Dipartimento di Scienze

Scuola Dottorale EDEMOM

European **D**octorate in **E**lectronic **M**aterials, **O**ptoelectronics and **M**icrosystems

XXVII Ciclo dottorale

Distribuzione di segnali di sincronizzazione per la Power Quality attraverso ponte radio Microwave.

Daniele TRINCA

Tutor

Prof. Maurizio Caciotta

Coordinatore

Prof. Giuseppe Schirripa Spagnolo

Roma, 31 Marzo 2016

A Sara e nostro figlio Alessandro

Abstract

La rete di monitoraggio della Power Quality (PQ) sui cui lavora il Laboratorio di Misure è costituita da siti di misura sul territorio di Roma, interconnessi ad un nodo centrale di raccolta del dato di PQ. Ogni postazione di monitoraggio è composta da trasduttori di tensione e corrente collegati ad un sistema di acquisizioni dati DAS ("Data Acquisition System"), che provvede a raccogliere ed elaborare i dati di PQ per poi trasmetterli al sistema di raccolta centralizzato tramite una connessione Internet. Un ricevitore GPS ("Global Positioning System") fornisce il *timestamp* riferito al tempo UTC ("Coordinated Universal Time") da associare ai dati acquisiti.

Le necessità di un siffatto sito di monitoraggio sono: la disponibilità di una connettività adeguata per il trasferimento dei dati e le operazioni di manutenzione remota, un segnale analogico PPS ("Pulse Per Second") per la sincronizzazione di fase del DAS, la marcatura temporale ed un segnale analogico a 2048 kHz per la generazione della frequenza di campionamento impiegata nel DAS; quest'ultimo segnale, in forma metrologicamente riferibile, è disponibile solamente nei siti ospitati da TIM ("Telecom Italia Mobile"): per questo il DAS è equipaggiato anche con un semplice oscillatore al quarzo che ne permette l'utilizzo anche in altri contesti, sebbene con un livello di accuratezza inferiore.

La disponibilità di una connettività dati rimane tuttavia una problematica importante, soprattutto nelle zone periferiche e rurali non ancora raggiunte dai servizi a banda larga (*broadband*); inoltre non è sempre possibile ricorrere all'impiego del GPS come sorgente di riferimento, sia per limitazioni ambientali alla piena visibilità del cielo, che per la suscettibilità al disturbo volontario ("jamming") ed involontario (interferenze). Pertanto, si è deciso di cercare una soluzione alternativa, o quanto meno di riserva, per portare a distanza ed in modo accurato i segnali di riferimento per il funzionamento del DAS. La scelta dell'impiego di un ponte radio per questo scopo è sembrata particolarmente adatta in quanto gode di tutti i vantaggi del trasporto "wireless", è un apparato di largo impiego nel settore delle telecomunicazioni ed è anche in grado di provvedere alla necessità di un collegamento dati robusto ed affidabile.

L'attuale tendenza a livello globale alla convergenza verso sistemi di trasporto dati basati sulle reti a pacchetto, ha indirizzato il mio interesse nei confronti delle due tecniche di sincronizzazione più evolute nel panorama delle reti Ethernet: il Synchronous Ethernet (o

SyncE) e lo standard IEEE 1588-2008 (noto anche come PTPv2, “Precision Time Protocol version 2”). Il primo è un metodo specifico per la distribuzione del *clock* ad elevata accuratezza, basato sulla trasmissione del riferimento di frequenza “in banda”, su flussi di dati sincroni; l’altro è specificamente progettato per trasferire in modo accurato l’informazione di fase e del “Time of Day” mediante uno scambio di messaggi tra orologi nel paradigma Master-Slave. Sebbene anche il PTPv2 sia impiegabile per trasferire un riferimento di frequenza, il SyncE è in grado di offrire un livello di accuratezza e stabilità superiori.

Queste due tecniche presentano peculiarità tra loro complementari che combinate in una soluzione “ibrida” possono essere impiegate per ottenere un riferimento di fase (PPS) con un livello di accuratezza che può avvicinarsi a quella ottenibile con un ricevitore GPS, oltre che un riferimento di frequenza molto stabile. Per di più, queste due tecnologie si sposano bene con i sistemi di collegamento radio Microwave: i ponti radio “hybrid” sono infatti in grado di trasportare contemporaneamente sul *frame radio* sia un riferimento di frequenza fisico, sia pacchetti di dati. Sfruttando opportunamente questa caratteristica, contestualmente all’impiego di tecniche di classificazione e priorizzazione del traffico (VLAN e QoS), è possibile garantire il servizio di sincronizzazione anche in condizioni radio avverse, dove le funzionalità di “Adaptive Modulation” e “Automatic Transmit Power Control” potrebbero costringere il ponte radio a lavorare in regime di capacità di banda minima. In effetti, considerato un collegamento punto-punto in tali condizioni e forzando il ponte ad operare con una modulazione minimale “QPSK Strong” a 50 Mbps, si è verificato che un'iniezione di traffico nel collegamento, crescente fino a saturare la banda a disposizione, non comporta sostanziali scostamenti del segnale PPS in uscita al nodo Slave a valle del collegamento stesso. Si è inoltre verificato che il riferimento di frequenza a 10 MHz ricostruito dallo Slave è ancora di qualità paragonabile alla sorgente di riferimento. Essendo i segnali analogici PPS e *clock* il reale oggetto d’interesse, si è scelto di valutare le prestazioni del sistema investigando sulle loro proprietà statistiche alle terminazioni di sorgente e di consegna della catena punto-punto. Le metriche scelte per la caratterizzazione del livello di qualità della sincronizzazione sono il “Time Interval Error” dei segnali ed i relativi indici statistici di: valore atteso, deviazione standard, valori massimo e minimo, ampiezza picco-picco.

Le verifiche di cui sopra sono state effettuate su un banco di test specificamente realizzato per lo scopo: due orologi SB-V01, rispettivamente in configurazione “Master” e “Slave”,

sono messi in comunicazione mediante un ponte radio Huawei OptiX RTN905 operante in guida d'onda a 23 GHz; i dati relativi ai segnali PPS e *clock* raccolti con un oscilloscopio USB della famiglia PicoScope, sono stati successivamente elaborati numericamente in *post-processing* mediante l'impiego di *script* in linguaggio Python 2.7, da me appositamente scritti per questo scopo.

Al fine di valutare i limiti d'impiego sul campo della soluzione proposta, si è proceduto inizialmente a stabilire l'effettiva affidabilità e stabilità di sincronizzazione di fase tra due generici ricevitori GPS come quelli ad esempio impiegabili per gli scopi di monitoraggio della Power Quality. Si è verificato che, operando essi sotto le medesime condizioni al contorno, al variare della disposizione della costellazione di satelliti in vista, la distanza tra i PPS dei ricevitori può raggiungere scostamenti fino ad 80 ns. Per questa verifica sono stati impiegati i soli due apparati disponibili dotati di ricevitore GPS: il SyncSwitch e lo SB-V01.

Con la tecnica ibrida PTPv2-SyncE applicata agli apparati SB-V01, che s'ipotizza impiegare a regime sul campo come Master e Slave, si è dimostrato invece che è possibile raggiungere una distanza stabile tra PPS attorno ai 77 ns ±2 ns per un collegamento radio di tipo P2P a singolo *hop*, dopo oltre 48h di collegamento.

Questa soluzione dunque si presenta come una possibile alternativa di *backup* alla comune sincronizzazione satellitare, in grado di portare ad una distanza di circa 10 km dalla sorgente di riferimento, sia segnali di fase e frequenza, un collegamento dati della capacità di alcune centinaia di Mbps, utile al trasferimento delle informazioni di Power Quality. Sebbene lo studio proposto supponga di trasportare con un singolo collegamento i segnali di sincronizzazione ed un canale dati da un sito provvisto di riferimenti primari verso un altro sito periferico, esso offre lo spunto per ipotizzare l'utilizzazione di più ponti radio in cascata. Con essi, operanti ad una frequenza di lavoro più bassa, è possibile coprire distanze nell'ordine delle decine di chilometri: in questo caso è importante caratterizzare l'intera catena ed adottare le strategie "on-path" per ridurre quanto più possibile il fenomeno della "Packet Delay Variation", rimanendo in un *time-budget* ancora accettabile per gli scopi della Power Quality.

Indice

ABSTRACT ..... **III**

INDICE ..... **VI**

INTRODUZIONE **10**

1. SINCRONIZZAZIONE DELLE RETI **12**

1.1 DAS PER LA POWER QUALITY 12

1.2 PACKET NETWORK: CONVERGENZA ED UNIFICAZIONE. 13

1.3 IMPORTANZA DELLA SINCRONIZZAZIONE 14

1.4 TEMPORIZZAZIONE E SINCRONIZZAZIONE 17

1.5 SINCRONIZZAZIONE NELLE RETI SONET/SDH 19

1.6 SINCRONIZZAZIONE NELLE RETI A PACCHETTO 22

2. SOLUZIONI PER LA SINCRONIZZAZIONE **25**

2.1 SINCRONIZZAZIONE SATELLITARE GNSS 25

2.1.1 Principi di funzionamento *25*

2.1.2 Vulnerabilità *30*

2.1.2.1 Livello di sistema. 30

2.1.2.2 Segmento utente. 31

2.1.2.3 Canale di propagazione. 32

2.1.2.4 Interferenze accidentali ed intenzionali. 33

2.2 IRIG TIME CODES 34

2.3 SYNCHRONOUS ETHERNET (SYNCE) 41

2.3.1 Architettura SyncE *41*

2.3.2 Ethernet Synchronization Messaging Channel (ESMC) *47*

2.4 NETWORK TIME PROTOCOL (NTP) 51

2.5 PRECISE TIME PROTOCOL (PTP, IEEE 1588) 59

2.5.1 Timestamping *63*

2.5.2 Meccanismo di sincronizzazione PTP *67*

2.5.3 Messaggistica PTP *72*

2.5.4 Formato messaggi PTP *78*

2.5.5 Grandmaster Clock *81*

2.5.6 Ordinary Clock *82*

2.5.7 Boundary Clock *82*

2.5.8 Transparent Clock *85*

2.5.9 Best Master Clock Algorithm *92*

2.5.10 Prestazioni e limitazioni del PTP *98*
2.5.11 Confronto tra NTP e PTP *99*
2.6 SINCRONIZZAZIONE IBRIDA (SYNCE+PTPV2) 102
2.7 STANDARD DI RIFERIMENTO 107
3. PARAMETRI E METRICHE DI PERFORMANCE 114
3.1 JITTER E WANDER 114
3.2 CLASSI DI JITTER 117
3.2.1 Periodic jitter *119*
3.2.2 Data dependent jitter *121*
3.2.3 Bounded uncorrelated jitter *125*
3.2.4 Random jitter *125*
3.2.5 Total jitter *126*
3.3 METRICHE DEL CLOCK 128
3.3.1 Period jitter *128*
3.3.2 Cycle to cycle jitter *130*
3.3.3 Long-term jitter *131*
3.3.4 Time Interval Error (TIE) *132*
3.3.5 Maximum Time Interval Error (MTIE) *137*
3.3.6 Time Deviation (TDEV) *140*
3.3.7 Unit Interval *141*
3.4 STRUMENTAZIONE DI MISURA DEL JITTER 143
3.4.1 BERT *143*
3.4.2 Jitter analyzer *144*
3.4.3 Time interval analyzer *144*
3.4.4 Analizzatori di spettro *145*
3.4.5 Oscilloscopi real-time *146*
3.5 PARAMETRI DI PERFORMANCE DELLE RETI PTP: PACKET DELAY VARIATION 147
4. LA SINCRONIZZAZIONE NELLE RETI ELETTRICHE 150
4.1 METODOLOGIE DI SINCRONIZZAZIONE 150
4.2 WIDE AREA MEASUREMENT SYSTEMS (WAMS) 153
4.3 SINCRONIZZAZIONE NEI SISTEMI DI MISURA DISTRIBUITI 154
4.4 SINCROFASORI PER SMART GRID 155
5. COLLEGAMENTI RADIO MICROWAVE 158

5.1 PONTI RADIO A MICROONDE 158
5.2 CARRIER ETHERNET 164
5.3 RUOLO DEI PONTI RADIO NEL CARRIER ETHERNET 165
5.4 TIPOLOGIE DI PONTE RADIO 170
5.4.1 Hybrid Microwave 170
5.4.2 Packet Microwave 171
5.5 TECNICHE DI TRASMISSIONE 172
5.5.1 Optimized Radio Transmission 172
5.5.2 Adaptive Modulation 172
5.5.3 Packet Quality of Service (QoS) 174
5.5.4 Service Aware Traffic Management 174
5.6 INCREMENTO DELLA CAPACITÀ DI CANALE 175
5.7 CONFIGURAZIONI AD ELEVATA AFFIDABILITÀ 177
5.8 TRASPORTO DELLA SINCRONIZZAZIONE 180
5.9 SUPPORTO FUNZIONALITÀ ON-PATH 183
5.10 OPERATIONS ADMINISTRATION & MAINTENANCE 184

6. BANCO DI PROVA 187

6.1 SCENARIO IPOTIZZATO 187
6.2 SISTEMA REALIZZATO PER LA SIMULAZIONE 189
6.3 SB-V01 194
6.4 UNITÀ DI ENERGIA 198
6.5 OPTIX RTN905 1A 201
6.5.1 IDU 905 201
6.5.2 ODU 204
6.5.2.1 Generalità 204
6.5.2.2 OptiX RTN 600 23G-HP 207
6.5.3 Funzionalità di sincronizzazione 208
6.5.3.1 Physical layer 209
6.5.3.2 Packet layer 211
6.5.3.3 Incapsulamento PTP 213
6.6 PRIORIZZAZIONE DEI FLUSSI DI DATI 214
6.6.1.1 Tipologie di porte VLAN 217
6.6.1.2 VLAN e QoS 219
6.7 SYNCSWITCH 220

7. SINCRONIZZAZIONE SU COLLEGAMENTO RADIO PUNTO-PUNTO 222

7.1 PERFORMANCE DI FASE TRA RICEVITORI GPS 223
7.2 PERFORMANCE DI FREQUENZA TRA RICEVITORI GPS 235
7.2.1 Caratterizzazione uscita 10 MHz SyncSwtich 237
7.2.2 Caratterizzazione uscita 10 MHz SBV01-GPS 240
7.3 PERFORMANCE DI FASE MEDIANTE PTPV2 (SB-V01GPS, SYNCSWITCH) 241
7.4 PERFORMANCE DI FASE MEDIANTE PTPV2 & SYNCE 244
7.4.1 Coppia apparati SyncSwitch e SBV01-GPS 244
7.4.2 Coppia apparati SB-V01GPS e SB-V01 246
7.5 ARCHITETTURA DEL COLLEGAMENTO PUNTO-PUNTO 250
7.5.1 Nodo Master 251
7.5.2 Nodo Slave 254
7.6 GENERAZIONE DEL TRAFFICO DATI 257
7.6.1 iPerf 257
7.6.2 D-ITG 259
7.6.3 Limiti di capacità del TCP 263
7.7 PERFORMANCE DI SINCRONIZZAZIONE SU COLLEGAMENTO PUNTO-PUNTO 266
7.7.1 Configurazione del collegamento Microwave 266
7.7.2 Sincronizzazione a piena banda disponibile 268
7.7.3 Sincronizzazione a pieno carico di traffico 270
7.7.4 Sintonizzazione a pieno carico di traffico 273

CONCLUSIONI 277

RINGRAZIAMENTI 279

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 280

ELENCO DELLE FIGURE 291

ELENCO DELLE TABELLE 297

ACRONIMI 299

Introduzione

Il laboratorio di “Misure Elettriche ed Elettroniche” del “Dipartimento di Scienze” di Roma Tre, nel corso degli ultimi anni, contestualmente alla ricerca sul tema della Power Quality ha dato inizio alla realizzazione di una rete di monitoraggio dell’energia elettrica su area metropolitana (di classe WAMS, “Wide Area Measurement System”), basata su siti di acquisizione ed elaborazione dati dislocati nella città di Roma.

Tali postazioni essendo asservite ad una metrologia ed un collegamento dati forniti da terze parti (TIM), trovano limitato impiego in quanto la qualità metrologica è assicurata solo nei siti dove sono disponibili questi servizi.

Al fine di svincolare la rete di monitoraggio da tali limitazioni, si è avviato uno studio volto alla ricerca di una soluzione per il trasporto “a distanza” della sincronizzazione di fase e frequenza, con un livello di accuratezza ancora idoneo agli scopi della Power Quality. La soluzione qui proposta, basata sull’impiego di uno o più ponti radio a microonde, offre operativamente i seguenti vantaggi:

- comunicazione “wireless”, che non presenta le complicazioni tipiche della stesura dei cavi;
- distanza di collegamento flessibile;
- costi relativamente accessibili (alcune migliaia di euro per *hop*[1]);
- piena compatibilità con le reti a pacchetto IP;
- trasporto dei dati e della sincronizzazione sullo stesso mezzo fisico;
- elevata diffusione del prodotto, grazie al suo largo impiego nel settore delle telecomunicazioni.

Fissato il mezzo di comunicazione con il quale trasportare la sincronizzazione, è stato necessario effettuare una ricerca delle tecniche di trasporto oggi disponibili che meglio possono adattarsi al mezzo scelto: tra queste spiccano lo standard IEEE1588-2008, noto anche sotto l’acronimo di come PTPv2 (“Precision Time Protocol version 2”) e “Synchronous Ethernet”, comunemente noto con l’abbreviazione “SyncE”. Questi due protocolli sono oggi

[1] Un hop è una porzione di path tra sorgente e destinazione; ogni volta che un pacchetto passa tra un dispositivo di rete (router o switch) ed il successivo si verifica un hop.

le tecniche più moderne ed accurate rispettivamente per il trasporto della sintonizzazione e della sincronizzazione sulle reti Ethernet, ed insieme rappresentano le basi su cui è stato costruito il sistema di sincronizzazione "White Rabbit" [1], impiegato presso il "Large Hardon Collider" (LHC) del CERN ("Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire") di Ginevra, che è in grado di raggiungere accuratezze temporali inferiori al nanosecondo, grazie a particolari accorgimenti e perfezionamenti tecnici.

Con il seguente lavoro s'intende dunque valutare l'adeguatezza del livello di accuratezza di sincronizzazione (in fase e frequenza) per lo studio dei fenomeni di PQ, raggiungibile sfruttando un ponte radio "Carrier Grade" e la combinazione delle tecniche di trasporto PTP e SyncE, in luogo di una soluzione basata interamente su GPS. Sebbene parte dell'accuratezza raggiungibile sia dipendente dalle prestazioni degli apparati impiegati, il processo di valutazione proposto può considerarsi ancora riutilizzabile per la validazione di una catena di trasporto più complessa e composta da modelli di apparato e costruttore diversi. Fissato lo scopo e gli obiettivi della ricerca, scaturiti dall'esperienza sul campo del Laboratorio di Misure di Roma, si è ritenuto di avviare l'approfondimento teorico iniziale dalla reti a commutazione di pacchetto, in contrapposizione alle reti a commutazione di circuito, giustificando l'interesse verso le prime con il ruolo di elemento unificante che hanno assunto negli ultimi anni.

1. Sincronizzazione delle reti

Di seguito, partendo dalla descrizione di un sito di misura per la PQ e dalla relativa esperienza maturata dal Laboratorio di Misure di Roma ed alla luce dell'esperienza acquisita nel settore delle telecomunicazioni mobili, si esaminerà la tendenza registrata dai mercati alla convergenza ed all'unificazione verso le reti a pacchetti.

1.1 DAS per la Power Quality

La rete di monitoraggio dell'energia elettrica su area metropolitana realizzata dal Laboratorio di Misure Elettriche ed Elettroniche del Dipartimento di Scienze di Roma Tre, nel corso degli ultimi anni, è costituita da siti di acquisizione ed elaborazione dati dislocati nella città di Roma. Ciascuna postazione acquisisce le informazioni di tensione e corrente facendo uso di un personal computer dotato di una scheda di acquisizione dati (DAS, "Data Acquisition System") USB ("Universal Serial Bus") [2] progettata dallo stesso gruppo di lavoro. Affinché i *set* di dati acquisiti nelle diverse postazioni risultino temporalmente confrontabili, l'istante di acquisizione è guidato dal segnale PPS ottenuto da un ricevitore satellitare GPS ("Global Position System"); ciò conferisce al sistema un'elevata accuratezza migliore di 100 ns in termini di fase per l'operazione di conversione analogico digitale dei segnali, e ne permette una riferibilità metrologica indiretta. Per quanto riguarda invece la frequenza di campionamento con cui opera il DAS, questa è ricavata come sottomultiplo di un riferimento a 2048 kHz metrologicamente riferibile [3] e disponibile nei siti di monitoraggio ospitati da "Telecom Italia" (recentemente confluita in TIM [4]), mentre ci si affida ad un semplice oscillatore al quarzo altrove. I dati così acquisiti infine vengono trasmessi ad un server di raccolta centralizzato [5] mediante un collegamento dati, solitamente una linea ADSL disponibile presso gli stessi siti Telecom Italia (Figura 1-1 [5]).

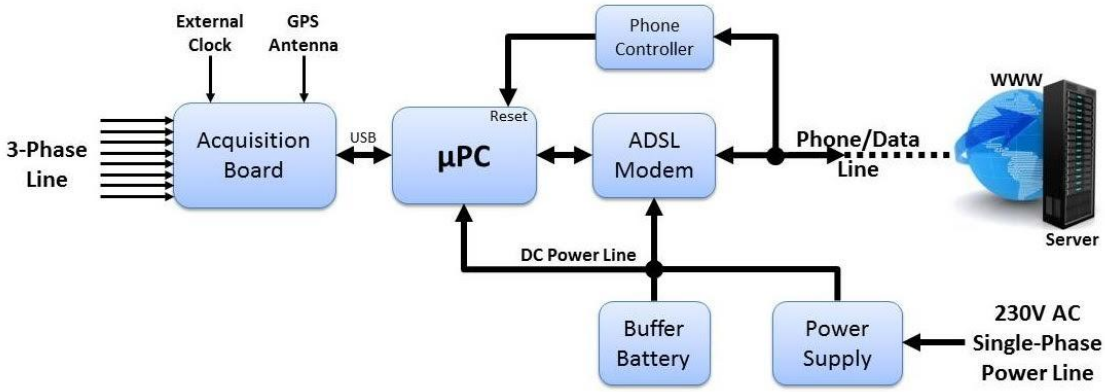


Figura 1-1 Architettura sito di monitoraggio per la Power Quality

1.2 Packet Network: convergenza ed unificazione.

Da alcuni anni a questa parte, a seguito di un'eccezionale aumento degli abbonamenti ai servizi dati mobili e al crescente consumo di banda, gli operatori di telecomunicazioni stanno affrontando un continuo processo di aggiornamento della loro infrastruttura di *backhaul*, ovvero della porzione di rete tra le stazioni radio base ed i relativi controllori. Essa infatti, qualora risulti di capacità insufficiente a supportare la crescita del traffico, rischia di diventare il collo di bottiglia della rete mobile.

Il desiderio da parte degli operatori di ridurre i costi d'installazione e di distribuzione del traffico, ha guidato il processo di aggiornamento delle reti di dati verso l'abbandono dei tradizionali collegamenti a commutazione di circuito ("Circuit-Switched", CS) E1/T1 a favore dei più vantaggiosi collegamenti a commutazione di pacchetto ("Packet-Switched", PS) denominati anche "Next Generation Networks" (NGN): "IP Carrier Ethernet" [6] [7] gioca un ruolo importante in questo tentativo di convergenza tra differenti generazioni tecnologiche verso piattaforme di rete unificate. La migrazione verso le reti "a pacchetto" ("Packet-Networks") permette infatti di avere un'infrastruttura più flessibile che risponde pienamente alla necessità di scalabilità, supportando contemporaneamente la convergenza delle reti fissa e mobile secondo il paradigma "*any radio over any media*" [8]. Tuttavia l'Ethernet non è stato inizialmente pensato per il trasporto della sincronizzazione che invece i sistemi radiomobili necessitano: le reti cellulari "Frequency Division Duplexing" (FDD) richiedono sintonizzazione in frequenza per preservare l'integrità della connessione, mentre i sistemi

"Time Division Duplexing" (TDD) o "Time Division Multiple Access" (TDMA) necessitano di sincronizzazione temporale per garantire la capacità di banda e ridurre i fenomeni interferenziali. L'originaria inadeguatezza delle reti a pacchetto al supporto di livelli di sincronizzazione inferiori al microsecondo deriva dalla possibilità dei pacchetti stessi di seguire percorsi diversi tra origine e destinazione, nonché dall'impiego della ritrasmissione di tutti quei pacchetti andati persi o corrotti. Queste eventualità influiscono sull'ordine di arrivo dei pacchetti che potrebbe non rispecchiare necessariamente quello di partenza, conferendo alle reti a pacchetto l'attributo di "reti non deterministiche".

Contestualmente alla migrazione delle reti di telecomunicazioni verso le tecniche di commutazione di pacchetto, anche altre reti dei servizi come quelle dell'energia elettrica stanno parallelamente attraversando una fase di profonda trasformazione: le reti elettriche "Smart Grid" hanno dato un'importante spinta all'impiego di reti di trasporto dati IP/Ethernet in sostituzione alle precedenti infrastrutture sincrone SDH ("Synchronous Digital Hierarchy") e SONET ("Synchronous Optical NETworking") nella gestione degli impianti. Le reti a pacchetto Ethernet assicurano infatti una capacità di trasporto più adatta all'elevato scambio dati delle reti elettriche intelligenti, ad un costo operativo (OpEx[2]) ridotto. Lo standard IEC 61850 ("Communication Networks and Systems in Substations"), i sistemi IP SCADA (conosciuti anche come Ethernet "Supervisory Control and Data Acquisition"), le misure dei sincrofasori ed il monitoraggio in punti diversi della rete di distribuzione (WASA, "Wide Area Situational Awareness" [9]) sono tutti esempi di applicazioni per reti di trasporto e distribuzione elettriche che necessitano dell'impiego di una rete a pacchetti Ethernet.

Poiché le reti di dati Ethernet sono per loro natura asincrone, senza opportuni accorgimenti non sono in grado di supportare le applicazioni di telecomunicazione tradizionali; lo sono invece le reti a commutazione di pacchetto (CS) e il *wireless backhauling* che, rappresentato dai ponti radio, sarà in parte oggetto di questo studio.

1.3 Importanza della sincronizzazione

L'accuratezza necessaria alla sincronizzazione di un orologio è dipendente dal tipo di applicazione a cui esso è destinato.

[2] La spesa operativa od OpEx (dal termine inglese "Operating Expense") è il costo necessario per gestire un sistema; la sua controparte, la spesa di capitale o CapEx ("Capital Expenditure"), è il costo per sviluppare o fornire asset durevoli per il sistema. - http://argomenti.ilsole24ore.com/

Un sistema temporale è "implicito" quando il comportamento temporale è determinato da processi, come per esempio trigger software o hardware. Il sistema temporale è "esplicito" quando invece è rappresentato da un orologio, come spesso avviene nei sistemi complessi.

Tuttavia gli orologi per loro natura non sono esatti: è necessario pertanto verificare quando è tollerabile la loro deviazione rispetto ad un sistema considerato di riferimento, e quando invece procedere ad una correzione.

Nel caso ideale, un orologio C_t perfetto opera ad un ritmo costante ed è in grado di riportare il tempo "vero" ad ogni istante di tempo t:

$$C_t(t) = t$$

Per orologi operanti alla stessa frequenza, l'operazione di riallineamento temporale consiste nella correzione dell'*offset* dell'orologio meno accurato rispetto a quello più accurato; nel caso di orologi reali si aggiunge anche la componente di *drift* frequenziale, dovuta al fatto che gli orologi non operano tutti esattamente alla stessa velocità: in questo caso la velocità dell'orologio meno accurato deve essere costantemente regolata ("rate correction") per seguire quella dell'orologio più accurato.

Gli orologi reali non riportano il tempo "vero": infatti dati due clock reali C_a e C_b è possibile definire l'offset come la differenza istantanea tra la lettura dell'orologio e il tempo "vero". L'offset di C_a è dunque:

$$offset_a = (C_a(t) - t)$$

Mentre l'offset relativo dell'orologio C_b rispetto a C_a al generico istante $t \geq 0$ è dato da

$$offset_{b,a} = C_b(t) - C_a(t)$$

La frequenza dell'orologio è riferita alla velocità alla quale l'orologio procede nel conteggio degli istanti che per C_a all'istante t è $C'_a(t)$. Ora se $C'_a(t) > 1$, allora C_a procede ad un ritmo più veloce dell'orologio ideale C_t, mentre se $C'_a(t) < 1$, C_a è più lento di C_t. La differenza tra l'istante atteso di *clock* ed il *clock* effettivo, detta "clock skew", è allora:

$$C_{a_skew} = C_a(t) - 1$$

Mentre il *clock skew* relativo dell'orologio C_b rispetto a C_a è

$$C_{b,a_skew} = C_b(t) - C_a(t)$$

Inoltre è necessario tenere conto che la deriva (*drift*) in frequenza degli orologi è spesso dipendente dalle variazioni della temperatura di esercizio e dell'invecchiamento degli oscillatori.

I campi applicativi della sincronizzazione sono variegati, i più comuni sono:

- transazioni economiche telematiche, come l'*online banking*, l'acquisto di beni e servizi online, tariffazione di servizi a consumo;
- acquisizione dati distribuita, ovvero sistemi di misura distribuiti sul territorio come le reti per il monitoraggio sismico ed ambientale;
- sistemi di controllo distribuiti e sincronizzazione di attuatori, come sistemi di gestione delle reti elettriche e degli impianti a turbina;
- processi di automazione industriale come stampa offset, la produzione della carta ed il confezionamento di prodotti;
- sistemi di telecomunicazioni con accesso a divisione di tempo (TDD).

Nella Tabella 1-1 sono riportati alcuni esempi di requisiti di accuratezza per diversi ambiti applicativi [10].

Tabella 1-1 Requisiti di accuratezza di fase per ambito applicativo

Livello di accuratezza	Requisiti	Applicazione
1	1ms – 500ms	Fatturazione, transazioni
2	5µs - 100µs	IP Delay monitoring
3	1.5µs - 5µs	LTE TDD (large cell)
4	1µs – 1.5µs	LTE TDD (small cell)
5	<1µs	WiMAX TDD (configurazioni specifiche)
6	500ns – 1000ns	LTE-A (per specifiche funzionalità)

Architetture di sincronizzazione distribuita (SDA, "Synchronization Distribution Architecture") basate su approccio gerarchico [11] vengono generalmente impiegate per distribuire la temporizzazione da un riferimento principale (PRMC, "Primary Reference Master Clock") a più apparati "slave" di una catena.

1.4 Temporizzazione e sincronizzazione

La sincronizzazione di una rete implica sia la sincronizzazione in frequenza che quella temporale, quest'ultima chiamata anche "sincronizzazione di fase". Il termine "timing" (termine anglofono che indica la temporizzazione) è storicamente associato alle interfacce di trasporto Time-Division Multiplexed (TDM)[3] operanti su strato fisico SDH/SONET dove gli elementi di rete (da qui NE, "Network Elements") vengono tra loro sincronizzati attraverso una sorgente di riferimento BITS ("Building Integrated Timing Supply"); più precisamente, il termine descrittivo di questa operazione di allineamento temporale è la "sincronizzazione", poiché veniva utilizzato un riferimento in frequenza per stabilizzare le apparecchiature di trasmissione attraverso uno o più siti. Infatti il "timing", comunemente riferito

[3] ITU-T G.823/824/825 definiscono le raccomandazioni per le reti TDM.

ad un preciso evento “timestamp”, è un metodo d’identificazione e distribuzione di un preciso istante nel tempo.

A differenza dalle applicazioni su reti fisse TDM, nelle comunicazioni mobili (“wireless”) il *clock* deve essere riferito al clock radio della “stazione radio base” (BTS, “Base Transceiver Station”), che deve sottostare a requisiti di sintonizzazione più stringenti per evitare l’interruzione del servizio, ad esempio nelle fasi di cambio cella dei terminali.

In alcuni casi, come nell’impiego di *gateway* Voice-over-IP (VoIP Gateway) nelle reti TDM, sono necessarie entrambe sincronizzazione e temporizzazione, quest’ultima in particolare per ottenere un accurata marchiatura temporale (*timestamping*) lato IP, ad esempio attraverso l’impiego di sincronizzazione di rete NTP (“Network Time Protocol”).

Nell’architettura TDM la sincronizzazione in frequenza (Figura 1-2), o sincronizzazione di clock, è volta a garantire che tutti i dispositivi sulla rete di comunicazione lavorino allo stesso ritmo temporale: l’informazione è codificata in impulsi discreti PCM (“Pulse Code Modulation”) e trasmessa sulla rete. Infatti, se due clock di riferimento sono differenti oppure viene aggiunta una deriva di fase (“clock drift”) al flusso di dati digitali (“bit stream”) trasmessi tra due dispositivi, i bit nel buffer di un sistema di commutazione potrebbero andare persi o duplicati (condizioni di “underflow” ed “overflow”), con conseguenze conosciute come “bit slip”.

La sincronizzazione temporale (Figura 1-3) serve per regolare l’oscillatore locale del dispositivo secondo l’informazione di tempo ricevuta; alla fase regolata del clock, viene assegnato un istante temporale rappresentato da un valore numerico. Anche se questo processo regola entrambe frequenza e fase del clock, differisce dalla sincronizzazione in frequenza [12] in quanto il clock viene aggiustato in modo discontinuo poiché la stessa informazione di tempo ricevuta è discontinua. Il processo di sincronizzazione temporale implica due principali funzionalità: “time service” e “time keeping”. Il primo serve a correggere l’orologio secondo l’orario standard, consentendo al dispositivo di sincronizzare la sua fase con quella del riferimento, anche se ad intervalli irregolari. Il *time keeping* invece è un’operazione di sintonizzazione che si occupa di garantire che la differenza di tempo tra il dispositivo locale ed il riferimento temporale cada all’interno di un intervallo di tempo ragionevole durante il processo di riallineamento temporale.

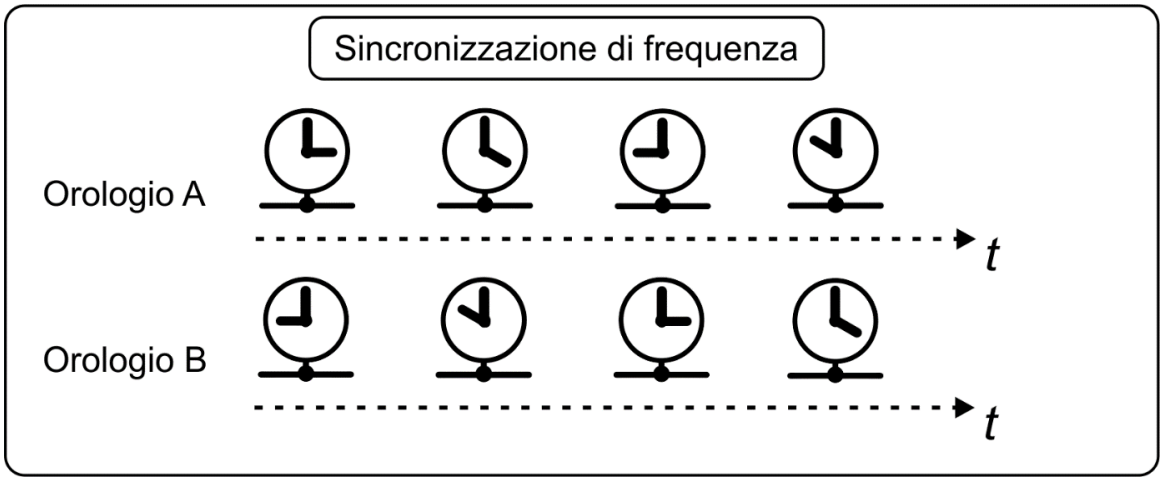


Figura 1-2 Esempio di sincronizzazione di frequenza

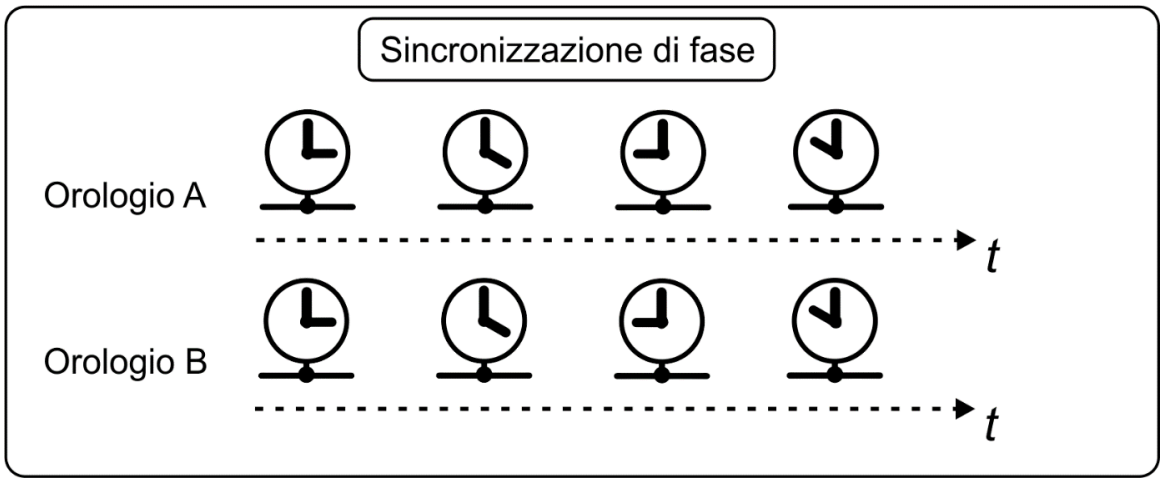


Figura 1-3 Esempio di sincronizzazione di fase

1.5 Sincronizzazione nelle reti SONET/SDH

Le reti di dati basate sulla tecnica di accesso TDM, come le reti SONET/SDH o PDH ("Plesiochronous Digital Hierarchy"), per un trasferimento efficiente delle informazioni, richiedono una precisa sincronizzazione in frequenza (o sintonizzazione) presso ognuna delle interfacce dati connesse, che altrimenti risulterebbero altamente instabili, o peggio, potrebbero non funzionare. Un esempio di sincronizzazione tra due elementi di rete ("Network Elements", NE) SONET/SDH è mostrato nella Figura 1-4 [13].

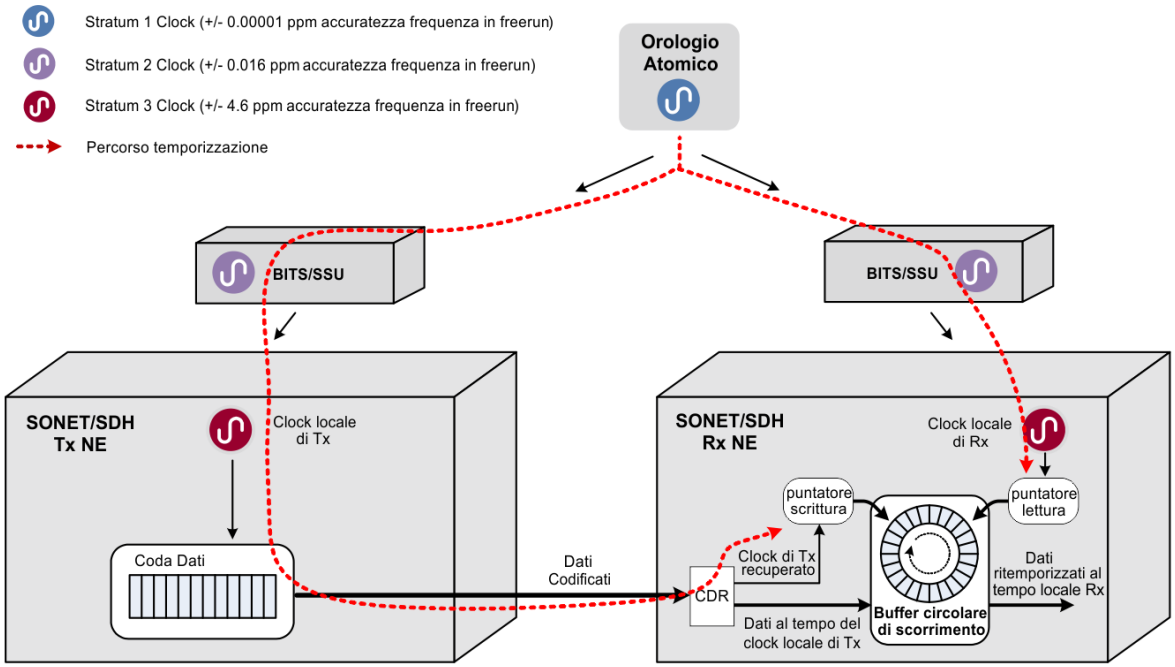


Figura 1-4 Esempio di sincronizzazione di reti SONET/SDH

Entrambi i NE trasmettitore “Tx NE” e ricevente “Rx NE”, lavorano alle frequenze di clock locale che sono tra loro sincronizzate alla stessa frequenza della sorgente di rifermento primaria, secondo uno schema gerarchico suddiviso in categorie discrete dette “*stratum*” (Figura 1-5) [14], ovverosia identificate in base al livello di accuratezza del riferimento di frequenza distribuito. La gerarchia comincia con un “Primary Reference Source” (PRS), il più elevato livello di accuratezza: un orologio atomico definito “stratum 1” a cui corrisponde un’accuratezza di ±0,00001 ppm quando l’orologio è “*free-run*”. Quest’accuratezza viene propagata agli orologi “stratum 2” installati nei BITS (“Building Integrated Timing Supply”) che hanno un’accuratezza di ±0,016 ppm in “*free-run*” e che forniranno a loro volta il riferimento di frequenza a tutti i gli oscillatori locali dei NE dello “stratum 3” (generalmente ±4,6 ppm in “*free-run*”). La tracciabilità verso lo “stratum 1” si ottiene quando tutti gli orologi afferenti al percorso temporale (“*timing-path*”) sono tra loro sincronizzati, avendo ciascun NE recuperato il riferimento temporale dalla sua sorgente; ogni NE, quando sincronizzato, può essere a sua volta una sorgente temporale per altri elementi di rete.

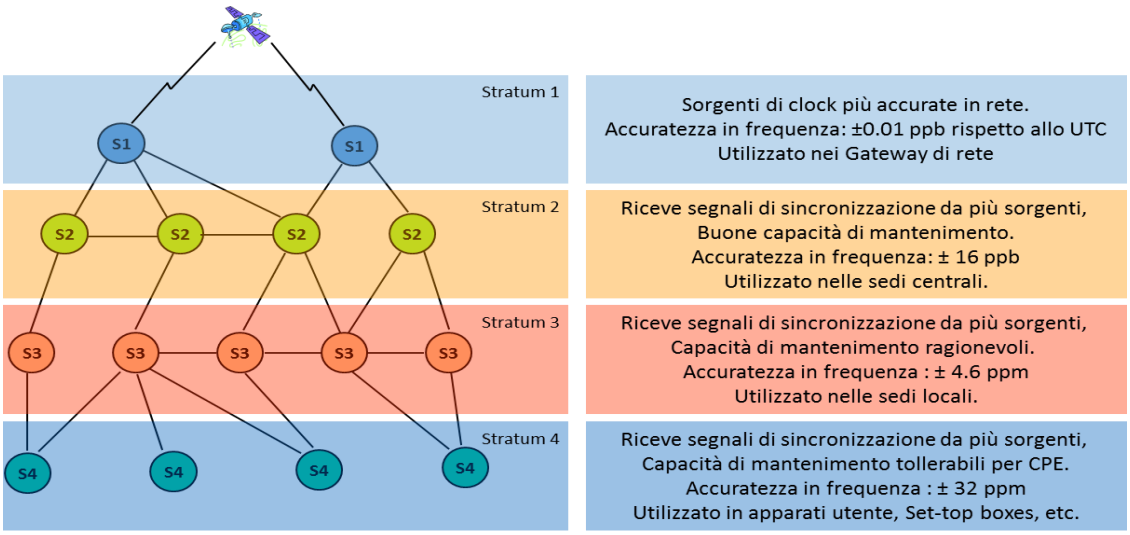


Figura 1-5 Schema gerarchico di tracciabilità a *"stratum"*

Le modalità di trasmissione del clock sono la "*external timing clock distribution*" e "*line timing distribution*", la cui differenza è mostrata intuitivamente nella Figura 1-6 [13] [14].

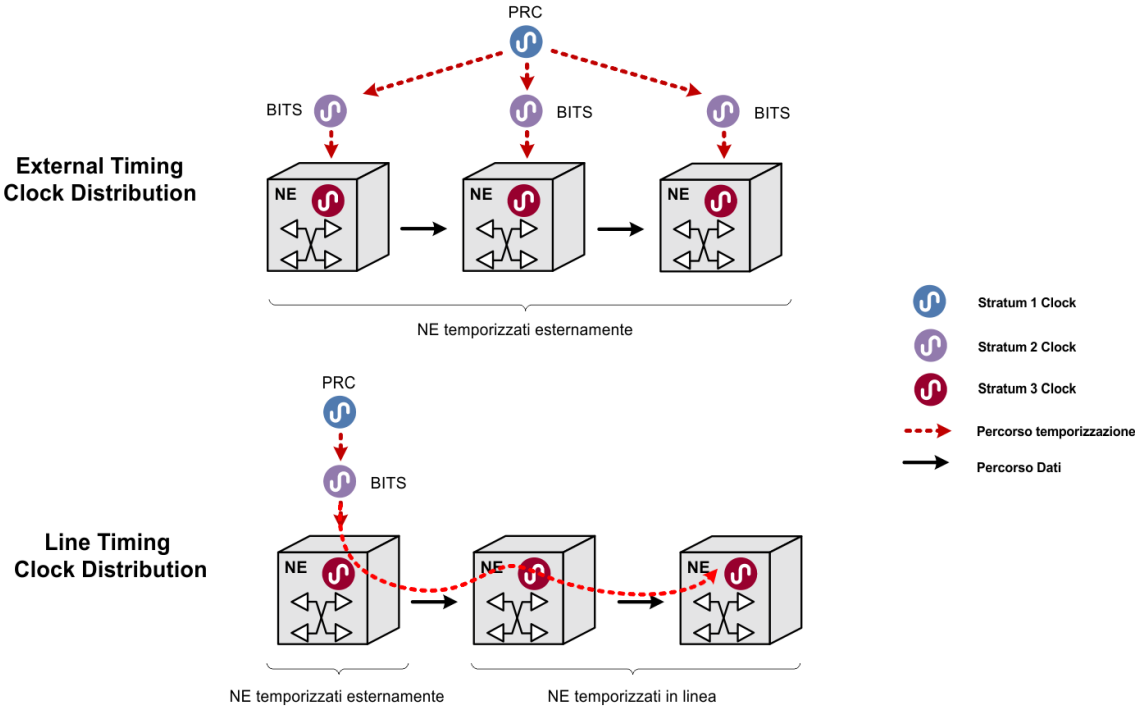


Figura 1-6 Timing Clock Distribution: differenza tra "External" e "Line"

Il principio di distribuzione della frequenza denominata “line timing distribution” è utilizzato alla stessa maniera nella distribuzione della sintonizzazione attraverso le reti a pacchetto che utilizzano la metodologia denominata “Synchronous Ethernet” (SyncE) descritta più avanti.

La corrispondenza tra i NE delle reti SDH e SONET è mostrata nella Figura 1-7 sotto [14].

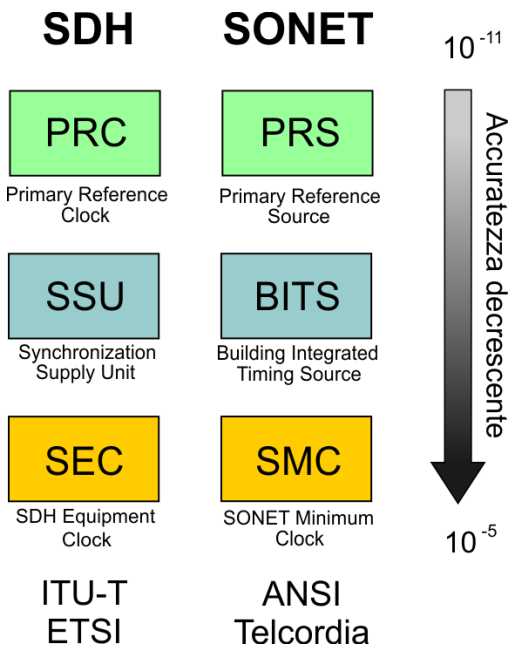


Figura 1-7 Corrispondenza tra Network Elements tra reti SDH e SONET

1.6 Sincronizzazione nelle reti a pacchetto

Le reti a pacchetto Ethernet sono originariamente asincrone e non sono in grado di trasferire dati tra due nodi con un’accuratezza di frequenza migliore delle reti TDM. Infatti, invece di utilizzare un buffer circolare per risolvere le differenze in frequenza tra nodi, utilizzano al ricevitore un buffer più ampio dotato di meccanismi per il controllo di flusso (“flow control”) per prevenire fenomeni di “overflow” ed “underflow”; ciò permette l’impiego di clock a più bassa accuratezza corrispondente a ±100 ppm in “free-run”, come mostrato sotto in Figura 1-8 [13].

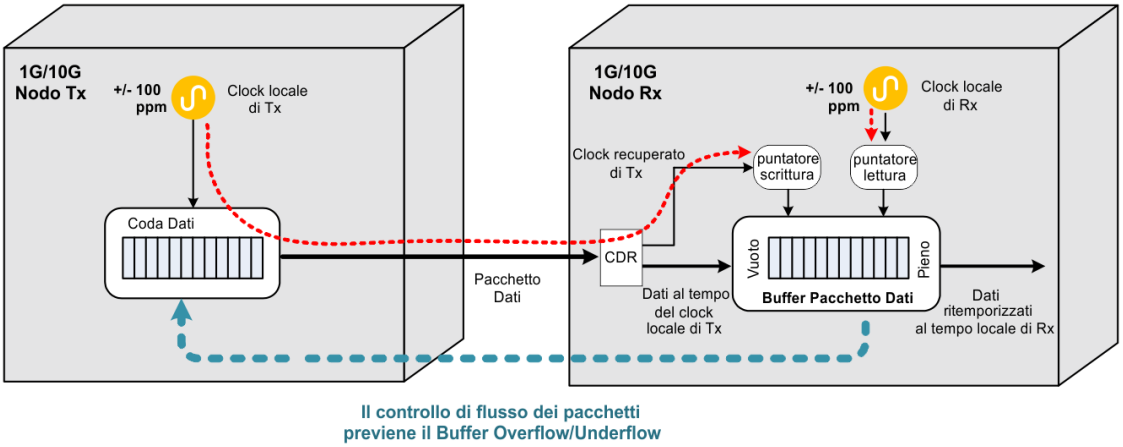


Figura 1-8 Controllo di flusso nelle reti a pacchetto

Tuttavia senza una sincronizzazione in frequenza le reti a pacchetto non sono in grado di trasferire dati alle reti TDM, poiché queste necessitano di un ritmo di trasferimento dati riferibile ad un orologio di classe "stratum 1", senza il quale si verificherebbero fenomeni di slittamento dei dati ("*data slip*" o "*bit slip*") alle interfacce TDM; inoltre le reti a pacchetto asincrone (Figura 1-9) non sarebbero in grado di trasferire informazioni dettagliate di tempo e frequenza alle stazioni radio base (BTS) per i servizi mobili [15].

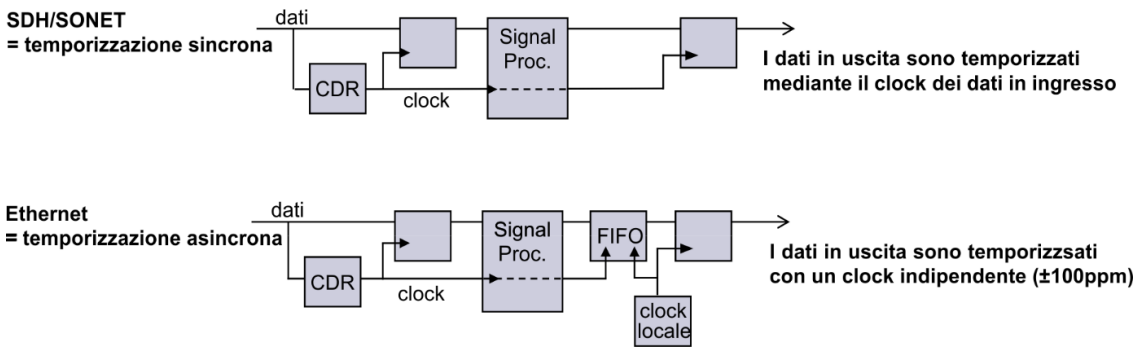


Figura 1-9 Temporizzazioni sincrone e asincrone

Sebbene una soluzione possa essere l'aggiunta di un BITS riferibile ad un orologio "stratum 1" per ogni nodo TDM da servire, questo risulterebbe proibitivo in termini di costo. Per questo motivo l'ITU (International Telecommunication Union) ha identificato due possibili metodologie per la distribuzione della sincronizzazione lungo le reti a pacchetti:

- Synchronous Ethernet (o SyncE), metodo basato sulla distribuzione del clock a livello fisico secondo il concetto del “line timing”;

- Precision Time Protocol (o PTP), protocollo standardizzato dalla IEEE[4] ed universalmente adottato nella distribuzione della sincronizzazione di tempo e frequenza nelle reti di telecomunicazioni.

Entrambe le soluzioni sono specificate nello standard ITU-T G.8261.

[4] L’ultima versione dello standard è il IEEE 1588-2008, noto anche come PTPv2

2. Soluzioni per la sincronizzazione

Questo capitolo esamina lo stato dell'arte delle moderne tecniche di sincronizzazione. Verranno in primo luogo considerati i metodi basati su sistemi di localizzazione satellitare, molto accurati e relativamente economici, ma soggetti a potenziali vulnerabilità spesso non prese seriamente in considerazione.

L'attenzione sarà successivamente spostata sui sistemi di sincronizzazione "fisici" come l'IRIG, che nella sua versione "B" ha trovato impiego nelle sottostazioni di distribuzione dell'energia elettrica, ed il "Synchronous Ethernet" (SyncE) d'impiego per il trasferimento del riferimento di frequenza nelle reti di telecomunicazioni.

Si passerà infine ad introdurre le tecniche di sincronizzazione a pacchetti, ovvero i protocolli NTP e PTP, dedicando particolare attenzione a quest'ultimo poiché in grado di offrire prestazioni di sincronizzazione più spinte. Un paragrafo a parte è poi dedicato alla soluzione "ibrida" che vede il SyncE ed il PTP utilizzati in modo sinergico per raggiungere le prestazioni più accurate di fase e frequenza di quelle ottenibili con il solo PTP: questa combinazione è la soluzione di sincronizzazione scelta in questo lavoro per essere trasportata su ponte radio.

Il capitolo si chiude in fine con una rassegna dei principali standard ed organi normativi riguardanti gli aspetti della sincronizzazione.

2.1 Sincronizzazione satellitare GNSS

2.1.1 Principi di funzionamento

I sistemi di posizionamento satellitare sono oggigiorno ampiamente diffusi in dispositivi di utilizzo quotidiano e giocano un ruolo chiave nell'evoluzione scientifica e tecnologica; basti pensare all'impiego dei sistemi di posizionamento satellitare per la navigazione, ed in generale ai terminali mobili (smartphone, tablet, ecc.) che utilizzano la localizzazione per erogare servizi sempre più evoluti. I sistemi satellitari GNSS ("Global Navigation Satellite System"), di cui il NAVSTAR-GPS ("NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System") è il più conosciuto ed usato nel mondo, godono di una caratteristica che li rende particolarmente adatti al loro impiego nel campo della sincronizzazione, cioè

quella di accurato riferimento temporale disponibile a livello globale e, di norma, gratuito. È possibile infatti ottenere un segnale di clock temporalmente sincronizzato con un'accuratezza che può raggiungere le decine di nanosecondi in quasi ogni punto della Terra. I dispositivi "al suolo" in grado di fruire del servizio di localizzazione satellitare permettono la conoscenza, con buon livello di accuratezza, delle informazioni di posizione geografica, altitudine rispetto al livello del mare e di un segnale di sincronizzazione riferibile al "Coordinated Universal Time" (UTC). Le applicazioni che ne derivano, sono molteplici sia in campo militare che civile, tra le quali [16]:

- sincronizzazione delle reti di comunicazione, sia fisse che mobili;
- localizzazione di mezzi di trasporto a terra, in mare o in volo;
- operazioni di salvataggio ed e assistenza/sorveglianza medica;
- sistemi di sicurezza, per la sorveglianza di persone/mezzi e servizi di protezione.

Il principio di funzionamento della localizzazione satellitare è in generale basato sulla misurazione e la comparazione del tempo di propagazione di segnali trasmessi da più satelliti e decodificati dai ricevitori terrestri. Ogni satellite è equipaggiato con orologi atomici ad elevata accuratezza, continuamente monitorati e corretti da stazioni di controllo a terra per compensare gli effetti relativistici[5] a cui sono soggetti. Il segnale tramesso con continuità da ciascun satellite contiene l'istante di tempo in cui esso è stato trasmesso, oltre ad altre informazioni utili codificate (stato del satellite, orbita, ecc.); il ricevitore terrestre è in grado di stimare il tempo di propagazione del segnale come differenza tra l'istante in cui il segnale è stato ricevuto e quello in cui è stato trasmesso, contenuto nella codifica dal segnale stesso. È possibile dunque stimare la distanza di ciascun satellite dal ricevitore sfruttando la conoscenza della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche. L'insieme dei punti equidistanti dalla posizione del satellite ha la forma di una sfera la cui intersezione con la superficie terrestre è in buona approssimazione una circonferenza (Figura 2-1). Nella situazione reale di 3 satelliti, l'intersezione delle 3 sfere disegna in generale un triangolo la cui area è proporzionale al livello d'incertezza della stima tra il ricevitore ed i satelliti stessi

[5] Il tempo sul satellite accelera di circa 38 microsecondi al giorno: senza queste correzioni genererebbe errori di posizione dell'ordine dei chilometri su un solo giorno di utilizzo.

[17]; di conseguenza, per ridurre l'incertezza vengono utilizzati 4 o più satelliti al fine di ottenere la posizione ed orario esatti, risolvendo un sistema di equazioni in 4 incognite: latitudine, longitudine, altitudine e segnale orario. Ogni ricevitore effettua delle continue correzioni al suo oscillatore interno per riallinearlo al clock dei satelliti, risultando quindi in un elevato livello di sincronizzazione.

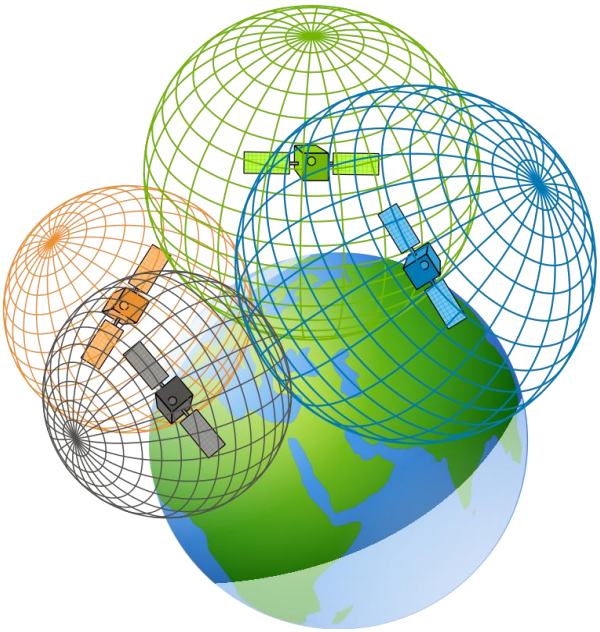


Figura 2-1 Geolocalizzazione satellitare GPS [18]

Lo statunitense GPS ("Global Positioning System") è stato sviluppato nel 1973 dal Dipartimento della Difesa statunitense (USDOD) guidato dalle necessità militari di superare durante della Guerra Fredda i limiti dei precedenti sistemi di navigazione; è operativo dal 1978 [19] ed è stato nel periodo tra il 1994 ed il 2008 l'unico sistema di navigazione satellitare pienamente funzionante e disponibile per tutto il mondo.

Il sistema di posizionamento si compone di tre blocchi: il segmento spaziale ("Space Segment"), il segmento di controllo ("Control Segment") ed il segmento utente ("User Segment").

Il segmento spaziale ("Space Segment") consiste in una costellazione di 31 satelliti GPS (più 3 di attivabili all'occorrenza) orbitanti attorno alla terra in un orbita media di circa 20.200 km dalla superfice terrestre; il sistema è stato progettato per assicurare la disponibilità

di almeno 24 satelliti per il 95% del tempo. I satelliti sono equipaggiati con orologi atomici in grado di produrre la frequenza fondamentale di 10.23 MHz e trasmettono i dati attraverso due portanti in banda L1 a 1575.42 MHz e L2 a 1227.60 MHz, create moltiplicando la frequenza fondamentale per i multipli interi, rispettivamente 154 e 120: utilizzando due frequenze distinte, il ricevitore GPS a terra può misurare la deviazione dei tempi di propagazione del segnale GPS, così da poter scartare il rumore di misura causato dalla propagazione nella ionosfera. Vengono trasmessi tre tipi di codici a queste frequenze: "Navigation Message", "Course Acquisition" (C/A) e "Precise" (P); i dati generati sono moltiplicati per delle sequenze pseudo-casuali di Gold le cui proprietà statistiche semplificano la ricostruzione del segnale a terra. Il segnale periodico C/A è trasmesso su L1 (

Figura 2-2) ogni 1 ms a 1.023 Mbps e contiene l'istante al quale il segnale è stato trasmesso; il codice "P" è trasmesso sia su L1 che L2 e contiene un informazione 10 volte più precisa di C/A, ma il codice è crittato per consentirne l'uso solo ai fini militari. Il "Navigation Message" contiene invece la posizione corrente del satellite, l'almanacco degli altri satelliti e le informazioni per la correzione del clock del satellite; è trasmesso sul canale L1 a bassa velocità (50 bps) per permettere ai ricevitori GPS appena avviati di aggiornare il loro almanacco eventualmente non valido [20].

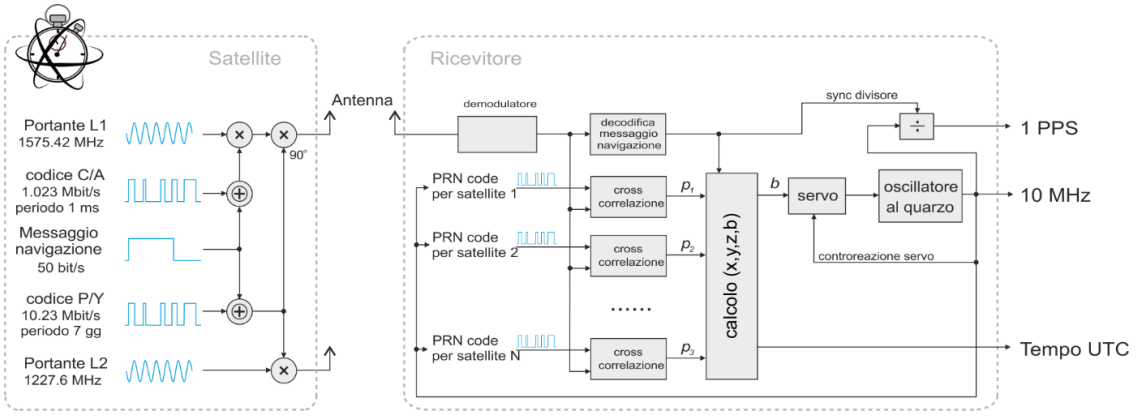


Figura 2-2 Schema di funzionamento del GPS

Il segmento di controllo ("Control Segment") è una rete a terra che traccia periodicamente le unità GPS calcolandone la posizione corrente e ne monitora le trasmissioni, supervisiona gli orologi a bordo e invia eventuali correzioni, cosicché ciascun satellite possa stimare la sua posizione corrente con buona precisione. La rete è costituita da un centro principale di

controllo, situato in Colorado, 1 centro di controllo alternativo, 12 antenne per il comando e controllo, 16 siti di monitoraggio (Figura 2-3) [21].

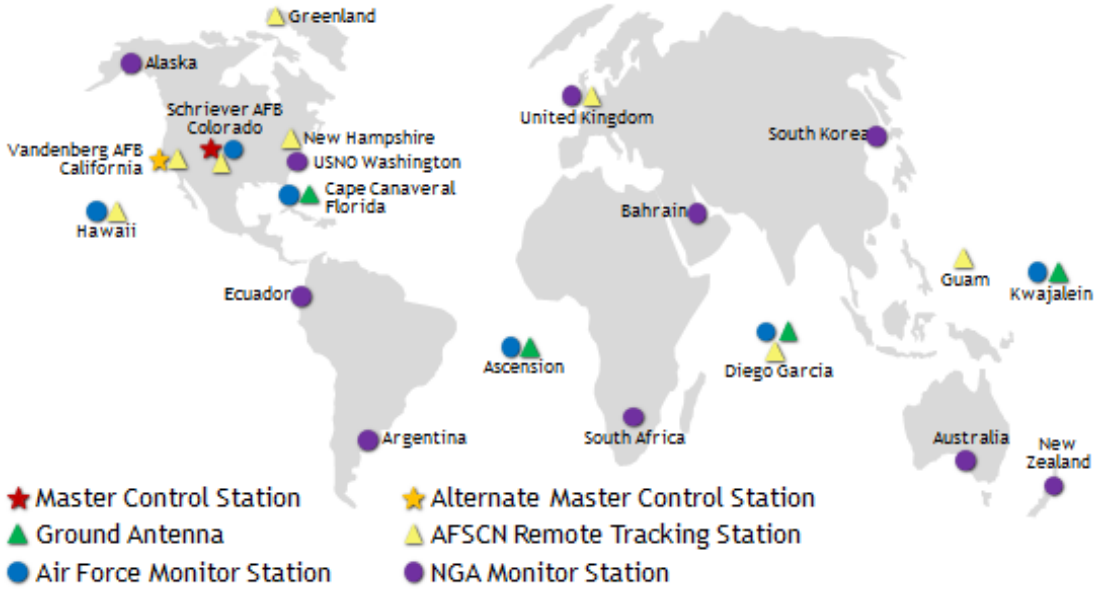


Figura 2-3 Distribuzione geografica dei centri di controllo a terra per il GPS

Il segmento utente ("User Segment") è composto da tutti gli utenti, militari e civili, che accedono al servizio GPS attraverso dei dispositivi riceventi che contengono l'hardware ed il software necessario a valutare i "Navigation Message" con cui sono poi in grado di ricostruire la propria posizione, misurando la differenza tra il clock del ricevitore GPS e quello dei satelliti. Il ricevitore GPS è in generale un ricevitore radio in grado di decodificare, interpretare e correlare i segnali ricevuti con il proprio riferimento generato internamente (tipicamente un oscillatore al quarzo). La distanza è calcolata in base alle differenze tra i clock del ricevitore e del satellite, mentre la posizione, come detto, è data dall'intersezione delle superfici sferiche associate alle distanze dei satelliti dal ricevitore. Negli anni sono stati sviluppati algoritmi complessi per cancellare le incertezze circa la sincronizzazione temporale.

I ricevitori GPS sono raggruppabili in due categorie:

- ricevitori sequenziali: economici ma non particolarmente adatti in applicazioni real-time; utilizzano un singolo canale per determinare la posizione in sequenza con almeno 4 satelliti;

- ricevitori multi-canale: più costosi ma veloci, sfruttano più canali parallelamente per tracciare i satelliti e sono più adatti all'impiego nei strumenti di misura che richiedono un elevato livello di accuratezza ed affidabilità nella sincronizzazione.

2.1.2 Vulnerabilità

Tutti i GNSS sono potenzialmente vulnerabili a causa di quattro differenti categorie di cause:

- A livello di sistema, inclusi i segnali ed i ricevitori;
- Problematiche del segmento utente;
- Il canale di propagazione, affetto da fenomeni atmosferici e di *multipath*;
- L'interferenza, che essa sia accidentale o intenzionale.

I satelliti GPS raramente diffondono segnali errati: solitamente è il numero limitato di satelliti in vista che può indurre i ricevitori a processare in modo non corretto dei segnali comunque validi, con risultati non prevedibili. Inoltre i segnali GNSS ricevuti a terra sono molto deboli, attorno ai -160 dBW [22] al di sotto del rumore di fondo dei ricevitori; le interferenze al contorno contribuiscono poi a rendere difficile il recupero del segnale. Il ricevitore potrebbe accidentalmente agganciarsi su riflessioni del segnale, note come "multipath", causate dal transito dello stesso attraverso le discontinuità dell'atmosfera.

2.1.2.1 Livello di sistema

Sebbene il segmento a terra sia responsabile del controllo e mantenimento dei satelliti e sia progettato in elevata affidabilità per resistere anche ad attacchi militari, possono comunque presentarsi alcune vulnerabilità tra cui:

- **numero di totale satelliti inferiore a 24.** Questa possibilità risulterebbe in una riduzione dell'accuratezza e della disponibilità del servizio.

- **upload di dati di navigazione errati.** Le pagine di navigazione inviate ai satelliti GPS (effemeridi) necessarie all'accuratezza della localizzazione, potrebbero essere errate e portare il sistema a lavorare in modo sbagliato, come accadde negli episodi del Giugno 2002, Marzo 2000 e Marzo 1993.
- **deriva dell'orologio del satellite.** Gli orologi atomici a bordo dei satelliti potrebbero avere comportamenti imprevisti ed accumulare errori di sincronizzazione crescenti e pericolosi, prima di essere individuati e corretti dagli operatori a terra: nel Gennaio del 2004 il satellite SVN-23 sperimentò 3 ore di deriva risultante in un potenziale errore massimo di localizzazione di 300 km.
- **interruzione del servizio in conseguenza a fenomeni spaziali.** Sebbene i satelliti siano opportunamente schermati dalle radiazioni spaziali, fenomeni di radiazione intensa come le tempeste solari, possono portare contemporaneamente fuori servizio uno o più satelliti.
- **attacchi al segmento a terra.** Le stazioni di controllo sono considerate "obiettivi sensibili" e possono essere soggette sia cyber-attacchi [23] che ad azioni ostili.

2.1.2.2 Segmento utente

Diversamente dal segmento a terra strettamente controllato e coordinato, il segmento utente è popolato da un panorama di ricevitori estremamente variegato che comprende anche i ricevitori di livello militare, quelli per la sicurezza dell'aviazione civile e quelli per la localizzazione civile installati nei moderni *smartphone*. La disponibilità sul mercato di ricevitori differenti e di qualità diversa, aumenta la possibilità che qualcuno di questi presenti dei bachi software ("bug") che possono compromettere l'affidabilità dal sistema di localizzazione per un particolare gruppo di utenti. Le vulnerabilità possono includere:

- **secondo intercalare.** Il GPS è soggetto ad eventi rari che possono non essere tenuti in conto durante la verifica del prodotto e scoperti solo dopo che il difetto si è presentato; uno di questi è il "secondo intercalare" che alcuni ricevitori possono gestire in modo non corretto.
- **aggiornamenti di sistema.** Anche se il sistema GPS è molto stabile e maturo, aggiornamenti di sistema possono causare comportamenti imprevisti nei ricevitori;

nell'Aprile del 2007 ad esempio è stato aggiunto alla costellazione il 32-esimo satellite GPS che causò problemi a quei ricevitori progettati per gestire solamente 31 satelliti. Nel Gennaio 2010 un aggiornamento software causò problemi al sistema di localizzazione militare.

- **bug del ricevitore**. Se per il settore militare e dell'aviazione civile il controllo di qualità sui ricevitori è piuttosto severo, questo non è sempre valido per le produzioni di massa, e può essere difficile garantire che l'apparato sia completamente esente da "bug". A seconda della progettazione e dalla configurazione del singolo ricevitore, si possono ottenere comportamenti diversi nel caso in cui un satellite è in stato d'errore o si è in presenza di un segnale di disturbo.
- **AGPS ("Assisted GPS")**. L'utilizzo dei dati di effemeridi introdotte esternamente per velocizzare l'acquisizione del ricevitore GPS può introdurre ulteriori vulnerabilità; dati errati inseriti nelle effemeridi dello AGPS possono accidentalmente portare il ricevitore GPS a male interpretare le informazioni dei satelliti.

2.1.2.3 Canale di propagazione

La regione ionizzata più alta dell'atmosfera, detta ionosfera, può causare delle discontinuità del mezzo di propagazione che, se non corrette mediante un modello, introducono l'errore più ingente nel segnale GNSS.

- **scintillazione nella ionosfera.** Perturbazioni di piccola entità nella ionosfera possono causare fenomeni di *multipath* del segnale; i ricevitori percepiscono una rapida variazione in fase ed ampiezza del segnale GNSS e possono perdere lo stato di "lock". Ciò avviene più frequentemente all'equatore e vicino ai poli.
- **eventi di Carrington.** Tempeste geomagnetiche o solari di elevata intensità, la cui frequenza si stima sia di una volta ogni 200 anni, ed in grado di produrre un'aurora boreale anche a latitudini inusuali.
- **modificazioni indotte della ionosfera**. Esplosioni nucleari causate nell'alta atmosfera possono causare effetti simili a quelli delle tempeste solari, causando potenziali conseguenze sui sistemi GNSS che possono protendersi anche per settimane,

e mettere a rischio gli stessi satelliti qualora immersi in un ambiente ricco di particelle ad elevata energia.

2.1.2.4 Interferenze accidentali ed intenzionali

Tali possono essere:

- **emissioni di armoniche radio**. Le emissioni da dispositivi trasmittenti commerciali possono interferire con il segnale GNSS e causare la perdita dello stato di "lock" al ricevitore.
- **jamming**. Viene volontariamente trasmesso un segnale di disturbo su una o più frequenze GNSS al fine di innalzare il rumore di fondo e far così perdere ai ricevitori lo stato di "lock". I dispositivi "jammer" (Figura 2-4), seppure considerati illegali in molti paesi del mondo, sono ampiamente commercializzati in Internet a prezzi accessibili al pubblico. Possono essere utilizzati per scopi criminali come i furti d'auto.
- **spoofing**. Jammer più sofisticati sono in grado oggi non solo d'irradiare rumore ma anche di trasmettere falsi codici GNSS ed effemeridi intenzionalmente errate.
- **meaconing**. È una tecnica di ritardo e ritrasmissione del segnale GNSS in grado di causare localmente fenomeni di *multipath*; un caso specifico di "*meaconing*" involontario è quello di antenne riceventi GPS che re-irradiano nell'area circostante il segnale GNSS ricevuto, a causa di disadattamenti d'impedenza; per evitare questo fenomeno è consigliabile montare le antenne riceventi non più vicine di 2 m l'una dall'altra.

Figura 2-4 Jammer GNSS veicolare

È preoccupante il fatto che la pratica del "*jamming*" sembra si stia sempre più diffondendo [24], tanto che nel gennaio 2011 è stato avviato nel Regno Unito il progetto "Sentinel" ("SErvices Needing Trust In Navigation, Electronics, Location & timing") [25] per tentare di misurare il fenomeno per le strade del paese. Il progetto, in carico a "Chronos Technology", è stato realizzato disponendo una rete di 4 sensori GPS di test per la durata di due-sei mesi in ciascun sito di valutazione.

2.2 IRIG Time Codes

Ai primi albori dei programmi missilistici e spaziali di metà secolo scorso, durante la sperimentazione di missili a lungo raggio, la necessità di correlare i dati raccolti da aree geografiche molto distanti tra loro venne soddisfatta grazie all'introduzione dei "codici seriali di tempo". Lo sviluppo di questi codici permise di produrre dispositivi in grado di sincronizzare l'orario in luoghi tra loro distanti attraverso un collegamento telemetrico o linee terrestri. Contestualmente ebbe origine un sistema di registrazione per i dati di test, che combinato con i dispositivi a codice seriale di tempo, permetteva la localizzazione automatica dei dati su nastro magnetico sfruttando il codice temporale memorizzato per effettuare le ricerche. L'informazione base di tempo veniva codificata come "larghezza di impulso" in formato binario o BCD ("Binary-Coded Decimal").

Questo genere di codifica temporale è originariamente frutto del lavoro dello "Inter-Range Instrumentation Group" (IRIG), l'organismo di standardizzazione del "Range Commanders Council" delle forze armate statunitensi, che a partire dal 1956 ha proposto una serie di formati di codice di tempo che, successivamente nel 1960, vennero riconosciuti ed

approvati come standard del settore, ed il cui formato della codifica venne descritto prima nello standard “IRIG Document 104-60”, poi nelle seguenti revisioni “IRIG Document 104-70” e “IRIG Document 200-70”, fino al più recente “IRIG Document 200-04” [26].

I codici IRIG hanno nomi designati dalle lettere alfabetiche A, B, D, E, F, G e H[6] che differiscono tra loro nella frequenza della portante modulata in ampiezza, che varia da 100 Hz a 100 kHz, e la risoluzione del tempo (Tabella 2-1) che ciascuna può codificare [27].

Tabella 2-1 Formati degli IRIG Time Codes

Formati degli IRIG Time Codes		
Formato	**Pulse Rate (o Bit Rate)**	**Intervallo di conteggio**
IRIG-A	1000 PPS[7]	1 ms
IRIG-B	100 PPS	10 ms
IRIG-D	1 PPM[8]	60 s
IRIG-E	10 PPS	100 ms
IRIG-G	10000 PPS	0.1 ms
IRIG-H	1 PPS	1 s

In questi flussi di codice possono essere codificati un numero variabile di bit di controllo e possono essere utilizzati sia per il collegamento diretto a sistemi digitali o come toni audio modulati in ampiezza adatti per la registrazione su nastro magnetico o la trasmissione su qualche altra tipologia di supporto.

Questi codici temporali sono stati utilizzati in applicazioni sia militari che civili. In particolare, lo “IRIG code B” (generalmente abbreviato IRIG-B) è stato ampiamente impiegato per la distribuzione temporale nelle sottostazioni delle reti di distribuzione dell’energia elettrica, per assicurare la sincronizzazione dei dispositivi come interruttori, relè e sistemi di misura e controllo.

[6] C è la specifica originaria che è stata successivamente sostituita dalla H - Datum Inc. (1987), Handbook of Time Code Formats (PDF), p. 18, 2013-06-24

[7] “Pulse Per Second”

[8] “Pulse Per Minute”

Il codice temporale si ripete ogni secondo e con un totale di 100 bit/s alcuni dei quali sono *framing* bit, mentre gli altri (74 bit) sono assegnati per codificare l'informazione di tempo e trasportare funzioni di comando. Il codice di base IRIG-B presenta tuttavia ambiguità sull'anno, dal momento che non trasporta questa informazione.

Il codice IRIG-B può essere utilizzato sia in forma di livello logico (non modulato), o come un segnale modulato in ampiezza con portante sinusoidale ad 1 kHz. Il segnale IRIG modulato è particolarmente adatto per la trasmissione su canali in banda voce e la registrazione su strumentazione a nastro magnetico. A causa della difficoltà nel misurare accuratamente i passaggi per lo zero, la codifica IRIG-B modulata è generalmente in grado di fornire una precisione superiore ad un millisecondo (un periodo di 1 kHz), ma solitamente non migliore di dieci microsecondi. Questo livello di accuratezza è accettabile in molte tipologie di sottostazione, ma non in tutte; la codifica IRIG-B non modulata invece può fornire un riferimento con precisione limitata solo dallo *slew-rate* del segnale digitale, migliore di un microsecondo e che, con particolari accorgimenti, può raggiungere la precisione di pochi nanosecondi. L'IRIG-B non modulato è distribuito normalmente ad un livello di tensione di 5V ed compatibile con ingressi in tecnologia TTL ("Transistor-to-Transistor Logic") o CMOS ("Complementary Metal-Oxide Semiconductor").

La convenzione di denominazione dei *time-codes* IRIG è fondata su un suffisso numerico a tre cifre aggiunto in coda ad una lettera usata per designare uno dei sei formati di codice IRIG; il suffisso, composto da tre numeri d'identificazione ("Signal Identification Numbers"), descrive la tipologia e la frequenza della portante associata e quali informazioni facoltative sono incluse nel messaggio, come mostrato nella Figura 2-5 [27].

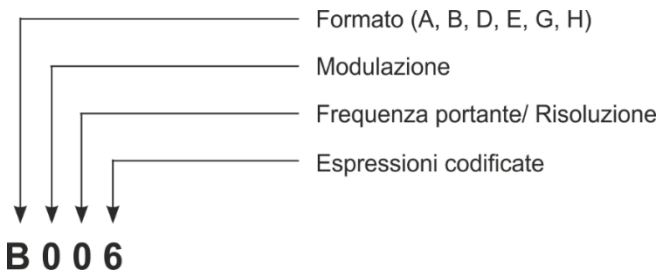


Figura 2-5 Signal Identification Numbers negli IRIG time-codes

I segnali IRIG possono essere trasmessi in tre modalità, codificate nel primo *digit* del "Signal Identification Numbers":

- non-modulati, in DCLS ("Direct Current Level Shift")[9] senza portante, codifica ad ampiezza d'impulso;
- modulati in ampiezza con portante ad onda sinusoidale;
- modulati in ampiezza con *codice Manchester* modificato, su portante ad onda quadra.

Le cinque possibili frequenze portanti sono identificate dal secondo *digit* del "Signal Identification Numbers" e sono: "*No carrier*" (DCLS), 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz.

Le tipologie di espressioni codificate sono tre, le cui possibili combinazioni sono riportate nel terzo *digit* del "Signal Identification Numbers":

- "Binary Coded Decimal", in forma di *time-of-year* (BCD_{TOY}) e *year* (BCD_{YEAR}) è sempre presente;
- "Control Functions" (CF), gruppo opzionale di bit contenenti anno[10], qualità del tempo, anno bisestile, secondi intercalari e controllo di parità. Altri bit CF sono riservati per scopi definiti dall'utente, a seconda dell'applicazione;
- "Straight Binary Seconds" (SBS), *time-of-day* opzionale sotto forma di contatore di secondi binario a 17 bit, in grado di rappresentare un valore tra 0 e 86400 secondi.

La Tabella 2-2 riassume il significato di ciascun *digit*.

[9] I segnali DCLS sono facilmente trasmissibili su bus EIA RS485/CCITT V11 e fibre ottiche.

[10] L'informazione sull'anno non è era specificata prima della revisione del 2004; pertanto l'IEEE aveva adottato lo standard IEEE-1344 "*Synchrophasors for Power Systems*" con *timecode* basato su IRIG-B122/B123 e che includeva nel campo CF le informazioni di: anno, leap second, Daylight Saving Time e UTC offset. Tale variazione è nota come "IEEE-1344 extensions".

Tabella 2-2 Codifica del suffisso IRIG

Suffisso IRIG Time-Codes	
1° Digit	**Modulazione**
0	Non modulato, DC Level Shift (DCLS), codifica pulse-width
1	Modulazione d'ampiezza, portante sinusoidale
2	Modulazione Manchester
20° Digit	**Frequenza portante / Risoluzione**
0	Nessuna portante (DCLS)
1	100 Hz / 10 ms
2	1 kHz / 1 ms
3	10 kHz / 100 µs
4	100 kHz / 10 µs
3° Digit	**Espressioni codificate**
0	BCD_{TOY}, CF, SBS
1	BCD_{TOY}, CF
2	BCD_{TOY}, SBS
3	BCD_{TOY},
4	BCD_{TOY}, BCD_{YEAR}, CF, SBS
5	BCD_{TOY}, BCD_{YEAR}, CF
6	BCD_{TOY}, BCD_{YEAR},
7	BCD_{TOY}, BCD_{YEAR}, SBS

Le possibili combinazioni di formato di codice riconosciute dallo standard "IRIG 200-04" sono riportate nella Tabella 2-3 [28].

Tabella 2-3 Formati di codice ammissibile per IRIG

Formati di codice ammissibili			
Formato	**Tipo di modulazione**	**Frequenza portante**	**Espressioni codificate**
A	0, 1, 2	0, 3, 4, 5	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
B	0, 1, 2	0, 2, 3, 4, 5	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
D	0, 1	0, 1, 2	1, 2
E	0, 1	0, 1, 2	1, 2, 5, 6
G	0, 1, 2	0, 4, 5	1, 2, 5, 6
H	0, 1	0, 1, 2	1, 2

Tutti i formati di codice IRIG utilizzano la codifica ad ampiezza d'impulso ed una struttura *time-code* composta da *frame* ripetuti, della lunghezza di 60 o 100 bit. All'inizio della trasmissione di ciascun di bit codificato, IRIG abilita un segnale (livello DC, portante sinusoidale o "l" logico in codifica Manchester); il segnale viene successivamente disabilitato (livello DC o portante sinusoidali attenuate, o "0" logico in codifica Manchester) dopo un periodo di tempo dipendente dall'informazione da trasmettere, della durata del:

- 50% della durata di un periodo per un "1" binario,
- 20% della durata di un periodo per uno "0" binario,
- 80% della durata di un periodo per un "Position Identifier", usato come marcatore di riferimento.

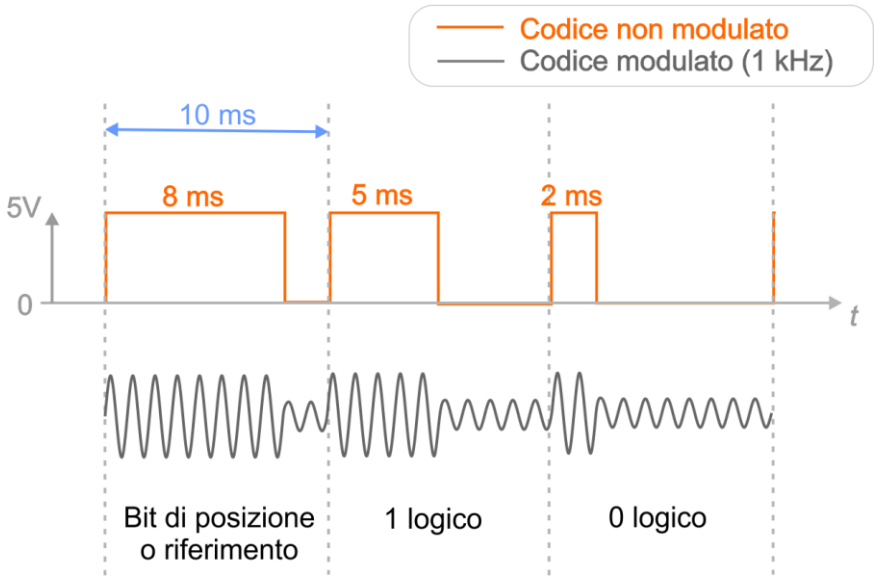


Figura 2-6 Esempio di codifica IRIG

La presenza di due marcatori di riferimento consecutivi indica l'inizio del periodo di tempo dove il primo marcatore di riferimento segnala che il prossimo fronte di salita sarà il marcatore PPS (“PPS On-Time 1”). Ogni 10 bit il decimo (9, 19, 29, …, 99) è un “Position Identifier” P_j mentre tutti gli altri bit rappresentano dei dati, eventualmente “0” quando non hanno uno scopo assegnato.

In generale vengono utilizzati gruppi di 4bit in rappresentazione *little-endian* per codificare le cifre BCD:

- Bits 1–4 codificano i secondi, i bits 6–8 le decine di secondi (0–59),
- Bits 10–13 codifica i minuti, i bits 15–17 le decine di minuti (0–59),
- Bits 20–23 codifica le ore, i bits 25–26 le decine di ore (0–23),
- Bits 30-33 codifica il giorno dell'anno, i bits 35-38 le decine di giorni dell'anno, e i bits 40–41 le centinaia di giorni dell'anno (1–366),
- Bits 45–48 codifica le decine di secondi (0–9),
- Bits 50–53 codifica gli anni, i bits 55–58 le decine di anni (0–99),
- Bits 80–88 e 90–97 codificano gli "straight binary seconds" a partire dalle ore 00:00 del giorno corrente (0–86399, non BCD).

I 9 bit non assegnati tra due bit marker sono lasciati a disposizione di “Control Function” definite dall’utente, come ad esempio avviene per l’estensione IEEE 1344 per i bit 60-75.

2.3 Synchronous Ethernet (SyncE)

2.3.1 Architettura SyncE

Il "Synchronous Ethernet" (o SyncE) è una tecnologia il cui scopo è distribuire l'informazione di frequenza attraverso i dispositivi Ethernet: in questo contesto frequenza e "*bit-rate*" hanno medesimo significato, in quanto il SyncE ricostruisce l'informazione di frequenza a partire dai "*bit-stream*" seriali in arrivo sull'interfaccia e passa l'informazione ottenuta all'orologio di sistema. Quest'ultimo, ad esempio, in un apparato di rete corrisponde all'orologio locale utilizzato come sorgente di clock per tutte le porte di uscita SyncE del dispositivo, le quali e che risultano dunque a loro volta agganciate al clock di sistema: questo presuppone che le porte trasmettano continuamente flussi di dati. Lo stesso principio di funzionamento mostrato nella Figura 2-7 è stato sfruttato a lungo in passato nelle reti di telecomunicazione basate su E1/T1 o SDH/SONET [29].

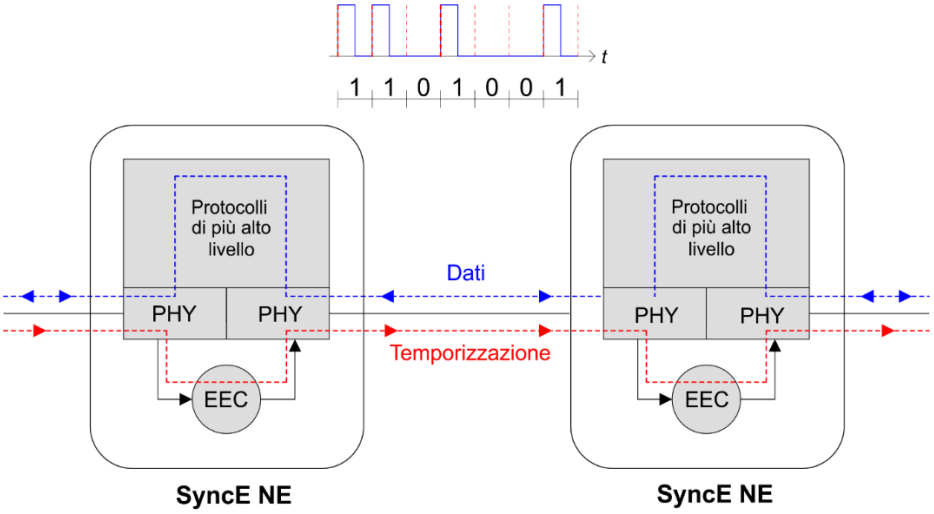


Figura 2-7 Temporizzazione tra elementi di rete SyncE

Il meccanismo per il trasferimento della sintonizzazione è utilizzato per costruire un albero (o gerarchia, Figura 2-8) di orologi *master-slave* interconnessi, dove alla radice sussiste un "Primary Reference Clock" (PRC, accuratezza di 1 parte per 10^{11}), corrispettivo del PRS ("Primary Reference Source")[11] delle reti SONET; ogni NE della rete SyncE ospita un orologio interno denominato "Ethernet Equipment Clock" (EEC) agganciato in frequenza ad un *bit-stream* in arrivo su una delle linee di traffico in ingresso, mentre i segnali in uscita sono

[11] Nomenclatura nello standard ANSI/Telcordia.

direttamente temporizzati dallo stesso EEC che risulta agganciato ad un riferimento esterno ("locked mode"): in questo modo la sintonizzazione viaggia dal PRC verso tutta la catena di NE, come avveniva già nell'architettura per la sincronizzazione di reti SDH/SONET.

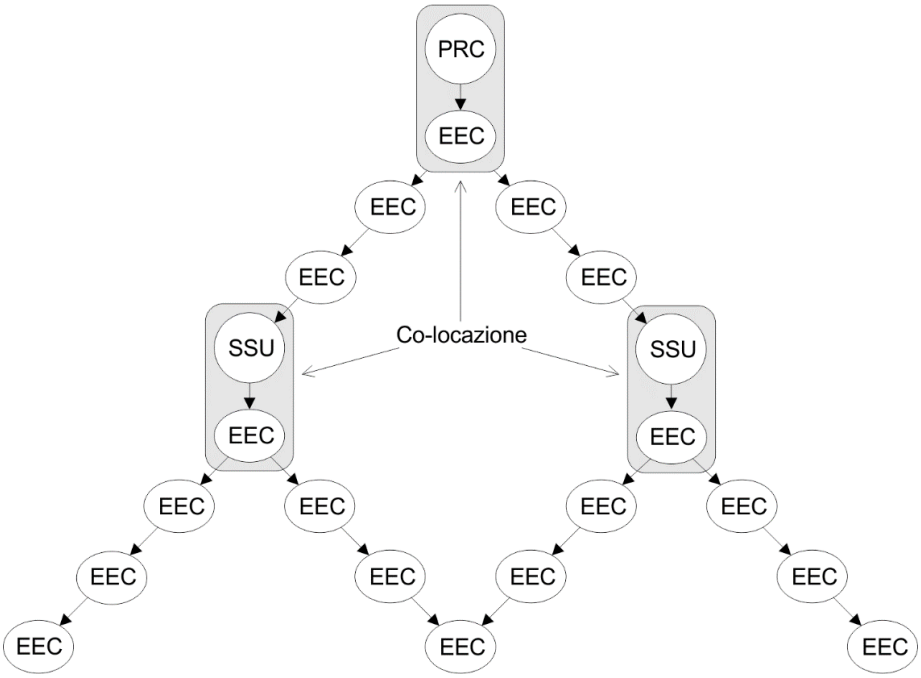


Figura 2-8 Gerarchia degli elementi per la sintonizzazione SyncE

Nel SyncE gli EEC possono trovarsi nella modalità indipendente "free-run" (ad es. con accuratezza di 4.6 ppm) o operare agganciati ad un clock di riferimento di rete; quando si presenta un disservizio di rete, l'oscillatore locale dell'EEC è costretto a lavorare in modalità di mantenimento ("holdover") per ore o giorni, e la capacità di mantenere nel tempo una deriva accettabile dal riferimento nel tempo dipende dalla qualità dell'oscillatore stesso[12].

Nella catena una terza categoria di orologi detta "Synchronization Supply Unit" (SSU) ha il compito di agire da nodo (al pari di un BITS nelle reti SONET), distribuendo la sincronizzazione in frequenza ad un gruppo sottostante di NE. L'SSU oltre a ridurre l'accumulo di "*jitter*" e "*wander*" (disallineamenti temporali di breve e lungo termine trattati più avanti nel

[12] Raccomandazioni e metriche sono definite in ITU-T G.813 e ITU-T G.8262 rispettivamente per reti TDM ed Ethernet.

paragrafo 3.1), può agire da sorgente di riferimento autonoma per i NE qualora la tracciabilità verso il PRC sia temporaneamente non disponibile a causa di un guasto; sebbene l'SSU non rappresenti da solo un riferimento stabile come quando agganciato ad un riferimento PRC, esso è in grado di fornire un riferimento sufficientemente accurato tale da garantire l'operatività del servizio fino alla riparazione del guasto. Questa tipologia di protezione, detta "holdover protection" (Figura 2-9 [30]), è possibile perché gli SSU sono solitamente equipaggiati internamente con oscillatori al Rubidio o termostatati al quarzo.

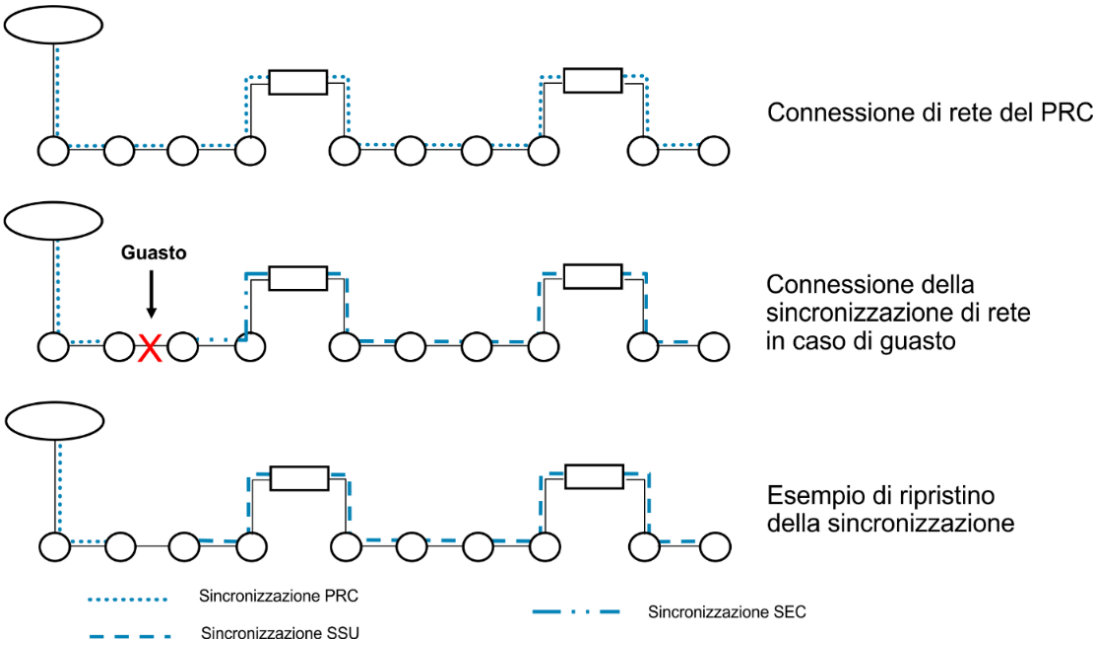


Figura 2-9 Holdover Protection

L'ITU-T Rec. G.823, che specifica i limiti della rete ("Network Limits"), attraverso la ITU-T Rec.G.803 definisce le linee guida per la progettazione della catena di riferimento per la sincronizzazione, da cui si evidenziano le seguenti regole (Figura 2-10):

- nella catena devono essere impiegati degli SSU per rigenerare il segnale di sincronismo;
- tra due SSU (o tra un PRC ed un SSU) non devono sottostare più di 20 EEC;
- non devono esistere più di 60 EEC nell'intera catena;
- non devono esistere più di 10 SSU nell'intera catena.

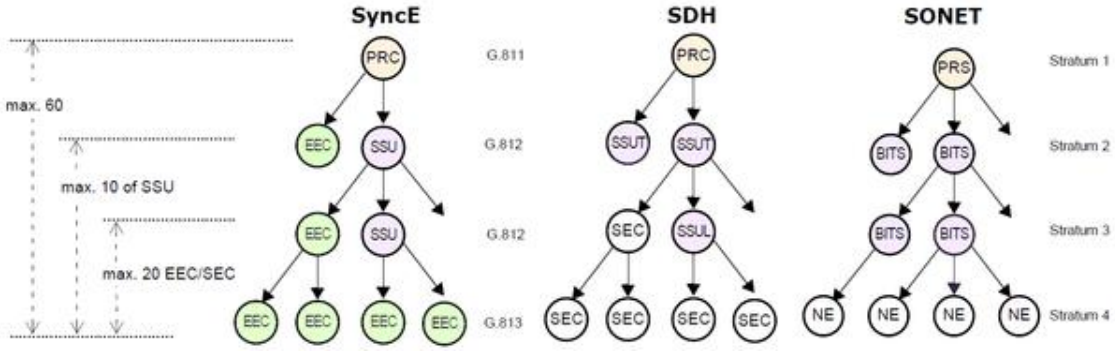


Figura 2-10 Comparazione delle catene di riferimento SyncE, SDH e SONET

L'Ethernet essendo per sua natura un sistema asincrono, normalmente non necessita di un clock locale ad elevata accuratezza; di conseguenza, la maggior parte dei dispositivi Ethernet non sono in grado di fornire un clock ad elevata accuratezza ad altri dispositivi. Tuttavia, attraverso le interfacce SyncE l'accuratezza del clock locale è incrementata da ±100 ppm delle comuni interfacce Ethernet a ±4.6 ppm (

Figura 2-11) in condizione di "free-run"[13] o di mantenimento ("holdover"), e deve essere riferibile ad un clock di classe "stratum 1" attraverso un "Synchronization Supply Unit" (SSU) esterno o un BITS.

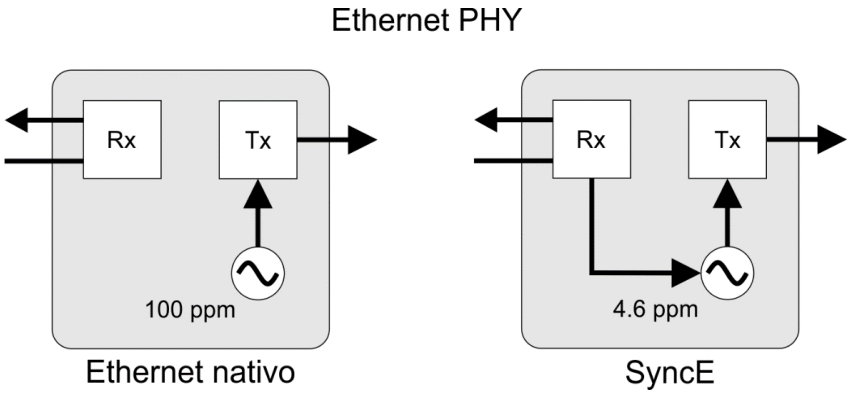


Figura 2-11 Differenza architetturale tra interfacce Ethernet native e SyncE [11]

[13] Il parametro è riferito a dispositivi o interfacce nella modalità "stand-alone" che agganciati al loro PRC possono comunque ridistribuire ad altri NE sincronizzazione con livello di accuratezza migliore di quello in "free-run".

In condizioni di normalità la “line rate” SyncE è agganciata in frequenza alla sorgente di riferimento principale (detta “master reference”), in grado di redistribuire un’accuratezza nell’ordine delle parti per bilione; fornisce inoltre la tracciabilità del riferimento attraverso la rete [11]. Queste caratteristiche permettono al SyncE di essere utilizzato in modo intercambiabile con il SONET/SDH.

Quando i dispositivi della rete sono tutti abilitati al supporto di SyncE (Figura 2-12), questo è in grado di trasferire in modo molto accurato l’informazione di frequenza, ma non può essere utilizzato per trasferire l’informazione di fase o di tempo (ToD, “Time-of-Day”).

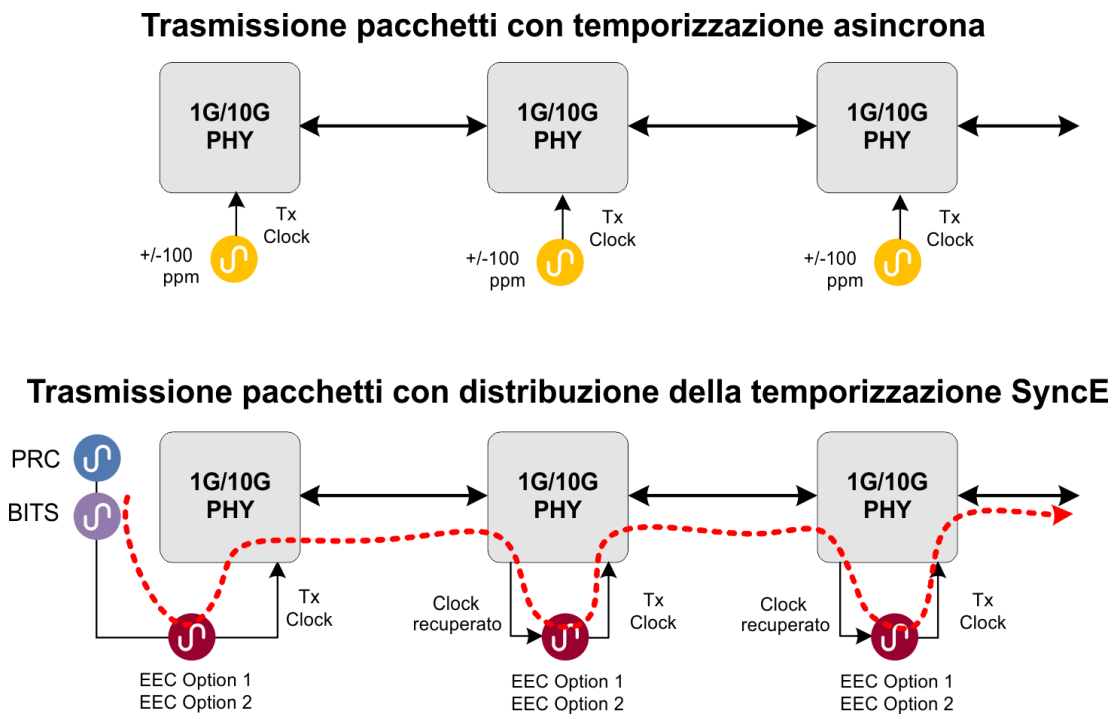


Figura 2-12 Trasmissione di pacchetti con temporizzazione asincrona e SyncE [13]

Le performance caratteristiche dei PLL (“Phase Locked Loop”) raccomandate per recuperare e ritrasmettere la sincronizzazione in frequenza nella catena SyncE sono governate dallo standard ITU-T G.8262 che definisce due scelte prestazionali, conosciute come:

- *Ethernet Equipment Clock* (EEC) *Option 1*, basato sulla *gerarchia* a 2.048 kbps governata dallo standard G.813 ed in utilizzo in Europa ed Asia, comunemente conosciuta come E1;

- *Ethernet Equipment Clock* (EEC) *Option 2*, basato sulla *gerarchia* a 1.544 kbps governata dallo standard G.812 *Type* IV (o "Stratum 3") utilizzato prevalentemente in Nord America, comunemente conosciuta come T1.

Un prospetto ad alto livello per ogni "option" è mostrata nella Tabella 2-4 [13].

Tabella 2-4 SyncE: prestazioni caratteristiche EEC Option1 ed Option2

	EEC Option1 (G.813 Option 1)	**EEC Option2 (G.813 Option IV)**
Free-run Accuracy (ppm)	±4.6	±4.6
Holdover Stability (ppm/day)	±2	0.37
Filtering Bandwidth	1 – 10 Hz	0.1 Hz
Jitter Generation (ps pp)[14] @Ethernet Out Interface	Gigabit Ethernet: 400 ps pp, 2.5 kHz to 10 MHz	
	10GigabitEthernet: 50 ps pp, 20 kHz to 80 MHz	

Dal punto di vista tecnico, è possibile ottenere un clock più accurato dallo strato fisico Ethernet piuttosto che utilizzando la tecnologia SDH [12]. Un clock per poter essere efficacemente recuperato da un *bit-stream* deve disporre di un numero sufficiente di transizioni logiche nella finestra temporale di osservazione; in altre parole, non devono verificarsi troppe occorrenze consecutive di 1 o 0 logici. La tecnologia SDH per ovviare a questa problematica implementa una tecnica di rimescolamento casuale ("scrambling"), in grado di ridurre la possibilità che si verifichino 1 o 0 logici consecutivi, che tuttavia possono verificarsi comunque. Il livello fisico della tecnologia Ethernet sfrutta invece le codifiche 4B/5B per il Fast Ethernet (FE) e 8B/10B per il Gigabit Ethernet (GE) che aggiungono un bit per eliminare la possibilità che si verifichino più di 4 valori logici consecutivi identici, facilitando l'operazione di recupero del clock: il flusso dati codificato contiene così sempre un numero sufficiente di transizioni che occorrono anche in assenza di dati trasmessi, scongiurando il degrado in accuratezza durante il processo di recupero del clock.

I vantaggi dell'utilizzo della tecnica SyncE sono:

[14] Picosecondi picco-picco.

- La qualità del clock recuperato di 0.01 ppm, vicino alla qualità del clock SDH;
- È altamente affidabile, in quanto difficilmente può essere affetto dal carico della rete;
- L'architettura del sistema a pacchetti è studiato per essere interoperabile con le reti SDH, ed è dunque ampiamente standardizzata e sperimentata;
- Conforme alle precedenti raccomandazioni ITU-T e Telcordia.

Tra i svantaggi si elencano invece:

- I NE della catena devono essere tutti compatibili SyncE per non interrompere la catena stessa, questione che può tradursi in un elevato costo nell'inserimento della tecnologia in una rete che ha apparati non compatibili;
- Non supporta la sincronizzazione temporale o di fase.

2.3.2 Ethernet Synchronization Messaging Channel (ESMC)

Il "Ethernet Synchronization Messaging Channel" (ESMC) è il protocollo utilizzato per trasferire le informazioni attraverso la catena di distribuzione della sincronizzazione, con riferimento alla qualità della sorgente di sincronizzazione. ESMC consiste di speciali *frame* Ethernet ed è basato sul protocollo OSSP ("Organization Specific Slow Protocol", specificato nello standard IEEE 802.3ay[15]) che, utilizzato congiuntamente al SyncE, trasporta le informazioni necessarie a determinare: la scelta del clock di riferimento, la gestione del clock, la tracciabilità della qualità e le condizioni di disservizio. Per raggiungere tali scopi, il protocollo ESMC fa uso della messaggistica SSM ("Synchronization Status Message") di vario tipo definita nello standard ITU-T G.8264 ed inviata fuori banda ad una frequenza di 10 pps ("packets per second"): un apparato di rete che riceve messaggistica SSM su più porte è quindi in grado, attraverso un opportuno algoritmo, di scegliere come riferimento quella con accuratezza maggiore grazie all'informazione di "quality level" contenuta nel campo "QL" del messaggio stesso. Il meccanismo di selezione basato su QL ricostruisce una gerarchia di orologi "master" e "slave", tutti tracciabili ad un riferimento di tempo primario. I livelli di qualità predefiniti (Tabella 2-5) sono ad esempio: QL-PRC, QL-SSU-A, QL-SSU-B, QL-SEC (SEC, "SDH Equipment Clock") e QL-DNU; l'ultimo elemento identifica il

[15] Una revisione allo standard IEEE 802.3-2005 PAR.

messaggio “Do Not Use” utilizzato per controllare il meccanismo di commutazione in caso di guasto [12].

Tabella 2-5 Livelli di qualità nella messaggistica SSM

Quality Level	SSM Code	Code Value
QL-PRC (G.811)	0010	0x02
QL-SSU-A (G.8121 V)	0100	0x04
QL-SSU-B (G.812 VI)	1000	0x08
QL-SEC (G.813 I)	1011	0x0b
QL-DNU (do not use)	1111	0x0f

Come per i metodi di estrazione del clock, anche la messaggistica SSM è derivata similmente alla controparte nelle reti SONET/SDH. I messaggi SSM[16] sono in linea di massima raggruppabili in PDU (“Protocol Data Unit”) di “evento” ed di “informazione”, tra loro distinguibili attraverso un bit di “event-flag”.

La struttura di un messaggio ESMC è mostrata nella Figura 2-13 [31] ed il significato dei campi [11] nella Tabella 2-6.

[16] Si può parlare di SSMoETH, paradigma di “SSM over Ethernet” quando i messaggi di sincronizzazione transitano su di una rete a pacchetti.

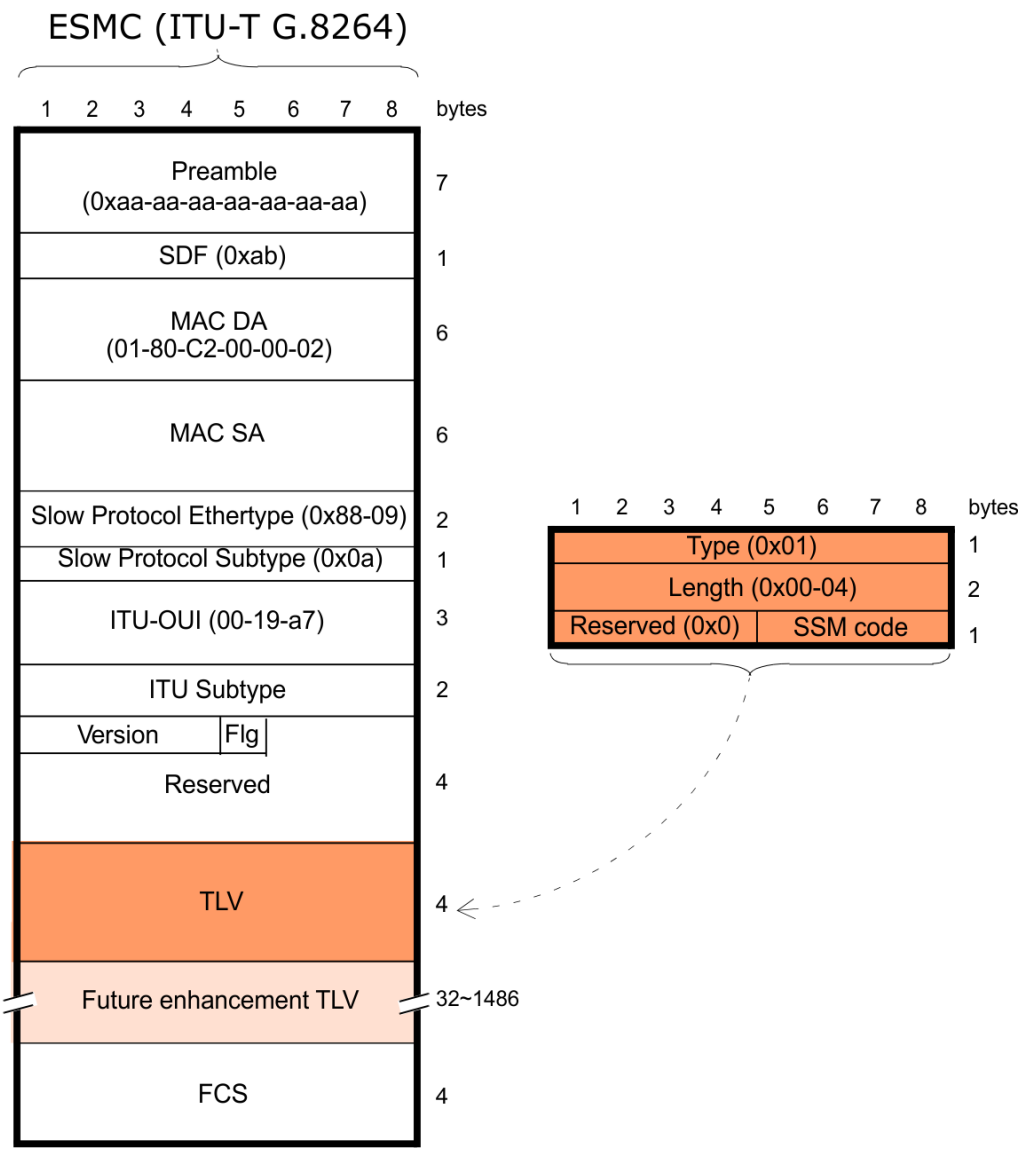


Figura 2-13 Struttura del messaggio ESMC

Tabella 2-6 Descrizione campi dello Ethernet Synchronization Messaging Channel

Ottetti	Dimensioni	Descrizione campo
1-6	6 ottetti	Indirizzo di destinazione (hex) = 01-80-C2-00-00-02
7-12	6 ottetti	Indirizzo sorgente
13-14	2 ottetti	Slow protocol Ethertype (hex) = 88-09
15	1 ottetto	Slow protocol subtype (hex) = 0A
16-18	3 ottetti	ITU-OUI[17] (hex) = 00-19-A7
19-20	2 ottetti	ITU subtype
21	4 bit	Versione
	1 bit	EventFlag
	3 bit	Riservato
22-24	3 ottetti	Riservato
25-28	4 ottetti	QL-TLV (type, length, reserve, SSM)
29-1532	32-1486 ottetti	Miglioramenti futuri
Ultimi 4	4 ottetti	FCS (Frame Check Sequence)

La messaggistica ESMC è classificabile in due tipologie: pilotata da un evento ("event-driven") ed informazione periodica ("periodic information"). Il primo è importante per il clock SyncE in quanto viene inviato quando il valore di QL è cambiato; il secondo, detto anche "heartbeat message", è inviato ogni secondo e può trasportare altre informazioni utili come: ID (identificativo) della sorgente, informazioni sulla sorgente e numero di "hop" (salti di rete) nel percorso verso la sorgente. Il messaggio di *heartbeat* contiene inoltre un campo "Revision" che indica le differenze rispetto al messaggio precedente.

[17] "Organizationally Unique Identifier", http://standards.ieee.org/develop/regauth/oui/

2.4 Network Time Protocol (NTP)

Lo standard "NTP over Ethernet" è utilizzato per sincronizzare gli orologi sulle reti a commutazione di pacchetto IP notoriamente affette da ritardi di propagazione variabili e fornisce un'accuratezza temporale dell'ordine dei millisecondi, sufficiente per tutti quei processi che non sono *time-critical* [17]. L'obiettivo dell'NTP è permettere ai client connessi ad un server di riferimento di poter sincronizzare i loro orologi all'orario UTC ("Coordinated Universal Time").

L'NTP, arrivato oggi alla sua quarta versione, è considerato uno dei più protocolli Internet più antichi ma durevoli, tuttora in uso. Originariamente progettato da David L. Mills all'università di Delaware, le prime documentazioni di questa tecnologia di sincronizzazione risalgono alla ormai storica IEN-173 ("Internet Engineering Note") del 1981, mentre le prime specifiche di protocollo pubblico da esso derivate risalgono alla RFC-778 [32]. Nel 1985 l'RFC-958[18] conteneva le prime specifiche formali della versione "0" che già definivano un'accuratezza nominale su rete Ethernet di alcune decine di millisecondi, mentre solo nel 1991, grazie ad un articolo di D.L. Mills sull'NTP Version 1, è stato finalmente esposto un modello NTP che includeva l'architettura, il protocollo e gli algoritmi implementati, ponendo le basi per l'evoluzione successiva, oggi segnata dalla versione 4. Questo sistema è capace di mantenere la sincronizzazione in maniera continuativa attraverso più nodi ed in modo automatico, caratteristiche che lo hanno reso adattabile all'impiego su un'intera rete WAN ("Wide Area Network") ed in Internet. È organizzato secondo il paradigma "server-client" in livelli gerarchici numerabili detti "*stratum*", il cui numero di livello indica la distanza dai clock di riferimento che sono sempre indicati come "stratum 0" (Figura 2-14), come ad esempio gli orologi atomici (Cesio e Rubidio) oppure orologi basati su GPS o altre tecnologie radio; di solito questi orologi non sono parte integrante della rete ma sono connessi a computer di "stratum 1" (detti server primari o "primary server") sincronizzati allo "stratum 0" tramite un segnale PPS. Gli orologi "stratum 1" agiscono così da server di riferimento per i computer dello "stratum 2" grazie appunto all'impiego della messaggistica NTP. I computer afferenti allo "stratum 2" inviano le richieste di sincronizzazione ad uno o più server dello "stratum 1" e sono in grado di scegliere tra questi, quello con riferimento temporale più accurato. Lo "stratum 2" può ancora agire da server per gli strati sottostanti

[18] Network Working Group, D.L. Mills, Request for Comments: 958, M/A-COM Linkabit, September 1985

fino ad un numero massimo di 256 [17], ed è considerato server secondario ("secondary server").

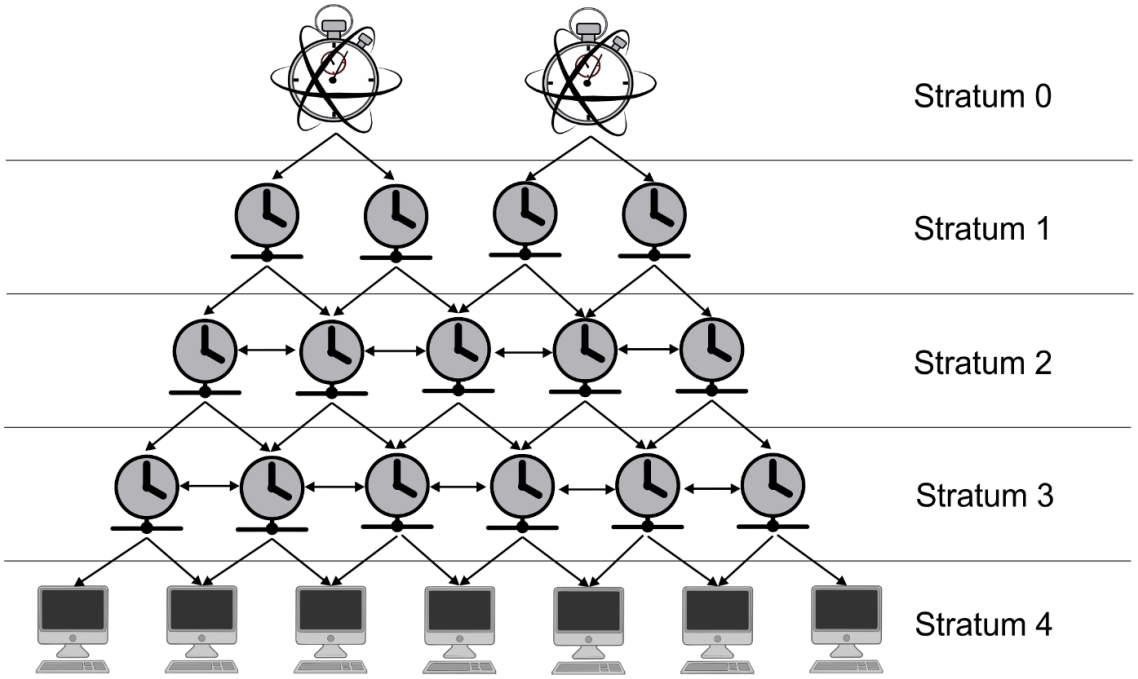


Figura 2-14 Gerarchia a "stratum" per gli orologi NTP

Dunque, un gruppo di computer *client* utilizzanti tutti il servizio NTP possono operare con un segnale di clock sincronizzato. L'NTP è stato progettato per essere a conoscenza di 3 metriche critiche per il *timekeeping*: l'offset del clock locale rispetto al riferimento, il *round-trip delay* del percorso tra il computer locale e il server di riferimento selezionato, e la dispersione del clock locale, ovvero una misura del errore massimo del clock locale rispetto al clock di riferimento. Ognuna di queste componenti è tenuta separata per permettere al clock locale non solo di potersi sincronizzare con un clock di riferimento, ma anche determinare i confini massimi del processo di sincronizzazione, affinché l'utente possa determinare non solo il tempo corretto, ma anche il corrispondente livello di qualità.

L'NTP utilizza il formato standard internazionale di tempo coordinato universale UTC come riferimento temporale, diverso dal GMT ("Greenwich Mean Time"), che a sua volta sfrutta il tempo standard TAI ("International Atomic Time") il cui "secondo standard" corrisponde a 9.192.631.770 periodi della radiazione emessa da un atomo di Cesio-133 nella transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale [33]; ciò implica il fatto che

l'NTP deve incorporare il riallineamento del "secondo intercalare" al giorno solare medio[19]. È inoltre un protocollo di "tempo assoluto", e pertanto i fusi orari locali non sono parte intrinseca del protocollo stesso e la conversione tra orario UTC ed orario locale è una computazione lasciata al client locale.

Nella forma più semplice del protocollo, il client richiede l'ora attuale al server selezionato, il quale risponde alla richiesta del client aggiungendo al pacchetto di dati il suo orario corrente. Quando il client riceve indietro il pacchetto è in grado di estrapolare due informazioni: quello che era il tempo sul server di riferimento, ed il tempo trascorso dalla richiesta, misurato attraverso il clock locale del client. Iterando più volte questa procedura, il client può mitigare gli effetti del *jitter* di rete ed ottenere dunque un valore di ritardo stabile delle transazioni Client-Server. Questo valore può infine essere utilizzato per regolare l'orologio locale in modo che sia sincronizzato con il server.

Il server NTP opera attraverso il protocollo UDP ("User Datagram Protocol") sulla porta 123 rispondendo alle richieste di ciascun client aggiungendo un campo di tempo al pacchetto ricevuto prima di restituirlo al mittente, senza riferimento alle transazioni precedenti.

Nella Tabella 2-7 sono riportati i parametri globali del protocollo NTP come definiti dallo "NTP Working Group" [34].

Tabella 2-7 Parametri globali protocollo NTP

Nome	Valore	Descrizione
Port	123	NTP port number
Version	4	Version number
Tollerance	15e-06	Frequency tolerance
Minpoll	4	Minimum poll exponent (16s)
Maxpoll	17	Maximum poll exponent (36h)
Maxdisp	16	Maximum dispersion (s)
Mindisp	.005	Minimum dispersion increment (s)

[19] L'ente responsabile della regolazione è l'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS).

Maxdist	1	Distance threshold (s)
Maxstrat	16	Maximum stratum number

Appena il pacchetto è ricevuto dal server, questo viene marchiato temporalmente e passato al processo NTP che include vari *timestamp* in alcuni campi, inverte gli indirizzi di sorgente e destinazione, ricalcola il *checksum* del messaggio e lo reinoltra al mittente secondo il formato riportato in Figura 2-15 [35].

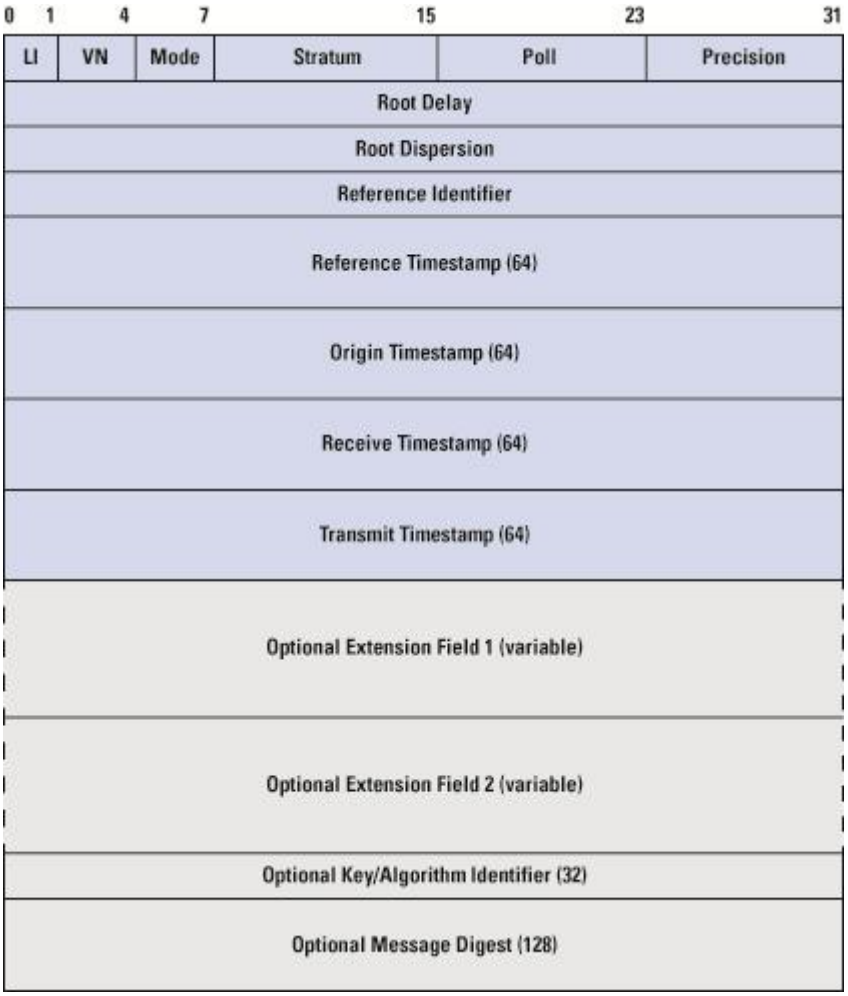


Figura 2-15 Formato del pacchetto NTP

Lo *header* (intestazione) del messaggio NTP è composto dai seguenti campi:

- “Leap Indicator” (LI), di lunghezza 2 bit, indica se l’ultimo minuto del giorno corrente contiene una correzione di secondo intercalare (0 - nessun aggiustamento, 1 – minuto di 59 secondi, 2 – minuto di 61 secondi, 3 - fuori sincronizzazione);
- “NTP Version Number” (VN), lunghezza di 3 bit, versione del servizio NTP;
- “Mode”, lunghezza di 3 bit, indica una delle modalità di trasmissione dei pacchetti (0: riservato, 1: "Symmetric active", 2: "Symmetric passive", 3: Client, 4: Server, 5: Broadcast, 6: "NTP control message", 7: riservato per utilizzo privato);
- “Stratum”, di 8 bit, indica la tipologia di riferimento (0: non specificato o non valido, 1: server primario, 2–15: server secondario, 16: non sincronizzato, 17–255: riservati);
- “Poll”, intero con segno da 8 bit, intervallo di sondaggio inteso come il logaritmo in base 2 del massimo intervallo tra due messaggi NTP successivi, espresso in secondi;
- “Precision”, intero con segno da 8 bit, precisione dell’orologio con valore in secondi espresso sotto forma di logaritmo in base 2;
- “Root Delay”, di 32 bit con segno in virgola fissa tra la 15-esima e la 16-esima cifra, esprime il ritardo totale (round-trip) tra il server ed il suo riferimento primario, in secondi;
- “Root Dispersion”, di 32 bit con segno in virgola fissa tra la 15-esima e la 16-esima cifra, esprime l’errore massimo dovuto alla tolleranza in frequenza dell’orologio;
- “Reference Identifier”, di 32 bit rappresenta: per gli orologi “stratum 1” il codice a 4 caratteri ASCII della sorgente di riferimento esterna, secondo la RFC 4330; per i server secondari l’indirizzo IPv4 oppure lo *hash* MD5 (“Message Digest Algorithm 5”)[20] dell’indirizzo IPv6 della sorgente di riferimento;
- “Reference Timestamp”, lungo 64bit di cui 32 rappresentanti i secondi in forma d’intero senza segno ed i restanti 32 una parte frazionale, è l’istante in cui l’orologio è stato corretto l’ultima volta;

[20] Descritto nella RFC 1321- https://tools.ietf.org/html/rfc1321

- “Originate Timestamp”, lungo 64bit di cui 32 rappresentanti i secondi in forma d’intero senza segno ed i restanti 32 una parte frazionale, è l’istante in cui il client ha inviato il messaggio NTP al server;
- “Receive Timestamp”, lungo 64bit di cui 32 rappresentanti i secondi in forma d’intero senza segno ed i restanti 32 una parte frazionale, è l’istante in cui il server ha ricevuto il messaggio NTP dal client;
- “Transmit Timestamp”, lungo 64bit di cui 32 rappresentanti i secondi in forma d’intero senza segno ed i restanti 32 una parte frazionale, è l’istante in cui il server ha inviato la riposta al client;
- “Optional Key”, lungo 32 bit e “Message Digest” lungo 128 bit, sono campi opzionali che permettono al client di condividere con il server una chiave di autenticazione segreta da 128 bit, al fine d’individuare eventuali attacchi di tipo “man-in-the-middle” che possono iniettare false risposte.

I quattro campi “Reference Timestamp” (T1), “Originate Timestamp” (T2), “Receive Timestamp” (T3) e “Transmit Timestamp” (T4) utilizzano come unità di tempo il secondo, detta “epoche” (“epochs”) contate a partire dal 1 Gennaio 1900 UTC, e che permetterà di utilizzare il sistema NTP fino all’anno 2036 [34] prima di terminare il ciclo completo. La più piccola frazione di tempo che può essere rappresentata in questo formato sono 232 picosecondi.

In Figura 2-16 è mostrato un pacchetto NTP catturato con il *tool* Wireshark[21].

[21] Software per analisi di protocollo (o “packet sniffer/analyzer), https://www.wireshark.org/

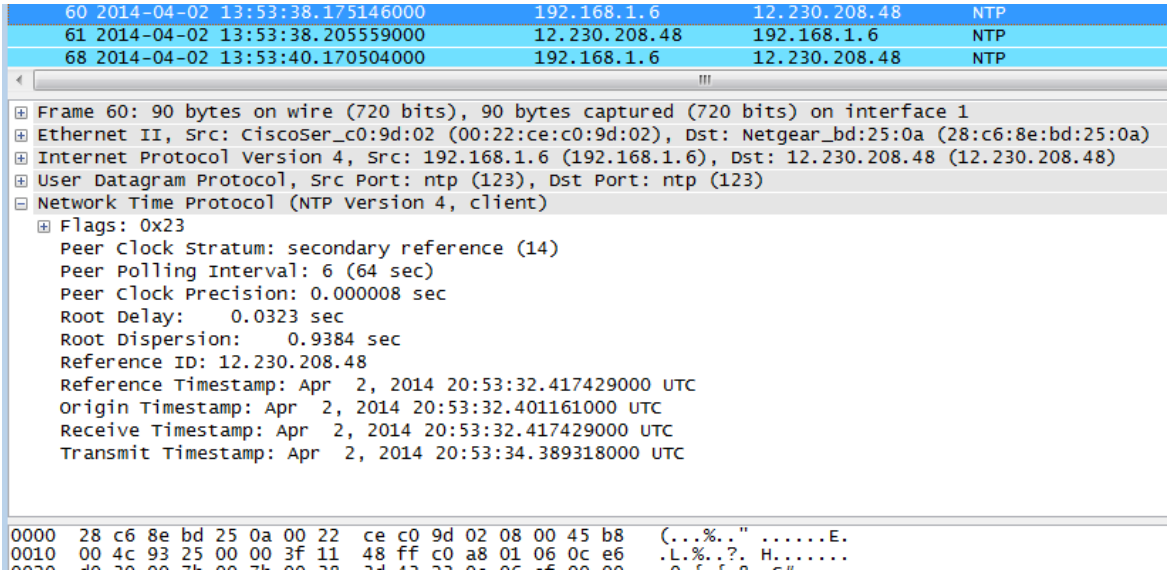


Figura 2-16 Pacchetto NTP analizzato con software “Wireshark”

Per convertire l’orario di sistema nei formati data e timestamp NTP, è necessario che venga prima determinato il numero di secondi *s* dall'epoca iniziale (“prime epoch”) per l'orario di sistema. La “*era”* è il quoziente intero, il timestamp è il resto intero:

$$era = s/2^{32},$$

$$timpestamp = s - era \cdot 2^{32}$$

I quattro campi T1, T2, T3 e T4 (Figura 2-17) guidano la funzione di “timekeeping” del client nell’allineamento temporale dell’orologio locale, iniziata dall’operazione di richiesta di sincronizzazione Client-Server che avviene solitamente con una frequenza, detta “*polling-rate*”, di 16 secondi.

In una transazione NTP il client può stimare il ritardo con il server come la differenza tra il tempo totale della transazione Client-Server ed il tempo impiegato dal server per processare la richiesta e generare la risposta, secondo l’equazione:

$$\delta = (T4 - T1) - (T3 - T2)$$

Mentre l’offset tra gli orologi client e server può essere calcolata come:

$$\theta = \frac{1}{2}[(T2 - T1) + (T3 - T4)]$$

Assumendo che il ritardo di percorso del pacchetto sia simmetrico in entrambe le direzioni *Client-Server* e *server-client*; qualora non sussistesse questa condizione, la sincronizzazione sarebbe affetta da una sistematica polarizzazione della metà della differenza tra i tempi di percorrenza dei pacchetti, nei tragitti di andata e ritorno.

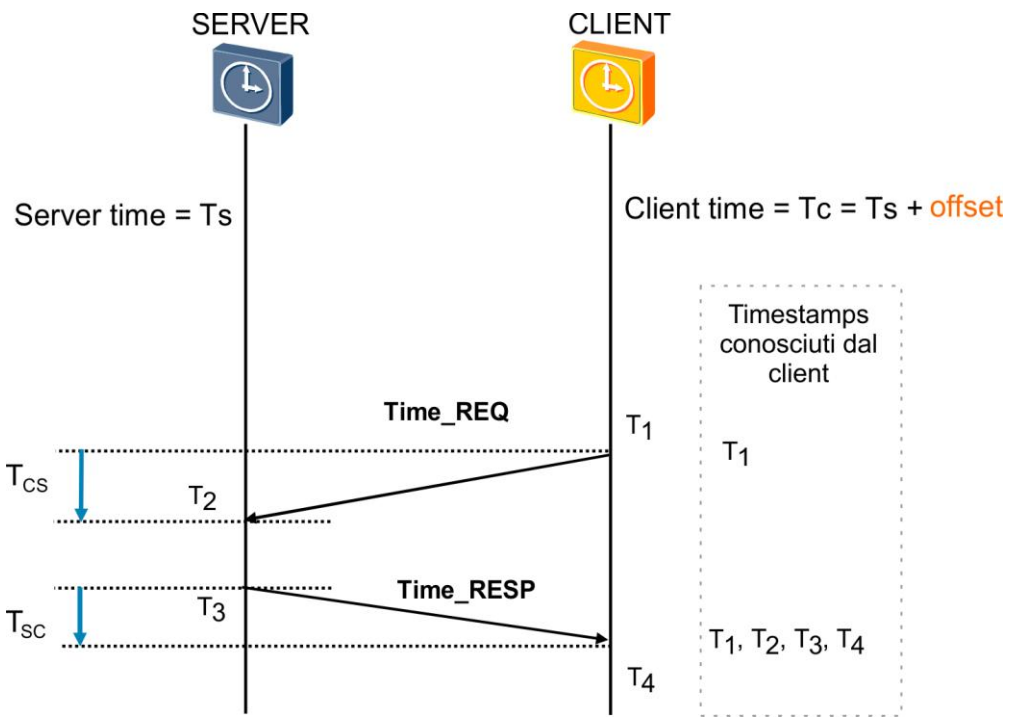


Figura 2-17 Meccanismo di messaggi NTP

Quando un client cerca di sincronizzarsi con un server, invia al server scelto un *burst* di 8 pacchetti NTP spaziati tra loro nel tempo di 2 secondi; il processo NTP utilizza la minore delle ultime 8 misurazioni di ritardo (δ_0, θ_0) come nuovi valori di aggiornamento per il client NTP.

Qualora il client NTP fosse configurato per poter operare con più server di riferimento, il client può selezionare il miglior candidato in termini di *stratum* più basso e minimi valori di *jitter* ed *offset*, operazione che avviene sfruttando l'algoritmo di Marzullo [36].

2.5 Precise Time Protocol (PTP, IEEE 1588)

Negli ultimi 20 anni organizzazioni accademiche e commerciali hanno mostrato interesse nello sviluppo di tecniche per la sincronizzazione degli orologi in dispositivi tipicamente utilizzati nelle applicazioni di misura e controllo. All'interesse comune è conseguita un'accesa discussione pubblica tra gli sviluppatori mondiali di tecnologie e standard volta alla standardizzazione di una tecnologia applicabile ai sistemi di automazione industriale distribuiti. Nel novembre del 2000 [37], in particolare, si verificò un livello di partecipazione sufficiente ad avviare un processo di normazione della sincronizzazione, tale da spingere la formazione di una commissione "ad hoc" in cerca di sponsorizzazioni; il comitato iniziale riunitosi per la prima volta nell'aprile del 2001 decise di chiedere il patrocinio del comitato tecnico per la tecnologia dei sensori della società delle strumentazione e misurazioni ("Technical Committee on Sensor Technology of the Instrumentation and Measurement Society") afferente allo "Institute of Electrical and Electronics Engineers" (IEEE). Il comitato, che radunava in sé figure tecniche di spiccato profilo nei diversi campi d'applicazione industriale, nonché membri del NIST[22] ("National Institute of Standards and Technology") ed organi militari, pubblicò nel novembre 2002 lo standard IEEE 1588-2002 ufficialmente intitolato *"Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems"*. Lo standard definiva il protocollo PTP ("Precision Time Protocol") una tecnologia "packet layer" (Tabella 2-8) che, partendo dal contributo dato da un programma di ricerca precedentemente avviato negli Agilent Laboratories sotto la guida del Dr. J.C. Eidson [38], si prefiggeva l'obiettivo di soddisfare quelle esigenze applicative di sincronizzazione delle reti a pacchetto per le quali il protocollo NTP non offriva sufficiente accuratezza, mentre il costo di un ricevitore GPS per nodo risultava economicamente non sostenibile, o addirittura il segnale GPS risultava inaccessibile [39]. Tra il 2002 ed il 2007, a seguito di continui incentivi al miglioramento, lo standard venne rivisto e nel luglio 2008, successivamente all'approvazione del "IEEE Revision Committee" (RevCom), venne pubblicato il nuovo standard IEEE 1588-2008, conosciuto anche con i nomi di PTPv2 ("PTP Version 2") e 1588v2. Quest'ultimo, rispetto al suo predecessore, migliora l'accuratezza, la

[22] "National Institute of Standards and Technology", agenzia federale del governo degli Stati Uniti d'America che si occupa di gestire e promuovere lo sviluppo di standard, tecnologie, e metodologie che favoriscono la produzione e il commercio.

precisione e la robustezza, sebbene sfrutti un formato di messaggi non compatibile con la versione del 2002 [40].

Tabella 2-8 Interfacce di sincronizzazione Physical Layer e Packet Layer

	Physical Layer	**Packet Layer**
User/network interface	SDH/SONET, SyncE, PDH	IEEE1588v2 (PTP), NTP
Dedicated sync interfaces	T1, E1, 2048kHz, 6MHz	1PPS, ToD

IEEE 1588 è un protocollo distribuito che è in grado di funzionare correttamente sia nelle infrastrutture di rete (non necessariamente limitate alla categoria Ethernet) costituite di soli dispositivi PTP che in quelle dove questi coesistono con altri dispositivi non-PTP; è stato specificamente progettato per installazioni "*plug & play*" a basso costo, con minimo dispendio di risorse computazionali e di banda dati. Lo standard specifica inoltre che gli orologi in tempo reale (*real-time*), organizzati in gerarchie di sincronizzazione *master-slave*, si sincronizzano tra loro mediante uno scambio di messaggi di temporizzazione PTP, attraverso i quali i dispositivi *slave* ricavano l'informazione di tempo con cui regolare i propri orologi locali.

PTPv2 fornisce la sincronizzazione sia per le implementazioni puramente di livello applicativo software (Figura 2-18 [41]), sia per quelle *"hardware assistite"* (Figura 2-19 [41]). Per la prima tipologia, notoriamente soggetta alle fluttuazioni dello *stack software*, sono state ottenute deviazioni nella temporizzazione dell'ordine delle decine di microsecondi [42], mentre per la seconda tipologia gli scostamenti possono scendere fino alle decine o centinaia di nanosecondi [41], dipendentemente dai dispositivi hardware utilizzati[23] e dalle condizioni del traffico di rete [43].

[23] Una questione chiave è la relazione tra la metrica (classificazione di pacchetto) e l'implementazione dello *slave servo*, basata su algoritmi proprietari.

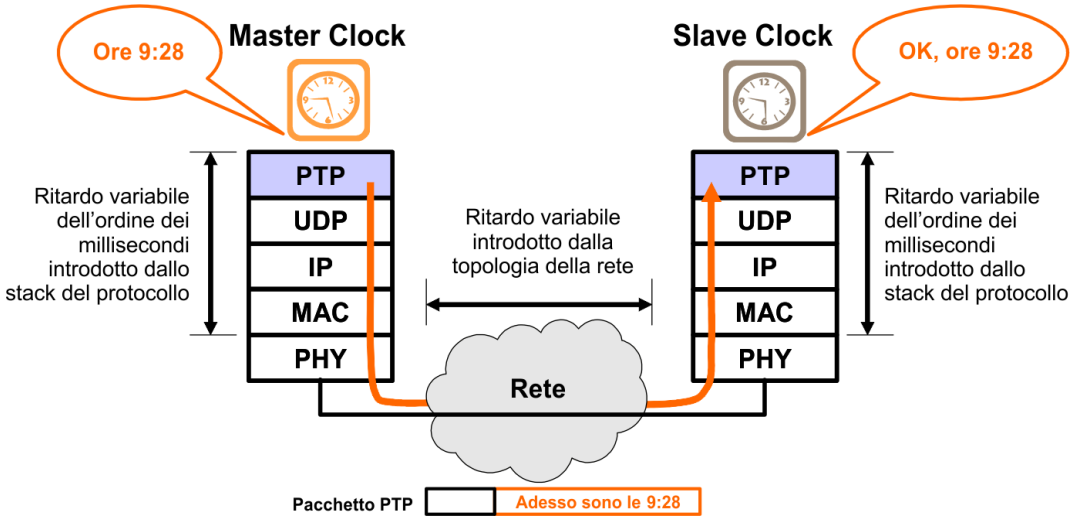


Figura 2-18 Timestamping PTP software

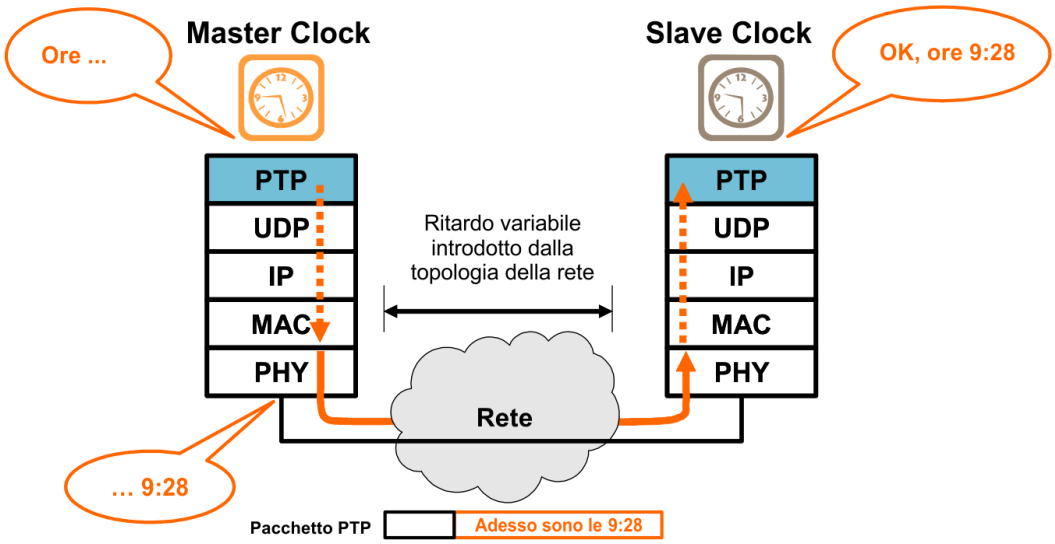


Figura 2-19 Timestamping PTP Hardware assistito

A differenza del SyncE che deriva le informazioni di clock dal flusso di bit in ingresso (*bit stream*), il 1588v2 è una soluzione puramente basata sullo scambio di pacchetti (*packet-based*), dove l'effettivo valore di clock viene passato all'interno dei *payload* di pacchetti speciali dedicati a tale compito.

Il vantaggio di utilizzare la sincronizzazione basata su pacchetti di rete è che i nodi tra gli orologi master e slave possono rimanere asincroni, evitando così costosi aggiornamenti d'impianti esistenti: solo i nodi slave che richiedono una precisa sincronizzazione di frequenza per comunicare eventualmente con gli altri elementi SONET/SDH di rete necessiteranno quindi di integrare i circuiti di estrazione del clock. Invece, il resto della rete a pacchetto può rimanere asincrono, al contrario di quanto avviene con i metodi di temporizzazione a livello fisico (come SyncE) dove necessita un circuito di temporizzazione sincrona ad ogni nodo. Un altro importante vantaggio del PTP è la sua capacità di trasmettere sia un preciso riferimento di frequenza, sia informazioni di fase, che risultano caratteristiche essenziali in applicazioni wireless, quali ad esempio LTE, WiMAX e W-CDMA.

Al di sotto dell'architettura basata sul paradigma master-slave, il sistema di distribuzione del tempo è costruito su più segmenti di rete su cui operano gerarchie diverse di orologi, volti a garantire che la temporizzazione e la sincronizzazione vengano mantenute tra la sorgente di riferimento ed i numerosi clienti PTP che sono distribuiti in tutta la rete.

Gli orologi PTPv2 usano una marchiatura hardware del tempo (*timestamping*) per segnare con precisione ogni pacchetto che attraversa la rete e che è in genere affetto da ritardi nella propagazione. Le possibili tipologie di orologio dell'architettura PTP sono i "Grandmaster" (GM), gli "Ordinary Clock", i "Boundary Clock" ed i "Transparent Clock".

I "Boundary Clock" (BC) ed i "Transparent Clock" (TC) servono a ridurre nella rete gli effetti complessivi dei fenomeni di ritardo ("Packet Delay Variation", PDV) e delle asimmetrie del mezzo, agevolando l'operazione di recupero della frequenza; l'aggiunta di BC e TC alla rete è essenziale per ridurre l'impatto degli effetti indesiderati e consentire ai dispositivi di rete di raggiungere accuratezze prossime al 1μs anche per le informazioni di tempo e di fase. Uno switch Ethernet con funzionalità BC o TC in grado di controllare l'impatto del traffico di rete sulla messaggistica PTPv2 è un dispositivo dotato del cosiddetto supporto "*on-path*" (Figura 2-20) [44].

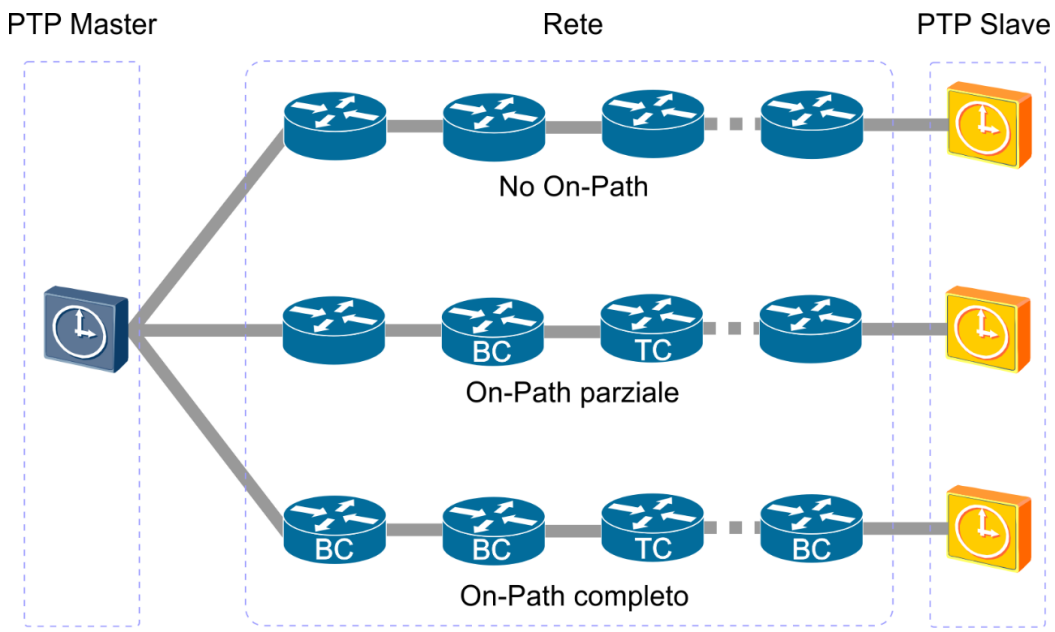


Figura 2-20 Supporto “On-Path” per le reti PTP

2.5.1 Timestamping

Una particolarità dell'architettura PTP è la separazione della parte *time-critical*, implementata a livello hardware, da quella protocollare puramente software che risulta dunque disaccoppiata dai rigidi requisiti temporali e può essere eseguita da un processo a bassa priorità su di un’unità di calcolo (CPU, “Central Processing Unit”) economica a basse prestazioni.

La sezione hardware consiste di un orologio real-time ad elevata precisione ed di un’unità TSU (“Time Stamp Unit”) per la generazione delle marcature temporali (“timestamp”); la componente software che implementa il protocollo PTPv2 viene interfacciata con questi due moduli hardware attraverso lo strato “OS Abstraction Layer” mentre le funzionalità del sistema operativo (OS) utilizzato vengono messe a disposizione ad un livello più alto dallo strato “OS layer” dove risiede l’intelligenza del PTP, come mostrato in Figura 2-21 [45].

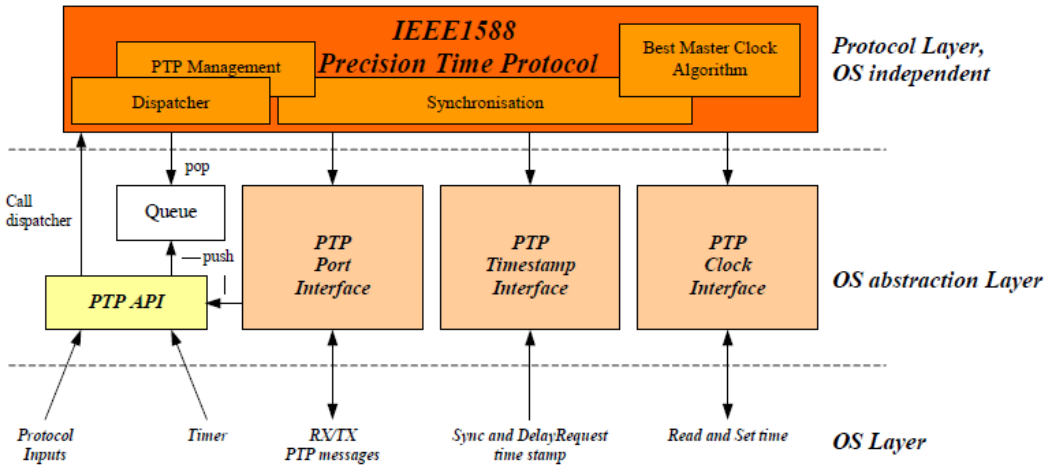


Figura 2-21 Architettura di una “Timestamp Unit” software

Il blocco “protocol dispatcher” garantisce l’esecuzione delle funzioni in un singolo processo, mentre il livello intermedio ingloba tutte le funzioni dipendenti dal sistema operativo. L’interfaccia denominata “Timestamp Interface” fornisce al protocollo PTP il *timestamp* individuato per i messaggi Sync e Delay_req (Figura 2-22). Per un elevato livello di accuratezza il timestamp è generato a livello hardware dal blocco TSU, altrimenti l’operazione è demandata a livello software. I timestamp di tipo software sono meglio generati mediante l’utilizzo di driver software dedicati per il OS, che agiscono al livello più vicino possibile al canale di trasporto fisico.

Il *real-time clock* locale è letto e regolato tramite il blocco “Clock Interface”; se la piattaforma non è dotata di un real-time clock, è ancora possibile utilizzare l’orologio del sistema operativo o una soluzione più specifica come i “*nanokernel*” degli OS derivati da Unix.

Il blocco “Port Interface” ha il compito di inviare e ricevere i messaggi PTP attraverso l’interfaccia *socket* dello *stack* IP, dove i requisiti di tempo possono essere trascurati perché il *timestamp* viene generato direttamente sul canale di trasporto [30].

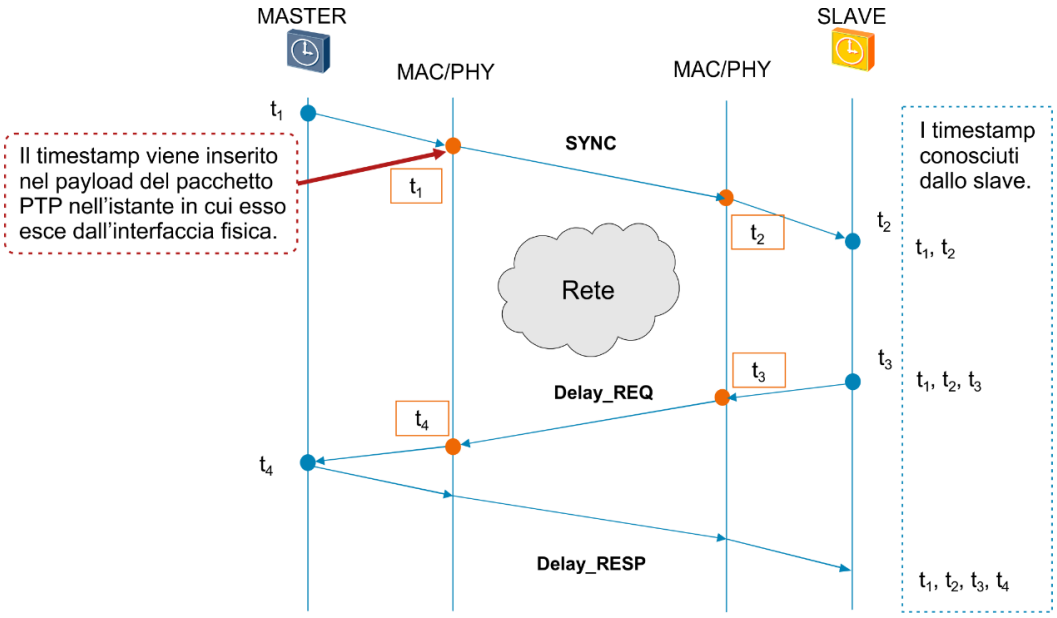


Figura 2-22 Meccanismo di messaggistica PTP Hardware Assistito

L'accuratezza di una implementazione PTP puramente software è fortemente dipendente dalla piattaforma utilizzata, dal carico della rete e dalla posizione in cui viene generato il *timestamp*: più questo è vicino allo strato fisico, più sarà accurato; una tipica applicazione basata su sistemi operativi Linux o Windows™ ha un'accuratezza in genere tra ±10 µs e ±200 µs [45]. L'implementazione software risulta dunque inadeguata per raggiungere accuratezze dell'ordine del microsecondo, pertanto è necessario l'impiego di un TSU basato su interfaccia MII ("Media Independent Interface") per marcare temporalmente i pacchetti nelle vicinanze del canale di trasporto (Figura 2-23).

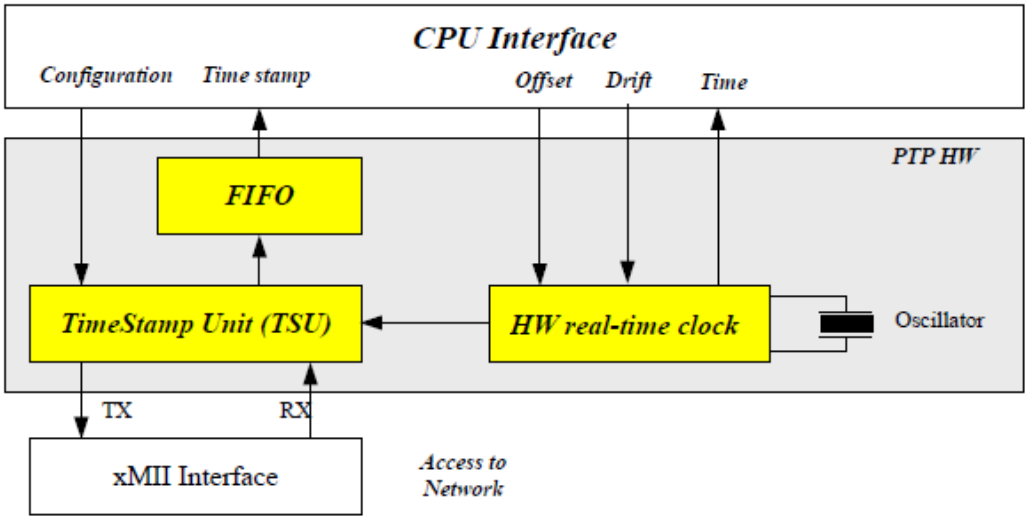


Figura 2-23 Architettura di una TSU hardware assistita da interfaccia MII

Il tempo assoluto è mantenuto dal *real-time clock* che conta i battiti dell'oscillatore, solitamente un TXCO ("Temperature-Compensated Crystal Oscillator"), successivamente convertiti dal *driver* software in *epoche* in formato simile al POSIX[24], eccetto per il campo dei secondi PTP lungo 48bit e che rende così il *timestamp* lungo 10 ottetti. Infine, quando viene rilevato un ottetto SOF ("Start-Of-Frame") Ethernet sul canale, il *timestamp* PTP viene agganciato con un *latch* al contatore.

Il *real-time clock* è dotato di un'unità di correzione della fase (*offset*) e della frequenza (*drift*) di oscillazione, necessaria per effettuare le regolazioni del clock e raggiungere rapidamente la convergenza del sistema; in particolare la compensazione dell'*offset* aggiusta il valore assoluto dell'orologio locale affinché coincida con quello di riferimento, mentre la compensazione del *drift* effettua tra questi una sincronizzazione di frequenza, secondo l'equazione:

$$f(t)_{slave} = f(t)_{master} + \delta + \varepsilon_q$$

Dove le $f(t)$ sono le frequenze di clock, δ è il *drift* e ε_q è l'errore di quantizzazione.

[24] Valore numerico intero che esprime il numero di secondi e nanosecondi trascorsi dalla mezzanotte (UTC) del 1 gennaio 1970 che presenza il vantaggio di poter eseguire raffronti tra date con semplici operatori matematici.

In realtà la compensazione in frequenza è un processo piuttosto complesso e necessita di periodi di tempo lunghi per essere raggiunta; la qualità di una sua implementazione può essere essenzialmente caratterizzata da:

- tempo di transizione, ovvero dal tempo richiesto dal clock locale per sincronizzarsi sia in fase che in frequenza al proprio riferimento;
- stabilità ed immunità alle interferenze, ottenute ad esempio sfruttando controlli adattativi, volti a rendere stabile la sincronizzazione una volta ottenuta e contemporaneamente a rispondere prontamente alle variazioni permanenti nella topologia di rete.

2.5.2 Meccanismo di sincronizzazione PTP

Prima di esaminare ciascuno dei singoli messaggi PTP, è utile esaminare prima gli scambi di messaggi che si svolgono all'interno di un dominio PTP. Ci sono due fasi per stabilire o accedere ad un dominio PTP.

Nella prima fase viene stabilita la gerarchia dei clock per determinare quali ne fanno parte e quale tra questi è designato come “master”; ogni porta di ogni orologio (che sia OC o BC) si assegna il proprio ruolo di “master” o membro (*member*) in base alle informazioni contenute nel messaggio “Announce” ricevuto dagli orologi che si trovano nello stato di “master”. La gerarchia viene determinata utilizzando l’algoritmo BMC che è eseguito continuamente per reagire prontamente ad eventuali variazioni dell’architettura di rete.

Stabilita la gerarchia, si avvia la seconda fase che consiste nella *sincronizzazione* degli orologi, costituita da due procedure parallele: una fase di *sintonizzazione*, ed un’altra di determinazione dell’offset e del ritardo di propagazione (“*path-delay”*).

La sintonizzazione, responsabile di regolare la velocità dello slave clock a quella del master, è raggiunta inviando un flusso continuo di messaggi “Sync” dal master allo slave, con un rate che va da un messaggio al secondo ad alcuni messaggi per secondo per sovvenire alla suscettibilità degli oscillatori locali alle variazioni ambientali [46].

L'istante di trasmissione t_1 e quello di ricezione t_2 dei messaggi *Sync* sono misurati dallo slave clock tramite il proprio oscillatore locale; la frequenza dello slave clock deve essere regolata fintanto che non si raggiunge l'uguaglianza degli intervalli:

$$t_1^{k+1} - t_1^k = t_2^{k+1} - t_2^k$$

Ovvero,

$$t_2^k - t_1^k = t_2^{k+1} - t_1^{k+1}$$

Il trasporto del *timestamp* t_1 dal master allo slave può avvenire secondo due diverse modalità:

- **"Two-step mode"**. Il master invia periodicamente agli slave un messaggio di sincronizzazione (*Sync*) con una prima stima del valore di tempo (*timestamp*); parallelamente, con il supporto di hardware dedicato sullo strato fisico, viene misurato nel modo più preciso possibile l'istante di tempo in cui il messaggio esce dal mittente [39]. Questo valore è viene inviato in un successivo messaggio (*Follow-up*) agli slave, i quali a loro volta misurano nel modo più accurato possibile l'istante di ricezione di entrambi i messaggi con cui potranno correggere il valore di offset rispetto al master.

- **"One-step mode"**. Il master invia periodicamente agli slave un messaggio di sincronizzazione il valore preciso di tempo "on-the-fly" già nel messaggio *Sync*, calcolato tramite supporto di hardware dedicato, senza necessità di ulteriori messaggi di "Follow-up". Gli slave, analogamente a quanto accade nel "two-step mode" misurano nel modo più accurato possibile l'istante di ricezione dei i messaggi con cui correggere il valore di offset rispetto al master.

La determinazione dell'*offset* temporale tra master e slave, ad esempio in termini di differenza tra i corrispettivi *time-of-day*, è resa possibile dalla misura dell'intero tempo di viaggio di andata e ritorno (round-trip time) dei pacchetti, ovvero del cosiddetto "two-way delay".

Per la misura del ritardo di propagazione nella direzione master-slave (*downlink*) sono disponibili i tempi t_1 e t_2, ricavabili dal messaggio *Sync*; tramite il messaggio "Delay_Req" il sistema viene a conoscenza del ritardo nella direzione slave-master (*uplink*) mediante i tempi t_3 e t_4, quest'ultimo riportato allo slave in termini di *time-stamp* attraverso il messaggio "Delay_Resp". Nell'ipotesi di ritardo simmetrico[25] nelle due direzioni rappresentato dai messaggi *Sync* e *Delay_Req*, il ritardo e l'offset rispetto al master possono essere calcolati tramite

$$delay = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2}$$

$$offset = t_2 - (t_1 + delay)$$

Effettuando le sostituzioni

$$offset = t_2 - \left[(t_1 + \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2}\right] =$$

$$= t_2 - t_1 - \frac{t_2}{2} + \frac{t_1}{2} - \frac{t_4}{2} + \frac{t_3}{2} =$$

$$= \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2}$$

Considerati due gruppi consecutivi di messaggi *Sync* e *Follow-up*, la deriva (*drift*) tra master e slave, intesa come tasso di variazione di fase, può essere ricavata comparando il $\Delta time$ tra due messaggi *Sync* successivi

$$drift = \frac{\Delta time_{slave} - \Delta time_{master}}{\Delta time_{master}}$$

Nella Figura 2-24 è riportato un esempio di sincronizzazione PTP ideale, ovvero con perfetta simmetria dei *path* [47].

[25] In questo caso, il ritardo medio del percorso può essere utilizzato per calcolare il ritardo unidirezionale<.

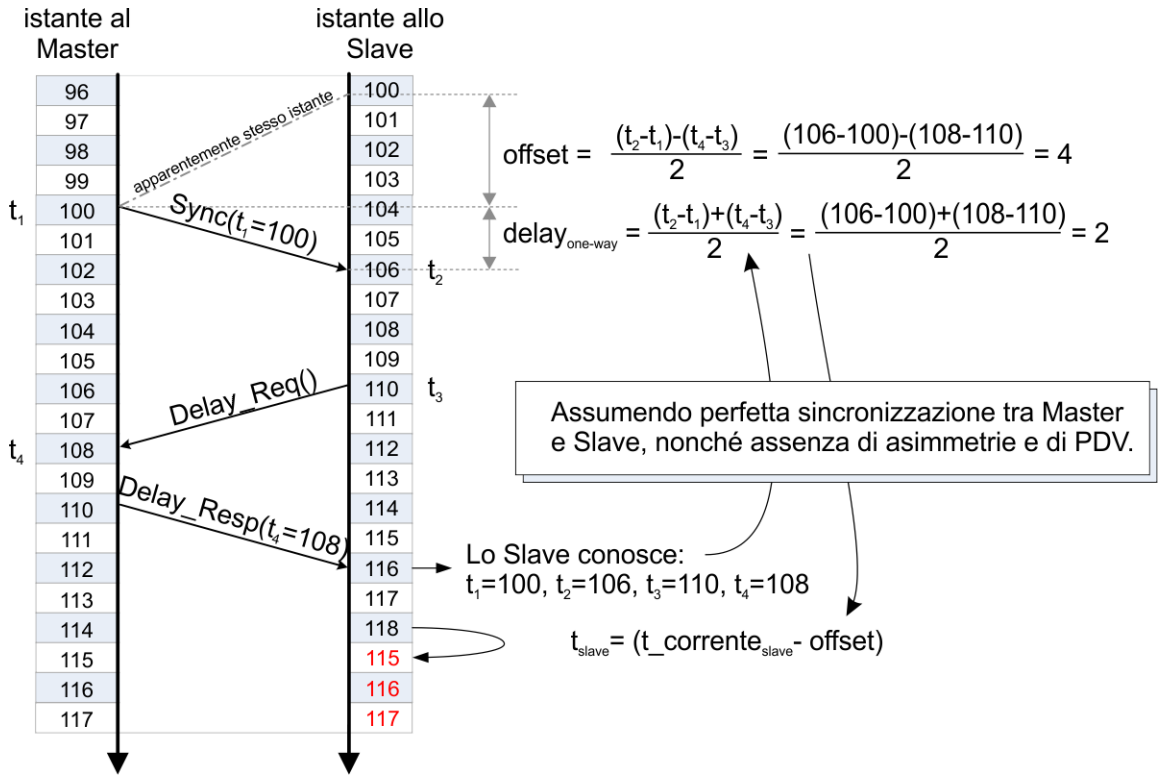


Figura 2-24 Esempio di meccanismo di sincronizzazione PTP

Nei casi reali i canali di trasporto però non sono simmetrici: nei cavi Ethernet, ad esempio le coppie “twisted-pairs” avvolte con periodo “twist” differente (Figura 2-25), introducono ritardi di propagazione differenti sulle linee di trasmissione e ricezione; un cavo di categoria CAT5 o CAT6 le cui caratteristiche sono definite nello standard IEC11801, introduce mediamente un ritardo di 50 ns ogni 100 m. Per raggiungere un elevato grado di simmetria è necessario ricorrere alla fibra ottica, utilizzando due lunghezze d’onda diverse per le due opposte direzioni di propagazione [48].

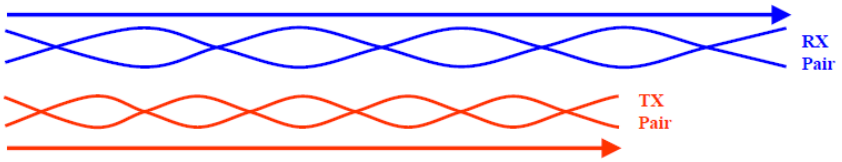


Figura 2-25 Differenza di avvolgimento in cavi "*twisted-pairs*" Ethernet

È interessante infine notare che il PTP, che fa parte della famiglia di protocolli TWTT ("Two-Way Time Transfer")[26] come l'NTP, presenta alcune analogie con i principi di funzionamento di entrambi i protocolli NTP e ed ACR ("Automatic Clock Recovery") unidirezionale, come mostrato nella

Figura 2-26 [30].

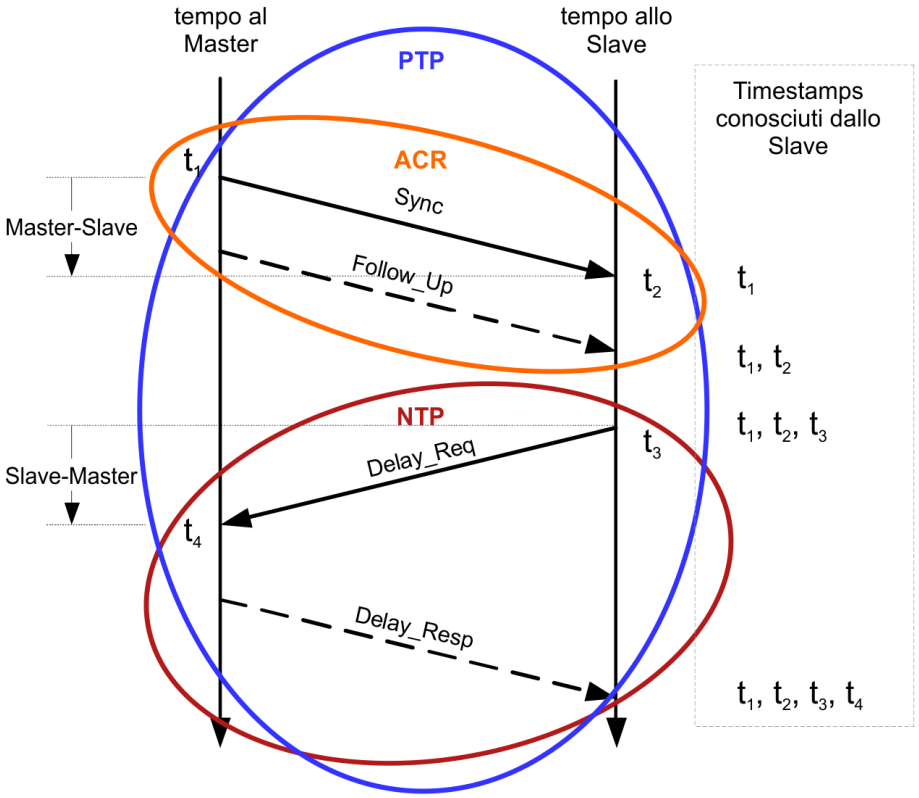


Figura 2-26 Analogie tra tecniche PTP, ACR ed NTP

[26] I protocolli TWTT utilizzano flusso di traffico bidirezionale tra un server (master) ed un client (slave) per scambiare le informazioni sui timestamp.

2.5.3 Messaggistica PTP

Ci sono un totale di dieci diversi tipi di messaggi PTP, divisi in due gruppi: "Event" e "General". I messaggi di evento ("Event") sono da considerare *time-critical*[27] poiché l'accuratezza del loro *timestamp* ha un impatto diretto sull'accuratezza del riferimento di tempo distribuito.

I messaggi del tipo "Pdelay_XXX" vengono utilizzati per determinare il tempo di propagazione tra clock sullo stesso collegamento *punto-punto*, e non vengono mai inoltrati da BC e TC.

Il protocollo utilizzato per il trasporto è l'UDP ("User Datagram Protocol", Figura 2-27) la cui porta 319 è utilizzata per la messaggistica "Event" e la 320 per la messaggistica "General" [49].

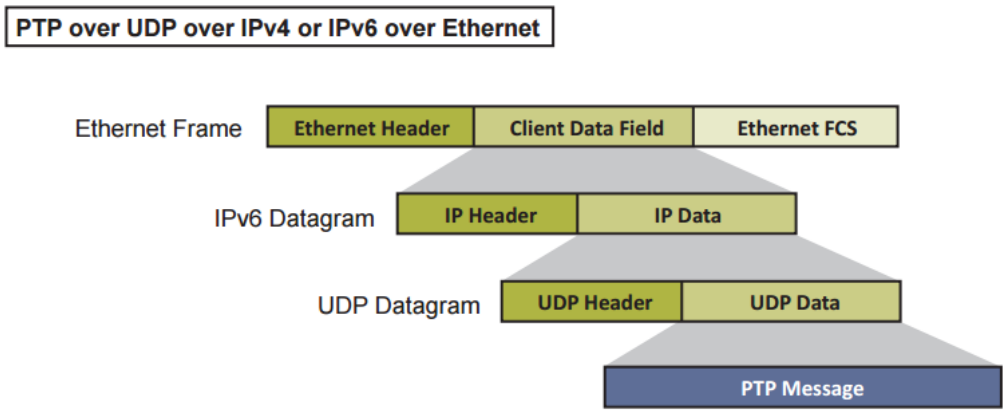


Figura 2-27 Messaggio PTP nel frame Ethernet

I messaggi della famiglia "Event" sono (Tabella 2-9):

- *Sync*, messaggio nella direzione da master a membro marchiato temporalmente sia alla partenza che alla ricezione (frequenza minima 1 pacchetto ogni 16 s, frequenza massima 128 pacchetti per secondo);
- *Delay_Request*, messaggio nella direzione da membro a master marchiato temporalmente sia alla partenza che alla ricezione (frequenza minima 1 pacchetto ogni 16 s, frequenza massima 128 pacchetti per secondo);

[27] Informazioni urgenti che devono essere presentate tempestivamente.

- *Delay_Response*, messaggio nella direzione da master a membro che include il timestamp del Delay_Request;
- *Pdelay_Req* e *Pdelay_Resp*, messaggi utilizzati per stimare il ritardo su un collegamento tra 2 clock che agiscono in modalità P2P.

Tabella 2-9 Descrizione messaggi PTP di tipologia "Event"

Gruppo "Event"				
Messaggio	**Funzione**	**Contenuto**	**bits**	**Descrizione**
Sync	Clock Sync	originTimestamp	80	48 bit per i secondi, 32 per i nanosecondi
Delay_Req	Clock Sync	originTimestamp	80	Epoche, secondi, nanosecondi (16,32,32 bit)
Pdelay_Req	Delay Calc	originTimestamp	80	Epoche, secondi, nanosecondi (16,32,32 bit)
		reserved	10	Riservato
Pdelay_Resp	Delay Calc	receiveReceiptTime-stamp	80	Epoche, secondi, nanosecondi (16,32,32 bit)
		requestingPort Identity	10	Identità del clock P2P che ha effettuato Pdelay_Req

Il dispositivi membro utilizzano i *timestamp* riportati nei messaggi per sincronizzarsi al master.

Diversamente dai messaggi di evento, la messaggistica "General" (Tabella 2-10) non necessita di *timestamping*; essa è composta dai messaggi:

- *Announce*, è un messaggio periodico utilizzato dal BMC per stabilire la gerarchia master-slave (frequenza minima 1 pacchetto ogni 16s, frequenza massima 8 pacchetti per secondo). Nel campo *clockClass* trasporta l'informazione di livello di qualità ("Quality Level", QL)[28], analoga ai sistemi SONET/SSH o SyncE;

[28] Lo standard utilizza sezioni dedicate di questo campo per codificare i valori di QL, al fine di mantenere la coerenza e la tracciabilità tra i vari metodi di distribuzione della frequenza.

- *Follow_Up*, esiste solo nella modalità “two-step” ed è inviato con il time-stamp accurato dal master immediatamente dopo lo *Announce*;
- *Delay_Resp*, utilizzato dal master per inviare allo slave il *timestamp* relativo all’arrivo della richiesta *Delay_Req*;
- *Pdelay_Resp_Follow_Up*, messaggio di supporto nell’implementazione *peer-delay* (P2P);
- *Management*, messaggi di gestione utilizzati per effettuare operazioni di “query” ed “update” dei data-set presenti sui clock; sono utilizzati inoltre per personalizzazioni del protocollo o la gestione dell’inizializzazione e dei dis-servizi;
- *Signaling*, sono utilizzati per tutte le altre comunicazioni tra i dispositivi PTP.

Tabella 2-10 Descrizione messaggi PTP di tipologia “General”

Gruppo “General”				
Messaggio	**Funzione**	**Contenuto**	**Bits**	**Descrizione**
Announce	BMC	originTimestamp	80	48 bit per i secondi, 32 per i nanosecondi
		currentUtcOffset	16	UTC Offset
		reserved	8	Riservato
		grandmasterPriority1	8	Priorità designata
		grandmaster-ClockQuality	32	Qualità del clock
		grandmasterPriority2	8	Priorità designata
		grandmasterIdentity	64	Identità del GrandMaster
		stepsRemoved	16	Step di distanza con il PRC
		timeSource	8	Master time source
Follow_Up	Clock Sync	preciseOriginTime-stamp	80	Epoche, secondi, nanose-condi (16,32,32 bit)
Delay_Resp	Clock Sync	receiveTimestamp	80	Epoche, secondi, nanose-condi (16,32,32 bit)

		requestingPort Identity	80	
PDelay_Resp_Follow_Up	Delay Calc	responseOriginTimestamp	80	Epoche, secondi, nanosecondi (16,32,32 bit)
		requestingPort Identity	10	Identità del clock P2P che ha effettuato Pdelay_Resp
Signaling	TLV pass	targetPort Identity	80	Identità della destinazione
		TLV	N	Target, Length, Value
Management	DataSet	targetPort Identity	80	Identità della destinazione
		startingBoundaryHops	8	Numero di BC a cui è permessa la ritrasmissione
		boundaryHops	8	Numero di ritrasmissioni di BC rimanenti
		reserved/Action field	8	Get, Set, Response, Command, Acknowledge
		reserved	8	Riservato
		managementTLV	M	TLV

In generale si hanno messaggi di “Sync” inviati periodicamente dal Master per la compensazione della deriva (“Drift Compensation”) e la stima del ritardo (“Delay Measurement”), in cicli di periodo fondato su potenze di 2^n secondi, con “n” nell’intervallo [-7,6] (il default è n=1). La frequenza ottimale dei messaggi “Sync” si basa sulla stabilità dell’oscillatore.

Il “Delay_Req” è utilizzato invece per la stima del ritardo e nella maggior parte dei casi risulta essere molto meno frequente del “Sync”, in quanto si assume che i ritardi non cambino rapidamente ed in modo che il carico di rete non cresca eccessivamente con il numero di apparati Slave [48].

La modalità di default scambio dei messaggi PTP è il “Multicast”[29], il cui indirizzamento è registrato e conosciuto da tutti gli orologi PTP che corrisponde solitamente a:

- “224.0.1.129”, per reti IPv4;

[29] L’utilizzo del PTP in linea di principio può avvenire su qualsiasi bus che supporta il “Multicast”, non necessariamente Ethernet.

- “FF0x::181” per reti IPv6.

La messaggistica di tipo *peer-delay* (P2P) utilizza invece un indirizzamento proprio:

- “224.0.0.107”, per reti IPv4;
- “FF02::6B”, per reti IPv6.

Non essendo non dovendo essere trasmessa su domini (o reti) differenti, la messaggistica P2P ha un “time-to-live” (TTL)[30] di rete pari a 1 sulle reti IPv4, o un “*hop*” pari a 0 sulle reti IPv6.

La metodologia “Multicast” presenta tuttavia lo svantaggio che ciascun clock del dominio riceve i messaggi destinati a tutti gli altri orologi e deve affrontare un’operazione di filtraggio che può causare problematiche di scalabilità, in quanto il processore del sistema client potrebbe andare facilmente in saturazione; infatti, dovendo essere il client l’elemento più economico dell’ecosistema PTP, la minimizzazione della potenza di calcolo e della banda consumata sono una priorità in fase di progettazione e questioni in contrasto con la scalabilità del metodo “Multicast”. Inoltre nelle reti di dati spesso la trasmissione di *upstream* Multicast non è permessa [50]. Per ovviare a queste problematiche, facilmente verificabili nelle reti degli operatori di telecomunicazioni, lo standard PTPv2 ha introdotto la possibilità di utilizzo della modalità “Unicast” in alternativa al “Multicast”, richiesto appunto nelle reti di telecomunicazioni per effettuare regolazioni fini ed ottimizzare così le performance della rete. Nella modalità “Unicast” lo slave necessita di conoscere solamente gli indirizzi dei master di riferimento, attraverso un’opportuna configurazione statica sul dispositivo o a mezzo di un meccanismo automatico quale protocollo DHCP (“Dynamic Host Configuration Protocol”)[31]; lo slave deve richiedere al master una trasmissione “Unicast” per ogni tipologia di richiesta (ad es. Announce, Sync, Delay_Req e Delay_Res), meccanismo definito nella clausola 16 dello standard IEEE 1588-2008. Il dispositivo slave può successivamente negoziare la frequenza di scambio dei messaggi PTP, garantita solo per

[30] Campo a 8 bit, utilizzato come contatore e decrementato di un “hop” ogni volta che il pacchetto IP raggiunge un router. Se questo contatore arriva a zero il pacchetto viene eliminato dalla rete.

[31] Protocollo di rete di livello applicativo implementato come servizio che permette ai dispositivi di una certa rete locale di ricevere automaticamente, ad ogni richiesta di accesso a una rete IP, la configurazione necessaria operare sulla una rete stessa.

un tempo limitato, ma che può essere successivamente rinegoziata attraverso la messaggistica di segnalazione.

Il IEEE 1588-2008 è un protocollo complesso studiato per essere utilizzato in diversi ambiti applicativi, pertanto alcune parti del protocollo sono mirate per specifiche applicazioni e potrebbero non essere adatte ad altri contesti, rendendo quindi difficile capire quali sezioni possono essere utilizzate in un particolare ambiente.

La clausola 19.3.1.1 della IEEE 1588-2008 introduce così il concetto di "profilo PTP" ("*PTP profile*"), inteso come insieme di particolari combinazioni di opzioni e valori di attributi (necessari o proibiti) volti a supportare l'interoperabilità tra apparecchiature progettate per uno specifico dominio applicativo. Ad esempio, la "ITU- T Recommendation G.8265.1-2010" definisce quello che è colloquialmente noto come "Profilo Telecom" ("*Telecom Profile*"), finalizzato alla distribuzione di un riferimento di frequenza[32] accurato su reti a pacchetto e che può essere utilizzato in conformità con le pratiche di sincronizzazione giù esistenti, principalmente per consentirne l'interoperabilità con le reti SONET/SDH e SyncE.

Dato che il profilo Telecom si basa su messaggi "Unicast" (

Figura 2-28) la negoziazione di questo servizio è abilitata di default nei dispositivi compatibili con il profilo. Lo slave inizia la comunicazione con il GM attraverso una richiesta di servizio utilizzando il processo descritto nella clausola 16 del G.8265.1, che consiste nell'invio di un messaggio di segnalazione contenente un REQUEST_UNICAST_TRANSMISSION TLV al GM che risponde con un GRANT_UNICAST_TRANSMISSION TLV contenente la stessa lista di parametri della *request*. È interessante notare che, mentre il IEEE 1588-2008 generalmente consente al master di ridurre la frequenza dei messaggi, nel "Telecom Profile" il master deve invece negare la richiesta da parte dello slave di ridurre la frequenza dei messaggi, al fine di evitare il rischio di offrire allo slave un servizio ridotto che non è in grado di

[32] La raccomandazione ITU-T G.8275.1-2014 definisce invece il profilo PTP per la distribuzione di tempo e fase.

soddisfare gli stringenti vincoli di performance dei servizi di telecomunicazioni a cui è destinato [50].

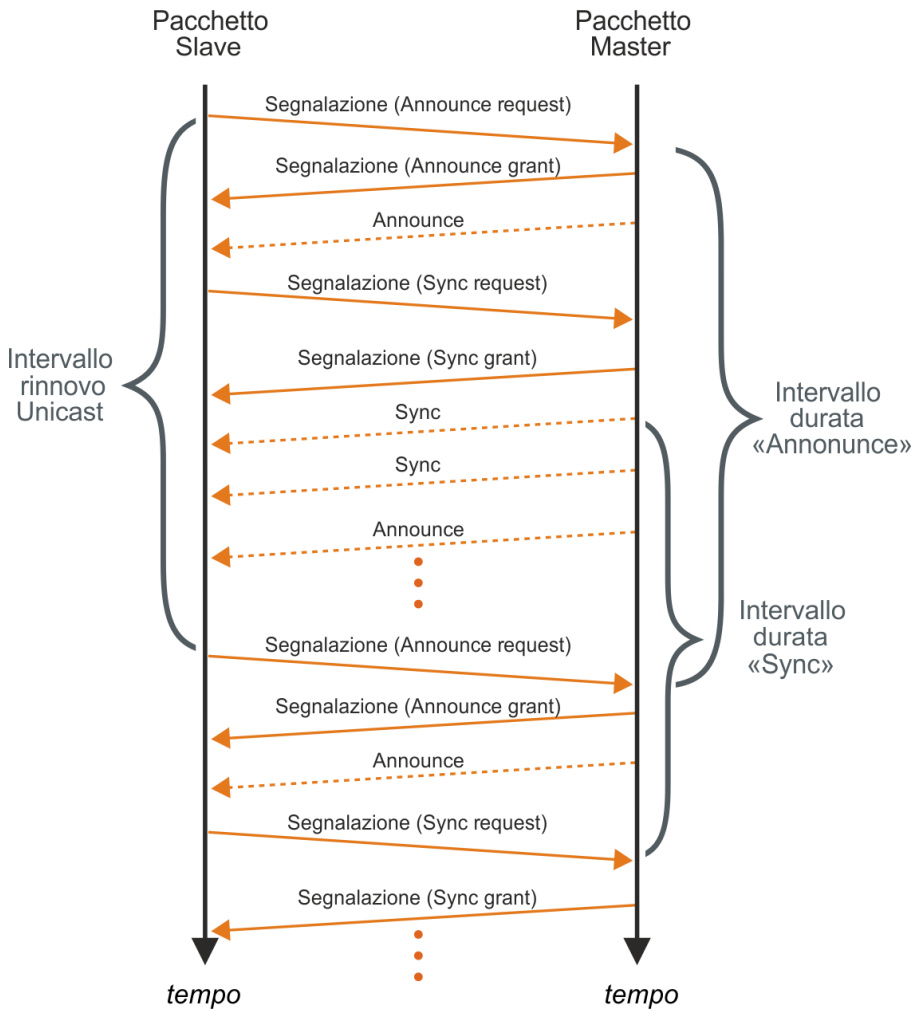


Figura 2-28 Scambio messaggi PTP in modalità “Unicast” [51]

2.5.4 Formato messaggi PTP

Tutti i messaggi PTP costituiti da un'intestazione (“header”), un corpo (“body”) e un suffisso (“suffix”):

- l’intestazione è la parte iniziale di ciascun messaggio PTP, formata da un generico *packet header* composto da 34 byte;
- il contenuto del corpo identifica la tipologia di messaggio PTP;

- il suffisso è un campo opzionale che può essere riempito con degli “0” di *padding* o con una “*message extension*” del protocollo, come espansione delle funzioni PTP.

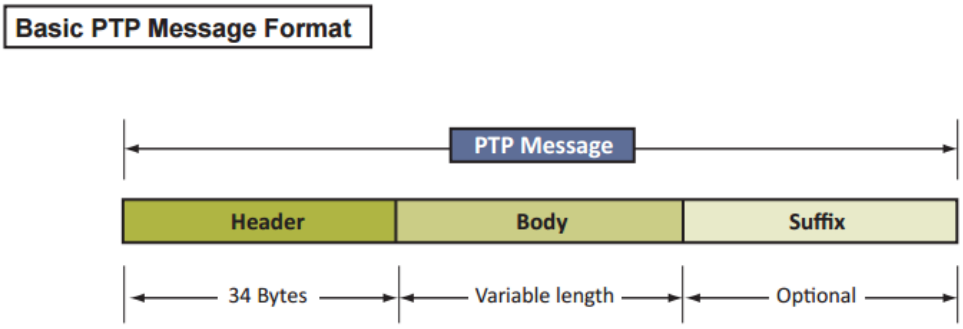


Figura 2-29 Formato del messaggio PTP [49]

Il meccanismo di estensione delle funzionalità del PTP è basato sul costrutto TLV (“*Type, Value, Length*”) dove il “type” può essere: “standard”, “extension”, “experimental” e “reserved”. Costruttori ed enti di normalizzazione possono utilizzare i *type* TLV per estendere le funzionalità in base alle nuove esigenze; in particolare i TLV di tipo “experimental” per facilitare le fasi di sperimentazione di estensioni candidate a divenire standard nelle versioni future del protocollo.

Lo *header* generico per la messaggistica PTP (Tabella 2-11) contiene i seguenti campi:

- *transportSpecific*. “0” se il messaggio PTP è utilizzato dallo IEEE1588, “1” se utilizzato dallo 803.1as;
- *messageType*:
  - 0: Sync
  - 1: Delay_Req
  - 2: *Pdelay_Req*
  - 3: *Pdelay_Resp*
  - 4-7: riservati
  - 8: *Follow_Up*

- 9: *Delay_Resp*
- A: *Pdelay_Resp_Follow_Up*
- B: *Announce*
- C: *Signaling*
- D: *Management*
- E-F: riservati

- *versionPTP*, indica la versione usata dal protocollo;
- *messageLength*: indica la lunghezza del messaggio PTP;
- *domainNumber*: indica il dominio di afferenza del mittente del messaggio PTP;
- *correctionField*: è il valore di correzione espresso in nanosecondi;
- *sourcePortIdentity*: indica l'ID dell'orologio che invia i messaggi;
- *sequenceId*: numero che indica la relazione di sequenzialità tra il messaggio PTP ed i consecutivi;
- *controlField*: dipendente dal tipo di messaggio;
- *logMessageInterval*: indica l'intervallo d'invio dei messaggi, dipendente dal tipo di messaggio.

Tabella 2-11 Descrizione *header* del messaggio PTP

Bits								**Ot-tetto**	**Off-set**
7	**6**	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**	**0**		
TransportSpecific				MessageType				1	0
Reserved				VersionPTP				1	1
MessageLength								2	2
DomainNumber								1	4
Reserved								1	5
FlagField								2	6
CorrectionField								8	8
Reserved								4	16
SourcePortIdentity								10	20
SequenceId								2	30
ControlField								1	32
LogMessageInterval								1	33

2.5.5 Grandmaster Clock

Il “Grandmaster clock” (GM) è l’orologio riferimento di rango più elevato nel suo dominio[33] di rete, poiché rappresenta la *sorgente primaria di riferimento* (PRS, “Primary Reference Source”) per tutti gli altri elementi PTP presenti nel dominio. È solitamente agganciato ad una sorgente di riferimento ad elevata precisione, come una ricevitore GPS o un orologio atomico; qualora non fosse necessario avere in una rete locale (LAN) un accurato

[33] Lo ITU-T G.8265.1 definisce un "dominio" come raggruppamento logico tra orologi tra loro comunicanti attraverso il protocollo PTP. Esiste un solo orologio PTP master attivo per dominio, anche se possono essere disponibili altri orologi master alternativi.

riferimento esterno all'UTC, il Grandmaster può operare sfruttando il proprio oscillatore locale nella modalità "*free-run*".

Nella stessa rete possono coesistere più riferimenti "Grandmaster", sia sotto forma di singolo dispositivo *stand-alone* che di modulo plug-in o "*blade*" da integrare in armadi SSU ("Synchronization Supply Unit") o BITS ("Building Integrated Timing Supply") preesistenti.

2.5.6 Ordinary Clock

Gli "Ordinary Clock" (OC) sono la tipologia più popolosa dell'architettura PTP poiché sono in genere i nodi terminali della rete che distribuiscono la sincronizzazione ai dispositivi connessi. Che siano implementati su interfaccia plug-in o dispositivo stand-alone, possono operare sia come master che slave e sono formalmente definiti come orologi con una sola porta PTP.

2.5.7 Boundary Clock

I "Boundary Clock" (BC) sono degli *switch* di rete descritti già nella IEEE 1588-2002 e definiti come orologi PTP con più porte PTP, ciascuna delle quali serve un diverso segmento (*path*) di rete PTP, agendo come interfaccia di separazione tra diversi domini PTP. I BC intercettano e processano tutta la messaggistica PTP, lasciando inalterato il traffico restante, alla stregua di un classico router o switch di rete. Sono dunque degli orologi che incorporano la funzionalità di *switching*, in grado di creare domini di sincronizzazione segmentando un *path* tra orologi master e slave: il traffico dati passa attraverso lo switch del BC, mentre i messaggi di sincronizzazione in ingresso vengono utilizzati per sincronizzare l'orologio stesso del BC.

Un BC termina quindi il flusso PTP in ingresso, recupera clock e timestamp, ed infine genera un nuovo flusso PTP: nel BC (Figura 2-30 [52]) sono effettivamente presenti in configurazione "back-to-back" uno slave clock per il recupero del clock ed un master clock per la rigenerazione i pacchetti PTP.

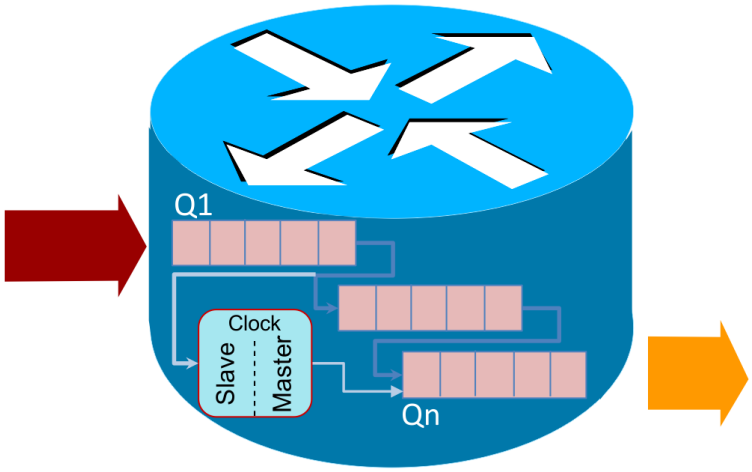


Figura 2-30 Boundary Clock

Questa tipologia di orologi ha lo scopo di sostituire i classici switch Ethernet al fine di mitigare gli effetti di ritardo sui pacchetti di sincronizzazione (fenomeno di disturbo noto come "Packet Delay Variation", PDV): l'unico contributo PDV (per *hop*) è quello del BC (Figura 2-31) e il collegamento stesso e pertanto il PDV cumulativo e l'asimmetria risultano notevolmente ridotte [53].

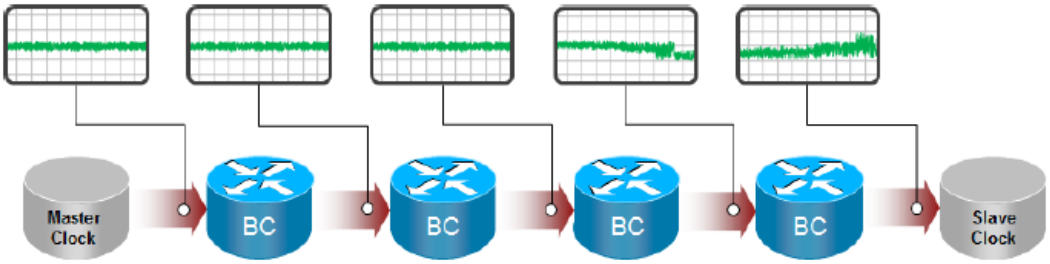


Figura 2-31 Effetti dei Boundary Clock sull'accumulo della PDV

Ci sono due fonti di PDV che saranno presenti all'uscita di ogni BC:

- accumulazione del clock wander. Ogni BC recupera il clock e rigenera un nuovo segnale di temporizzazione che non coincide perfettamente con il clock di riferimento del Grandmaster; questo può portare all'introduzione di wander a bassa frequenza e che può accumularsi nelle catene di BC. Questa è concettualmente la

stessa fonte di wander che è conosciuta in tecnologie che utilizzano livelli puramente fisici per il trasferimento del segnale di tempo, come ad esempio SyncE ed SDH.

- PDV dalla coda del buffer di uscita di un BC. I pacchetti di temporizzazione sono generati all'interno del BC e non c'è alcun PDV proveniente dai pacchetti di temporizzazione ricevuti dal BC in quanto questi vengono terminati. Le code che i nuovi pacchetti di temporizzazione attraverseranno prima di essere uscita dello switch introdurranno un PDV dipendente dai metodi d'implementazione impiegati. Si noti che in una catena di BC non ci sarà alcun accumulo di PDV da questa fonte poiché ogni flusso di temporizzazione è terminato all'arrivo e non passa attraverso l'uscita.

I BC sono tuttavia efficaci fintanto che la separazione tra slave e master è di pochi *hop* (Figura 2-32); questo accade perché ogni BC recupera la sincronizzazione dal proprio master utilizzando un *loop* di controllo, e quando questi sono messi in cascata, si accumulano gli errori non lineari [54] che fanno divergere la precisione di uno slave clock con l'aumentare dell'errore accumulato. Questo effetto è dovuto sostanzialmente a due meccanismi:

- Gli scambi di messaggi PTP tra coppie di nodi successivi nella catena che possono non essere sincronizzati,
- Possibili picchi di guadagno e generazione di rumore nei PLL ("Phase-Locked Loop") servo ai nodi successivi.

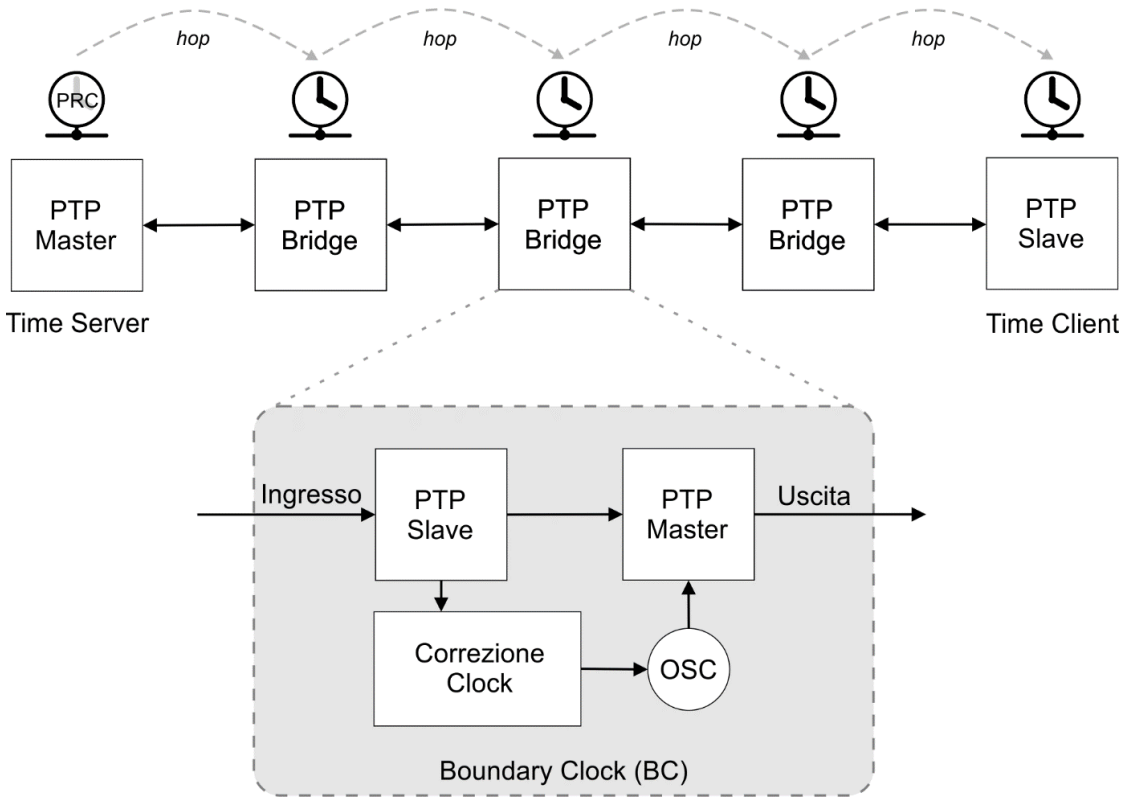


Figura 2-32 Boundary Clock: *hop* di separazione tra Server e Client

I BC hanno inoltre un impatto negativo sul tempo necessario alla riconfigurazione della rete in caso di variazione della topologia (ad esempio a seguito della perdita del riferimento temporale da parte di un master clock), in quanto ogni clock locale deve nuovamente sincronizzarsi con un master secondo l'algoritmo BMC ("Best Master Clock"): in questo intervallo di tempo la rete risulta non sincronizzata ed il tempo necessario per la sincronizzazione cresce con il numero di *hop*.

Infine i BC possono agire come anello di congiunzione tra porzioni di rete (*subnet*) che utilizzano versioni differenti dello standard IEEE 1588 tra loro non compatibili: questo ostacolo può essere aggirato se il BC è in grado di eseguire sulle diverse porte di uscita differenti versioni del protocollo.

2.5.8 Transparent Clock

Nelle reti a commutazione di pacchetto il ritardo medio di transito di un pacchetto nelle due direzioni viene meno alla necessità di simmetria, in gran parte dovute all'impiego

di “packet address lookup tables” e ad operazioni di *buffering* (“I/O queuing”) da parte degli apparati *switch* di rete Ethernet, che introducono latenze variabili per i pacchetti in transito e che vanno ad incidere sull’accuratezza del *timestamp* del pacchetto stesso.

Dalla versione due dello standard IEEE 1588 sono stati introdotti speciali apparati di rete “*switch*” detti “Transparent Clock” (TC) che, invece di agire sui pacchetti PTP come “Ordinary Clock” multi-porta alla stregua dei “Boundary Clock”, aggiornano[34] un apposito campo di compensazione del ritardo “CorrectionField” (CF) nell’*header* del messaggio PTP (byte offset 8) con un nuovo valore a 64 bit [55] che tiene conto del tempo di transito del pacchetto (espresso in nanosecondi) attraverso lo switch (Figura 2-33).

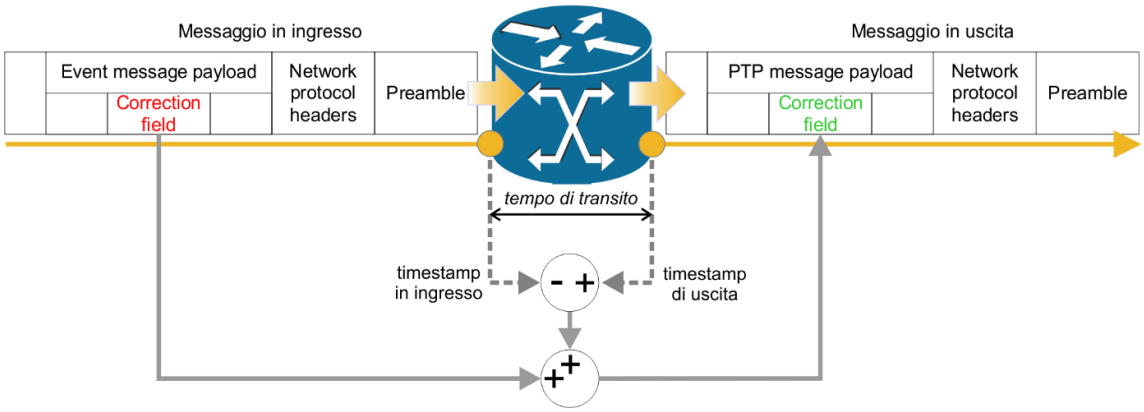


Figura 2-33 Transparent Clock: compensazione del ritardo di transito del pacchetto

L’introduzione dei TC ha rappresentato dunque un modo più semplice rispetto ai BC per ovviare alle latenze introdotte dagli switch di rete, e che porta i seguenti benefici dovuti essenzialmente al fatto di non dover impiegare l’algoritmo BMC [53]:

- a seguito di una variazione della topologia di rete non necessitano di riconfigurazione;
- presentano minori problemi d’interoperabilità,
- hanno un tempo d’inizializzazione più veloce, tale da renderli subito operativi.

[34] Di qui la denominazione “transparent”, in quanto non avviene l’interruzione del flusso PTP.

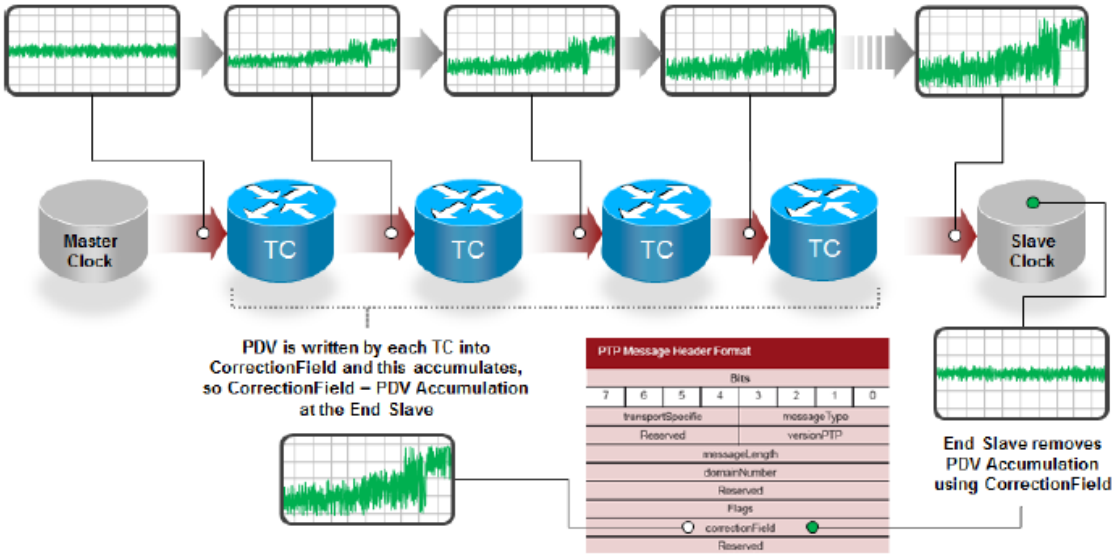


Figura 2-34 Effetti dei Transparent Clock sulla PDV

In linea di principio un TC ideale non dovrebbe contribuire alla PDV poiché il CF dovrebbe permetterne la completa cancellazione a posteriori: uno slave clock od un BC a valle del percorso di rete è infatti in grado di determinare il tempo totale di transito nei precedenti TC della catena. Nella pratica però è molto difficile realizzare un TC ideale in quanto questa funzionalità è implementata nei dispostivi di rete, come router e switch (Figura 2-34 [53]). L'architettura alla base di un router (o switch) dotato di funzionalità TC è rappresentato nella Figura 2-35 [11].

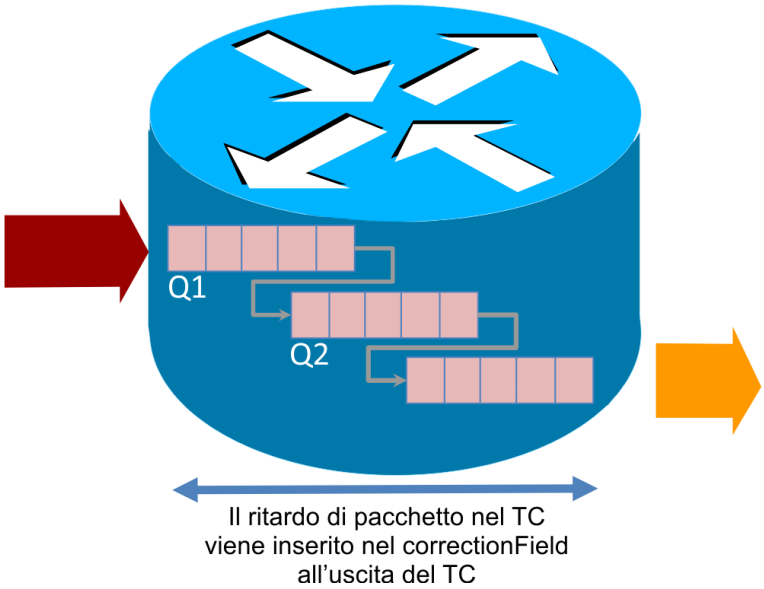


Figura 2-35 Transparent Clock

All'interno di uno switch o di un router esistono molti *buffer* (code) per tamponare, gestire e "priorizzare" i pacchetti. La coda finale Q_n che si trova appena prima dell'interfaccia fisica (PHY) è quella più problematica in quanto è tecnicamente molto difficile modificare il contenuto di un pacchetto quando si è in procinto di uscire dall'interfaccia PHY: una volta che il campo di correzione è stato calcolato e inserito nel pacchetto PTP, il pacchetto teoricamente dovrebbe uscire immediatamente dall'interfaccia PHY; questo non è sempre assicurabile in quanto, in caso di congestione di traffico, il pacchetto PTP corrente deve attendere che il pacchetto che lo precede sia stato interamente trasmesso prima di uscire. Le tecniche di *timestamping* hardware possono aiutare nell'aumentare l'accuratezza, mentre la *priorizzazione* "Layer2" dei servizi ("Layer 2 Quality of Service", L2 QoS) potrebbe essere inefficace [56] perché non è possibile bloccare l'uscita di un pacchetto quando la trasmissione è già cominciata.

Esistono due modalità di misura del ritardo per i TC: la "End-to-End" (E2E), dove il ritardo è determinato su tutta la tratta di rete fino al GM, e la "Peer-to-Peer" (P2P) in grado di determinare il ritardo solamente sul segmento di rete fino al più prossimo dispositivo (Figura 2-36). Nella "End-to-End" il TC aggiorna il campo CF con il ritardo associato ai singoli trasferimenti di pacchetto inoltrando i messaggi come un normale switch, mentre nella "Peer-to Peer" il TC misura il ritardo di linea associato al percorso di trasmissione d'ingresso

ed include questo ritardo nel campo destinato alla correzione. I TC di tipo P2P (Figura 2-38) rispetto agli E2E (Figura 2-37) permettono in genere una riconfigurazione più veloce a seguito di modifiche alla topologia di rete.

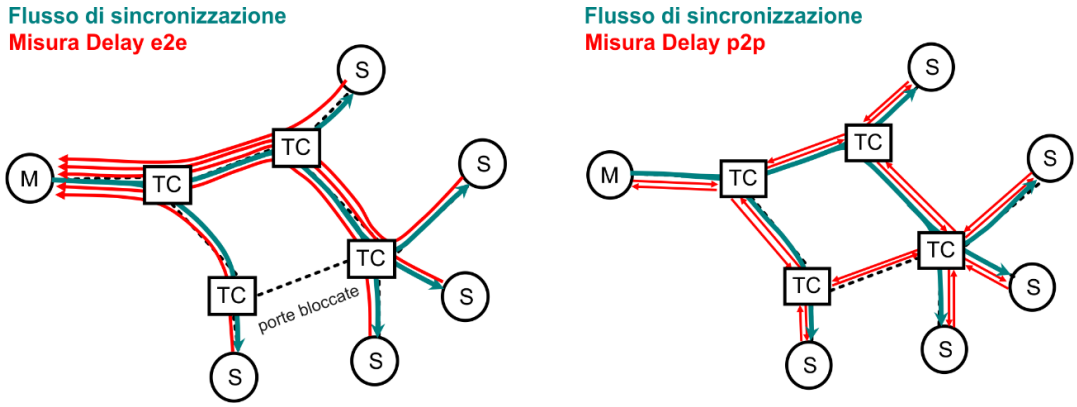


Figura 2-36 Misure del ritardo “End-to-End” e “Peer-to-Peer” [48]

Il P2P utilizzano la metodologia *peer-delay* per la stima del ritardo che, oltre a fornire informazioni sul tempo di transito PTP, fornisce anche correzioni per il ritardo di propagazione del collegamento con la porta che riceve il messaggio di evento PTP (CorrectionField): misura il ritardo tra porta-a-porta tra due porte direttamente connesse nella stessa tecnologia di commutazione, ed opera simultaneamente in entrambe le direzioni del link indipendentemente dallo stato della porta (master o slave) [57]. Il meccanismo P2P misura dunque il ritardo sul link per tutti gli orologi confinanti utilizzando i messaggi “Pdelay_Req”, “Pdelay_Resp” ed eventualmente “Pdelay_Follow_Up”: quando un *Sync* attraversa una TC P2P, al campo di correzione viene aggiunto non solo il tempo ti transito ma anche il ritardo di *uplink*, cioè il ritardo relativo al link da cui è stata ricevuta la sincronizzazione [46].

.

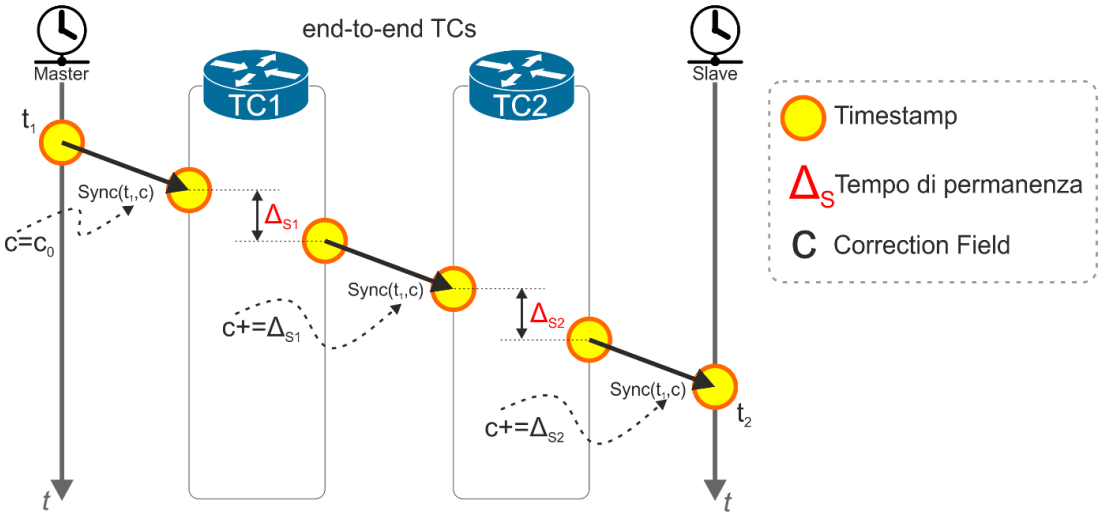


Figura 2-37 Transparent Clock: meccanismo “End-to-End”

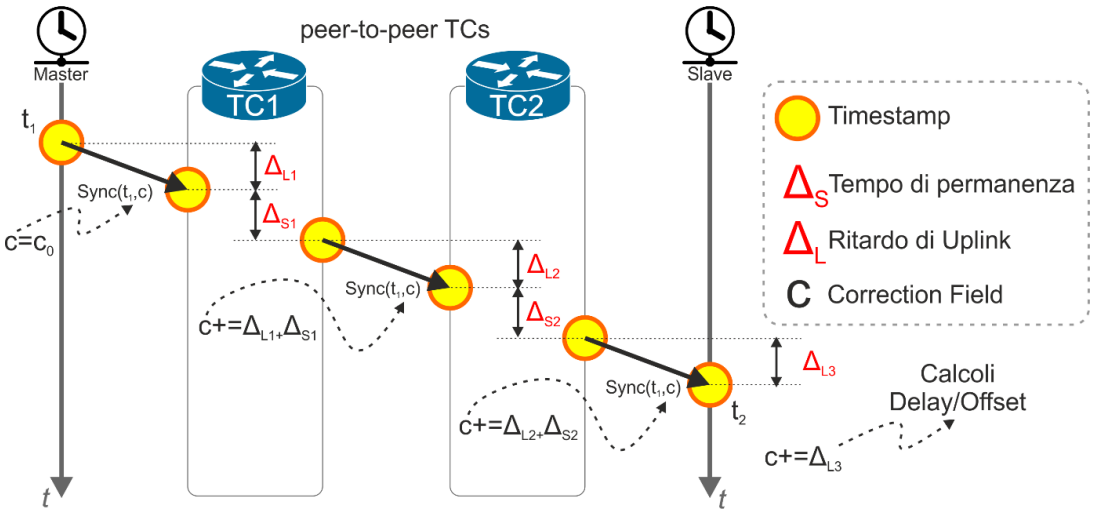


Figura 2-38 Transparent Clock: meccanismo “Peer-to-Peer”

Ciascuno di questi due metodi ha i propri vantaggi e svantaggi: il TC E2E scala male con il numero di dispositivi collegati alla sottorete (*subnet*), poiché il master "vede" tutti gli slave e questo può indurre una topologia di rete 1:N dove c'è un master in comunicazione con un gran numero di slave. Risulta tuttavia efficace per i sistemi lineari dove ci sono molti orologi interconnessi in *daisy chain*[35] (Figura 2-39). Al contrario, i TC P2P scalano bene con

[35] Connessione “in serie” di dispositivi.

il numero di dispositivi collegati alla sottorete e possono rispondere rapidamente ai cambiamenti di topologia di rete, ma non sono in grado di risolvere le topologie 1: N.

Gli organismi di normalizzazione stanno creando specifiche prestazionali dei singoli BC e TC; in particolare la ITU-T sta elaborando la famiglia di documenti G.8273, di cui la G.8273.2 specificherà prestazioni del BC mentre la G.8273.3 specificherà quelle dei TC, secondo le quali l'errore dovrà essere una frazione del limite di 1 µs. Standard come lo IEEE C.37.238-2011[36] propongono invece limiti di errore inferiore a 50 ns per un singolo elemento di rete.

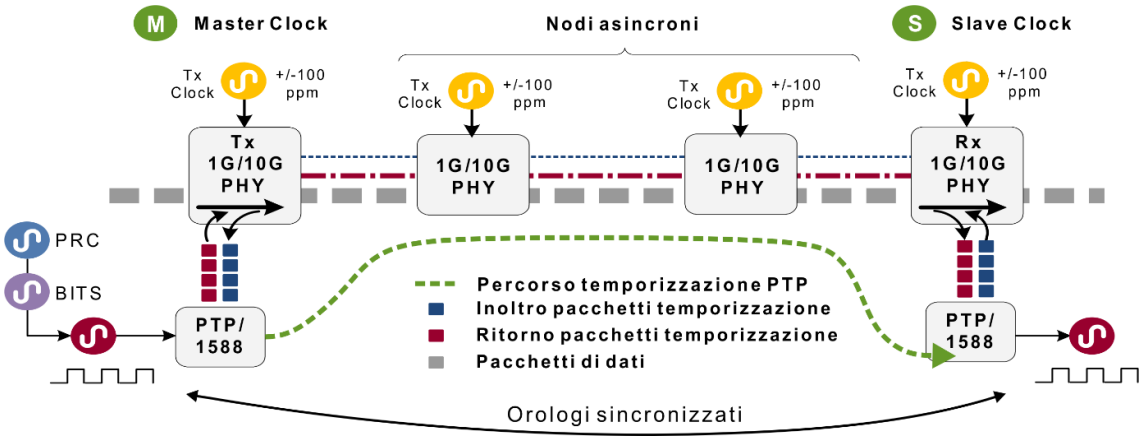


Figura 2-39 Catena di temporizzazione PTP attraverso nodi asincroni [13]

[36] "PTP in Power Systems Applications", Annex A.

Tabella 2-12 Matrice di comparazione tra IEEE1588 e SyncE

	SyncE	**IEEE 1588**	**IEEE 1588 + TC**
Continuità del path temporale	Tutti i nodi devono supportare SyncE	Solo il Master e lo Slave devono supportare il 1588	Tutti i nodi devono supportare 1588
Numero di nodi nel path	L'accuratezza di frequenza può essere distribuita fino a 60 nodi prima di un re-timing	I nodi in free-running a ±100 ppm sono limitati a 10	Più nodi in free-running a ±100 ppm sono possibili (>10) dipendentemente dall'applicazione
Accuratezza di frequenza	Stessa di SONET/SDH	Più limitata del SyncE a causa della PDV	Inferiore al SyncE, meno influenzata dalla PDV
Allineamento di fase	Non supportato	È possibile un allineamento fino ad 1 µs	È possibile un allineamento migliore di 1 µs
Time of Day	Non supportato	Supportato	Supportato

2.5.9 Best Master Clock Algorithm

Prima di avviare il processo di sincronizzazione clock, l'architettura PTP deve determinare la gerarchia degli orologi, ovvero lo stato di master o slave di ogni dispositivo. L'algoritmo "Best Master Clock" (BMC) è fondamentale per il funzionamento del PTP poiché specifica il metodo con cui ogni orologio determina nel suo sottodominio il miglior master clock ("Grandmaster", GM) tra tutti gli orologi visibili, incluso se stesso. La decisione si basa sul valore dello *stratum* (qualità del clock), l'accuratezza

della base temporale del clock, la stabilità dell'oscillatore locale e la massima vicinanza dell'orologio al GM, quest'ultima determinata sulla base dello *spanning-tree*[37].

L'algoritmo è stato progettato affinché non avvenga nessuna negoziazione tra gli orologi, al contempo assicurando che non possano verificarsi configurazioni per le quali coesistano due master o non sia presente almeno un master. Il BMC (Figura 2-40) permette inoltre ad un orologio di prendere automaticamente le funzioni di GM quando il GM precedente ha perso il suo riferimento (ad es. il segnale GPS), è stato scollegato causa di un guasto o per qualunque altro motivo non è più in grado di continuare come GM; essendo sempre attivo, può inoltre valutare se nella rete è stato introdotto un nuovo orologio in grado di fornire un riferimento di qualità più elevata [58].

Figura 2-40 Meccanismo decisionale "Best Master Clock"

L'algoritmo per la determinazione del BMC ("Best Master Clock Algorithm", BMCA) è composto di due parti:

[37] Lo Spanning Tree Protocol (STP) è un protocollo di rete che garantisce assenza di *loop* per ogni bridge LAN Ethernet.

(a) “Data Set Comparison” (DSC), un algoritmo che confronta le proprietà di due orologi indicate nei rispettivi *dataset* contenuti nel messaggio *Announce*; in uscita l’algoritmo fornisce tra i due il miglior candidato per il ruolo di GM.
(b) “State Decision” (SD), un algoritmo che sulla base dei risultati ottenuti dal DSC elegge il miglior clock e lo stato raccomandato.

L’algoritmo DSC è basato su confronti binari degli attributi, con il seguente ordine di precedenza:

1. “Priority1” (GMpriority1), parametro ad 8 bit configurabile da utente con precedenza assoluta, in cui i clock candidabili a master hanno valore 128 e gli slave 255 (più basso è il valore, maggiore è la priorità);
2. “Class” (GMClockQuality), *stratum* che definisce la tracciabilità TAI (“International Atomic Time”);
3. “clockIdentifier”, attributo che definisce l’accuratezza della sorgente temporale rispetto al riferimento UTC;
4. “Clock Variance”, attributo che definisce la precisione di un clock secondo una statistica che rappresenta il *jitter* e *wander* del clock dell'oscillatore in un intervallo del messaggio *Sync*;
5. Distinzione tra BC ed OC, con precedenza su BC qualora le voci da (1) a (4) non indichino che un clock è migliore;
6. “Priority2” (GMpriority2), parametro configurabile da utente che interviene nella classificazione tra orologi altrimenti paritetici;
7. “Source ID” (GMPortID), consistente in una combinazione del clock UUID (“Universally Unique Identifier”) e *PortNumber*, solitamente lo stesso “Ethernet MAC address”.

Oltre al precedente ordine di attributi, viene tenuta in considerazione anche la “distanza” (campo “StepsRemoved”), intesa come il numero di BC che intercorrono tra il clock e quello sconosciuto (e potenzialmente master), allorquando:

- Due messaggi *Announce* riflettono lo stesso master sconosciuto, situazione che può verificarsi in presenza di *path* ciclici non opportunamente rimossi;

- Due PRC con “Class” 1 o 2 hanno gli stessi attributi di “Class” e “Time Source”.

Dopo che il DSC ha determinato il miglior clock tra i due candidati, l’SD determina il prossimo stato raccomandato che infine è valutato da una macchina a stati; al termine del BMCA ogni porta del clock avrà uno dei tre stati:

- Master. La porta è una sorgente temporale sul *path* servito dalla stessa porta;
- Slave. La porta si sincronizza all’orologio del *path* che ha una porta nello stato Master;
- Passive. La porta non è un master del percorso e non si sincronizza ad un master; è una sorta di stato IDLE utile ad evitare anelli chiusi e può essere attivato in caso di riconfigurazione della rete.

Tra due orologi A e B, viene selezionato A ed interviene lo stato “Passive” per B quando per B la porta UUID di ricezione è a minor valore di quella di trasmissione.

Il diagramma di flusso dell’algoritmo SD è mostrato in Figura 2-41, assumendo che:

- D_0 è l’informazione contenuta nel *dataset* dell’OC corrente;
- E_{rj} è il j-esimo messaggio *Announce* in arrivo sulla generica porta “r” rispetto all’ultimo cambiamento di stato dell’OC;
- E_{rbest} è il miglior *Announce* ricevuto sulla porta “r” rispetto all’ultima volta che l’algoritmo BMC è stato eseguito su questa porta.

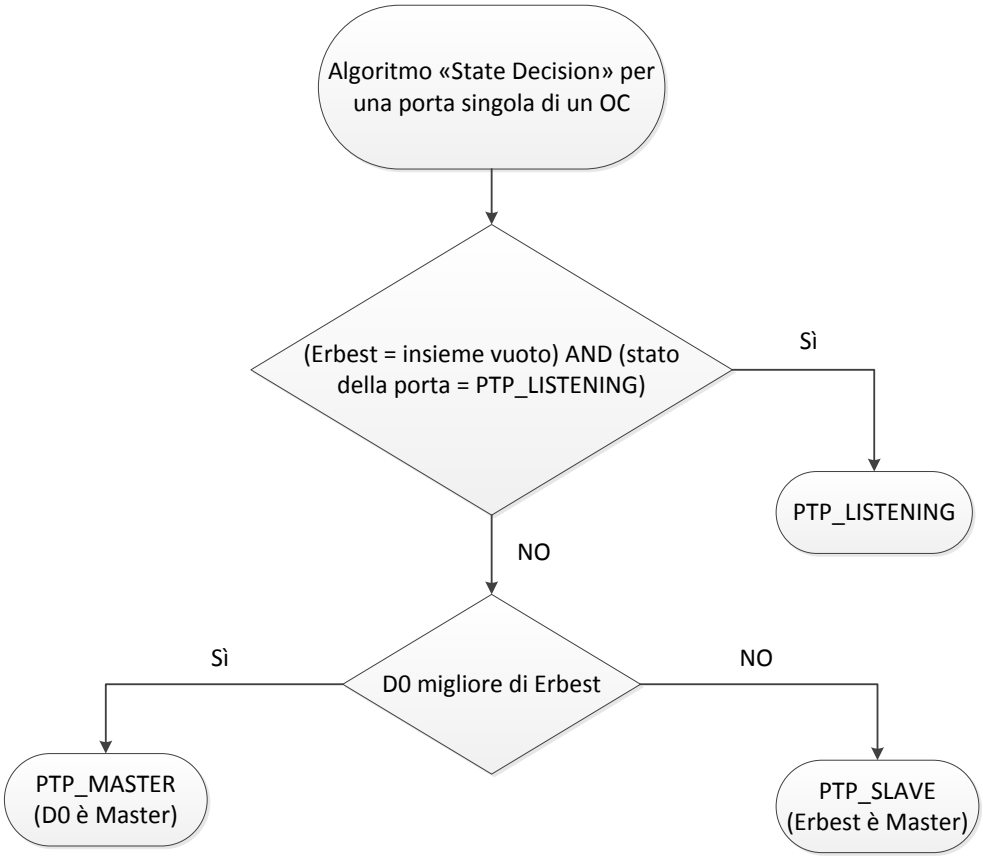


Figura 2-41 Diagramma di flusso algoritmo SD

Un OC eletto “master” modificherà dunque il suo stato in PTP_MASTER ed invierà a sua volta i messaggi *Announce* agli altri orologi OC e slave. Il diagramma di flusso di sintesi dell’intero processo BMCA è riportato in Figura 2-42.

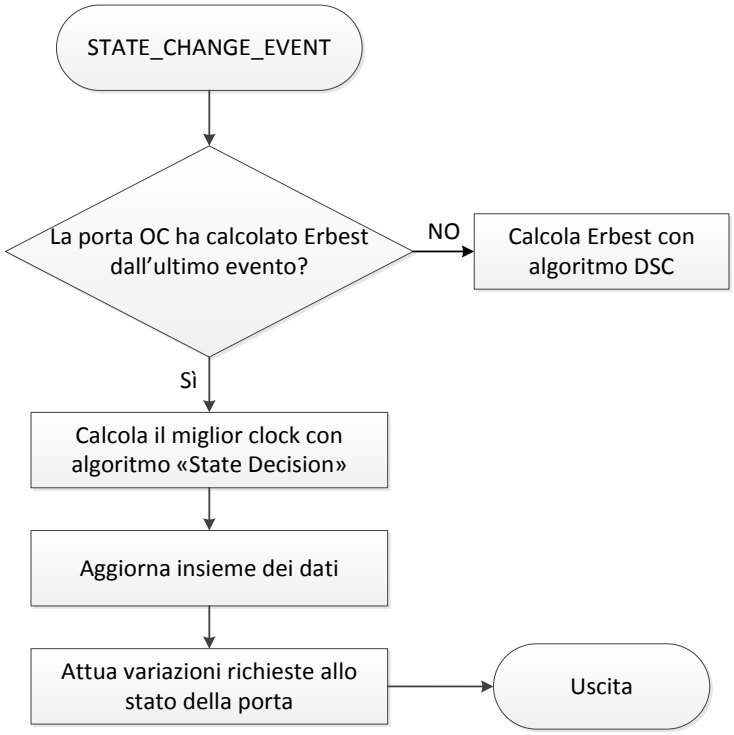


Figura 2-42 Diagramma di flusso algoritmo BMC

Nella Figura 2-43 un esempio di BMCA [17].

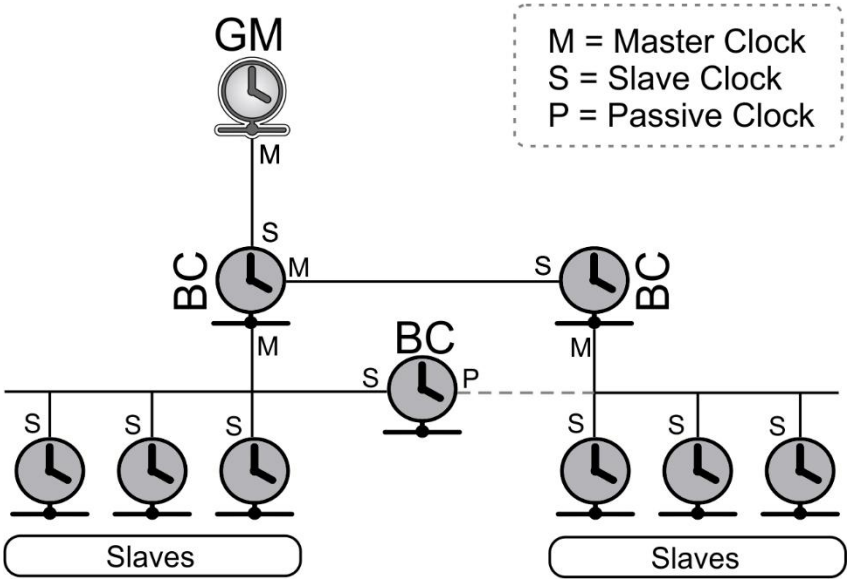


Figura 2-43 Esempio di gerarchia ottenibile con BMCA

Nella Tabella 2-13 è riportato invece il formato del messaggio *Announce*.

Tabella 2-13 PTP: formato del messaggio *Announce*

Nome	Bytes	Offset	Utilizzo
Header	34	0	Message Header
UTCOffset	10	34	Offset UTC corrente da Posix[38]
TimescaleInUse	2	44	TAI o arbitrario
AnnounceFlags	4	46	Flag di protocollo
StepsRemoved	2	50	Stratum
GMPortID	10	52	GM UUID e numero di porta
GMClockQuality	4	62	Classe, sorgente, varianza
GMPriority1	1	66	Arbitrario
GMPriority2	1	67	Arbitrario
ParentPortID	10	68	ID della porta Master
LocalClockQuality	4	78	Classe, sorgente, varianza
ClockChangeRate	4	82	Velocità cambio Master
ParentVariance	2	86	Varianza del Master

2.5.10 Prestazioni e limitazioni del PTP

Le prestazioni di ogni sistema basato su PTP possono essere espresse ricorrendo alla PSD ("Power Spectral Density") del rumore di fase del segnale di clock recuperato dallo Slave e all'istogramma dell'offset clock tra Master e Slave: la PSD esprime le performance di sintonizzazione, l'istogramma invece l'accuratezza di sincronizzazione. Essendo stato il PTP un protocollo progettato essenzialmente per applicazioni industriali dove l'accuratezza a livello del microsecondo era considerata soddisfacente e non richiedeva condizioni stringenti

[38] "Portable Operating System Interface", famiglia di standard IEEE volta a mantenere compatibilità tra i sistemi operativi.

per il *jitter*, può difficilmente raggiungere accuratezze al di sotto del nanosecondo con un'implementazione standard, essenzialmente a causa dei seguenti fattori:

- la sintonizzazione avviene attraverso le differenze temporali tra messaggi Sync, ma la granularità della singola unità di timestamp è limitata (8 ns su Gigabit Ethernet);
- per il recupero di un clock con basso jitter è necessario l'impiego di un oscillatore interno locale molto stabile (ad es. un OCXO), oppure l'incremento della frequenza dei messaggi di *Sync* che così aumenterebbero la banda impiegata;
- essendo il PTP un protocollo indipendente dal mezzo su cui viene trasportata la messaggistica, non esiste alcun meccanismo per la stima delle asimmetrie di collegamento, e si assume dunque che il link sia perfettamente simmetrico.

2.5.11 Confronto tra NTP e PTP

I protocolli di sincronizzazione NTP e PTP, anche se condividono aspetti implementativi simili, sono stati progettati per essere applicati in contesti abbastanza diversi: l'NTP è nato per soddisfare esigenze di tipo "*enterprise*" che cominciavano a sorgere con la diffusione dei Personal Computer (PC) negli anni '80, mentre il PTP è stato introdotto più recentemente nel 2002 per soddisfare in un primo tempo le esigenze di temporizzazione nell'ambito dell'automazione, del controllo e delle misure industriali, e . Successivamente con la sua evoluzione (IEEE-1588-2008) ha esteso il suo dominio nel campo delle telecomunicazioni ove oggi è la metodologia di trasporto temporale più promettente ed alternativa al GPS. In modo più riduttivo, è possibile affermare che il protocollo NTP è stato pensato per essere applicato in reti fisicamente vaste (come Internet), mentre il PTP è stato progettato per sincronizzare i dispositivi e strumentazione di reti locali private (LAN) e di estensione limitata. Apparecchiature per telecomunicazioni e strumentazione di test e misura utilizzano oscillatori locali relativamente di alta qualità disciplinati direttamente dal protocollo PTP ed in generale non

c'è alcun tipo di sistema operativo con applicazioni concorrenti che possono interporsi; i PC utilizzano invece oscillatori di qualità commerciale disciplinati indirettamente su reti in cui programmi e pacchetti possono tra loro concorrere e sovrapporsi.

I due protocolli, che operano "in banda"[39], hanno in comune flussi di sincronizzazione tra server primari (orologi GM), server secondari (BC) e client (OC) su cui è eseguito un algoritmo che genera, seppure con metriche differenti nei due protocolli, una sorta di *spanning-tree* dal percorso più breve. Entrambi partono dal presupposto che tutti gli orologi membro siano disciplinati in qualche modo (in tempo o in frequenza), ed al contempo si prefiggono l'obiettivo d'individuare possibili guasti e verificare la qualità del timekeeping. Sebbene entrambi sfruttino stessa tipologia (espressa diversamente) di calcolo per l'offset ed il *round-trip delay*, nessuno dei due può stimare i ritardi non reciproci dovuti a dissimmetrie nei *path*.

Una prima differenza che è alla base del modello di servizio NTP è che in una coppia di server uno può essere di backup qualora l'altro abbia perso ogni sorgente di riferimento; nel PTP ciò può avvenire nel caso d'utilizzo di più GM, ma la rete va riconfigurata in caso di guasto.

La più importante differenza, almeno in alcune configurazione di sottorete, è forse la capacità intrinseca del PTP di costruire *spanning-tree* senza nessun intervento di preconfigurazione; in alcune architetture NTP che sfruttano la modalità *manycast* è tuttavia possibile impiegare il processo di auto-configurazione.

Uno dei punti di forza del PTP è la possibilità di utilizzare un *timestamping* hardware (che riduce il rumore di fase), al contrario dell'NTP che utilizza una marchiatura software soggetta alle latenze del sistema operativo *host* e della rete. Il PTP è stato pensato per essere utilizzato su reti LAN veloci, in modo da poter impiegare intervalli di tempo più brevi per l'aggiornamento del clock ed ottenere un rumore di fase ridotto ed un elevato livello di accuratezza; ciò genera un volume di traffico che difficilmente può essere scalato su reti di dati geograficamente estese. Al contrario NTP utilizza un intervallo temporale di aggiornamento relativamente più lungo, proprio per ridurre quanto più possibile il carico di rete.

[39] In presenza di traffico di rete e non su un canale di trasporto dedicato.

Infine, vi è il problema del numero di *timestamp* che possono essere inclusi nel pacchetto. Nel PTP è uno solo che vincola la flessibilità nella progettazione protocollo. Nello NTP invece esistono tre *timestamp* operativi che supportano tutte le modalità NTP e questo non solo fornisce maggiore flessibilità, ma anche un livello maggiore di sicurezza. In Tabella 2-14 sono raccolte le principali differenze tra i due protocolli.

Tabella 2-14 Matrice di comparazione tra NTP e PTP

Criterio	**NTP**	**PTP**
Peak time transfer error	> 1ms (10^{-3}s)	> 100 ns (10^{-7}s)
Fonte principale di errore	Routers	Routers, switches, OS stack delay, network ecc.
Implementazione	Server: HW/SW; client: SW	Master: HW; slave: HW/SW
Topologia di rete	LAN (PTP), WAN (PTPv2)	WAN
Modalità di funzionamento	Il client richiede il riferimento al server	Il master invia il riferimento allo slave
Supporto “on-path”	Non previsto	Non mandatorio, ma possibile tramite TC/BC
Costi relativi	Essenzialmente gratuito	HW costoso
Monitoring & Management	Minimale	Estensivo
Ridondanza	Più sorgenti tramite BMCA	Più server NTP
Sicurezza	Codici *hash*, meccanismi di selezione del clock	Crittografia
Applicazioni	Enterprise IT, IPTV, home networks	Aerospaziale e difesa, automazione, telecomunicazioni, *bridging* audio/video

2.6 Sincronizzazione ibrida (SyncE+PTPv2)

La scelta delle tecniche SyncE o IEEE1588v2 dipende fortemente dal tipo di applicazione a cui è destinato il servizio di sincronizzazione. Mentre il SyncE è una tecnologia di livello fisico che trasporta un riferimento di frequenza, il protocollo PTPv2 è una tecnica in grado di trasportare l'informazione di tempo da cui è possibile derivare frequenza e fase. Nella scelta di una o dell'altra metodologia, è bene tenere conto che:

- SyncE non può essere implementato in maniera "legacy"[40] in reti Ethernet preesistenti senza aver prima aggiornato tutte le interfacce della rete per lavorare in modo sincrono, operazione in genere costosa perché gli apparati vanno sostituiti con altri in grado di derivare la frequenza dal segnale d'ingresso e di agganciare l'uscita ad un clock di sistema con un offset di frequenza in 4.6ppm (Tabella 2-15 e Tabella 2-16) [57].

[40] "Legacy" è un sistema "mission-critical" di epoca tecnologica antecedente, ma che continua ad essere utilizzato perché è di valore per il business da esso supportato.

Tabella 2-15 Interoperabilità tra porte Ethernet e SyncE

ITU-T G.8261 Annex A (V = possibile, X = non possibile)							
Interfaccia		**Traffico interoperante con**			**Rete di sincronizzazione interoperante con**		
		Ethernet	**SyncE port**		**Ethernet**	**SyncE port**	
	Op.Mode	Non-Sync		Sync	Non-Sync		Sync
Ethernet	Non-Sync	V	V	V	X	X	X
SyncE	Non-Sync	V	V	V	X	X	X
SyncE	Sync	V	V	V	X	X	V

Tabella 2-16 Interoperabilità in frequenza tra Ethernet e SyncE

ITU-T G.8261 Annex A				
Tipo di interfaccia	**Modalità operativa**	**Frequenza**		
		Max deviazione frequenza d'uscita	**Tolleranza d'ingresso**	
			Per recupero dati	**Per recupero clock**
Ethernet	Non-Sync	±100 ppm	±100 ppm	n/d
SyncE		Agganciato allo EEC, ±100 ppm altrimenti		
SyncE	Sync	Agganciato allo EEC, ±4.6 ppm nel caso peggiore		±4.6 ppm (caso peggiore)

- PTPv2 può essere implementato in modo “legacy” in reti Ethernet preesistenti senza ulteriori costi, ma l’accuratezza degli algoritmi di recupero del clock degli Slave clock può dipendere significativamente dal carico del traffico.

Negli ultimi tempi sta crescendo sempre più l’interesse nello sviluppo di applicazioni “Hybrid Mode” [59] che combinano contemporaneamente le due metodologie SyncE e PTPv2: sebbene il PTPv2 sia in grado di trasportare l’informazione di frequenza, una sincronizzazione stabile mediante SyncE può essere utilizzata per disciplinare l’oscillatore dello Slave clock, anche in presenza di significativi sbilanciamenti di rete; tuttavia queste metodologie non sono ancora del tutto standardizzate e considerate “vendor-specific”. Il miglior esempio di tecnica di sincronizzazione che fa uso della combinazione delle due tecnologie è oggi certamente il “White Rabbit” sviluppato dal CERN (“Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”) nell’ambito del progetto LHC (“Large Hadron Collider”), in grado di raggiungere accuratezze di sincronizzazione al di sotto del nano-secondo.

Test condotti da “Texas Instruments” [60] su di una rete PTP “Point-to-Point” (P2P) asservita a Synchronous Ethernet, hanno dimostrato che in condizioni nominali la sincronizzazione tra Master e Slave può essere fino a 100 volte più accurata che nelle stesse condizioni ma senza il supporto di SyncE (Figura 2-44), poiché quest’ultimo quando abilitato (Figura 2-45) è in grado di eliminare ogni instabilità del clock di riferimento dell’orologio Slave, mentre il PTP è agganciato al Master. Sfruttando un sistema di timestamping hardware-assistito, è possibile raggiungere un’accuratezza migliore di 10 ns.

Essendo dunque il riferimento di frequenza distribuito attraverso la rete stessa, la stabilità dell’oscillatore locale dello Slave clock non rappresenta più una significativa sorgente di errore, anzi, il nodo Slave potrà raggiungere in questo modo lo stesso livello di precisione di OCXO ad elevata stabilità pur disponendo di un oscillatore standard al quarzo [60].

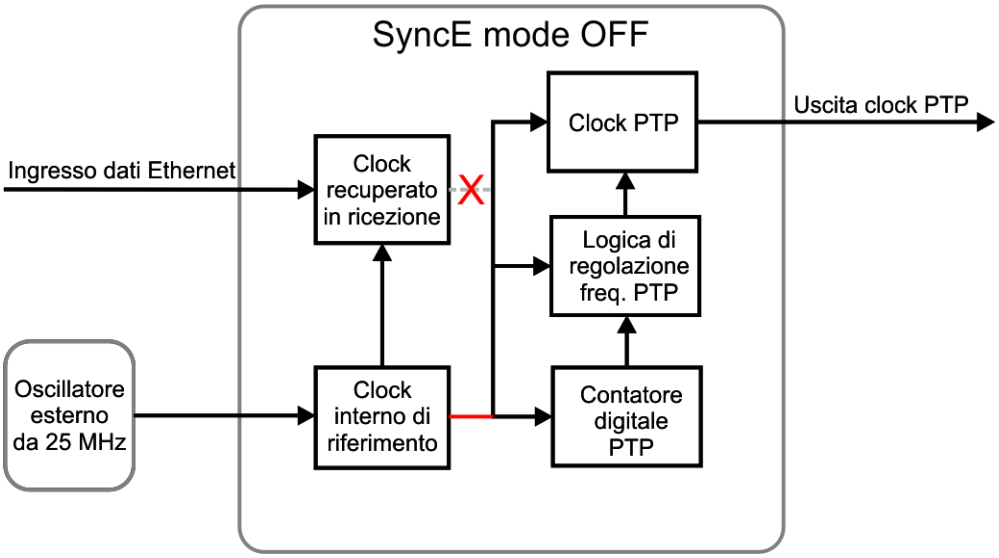


Figura 2-44 Sincronizzazione PTP senza supporto SyncE

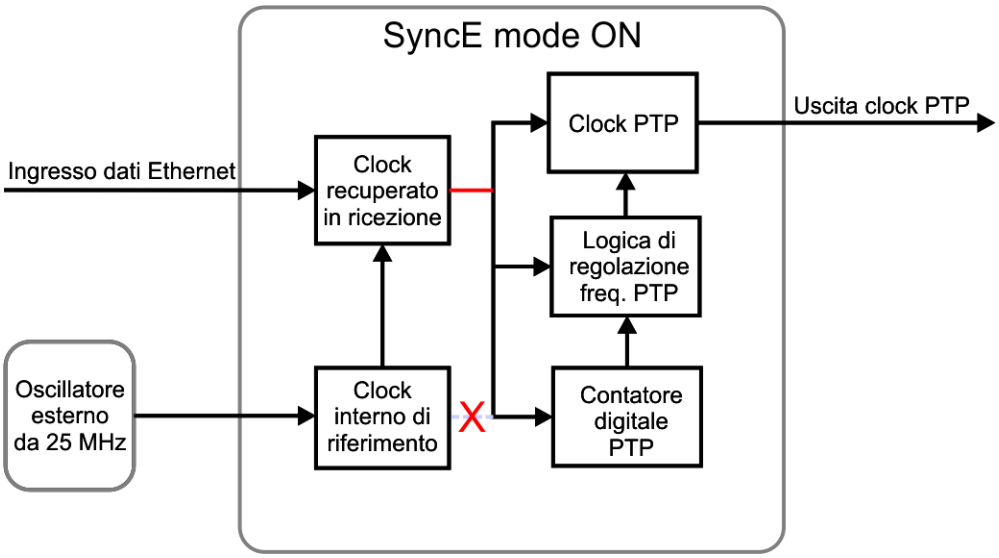


Figura 2-45 Sincronizzazione PTP con supporto SyncE (ibrida)

In una rete “Metro Ethernet Network” (MEN) la convergenza tra le due tecnologie offre i seguenti vantaggi:

- avere tramite il SyncE un accurato livello di sintonizzazione per il PTPv2;
- supporto “legacy” di livello 1 su tutti i noti, per l’interoperabilità con i sistemi SONET;
- elevato livello di sincronizzazione, con accuratezza in frequenza, fase ed allineamento temporale;
- un unico dominio temporale, anche tra operatori diversi.

Combinando SyncE e IEEE 1588 è possibile raggiungere una migliore distribuzione dell’accuratezza nella temporizzazione senza dover sostenere eventuali costi per l’incremento della banda di rete; nel caso specifico d’impiego dello standard Gigabit Ethernet (GE), dove la frequenza del clock recuperato è di 125 MHz, l’accuratezza della temporizzazione della rete è limitata ad 8 ns. Per raggiungere prestazioni migliori al di sotto del nanosecondo è necessario l’impiego di un circuito in grado di misurare differenze temporali nell’intervallo dei picosecondi, come il “Digital Dual Mixer Time Difference (DDMTD)” impiegato nel “White Rabbit” [61] e che agisce come rilevatore di fase digitale capace di una risoluzione prossima alla scala temporale del femtosecondo [20].

La Tabella 2-17 riassume in modo comparativo le differenze principali tra SyncE e PTPv2.

Tabella 2-17 Matrice comparativa tra SyncE e IEE E1588, con supporto TC

	SyncE	**IEEE 1588**	**IEEE 1588 + TC**
Continuità del path temporale	Tutti i nodi devono supportare SyncE	Solo il Master e lo Slave devono supportare il 1588	Tutti i nodi devono supportare 1588
Numero di nodi nel path	L'accuratezza di frequenza può essere distribuita fino a 60 nodi prima di un re-timing	I nodi in free-running a ±100 ppm sono limitati a 10	Più nodi in free-running a ±100 ppm sono possibili (>10) dipendentemente dall'applicazione
Accuratezza di frequenza	Stessa di SONET/SDH	Più limitata del SyncE a causa della PDV	Inferiore al SyncE, meno influenzata dalla PDV
Allineamento di fase	Non supportato	È possibile un allineamento fino ad 1 µs	È possibile un allineamento migliore di 1 µs
Time of Day	Non supportato	Supportato	Supportato

2.7 Standard di riferimento

Esistono degli standard riguardanti le infrastrutture di sincronizzazione, prodotti al fine di mantenere la conformità e l'uniformazione dei sistemi nelle diverse aree di applicazione e, con l'ausilio delle raccomandazioni, di individuare eventi inaspettati o rispondere prontamente ad incidenti, deviazioni e non conformità.

I principali organi normativi (SDO, "Standards Development Organization") per la sincronizzazione sono:

ITSF – "International Telecom Sync Forum". È un *forum* che organizza eventi annuali di aggiornamento per esplorare a fondo gli argomenti riguardanti la distribuzione di precisi riferimenti di frequenza, tempo e fase; la *mission* sostenuta è quella di favorire una più ampia comprensione delle necessità di sincronizzazione di reti di telecomunicazioni e altri ambiti applicativi più ampi, riunendo al contempo persone provenienti dall'industria, governo e mondo accademico e che rappresentano utenti, fornitori e professionisti nella comunità della temporizzazione.

ITU-T – "International Telecommunication Union"[41]. È il settore dell'Unione internazionale delle telecomunicazioni (ITU) che si occupa di regolare le telecomunicazioni telefoniche e telegrafiche. L'ITU-T fornisce delle specifiche standard riconosciute a livello internazionale. Il gruppo di studio ("Study Group") dell'ITU-T riunisce esperti di tutto il mondo per sviluppare standard internazionali (conosciuti come *raccomandazioni*) che fungono da elementi cardine per l'interoperabilità delle infrastrutture ICT[42] globali, garantendo che le reti ICT delle diverse nazioni adottino protocolli di comunicazione tra loro compatibili.

ANSI – "American National Standards Institute". Organizzazione privata senza fini di lucro, membro dell'ISO ("International Organization for Standardization") e dell'IEC ("International Electrotechnical Commission"), i cui principali compiti sono il coordinamento, formalizzazione e l'adozione di norme nazionali all'interno degli Stati Uniti ANSI, e rappresenta inoltre gli Stati Uniti a negli incontri con gli organismi ISO.

ATIS – "Alliance for Telecommunications Industry Solutions". È un organismo di normalizzazione che sviluppa standard e soluzioni tecniche ed operative per il settore ICT, accreditato presso l'ANSI e membro dell'ITU-T. Raccoglie alcune centinaia di membri tra aziende, provider di telecomunicazioni, costruttori di

[41] Prima del 1992 era il CCITT ("Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique").
[42] "Information and Communications Technology", insieme dei metodi e delle tecnologie che realizzano i sistemi di trasmissione, ricezione ed elaborazione di informazioni.

strumentazione e produttori. L' ATIS comprende inoltre numerosi comitati di settore e *forum*, che discutono, valutano e redigono linee guida in materia di sicurezza ed affidabilità delle reti, interoperabilità tecnologica, sottoscrizione di servizi ed etichettatura dei prodotti.

IEEE – "Institute of Electrical and Electronics Engineers". È un'associazione internazionale di scienziati e professionisti che ha gli obiettivi di promuovere le scienze tecnologiche e di cercare nuove applicazioni e teorie nella scienza elettrotecnica, elettronica, informatica, biomedica e delle telecomunicazioni migliorare la qualità della vita dell'uomo. Per perseguire tali scopi, organizza conferenze e dibattiti tecnici in tutto il mondo, pubblica testi tecnici, sostiene programmi educativi si occupa inoltre di definire e pubblicare standard.

Bellcore/Telcordia. Inizialmente conosciuta come "Bell Communications Research, Inc." o "Bellcore", è un'azienda di ricerca e sviluppo per le telecomunicazioni nata da una smembramento in AT&T ("American Telephone and Telegraph Company"). Dal 2012 è una consociata di Ericsson che fornisce soluzioni tecnologiche[43] interconnessione e di smistamento, numerazione, instradamento, fatturazione di chiamate e coordinamento di norme tecniche tra *Carrier* di telecomunicazioni concorrenti.

NIST – "National Institute of Standards and Technology". È un'agenzia del governo degli Stati Uniti d'America che, sotto il Dipartimento del Commercio, ha il compito di promuovere l'economia americana attraverso la collaborazione con l'industria al fine di sviluppare standard, tecnologie, e metodologie, che favoriscano la produzione e il commercio.

IETF – "Internet Engineering Task Force". È una comunità internazionale aperta a ogni persona interessata che riunisce progettisti di reti, operatori, fornitori

[43] Dal 2013 sotto il brand "Iconectiv" – www. iconectiv.com

e ricercatori interessati all'evoluzione dell'architettura Internet e che hanno come *mission*[44] il suo il buon funzionamento, attraverso la produzione di documenti tecnici di elevata qualità in grado d'influenzare il modo in cui le persone progettano, utilizzano e gestiscono Internet.

MEF – "Metro Ethernet Forum". È un consorzio industriale globale che comprende più di 220 organizzazioni tra cui importanti operatori di telecomunicazioni, fabbricanti di cavi, costruttori di strumentazione e fornitori di semiconduttori, il cui scopo è promuovere l'adozione a livello mondiale di reti e servizi Ethernet di livello *Carrier*. Il MEF sviluppa le specifiche tecniche e gli accordi di implementazione per promuovere l'interoperabilità e la diffusione del "Carrier Ethernet" a livello mondiale, uno standard di servizi a livello *Carrier* distinto dal più familiare Ethernet basato su reti LAN. Il programma di certificazione del MEF consente inoltre *service provider* di certificare che i loro servizi Carrier Ethernet sono conformi alle specifiche MEF.

IEC – "International Electrotechnical Commission". È un'organizzazione internazionale per la definizione di standard in materia di elettricità, elettronica e tecnologie correlate, formata da rappresentanti di enti di standardizzazione nazionali riconosciuti. Molti dei suoi standard sono definiti in collaborazione con l'ISO.

Gli standard di riferimento più rilevanti nelle moderne reti di sincronizzazione sono:

MEF 22.1. La fase 1 del MEF 22.1 ha descritto un quadro per l'utilizzo di MEF 6.x Ethernet e MEF 8 CES per servizi di "*mobile backhaul*". Le performance di sincronizzazione dell'architettura erano limitate al caso d'interfacce TDM verso le stazioni radio base (BTS). La fase 2 del MEF 22.1 aggiunge miglioramenti per l'implementazione di servizi interoperabili così come le performance di sincronizzazione. I miglioramenti includono lo "UNI Mode" per agganciare il SyncE ad un

[44] La *mission* è documentata nella RFC 3935.

EEC ed assicurarsi che l'interoperabilità del SyncE includa un indicatore di livello di qualità del clock (QL). Il MEF 22.1 fa poi riferimento agli standard ITU-T ed IEEE per tutti gli aspetti di dettaglio più rilevanti.

ITU-T G.81x ed ITU-T G.82x. Queste raccomandazioni contengono la terminologia e le specifiche di performance e sincronizzazione per le reti TDM; specificano che le metriche per l'accuratezza in frequenza di "Maximum Time Interval Error" (MTIE) e "Time Deviation" (TDEV) devono essere dell'ordine dei nanosecondi, che risponde al requisito di distribuzione dell'accuratezza di parti per bilione (ppb). La ITU-T G.823 definisce maschere diverse di accuratezza in base all'applicazione; più dettagli in merito possono essere trovati nella stessa raccomandazione alla sezione 3.1.2, sotto la voce "Measurements and Limits".

ITU-T G.781 ed ITU-T G.8264. La ITU-T G.781 descrive l'implementazione del modello gerarchico degli orologi ed il loro processo di selezione per le reti TDM; la ITU-T G.8264 riprende gli stessi aspetti e li applica alle reti di sincronizzazione Ethernet.

ITU-T G.82xx. L'evoluzione del corpo di raccomandazioni G.82xx rappresenta il fulcro del lavoro del gruppo di studio ITU responsabile della sincronizzazione, e stabilisce le metriche ed i limiti di performance. La serie di raccomandazioni descrive ampiamente i requisiti di sincronizzazione per le reti a pacchetto, in particolare la ITU-T G.8261 definisce i limiti per il SyncE (tolleranze di jitter e wander, frequenze supportate, specifiche sui clock) ed include un elenco di *test-case* di verifica da utilizzare in fase di pre-produzione. La ITU-T G.8262, parallelamente alle ITU-T G.81x, ITU-T G.82x e Telcordia GR-1244-CORE[45], descrive i requisiti per le performance di accuratezza di sincronizzazione per i "Synchronous Ethernet Equipment Clocks EEC" per assicurarne la compatibilità con le reti

[45] "Clocks for the Synchronized Network: Common Generic Criteria", Issue 4, October 2009.

SONET/SDH. La ITU-T G.8264 aggiunge invece il protocollo "Ethernet Synchronization Messaging Channel" (ESMC) per la gestione della gerarchia e la distribuzione del SyncE e ne permette l'interoperabilità con le preesistenti infrastrutture SONET/SDH abilitando il SyncE a trasmettere il QL SSM come definito nelle ITU-T G.707, G.781, Telcordia GR-253-CORE ed ANSI T1.101. ITU-T G.8265 e ITU-T G.8265.1 introducono il "Telecom Profile" per il trasferimento della frequenza e descrivono l'implementazione dello standard IEEE 1588-2008 nelle reti di telecomunicazione, incluso il trasferimento del "Time-of-Day" (ToD) [15].

Telcordia GR-378-CORE definisce i requisiti per gli apparati BITS ("Building Integrated Timing Systems") mentre il GR-2830-CORE, similmente alla ITU-T G.811, descrive le sorgenti primarie di riferimento ("Primary Reference Sources", PRC).

IEC 61784-2:2014. Specifica gli indicatori di performance che supportano schemi di classificazione dei requisiti per Ethernet Real-Time (RTE) nonché i profili ed i relativi componenti di rete basati su ISO/IEC 8802-3 o IEEE 802.3, IEC serie 61158 e IEC 61784-1 e le soluzioni RTE che sono in grado di operare in parallelo con le applicazioni basate sulle norme ISO/IEC 8802-3 o IEEE 802.3

IEEE 1588-2008. Già ampiamente discusso precedentemente, standardizza un protocollo di sincronizzazione precisa per misure di rete e sistemi di controllo ("Precision

Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems") ed è stato adottato anche dalle ITU-T G8265.1 e ITU-T G875.1. Assieme al SyncE sono probabilmente oggi le metodologie di sincronizzazione più promettenti per le reti Ethernet.

Nella Figura 2-46 sono genicamente riportate le relazioni che la IEEE 1588-2008 ha con i diversi SDO [30].

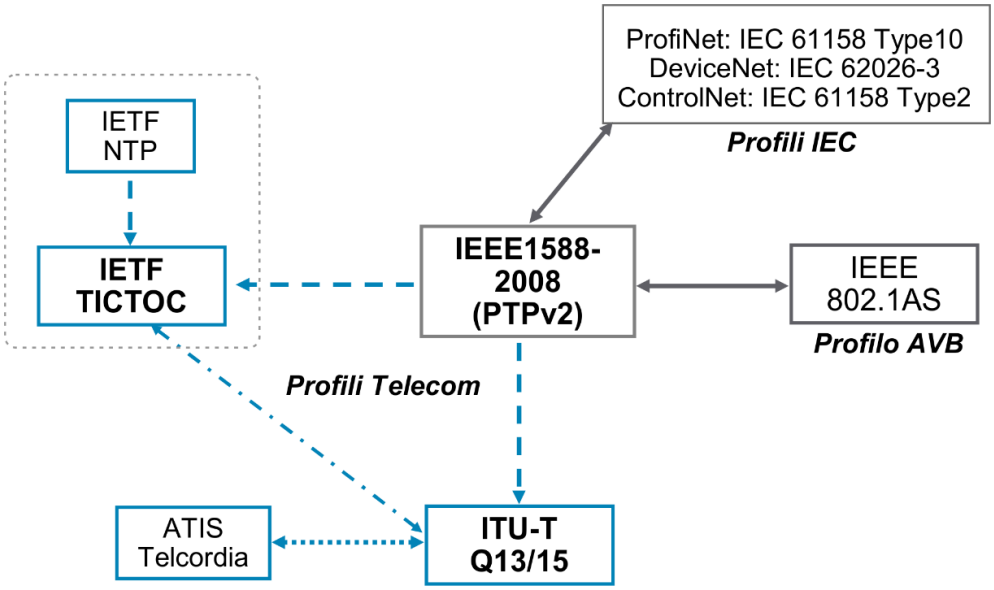


Figura 2-46 Relazioni tra IEEE1588-2008 e SDO

3. Parametri e metriche di performance

Lo sviluppo del Synchronous Ethernet (SyncE), se da una parte ha contribuito significativamente all'evoluzione delle reti di comunicazione digitali aggiungendo al livello fisico (PHY) la distribuzione e la sincronizzazione del *clock* per le reti Ethernet, dall'altra ha portato con sé problematiche comuni anche ad altre tecnologie di trasmissione: il *jitter* ed il *wander* sono infatti due aspetti che possono compromettere la qualità e l'affidabilità di dati e servizi, in particolar modo sulle reti di telefonia mobile e nei sistemi di acquisizione dati (DAS).

Nel corso del capitolo verranno prima introdotte le differenti classi di *jitter*, poi le metriche più comuni per la caratterizzazione dei clock, tra le quali in particolare il "Time Interval Error" prevalentemente utilizzato nella parte di sperimentazione su banco di prova. Verrà infine dato un ~~a~~cenno alla strumentazione di misura con cui è possibile effettuare misure di jitter.

Il capitolo si chiude con un paragrafo dedicato invece alla "Packet Delay Variation", un parametro caratteristico del protocollo PTP.

3.1 Jitter e wander

Il *jitter* ed il *wander*, secondo le definizioni date dal NIST [62], sono rispettivamente la variazione a *breve-termine* e *lungo-termine* degli istanti significativi di un segnale digitale rispetto alla loro posizione ideale nel tempo; più precisamente, secondo quanto riportato nella ITU-T G.810, il termine *jitter* è riferito a variazioni non cumulative al di sopra dei 10 Hz, mentre le variazioni cumulative al di sotto di questa soglia sono associate al fenomeno del *wander*.

È intuitivo e naturale pensare agli "istanti significativi" della definizione come agli istanti di transizione logica (o *fronti*) del segnale digitale. I fenomeni di *jitter* e *wander* su un segnale dati hanno effetti equivalenti ad una modulazione di fase del segnale di clock utilizzato per generare i dati stessi.

Ogni dispositivo di rete (NE) genera all'uscita un certo grado di *jitter* (detto "output jitter" o "intrinsic jitter")[46], e la rete deve essere quindi in grado di operare in sua presenza; tuttavia quando il livello di *jitter* diventa eccessivo, vengono causati errori di bit che degradano le prestazioni di rete. Anche se il *jitter* in sé stesso non causa errori di bit, esso riduce il margine di rumore del sistema, rendendolo maggiormente soggetto ad errori da parte dei suoi elementi (NE).

Seppure *jitter* e *wander* sono tra loro strettamente legati, i loro effetti sulle reti ed i dispositivi sono molto diversi:

- il *jitter* in ingresso ad un dispositivo lo può indurre a generare errori di bit, secondo il meccanismo del diagramma ad occhio, che si traduce in perdita di pacchetti; la sua unità di ampiezza è la "Unit Interval" (UI);

- il *wander* non influisce sullo stadio di ingresso del dispositivo, ma sulla capacità del suo clock interno di agganciare e mantenere il riferimento a monte (sincronizzazione), impattando sulla distribuzione dei riferimenti di clock attraverso la rete; la sua unità d'ampiezza è il tempo, solitamente espresso in nanosecondi o microsecondi.

Nelle reti di telecomunicazioni il motivo per il quale si studia il *jitter* è essenzialmente per limitare il "Bit Error Rate" (BER), mentre nei sistemi di acquisizione dati DAS il *jitter* può rappresentare parte dell'incertezza sull'istante di tempo in cui viene effettuato un campionamento in una conversione A/D, qualora ad esempio si utilizzasse un clock di riferimento preciso per guidare le acquisizioni di un ADC ("Analog to Digital Converter"): come le fluttuazioni verticali attorno al punto di campionamento ed in presenza di bassi livelli di SNR ("Signal to Noise Ratio") possono causare errori, così avviene per le fluttuazioni orizzontali (temporali) dovute al *jitter* (Figura 3-1); il punto di campionamento è il punto nel diagramma tempo-tensione (t, V) dove il ricevitore di rete determina il valore logico di un bit, o in maniera analoga un ADC quantizza l'ampiezza di un segnale.

[46] In genere dovuto al comportamento dell'oscillatore interno e a fenomeni di delay introdotti da *scramblers* o *encoders*; è definito nello standard ITU-T G.8262 come valore picco-picco in "unit intervals".

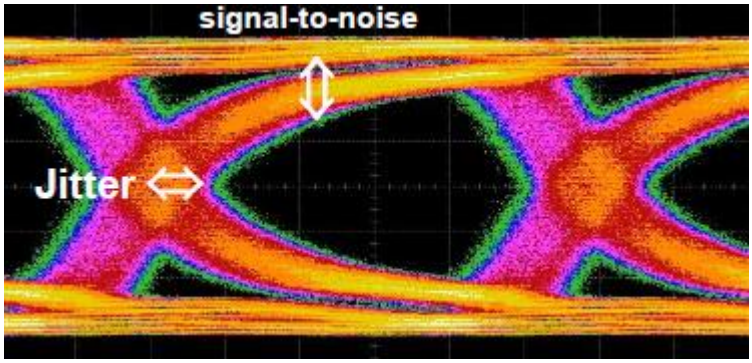


Figura 3-1 Jitter e SNR nel diagramma “ad occhio”

Essendo il *jitter* definito attraverso una deviazione temporale da un evento definito, questa può essere rappresentata come un istogramma di una funzione densità di probabilità (PDF, “Probability Density Function”), ottenuto tramite la quantizzazione delle deviazioni misurate; l’istogramma permette poi d’identificare la tipologia di *jitter*.

Le più comuni tipologie di misurazione del *jitter* sono:

- “**Cycle to cycle jitter**”. Si applica a tutti i clock e misura la differenza tra il periodo di clock attuale ed il suo predecessore;
- “**Period jitter**”. Si applica a tutti i clock e rappresenta la massima deviazione del punto di transizione del clock rispetto all’idealità;
- “**Long term jitter**”. È la differenza tra la transizione di clock ideale e quella reale, la cui operazione di misura avviene su un elevato numero di cicli e può essere rappresentato in forma d’istogramma;
- “**Time interval error jitter**”. Applicabile a segnali dati e clock, rappresenta la differenza tra l’evento del segnale misurato e l’evento del clock idealmente recuperato. Quest’operazione è effettuata su un elevato numero di bit e può essere rappresentata tramite istogramma;

3.2 Classi di jitter

Il jitter totale ("Total Jitter", TJ, Figura 3-3) è composto dalle due componenti:

- **Jitter Deterministico** ("Deterministic Jitter", DJ). È un *jitter* la cui funzione densità di probabilità non è gaussiana (Figura 3-2); è sempre limitato ("*bounded*") in ampiezza, pertanto è ben esprimibile in termini di valore picco-picco [63].
-

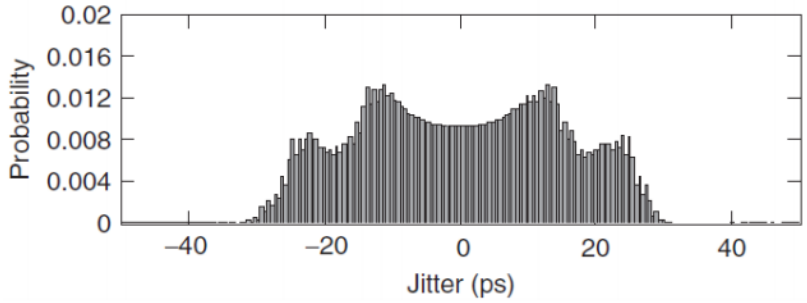


Figura 3-2 Jitter deterministico

È chiamato "deterministico" in quanto, in linea di principio, avendo una conoscenza completa dei parametri del sistema sarebbe possibile predire la posizione di ogni fronte ad ogni istante di tempo.

Le sue cause possono essere dovute ad imperfezioni del dispositivo, come ad esempio problemi di *grounding*, EMI ("Electro Magnetic Interference") [64], riflessioni, risposta in frequenza del canale. Disabilitando la sorgente di DJ il contributo relativo al suo disturbo di *jitter* si annulla.

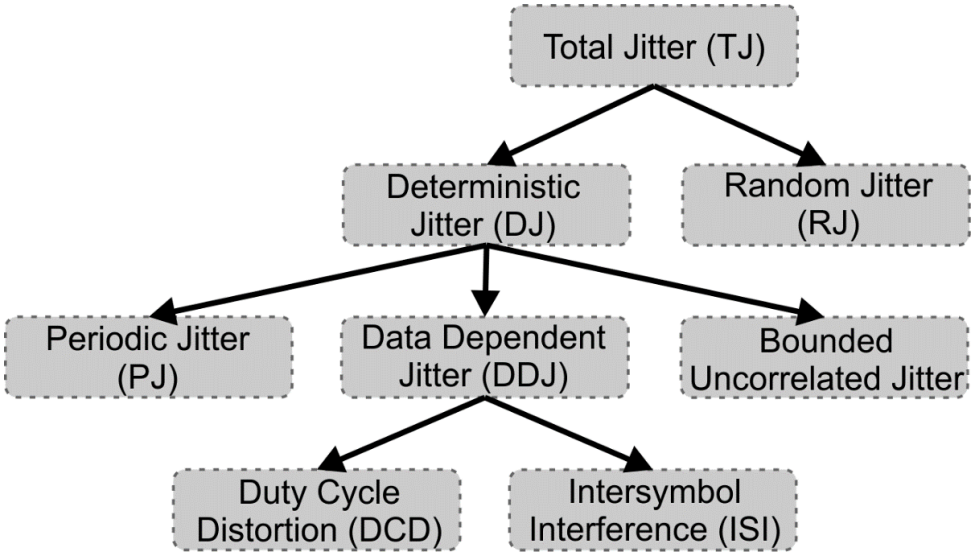


Figura 3-3 Classi di jitter

Il DJ è a sua volta scomponibile in:

- **Jitter periodico** ("Periodic Jitter", PJ), o sinusoidale ("Sinusoidal Jitter", SJ). Variazioni periodiche nel tempo del fronte del segnale. Può essere causato da EMI o dalle alimentazioni;
- **Jitter dipendente dai dati** ("Data Dependent Jitter", DDJ). Jitter variabile dipendentemente dal particolare *pattern* di dati utilizzato. Un esempio è l'interferenza inter-simbolica (ISI, "Inter-symbol Interference");
- **Jitter limitato e non correlato** ("Bounded Uncorrelated Jitter", BUJ). Si riferisce ad influenze di link adiacenti sul tempo di bit, la cui causa è solitamente il *crosstalk.*

- **Jitter casuale** ("Random Jitter", RJ). La principale sorgente è il rumore bianco (gaussiano) prevalente in tutti i componenti del sistema, attivi e passivi; inoltre amplificatori e driver di linea moltiplicano l'energia del rumore. Il risultato sono errori di temporizzazione interagenti con lo *slew-rate* dei segnali implicati. Per sua natura, la distribuzione di energia di rumore bianco è Gaussiana (non limitata,

"unbounded") e pertanto RJ può essere descritto attraverso la funzione densità di probabilità[47]

$$PDF_{RJ}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Dove:

- x è la variabile indipendente,
- σ il valore quadratico medio (RMS, "Root Mean Square"),
- μ il valor medio della distribuzione e che può essere omesso, in quanto il jitter è definito come deviazione positiva o negativa da un valore ideale.

La decomposizione del *jitter* totale ("Total Jitter", TJ) in sottogruppi permette dunque una definizione più accurata del "*jitter budget*", aiutando i progettisti a controllare singolarmente le diverse sorgenti di *jitter*.

3.2.1 Periodic jitter

PJ è la differenza fra il massimo periodo di clock e il periodo di clock più piccolo per tutti i singoli periodi di clock all'interno di una finestra di osservazione[48] (tipicamente 1k o 10k cicli). È solitamente introdotto dai PLL ("Phase Locked Loop") e deve essere ben tollerato dai sistemi di recupero dei dati e della sincronizzazione [64].

Il segnale di clock è un'onda quadra con frequenza fondamentale f_s che mediante decomposizione di Fourier può essere espressa come somma di armoniche sinusoidali f_s , $3f_s$, $5f_s$, ecc. Quando il segnale passa attraverso un canale passa-banda con frequenza centrale f_s , le armoniche che cadono fuori dell'intervallo del filtro possono essere trascurate; allora il segnale di clock può essere espresso come:

$$Acos[j(t)] = Acos[2\pi f_s t + \emptyset_0 + \Delta\emptyset(t)]$$

[47] Essendo la PDF "unbounded", non è possibile infatti ben definire un valore picco-picco.

[48] Le definizioni basate sulla differenza tra clock misurato ed ideale, come quella dello Standard JEDEC 65B, non sono facilmente praticabili a causa dell'instabilità dei riferimenti di tempo; di conseguenza è pratico considerare "ideale" il periodo medio.

Dove "A" è l'ampiezza e f_s la frequenza fondamentale e $\Delta\emptyset(t)$ è la componente di modulazione di fase definita in funzione della frequenza del *jitter* w_j come:

$$\Delta\emptyset(t) = \Delta w \cdot \sin(w_j t)$$

Se assumiamo la massima differenza di fase tra $\Delta\emptyset(t)$ e il clock di riferimento come

$$\Delta w = A_j \cdot T_{bit}$$

Che espresso in radianti è

$$\Delta w = 2\pi A_j$$

La modulazione di fase diventa (Figura 3-4)

$$\Delta\emptyset(t) = 2\pi A_j \cdot \sin(w_j t)$$

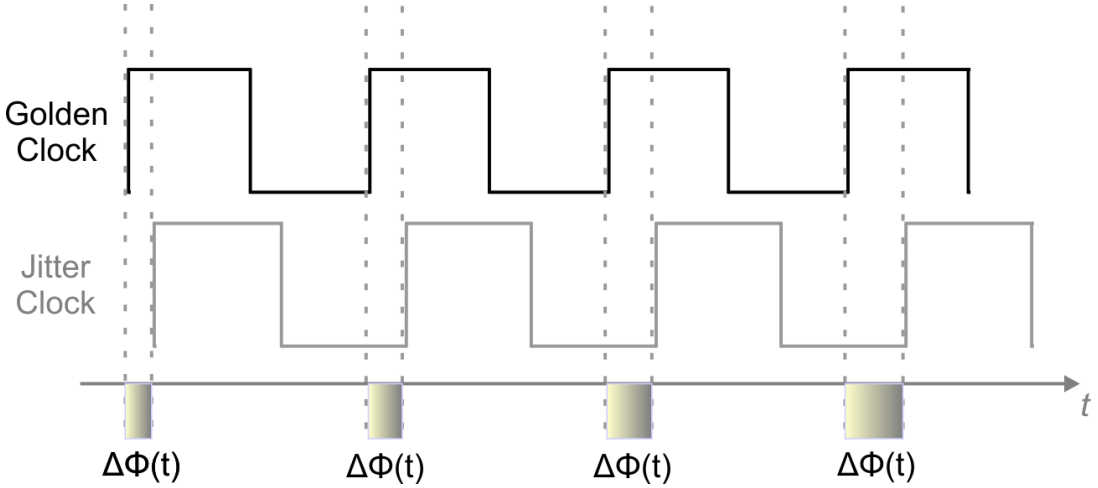


Figura 3-4 Modulazione di fase in presenza di jitter

Derivando la modulazione di fase rispetto al tempo si ottiene la frequenza di *jitter* in radianti

$$w(t) = 2\pi A_j w_j \cdot \cos(w_j t) + w_s$$

Essendo la definizione di periodo

$$T = \frac{2\pi}{w}$$

I periodi massimo e minimo sono dunque esprimibili in secondi come

$$T = \frac{2\pi}{w_s \pm 2\pi A_j w_j}$$

Ovvero in termini di frequenza

$$T = \frac{1}{f_s\left(1 \pm 2\pi A_j \frac{f_j}{f_s}\right)}$$

Il SJ può essere decomposto in serie di Fourier come

$$SJ(t) = \sum_i A_i \cos(w_i t + \theta_i)$$

Ed il jitter prodotto da una singola sinusoide può essere espresso tramite la sua PDF (Figura 3-5)

$$PDF_{SJ}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{A^2 - t^2}}, & A > |t| \\ 0, & A \leq |t| \end{cases}$$

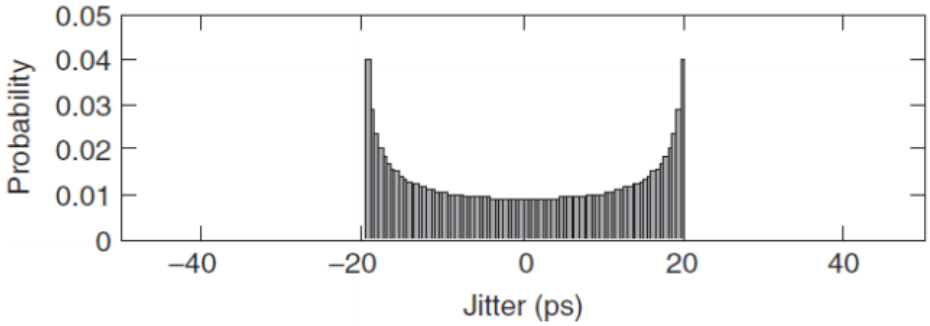


Figura 3-5 Jitter periodico

3.2.2 Data dependent jitter

Il "Data Dependent Jitter" (DDJ, Figura 3-6) rappresenta la deviazione di un fronte logico dalla sua posizione di idealità nel tempo, causato dai sistemi con memoria (non tempo-invarianti), dove la forma d'onda corrente dipende dalla "storia" del sistema e dalle forme d'onda precedenti: la banda limitata del mezzo di trasmissione (ad esempio le tracce di un circuito stampato PCB "Printed Circuit Board"), i front-end dei ricevitori (come amplificatori di trans-impedenza), o le riflessioni delle onde elettromagnetiche possono essere causa d'interferenza tra il simbolo corrente ed il precedente. L'interferenza inter-simbolica (ISI) è dunque

legata alle caratteristiche “passa basso” del collegamento: i pattern i cui fronti cambiano più rapidamente hanno delle componenti di segnale ad alta frequenza che, in combinazione con gli effetti di filtraggio del canale, si propagano lungo il collegamento a velocità differenti a seconda della loro frequenza; la differenza di velocità di propagazione causa la sovrapposizione parziale delle forme d’onda rappresentanti i bit. Un esempio di ISI è quello causato da un *data stream* seriale isocrono codificato 8B/10B, come ad esempio un bus PCI Express[49]. Metodologie come l’equalizzazione possono migliorare il *jitter* dovuto all’ISI.

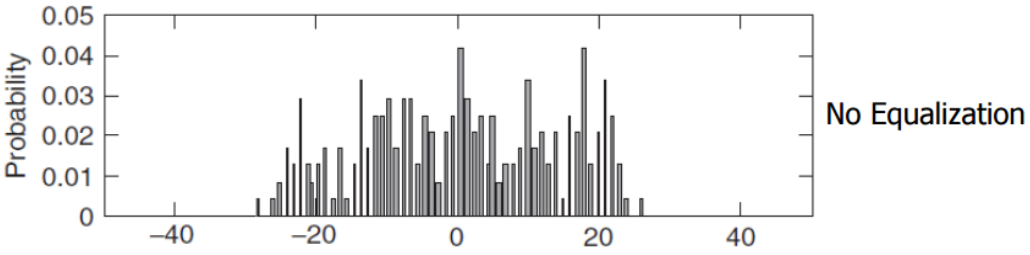


Figura 3-6 Jitter dipendente dai dati

Il fenomeno della distorsione del “duty cycle” è legata allo sbilanciamento della generazione degli “1” e degli “0” logici, ad esempio quando sono presenti un’asimmetria nei tempi di salita e di discesa dei fronti o un offset di tensione. Il “duty cycle” (DC, Figura 3-7) è il rapporto tra la durata dell’impulso ed il periodo dell’impulso; idealmente, un clock simmetrico ha un DC del 50%.

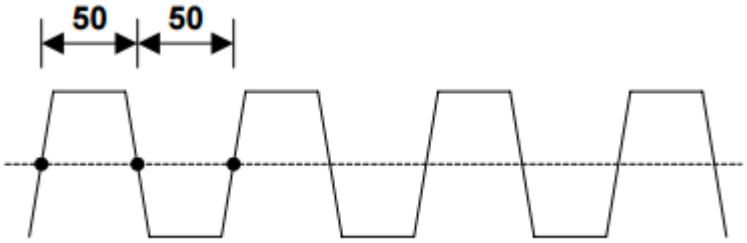


Figura 3-7 Duty cycle di un segnale di clock

[49] “Peripheral Component Interconnect Express”, abbreviato in PCIe, è uno standard di interfaccia d'espansione a bus seriale per computer, progettato per sostituire i vecchi standard PCI paralleli.

La distorsione del “duty cycle” (“Duty Cycle Distortion”, DCD, Figura 3-8) tiene conto sia della varianza temporale rispetto al 50% del DC, sia della varianza dell’offset di tensione medio.

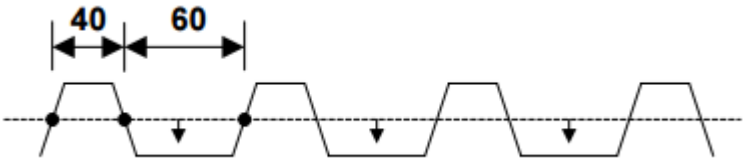


Figura 3-8 Distorsione del duty cycle (DCD)

Il DCD cresce con la riduzione dell’ampiezza e dei tempi di salita/discesa introdotti dal comportamento passa-basso del canale, che in genere tende ad attenuare le componenti in frequenza ma non l’offset, questo collocabile a frequenze più basse. Come mostrato nella Figura 3-9, i fronti di salita e discesa del diagramma ad occhio non s’intersecano nel massimo centrale dell’occhio (linea nera).

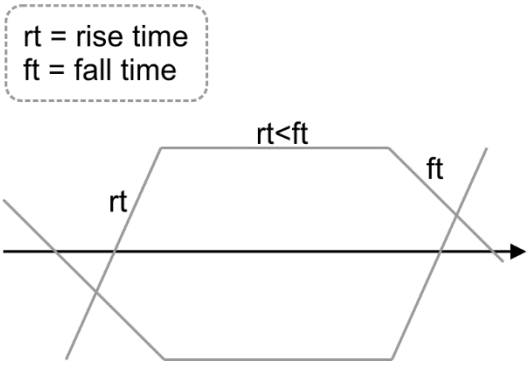


Figura 3-9 DCD: fronti del segnale nel diagramma “ad occhio”

Una tecnica per verificare il DCD è quella di stimolare gli elementi del sistema con un pattern di dati periodico di “1” e “0” alternati: ciò eliminerà il jitter dovuto all’ISI rendendo la forma d’onda meglio visualizzabile.

La PDF risultante da una DCD picco-picco (α_{DCD}) è la somma di due funzioni delta di Dirac[50] di Figura 3-10:

[50] Il modello a doppio Dirac approssima la PDF del TJ e permette la determinazione delle componenti DJ e RJ.

$$PDF_{DCD}(t) = \frac{1}{2}\left[\delta\left(t - \frac{\alpha_{DCD}}{2}\right) + \delta\left(t + \frac{\alpha_{DCD}}{2}\right)\right]$$

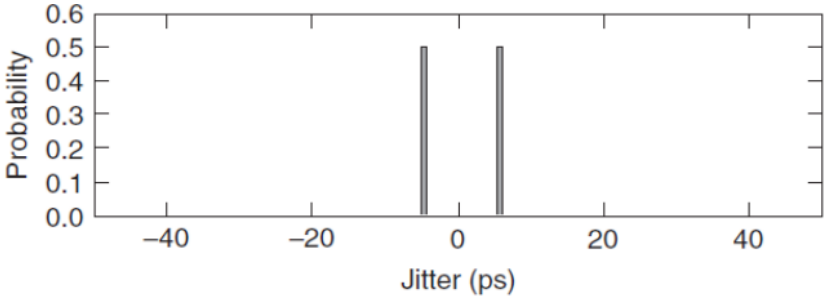


Figura 3-10 PDF risultante da una DCD

Un fenomeno speculare al DCD è la distorsione dell'ampiezza dell'impulso ("Pulse-Width Distortion", PWD) mostrato in Figura 3-11.

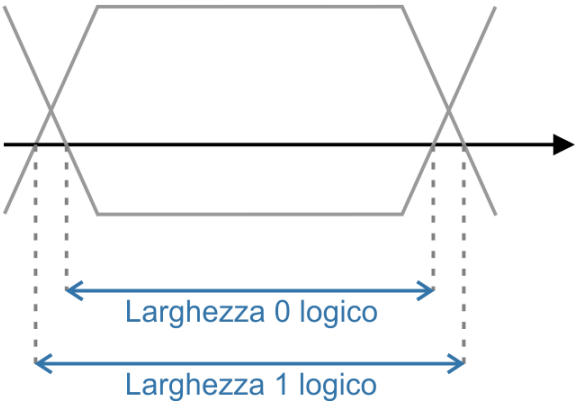


Figura 3-11 Pulse Width Distortion (PWD)

La decomposizione del DDJ, espresso in genere da un valore picco-picco, è un'operazione complessa; la soluzione solitamente praticata è quella di misurare il DDJ di ciascun blocco del sistema indipendentemente:

$$DDJ_t = \sum_{i=0}^{N} DDJ_{block}(i)$$

Dove:

- DDJ_t rappresenta il DDJ totale teorico del sistema;

- N è il numero totale dei blocchi;
- $DDJ_{block}(i)$ è il DDJ dell'i-esimo blocco.

La convoluzione delle singole componenti DJ, nel calcolo del *jitter-budget* del sistema, viene approssimata da una somma lineare dei singoli termini.

3.2.3 Bounded uncorrelated jitter

Il BUJ è nella maggior parte dei casi rappresentato dal "crosstalk", un fenomeno di mutuo disturbo che può essere osservato ad esempio tra conduttori tra loro separati e su cui transitano pattern differenti: ciascuno dei due conduttori, attraverso capacità e induttanze parassite, induce nella controparte il segnale trasportato. Il segnale totale su ciascuna linea può dunque risultare variato in ampiezza ed aver alterato dunque i punti di attraversamento dei fronti.

Questo genere di disturbo è considerato *non-correlato* in quanto è riferito e correlato al segnale "aggressore" esterno, ma non a quello che subisce il disturbo (ovvero il segnale "vittima"); essendo non-correlato può essere ancora quantificato da un valore picco-picco.

Gli effetti del crosstalk possono essere ridotti in genere separando meglio i canali, aumentandone la schermatura o utilizzando segnali differenziali.

3.2.4 Random jitter

Il "Random Jitter" (RJ) è causato da tutti quei fenomeni che non possono essere predetti sul segnale fronte per fronte, cioè dalla sovrapposizione di un elevato numero di piccoli fenomeni (processi indipendenti ed in genere non controllabili) che si combinano tra loro secondo il noto "teorema del limite centrale", ovvero seguendo una distribuzione di tipo gaussiano non limitata.

Questo genere di *jitter* non può essere descritto semplicemente con un valore picco-picco in quanto il valore differirebbe ad ogni misurazione, anche quando il pattern di dati utilizzato è sempre lo stesso. Per questi motivi il RJ è descritto attraverso una funzione densità di probabilità (PDF, Figura 3-12) del tipo

$$PDF_{RJ}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Dove σ rappresenta la deviazione standard (RMS) e μ il valor medio[51].

Il RJ se non può essere descritto da un solo valore picco-picco, può tuttavia essere descritto con un massimo valore picco-picco all'interno di una certa probabilità; può essere ad esempio definito un valore picco-picco in grado di assicurare che tale valore avrà una probabilità di verificarsi al di sotto di un certo "Bit Error Rate" (BER).

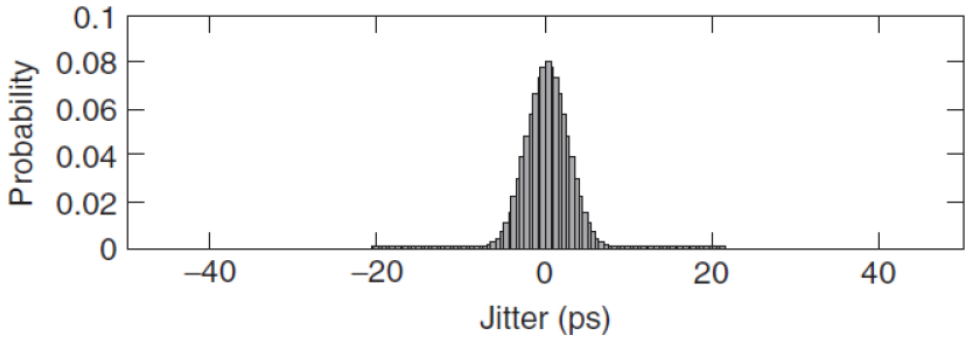


Figura 3-12 Jitter casuale

3.2.5 Total jitter

Il TJ non può essere descritto attraverso un solo valore statico (come ad esempio un valore picco-picco) in quanto una delle sue componenti è il RJ che varia con il BER.

Parimenti al RJ, il TJ può essere descritto attraverso una funzione densità di probabilità (PDF), che può essere ottenuta con buona approssimazione tramite misure di "Time Interval Error" (TIE) riportate ad un istogramma di probabilità. Tutte le componenti del *jitter* viste nei paragrafi precedenti vengono combinate tra loro:

- Sommando il jitter di tutte le sorgenti deterministiche (DJ);
- Raggruppando il jitter dei fenomeni casuali in un'unica varianza σ_{Totale}.

La stima del TJ è basata sulle seguenti relazioni:

$$DJ_{Totale} = DCD + ISI + BUJ = ck_dc + rf_ft + n_p + ISI + BUJ$$

[51] Nel caso, assai frequente, di processo continuo gaussiano stazionario a valore medio nullo $\mu = 0$

$$\sigma_{Totale} = \sqrt{{\sigma_1}^2 + {\sigma_2}^2 + \cdots + {\sigma_n}^2}$$

Dove

- "ck_dc" rappresenta il DCD del clock;
- "rt_ft" rappresenta la differenza tra i tempi di salita e di discesa;
- "n_p" è la differenza tra le reti positive e negative.

E che combinate esprimono il TJ in funzione del BER:

$$TJ(BER) = 2N(BER) \cdot \sigma_{Totale} + DJ_{Totale}$$

Dove N è il fattore moltiplicativo del BER (Tabella 3-1), di cui alcuni valori sono riportati nella tabella sotto: anche se il RJ ha un basso valore di deviazione standard, esso può risultare particolarmente incidente sul TJ a causa del fattore di moltiplicazione.

$TJ(BER)$ è il valore picco-picco della distribuzione del *jitter* definita in termini di BER, utile per comparare le prestazioni tra i differenti componenti del sistema, inclusi i clock; è definito come il livello di chiusura del diagramma ad occhio ad un dato BER.

Tabella 3-1 Fattore moltiplicativo del BER

BER	**N**
1e-6	4.75
1e-8	5.61
1e-10	6.36
1e-11	6.71
1e-12	7.03
1e-13	7.35
1e-14	7.65
1e-15	7.94

La PDF del TJ (Figura 3-13) è infine prodotta convolvendo le funzioni densità di probabilità del RJ e del DJ:

$$PDF_{TJ} = PDF_{RJ_{Totale}} \otimes PDF_{DJ_{Totale}}$$

Dove

$$PDF_{DJ}(t) = PDF_{SJ}(t) \otimes PDF_{DCD}(t) \otimes PDF_{ISI}(t) \otimes PDF_{BUJ}(t)$$

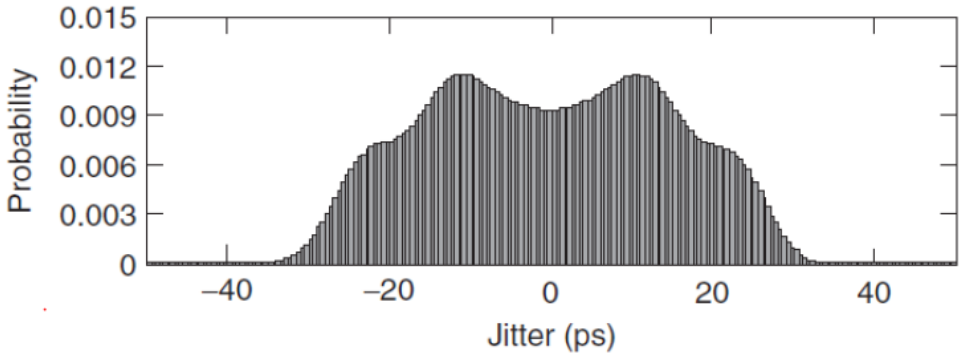


Figura 3-13 Jitter totale

3.3 Metriche del clock

Esistono diverse metriche per la stima di *jitter* e *wander* rispetto ad una singola forma d'onda sincrona; è importante comprendere come queste metriche si relazionano l'un l'altra e cosa sono in grado di rivelare. Tuttavia è bene tenere presente che la qualità di un clock dipende dal punto di vista, ovvero dalle specifiche aree applicative dove può essere fonte di errore.

3.3.1 Period jitter

Il "period jitter" è la misura più semplice e diretta di jitter, poiché misura il periodo di ogni ciclo di clock nella forma d'onda; il suo valore picco-picco può essere ottenuto attraverso un oscilloscopio, configurato per visualizzare poco più di un ciclo di clock su di un display a persistenza infinita (Figura 3-14 [65]): quando l'oscilloscopio si aggancia sul primo fronte, il jitter è visualizzabile sul secondo fronte.

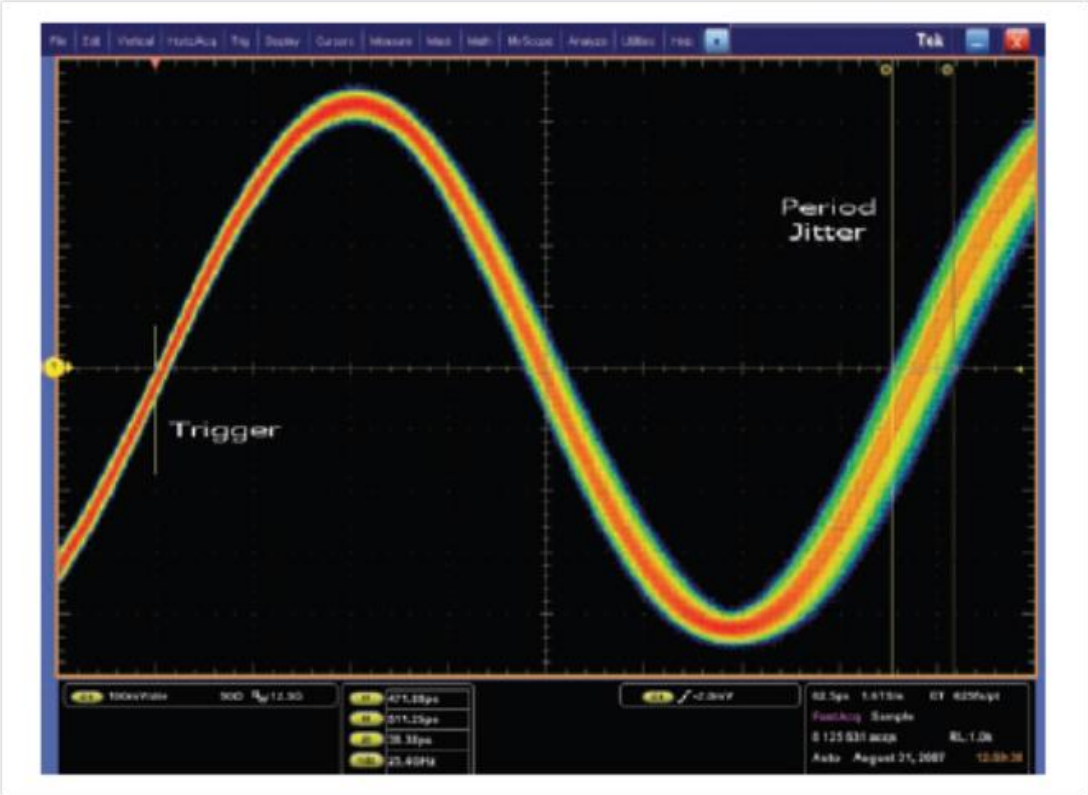


Figura 3-14 Jitter: persistenza infinita su oscilloscopio

Lo standard JDEC 65B definisce il “period jitter” come la deviazione nella durata del ciclo di un segnale rispetto al periodo ideale, su un numero di cicli scelti casualmente; lo standard specifica inoltre che il “period jitter” dovrebbe essere misurato su di un campione di 10k cicli.

Secondo il produttore “SiTime Corporation” [66] il “period jitter” dovrebbe essere misurato seguendo la procedura:

1. Misurare la durata di un ciclo di clock (da fonte di salita a fronte di salita);
2. Attendere un numero arbitrario di cicli di clock;
3. Ripetere i passi sopra 10k volte;
4. Calcolare la media aritmetica, deviazione standard e valore picco-picco sui 10k campioni;
5. Ripetere la misura 25 volte; calcolare il calore medio picco-picco dall’insieme dei 25 risultati ottenuti.

La deviazione standard (σ) o la radice quadratica media (RMS, "Root Mean Square") calcolata sulle misurazioni di 10.000 campioni risulta sufficientemente accurata e l'errore espresso in valore RMS può essere calcolato secondo l'equazione

$$Errore_{RMS} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{2N}}$$

Dove σ_n è il valore RMS del campione collezionato e N è la grandezza del campione; per una grandezza del campione 10.000, l'errore RMS è $0.0071\sigma_n$. Questo errore è casuale e segue una distribuzione di tipo Gaussiano. L'errore di misura nel caso peggiore è tipicamente stimato come $\pm 3\ Errore_{RMS}$. Tuttavia nelle applicazioni di natura pratica, l'errore RMS è piccolo sufficientemente da essere ignorato.

A causa della natura casuale del "period jitter", aumentando la grandezza del numero di campione aumenta la probabilità di campionare punti sulle code della curva di distribuzione; in altre parole, i valori picco-picco tendono a divergere piuttosto che a convergere aumentando il numero di campioni. Per questa ragione il processo di "SiTime" aggiunge il passo numero 5, al fine di ottenere misurazioni picco-picco più consistenti.

3.3.2 Cycle to cycle jitter

Il jitter "Cycle to Cycle" (C2C), secondo la definizione dello standard JEDEC 68B, misura la variazione del periodo di clock di un segnale tra cicli adiacenti, su di un numero casuale di coppie di cicli adiacenti che secondo lo standard deve essere maggiore o uguale a 1000.

Può essere trovato applicando un'operazione di differenza del primo ordine sul "period jitter"; essendo inoltre una differenza tra 2 periodi consecutivi, non necessita la conoscenza della posizione dei fronti di un clock di riferimento con periodo ideale.

Questo genere di misurazioni può essere interessante per studiare le dinamiche istantanee a cui è soggetto un PLL per il recupero del clock ("PLL clock-recovery") e più in generale la stabilità degli orologi "spread-spectrum", poiché il C2C è meno sensibile alle caratteristiche di espansione della frequenza rispetto al "period jitter".

In genere è espresso o come valore di picco o RMS, in picosecondi.

La metodologia proposta da "SiTime" segue i passi:

1. Misurare il periodo del ciclo rispetto a due cicli di clock consecutivi T_1 e T_2;
2. Calcolare e memorizzare il valore differenza $|T_1 - T_2|$;
3. Attendere un numero casuale di periodi di clock;
4. Ripetere i passi sopra 1000 volte;
5. Calcolare la deviazione standard (σ) ed il valore di picco dei 1000 campioni, inteso come il valore assoluto più grande $|T_1 - T_2|$ dell'insieme di dati raccolti;
6. Ripetere le misurazioni 25 volte e calcolare il picco medio dall'insieme dei 25 risultati.

Analogamente a quanto avviene per il "period jitter", il valore di picco del C2C diverge con il numero di campioni acquisiti; il punto 6 sopra è stato aggiunto per ottenere un picco medio di jitter C2C.

Il C2C ha tuttavia un difetto [67]: è visibile solo il jitter ad alta frequenza. Il fatto di osservare cicli adiacenti filtra qualsiasi altro effetto di lungo termine che avviene nel segnale; ogni effetto che si verifica in fase con il numero di cicli misurati cadrà in un punto di misura nullo. La finestra d'osservazione è dunque un filtro "notch".

La metodologia "N-Cycle" jitter estende il concetto di C2C: invece che misurare la differenza tra cicli adiacenti, viene misurato un raggruppamento di N periodi. In particolare, la differenza tra raggruppamenti adiacenti è "N-Cycle" jitter, mentre la variazione dei periodi multipli è meglio identificata dal "N-Period" jitter.

3.3.3 Long-term jitter

Il "Long-Term" jitter misura la variazione dell'uscita di un clock dalla sua posizione ideale su più cicli consecutivi, il cui numero dipende dalla tipologia di applicazione. Esso rappresenta gli effetti cumulativi del jitter su di un flusso continuo di cicli di clock in un intervallo di tempo ampio, ed è questo il motivo per cui è spesso identificato con il jitter accumulato.

Il “Long-Term” jitter è utile principalmente nei sistemi di visualizzazione video e nelle applicazioni di telemetria su lunga distanza, come i “range finder”.

La “SiTime” propone i seguenti passi per la misura del “Long-Term” jitter, ad esempio su 10000 cicli di clock (Figura 3-15):

1. Misurare l’intervallo di tempo occupato da 10000 cicli di clock consecutivi;

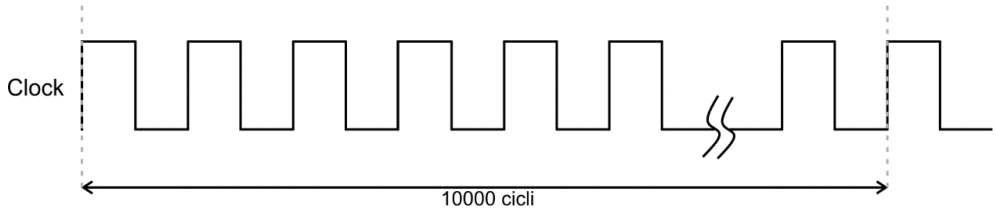


Figura 3-15 Cicli di clock per il Long-Term Jitter

2. Attendere un numero casuale di cicli;
3. Ripetere i passi precedenti 1000 volte;
4. Calcolare la deviazione standard (σ) ed il valore picco-picco dei 1000 campioni;
5. Ripetere le misurazioni 25 volte e calcolare il valore picco-picco medio dall’insieme dei 25 risultati.

Anche in questo caso l’ultimo passo è utilizzato per aggirare la natura non limitata del valore picco-picco.

3.3.4 Time Interval Error (TIE)

Il “Time Interval Error” (TIE) è la deviazione temporale di un fronte dalla sua posizione ideale, misurata rispetto ad un istante di riferimento; in pratica, il TIE è una rappresentazione nel dominio del tempo del rumore di fase espresso in secondi o pico-secondi [66]. Il TIE può essere interpretato come la differenza tra il segnale misurato ed il clock di riferimento[52,]

[52] Mentre il jitter è di norma misurato facendo riferimento ad un clock estratto dal segnale dati, il wander è misurato in riferimento ad un clock esterno.

tipicamente espressi in nanosecondi, e per convenzione impostato a zero all'inizio del periodo di misurazione: esso restituisce dunque le variazioni temporale a partire dall'inizio della misurazione (Figura 3-16).

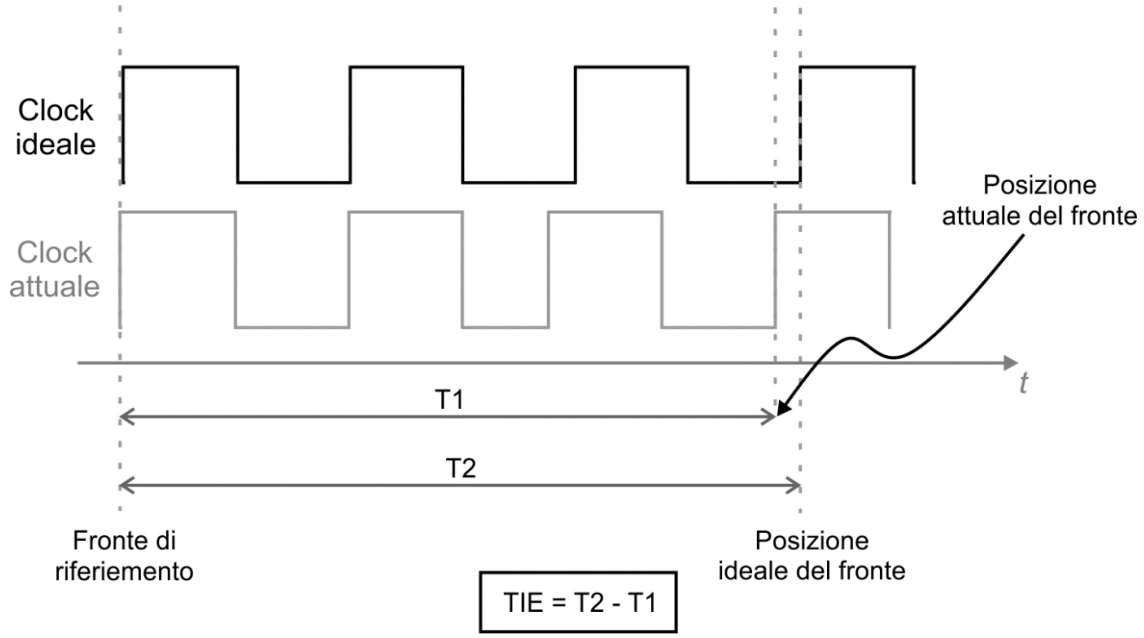


Figura 3-16 Time Interval Error

Nella Figura 3-17 è riportata la rappresentazione del TIE rispetto al tempo; i fronti in rosso rappresentano il riferimento temporale ideale, mentre quelli in nero i fronti del segnale misurato che a causa del jitter slitteranno nel tempo (fenomeno di "shifting") prima o dopo i fronti di riferimento.

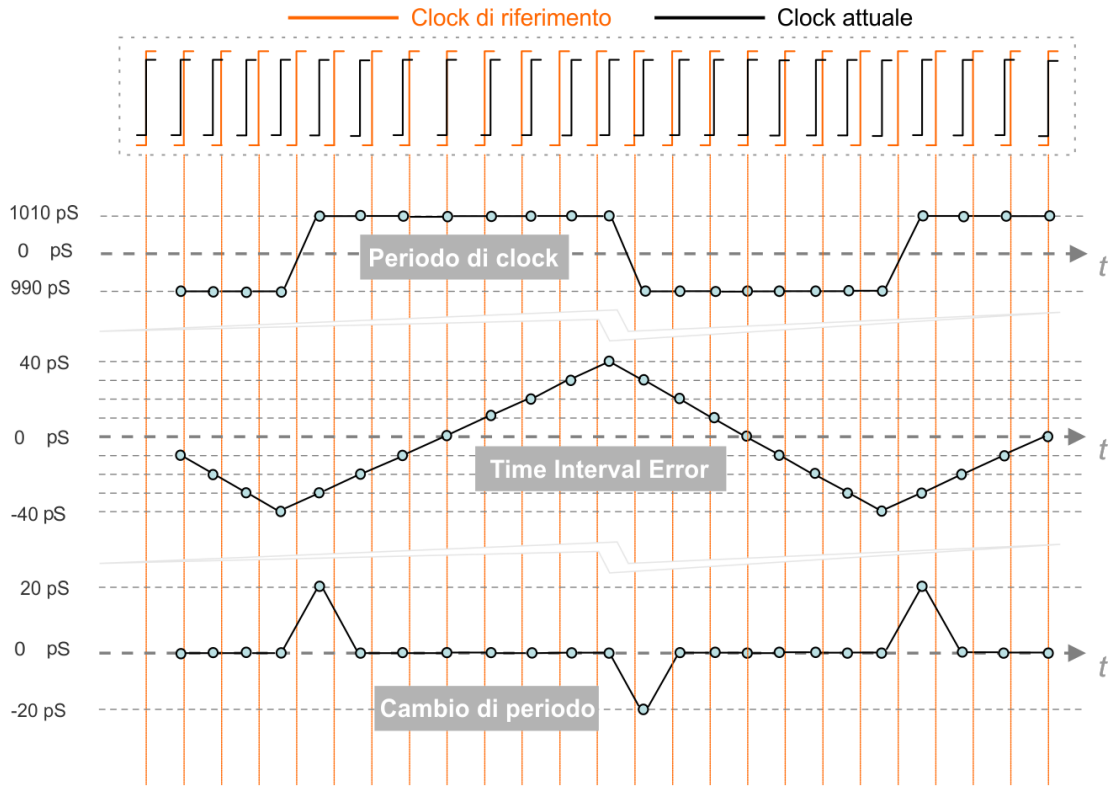


Figura 3-17 Time Interval Error in relazione al periodo di clock [66]

Nell'esempio in figura, il TIE si sposta in direzione dei valori negativi e dopo aver accumulato -40 ps di errore di jitter, la direzione s'inverte nuovamente.

Le misure di TIE sono particolarmente utili nella valutazione dei flussi di dati trasmessi dove il clock è tipicamente ricavato dai dati utilizzando dei circuiti di *Clock/Data Recovery* (CDR); un ampio valore di TIE potrebbe ad esempio indicare che il PLL nel CDR non è sufficientemente rapido a seguire le variazioni del "bit rate" del flusso.

Gli strumenti più adatti per riscostruire l'informazione degli insiemi di dati TIE, sono gli oscilloscopi "real-time" che acquisiscono il segnale in analisi per generare l'insieme dei campioni TIE {tn} a partire dai campioni di tensione.

Il dato attuale è acquisito ad intervalli di tempo regolari tramite un ADC veloce su una base dei tempi interna, pertanto i punti di attraversamento sono calcolati mediante tecniche d'interpolazione: se la banda dell'oscilloscopio è sufficiente (solitamente 3 volte la massima

frequenza da analizzare) e se la profondità di memoria è adeguata ("memory depth"), l'interpolazione non introduce incertezze apprezzabili [68]. La base dei tempi dell'oscilloscopio possiede le sue caratteristiche in termini di jitter che contribuiscono all'errore di misura del jitter sul segnale d'interesse; "SiTime" afferma [66] che il jitter sulla base dei tempi dovrebbe essere tenuto al di sotto del 25% del jitter atteso sul segnale in via d'analisi, affinché le misurazioni risultino di accuratezza migliore del 3%.

Si vuole evidenziare che quando il calcolo del TIE è applicato su di una rete a pacchetti sfruttando una metodologia di misura basata sulla raccolta delle differenze tra "timestamp", allora il TIE è chiamato "Packet Delay Variation".

Nella Figura 3-18 è riportato come l'oscilloscopio digitale campiona e visualizza un segnale ai suoi ingressi:

- le frecce sotto rappresentano gli istanti di campionamento;
- la linea continua è il segnale da campionare;
- i punti sono i campioni del segnale;
- la linea tratteggiata è l'interpolazione ("best-fit") tra i campioni.

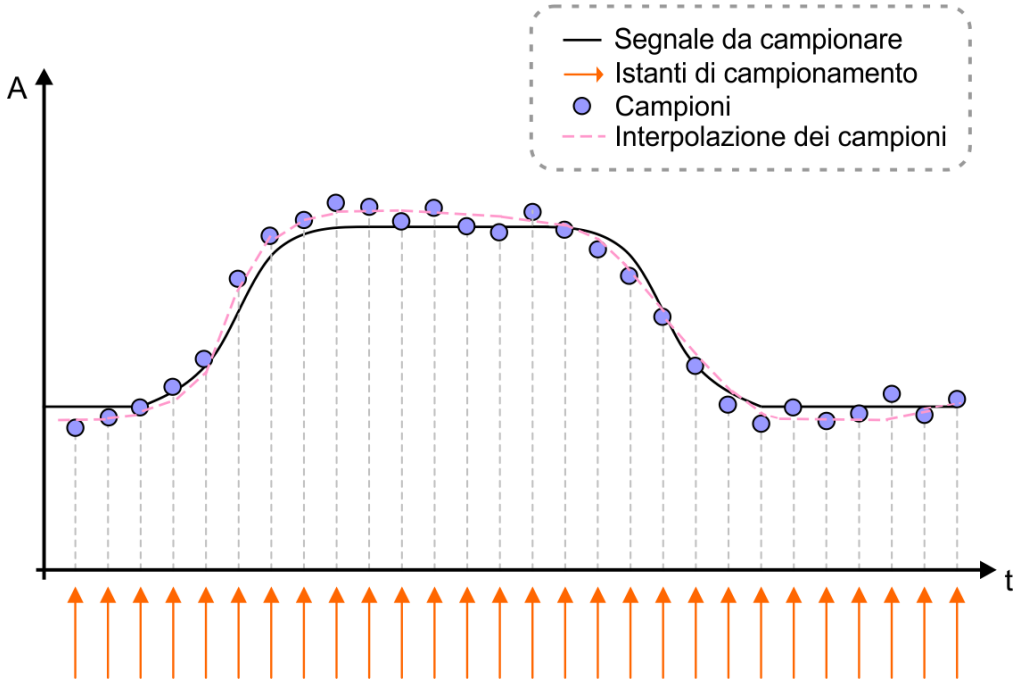


Figura 3-18 Campionamento ed interpolazione negli oscilloscopi digitali

Dalla figura è evidente che i campioni del segnale possono non rispettare sempre il valore reale del segnale, una discrepanza dovuta ad errori di quantizzazione dell'oscilloscopio.

"SiTime" [66] consiglia due metodologie di misurazione del TIE.

Metodo A.

1. Configurare l'oscilloscopio real-time per misurare tutti i periodi di clock.
2. Configurare l'oscilloscopio per catturare 10000 cicli sul display, regolando opportunamente la divisione orizzontale.
3. Registrare media, deviazione standard e valore picco-picco.
4. Media e deviazione standard saranno sufficientemente accurate, mentre il valore picco-picco non sarà accurato a causa della natura "non limitata" del jitter.
5. Per ottenere un valore picco-picco più attendibile, ripetere i passi 2 e 3 per 25 volte annotando il valore picco-picco ad ogni ciclo e calcolare infine la media sui 25 risultati ottenuti.

Metodo B (secondo lo standard JEDEC).

1. Configurare l'oscilloscopio per misurare il periodo del primo clock ed impostare la funzionalità "istogramma" ove disponibile.
2. Configurare l'oscilloscopio per catturare un singolo ciclo di clock sul display.
3. Ripetere gli *step* 1 e 2 per 10000 volte.
4. Registrare media, deviazione standard e valore picco-picco.
5. Media e deviazione standard saranno sufficientemente accurate, mentre il valore picco-picco non sarà accurato a causa della natura "non limitata" del jitter.
6. Per ottenere un valore picco-picco più attendibile, ripetere i passi da 2 a 4 per 25 volte annotando il valore picco-picco ad ogni ciclo e calcolare infine la media sui 25 risultati ottenuti.

3.3.5 Maximum Time Interval Error (MTIE)

Questo genere di calcolo computazionale è utilizzato nello studio del wander, dove le componenti di jitter ad alta frequenza vengono rimosse da un filtro passa-basso.

Il MTIE è ottenuto dai dati di fase mediante ripetute ricerche della massima escursione su di una serie di finestre temporali [69]: più è ampia la finestra d'osservazione "τ" maggiore è il MTIE(τ) (Figura 3-19), che è una funzione monotona crescente di "τ" ed opera come fosse un rilevatore di picco che si sposta sull'insieme dei TIE registrando il massimo valore picco-picco della variazione di ritardo, rispetto ad un dato segnale di riferimento in ingresso [70].

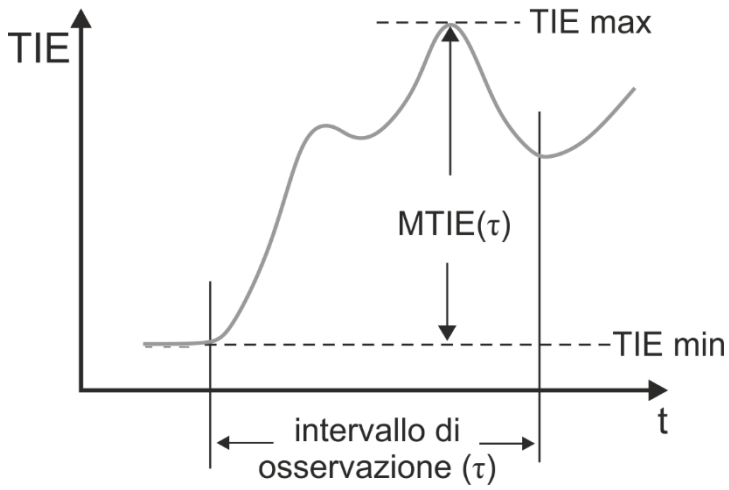


Figura 3-19 Maximum Time Interval Error

Il MTIE misura la stabilità di un clock rispetto ad una finestra temporale, ovvero il la variazione di fase del segnale rispetto all'idealità, nel suo caso peggiore; può essere espresso dalla relazione sotto [71].

$$MTIE(n\tau_0) \cong \max_{1\le k\le N-n}\left[\max_{k\le i\le k+n} x_i - \min_{k\le i\le k+n} x_i\right], n = 1,2,\dots,N-1$$

Dove:

- $n\tau_0$ è la lunghezza della finestra di osservazione;
- n è il numero di campioni della finestra;
- τ_0 è l'intervallo del campione;
- N è il numero di campioni del set di dati;
- i è incrementata per scansionare all'interno della finestra;
- k è incrementata per far scorrere temporalmente la finestra.

Se durante l'analisi del *wander* il riferimento temporale non è disponibile, l'analisi basata su MTIE può risultare affetta da un offset di frequenza; quando quest'offset è sottratto dal risultato, allora si è operato un "Maximum Relative Time Interval Error" (MRTIE).

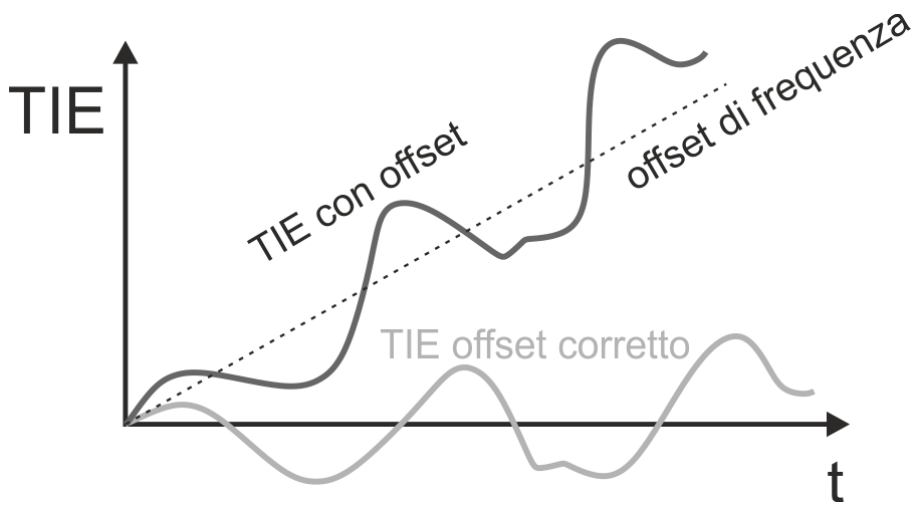


Figura 3-20 Rimozione dell'offset nel Maximum Relative Time Interval Error

Il MTIE ed il MRTIE sono in genere espressi in nanosecondi o microsecondi [30].

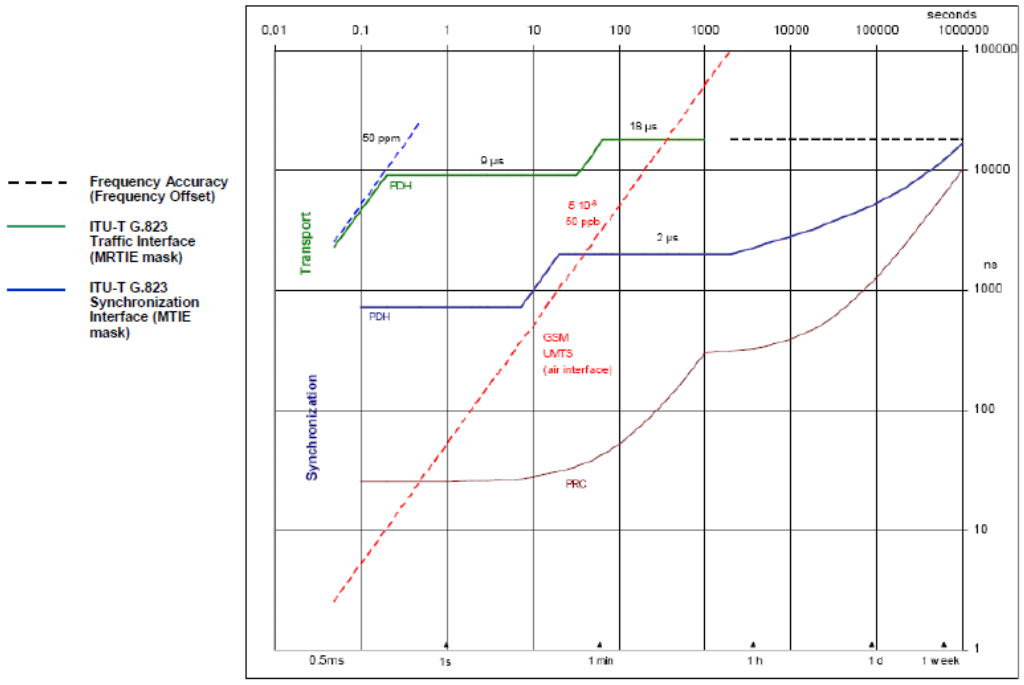


Figura 3-21 Maschera ITU-T G.810 per l'MTIE

Il MTIE è specificato nella ITU-T G.810 e le relative "maschere" (Figura 3-21) per la verifica della "compliance" sono ad esempio indicate nelle ITU-T G.812, G.813, G.823, G.824 e G.8261.

3.3.6 Time Deviation (TDEV)

Un altro parametro chiave per lo studio della stabilità della sincronizzazione è il "Time Deviation" (TDEV), una misura di *wander* che caratterizza il contenuto spettrale del segnale.

È una funzione del parametro "τ" (intervallo di osservazione) che rappresenta un'analisi statistica del contenuto di energia spettrale del rumore di fase e che può essere interpretato come il valore RMS di una TIE fortemente filtrata da un filtro passa-banda, centrato ad una frequenza di 0.42/τ. Ogni contributo costante dell'offset di frequenza del segnale di temporizzazione rispetto al suo riferimento, non ha influenza sulla funzione TDEV(τ) (Figura 3-22).

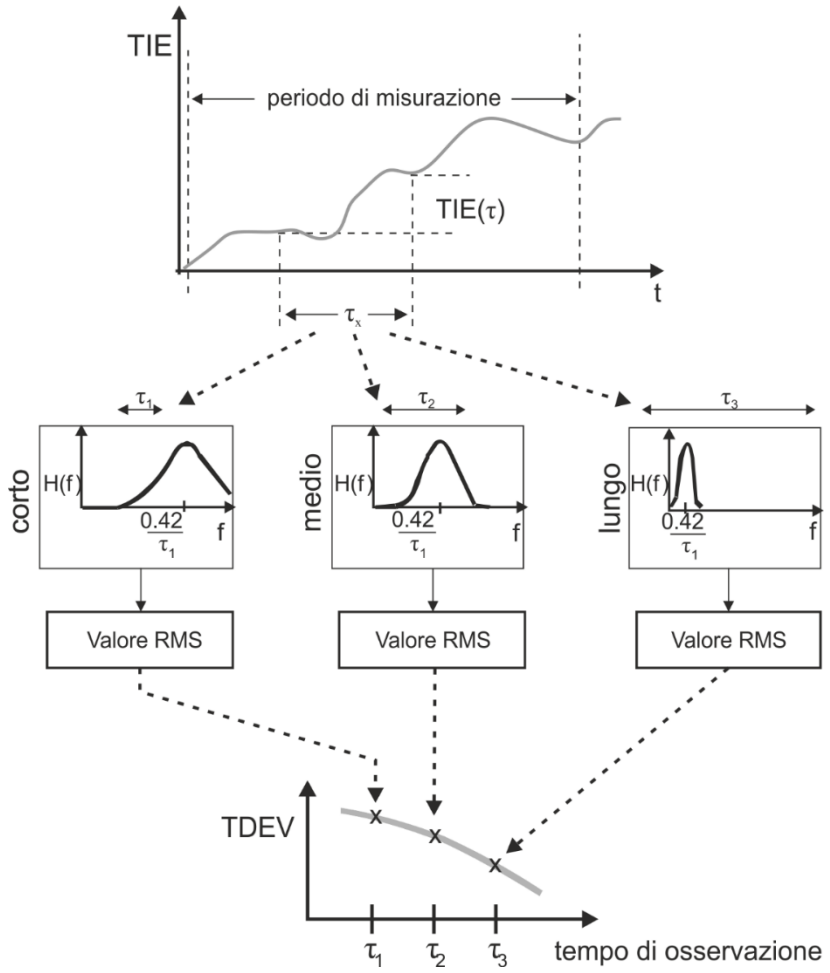


Figura 3-22 Time Deviation (TDEV)

La TDEV può essere matematicamente descritta dalla relazione sotto [72].

$$TDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, n = 1,2, \dots, int\left(\frac{N}{3}\right)$$

Dove:

- $n\tau_0$ è la lunghezza della finestra di osservazione;
- n è il numero di campioni della finestra;
- τ_0 è l'intervallo del campione;
- N è il numero di campioni del set di dati;
- i è incrementata per scansionare all'interno della finestra;
- j è incrementata per far scorrere temporalmente la finestra.

Il TDEV rappresenta anche una "signature" [73] della tipologia di oscillatore o di un particolare meccanismo di rumore; ad esempio la ETS 300 462-1 associa particolari gradienti della curva TDEV a particolari meccanismi di rumore nei clock.

3.3.7 Unit Interval

Il jitter è un cambiamento inatteso della fase del segnale digitale e la quantità di jitter è nelle comunicazioni digitali un indice per stimare la qualità di una trasmissione; l'unità di misura della fase "Unit Interval" (UI) è qui utilizzata per indicare l'ampiezza del jitter nei codici di trasmissione ed è definita come un singolo ciclo di "bit-clock" (spostamento di fase di 360°), indipendentemente dalla codifica impiegata (Figura 3-23) [74].

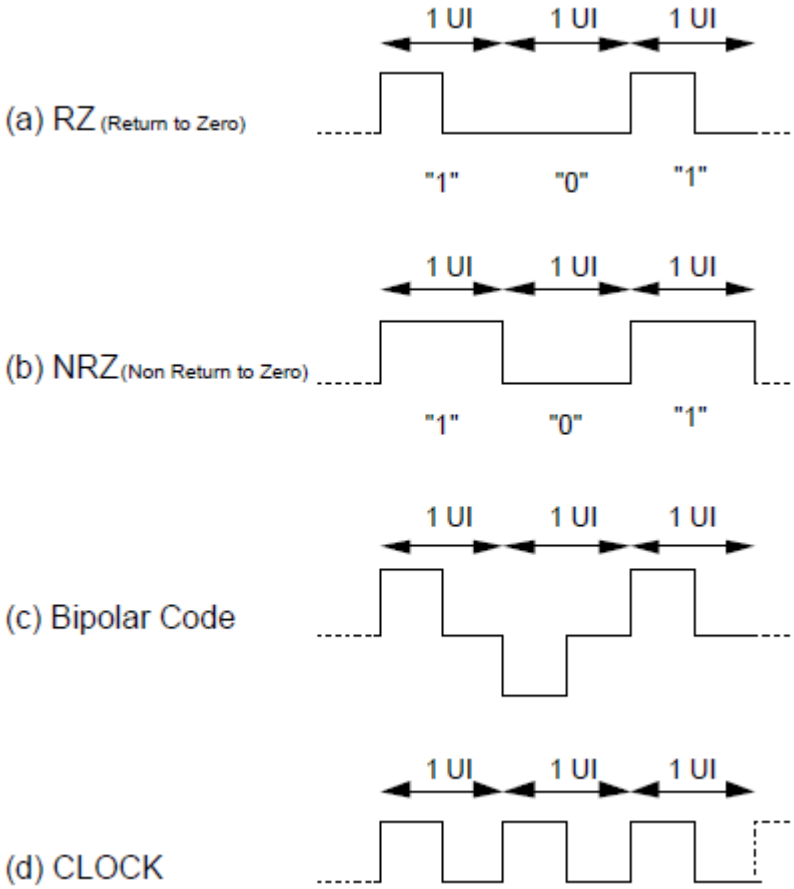


Figura 3-23 Codifica bipolare, RZ e NRZ

Attualmente sono in uso due tipologie di unità:

- UI_{pp} (variazione di ampiezza di fase picco-picco);
- UI_{rms} (variazione di fase effettiva).

Essendo parametri standardizzati, queste quantità sono indipendenti dal “bit-rate” e dunque l’incidenza del jitter può essere comparata anche a differenti “bit-rate”.

3.4 Strumentazione di misura del jitter

Il jitter può essere misurato facendo uso di molteplici strumenti e strategie, i più frequenti descritti nei paragrafi a seguire.

3.4.1 BERT

I tester di "Bit-Error-Rate" (BERT, Figura 3-24) includono in un unico strumento sia la sorgente di riferimento che l'hardware necessario alla misurazione; la sorgente è solitamente indicata come "Pattern Generator" (PG) mentre la parte di acquisizione e misura "Pattern Detector" (PD).

Il PG è in grado di generare segnali digitali sorgenti a diversi "data-rate" e protocolli, dallo standard RS-232 ai moderni Gigabit Ethernet.

Il BERT invia un flusso di pacchetti di dati che vengono comparati con quanto ricevuto al PD, per verificarne l'integrità.

Figura 3-24 Keysight N4906B Serial BERT

Questo genere di apparati può rilevare piccole quantità di jitter con ragionevole accuratezza, poiché sono in genere dotati di eccellenti basi dei tempi e di circuiti di temporizzazione molto accurati. Il jitter viene misurato muovendo il punto di campionamento di passi fissi e rilevando l'istante il cui il segnale è considerato fuori soglia; il set di campioni così ottenuto viene utilizzato per determinare la deviazione standard e il valore picco-picco nelle variazioni della temporizzazione dei fronti del segnale.

Solitamente hanno costi piuttosto elevati e sono poco versatili; i tempi di misura ricadono oggi nelle decine di minuti per la scansione dei dati ed alcune ore per i risultati.

3.4.2 Jitter analyzer

Gli analizzatori di jitter (Figura 3-25) sono solitamente strumenti molto specifici e costosi, progettati per misurare le variazioni di temporizzazione nei circuiti; difficilmente possono essere impiegati in campi applicativi diversi dagli intervalli di frequenza e dagli standard supportati per i quali sono stati progettati. I metodi di misura impiegati variano a seconda del costruttore: alcuni sfruttano un analisi di fase similmente agli analizzatori di spettro, altri invece utilizzano sistemi di conteggio dei bit similmente ai BERT. La tipologia di *design* di tali strimenti è in genere dettata dallo standard che questo dovrà supportare. Complessivamente essi sono utili nell'intervallo di *rate* tra DC e 50 Gb/s.

Figura 3-25 Anritsu MP1797A – 40G Jitter Analyzer

3.4.3 Time interval analyzer

Sono conosciuti anche come "Signal Integrity Analyzer" e sono dei timer contatori che misurano il jitter attraverso un approccio statistico: misurando un elevato numero di periodi del segnale o confrontandolo con una base di riferimento, possono misurare il jitter con discreta accuratezza, che va a dipendere dalla qualità della base dei tempi e dalla risoluzione dei contatori impiegati. Alcuni di questi strumenti (Figura 3-26) impiegano metodologie alternative all'impiego di veri contatori, come generatori di rampa basati su di un generatore di corrente che carica una capacità: la strumentazione converte tramite un ADC la tensione ai capi della capacità associando questo valore ad una variazione temporale.

Figura 3-26 Keysight 5372A Frequency & Time Interval Analyzer

Questo genere di analizzatori sotto-campiona il segnale e non è in grado di misurare il periodo "cycle-to-cycle" o variazioni di fase nel tempo: un'importante limitazione che impedisce di determinare in modo diretto la frequenza del jitter. Inoltre il sotto-campionamento può introdurre effetti di "aliasing" portando il jitter ad alta frequenza a manifestarsi come jitter a bassa frequenza e rischiando di guidare l'osservatore verso conclusioni incorrette circa la natura della sorgente del jitter.

3.4.4 Analizzatori di spettro

L'uso combinato di analizzatore di spettro (

Figura 3-27) con sorgenti di frequenza ad elevata accuratezza permette di apprezzare piccole variazioni della fase di un segnale; dopo aver infatti misurato la deviazione di fase del segnale, è possibile effettuare una conversione diretta nel tempo considerando che un segnale che varia di 1° ha una variazione di 360° sul periodo.

Figura 3-27 Keysight E5052B SSA

Un particolare vantaggio degli analizzatori di spettro è che posseggono una buona risoluzione della misura di fase ed un eccezionalmente basso “Noise-floor”, che consentono loro di misurare variazioni in frequenza e fase in modo migliore rispetto alla strumentazione convenzionale basata sul dominio del tempo: un tipico oscilloscopio ad elevate prestazioni (che sia “sampling” o “real-time”) ha infatti un “Noise-floor” di jitter non migliore di 100 fs [75], a causa del “dynamic-range” limitato dell’ADC e del jitter residuo dovuto al riferimento temporale interno. Gli analizzatori “real-time” hanno inoltre il vantaggio rispetto ai predecessori “swept sinewave” di poter misurare le variazioni “cycle-to-cycle”.

Attraverso tecniche di misura basate su cross-correlazione tra due canali di misura indipendenti, alcune famiglie di analizzatori possono raggiungere un jitter “Noise-floor” anche 1000 volte inferiori agli oscilloscopi digitali moderni.

3.4.5 Oscilloscopi real-time

Questo genere di strumentazione rappresenta il modo più semplice per osservare il jitter. Un oscilloscopio “Real-Time” (Figura 3-28) cattura una sequenza temporale di campioni di tensione che forniscono un insieme coerente di variazioni di tensione da cui vengono derivate le informazioni riguardanti i fronti temporali.

È possibile misurare il periodo di ogni ciclo, la differenza tra periodi nonché la media di tutti i periodi catturati. Sfruttando il periodo medio e la fase del primo e dell’ultimo ciclo, ogni singolo fronte risulta misurabile in termini di TIE; inoltre, con l’ausilio del calcolatore, è possibile effettuare analisi di dati complesse in “post-processing”, operazione che solitamente non è possibile con le altre tipologie di strumentazione menzionate.

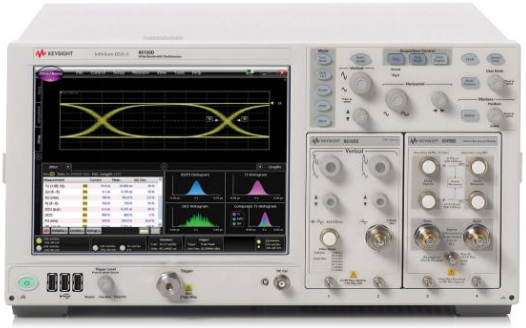


Figura 3-28 Infinium DCA-X 86100D Wide-Bandwidth Oscilloscope

Un oscilloscopio “Real-Time” è in grado di fornire l’informazione riguardante il fronte attuale con il suo “timestamp” associato, fornendo così un’informazione di fase che può essere utilizzata per individuare gli effetti delle armoniche nascosti nel set di dati. Questo genere di approccio “Real-Time” permette dunque di ottenere informazioni dettagliate circa il dominio del tempo e della frequenza, sia per i segnali di clock che per gli stream di dati.

Le informazioni di ampiezza del jitter e la frequenza completa delle sue relazioni armoniche così determinate, possono essere utilizzate per individuare le diverse componenti del jitter ed eventualmente le sorgenti.

La strumentazione “Real-Time” rappresenta oggi il migliore strumento disponibile [76] per lo studio del jitter, anche se il suo impiego è limitato da frequenze di campionamento e larghezze di banda non adatte all’analisi degli altissimi flussi di dati oggi esistenti.

3.5 Parametri di performance delle reti PTP: Packet Delay Variation

Una delle maggiori sfide dello standard IEEE 1588 è quella di riuscire a superare la problematica della variazione di ritardo dei pacchetti, nota come “Packet Delay Variation” (PDV). Essa è di per sé così sensibile al carico della rete, che dalla conoscenza delle condizioni del carico dinamico si possono comprendere le caratteristiche della PDV e viceversa. Lo studio di questo fenomeno si è dimostrato inoltre essenziale per lo sviluppo di algoritmi ottimali per gli “Slave Clock” (SC).

La misurazione della PDV è importante per diverse ragioni:

- comprendere la PDV rispetto a diverse configurazioni di rete è fondamentale per ottenere le migliori performance da uno SC;
- le misure possono fornire una guida per lo sviluppo ottimale di Master e Slave sulla stessa rete;
- il monitoraggio della PDV all'interno di un NE può fornire precise informazioni sulle prestazioni si uno SC ed al contempo sulle condizioni generali della rete.

Nelle misurazioni di latenza e PDV, il pacchetto IEEE 1588 funziona da elemento "probe", grazie ad un "timestamp" preso su un particolare pacchetto che attraversa due punti della rete; il set di dati è formato da una sequenza di valori di ritardo di transito del pacchetto dove ogni campione è la differenza tra due "timestamp". Il processo è simile ad una misura di fase e le tecniche di analisi delle sequenze di ritardo sono ereditate da quelle applicate negli studi di stabilità degli oscillatori.

Per studiare il trasferimento della frequenza tramite pacchetti, la quantità di maggior interesse è la PDV: le apparecchiature che effettuano timestamping su due nodi della rete non devono necessariamente condividere lo stesso riferimento temporale; è sufficiente infatti che oscillino alla stessa frequenza.

Per lo studio del trasferimento della fase, la strumentazione che effettua il timestamping deve condividere uno stesso riferimento temporale, ad esempio attraverso un GPS, poiché i segmenti di rete di downstream ed upstream devono essere analizzati simultaneamente.

Per la distribuzione del tempo e della fase (che interessa alla PQ) fa riferimento a "ITU-T G.8275, Architecture of time/phase distribution".

Gli elementi di rete (switch e router) operano mediante dei meccanismi d'immagazzinamento ed inoltro dei messaggi gestiti tramite delle code ("queue") che generano dei ritardi di transito dei pacchetti, dipendentemente dalla congestione e dal "pattern" di traffico; nelle reti Ethernet i ritardi dovuti alle code causano l'insorgere della PDV, ma possono essere caratterizzati mediante l'uso di una funzione di distribuzione di probabilità (PDF).

Nel protocollo PTP, il nodo master invia un messaggio *multicast* di tipo SYNC a tutti gli slave, al ritmo dell'intervallo di sincronizzazione; il pacchetto SYNC include il timestamp

di origine M_i ed ogni Slave registra l'istante S_i di ricezione dell'i-esimo pacchetto SYNC. Il ritardo di ogni pacchetto sulla tratta "End-to-End" è data da:

$$d_i = d_{trans} + d_{prop} + d_{queue_i}$$

Poiché la dimensione del pacchetto è fissa (44Bytes) e se i pacchetti seguono tutti lo stesso percorso verso lo Slave, d_{trans} e d_{prop} sono entrambi costanti, lasciando variabile solo il ritardo di coda d_{queue}, causa della PDV.

Nel caso di una perfetta sincronizzazione tra Master e Slave, la differenza tra due time-stamp for ogni pacchetto SYNC coincide con il ritardo d_i sopra:

$$\delta_i = S_i - M_i = d_i$$

Se i due segnali di clock sono affetti da un disallineamento, allora δ_i includerà anche un offset accumulato.

$$\delta_i = d_i + (M_i + d_i)\sigma$$

Questo offset $(M_i + d_i)\sigma$ fa gradualmente aumentare o ridurre δ_i nel tempo, a seconda se il clock Slave è più veloce o lento del suo Master.

4. La sincronizzazione nelle reti elettriche

Lo scopo di questo capitolo è fornire una breve panoramica sul tema nella sincronizzazione nello specifico contesto dei sistemi di energia elettrica.

Verranno introdotte le metodologie impiegate nelle diverse applicazioni dei sistemi di energia elettrica; saranno poi presentati i sistemi di acquisizione dati WAMS, di cui possiamo considerare parte la rete di monitoraggio della PQ del Laboratorio di Misure, e sarà affrontato il problema della sincronizzazione in questo genere di applicazioni. Infine saranno brevemente trattati i sincrofasori per Smart Grid.

4.1 Metodologie di sincronizzazione

L'importanza di poter marcare temporalmente gli eventi in modo accurato e preciso è diventata sempre più evidente nell'industria dell'energia elettrica a seguito della necessità di analizzare le cause di guasti elettrici e blackout che, ogni volta, rischiano di coinvolgere un elevato numero di utenze. Le esperienze in questo settore mostrano che il processo di riallineamento dei dati tra differenti servizi può richiedere più tempo dell'analisi stessa dei dati: è dunque utile poter ricorrere a riferimenti temporali accurati per poter controllare e proteggere i sistemi di distribuzione dell'energia elettrica.

Le sorgenti temporali di riferimento basate su comunicazioni radio, come i sistemi di navigazione satellitari, sono comunemente utilizzati per ricavare un preciso riferimento di tempo; tuttavia, per evitare di dover equipaggiare ogni dispositivo con un ricevitore GPS dedicato, sono stati impiegati altri sistemi di distribuzione dell'informazione di tempo: il NTP ed il IRIG-B. Anche se l'NTP è già indicato nella specifica IEC 61850[53] per questo scopo, è adatto solo nelle applicazioni in cui non è richiesta un'accuratezza di sincronizzazione migliore dei millisecondi; per contro, i codici IRIG-B sono in grado di fornire performance di sincronizzazione migliori, ma necessitano di un cablaggio dedicato per la distribuzione dei segnali di temporizzazione. Con l'introduzione del PTP, oggi sembra finalmente possibile distribuire in riferimento temporale in modo accurato e sicuro sfruttando la rete Ethernet come mezzo d'interconnessione tra le stazioni di energia, offrendo un livello di accuratezza che può arrivare al di sotto del microsecondo. L'accuratezza del riferimento

[53] Standard di protocollo dominante nei servizi di "substation", supportato dai *vendor* più importanti del mercato.

temporale di ogni sottostazione diventa particolarmente importante quando più sottostazioni sono coinvolte in operazioni di commutazione sincronizzata: il blackout in Nord America [77] nell'agosto del 2003[54] evidenziò le difficoltà nella gestione di dati le cui marcature temporali erano state derivate da riferimenti di tempo inaccurati; in conseguenza dell'accaduto, nel 2006 lo standard PRC018-1 impose che tutti i dati raccolti dovessero avere un'accuratezza migliore di 2 ms in relazione all'UTC.

Oggi, la maggior parte dei sistemi di misura e controllo della rete elettrica devono avere un'accuratezza di almeno 1ms, come i dati per i sistemi SCADA, per i "Protection Relays" (IEDs, "Intelligent Electronic Devices") e i sistemi di correlazione con i fulmini. Tuttavia, applicazioni emergenti come la misura dei sincrofasori e la localizzazione dei guasti mediante onda viaggiante ("Travelling Wave Fault Location", Figura 4-1) richiedono un'accuratezza assoluta migliore di 1μs [78].

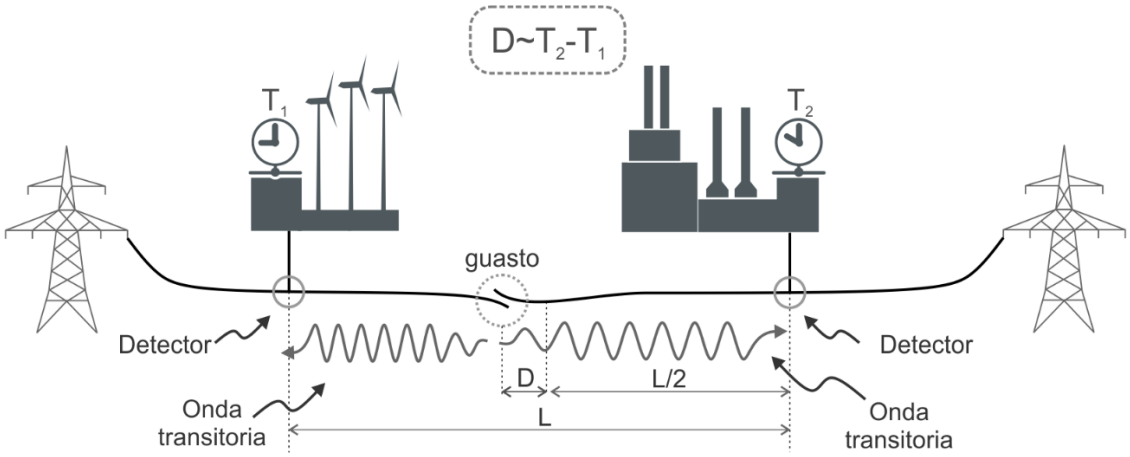


Figura 4-1 Travelling Wave Fault Location

La IEC 61850-90-1 stabilisce in merito le classi di performance per la sincronizzazione dei dispositivi IED, secondo la Tabella 4-1 [79].

[54] Il blackout del 14/08/2003 è stato uno dei più grandi mai avvenuti nella storia del Nord America, causato da guasti in cascata e che ha impattato su 50 milioni di persone con una perdita economica di circa 6 bilioni di dollari americani. Un evento simile, pur se di dimensioni più contenute, è accaduto anche in Europa il 04/11/2006.

Tabella 4-1 Classi di performance per gli IED

Classe	Accuratezza
T1	±1ms
T2	±100µs
T3	±25µs
T4	±4µs
T5	±1µs

Per sincronizzare gli IED vengono utilizzati quelli che sono comunemente noti come "substation clocks", ovvero dei riferimenti temporali in genere disciplinati da un GPS e che trasferiscono il segnale di sincronizzazione agli altri elementi della "substation" in modi diversi (IRIG-B, PPS, ASCII Broadcast Time Codes, NTP, PTP), ma che solitamente richiedono un'infrastruttura di distribuzione a parte (Figura 4-2).

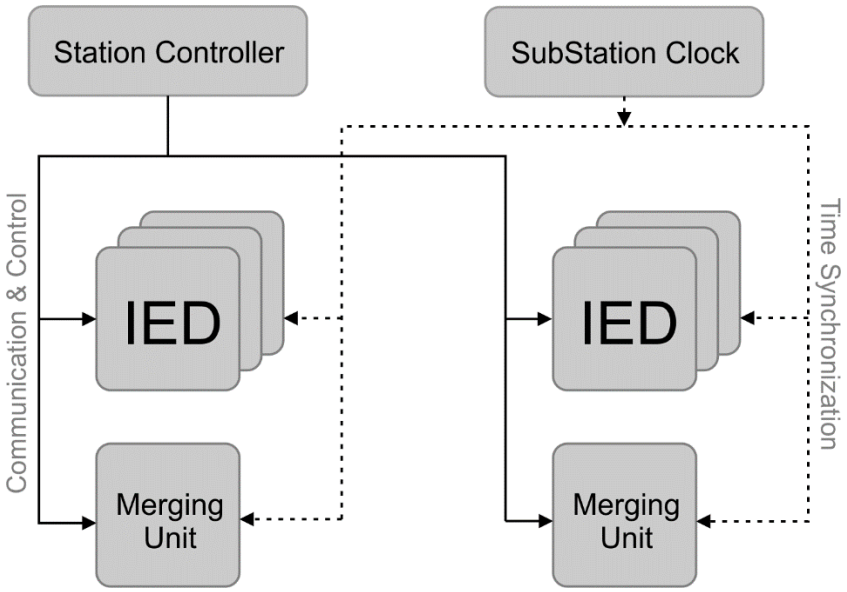


Figura 4-2 Sincronizzazione nelle sottostazioni di energia

Lo standard IEEE 1588 definisce un numero di modalità operative in grado di coprire le esigenze di sincronizzazione di campi applicativi, quale pure quello dell'industria dell'energia elettrica, con particolare attenzione alle "Smart Grid" [79].

Un'altra peculiarità del protocollo PTPv2 è l'auto-configurazione della rete, grazie all'impiego dell'algoritmo BMCA ("Best Master Clock Algorithm") impiegato per determinare ed eleggere il clock con migliore accuratezza nella rete, che assumerà il ruolo di GM ("Grand Master").

4.2 Wide Area Measurement Systems (WAMS)

I problemi relativi ai disturbi ai sistemi "wide-area" che incontrano oggi le moderne compagnie operanti nella gestione dell'energia elettrica necessitano di essere affrontati sia ricorrendo a tecniche di protezione e controllo tradizionali, sia avvalendosi di più complessi sistemi di monitoraggio, gestione ed automazione dei sistemi elettrici, solitamente affidati ad "Intelligent Electronic Devices" (IEDs) interconnessi tramite appositi collegamenti per le comunicazioni.

Questi sistemi utilizzano algoritmi e procedure basate sulla stima dello stato del sistema, ottenuta tramite misurazioni effettuate in punti strategici della rete e continuamente aggiornate. Affinché le quantità misurate sulla rete siano direttamente confrontabili, è necessario che tra la strumentazione distribuita sussista un adeguato livello di sincronizzazione, ovvero sia possibile implementare una "Wide Area Measurement System" (WAMS) in grado di acquisire le informazioni dai diversi nodi e di distribuire i dati sincronizzati sullo stato della rete.

L'accuratezza richiesta per la sincronizzazione varia sostanzialmente in funzione del tipo di applicazione: nel caso di misurazioni basate ad esempio sulla conoscenza in tempo reale di grandezze caratteristiche dello stato del sistema[55], è richiesto un livello stringente di accuratezza della marcatura temporale (timestamping). Nel caso invece di misure ambientali dove sono significative le grandezze mediate nel tempo, non c'è bisogno di un'accuratezza così spinta. Oggigiorno sembra che le applicazioni che richiedono maggior accuratezza di sincronizzazione facciano prevalentemente uso di ricevitori GPS, in grado di offrire un'accuratezza dell'ordine delle poche centinaia di nanosecondi.

[55] Ad es. stima dello stato del sistema, monitoraggio della Power Quality e gestione del congestionamento della rete

4.3 Sincronizzazione nei sistemi di misura distribuiti

Nei sistemi distribuiti, al fine di assicurare la ricostruzione dell'ordine degli eventi, gli orologi locali dei nodi di misura devono seguire strettamente un riferimento temporale arbitrario che, nelle applicazioni cablate, viene condiviso su di un canale di comunicazione. La maggior parte degli standard per le misure distribuite richiedono l'implementazione di un sottoinsieme del protocollo IEEE 1588:2008 per poter raggiungere l'accuratezza richiesta; lo "IEC Smart Grid Strategy Group" propone ad esempio l'impiego del PTPv2 poiché può fornire un livello di accuratezza inferiore ai 100 ns su reti IP.

Un esempio di misure distribuite ad elevata accuratezza è la ricostruzione dei sincrofasori nelle applicazioni di automazione delle sotto stazioni elettriche: le coppie corrente-tensione misurate vengono marcate temporalmente dal sensore ed inviata ai nodi di elaborazione dati. La IEEE C37.118.1-2011 "Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems" asserisce che "un errore di fase di 0.57° sarà se stessa causa del 1% del "Total Vector Error" (TVE). Questo corrisponde ad un errore temporale di ±26 µs per sistemi a 60 Hz e ±31 µs per sistemi a 50 Hz"; inoltre viene aggiunto che "è altamente raccomandata un riferimento in grado di fornire tempo, frequenza e stabilità in frequenza almeno 10 volte superiori a questi valori corrispondenti al 1% del TVE", stando a significare che l'accuratezza richiesta per marcare gli eventi sono rispettivamente di 2.6 µs per sistemi a 60 Hz e 3.1 µs per sistemi a 50 Hz.

È evidente dunque che senza un opportuno livello di sincronizzazione i dati frutto delle misurazioni potrebbero essere ricostruiti secondo un ordine non veritiero, rendendo a volte impossibile la stima degli eventi. L'accuratezza temporale al di sotto del microsecondo, rispetto a metodologie più antiquate, aiuta i gestori di rete nel prendere decisioni migliori in un tempo più breve e, grazie alla disponibilità di un elevato numero di campionamenti, permette di ottenere un livello superiore di controllo da parte del personale addetto alla supervisione.

Nei sistemi di generazione, trasmissione e produzione dell'energia elettrica, i componenti della rete devono poter essere protetti e spenti in tempo utile in situazioni di carico critico; le misure di corrente-tensione vengono effettuate ad istanti temporali ben definiti ed ad elevate frequenze di campionamento al fine di:

- monitorare lo stato e la salute della rete;

- prevedere potenziali situazioni critiche di carico;
- proteggere la rete dai sovraccarichi;
- misurare lo scambio energetico consegnato/consumato tra provider.

Le soluzioni tradizionali come IRIG-B per la sincronizzazione degli impianti, richiedono come già detto un cablaggio dedicato con un conseguente costo di messa in esercizio; l'utilizzo della stessa rete per lo scambio dei dati e la sincronizzazione, come avviene per il PTP, rappresenta dunque al momento la scelta operativa più economica e flessibile per questo genere di applicazioni.

4.4 Sincrofasori per Smart Grid

Gli operatori di rete elettrica utilizzano le informazioni-chiave fornite dai PMU ("Phasor Measurement Units") e ricevute attraverso dei concentratori ("Phasor Data Concentrators", PDC) per avere maggiore visibilità della rete stessa e poter contrastare i disturbi di rete prima che possano degenerare in blackout. Mentre lo standard IEEE C37.118 è stato pubblicato nel 2005 specificamente per i PMU, lo IEC 61850 è stato sostanzialmente dedicato alle sottostazioni, ma è considerata pure uno standard di riferimento per tutta la strumentazione da campo; nella IEC 61850-90-1 viene inoltre affrontato il tema della comunicazione ad ampio raggio tra sottostazioni. L'impiego dei PMU ha contribuito ad incrementare l'osservabilità delle reti elettriche ed ha supportato lo studio dei comportamenti dinamici introdotti dalla generazione fluttuante di energia elettrica da fonti rinnovabili, come l'eolico ed il fotovoltaico.

In tutte queste applicazioni la sincronizzazione è un punto cardine perché permette di coordinare le operazioni di acquisizione dati e di comparare i segnali ottenuti rispetto al tempo, correlandoli tra loro. In questo genere di misurazioni è necessario tuttavia tenere in conto della:

- precisione della sincronizzazione;
- distanza fisica che separa i nodi della rete.

Questi due parametri rappresentano una limitazione nella progettazione di una rete perché in quanto, all'aumentare della distanza, è sempre più difficile condividere segnali di riferimento sincronizzati tra i sistemi [80], poiché l'accuratezza del riferimento tende a degradare.

Lo standard IEEE 1588 è in grado di raggiungere un livello di accuratezza della temporizzazione soddisfacente anche tra sistemi tra loro distanti chilometri, superabile solo con l'impiego di ricevitori GPS. L'impiego del GPS come riferimento temporale nei sistemi distribuiti, permette di effettuare misurazioni dei fasori su scala geografica con una precisione migliore del microsecondo, molto vicina ai requisiti dei sistemi operanti sotto un unico segnale di riferimento (clock). Tuttavia questo approccio pone gli operatori di rete elettrica di fronte alcune potenziali problematiche:

- l'installazione di una o più antenne GPS presso ogni sistema di misura è una scelta costosa in termini sia di CapEx che di OpEx. Aggiunge ulteriore strumentazione e cablaggio, nonché rende necessarie talvolta operazioni di manutenzione tecnica sull'antenna esterna;

- il sistema GPS è gestito dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America, che almeno in linea di principio avrebbe l'autorità per oscurare selettivamente il servizio secondo necessità. Altre alternative di tipologia GNSS ("Global Navigation Satellite System"), oltre a sottostare alla stessa problematica, non hanno ancora un paragonabile livello di copertura;

- il segnale GPS può essere facilmente disturbato volontariamente da apposite apparecchiature a basso costo (detti "jammer"). Ciò costituisce una potenziale vulnerabilità che non richiede alcun tipo di accesso alla rete di controllo e che può causare l'interruzione temporanea del servizio.

Anche se il PTP è in grado di distribuire entrambe fase e frequenza, alcuni operatori di rete preferiscono ancora trarre vantaggio delle esistenti infrastrutture di distribuzione della frequenza (ad esempio TDM, o SyncE) ed utilizzare il servizio PTP (a livello di pacchetto)

solo per la sincronizzazione temporale. Inoltre, poiché molte sottostazioni fanno ancora uso dei "time-codes" IRIG-B, uno dei requisiti più comuni per la strumentazione PTP è quella di poter interoperare in modo "legacy" con i sistemi IRIG-B o 1PPS[56] (detti "Direct Time Synchronization"), in modo che anche la strumentazione più datata possa venire interconnessa con le nuove Smart Grid.

Un'interessante strategia adottata dagli operatori di rete elettrica (ma pure da operatori di telecomunicazioni) per la diffusione del riferimento temporale e quella denominata "Hybrid GPS-PTP", in cui al PTP viene assegnato il ruolo di backup del GPS, qualora questo risulti guasto.

[56] L'utilizzo su fibra ottica è raccomandato nella "Implementation guideline for digital interface to instrument transformers using IEC 61850-9-2" UCA International Users Group. Raleigh, NC, USA, 2004; non compensa automaticamente il delay di propagazione e non contiene l'informazione di tempo assoluto proposta da IEC TS 62351-6 in prevenzione degli attacchi di tipo "replay".

5. Collegamenti radio Microwave

Il capitolo che segue introduce l'argomento dei ponti radio a microonde, altro tema cardine di questo lavoro. Verranno descritti i ruoli dei ponti radio nelle moderne reti "Carrier Ethernet", le tipologie di ponte radio disponibili, la composizione dei blocchi funzionali, fino a toccare le tecniche avanzate impiegate in questi sistemi per ottimizzare il trasporto delle informazioni, sia in termini di capacità che di affidabilità di collegamento. Circa questi due ultimi spetti si farà cenno alle varie configurazioni di "diversità" che impiegano tecniche basate sulla polarizzazione della radiazione e di ridondanza dei canali.

Si introdurrà infine il tema del trasporto della sincronizzazione con riferimento al supporto delle funzionalità "on-path" per il protocollo PTP, già incontrate nei paragrafi 2.5.7 e 2.5.8.

5.1 Ponti radio a microonde

I ponti radio a microonde sono una tecnologia di comunicazione wireless in linea di vista (LOS, "Line Of Sight") che utilizza fasci di onde radio per realizzare connessioni in grado di trasmettere e ricevere diverse tipologie d'informazione (voce, dati, video). Sono ampiamente impiegati nelle comunicazioni punto-punto (P2P, "Point to Point") per la lunghezza d'onda impiegata che permette di utilizzare un'antenna di dimensioni contenute per veicolare la radiazione in fasci stretti ed altamente direzionali trasmessi verso un'antenna ricevente. Ciò permette ai ponti radio vicini di utilizzare le stesse frequenze senza interferirsi; un altro vantaggio dell'impiego delle microonde è la possibilità di trasportare un elevate capacità di contenuto informativo.

Una tipica radio a microonde di un collegamento P2P è composta da tre componenti base:

- **Modem**. Un'interfaccia di comunicazione digitale per le apparecchiature che devono trasmettere o ricevere informazioni; si occupa di modulare e demodulare le comunicazioni in banda base.

- **Unità a radio frequenza** (RF). Apparato addetto alla conversione del segnale in banda base proveniente dal modem in un segnale a microonde (banda traslata).
- **Antenna**. Elemento radiante passivo addetto alla messa in aria e alla ricezione del segnale radio.

La combinazione di questi tre elementi costituisce il "terminale radio"; per realizzare un collegamento a microonde di tipo P2P, comunemente indicato come "microwave hop", sono necessari due terminali radio, classificabili a loro volta in tre tipologie d'installazione: "all-indoor" (o "trunk"), "split mount" e le più recenti "all-outdoor".

I "Trunk Microwave Equipment" sono apparati di tipologia "**all-indoor**" (Figura 5-1) progettati per supportare in modo estremamente affidabile (oltre 10 canali) elevate capacità di trasmissione, dell'ordine dei Gigabit. In questo genere di apparecchiature tutta l'elettronica (sezione RF, banda base, MUX/DEMUX) è contenuta in un armadio da ambiente interno e l'antenna è il solo elemento posto in ambiente esterno. Poiché l'attenuazione in guida cresce con la frequenza di trasmissione (~0.27 dB/m @ 23 GHz), per un tipico collegamento all'antenna esterna con calata tra 20 e 50 metri l'attenuazione è un fattore certamente trascurabile, considerando la potenza di trasmissione limitata tipicamente tra i 18 ed i 30 dBm, dipendentemente da banda impiegata e tipo di applicazione.

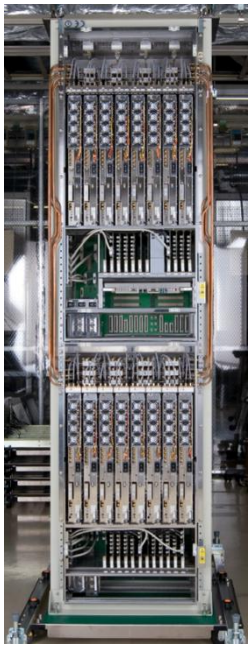


Figura 5-1 Microwave all-indoor: Aviat Networks TRuepoint 6500

Le soluzioni "**split**" suddividono invece il sistema radio in due blocchi:

- **IDU** ("InDoor Unit"), l'unità da ambiente interno contenente l'elaborazione del segnale in banda base ed il modem.

- **ODU** ("OutDoor Unit"), l'unità da ambiente esterno che include l'amplificazione di potenza, un ricevitore con amplificatore a basso rumore (LNA, "Low Noise Amplifier") ed i meccanismi di "frequency up/down conversion", per il passaggio dalla banda base alla traslata e viceversa.

La IDU e la ODU sono tra loro connesse tramite un cavo coassiale (detto cavo IF, "Intermediate Frequency") che trasporta i segnali segnale dati e di gestione a frequenza intermedia nell'ordine delle centinaia di MHz e che a parità di lunghezza non solo è meno costoso di una guida d'onda, ma non ha impatti sul budget di potenza. Questo genere di soluzione è particolarmente flessibile poiché la ODU può essere installata direttamente sull'antenna a

disco parabolico (in configurazione “direct mount”) o mediante una guida d’onda (in configurazione “split mount” Figura 5-2), di modesta lunghezza se comparata a quella invece richiesta per una soluzione “all-indoor”. Sebbene la capacità totale di collegamento ottenibile con questo genere di apparati sia inferiore alla soluzione “all-indoor”, è la tipologia di ponte radio più diffusa per la sua semplicità d’installazione e manutenzione.

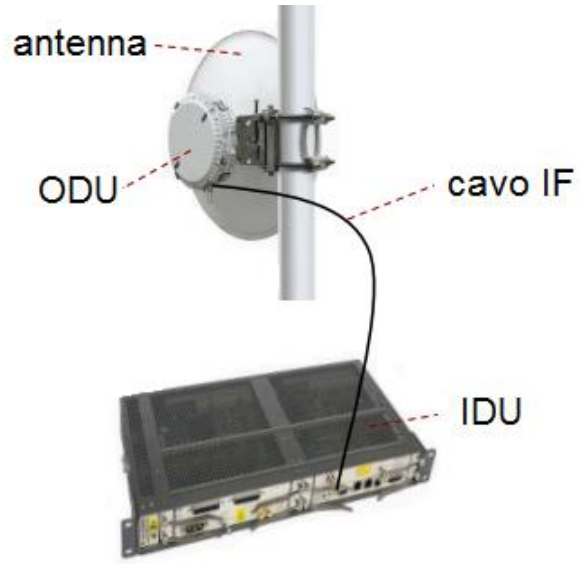


Figura 5-2 Microwave in configurazione “split-mount”

Le soluzioni “**all-outdoor**” (Figura 5-3) infine rappresentano oggi il modo più semplice ed economico di realizzare un collegamento radio, poiché tutte e tre le sezioni di banda base, RF ed antenna sono montate in esterno, senza necessità di un ambiente da interno protettivo per gli apparati, che ne abbatte i costi di messa in esercizio ed amplia il panorama di scelta dei siti d’installazione.

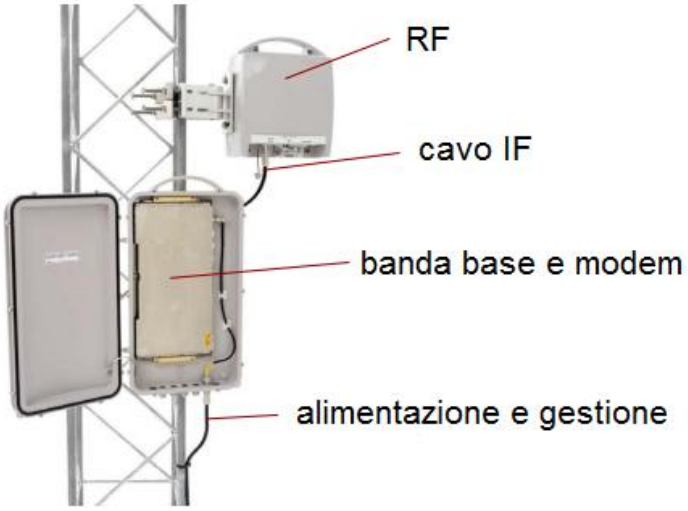


Figura 5-3 Microwave in configurazione “all-outdoor”

Lo svantaggio principale a sfavore tecnologia a microonde è la necessità di dover lavorare in LOS, ovvero in assenza di ostacoli interposti tra i due elementi terminali del collegamento, le antenne. Questa situazione è determinata dal “Path Profile”, che deve garantire le condizioni di LOS e la mitigazione dei fenomeni di riflessione da cammino multiplo (“multipath fading”). La condizione di linea di vista è più stringente di quella di visibilità ottica, in quanto le microonde sono di frequenza inferiore alla radiazione luminosa, e rispetto a questa rispondono diversamente alle condizioni ambientali di contorno, richiedendo maggiore libertà da ostacoli rispetto alla visibilità ottica. Il segnale radio si propaga infatti secondo un percorso tridimensionale di forma ellittica (volume di radiazione) con velocità di fase differenti.

Il fisico francese Augustin Fresnel divise il percorso in zone differenti basate sulla velocità e sulla fase delle onde in propagazione, ovvero, le cosiddette “zone di Fresnel”: tracciata la linea di vista tra un trasmettitore ed un ricevitore la n-esima zona di Fresnel si calcola mediante[57]

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

[57] ITU-R P.526-8-2013

Dove:

- R_n è il raggio della n-esima zona di Fresnel (Figura 5-4) espressa in metri;
- n è l'indice della zona di Fresnel (n = 1,2,3…);
- d_1 è la distanza sulla linea di vista del generico punto P vista dal trasmettitore ;
- d_2 è la distanza sulla linea di vista del generico punto P vista dal ricevitore ;
- λ è la lunghezza d'onda espressa in metri;
- Valida per $d_1, d_2 \gg R_n$.

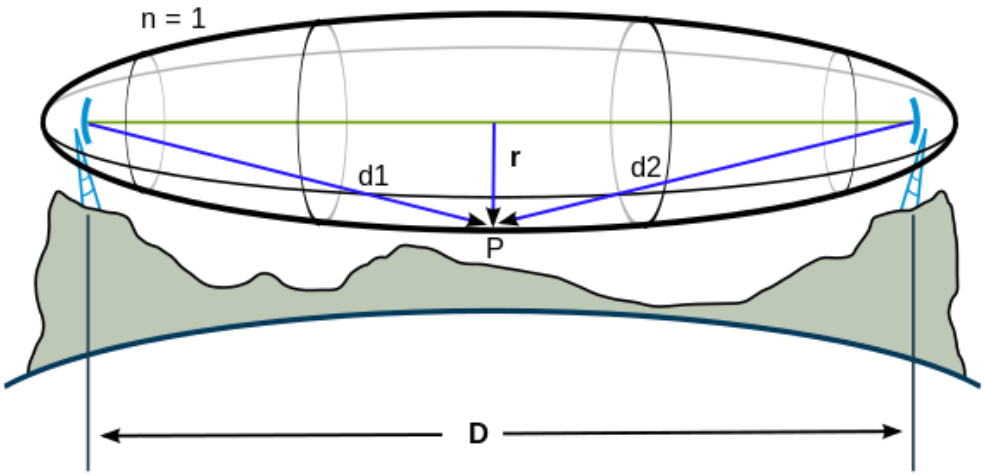


Figura 5-4 Zona di Fresnel

Il massimo raggio "r" si trova nella mezzeria della linea di vista. Nella progettazione di un collegamento punto-punto è buona pratica che il raggio R_1, contenente l'energia principale dell'onda, risulti libero da ostacoli per almeno il 60% della sua lunghezza.

5.2 Carrier Ethernet

Per soddisfare la continua domanda di banda dati e di maggiore qualità dei servizi nel mercato delle telecomunicazioni, gli operatori del settore si affidando sempre più frequentemente alle soluzioni di classe "Carrier Ethernet". Ovverosia a quell'insieme di tecnologie che rendono possibile la fruizione di Ethernet per il trasporto "end-to-end" attraverso reti "Metro Ethernet" (MEN, "Metro Ethernet Network)[58] degli operatori di rete ("Network Operators"), e che al contempo consentono di mantenere le caratteristiche di economicità, semplicità e flessibilità tipiche di questo standard.

La convergenza verso la tecnologia Ethernet è guidata essenzialmente dal fatto che oltre il 95% del traffico su Internet è originato e terminato in questo standard; inoltre la sua riconosciuta flessibilità[59], dovuta sostanzialmente alle sue caratteristiche "plug-and-play" congiuntamente alla larga diffusione, generano nel mercato globale una domanda tale da rendere questi dispositivi accessibili a costi sempre più contenuti.

Il "Metro Ethernet Forum" (MEF), un consorzio industriale internazionale *no-profit* che si occupa di promuovere l'adozione del "Carrier Ethernet" nel mondo, ha standardizzato le tipologie di servizi Ethernet e loro attributi che differenziano "Carrier Ethernet" dalle tradizionali reti LAN:

- standardizzazione del servizio;
- scalabilità;
- affidabilità;
- gestione del servizio ("Service Management");
- qualità del servizio ("Quality of Service", QoS).

Anche se il MEF non definisce le tecnologie di trasporto, in genere vengono utilizzate in modo combinato:

- reti WDM ("Wavelength Division Multiplexing", multiplazione per sistemi di comunicazione ottica);
- reti SDH ("Synchronous Digital Hierarchy", tecnologia a circuito);

[58] Interconnessione di in reti MAN/WAN che combinano diverse tecnologie di trasporto come SDH ed MPLS ("Multi Protocol Label Switching") per la distribuzione di servizi Ethernet.

[59] E' caratterizzata da maggiore granularità di banda e non ha bande prefissate come ad es. SDH

- reti ATM (“Asynchronous Transfer Mode”) “LAN Emulation” (LANE).

Le caratteristiche essenziali che lo hanno portato ad essere attrattivo per il mercato sono:

- facilità d’installazione ed uso;
- economicamente conveniente in fase di acquisto e nella successiva gestione;
- flessibilità del servizio.

I servizi “Carrier Ethernet” sono forniti attraverso un interfaccia IEEE economica, ben conosciuta e standardizzata che permette all’utente finale di ottenere incrementi di banda quando necessario.

5.3 Ruolo dei ponti radio nel Carrier Ethernet

L’impiego della tecnologia “Microwave” (MW) è in aumento nei servizi “Carrier Ethernet” di conseguenza agli evidenti vantaggi che offre:

- tempi di dislocamento rapidi;
- convenienza economica, rapportata ad altre tecnologie;
- *throughput*[60] di dati paragonabili alla fibra ottica, per alcuni tipi di applicazione.

Impiegando uno o più canali di comunicazione radio al posto di un collegamento fisico, i ponti radio MW permetto di aggirare gli ostacoli di messa in opera rappresentati sia dai diritti di accesso alle proprietà, sia i costi di canalizzazione che affliggono spesso i collegamenti in rame o fibra ottica: pertanto rappresentano oggi la scelta tecnologica più competitiva per il trasporto dei servizi Ethernet in termini di costo per bit. Tenuto conto che i prodotti MW oggi disponibili sul mercato possono fornire capacità di banda nell’ordine del Gigabit,

[60] Solitamente indicato con THR, si calcola come $\eta \times C$, dove η è l'efficienza del protocollo usato e C la capacita di trasmissione.

essi sono sufficienti a soddisfare le necessità di "*backhauling*"[61] della rete mobile[62] e dei servizi orientati al mercato business, due settori in continua espansione. Inoltre i ponti radio MW sono in grado di coprire flessibilmente distanze tra punti variabili da alcuni centinaia di metri a diversi chilometri, ove sussistano tra loro condizioni vantaggiose di linea di vista (LOS.

Ad esempio, in alcuni progetti per la diffusione di connettività broadband in specifici contesti periferici e rurali della Gran Bretagna [81], sono stati impiegati i ponti radio MW in luogo della fibra ottica (FTTC, "Fiber To The Cabinet") per interconnettere più rapidamente ed a costi più contenuti le centrali telefoniche alle cabine di strada; da queste poi la connettività broadband viene erogata alle abitazioni di zona attraverso un collegamento VSDL[63] su cavo di rame. Questa soluzione tecnica battezzata da BT ("British Telecom") con l'acronimo "WTTC" ("Wireless To The Cabinet", Figura 5-5) [81], ha permesso di portare connettività a banda larga in zone altrimenti difficilmente raggiungibili, evitando peraltro costi d'investimento ben svantaggiosi rispetto ai potenziali ricavi. Ciò anche nella prospettiva incalzante di estendere il concetto di Servizio Univerale a tale connettività.

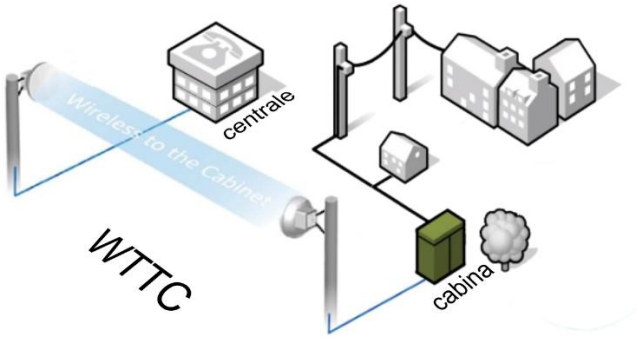


Figura 5-5 Ponti radio in impiego "Wireless To The Cabinet"

Un pregiudizio erroneo spesso attribuito ai ponti radio è che il loro impiego sia sempre limitato da problematiche inerenti a concessioni governative dello spettro radio necessario, sotto forma di licenze; questo aspetto oggigiorno può essere mitigato dal fatto che sono già

[61] In una rete di telecomunicazioni gerarchica la porzione di backhaul della rete comprende i collegamenti intermedi tra la rete principale ("Core Network") e le sottoreti periferiche.
[62] Più del 60% delle stazioni radio base mondiali sono oggi interconnesse tramite MW – fonte MEF.
[63] "Very High-speed Digital Subscriber Line", ovvero una linea "DSL ad alta velocità".

disponibili apparati operanti liberamente nella banda dello spettro non licenziato ("unlicensed", Figura 5-6), come ad esempio quello dei 60 GHz (V-Band).

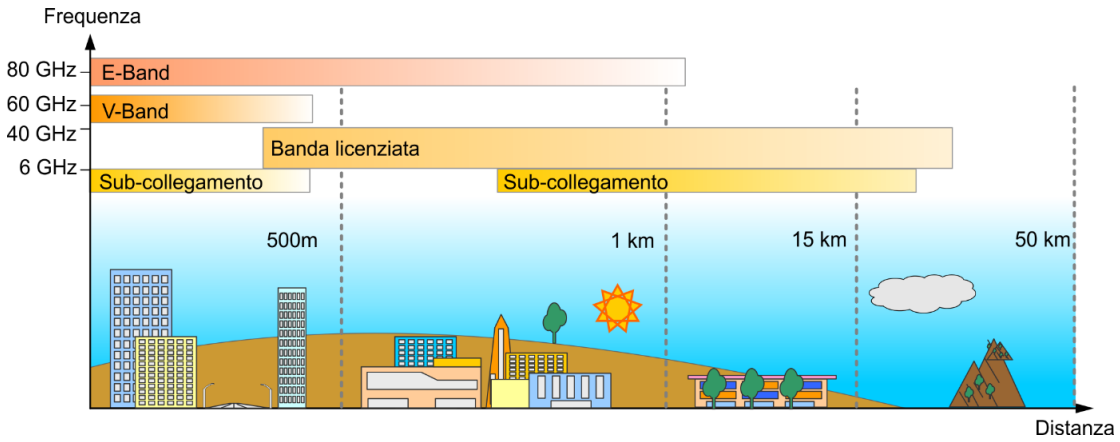


Figura 5-6 Bande licenziate e libere in relazione alla distanza di collegamento [82]

In questa banda tuttavia sono accentuati i fenomeni di attenuazione del segnale e c'è la possibilità di mutua interferenza tra ponti radio diversi [83]. Nella Figura 5-7 è riportata la composizione spettrale delle diverse bande radio.

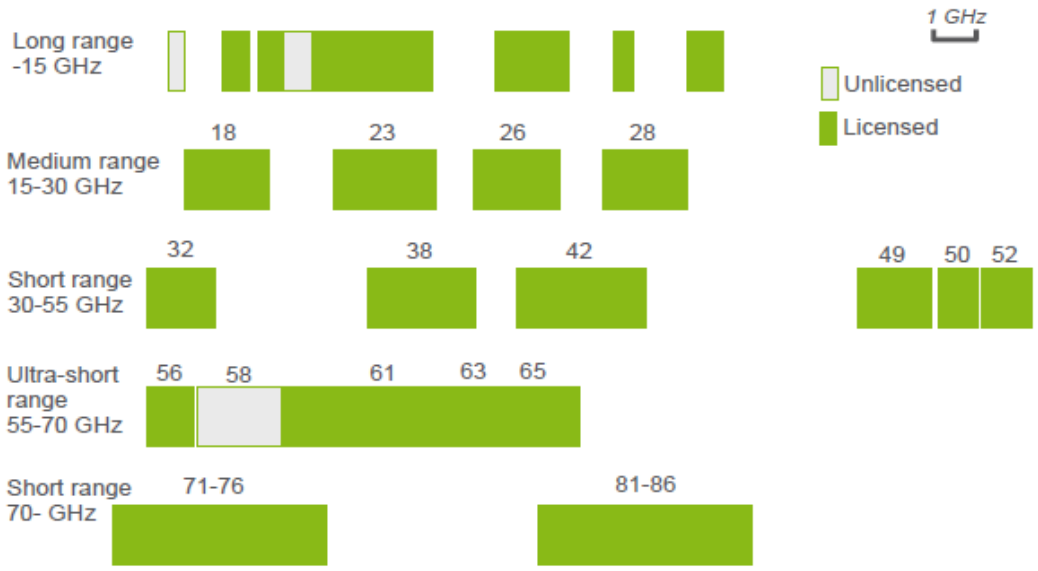


Figura 5-7 Composizione spettrale delle bande licenziate e libere

Storicamente i protocolli utilizzati per il *backhauling* dei servizi di fonia mobile (GSM, WCDMA) sono stati il PDH e lo SDH; negli ultimi anni, con la crescita vertiginosa della domanda per i servizi "Mobile Broadband Data Services", anche il mercato dei MW si è spostato verso il *backhaul* Ethernet, che meglio si presta a servire le moderne tecnologie di accesso radio ("Radio Access Network", RAN) ai servizi mobili.

Il ricorso alla tecnologia MW è di fatto inevitabile nelle situazioni in cui la stesura di un collegamento fisico in rame o fibra è impossibilitato [84] ed esempio da:

- questioni legali dovute all'attraversamento di suolo privato;
- impedimenti fisici dovuti ad esempio alla conformazione del territorio;
- motivi di sicurezza dovute a fattori umani o ambientali.

Nella Tabella 5-1 sono riassunti pregi e difetti di entrambe le soluzioni, in modo comparativo.

Tabella 5-1 Matrice di comparazione tra Microwave e fibra ottica

	Microwave	**Fibra ottica**
Capacità	Ordine dei Gbps	Praticamente illimitata
Regolamentazioni	• Concessioni per lo spettro • Impatto visivo considerevole	Diritti di attraversamento delle proprietà
Costi/Tempi	• Costo per link • Tempi rapidi di rilascio	• Costo al metro • Tempi crescenti con la distanza
Terreno	• Nessuna limitazione • Richiesta linea di vista	Costi dipendenti dalla tipologia di terreno da scavare
Riutilizzabilità	Reimpiegabile altrove	In genere non reimpiegabile
Clima	• Influenza delle condizioni meteo • Modulazione adattiva	Non influenzato

Le applicazioni di trasporto MW permettono infine di connettere siti remoti in qualità di porzione di rete di aggregazione o di distribuzione di altre tipologie di traffico tra cui:

- reti broadband per il supporto alla televisione digitale;
- reti broadband per il supporto all'accesso DSL in aree rurali, abbattendo le limitazioni di distanza tra DSLAM e *backbone*;
- backup ad altre tipologie di collegamento (ad es. fibra);
- estensione della rete a zone periferiche.

Per rispettare i requisiti di servizio ELAN ("Ethernet transparent LAN"), i collegamenti MW possono essere implementati secondo le due architetture:

- punto-punto ("Point-to-Point", P2P), per la connettività tra due soli punti o nodi;
- nodale o anello, per la trasmissione in più direzioni a supporto della ridondanza e del bilanciamento del carico di rete.

L'implementazione P2P è quella più comune ed è in genere usata per estendere i servizi nelle zone in cui non c'è possibilità di collegamento ad una rete terrestre, come può accadere nel caso dei siti di monitoraggio della Power Quality.

Un sistema MW nodale è invece più tipicamente impiegato nei punti di aggregazione di una rete di trasporto, assicurando che i servizi ad alta priorità ricevano il giusto trattamento; la struttura ad anello è invece una specifica configurazione nodale utilizzata per fornire elasticità alla rete e capacità di bilanciamento: ogni radio nodale trasmette in due differenti direzioni senza ricorrere a dispositivi esterni (come gli "switch") verso altri nodi, che sono utilizzati per chiudere l'anello.

Il trasporto MW offre tre principali funzionalità:

- **aggregazione di servizi multipli** ("Multiservice aggregation"). È la capacità di accettare in ingresso flussi provenienti da differenti servizi (voce,

dati, ecc.) e tecnologie (TDM, ATM, Ethernet) e adattarli automaticamente a livello di trasporto. I servizi TDM possono essere trasportati in modo nativo o in forma di pacchetto, a seconda che la soluzione impiegata sia di tipo "packet" o "hybrid";

- **networking**. S'intende la capacità di inoltrare i servizi dalla sorgente al destinatario pur mantenendo i livelli di qualità e protezione attesi
- **trasmissione radio**. È la funzionalità di trasmissione dei bit livello 1 ("Layer1", L1)[64] sul canale radio assieme alle funzionalità di controllo.

5.4 Tipologie di ponte radio

Sono disponibili sul mercato due diverse tipologie di ponti radio Microwave, entrambe utilizzabili sia nelle reti "packet oriented" che in quelle che pur trasportando pacchetti di dati, necessitano ancora del *legacy* con i servizi TDM voce: sono lo *hybrid MW* ed il *packet MW*.

5.4.1 Hybrid Microwave

Il MW ibrido è una possibilità interessante per gli operatori che hanno necessità di rendere coesistenti sulla stessa rete entrambi i servizi TDM/ATM e "Carrier Ethernet": lo "Hybrid Microwave" è in grado di gestire in modo nativo ed efficiente i pacchetti, permettendo inoltre di introdurre nella rete servizi dati senza impatti sui servizi TDM tradizionali esistenti; l'apparato incapsula i servizi TDM e a pacchetti in un unico frame prima della trasmissione. Le tre modalità operative supportate sono: solo TDM, ibrido (TDM con pacchetti), e solo pacchetti.

I flussi "Carrier Ethernet" e TDM sono processati separatamente agli ingressi dell'apparato e ciascuno riceve indipendentemente dall'altro parte della capacità del collegamento; un multiplexer con funzionalità di gestione della QoS tratta i pacchetti IP/Ethernet secondo la loro marcatura di QoS. Infine, entrambi i flussi di traffico prima di essere trasmessi vengono miscelati nella sezione RF dal "Air Frame Multiplexer". Questa funzionalità ibrida permette agli operatori di attuare una strategia flessibile per la migrazione delle reti verso

[64] Da intendersi secondo la pila del modello ISO/OSI.

l'architettura a pacchetti, contemporaneamente mantenendo di fatto due reti "end-to-end" (E2E): il traffico voce può essere inviato sulla rete TDM con qualità garantita, mentre il traffico dati viene gestito secondo le modalità definite dalle politiche di QoS.

5.4.2 Packet Microwave

I ponti radio a pacchetti ("Packet Microwave") gestiscono i pacchetti "Carrier Ethernet" in modo nativo, trasportando il traffico multimediale in modo efficiente e permettono agli operatori di rendere disponibili i servizi dati senza impattare i servizi voce tradizionali, in modo economicamente efficace: l'operatore può in questo modo mantenere una singola rete a pacchetti che ospita entrambe le tecnologie TDM ed IP/Ethernet.

Questo genere di apparati fanno convergere il traffico Ethernet e non-Ethernet (TDM) in un singolo strato di trasporto a pacchetto, chiamato "Multiservice Aggregation Layer" (Figura 5-8), utilizzando standard industriali come "Pseudo-Wire" e "Circuit Emulation Service" (CES): il "Carrier Ethernet" rappresenta dunque la convergenza verso un unico strato di trasporto; il traffico in ingresso che non è a pacchetti è processato da un blocco "Generic InterWorking Function" (GIWF) che ne assicura il corretto incapsulamento in flussi di pacchetti. Il vantaggio di questo approccio è quello di poter aggiungere o rimuovere i collegamenti TDM nel tempo, ovvero maggiore la flessibilità d'impiego in vista di una migrazione completa verso un'architettura completamente IP ("All-IP").

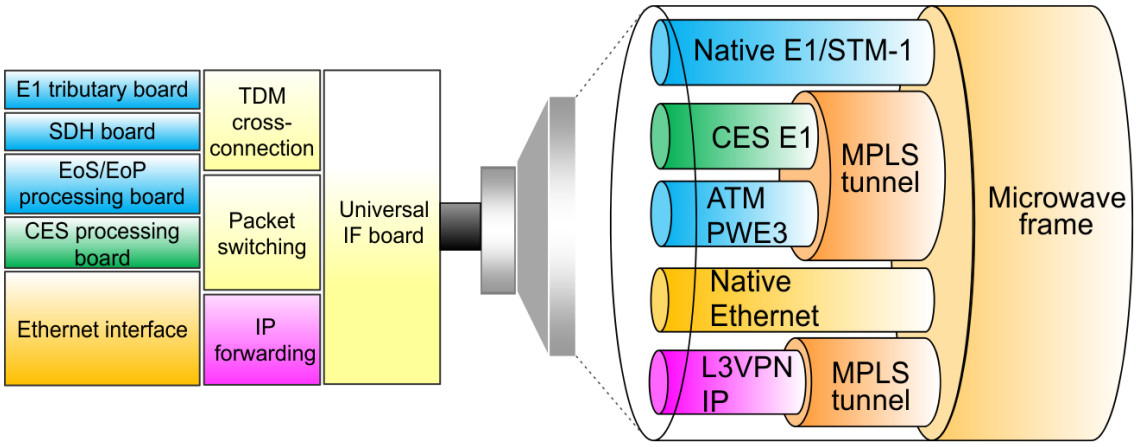


Figura 5-8 Multiservice Aggregation Layer

5.5 Tecniche di trasmissione

Il progresso tecnologico nella progettazione degli apparati MW assicura oggi la possibilità di mantenere gli attributi richiesti per il "Carrier Ethernet", ovvero l'abilità di assicurare la qualità del servizio (QoS), l'affidabilità del collegamento e la governabilità (OAM, "Operations Administration and Management").

La tecnica denominata "Microwave Aware Transmission" (MAT) combina assieme le quattro funzionalità di:

- trasmissione radio ottimizzata (ORT, "Optimized Radio Transmission");
- modulazione adattiva (AM, "Adaptive Modulation");
- packet Quality of Service (QoS);
- gestione del traffico basata su tipologia di servizio (SATM, "Service Aware Traffic Management").

5.5.1 Optimized Radio Transmission

La trasmissione radio ottimizzata (ORT) è la capacità di comprimere in modo intelligente le trasmissioni dei pacchetti secondo la categorizzazione della tipologia di traffico in arrivo e del servizio (TDM voce, VoIP, servizio real-time, PTP, o dati non categorizzati in priorità "*best-effort*").

5.5.2 Adaptive Modulation

La modulazione adattiva (AM) è una tecnologia importante ed innovativa nelle reti di ponti radio, ed è utilizzata per ottimizzare il *throughput* radio regolando opportunamente lo schema di modulazione con il variare delle condizioni di propagazione. La figura sotto mostra come questa tecnologia sia in grado di adottare dinamicamente il livello di modulazione più adatta. Cioè, secondo le performance del canale che può essere degradato da condizioni metereologiche avverse, ed al fine di garantire per quanto possibile un canale di comunicazione senza errori. In condizioni avverse, dunque, la modulazione all'interfaccia aerea ("air

interface") potrebbe scendere ad esempio da 256QAM[65] ad una più robusta 64QAM, risultando però in una riduzione dell'ampiezza di banda dati disponibile per il trasporto: in questo caso è importante che l'apparato MW sia in grado di gestire in priorità il traffico di servizi definiti in "alta disponibilità" ("High Availability, HA) a scapito del traffico considerato di livello "best-effort". La tecnica AM (Figura 5-9) è in grado quindi di regolare la capacità del canale a seconda delle esigenze, migliorando l'efficienza dello spettro in uso [85].

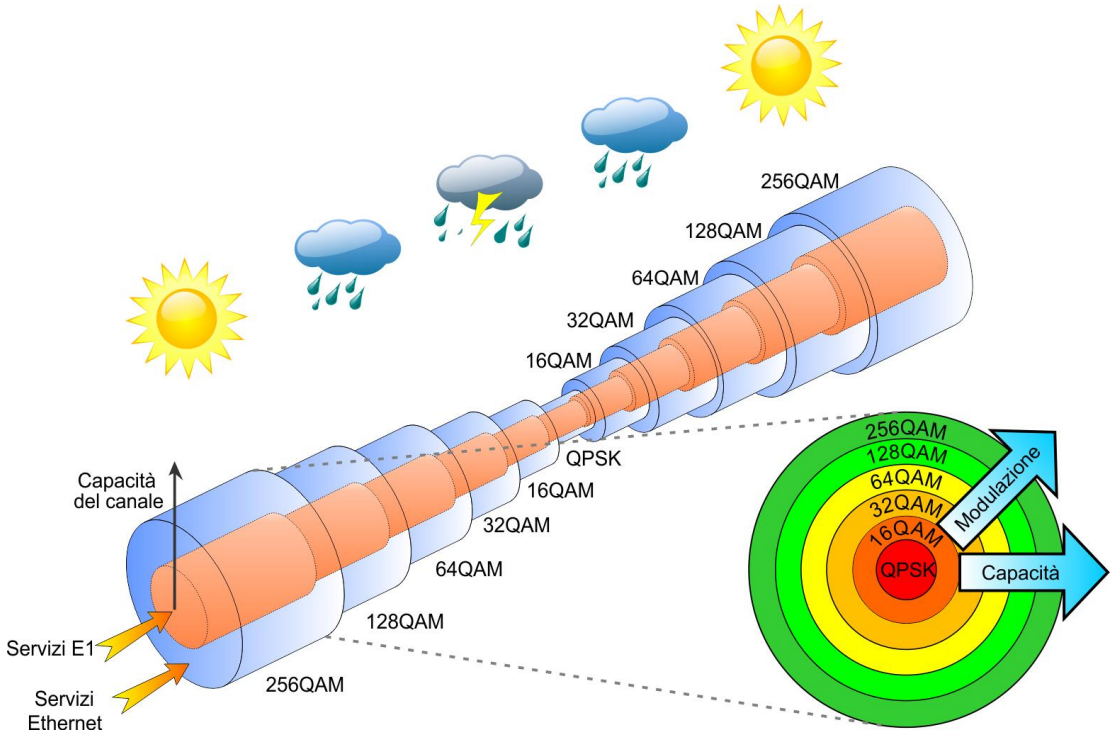


Figura 5-9 Adaptive Modulation e capacità di canale [85]

Contestualmente alla modulazione adattiva interviene anche il metodo di regolazione automatica della potenza di trasmissione (ATPC, "Automatic Transmit Power Control") che traccia la fluttuazione del livello di segnale al nodo ricevente, basandosi sul fading del segnale trasmesso che è rilevato al ricevitore di destinazione. Questa tecnica permette di ridurre le interferenze con altri collegamenti vicini.

[65] "Quadrature Amplitude Modulation", modulazione numerica di ampiezza in quadratura.

5.5.3 Packet Quality of Service (QoS)

La qualità del servizio (QoS) nei sistemi Mircowave può essere raggiunta combinando la AM con meccanismi di QoS che in tempo reale regolano la gestione del traffico basandosi sulle prestazioni rilevate sull'interfaccia aerea. Questi apparati sono infatti in grado di regolare il throughput del canale in base alla banda realmente disponibile, impedendo il transito dei pacchetti a livello Ethernet, secondo gli standard basati sulla marcatura della QoS. Ripristinata la condizione di piena capacità di canale sull'interfaccia aerea, l'apparato può inoltrare nuovamente i pacchetti scartati.

5.5.4 Service Aware Traffic Management

La gestione del traffico basata sulla categorizzazione della tipologia di servizio ("Service Aware Traffic Management", SATM) è la capacità dell'apparato di riconoscere i pacchetti per tipologia; il flusso di dati trasmessi può essere composto da più servizi concorrenti, come ad esempio:

- TDM (E1/T1);
- ATM;
- IP;
- Ethernet;

provenienti da sorgenti multiple, ciascuna con differenti requisiti in termini di QoS. Ad esempio, per la fonia, si adotta un profilo real-time ad elevata priorità mentre per i dati (Internet browsing o video streaming) una priorità più bassa di tipologia non-real-time. Mediante la tecnica di "multiservice aggregation", lo Ethernet è utilizzato come uno strato di trasmissione comune in grado di trasportare più tipologie di traffico.

Il SATM permette agli apparati MW di differenziare, classificare e trasmettere i pacchetti in ordine di priorità dipendente alla marcatura della classe di servizio, e di applicare differenti algoritmi di compressione a specifiche tipologie di pacchetto. SATM include inoltre la possibilità di trasportare flussi TDM in modo "genuino", evitando il degrado della qualità dovuto al processo di "*pacchettizzazione*".

5.6 Incremento della capacità di canale

Gli approcci utilizzabili per incrementare il *throughput* di un collegamento MW sono molteplici: come mostrato precedentemente è possibile lavorare su ordini di modulazione più elevati, in grado di aumentare la capacità del canale; l'impiego di modulazioni di ordine superiore rende tuttavia il ricevitore più sensibile[66] alle imperfezioni di propagazione, come ad esempio l'effetto di distorsioni introdotte dall'attenuazione dovuta a riflessioni multiple ("Multi-path fading") ed alla pioggia. È possibile tentare di compensare l'aumento della sensibilità del ricevitore con:

- una potenza di uscita del trasmettitore più elevata;
- parabole più grandi, che richiedono supporti fisici più stabili;
- funzionalità avanzate del ricevitore, come algoritmi di correzione dell'errore.

In secondo luogo è possibile allargare lo spettro, ossia la larghezza di banda associata al canale, in modo da aumentare le risorse radio a disposizione e conseguentemente la capacità.

È possibile inoltre raddoppiare il *throughput* senza allargamenti di banda sfruttando la tecnologia "XPIC" ("Cross Polarization Interference Cancellation") congiuntamente alla "co-channel dual-polarization" (CCDP, Figura 5-10), che adotta onde radio polarizzate orizzontalmente e verticalmente sullo stesso canale per trasmettere contemporaneamente due segnali sulla stessa frequenza portante, idealmente senza interferire tra loro poiché ortogonali. In realtà un certo livello d'interferenza è inevitabile a causa della discriminazione di cross-polarizzazione dell'antenna (XPD, "Cross Polarization Discrimination") e del degrado introdotto dal canale; in questo caso la tecnica XPIC interviene nel ridurre l'interferenza [86].

[66] Margine di rumore ridotto.

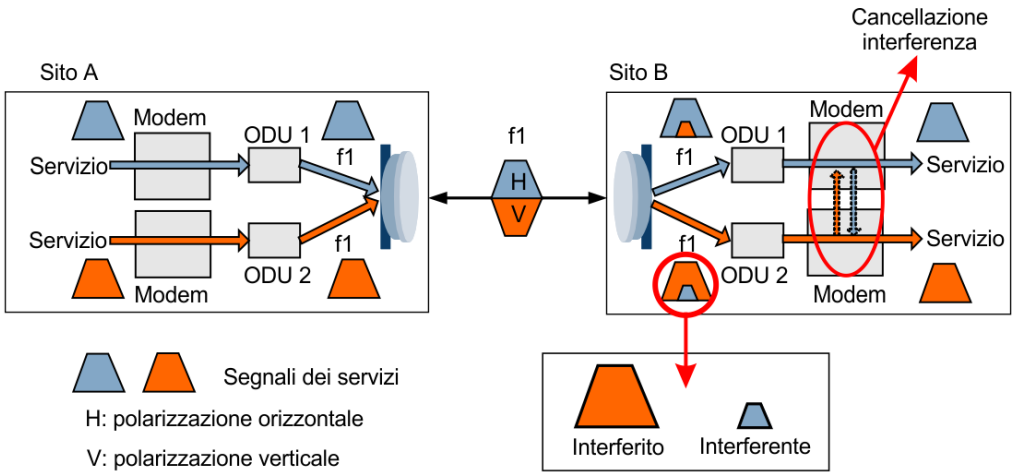


Figura 5-10 Combinazione tecniche XPIC e CCDP [86]

L'utilizzo di due segnali ortogonali è reso possibile impiegando per ogni sito due ODU sulla stessa antenna, mediante un accoppiatore (OMT, "Ortho Mode Transducer") in guida d'onda; l'accoppiamento (Figura 5-11) può essere:

- Diretto, tramite accoppiatore OMT di tipo "direct-mount";
- Separato, tramite accoppiamento con OMT "split-mount" su pali separati e guide d'onda.

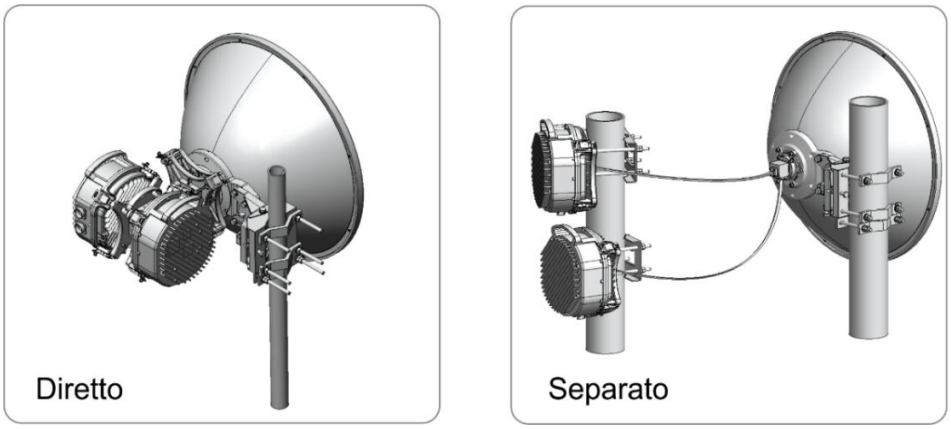


Figura 5-11 Accoppiamenti d'antenna *direct* e *split mount*

Quando l'XPIC non viene utilizzato, viene impiegata la tecnica ACAP ("Adjacent Channel Alternated Polarization", Figura 5-12) che permette ancora di trasmettere due servizi RF su due canali RF (f1 ed f2), in modo alternato.

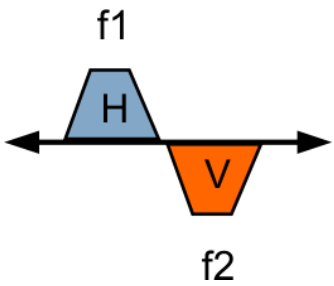


Figura 5-12 Adjacent Channel Alternated Polarization (ACAP)

L'XPIC è in grado dunque di incrementare la capacità del collegamento e la sua efficienza spettrale.

Un altro meccanismo per raddoppiare la capacità del collegamento è l'utilizzo di due portanti distinte a frequenze molto diverse (FD, "Frequency Diversity", Figura 5-13): il vantaggio di questa configurazione (detta "1+1 FD") rispetto all'impiego di portanti contigue è che in caso di *fading* dovuto a condizioni meteorologiche avverse, questo difficilmente impatterà contemporaneamente su entrambi i canali, risultando in una maggiore affidabilità del collegamento.

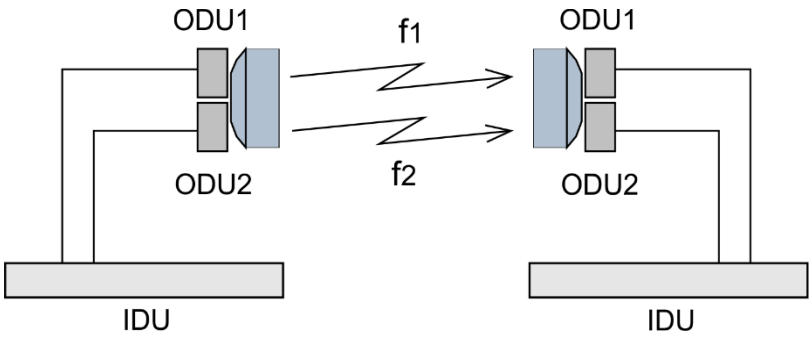


Figura 5-13 Frequency Diversity

5.7 Configurazioni ad elevata affidabilità

I collegamenti radio a microonde in elevata affidabilità vengono realizzati applicando configurazioni di "diversità" in grado di incrementare la robustezza del segnale utilizzando due o più canali di comunicazione con caratteristiche differenti.

La diversità ("diversity") gioca un ruolo importante nel combattere il *fading* e l'interferenza co-canale; si basa sul fatto che canali diversi subiscono livelli di *fading* ed interferenza diversi: più versioni dello stesso segnale possono essere trasmesse (o ricevute) e combinate al ricevitore. In alternativa, si può impiegare un codice di correzione d'errore in avanti e trasmettere parti diverse del messaggio su canali differenti.

Le tecniche di diversità possono sfruttare la propagazione di multipath che ha come risultato un guadagno di diversità, misurabile in decibel.

Le classi di schemi di diversità più comuni (Figura 5-14) per i collegamenti radio sono:

- "**Unprotected**". Non vengono impiegate tecniche di protezione o diversità, è detta configurazione "1+0" (una ODU attiva, l'altra assente). La configurazione "2x 1+0" può essere impiegata per realizzare un nodo di rilancio del segnale;

- "**Hot StandBy**" (HSB). Due coppie di apparati ODU sono installati e connessi alla stessa antenna, sintonizzati sulla stessa frequenza di canale; uno dei due è in modalità "stand-by", con ricevitore attivo e trasmettitore spento. Quanto l'unità ODU correntemente attiva sperimenta un guasto, viene messa in "stand-by" ed attivata la secondaria. Tale configurazione è solitamente indicata con "1+1 HSB" (una ODU attiva, l'altra in "stand-by");

- "**Frequency Diversity**" (FD). Il segnale è tramesso attraverso più canali o diffusi attraverso uno spettro espanso che è affetto da fading selettivo in frequenza. Vengono solitamente utilizzate più ODU attive, più uno di backup. Questa configurazione è conosciuta come "N+1 FD";

- "**Space Diversity**" (SD). Il segnale viene trasmesso su direzioni di propagazione diverse, scopo raggiungibile con l'impiego della tecnica di "antenna diversity" che utilizza più antenne trasmittenti e riceventi alla volta;

- "**Polarization Diversity**". Versioni multiple del segnale vengono trasmesse e ricevute tramite antenne con differente polarizzazione. Questa tecnica è utilizzata per la cancellazione dell'interferenza (XPIC, "Cross Polarization Interference Cancellation").

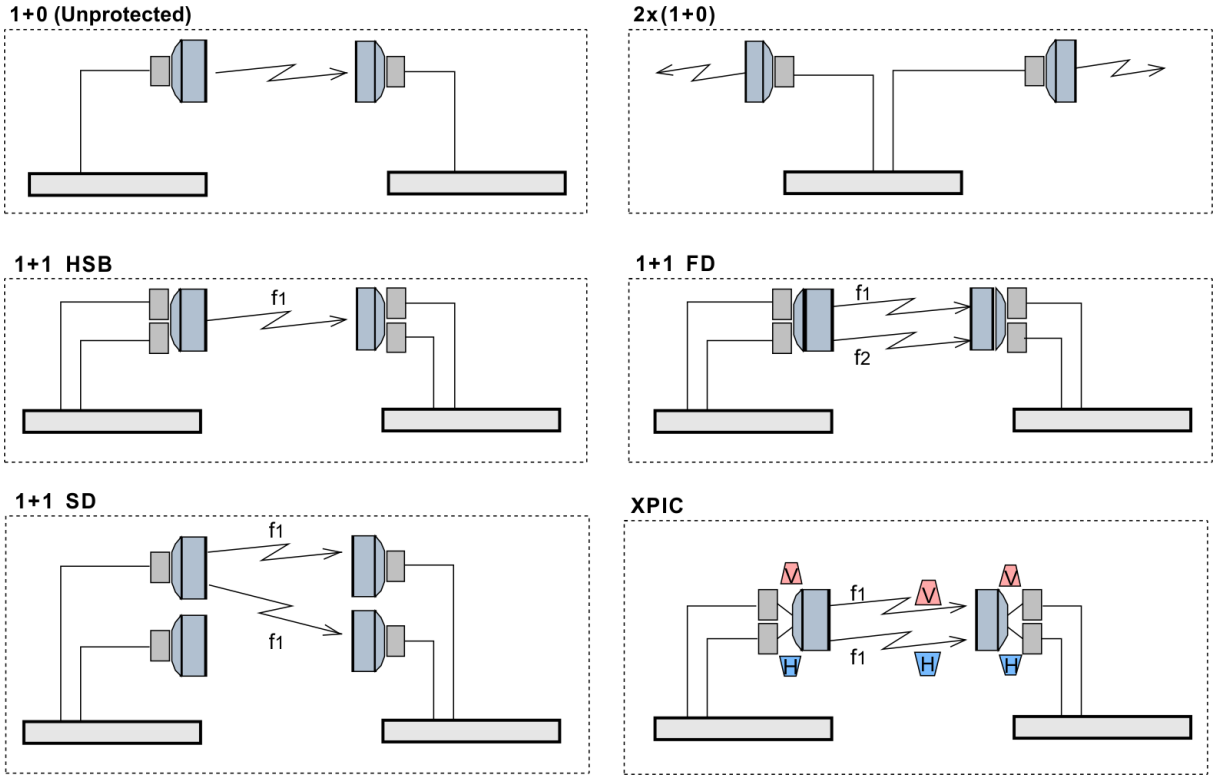


Figura 5-14 Schemi di diversità più comuni

Lo scopo che intendono raggiungere i ponti radio con le tecniche di alta-affidabilità e modulazione adattativa è quella di rendere disponibile il servizio di trasporto per il 99.999% del tempo [87].

La propagazione delle onde radio è in genere dipendente dalle condizioni atmosferiche di contorno, in particolar modo dalle concentrazioni di vapore acqueo e dalla temperatura; gli strati d'aria nella bassa atmosfera formano dei gradienti d'indice di rifrazione verticali tali che le onde radio vengono guidate al loro interno, tendendo a seguire la curvatura della superficie terrestre e riducendo dunque i fenomeni di attenuazione che si sperimenterebbero in loro assenza. Gli strati atmosferici si comportano come una guida d'onda e limitano la dispersione del fronte d'onda nella direzione orizzontale.

Le raccomandazioni della ITU-R P.453 forniscono in merito i modelli matematici mappe cartografiche indicanti i valori del gradiente dell'indice di riflessione che possono essere utilizzati in diverse parti del mondo [88]. Il gradiente fornito dalla ITU-R P.453 per il primo chilometro dell'atmosfera è utilizzato per calcolare il raggio terrestre effettivo da utilizzare in circostanze specifiche durante la modellazione della propagazione radio; nella Tabella 5-2 sono riportati alcuni risultati campione ottenibili in alcune metropoli internazionali.

Tabella 5-2 Esempi di alta-affidabilità in alcune metropoli internazionali

	Distanza di collegamento (km)					
	23GHz		**60GHz**		**80GHz**	
Città	99.9%	99.999%	99.9%	99.999%	99.9%	99.999%
Londra	11.5	3.1	1.09	0.70	6.8	2.0
Città del Messico	9.2	2.7	1.09	0.67	6.2	1.8
New York	8.6	2.2	0.90	0.56	5.1	1.5
Riyadh	19.9	6.3	1.05	0.83	15.2	3.7
Singpore	3.5	1.5	0.76	0.56	2.3	1.1
Sydney	8.8	2.2	0.91	0.56	5.2	1.5

5.8 Trasporto della sincronizzazione

I ponti radio a microonde sono ancora la tecnologia dominante a livello globale per il *backhaul mobile*, e continueranno ed esserlo nel futuro prossimo, essendo rapidamente evoluti per supportare le modalità ibrida e a pacchetti. La combinazione di queste tecnologie tuttavia pone in evidenza alcune interessanti questioni circa la validità degli attuali sistemi di sincronizzazione quando operanti su questi apparati. Nella corsa alla migrazione verso le reti "All-IP" si fa più acceso lo scontro tra il *networking* sincrono e asincrono: se da un lato la richiesta di servizi dati e streaming video è sempre più in crescita, dall'altro è necessario

mantenere i tradizionali servizi di telefonia mobile (Figura 5-15), che soffrono in modo critico della stabilità e della qualità della temporizzazione. Inoltre, seppure la sintonizzazione sia un aspetto comunemente supportato nel *backhaul mobile*, la sincronizzazione di fase è oggi altrettanto importante e necessaria per supportare nuovi servizi per le tecnologie CDMA ("Code Division Multiple Access"), LTE ("Long Term Evolution", Figura 5-16) TDD e LTE eMBMS ("evolved Multimedia Broadcast Multicast Service")[67].

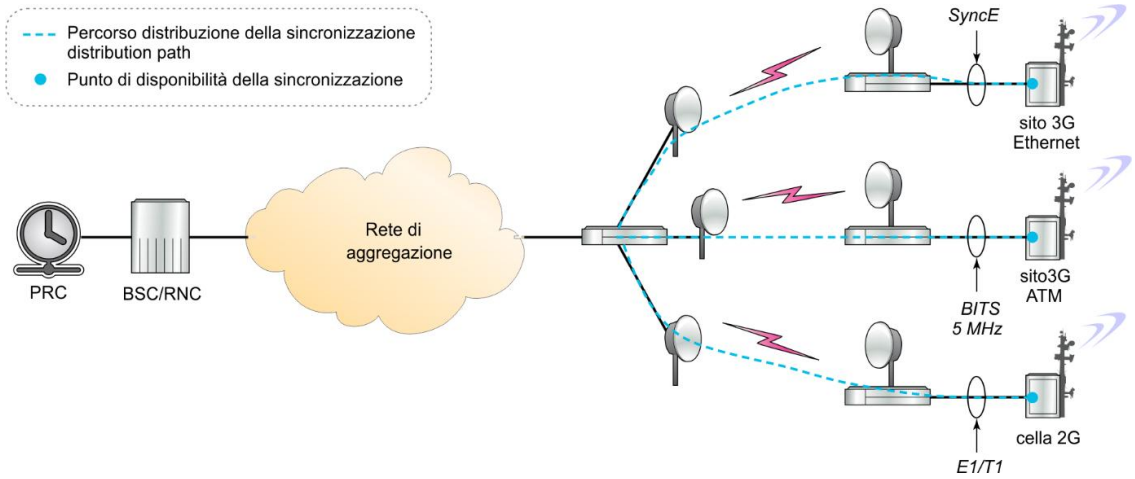


Figura 5-15 Sincronizzazione per servizi tradizionali di telefonia mobile [89]

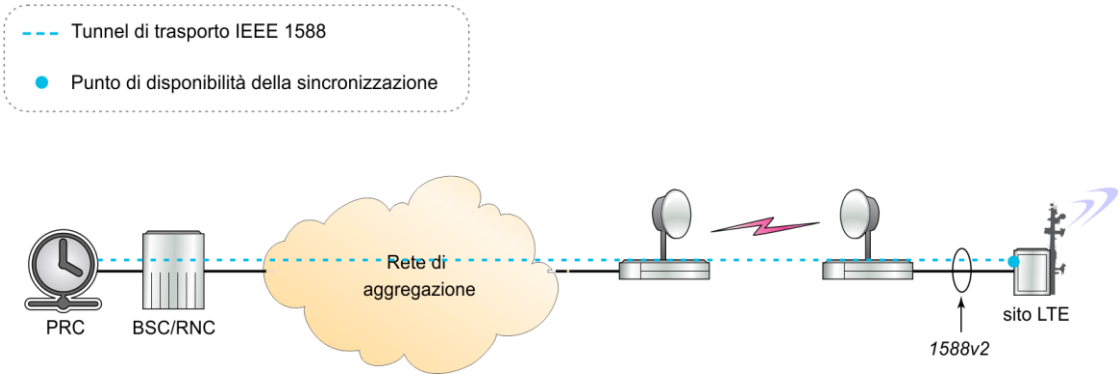


Figura 5-16 Sincronizzazione di fase per tecnologie mobili moderne [89]

I sistemi avanzati per collegamenti MW permettono ampia flessibilità di aggiornamento da TDM ad ibrido o a pacchetti, attraverso una semplice riconfigurazione software ed eventualmente l'aggiunta di moduli elettronici dedicati.

[67] Sistema di trasmissione "broadcast" attraverso celle multiple le cui applicazioni target sono la TV-mobile e la trasmissione di canali radio digitali.

Grazie all'impiego della tecnica AM, il meccanismo con il quale viene fornita la più elevata capacità possibile rispetto alle condizioni ambientali e del canale, può essere garantita una disponibilità della rete oltre il 99.99% del tempo; tuttavia, essendo il traffico di sincronizzazione una componente critica della rete, è importante che questo riceva la più elevata priorità in termini di QoS, in qualsiasi condizione.

La maggior parte dei collegamenti MW "point-to-point" su lunga distanza richiede l'impiego di ripetitori, risultanti in "*hop*" multipli tra il primo punto di aggregazione ed il punto di rilascio; questo aspetto è importante quando s'intende implementare sulla rete MW un meccanismo di sincronizzazione basato su pacchetti. Nel caso del SyncE, è sufficiente che ogni nodo MW della catena supporti questa tipologia di sintonizzazione; differentemente, nel caso della sincronizzazione (in fase e/o frequenza) mediante pacchetti PTP, non è richiesto che ogni nodo lo supporti in modo hardware assistito ("on-path support"), anche se è una scelta caldamente consigliata poiché la PDV è cumulativa e spesso proporzionale al numero di "*hop*" attraversati, con effetti che possono essere deleteri per la sincronizzazione. Le soluzioni MW avanzate possono ovviare a questo inconveniente sfruttando il meccanismo della QoS ed assicurando al traffico PTP il livello di priorità più elevato, riducendone la latenza nel transito [90].

Una causa che contribuisce al fenomeno della PDV è lo "Head-of-Line blocking", che avviene quando un frame ad elevata priorità (ad esempio PTP) deve attendere in coda la fine della trasmissione del frame corrente che è già cominciata e non può essere interrotta.

Alcuni sistemi MW adottano un canale dedicato simmetrico e parallelo per il solo trasporto della sincronizzazione su pacchetto (PTP o NTP), in grado di raggiungere livelli di PDV molto bassi poiché non condivide risorse con in canale di traffico.

Le reti di *backhaul* sono raramente omogenee (Figura 5-17) e la maggior parte consistenti di un mix di collegamenti MW, in fibra ottica ed in rame; analogamente, un livello di sincronizzazione omogeneo non è praticabile nella maggior parte dei casi. Una rete reale in genere necessita di più soluzioni di sincronizzazione concorrenti, come nel caso di operatori che intendono dispiegare una combinazione di servizi mobili che richiedono la sincronizzazione di tempo, fase e frequenza, o analogamente di gestori di reti elettriche che intendono monitorare lo "stato di salute" della rete distribuzione secondo il paradigma WAMS.

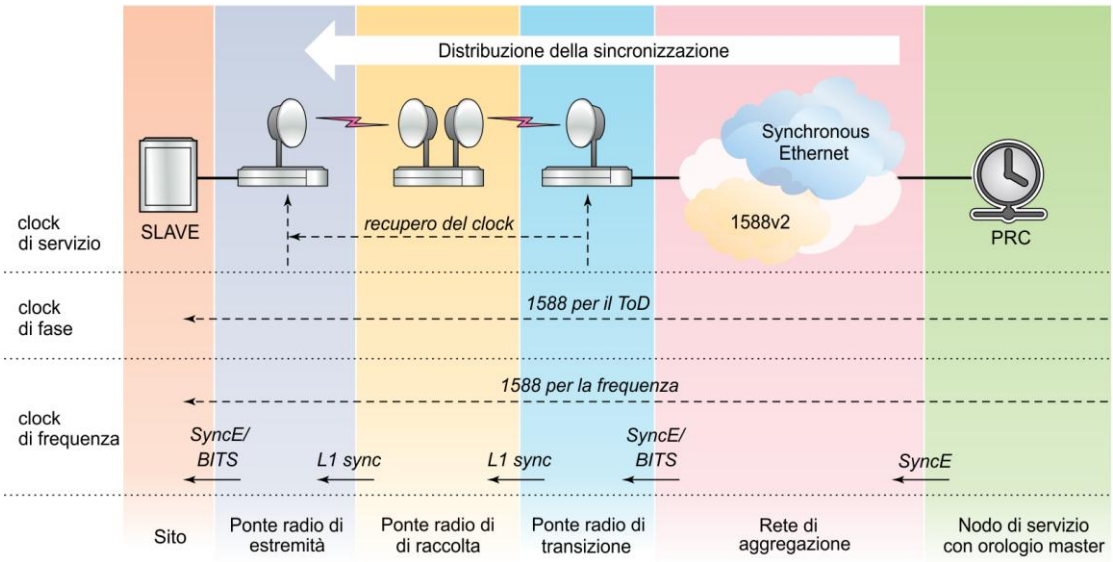


Figura 5-17 Rete di sincronizzazione non omogenea [89]

Una ragione a supporto della combinazione di differenti tecniche di sincronizzazione è quella che alcuni segmenti della rete potrebbero non supportare una specifica soluzione per la temporizzazione; alcuni sistemi MW sono per questo motivo stati progettati per interoperare in modo nativo con TDM, SyncE e PTP indistintamente.

5.9 Supporto funzionalità on-path

Le reti a pacchetto di oggi non sempre adottano apparecchiature per la sincronizzazione che offrono le funzionalità di "Transparent Clock" (TC) e "Boundary Clock" (BC); l'assenza di queste due tipologie di *clock* nella rete, può rendere difficile il raggiungimento delle performance richieste in scenari applicativi in cui è richiesta un'elevata accuratezza ed affidabilità in termini di sincronizzazione, fase ed frequenza. La sfida più impegnativa nell'operazione di recupero del clock dalla rete ("clock recovery") è infatti la mitigazione degli effetti della "Packet Delay Variation" (PDV), che può essere fortemente ridotta con l'impiego di TC e BC. Nonostante ciò, le asimmetrie presenti nei *path* di rete dovute a differenze di ritardo di propagazione nelle direzioni di "Uplink" e "Downlink", possono ancora impattare sull'accuratezza della sincronizzazione recuperata dallo "Slave clock", mentre può non essere un problema per la sincronizzazione di frequenza. Il supporto per le funzionalità di BC

e TC è dunque importante nella sincronizzazione "end-to-end" su ponti radio MW: esse spezzano la rete in segmenti più piccoli con minore PDV (Figura 5-18) ed effettuano un'operazione di re-timing tra clock [91].

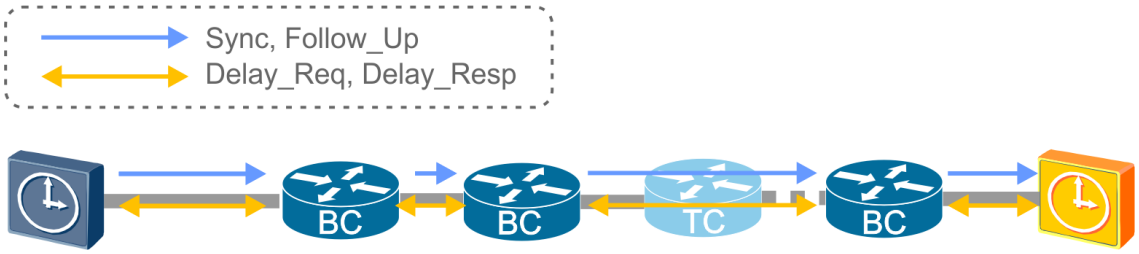


Figura 5-18 Riduzione della PDV con supporto funzionalità "On-Path" nativo

5.10 Operations Administration & Maintenance

Lo sviluppo crescente delle reti Ethernet ha reso la gestione e la manutenzione di rete sempre più importante, ma lo Ethernet tradizionale difficilmente riesce a fornire strumenti di gestione del servizio "End-to-End" (E2E), individuazione dei guasti e monitoraggio delle performance.

Al fine d'indirizzare queste necessità [92] lo ITU ("International Telecommunication Union"), lo IEEE ("Institute of Electrical and Electronics Engineers") ed il MEF ("Metro Ethernet Forum") hanno definito specifici protocolli e standard tra loro complementari a supporto delle attività OAM ("Operations Administration & Maintenance"), che includono anche i ponti radio come elementi di rete.

Lo Ethernet OAM mette a disposizione le funzionalità di:

- **Rilevazione dei guasti** ("fault management"). Lo stato di connettività di rete viene stabilito mediante l'invio di messaggi di rilevamento ed il guasto viene localizzato utilizzando metodologie simili al "*ping*" ed il "*traceroute*" delle reti IP. Lavora con protocolli di protezione in grado di azionare politiche di commutazione di circuito, in modo da mantenere l'interruzione del servizio al di sotto dei 50 ms necessari a raggiungere l'affidabilità di grado "Carrier".

- **Gestione delle performance**. Vengono collezionati i parametri di trasmissione della rete (*packet loss, jitter, delay, ecc.*) mediante misurazioni effettuate dagli stessi elementi di rete; attraverso gli strumenti di gestione, è possibile poi tenere sotto controllo la salute della rete e localizzare i guasti.

Le funzionalità OAM sono identificate nella Tabella 5-3 riportata sotto.

Tabella 5-3 Funzionalità "Operation Administration & Management"

Categoria	**Funzioni**
Operations	Monitoraggio automatico della rete
	Rilevamento ed isolamento guasti
	Gestione allarmi
Administration	Monitoraggio delle performance
	Semplificazione capacità di pianificazione
Maintenance	Attuazione degli aggiornamenti
	Rilascio nuove funzionalità
	Monitoraggio stato di salute rete

Lo OAM è suddiviso nei strati mostrati in Figura 5-19 Strati della OAM ("layers", o livelli):

- Transport;
- Connectivity;
- Service.

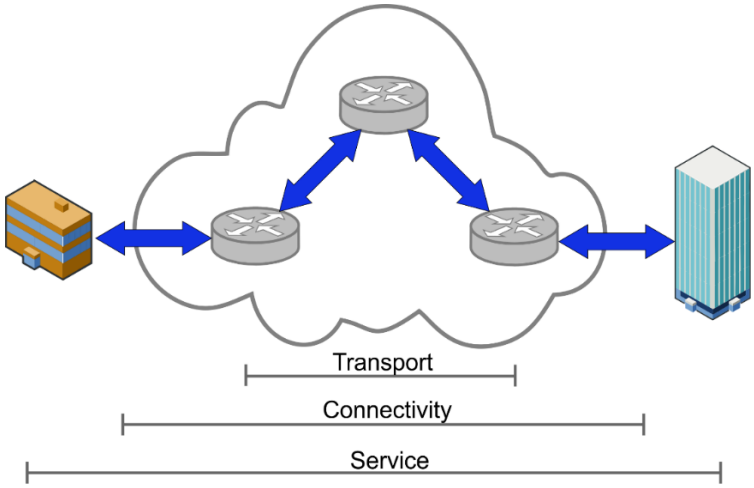


Figura 5-19 Strati della OAM

Le funzionalità di ciascun livello ed i corrispettivi standard sono elencati nella Tabella 5-4 [93].

Tabella 5-4 Funzionalità dei livelli di OAM e standard di riferimento

Layer	**Funzionalità**	**Standard**
Transport	▪ Assicura che una coppia di elementi mantengano comunicazione bidirezionale. ▪ Individua e notifica l'interruzione del link per l'aggiramento del guasto. ▪ Monitora la qualità del collegamento per garantire il livello di accettabilità stabilito.	IEEE 802.3 (include 802.3ah)
Connectivity	▪ Monitora il percorso (path) tra due apparati non adiacenti.	IEEE 802.1ag ITU-T Y.1731 Specifiche MEF
Service	▪ Stima lo stato del servizio dal punto di vista dell'utente. ▪ Produce le metriche da monitorare per gli SLA (Service Level Agreement) contrattualizzati.	ITU-T Y.1731 Specifiche MEF

6. Banco di prova

In questo capitolo viene descritto il banco di prova allestito per effettuare le verifiche di collegamento radio punto-punto con trasporto della sincronizzazione PTPv2 e SyncE. Le apparecchiature impiegate nel banco sono descritte nell'ordine con cui sono state installate nell'armadio *rack* che le ospita. È stato intenzionalmente dato più spazio agli elementi componenti il ponte radio, in quanto è l'apparecchiatura più complessa impiegata nel test ed è un elemento cardine di questo lavoro. Verranno meglio approfondite le tecniche di prioritizzazione del traffico, utilizzando VLAN e regole di QoS. Gli scenari di test ed i risultati ottenuti saranno invece trattati nel capitolo successivo.

6.1 Scenario ipotizzato

Per gli scopi di monitoraggio della PQ, si è considerato uno scenario di distribuzione della sincronizzazione tramite ponte radio costruito su un'architettura "a stella" (Figura 6-1), in cui si suppone che nel "centro stella" sia disponibile la sorgente di riferimento temporale ad elevata accuratezza ("Nodo Master"), ed i nodi periferici rappresentanti i siti di monitoraggio della PQ ("Nodi Slave") siano distribuiti a distanze differenti attorno ad essa.

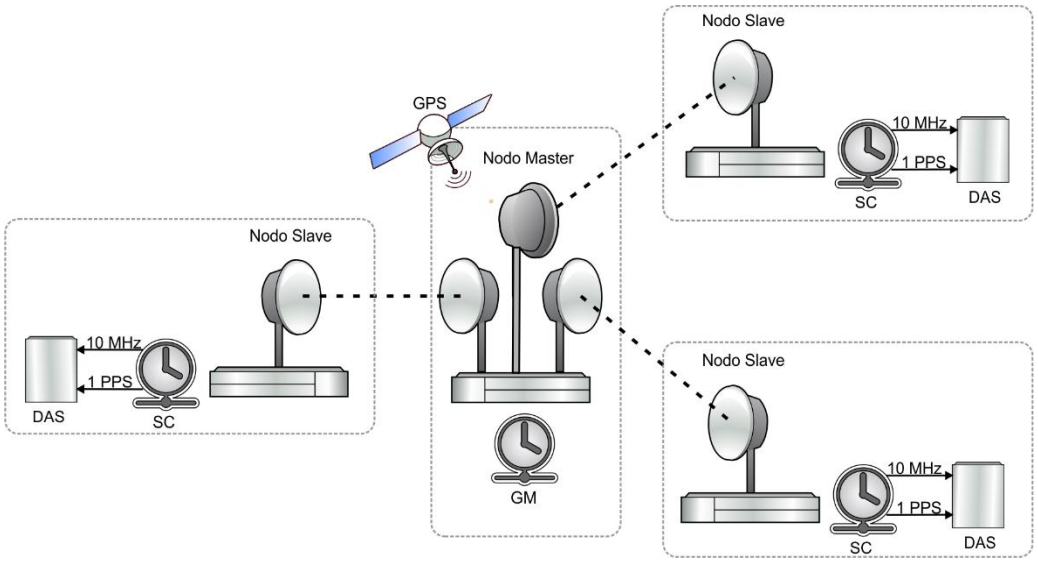


Figura 6-1 Configurazione "a stella" per la distribuzione della sincronizzazione

Questo schema di copertura geografica della sincronizzazione può essere concettualmente esteso (nei limiti imposti dalle tecniche SyncE e PTPv2) collegando tra loro più reti

"a stella" (Figura 6-2), dove i centri stella di rango inferiore alla sorgente di riferimento primaria sono rappresentanti da elementi di rete "Boundary Clock" che:

- rispetto al proprio riferimento di rango superiore, si comportano come "Slave";
- si comportano come "Master" verso gli orologi di rango sottostante.

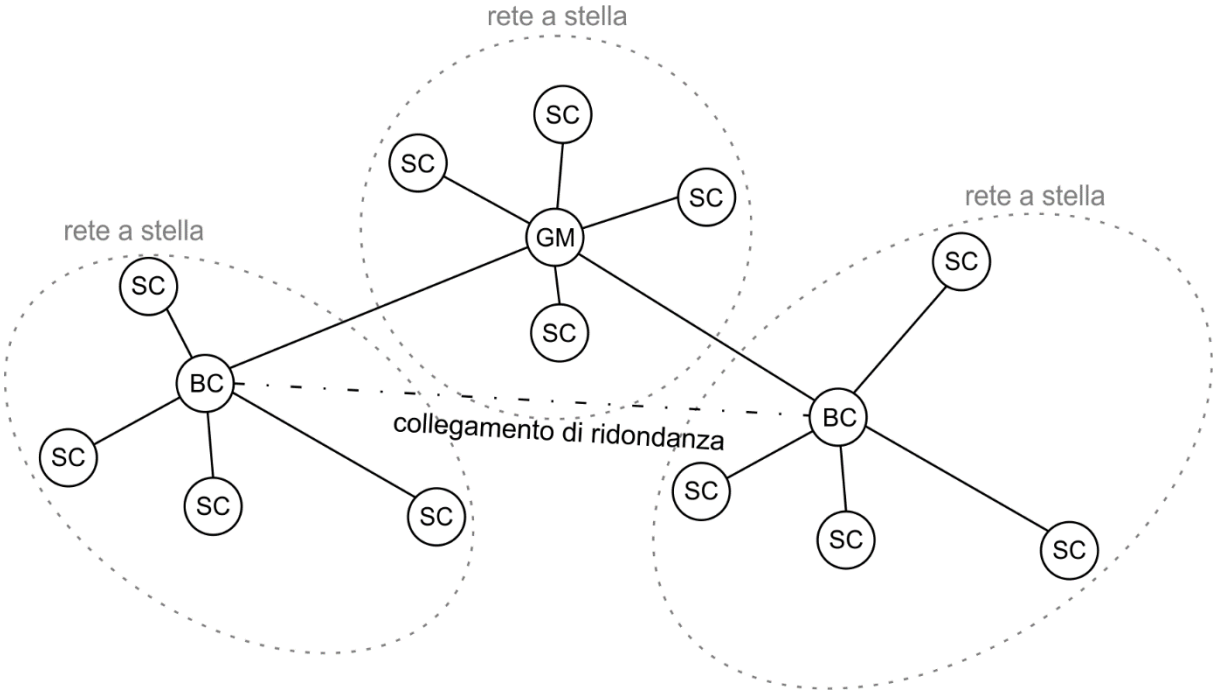


Figura 6-2 Estensione della configurazione di distribuzione "a stella"

Il progettista di rete può decidere d'inserire eventuali collegamenti di ridondanza e sfruttare l'algoritmo BMC per selezionare un Master alternativo in caso d'indisponibilità del collegamento radio principale.

Il collegamento più elementare alla base di una catena di trasporto della sincronizzazione mediante ponti radio, è il singolo "hop" punto-punto (P2P); **questo elemento base è l'oggetto della simulazione realizzata sul banco di prova**.

Le più complesse reti "multi-hop" necessitano di un'analisi per ogni elemento della catena, per valutare se il "time-budget" di sincronizzazione tra le estremità della catena stessa (sorgente primaria ed utilizzatore) rientri nei limiti imposti dalla tipologia di applicazione. Caratterizzare il comportamento degli apparati che s'intende utilizzare per la generazione, il

trasporto e l'estrazione dei segnali di sincronizzazione è un passo che può certamente aiutare il progettista di rete nei suoi compiti.

6.2 Sistema realizzato per la simulazione

Al fine di verificare l'applicabilità al trasporto delle tecniche di sincronizzazione scelte (PTPv2 e SyncE) mediante un collegamento radio Microwave, e le conseguenti performance raggiungibili in termini di accuratezza di sincronizzazione nei siti di monitoraggio della PQ, è stato realizzato un *setup* di laboratorio per la simulazione di un collegamento punto-punto (P2P) tra due terminazioni (

Figura 6-3):

- "**Nodo Master**", rappresentante il nodo logico centrale della sorgente di sincronizzazione, costituita da un orologio GM stabilmente agganciato alla rete GPS, da cui ricava il riferimento di fase e frequenza da re-inoltrare ad un "Nodo Slave";

- "**Nodo Slave**", la terminazione logica remota che riceve i flussi di sincronizzazione dal nodo di riferimento centrale e provvede a ricostruire *in loco* i segnali analogici di riferimento di fase (PPS), frequenza (clock a 10 MHz), e "Time-of-Day" (in forma di messaggio NMEA) da fornire alla strumentazione DAS per la stima dei parametri di PQ.

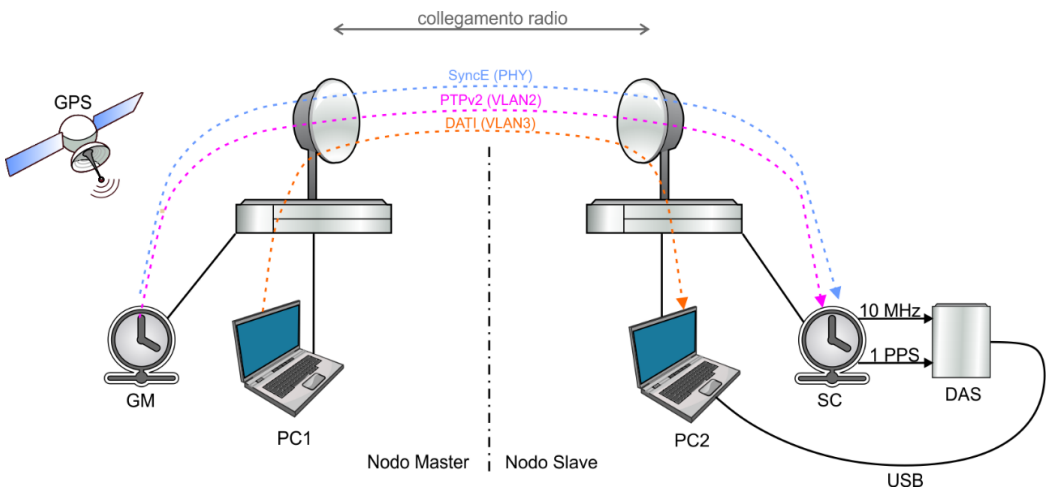


Figura 6-3 Schema di collegamento MW punto-punto per la Power Quality

Il setup riproduce lo scenario in cui un sito periferico di monitoraggio della PQ è dislocato in un'area geografica soggetta a "digital divide" e necessita sia di riferimenti temporali accurati per l'acquisizione dati operata dal DAS, che di un collegamento dati affidabile sia per il controllo remoto della postazione (OAM), sia per il trasferimento dei dati acquisiti dal DAS locale verso un sistema di raccolta centralizzato (PC1 in figura).

Tra i due nodi "Master" e "Slave", vengono fatti transitare tre flussi informativi distinti:

- il riferimento di frequenza SyncE, trasportato a livello fisico (PHY);
- la sincronizzazione di fase, basata su messaggistica a pacchetti PTPv2;
- un canale dati dedicato al trasferimento dei dati di PQ ed alle operazioni di controllo remoto della postazione di monitoraggio.

Circa quest'ultimo aspetto, la massima capacità di banda messa a disposizione da un collegamento MW (dell'ordine delle centinaia di megabit per secondo) permette di effettuare inoltre operazioni più onerose, quali ad esempio:

- aggiornamento di *firmware* e sistemi operativi degli apparati;
- telecontrollo e manutenzione remoti ("remote desktop");
- trasferimenti di flussi audio/video (video sorveglianza delle postazioni);
- monitoraggio di parametri ambientali (meteo e protezione civile);
- controllo di attuatori e servo meccanismi (sottostazioni di energia);
- condivisione del collegamento con altri servizi di terze parti[68].

Tali operazioni sono in genere più difficilmente realizzabili con tradizionali collegamenti dati di tipo mobile (2G, 3G e 4G), in generale per il costo basato sul traffico a consumo e politiche di "Network Management" volte a limitare su basi agnostiche [94] il consumo eccessivo delle risorse radio condivise con altri utenti, negli orari di picco di traffico e di maggiore domanda di contenuti.

I tre flussi informativi, prima di transitare nel canale radio sotto forma di frame, vengono separati sia a livello fisico (PHY) che di pacchetto (VLAN), affinché ciascun servizio (SyncE, PTPv2 e dati) risulti identificabile ed isolato dagli altri, e sia così possibile:

[68] Nel contesto del "digital divide" si può immaginare di condividere la capacità del ponte-radio con servizi di accesso ad Internet dedicati a piccole comunità periferiche.

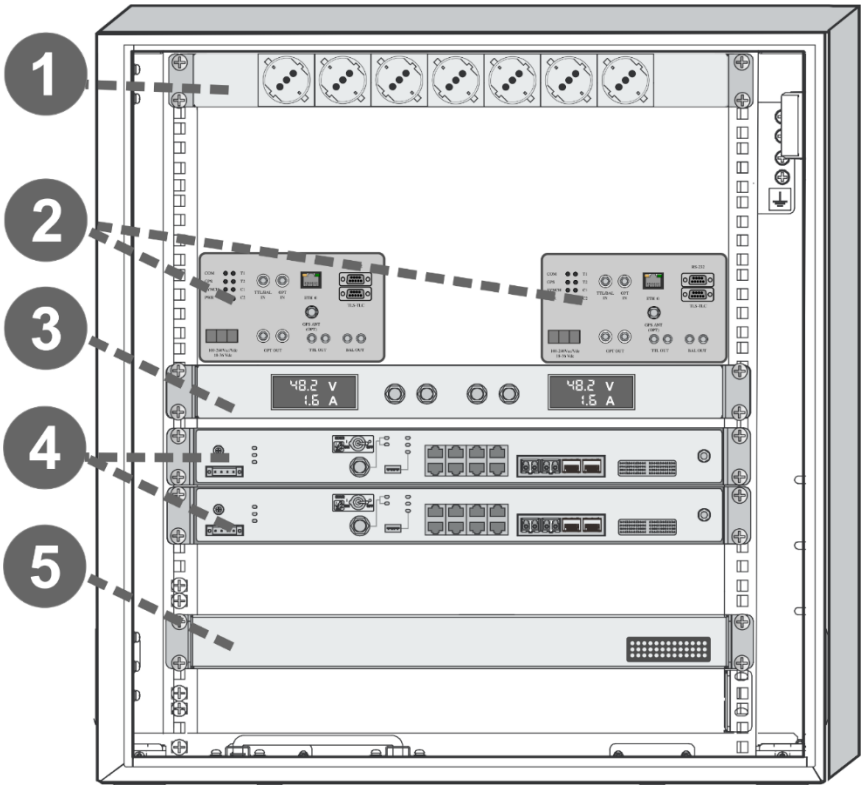
- assegnare un ordine di priorità tra i servizi (QoS) utile in situazioni di congestione del collegamento, privilegiando in questo caso quelli di sincronizzazione rispetto al flusso dei dati;
- evitare dunque che servizi di diversa natura si influenzino vicendevolmente, causando effetti imprevisti sui livelli di servizio attesi;
- disaccoppiare domini di rete, a vantaggio dell'efficienza di rete e della sicurezza delle comunicazioni.

Il banco è stato realizzato alloggiando le apparecchiature necessarie, ad esclusione delle ODU e dei PC, all'interno di un armadio *rack* da interni (grado di protezione IP20[69]) carrellato per apparati di rete da 19 pollici, alto 15U[70], come mostrato nello schema di

Figura 6-4.

[69] "International Protection", classifica e valuta il grado di protezione fornito da involucri meccanici e quadri elettrici contro l'intrusione di particelle solide e liquidi, secondo la codifica istituita dalla norma EN60529.

[70] "Rack Unit", si basa sulle specifiche standard per i *rack* EIA-310 ("Electronic Industries Alliance") e corrisponde a 1,75 pollici o 44,45 mm.



(1) Barra di alimentazione multi-presa a 7 posizioni, per l'alimentazione degli apparati installati nel *rack*;
(2) Orologi Digital Instruments modelli SB-V01 (SC) ed SB-V01GPS (GM);
(3) Unità di energia a due canali separati da 48V da 100W ciascuno, appositamente realizzata;
(4) Unità in banda base del ponte radio (OptiX RTN905 IDU);
(5) Switch di rete con funzionalità avanzate di orologio, prodotto da Digital Instruments, modello Sync-Switch.

Figura 6-4 Collocazione degli apparati di test in armadio rack

Esternamente al *rack* (

Figura 6-6), disposte su di un banco (Figura 6-5), le unità di potenza in banda traslata dei ponti radio (dette ODU), tra loro direttamente collegate mediante una guida d'onda e due attenuatori, necessari per ridurre la potenza ricevuta nei limiti di accettazione dello stadio di ricezione. Un'antenna GPS disposta in ambiente esterno fornisce i riferimenti temporali al SyncSwitch che opera come riferimento primario, sia per la fase che per la frequenza.

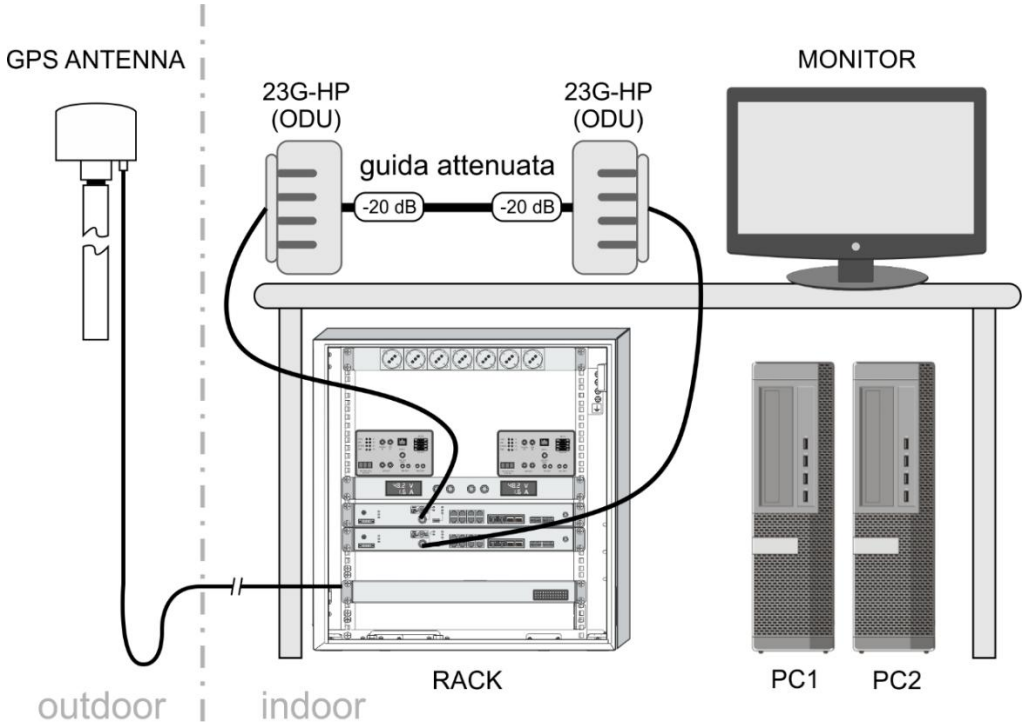


Figura 6-5 Schema del banco di test per la sincronizzazione su ponte-radio

Nei paragrafi a seguire saranno trattate nel dettaglio le singole apparecchiature impiegate nella realizzazione del banco di prova.

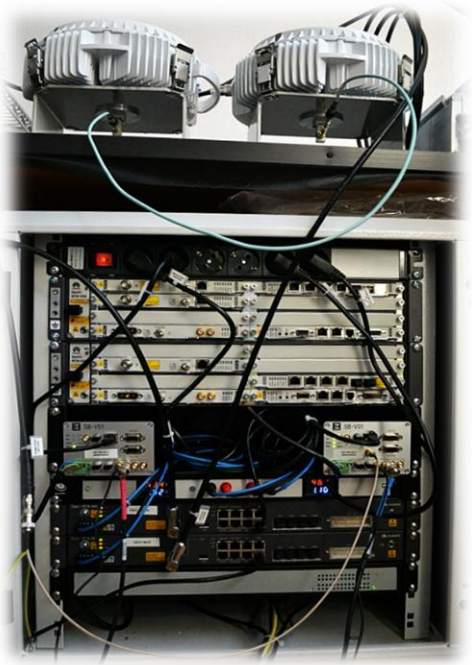


Figura 6-6 Armadio rack allestito per il banco di prova

6.3 SB-V01

Lo SB-V01 di Digital Instruments srl (Figura 6-7) è un "timing equipment" per applicazioni industriali in fattore di forma adatto per montaggio su barre DIN ("Deutsches Institut für Normung)" e capace del ruolo di "Slave Clock", presentato dal costruttore come una soluzione "all-in-one" per le reti "Smart Grid" e l'automazione di sottostazioni di energia[71]; quando equipaggiato con un ricevitore GPS opzionale (di seguito indicato come SB-V01GPS) è in grado di ricoprire anche i ruoli di "Master" e "GrandMaster" [95].

Figura 6-7 Digital Instruments SB-V01

L'interfaccia di gestione è basata su "Web User Interface" (WebUI) ed è inoltre gestibile via SNMP[72], e dunque integrabile in sistemi di monitoraggio di rete come OpenNMS[73]. Dispone inoltre di *relais* di I/O per segnalazione e controllo remoto.

In ingresso accetta sorgenti multiple come:

- IRIG-B ottico;
- IRIG-B elettrico 001/12x su connettore SMA[74] (*autosensing*);
- IEEE1588v2 ed NTP su porta Ethernet RJ-45;

[71] "SB-V01 All-in-one timing solution for smart grid and substation automation", Digital Instruments srl
[72] Il "Simple Network Management Protocol" è un protocollo internet definito dalla IETF che opera al livello 7 del modello OSI e consente la configurazione, la gestione e la supervisione di apparati collegati in una rete.
[73] Piattaforma "open-source" di grado "Enterprise" per il monitoraggio e la gestione delle reti.
[74] "Sub Miniature version A"

- GNSS (modulo presente sulla versione SB-V01GPS) con connettore d'antenna di tipo SMA.

In uscita può generare i seguenti segnali di temporizzazione:

- 2x IRIG-B ottico;
- 2x IRIG-B elettrico non modulato su connettore SMA;
- IEEE1588v2 ed NTP su porta Ethernet RJ-45;
- ToD ("Time of Day") su porta seriale RS232-TTL.

Per venire in contro alle diverse esigenze operative, può essere alimentato dallo stesso connettore sia nell'intervallo di tensione 24-48 VDC che 110-220 VAC. Nella Figura 6-8 è schematizzato il pannello frontale dell'apparato.

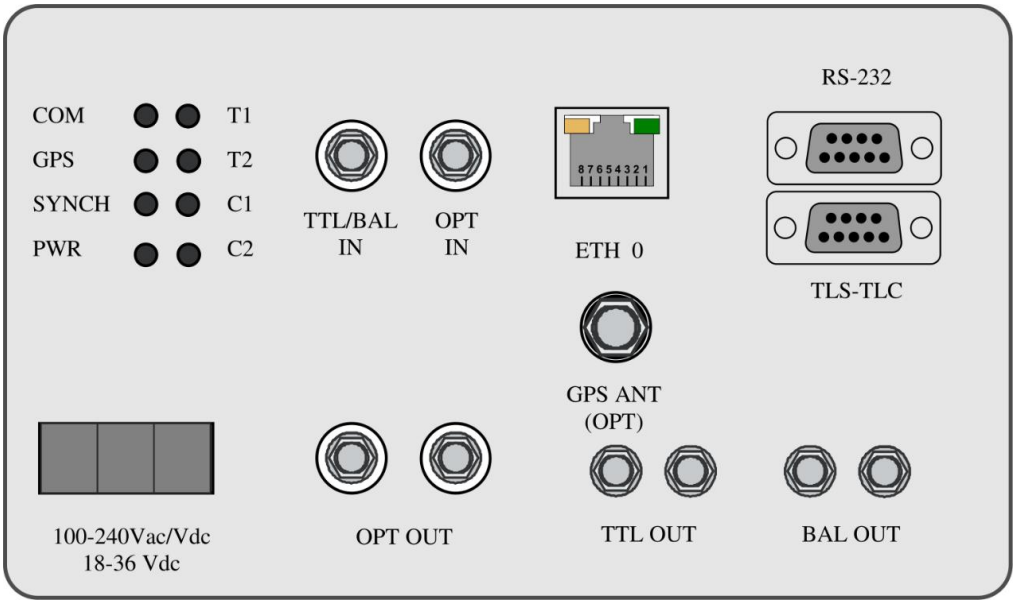


Figura 6-8 Schematizzazione del pannello frontale SB-V01GPS

Le funzionalità di "*bridging*" tra diverse tipologie d'interfacce di sincronizzazione lo rendono utile per:

- servire sia le apparecchiature legacy che i più moderni IED Ethernet, grazie alle funzionalità di conversione "GPS to PTP" e "GPS to IRIG-B";

- riutilizzare GPS preesistenti negli impianti, per fornire la sincronizzazione PTP tramite interfaccia Ethernet alle apparecchiature più aggiornate, attraverso la funzionalità per la conversione “IRIG-B to PTP”;
- estendere codici IRIG-B (“Extender”) in una rete esistente (ottica od elettrica), fornendo contemporaneamente la sincronizzazione PTP;
- aggiungere retro compatibilità verso IED/RTU (“Remote Terminal Unit”) legacy, utilizzando l’apparato come convertitore “PTP to IRIG.B” e “PTP to ToD”.

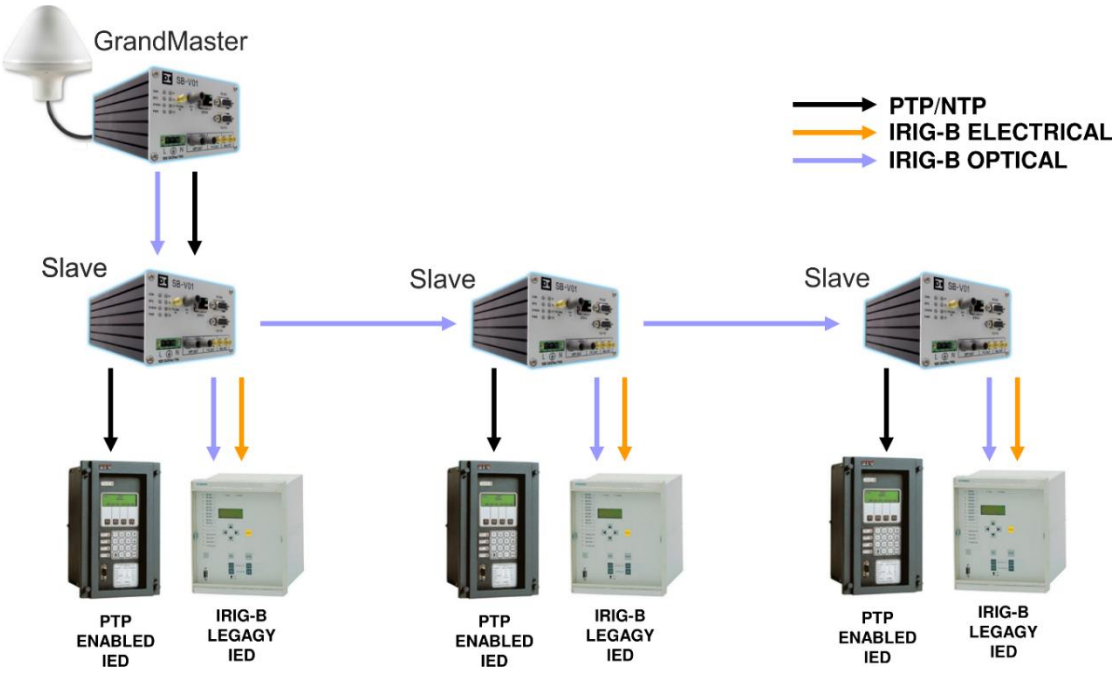


Figura 6-9 SB-V01, esempio di applicazione con IED [95]

Le performance di “holdover”, in caso di perdita di sincronizzazione, sono affidate ad un oscillatore locale OCXO (“Oven Controlled Crystal Oscillator”).

Il ricevitore GPS supporta 12 canali per il tracciamento di altrettanti satelliti, ha un tempo di acquisizione medio di 4 minuti e offre una stabilità di 1E-12 dopo 24 ore, con un accuratezza sul PPS inferiore ai 50 ns; quando agganciato ai satelliti, può garantire un’accuratezza temporale di 100 ns rispetto all'UTC (ITU-T G.8272 sec6) ed è in linea con la ITU-T G.811 per l’accuratezza in frequenza.

La tipologia di scambio messaggi PTP implementata è “one-step” mentre il “two-step” è opzionale; i profili supportati sono:

- default, con supporto BMCA;
- C37.238-2011, PTP per “Power System Applications”;
- ITU-T G.8265.1, “Frequency Profile”.

Per quanto riguarda la sezione SyncE, può essere utilizzata come *input* di frequenza ed essere generata come uscita (quando impostato come Master), ed è conforme agli standard G8261, G.8262 e G.8264 ESMC.

L’apparato è stato specificamente pensato e progettato per l’aggiornamento delle sub-stazioni di energia alla tecnologia IP, mantenendo il “legacy” con le precedenti architetture di sincronizzazione IRIG-B; se da una parte questo approccio permette agli operatori di rete elettrica una transizione più “morbida” verso le nuove architetture IP, dall’altra è facile aspettarsi che il target di accuratezza di fase (PPS) dell’apparato sia in linea con le massime performance ottenibili dalle precedenti soluzione basate su IRIG-B con risoluzioni e granularità temporale dell’ordine dei microsecondi. Inoltre, l’interfaccia di rete Ethernet 10/100 Mbps utilizzata in luogo di una Gigabit Ethernet, contribuisce a supportare questa considerazione: è un apparato di classe “Entry Level” non destinato ad applicazioni ad elevata accuratezza temporale. È interessante che i segnali di uscita PPS e *clock* siano tra loro sempre agganciati in fase (Figura 6-10), poiché generati dallo stesso sintetizzatore PLL a bordo dell’apparato, come mostrato in figura sotto (ritardo 16.67 ns tra i fronti di salita).

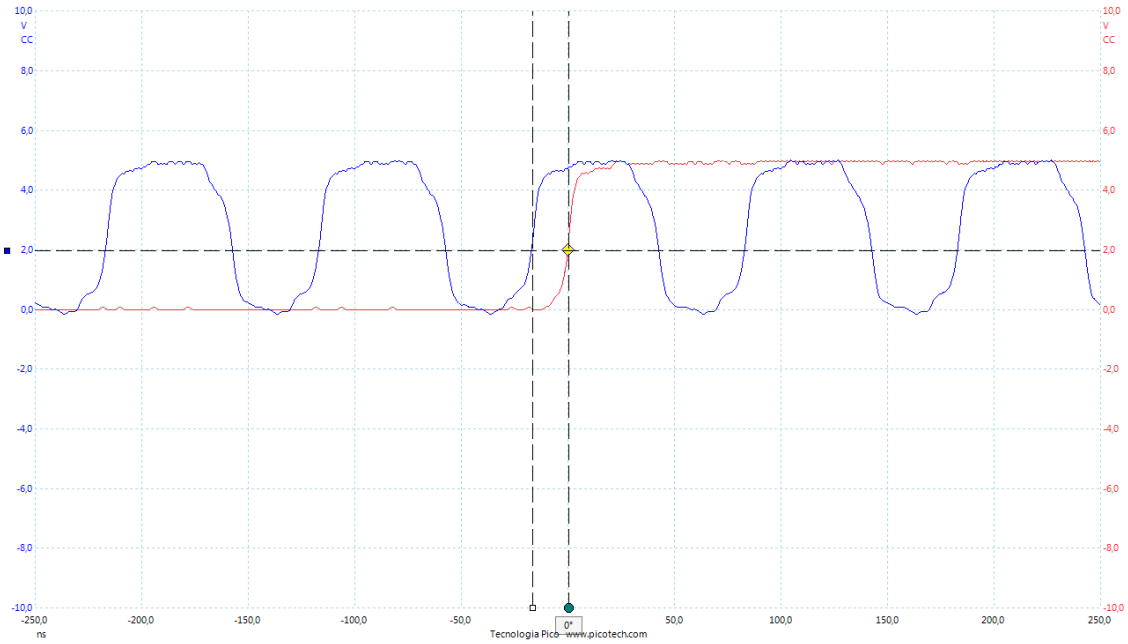


Figura 6-10 SB-V01GPS, segnali di uscita agganciati in fase

6.4 Unità di energia

L'unità di energia rappresenta la sezione di alimentazione elettrica del ponte radio, in grado di erogare i 48V in corrente continua necessari al funzionamento degli elementi in banda base e banda traslata. Essa è stata appositamente realizzata in questo contesto per gli scopi del banco di test, sfruttando due alimentatori *switching* separati "Mean Well CLG-100-48" (Figura 6-11) alloggiati all'interno di una scatola metallica per montaggio su rack da 19", dell'altezza di 1U.

Figura 6-11 Mean Well CLG-100-48

I due alimentatori, della potenza nominale di 96W ciascuno, accettano in ingresso una tensione alternata massima di 295V e sono stati impiegati per realizzare due canali di alimentazione separati con uscite a 48V, impiegati ciascuno per alimentare una terminazione del collegamento radio punto-punto, con una massima corrente di uscita di 2A per canale.

Il pannello frontale dello chassis è stato realizzato in alluminio dello spessore di 2.5 mm per facilitare le operazioni di fresatura ed agevolare lo scambio di calore con l'esterno, essendo stata impiegata la ventilazione passiva come metodologia di raffreddamento. Sul pannello frontale (Figura 6-12) sono stati inseriti inoltre due display LCD dotati di funzionalità di voltmetro ed amperometro, al fine di verificare il livello di tensione e corrente erogati alle apparecchiature sotto carico.

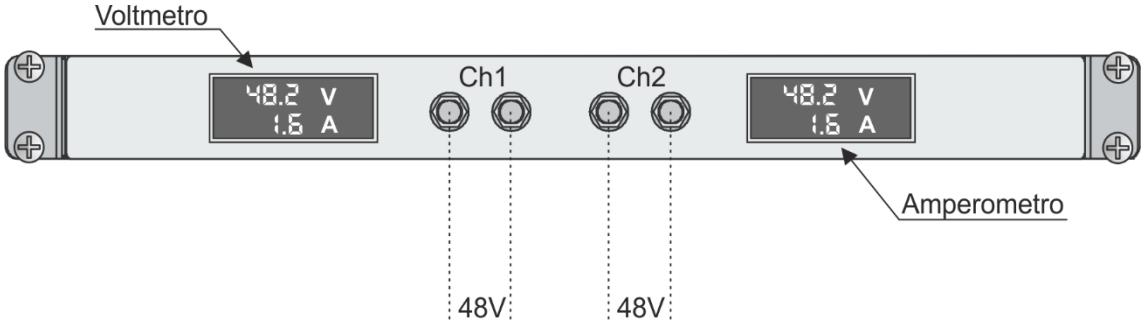


Figura 6-12 Schematizzazione pannello frontale unità di energia

Nella Tabella 6-1 sono riportate le caratteristiche di targa degli alimentatori impiegati.

Tabella 6-1 Caratteristiche tecniche “Mean Well CLG-100-48”

Tipologia	Parametro	Valore/Nota
Uscita	Tensione continua	48V
	Corrente nominale	2A
	Potenza nominale	96W
	Max Ripple	200 mVpp
	Tolleranza della tensione	±2%
	Regolazione di linea	±1%
	Regolazione di carico	±2%
	Tempo di avviamento	500 ms a pieno carico
Ingresso	Intervallo di tensione	90~295VAC
	Intervallo di frequenza	47~63Hz
	Efficienza	88,5%
	THD	<20% con carico ≥75%
	Corrente di perdita	<0,75mA
Meccanismi di protezione	Sovracorrente	Limitazione costante della corrente
	Corto circuito	Metodo “hiccup”[75]
	Sovra voltaggio	Spegnimento
	Surriscaldamento	Spegnimento
Altro	MTBF	300.000 h
	Dimensioni	222,2 x 68 x 38,8 mm
	Grado di protezione	IP67

[75] Ogni volta che il circuito “current-sense” individua una sovracorrente, viene interrotta l’alimentazione per un periodo di tempo stabilito da un timer, cosicché il surriscaldamento delle giunzioni dovute al sovraccarico è limitato alla sola durata del ciclo “hiccup”.

6.5 OptiX RTN905 1A

Nei test è stata impiegato un *kit* Microwave Huawei OptiX RTN905 1A, messo gentilmente a disposizione da Linkem SpA, per realizzare un collegamento radio in configurazione punto-punto, in guida d'onda. Questo tipo di ponte radio ricade nella tipologia "TDM/Hybrid/Packet Microwave" e può simultaneamente trasmettere collegamenti E1 nativi e servizi Ethernet.

Il prodotto adotta una struttura a blocchi separati (in gergo, "in configurazione *split*") che consiste di due parti (Figura 6-13):

- un elemento da ambiente interno, detto IDU ("InDoor Unit");
- un elemento da ambiente esterno, detto ODU ("OutDoor Unit"), da connettere all'antenna.

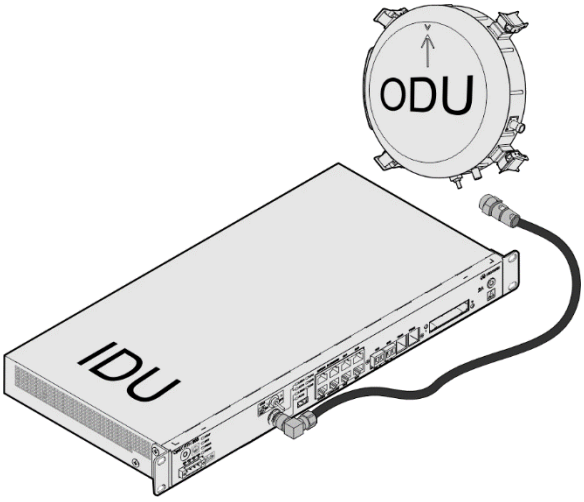


Figura 6-13 OptiX RTN905, IDU ed ODU

6.5.1 IDU 905

È l'apparato (Figura 6-14) collocato all'interno di un *rack* o di uno *shelter*, protetto da agenti esterni, che riceve ed effettua la multiplazione dei servizi, li processa e fornisce l'accesso per il controllo del sistema ("Operation & Management").

Ha le dimensioni esterne adeguate per essere installato in un rack da 19" con altezza 1U e dispone di [86]:

- 4 porte Gigabit Ethernet (GE) elettriche;
- 2 porte Gigabit Ethernet/Fiber Ethernet elettrico/ottico tramite moduli SFP;
- 16 interfacce E1;
- 2 interfacce TDM.

Figura 6-14 Huawei OptiX RTN905 IDU [96]

L'elettronica di banda base "Integrated IP radio" permette la gestione simultanea di flussi E1 ed Ethernet, con una modulazione massima di 1024QAM ("Quadrature Amplitude Modulation"); l'apparato può gestire un solo canale IF ("Intra-Frequency") pertanto l'unica configurazione RF ("Radio-Frequency") possibile è la "1+0": ciò non permette di utilizzare altre tipologie di configurazioni per incrementare la capacità di canale o l'affidabilità del collegamento, come ad esempio la configurazione XPIC ("Cross-Polarization Interference Cancellation").

La metodologia XPIC utilizzata in combinazione con la "co-channel-dual-polarization" (CCDP) permetterebbe invece, come detto, di raddoppiare la capacità del collegamento sullo stesso canale, sfruttando due onde ortogonalmente polarizzate per trasmettere due differenti flussi sullo stesso canale, con minima interferenza tra loro.

Lo schema a blocchi della generica IDU 905 è riportato in Figura 6-16:

- i servizi Ethernet (GE/FE, elettrici ed ottici) e legacy (E1 e TDM) vengono separati (o ricongiunti) con l'aggiunta di un "tag" dall'interfaccia dei servizi ed inviate (o ricevute) ai rispettivi moduli di elaborazione;
- i segnali TDM ed Ethernet elaborati s'inviluppano (o si separano) nella sezione IF;
- l'unità "clock" gestisce la sincronizzazione dell'apparato, eventualmente fornita dall'esterno (ad esempio tramite un collegamento fisico a 2048 kHz);

- l'interfaccia di "Node-Management" (NM, Figura 6-15) espone all'operatore le funzionalità di "Operation & Maintenance" (O&M).

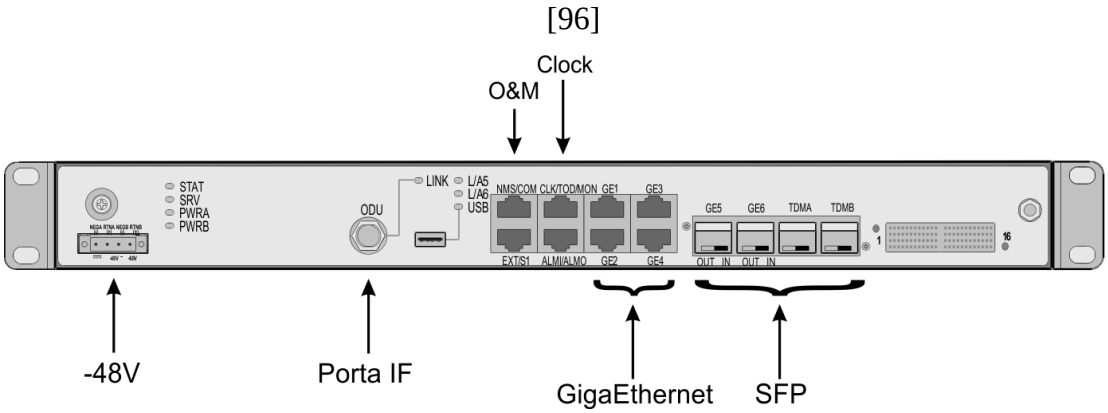


Figura 6-15 Schema pannello frontale OptiX RTN905 IDU [96]

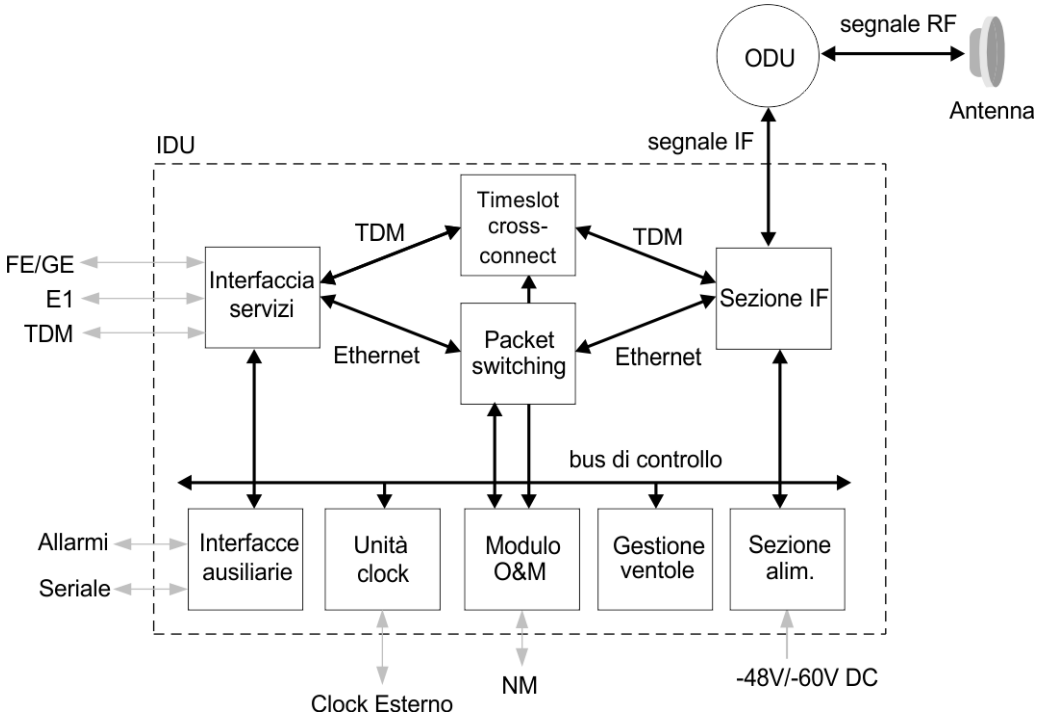


Figura 6-16 Schema a blocchi IDU [96]

La ODU scambia con la IDU l'inviluppo di segnali in trasmissione e ricezione, attraverso l'interfaccia IF comune. La versione del prodotto utilizzata in questo lavoro è la V100R005C00.

6.5.2 ODU

6.5.2.1 Generalità

La sezione outdoor dello RTN905 è installata in ambiente esterno ed ha il compito di portare “in aria” il segnale, traslando in banda ed amplificando opportunamente il segnale IF. La famiglia di prodotti RTN ODU (Figura 6-17) copre l’intera banda di frequenze tra i 6 GHz ed i 42 GHz. La IDU 905 supporta un’ampia gamma di ODU della famiglia RTN (vedere Tabella 6-2), specifiche a seconda della banda di frequenza di lavoro e alle performance che s’intende raggiungere.

.

Figura 6-17 OptiX RTN905 ODU [96]

Tabella 6-2 Tipologie di ODU compatibili con OptiX RTN905

Modello	**XMC-2**	**XMC-1**	**HP, HPA**	**SP, SPA**
Tipologia	High Power	Low Capacity	High Power	Standard Power
Banda	7, 8, 11, 13, 15, 18, 23, 26, 28, 32, 38, 42 GHz	7, 8, 11, 13, 15, 18, 23 GHz	6, 7, 8, 10, 10.5, 11, 13, 15, 18, 23, 26, 28, 32, 38 GHz (HP) / 6, 7, 8, 11, 13, 15, 18, 23 GHz (HPA)	7, 8, 11, 13, 15, 18, 23, 26, 38 GHz (SP ODU) / 6, 7, 8, 11, 13, 15, 18, 23 GHz (SPA ODU)
Modulazione	QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM (7, 8, 28, 32 GHz) / QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM, 512QAM, 1024QAM (altre)	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM	QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM
Spaziatura Canali	7, 14, 28, 40, 50, 56 MHz	3.5, 7, 14, 28 MHz	7, 14, 28 MHz (10.5 GHz) / 7, 14, 28, 40, 50, 56 MHz (altre)	3.5, 7, 14, 28 MHz

L'alimentazione di -48 V in corrente continua è fornita alla ODU dalla IDU 905 secondo lo standard ETSI EN300 132-2 mediante il cavo IF, che con l'alimentazione trasporta

anche i segnali modulati ed il canale di segnalazione e gestione (O&M, “Operation & Maintenance”) della ODU, secondo le modalità indicate in Tabella 6-3.

Tabella 6-3 Caratteristiche segnale IF

Segnale IF	Frequenza di trasmissione IF	350 MHz
	Frequenza di ricezione IF	140 MHz
O&M	Schema di modulazione	ASK
	Frequenza di trasmissione IF	5.5 MHz
	Frequenza di ricezione IF	10 MHz
Impedenza d’interfaccia	50 ohm	

In Figura 6-18 è riportato lo schema a blocchi del generico apparato ODU i cui elementi sono:

- Amplificatore di potenza (AMPL) per la trasmissione dei frame radio;
- Amplificatore a basso rumore (LNA, “Low Noise Amplifier”) di ricezione;
- Blocco di gestione “Operation & Management” (CTRL, “Control Unit”));
- Sezione di alimentazione in corrente continua (PWR, “Power”);
- Blocco di conversione IF-RF (UL, “UpLink);
- Blocco di conversione RF-IF (DL, “DownLink”);
- Multiplexer/Duplexer;
- Sintetizzatori.

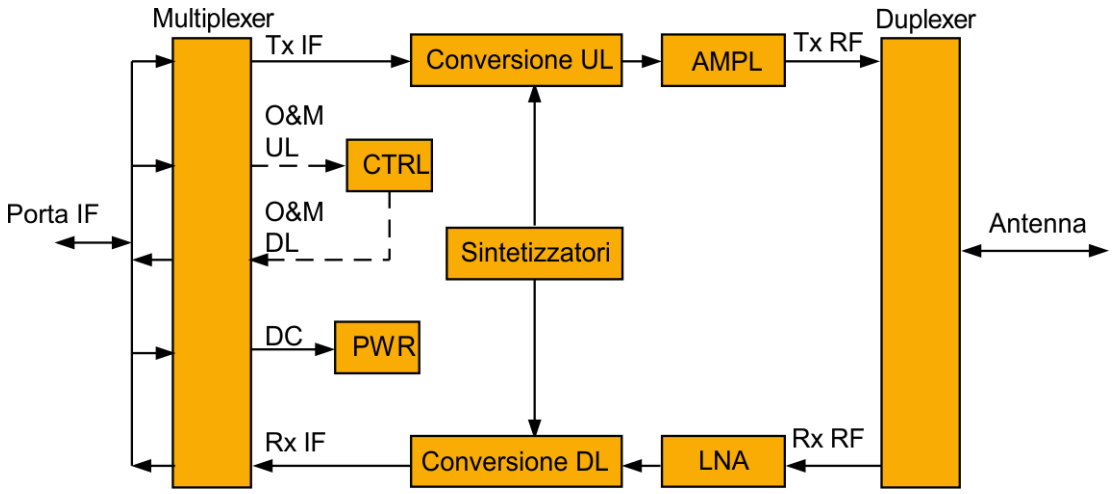


Figura 6-18 Schema a blocchi ODU [86]

6.5.2.2 OptiX RTN 600 23G-HP

Le ODU a disposizione per il banco di test sono due OptiX RTN 600 23G-HP (**Errore. 'origine riferimento non è stata trovata.**), ricavate da una precedente generazione di apparato (OptiX RTN 620) ma impiegabili anche su RTN 905.

Opera nella banda dei 23GHz (banda “K”) con un *range* di frequenza compreso tra 21.200-23.618 GHz, con le possibili spaziature di canale tra trasmettitore e ricevitore: 1008, 1200, 1232 MHz.

La massima potenza nominale in trasmissione della ODU è indicata in funzione della modulazione applicata:

- 25 dBm @ QPSK,
- 23 dBm @ 16/32QAM,
- 19 dBm @ 64/128QAM,
- 17 dBm @ 256QAM.

La minima potenza in trasmissione è invece comune e di soli 2 dBm. Tuttavia la minima potenza al ricevitore è di -20 dBm, ad eccezione dello schema di modulazione 256QAM che richiede -25 dBm.

Gli apparati RTN adottano inoltre una tecnica di controllo automatico della potenza chiamato ATPC ("Automatic Transmit Power Control") che tiene traccia del livello di segnale al ricevitore sito all'altra estremità del collegamento.

6.5.3 Funzionalità di sincronizzazione

L'OptiX RTN 905 abbraccia i requisiti di sincronizzazione di tempo e frequenza delle reti mobili, supportando la sincronizzazione di:

- frequenza a livello fisico (BITS a 2048 kbps o 2048 kHz su porta esterna);
- frequenza su reti a pacchetto (SyncE su porte FE/GE);
- tempo su reti a pacchetto tramite IEEE1588v2.

Per la sintonizzazione del clock sono accettate le seguenti tipologie di sorgente:

- E1;
- Radio Link clock;
- Synchronous Ethernet con supporto per SSM,
- Interfaccia TDM;
- 2048 kbps o 2048 kHz forniti esternamente;
- Clock interno in modalità "free-run".

Per la sincronizzazione di fase/ToD supporta IEEE1588v2 con le seguenti modalità:

- Ordinary Clock, Boundary Clock;
- Best Master Clock Algorithm;
- Selezione statica delle sorgenti PTP;
- Trasmissione trasparente dei pacchetti IEEE1588v2.

Qualora si fornisse la sincronizzazione al ponte radio tramite la “External Timing Interface” (1PPS+ToD), conoscendo la lunghezza dei collegamenti utilizzati per la sincronizzazione (o il ritardo complessivo da questi introdotto), sarebbe possibile compensarne gli effetti nell’interfaccia di gestione (O&M, Figura 6-19).

Slot Layout | Radio Link Configuration | External Time Interface

Basic Attribute | BMC | Cable Transmitting Distance

External Time Interface	Transmitting Direction	Transmitting Distance Mode	Transmission Length (m)	Transmission Delay (ns)
1-CSHI-External Time Interface1	Ingress	Length	0	/
1-CSHI-External Time Interface1	Egress	Time	/	0

Figura 6-19 Configurazione delle latenze da interfaccia di gestione WebLCT

6.5.3.1 Physical layer

Il sistema OptiX RTN905 supporta differenti tipologie di sorgenti di riferimento fisiche al fine soddisfare i requisiti di sincronizzazione di frequenza per differenti tipologie di servizi di rete:

- BITS. All’apparato viene fornito un segnale a 2048 kbps o un segnale a 2048 kHz;
- RNC. La sorgente di sincronizzazione è un segnale SyncE.

La sincronizzazione di elementi di rete (NE, Figura 6-20) formati da soli apparati MW può avvenire attraverso:

- Radio Link clock;
- 2048 kbps o 2048 kHz, modalità preferenziale per sincronizzare apparati dislocati nello stesso sito, attraverso la porta E1;
- SyncE, modalità utilizzata in genere per NE dislocati nello stesso sito e connessi in configurazione “back-to-back”, porte FE (“Fiber Ethernet”) /GE (“Giga Ethernet”);
- TDM, utilizzando le relative porte di concatenazione.

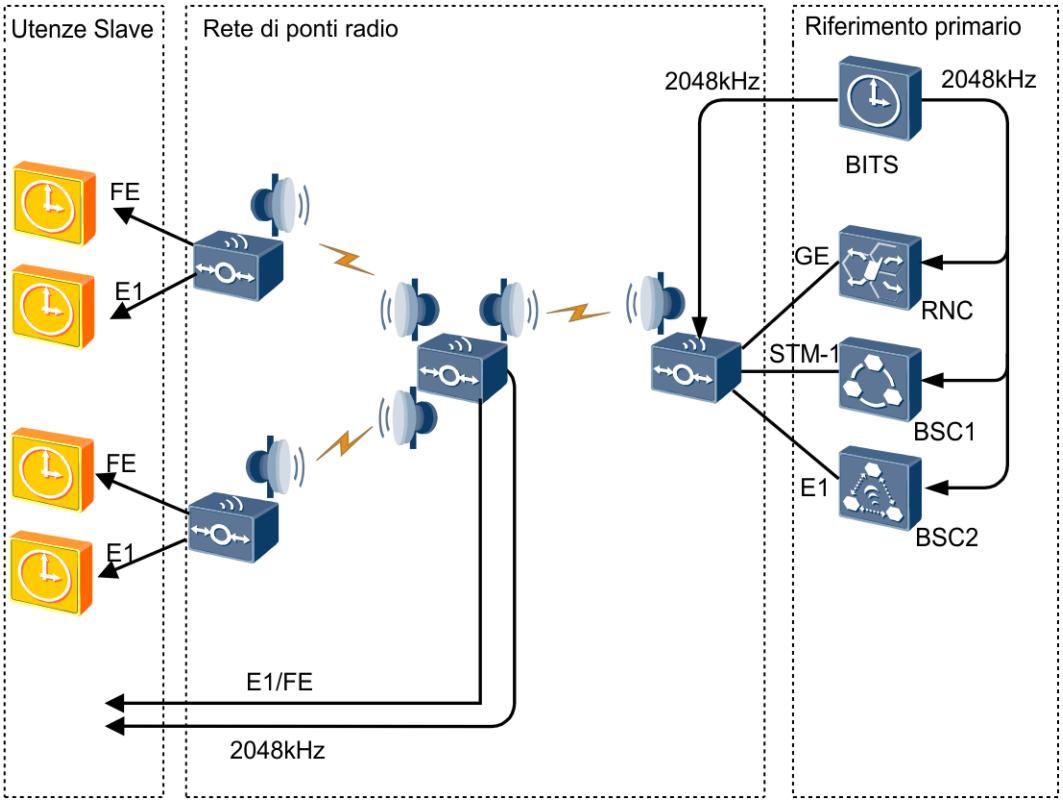


Figura 6-20 Trasporto sorgenti di riferimento fisiche su ponti-radio [85]

Seppure sia supportata la trasmissione trasparente solo per il servizio E1, l'apparato può sincronizzarsi con un'accuratezza di 50 ppb regolando il proprio oscillatore locale attraverso un PLL, sulla base delle informazioni di sincronizzazione ricevute.

La protezione per le sorgenti di clock è basata sulle priorità specificate nella tabella "source priority list": se un clock ad elevata priorità diviene inservibile, il sistema scala verso la sorgente di clock a livello di priorità immediatamente inferiore. I livello di protezione viene intensificato mediante l'impiego della messaggistica SSM (ITU-T G.781) che trasporta l'informazione di qualità della sorgente (QL, "Quality Level"):

Al fine dunque di preservare i livelli di sincronizzazione richiesti, indipendentemente dalla banda resa disponibile dallo AM, viene abilitata la modalità "Clock Protection" basata su liste di priorità e protezione della messaggistica SSM:

- sul collegamento radio i messaggi SSM sono trasmessi mediante specifici byte di *overhead*;

- sulle porte GE la messaggistica SSM è trasmessa su specifici pacchetti di controllo;
- sulle interfacce esterne, i messaggi SSM sono trasmessi nello slot temporale TS0.

Coerentemente con le liste di priorità, il NE sceglie la sorgente di clock con qualità più elevata ed inoltra l'informazione agli altri NE a valle. Sono supportati al massimo 20 "*hop*" nella catena di sincronizzazione (Figura 6-21), valore oltre il quale è necessario fornire un riferimento alternativo.

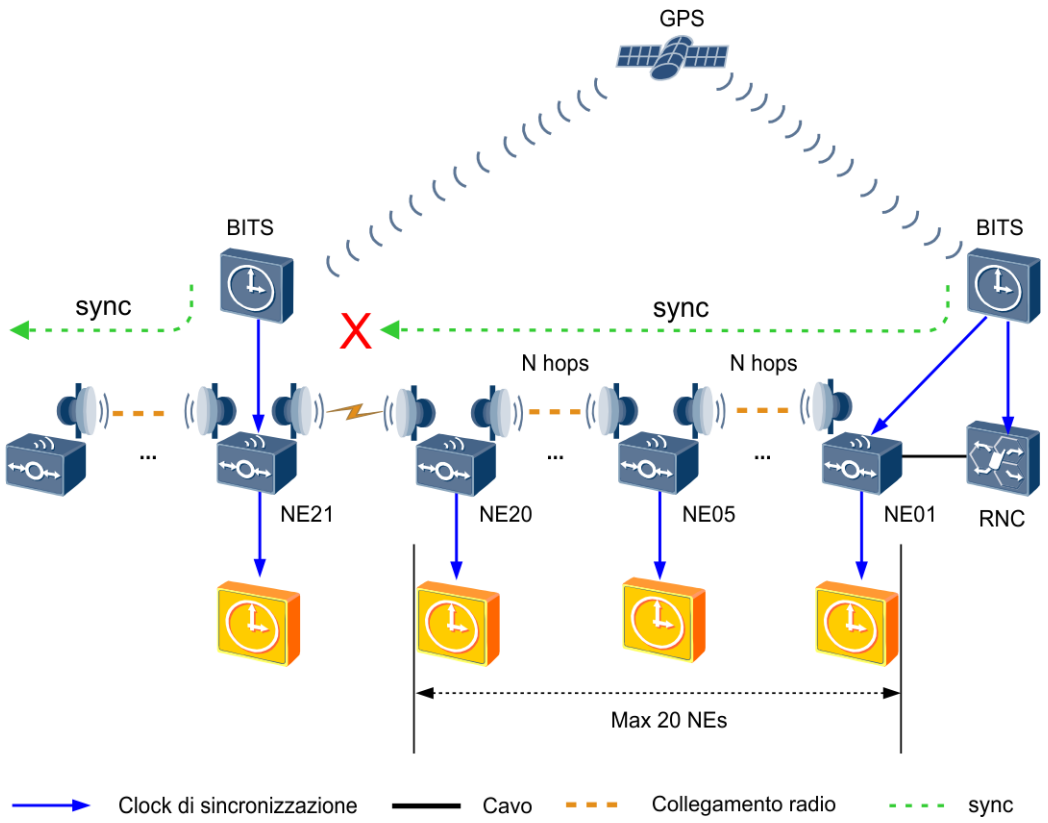


Figura 6-21 Hop nella catena di sincronizzazione Microwave [85]

6.5.3.2 Packet layer

Nelle applicazioni delle reti di trasmissione lo standard IEEE 1588v2 fornisce un approccio alla sincronizzazione di fase ad elevata precisione la cui accuratezza di sincronizzazione può essere migliore del microsecondo, che può essere impiegata come alternativa (o backup) al sistema GPS per la sincronizzazione delle stazioni radio base.

Lo OptiX RTN 905 supporta le seguenti modalità di clock:

- OC ("Ordinary Clock") su porte Ethernet ed IF;
- BC ("Boundary Clock") su porte Ethernet ed IF;
- TC ("Transparent Clock"), su porte Ethernet, supporta la ritrasmissione nodale dei pacchetti senza effettuare la sincronizzazione con altri apparati PTP;
- TC+BC, contemporaneamente su porte separate.

Le modalità di trasmissione della IEEE 1588v2 supportate sono:

- "Network-wide time synchronization", in cui il segnale temporale è recuperato ad ogni nodo prima di essere ritrasmesso;
- "Time transparent transmission", in cui i nodi TC marcano temporalmente i pacchetti con il tempo ti transito, ed è implementato quando più domini PTP condividono la stessa rete.

Il traffico di pacchetti può essere inoltre reso prioritario su ciascuna porta Ethernet con QoS ("Quality of Service") che supporta 8 tipi di livelli di servizio PHB ("Per Hop Behavior"), basati sulle metodologie di priorità C-VLAN ("Customer VLAN"), S-VLAN ("Service VLAN"), IP DSCP[76] e MPLS[77] EXP. Possono inoltre essere applicate politiche di *profilazione* del traffico ("Traffic Shaping", Figura 6-22) basato su porta, coda o servizio.

[76] Il "Differentiated Services Code Point" è un campo del pacchetto IP che permette a differenti livelli di servizio di essere assegnati al traffico di rete.

[77] Il "Multi Protocol Label Switching" è una tecnologia per reti IP che permette di instradare flussi di traffico multiprotocollo tra un nodo di origine ed un nodo di destinazione tramite l'utilizzo di identificativi ("label") tra coppie di router adiacenti.

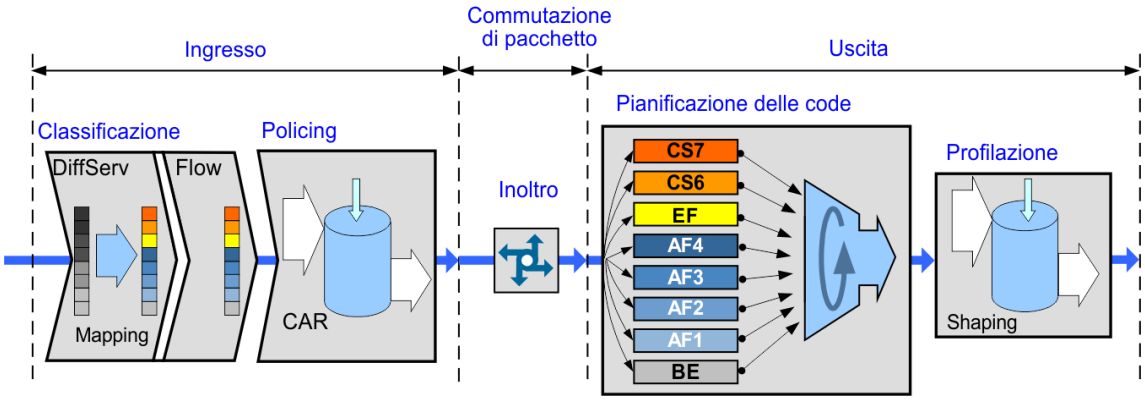


Figura 6-22 Classificazione e *profilazione* del traffico [86]

6.5.3.3 Incapsulamento PTP

Lo RTN905 permette l'incapsulamento dei pacchetti PTP sia all'interno del frame Ethernet che all'interno del pacchetto IP.

L'incapsulamento Ethernet (Figura 6-23) è possibile sia senza "VLAN tagging" secondo lo IEEE 802.3, sia con il suo impiego secondo lo IEEE 802.1q. Quando i messaggi implicati nella stima del ritardo del *path* che sfruttano il meccanismo "Pdelay" vengono incapsulati al livello 2 dello *stack* TCP/IP all'interno di frame Ethernet, questi utilizzano come indirizzo di destinazione il MAC address multicast "01-80-C2-00-00-0E", mentre tutti gli altri messaggi utilizzano l'indirizzo MAC multicast "01-1B-19-00-00-00"; il campo "Ethernet Type" del frame Ethernet che trasporta ed identifica i messaggi IEEE1588v2 viene popolato con il valore "0x88F7".

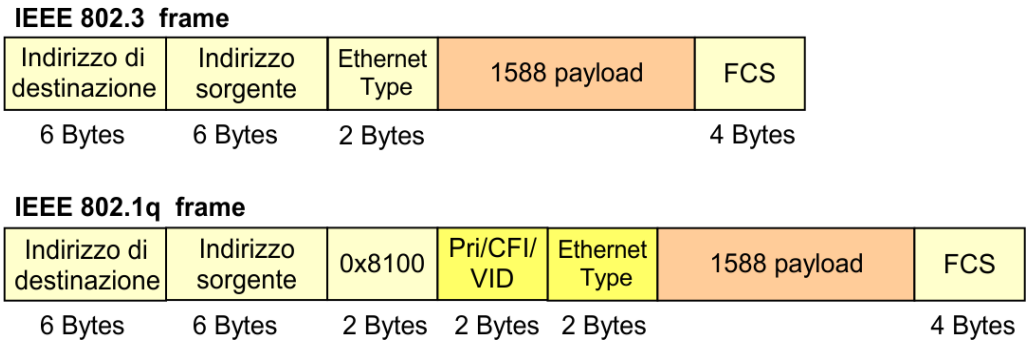


Figura 6-23 Incapsulamento PTP di livello 2 in frame IEEE 802.1q

Nel caso d'incapsulamento a livello IP, i pacchetti PTP sono incapsulati all'interno di un pacchetto UDP ("User Datagram Protocol", Figura 6-24) che può avere marchiatura VLAN. Allora i messaggi coinvolti nella stima del ritardo sul path con il metodo "Pdelay" puntano all'indirizzo IP di destinazione "224.0.0.107", mentre gli altri messaggi puntano all'indirizzo "224.0.1.129". Le porte impiegate sono la 319 per la segnalazione di eventi, e la 320 per la messaggistica di natura generale.

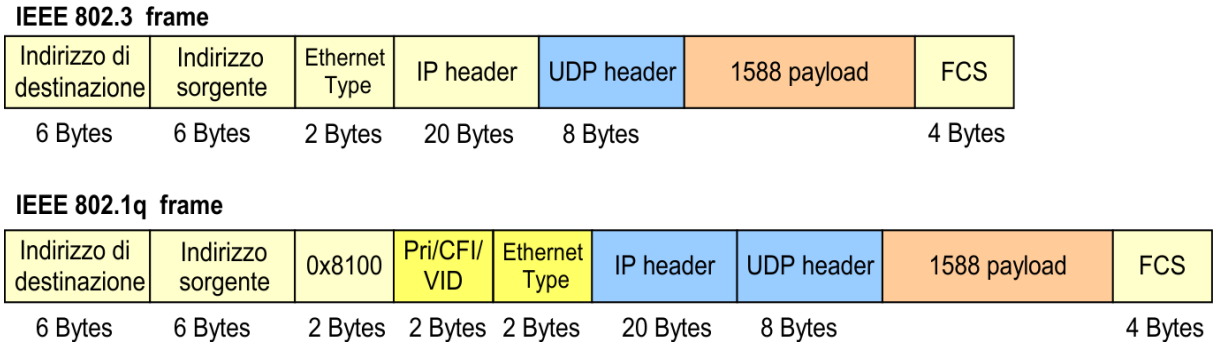


Figura 6-24 Incapsulamento PTP a livello IP in frame IEEE 802.1q

6.6 Priorizzazione dei flussi di dati

La gestione della qualità del servizio (QoS) ingloba tutti i requisiti e gli aspetti di un servizio, come la larghezza di banda, i ritardi, jitter e perdita di pacchetto ("Packet Loss"); opportunamente impiegata, permette di rispondere alla necessità del raggiungimento del livello di qualità atteso per una data applicazione: allocando e monitorando costantemente le risorse di rete, è possibile minimizzare le latenze ed il jitter anche in caso di congestione della rete.

Lo RTN905 supporta la classificazione e la "profilazione" del traffico ("Traffic Shaping") di flussi di complessi, in modo da limitare i *burst* di trasmissione ad un *data-rate* limitato; inoltre è possibile introdurre regole ("Access Control List", ACL) per permettere o impedire l'accesso di alcuni servizi alla rete di trasporto, mentre il blocco "Committed Access Rate" (CAR) impone restrizioni al volume di specifici flussi di servizio basandosi sulla classificazione del traffico. Merita inoltre particolare attenzione la topologia di rete reale suddivisa in differenti sotto-reti logiche (*subnet*), dette VLAN ("Virtual LAN"), dove i pacchetti di

"broadcast" possono essere trasmessi all'interno della sua sottorete, ovvero ad ogni VLAN corrisponde uno specifico dominio di *broadcast*. Pertanto di seguito saranno specificamente approfonditi tutti gli aspetti d'interesse della VLAN.

Nelle reti aziendali solitamente tutti gli apparati di rete afferiscono ad un'unica rete locale LAN, mentre i dispositivi Ethernet di differenti funzioni o dipartimenti appartengono alla loro rispettiva VLAN (Figura 6-25), cosicché a "costo-zero" viene aggirato il problema del "flooding broadcast" [97], dove ogni nodo ricevente il pacchetto di broadcast lo inoltra ai suoi vicini; nelle reti dense e complesse può comportare incrementi di latenza e sovraccarichi negli elementi di rete.

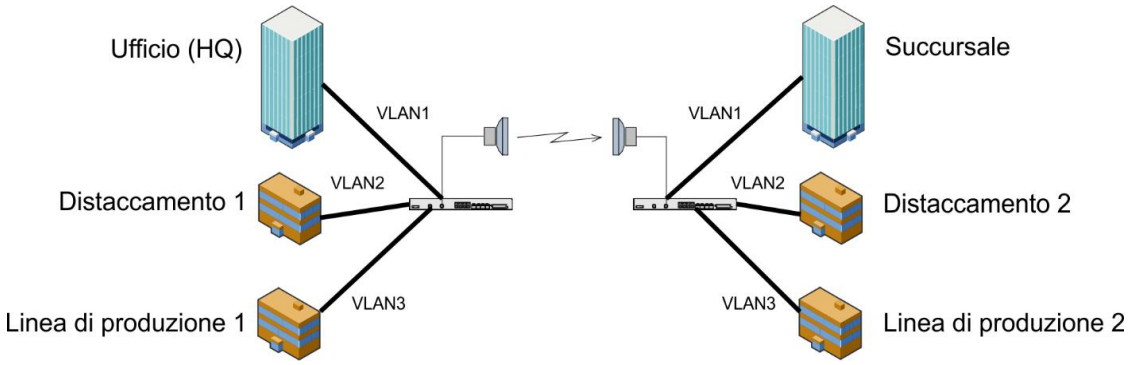


Figura 6-25 Esempio d'impiego reti VLAN

Gli altri benefici che comporta l'impiego delle VLAN sono:

- **Miglioramento nell'utilizzo della banda**. Non vengono generati elevati quantitativi di pacchetti di broadcast e se l'instradamento di un pacchetto non viene trovato, lo switch trasmette questo pacchetto solo alle altre porte afferenti alla specifica VLAN piuttosto che a tutte le porte dello switch.
- **Separazione tra utenti e rafforzamento della sicurezza**. I pacchetti delle VLAN sono inoltrati solo tra utenti della stessa sottorete.
- **Tendenza al "Virtual Workgroup"**. Lo scopo finale delle VLAN è quello del modello dei gruppi di lavoro virtuali, in cui un utente appartenente ad un'organizzazione (VLAN) che si sposta fisicamente in altra posizione della rete lungo la sua stessa VLAN, non necessita di riconfigurare le sue interfacce di rete.

L'implementazione della funzionalità VLAN è prevista dallo standard IEEE 802.1Q che definisce un particolare frame Ethernet contrassegnato ("tagged") in grado di trasportare le informazioni della VLAN, con un *header* di 4 Byte composto da:

- TPID ("Tag Protocol Identifier"), di 2 byte che indica se un frame Ethernet è stato "taggato". Quando un pacchetto con "tag" raggiunge una porzione di rete che non è in grado d'identificarlo, questo viene direttamente scartato ("dropped");
- PCP ("Priority Code Point"). Utilizza 3 bit per indicare la priorità ("user priority") del frame, da utilizzare nelle politiche di QoS;
- CFI ("Canonical Format Indicator"). Bit specifico per alcune reti ad anello;
- VID ("VLAN Identifier"). È un campo a 12 bit che identifica la VLAN con un valore nell'intervallo [0,4095].

Il PCP, lo CFO ed il VID costituiscono assieme il "Tag Control Information" (TCI, Figura 6-26).

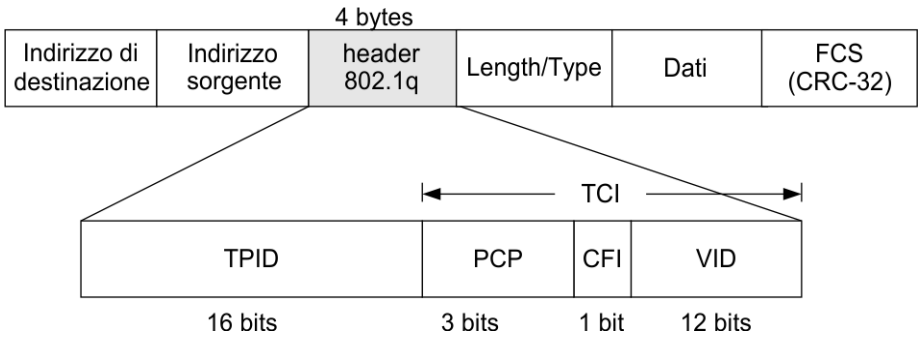


Figura 6-26 Frame Ethernet *taggato*

In generale, un frame non *taggato* in ingresso ad un dispositivo che effettua una marcatura ("tag") può essere scartato oppure contrassegnato con PVID ("Port VID") in uscita dal dispositivo. La conseguenza è che in uscita dal dispositivo possono aversi solo frame contrassegnati.

Gli RTN 905 supportano sia la modalità di trasmissione trasparente delle VLAN, dove il VLAN ID non viene modificato nel transito sul ponte radio, sia la modalità "swapping" in cui lo header viene modificato in base alle tabelle d'inoltro delle VLAN.

6.6.1.1 Tipologie di porte VLAN

Gli switch di rete abilitati alla gestione delle VLAN supportano due tipologie di porte: "Access" e "Trunk". Una porta "Access" è membro solamente di una singola VLAN e sono spesso utilizzate per connettervi i dispositivi "host" (come computer e stampanti) che diventano a loro volta inconsapevolmente membri della VLAN ("VLAN unaware") configurata su quella porta, in modo del tutto trasparente. Questo genere di approccio "port-based" per definire i gruppi di appartenenza ad una VLAN è molto diffuso per la sua semplicità di configurazione, ma la maggiore limitazione per il gestore della rete consiste nel dover riconfigurare le appartenenze alla VLAN ogni qualvolta un utenza si sposta da una porta ad un'altra nella rete.

È possibile impiegare una tecnica di assegnazione di appartenenza alla VLAN su base "MAC address", in quanto questa informazione di "livello 2"[78] è univoca e contenuta nei dispositivi di rete NIC ("Network Information Cards"), e presenta vantaggi di portabilità: quando uno switch, come ad esempio un "access point" Wi-Fi, riconosce il MAC come membro di un gruppo, gli assegna la sua VLAN; lo svantaggio in cui si può incorrere è quello di avere un elevato numero di VLAN sulla stessa porta che può causare un degrado delle prestazioni di rete: questo accade poiché coesistono diversi domini di broadcast sullo stesso canale di comunicazione condiviso. Un'ulteriore alternativa di raggruppamento è quella basata sul "livello 3", ovvero assegnando l'appartenenza alle VLAN a partire dagli indirizzamenti di rete IP ed i protocolli utilizzati; questa pratica permette d'implementare strategie di assegnazione delle VLAN su base applicativa e permette la *nomadicità*[79] delle utenze sulle porte della rete. Se da un lato questa tecnica riduce in quantitativo di traffico, dall'altro impatta sulle prestazioni degli apparati che

[78] Lo *stack* (pila) del protocollo TCP/IP è composto di quattro strati, detti "Layer".
[79] Un servizio si definisce nomadico quando pur se fornito su una rete fissa è possibile svincolarlo da una particolare locazione fisica.

necessitano di più tempo per ispezionare gli indirizzi IP di livello 3 piuttosto che riconoscere un indirizzo MAC di livello 2 in un frame.

Una VLAN può propagarsi attraverso più switch di rete secondo due metodologie (Figura 6-27):

- creando un collegamento fisico tra gli switch per ogni VLAN;
- Sfruttando più convenientemente connessioni di tipo “trunk” tra gli switch.

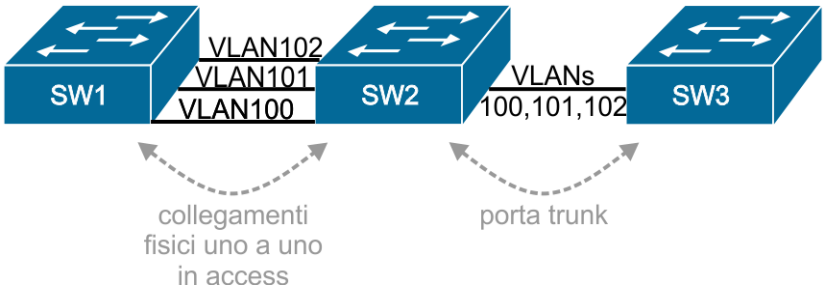


Figura 6-27 VLAN: collegamenti *access* e *trunk*

Nel primo caso sono necessari collegamenti fisici in numero pari alle VLAN da propagare mentre nel secondo caso s’impiega una porta “trunk” che, non essendo membro di una sola VLAN, si lascia attraversare da qualsiasi VLAN in transito tra gli switch.

Quando una VLAN si propaga da uno switch all’altro è necessario riconoscere a quale VLAN appartiene il frame; questo processo è asservito dal meccanismo di “frame tagging” che inserisce l’informazione VID (“VLAN ID”) in ciascun frame. Il meccanismo di marcatura (“tagging”) avviene solamente quando il frame è inviato in uscita da una porta “trunk”, ovvero quando ad esempio deve uscire da uno switch per entrare in un altro.

In generale, se una porta è in una singola VLAN può essere “untagged”; qualora è necessario sia membro di più VLAN, allora deve essere “tagged”.

Lo standard IEEE 802.1Q definisce come le VLAN operano in una rete a commutazione di pacchetto; i pacchetti conformi allo standard portano informazioni addizionali che permettono agli switch di rete di determinare a quale VLAN la porta afferisce.

Quando il frame trasporta le informazioni addizionali, allora si dice “taggato”. Per trasportare più VLAN lungo lo stesso collegamento fisico (backbone), ogni pacchetto deve essere distinto con il suo VID cosicché gli switch possano riconoscere a quale VLAN appartiene.

6.6.1.2 VLAN e QoS

La “Quality of Service” (QoS) deve essere messa in servizio al fine di ottenere una rete robusta sia per i servizi dati che multimediali, cosicché tutti i pacchetti di servizi sensibili al ritardo, come sincronizzazione e video, possano godere del minor ritardo possibile rispetto agli altri. Prima di poter trattare il traffico di rete in modo differenziato, è necessario inizialmente classificare il traffico e marcare i pacchetti, in modo che evidenzino la necessità di essere gestiti in modo differente dagli altri pacchetti: la priorizzazione dei pacchetti avviene mediante l’uso del campo “user priority” del *tag* VLAN, con cui gli operatori di rete possono definire fino ad 8 classi di servizio (Tabella 6-4), definite nello standard IEEE 802.1D-1998, che si occupa del comportamento e dei meccanismi dei “MAC Bridge” per mettere in comunicazione le stazioni terminali di due o più reti LAN/WAN.

Tabella 6-4 Classi di servizio per VLAN

User Priority	Acronimo	Tipologia di traffico
0 (default)	BE	Best Effort
1	BK	Background (traffico che non influenza altre priorità)
2	…	Non definito (lasciato libero dallo standard)
3	EE	Excellent Effort (Best Effort per utenti speciali)
4	CL	Controlled Load
5	VI	Video and Audio (latenza inferiore 100 ms)
6	VO	Voce (latenza inferiore 10 ms)
7	NC	Network Control (pacchetti che devono giungere a destinazione)

Successivamente è possibile utilizzare altri strumenti di QoS per assegnare delle strategie adeguate per la gestione del traffico di ogni classe, inclusi la gestione della congestione di rete, l'allocazione di banda e la definizione delle soglie di ritardo.

Al traffico in ingresso alla porta dello switch viene assegnata una delle code d'uscita, ovvero la classe di traffico con valore da 0 a 7: i pacchetti nella coda con priorità più elevata vengono trasmessi per primi; quando la coda si è svuotata, viene trasmesso il traffico in altra priorità della coda successiva, e così via. Lo switch deve possedere un numero di code di trasmissione ("queue", Q) che va da un minimo di 2 ad un massimo di 8; lo standard IEEE 802.1p raccomanda la seguente aggregazione ("mapping", Tabella 6-5) tra il tipo di traffico ed il numero di code disponibili sullo switch.

Tabella 6-5 Mapping tra code di trasmissione e tipologia di traffico (IEEE 802.1p)

<table>
<tr><th>Code</th><th colspan="8">Tipologia di traffico</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="8">BE</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="4">BE</td><td colspan="4">VO</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="4">BE</td><td colspan="2">CL</td><td colspan="2">VO</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">BK</td><td colspan="2">BE</td><td colspan="2">CL</td><td colspan="2">VO</td></tr>
<tr><td>5</td><td colspan="2">BK</td><td colspan="2">BE</td><td>CL</td><td>VI</td><td colspan="2">VO</td></tr>
<tr><td>6</td><td colspan="2">BK</td><td>BE</td><td>EE</td><td>CL</td><td>VI</td><td colspan="2">VO</td></tr>
<tr><td>7</td><td colspan="2">BK</td><td>BE</td><td>EE</td><td>CL</td><td>VI</td><td>VO</td><td>NC</td></tr>
<tr><td>8</td><td>BK</td><td>…</td><td>BE</td><td>EE</td><td>CL</td><td>VI</td><td>VO</td><td>NC</td></tr>
</table>

6.7 SyncSwitch

Il SyncSwitch di Digital Instruments srl (Figura 6-28) è uno switch in formato rack da diciannove pollici a dieci porte di classe "Gigabit", conforme allo standard IEEE1588-2008 ed al protocollo Synchronous Ethernet; implementa al suo interno la funzionalità di "Transparent Clock" (TC) correggendo i *timestamp* dei pacchetti in arrivo con il tempo di questi

speso nel transito attraverso il dispositivo, in modo da compensare la variabilità della consegna dei pacchetti sulla rete (PDV, “Packet Delay Variation”) con una precisione di 8 ns. Con le opportune licenze, l’apparato può fungere anche da orologio Master PTP e SyncE.

Figura 6-28 Digital Instruments SyncSwitch [98]

L’interfaccia di gestione è basata su “Web User Interface” (WebUI) ed gestibile via SNMP.

È dotato di un ricevitore GPS a 12 canali L1 con un tempo di acquisizione inferiore ai 4 minuti ed un’accuratezza sul PPS migliore di 50 ns.

Può generare le uscite su connettori BNC (“Bayonet Neill–Concelman”) per PPS e 10 MHz (sinusoidale), con una stabilità per quest’ultimo di 1E-12 parti dopo 24 ore di aggancio stabile alla rete GPS; infine dispone di 8 uscite Gigabit Ethernet e di due alloggiamenti per moduli SFP (“Small Form-factor Pluggable”) da 2.5 Gbps. In Figura 6-29 lo schema dei connettori posti sul pannello posteriore dell’apparato.

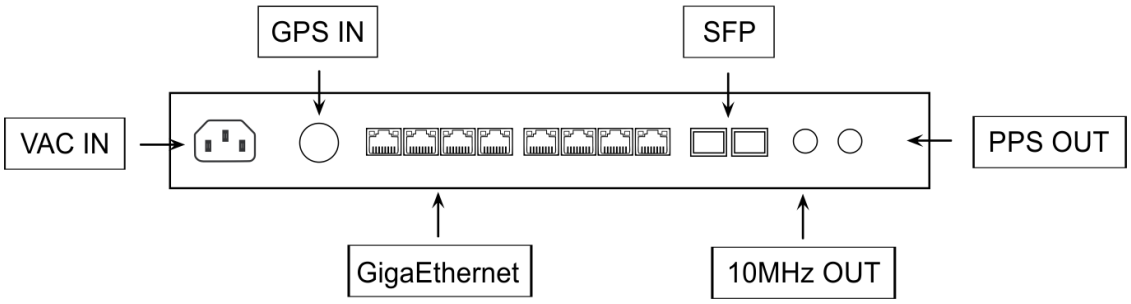


Figura 6-29 Schema pannello posteriore SyncSwitch [98]

A differenza dello SBV01-GPS, quest'apparato è specificamente destinato a reti di telecomunicazione e permette di osservare il traffico di rete (e di sincronizzazione) su una delle sue porte GE opportunamente configurata in "mirroring"[80].

7. Sincronizzazione su collegamento radio punto-punto

Sono riportate in questo capitolo le esperienze sperimentali effettuate con le apparecchiature a disposizione sul banco di prova descritto nel capitolo precedente. Lo scopo ultimo delle verifiche sperimentali è quello di stabilire le proprietà dei segnali PPS e clock a 10 MHz ricostruiti a valle del collegamento, al fine di poterne valutare l'adeguatezza per le esigenze del monitoraggio distribuito della Power Quality espresse negli obiettivi dell'introduzione.

Inizialmente si è valutato lo stato dell'arte circa il livello di sincronizzazione raggiungibile mediante i due ricevitori GPS a disposizione, onde utilizzare poi tali informazioni come riferimento nelle conclusioni. Nelle medesime condizioni di contorno, in stato di GPS "lock", è stata dunque valutata la distanza tra i segnali PPS di ciascun ricevitore e sono state statisticamente caratterizzate le singole uscite a 10 MHz.

Successivamente è stata caratterizzata una catena di sincronizzazione master-slave basata su apparati SB-V01, tra loro idealmente interconnessi via cavo con un collegamento diretto, al fine di valutarne le prestazioni in termini di distanza tra PPS Lo scenario è stato poi replicato inserendo il ponte radio in luogo del cavo di collegamento, verificandone l'incidenza sulle prestazioni di sincronizzazione.

Infine, partendo dalla configurazione precedente, contestualmente al processo di sincronizzazione è stato iniettato del traffico dati nel ponte radio, configurato per operare in regime di capacità di banda minima. Questa verifica è volta a valutare la reale capacità del ponte radio di dare precedenza al processo di sincronizzazione rispetto ad un traffico dati in situazioni ambientali radio sfavorevoli, valutandone l'influenza sui segnali di sincronizzazione ricostruiti a valle del collegamento.

[80] Abilità di una porta di rete di copiare il traffico di una porta di rete su un'altra (di mirroring) su cui non è permesso il traffico bidirezionale; qualora la replica del traffico sorgente è per più porte sorgenti si parla di "spanning".

7.1 Performance di fase tra ricevitori GPS

Prima d'investigare circa il livello di accuratezza di sincronizzazione raggiungibile mediante l'impiego delle tecnologie PTP e SyncE su ponte radio, è necessario caratterizzare il termine di paragone, rappresentato in questo contesto da due orologi dotati di ricevitore satellitare e correttamente agganciati al servizio satellitare GPS con continuità da più di 48h, tempo di riferimento scelto tale da poter considerare stabile il processo di sincronizzazione interno al ricevitore.

Lo scenario applicativo che s'intende riprodurre è quello di due stazioni di monitoraggio della Power Quality tra loro non interconnesse, la cui sincronizzazione di fase e frequenza di ciascuna è affidata ad un orologio dotato di ricevitore GPS; il ricevitore, agganciato e sincronizzato con la rete di satelliti GPS, fornisce localmente al DAS:

- la sincronizzazione di fase mediante il segnale analogico PPS;
- la sincronizzazione di frequenza mediante un segnale periodico a 10 MHz;
- il "Time-of-Day" attraverso una connessione dati seriale, contenuto ad esempio in messaggi di formato dati NMEA ("National Marine Electronics Association").

In linea del tutto generale, due stazioni di monitoraggio possono essere tra loro dislocate in posizioni geografiche tra loro sufficientemente distanti e tali che le corrispettive antenne GPS sottendano a viste del cielo diverse; di conseguenza possono essere soggette a condizioni metereologiche ed ambientali più o meno vantaggiose al raggiungimento di un livello accurato di sincronizzazione del segnale PPS, considerato rispetto al riferimento dato dalla costellazione di satelliti GPS.

A questo si aggiunge, per ragioni d'infrastruttura, che non necessariamente ogni sito di monitoraggio sia costituito dalla stessa tipologia di ricevitore GPS ed antenna; inoltre, per ogni installazione, è difficile in genere mantenere le stesse caratteristiche d'impianto: la lunghezza variabile della calata di cavo d'antenna e la qualità costruttiva dello stesso contribuisce ad introdurre ritardi di propagazione ed attenuazioni del segnale GPS, che influenzano il ricevitore nella fase di sincronizzazione. I *datasheet* dei cavi per radiofrequenza riportano

solitamente i parametri "Velocity Propagation" (Vp) o "Velocity Factor" (VF) che caratterizzano la velocità di transito del segnale nel mezzo, e sono espressi da un valore numerico compreso tra 0 ed 1, o da un valore percentuale dove il massimo corrisponde alla velocità di propagazione nel vuoto.

Il "Velocity Factor" è esprimibile come:

$$VF = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$$

Dove:

- ε_0 è la costante dielettrica nel vuoto,
- ε_r è la costante dielettrica relativa del mezzo.

Il ritardo per unità di lunghezza che subisce il segnale in transito nel cavo è stimabile mediante:

$$TD = \frac{1}{c \cdot VF} \cong 3.3 \cdot \sqrt{\varepsilon} \quad [ns/m]$$

Con "c" costante velocità della luce nel vuoto, pari a

$$c = 2.99792458 \cdot 10^8 \ [m/s]$$

Nella Tabella 7-1 [99] sotto sono riportati dei valori del tempo di ritardo ("Time Delay", TD) per alcune tipologie di materiale costituente i più comuni cavi coassiali.

Tabella 7-1 Tempi di ritardo per tipologia di dielettrico impiegato

Mater.	**ε**	**Imp. (Ω)**	**Cap. (pF/m)**	**Vp(%)**	**TD (ns/m)**
Solid Polyethylene	2,30	50	101,05	65,9	5,06
Foam PE[81]	1,45	50	80,38	83	4,02
Foam PE	1,42	50	79,40	84	3,97
Foam PE	1,38	50	78,41	85	3,92
Foam PE	1,35	50	77,43	86	3,88

[81] Polietilene.

Foam PE	1,32	50	76,44	87	3,83
Foam PE	1,29	50	75,79	88	3,79
Solid PTFE[82]	2,07	50	95,80	69,5	4,80
Tape PTFE	1,98	50	93,83	71	4,70
Low Density PTFE	1,73	50	87,60	76	4,39
Low Density PTFE	1,56	50	83,33	80	4,17
Solid Polyethylene	2,30	50	67,59	65,9	5,06
Foam PE	1,45	75	53,48	83	4,02
Foam PE	1,42	75	52,82	84	3,97
Foam PE	1,38	75	52,17	85	3,92
Foam PE	1,35	75	51,84	86	3,88
Foam PE	1,32	75	51,18	87	3,83
Foam PE	1,29	75	50,52	88	3,79
Solid PTFE	2,07	75	63,98	69,5	4,80
Low Density PTFE	1,73	75	58,40	76	4,39
Low Density PTFE	1,56	75	55,45	80	4,17

I ricevitori GPS consentono in genere di aggirare quest'ultimo ostacolo permettendo l'inserimento manuale di un fattore di correzione del ritardo (Figura 7-1) dovuto alla lunghezza del cavo d'antenna.

[82] Politetrafluoroetilene.

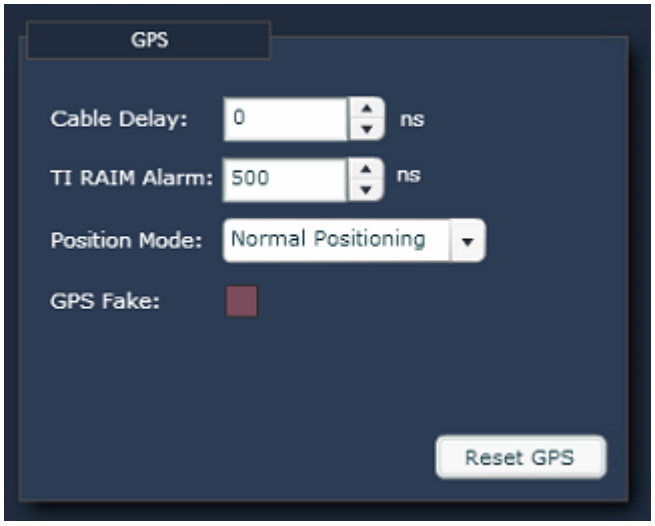


Figura 7-1 Compensazione del ritardo dovuto al cavo GPS, nei sistemi SB-V01

Tuttavia, non è sempre possibile conoscere con esattezza la lunghezza del cavo installato e le sue caratteristiche intrinseche; d'altra parte, una stima accurata del ritardo di propagazione sul cavo d'antenna richiederebbe l'impiego sul campo di strumenti "Time-Domain Reflectometry" (TDR), che aumenterebbe i costi e la complessità delle installazioni.

Questa combinazione variabile di fattori contribuisce certamente all'introduzione di errori di sincronizzazione che, sommate all'incertezza intrinseca del ricevitore (dichiarata solitamente nei datasheet del prodotto), comportano una differenza di fase complessiva tra i PPS delle stazioni di monitoraggio che può essere di molto superiore all'accuratezza dichiarata nei dati di targa dei prodotti.

Per questo motivo si è proceduto a caratterizzare il comportamento in fase dei due soli orologi a disposizione dotati di ricevitore GPS: il SB-V01GPS[83] ed il SyncSwitch.

Non avendo a disposizione un riferimento temporale metrologicamente riferibile, si è deciso procedere caratterizzando il jitter del PPS di uno dei due apparati rispetto all'altro, in termini di "Time Interval Error" (TIE), secondo lo schema di Figura 7-2.

[83] Il terzo orologio SBV01 non dispone di ricevitore GPS.

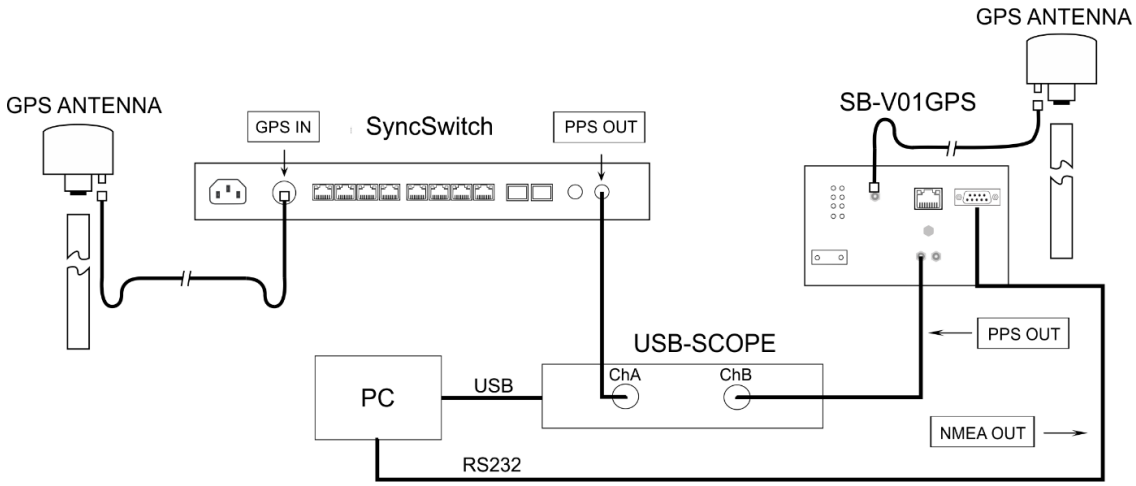


Figura 7-2 Setup caratterizzazione apparati GPS

Inizialmente è stata utilizzata una sola antenna con calata da 30 m (cavo coassiale marca BELDEN modello PRG7 CU PE) per entrambi i ricevitori, sfruttando un ripartitore di segnale d'antenna ("splitter") con banda passante da 5 GHz; sebbene quest'architettura utilizzando la stessa antenna e cavo riduca l'incertezza in termini di ritardo di propagazione del segnale, l'attenuazione ai ricevitori si è dimostrata tale da peggiorare il TIE rispetto alla soluzione basata sull'impiego di antenne diverse, ciascuna con una propria calata di 30 m verso il ricevitore.

In entrambi i casi, le antenne sono state disposte sullo stesso tetto ad un'altezza di 2 m dalla pavimentazione, su di un edificio di 9 piani in piena visibilità del cielo a 360°, tali da limitare gli effetti interferenziali di riflessione multipla (*multipath fading*) di edifici vicini e poter avere gli stessi satelliti in vista, nonché le stesse condizioni ambientali al contorno. Gli orologi con ricevitore GPS sono stati inoltre alloggiati all'interno dello stesso *rack*[84], in ambiente a temperatura controllata messo a disposizione da Linkem SpA.

Le misurazioni hanno avuto una durata di 12h, dopo aver atteso 48h dall'istante in cui l'ultimo ricevitore si è correttamente agganciato alla rete satellitare.

L'acquisizione dei segnali PPS di ciascun ricevitore (Figura 7-3) è stata operata tramite un dispositivo PicoScope USB connesso ad un PC ed il software PicoSocpe 6.1. Utilizzando

[84] Armadio contenitore per apparati.

il segnale PPS fornito in uscita dal SyncSwitch come trigger, si è acquisito il segnale PPS dello SB-V01GPS.

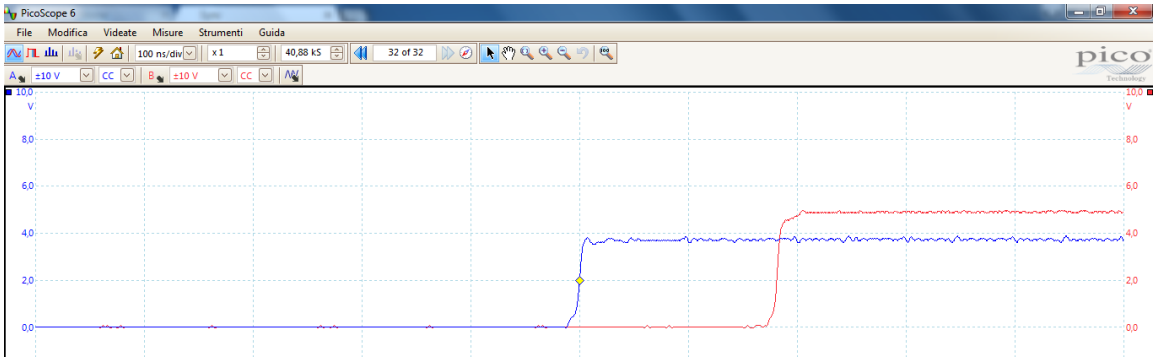


Figura 7-3 PicoScope: distanza segnale PPS tra apparati GPS

I cavi utilizzati per raccogliere i segnali PPS in uscita degli apparati sono "Coleman Cable 988591 M17/28-RG058 MIL-DTL-17" di uguale lunghezza; l'impiego di cavi di uguali caratteristiche fisiche, soprattutto realizzati dallo stesso produttore con elevati standard di qualità per il "settore difesa", si ritiene possa ovviare alla necessità di dover disporre di uno strumento di misura TDR per la caratterizzazione dei fenomeni di propagazione del segnale (ritardo ed attenuazione) tipici dal cavo stesso.

Ogni impulso di trigger ottenuto dal segnale "PPS" di riferimento, ha prodotto un file di testo in formato CSV ("Comma Separated Values") contenente i campioni di tensione relativi ai due segnali PPS ed un vettore dei tempi comune ad entrambe i canali acquisiti. Questi file sono stati poi elaborati a posteriori (*post-processing*) utilizzando uno script in linguaggio Python [100] (versione 2.7) appositamente scritto per valutare la differenza temporale in nanosecondi tra i due segnali PPS, con segno positivo se il segnale in esame è in ritardo rispetto al rifermento, negativo se invece è in anticipo. In output lo script genera a sua volta un file CSV contenente il valore individuato della distanza tra i due PPS; successivamente lo stesso script, appoggiandosi alla libreria "mathplotlib", realizza i grafici del TIE.

L'algoritmo impiegato dallo script per calcolare la distanza fra i PPS, sfrutta la ricerca di una soglia preimpostata a 2 V tra i due vettori di tensione; la ricerca utilizza una tecnica basata sul principio dello "*zero-crossing*" e sfrutta l'interpolazione lineare tra campioni a cavallo della soglia per la stima dell'istante di transizione. La differenza tra gli istanti di

transizione dei due PPS rappresenta la loro distanza reciproca, e quindi l'errore in fase di uno rispetto all'altro preso come riferimento temporale.

Contemporaneamente alle acquisizioni dati relative ai segnali PPS sono stati raccolti attraverso l'interfaccia seriale RS-232 dell'orologio SB-V01GPS i messaggi NMEA[85] ("National Marine Electronics Association") provenienti del ricevitore GPS interno, contenenti il ToD ("Time of Day"), il numero dei satelliti in vista e lo stato di "fix" del ricevitore, con lo scopo di verificare eventuali problematiche di tracciamento (*tracking*) dei satelliti durante l'acquisizione dati.

Per la memorizzazione di messaggi NMEA in un file di testo è stato impiegato il software "RS232 Data Logger" di Eltima Software [101], mentre l'elaborazione del dato a posteriori è stata affidata ad uno script Python appositamente realizzato.

Le sentenze[86] NMEA inviate dall'apparato SB-V01GPS sono:

- "Date & Time";
- "Global Positioning System Fix Data".

Quest'ultima di particolare interesse, in quanto ingloba l'informazione di marcatura temporale rispetto al riferimento UTC ed al contempo fornisce lo stato attuale del "fix" dei satelliti ed il numero di satelliti in vista. Tale informazione è strutturata nella sentenza identificata dal comando NMEA "$GPGGA", formattata secondo la Tabella 7-2.

[85] http://www.nmea.org/
[86] Tracciati standard di dati per l'interscambio di informazioni tra dispositivi elettrionici e software aderenti.

Tabella 7-2 Formato campi del messaggio NMEA “$GPGGA”

Nome	**Esempio**	**Descrizione**
Sentence Identifier	$GPGGA	Global Positioning System Fix Data
Time	170834	17:08:34 Z
Latitude	4124.8963, N	41d 24.8963' N o 41d 24' 54" N
Longitude	08151.6838, W	81d 51.6838' W o 81d 51' 41" W
Fix Quality: -0 = Invalid -1 = GPS fix -2 = DGPS fix	1	Stato GPS fix
Number of Satellites	5	Numero satelliti in vista
Horizontal Dilution of Precision (HDOP)	1.5	Accuratezza relativa per il posizionmento orizzontale
Altitude	280.2, M	Altitudine sul livello del mare
Height of geoid above WGS84 ellipsoid	-34.0, M	Altezza del geoide
Time since last DGPS update	blank	Ultimo aggiornamento DGPS
DGPS reference station id	blank	ID della stazione DGPS
Checksum	*75	Checksum di validazione del messaggio

La sentenza “$GPGGA” (Figura 7-4) viene emessa dal ricevitore GPS con una frequenza di un messaggio al secondo; tenendo traccia dei campi “Fix Quality” e “Numbers of Satellites” durante l’acquisizione dei segnali PPS, è possibile monitorare il verificarsi di quelle situazioni per le quali il ricevitore può perdere il “fix” ed essere costretto a far lavorare il proprio oscillatore locale in modalità “free-run”: in questa situazione l’accuratezza temporale del segnale PPS è soggetta alla stabilità e alla qualità dell’oscillatore locale impiegato.

```
$GPZDA,171842.00,22,01,2016,00,00*6B↓
$GPGGA,171842,4149.271,N,01227.156,E,1,09,0.0,110.5,M,0.0,M,,*7F↓
```

Figura 7-4 Sentenze NMEA

Nella grafico di Figura 7-5 è riportato in blu il numero di satelliti in vista dal SB-V01GPS nella finestra di osservazione, mentre in rosso lo stato del ricevitore secondo quanto riportato nel campo “Fix Quality” della sentenza NMEA “$GPGGA”.

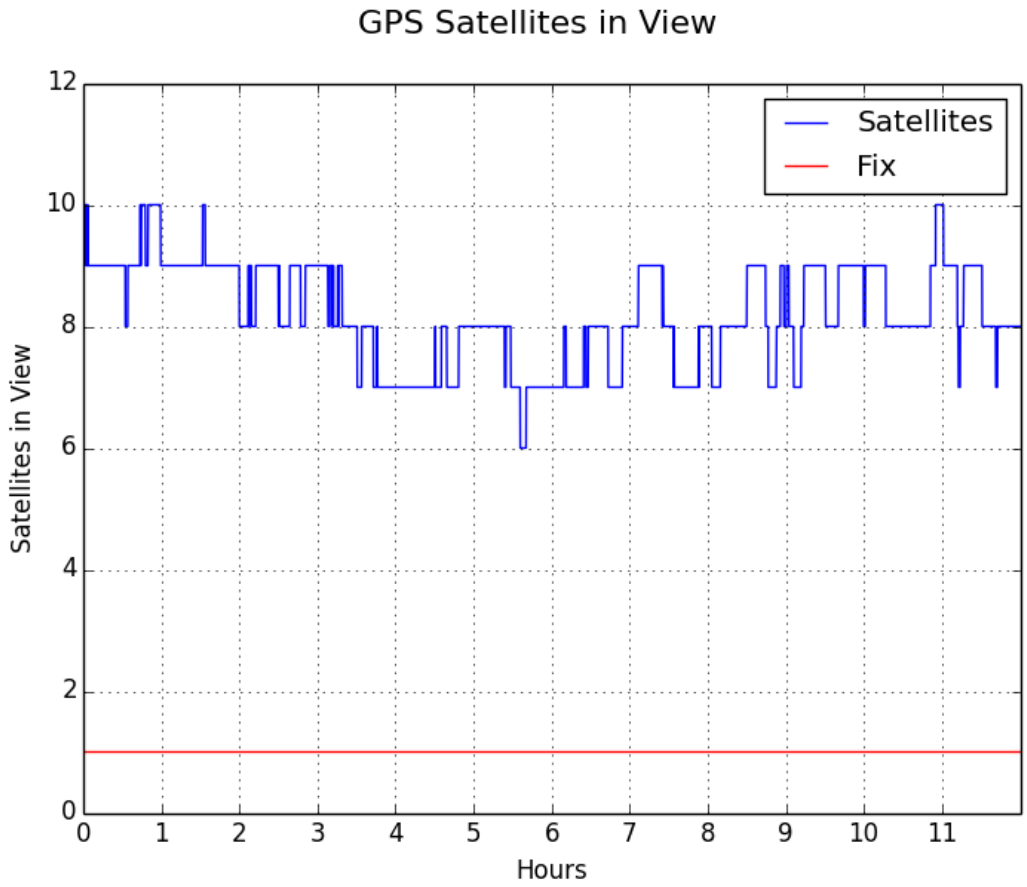


Figura 7-5 Grafico dei satelliti in vista e stato del “fix”

Come sarà chiaro più avanti, le situazioni di perdita del riferimento dei satelliti GPS possono essere compensate impiegando le tecniche di sincronizzazione IEEE1588 e SyncE atte a disciplinare temporaneamente l’oscillatore locale dell’orologio, piuttosto che lasciarlo correre in deriva nella modalità “free-run”. Opportunamente configurati, gli apparati SB-V01

sono in grado di scegliere il riferimento temporale più stabile tra GPS, meccanismo PTP/SyncE ed IRIG-B per disciplinare l'oscillatore locale (Figura 7-6).

Figura 7-6 Sorgenti di riferimento multiple per SB-V01

Su una finestra d'osservazione di 12h, successiva a 48h di continua stabilità dei ricevitori GPS, ciascuno in "fix" con la propria antenna, si osserva l'andamento dell'errore tra i due segnali PPS in Figura 7-7.

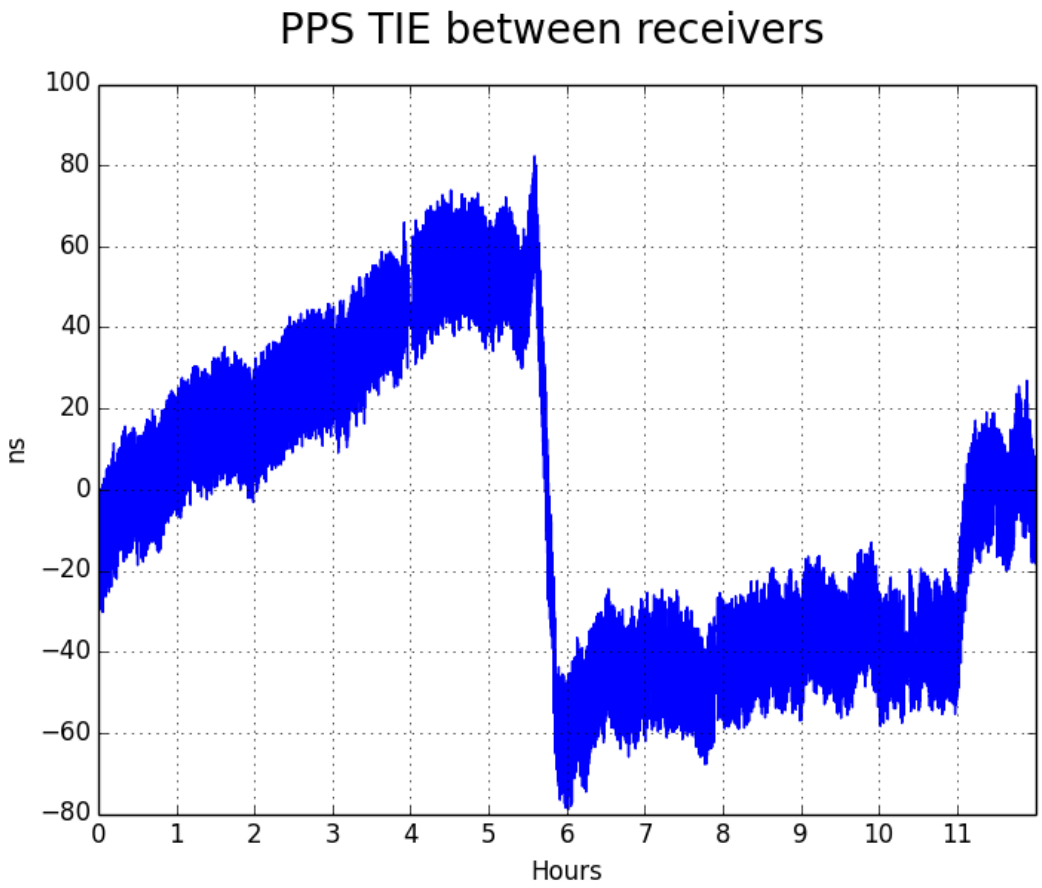


Figura 7-7 Andamento temporale della differenza tra PPS dei ricevitori

L'errore di fase tra i PPS è compreso nell'intervallo:

- [-20,20] nanosecondi per il 25,5% del tempo di osservazione;
- [-50,50] nanosecondi per il 79,1% del tempo di osservazione.

L'istogramma delle misurazioni di distanza tra i due PPS è la distribuzione delle misure; se anziché riportare il numero di eventi per classe (intervallo detto "bin") viene riportato il numero di eventi nella classe diviso il numero totale degli eventi considerati, si ottiene una distribuzione di classi di frequenza. Viene dunque naturale pensare che questa distribuzione così costruita approssimi bene una funzione densità di probabilità (PDF, "Probability Density Function"), dove il risultato della misura è visto come l'evento di una variabile casuale. Il numero dei "bin" può tuttavia influenzare in modo rilevante l'aspetto dell'istogramma, pertanto va scelto caso per caso. Nel caso di Figura 7-8 è stato scelto un bin pari ad 80.

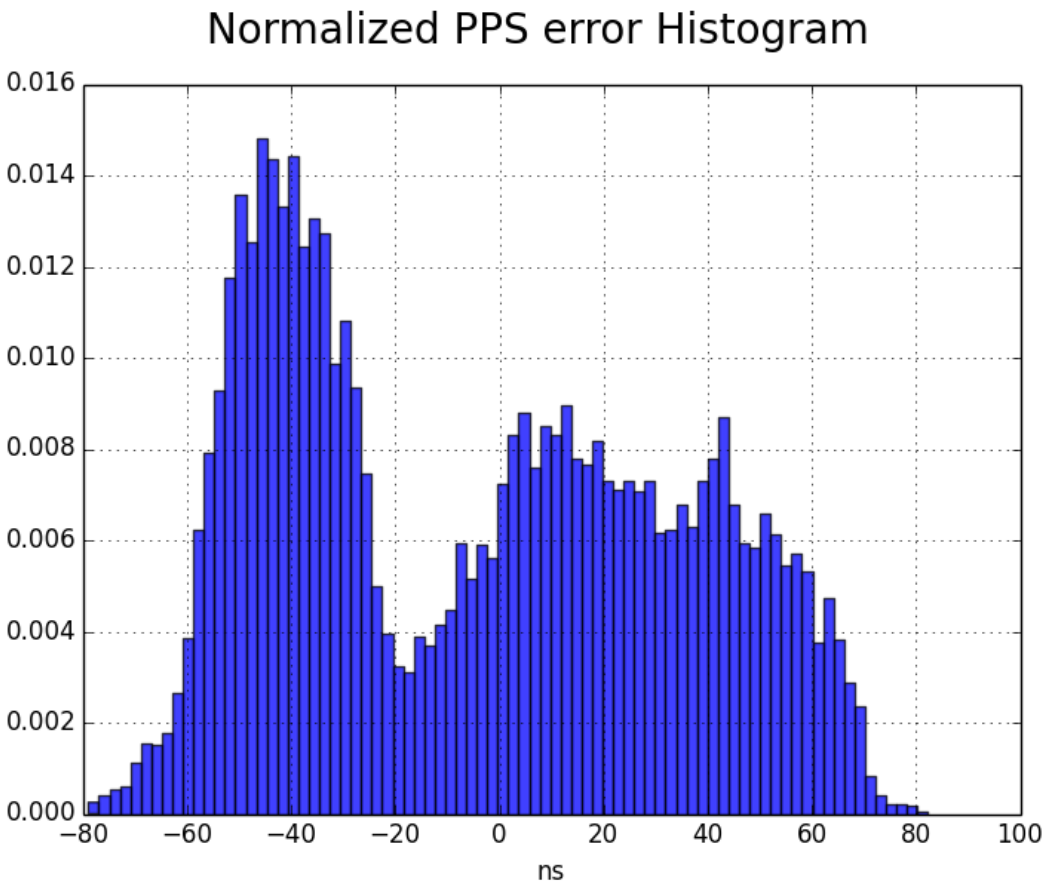


Figura 7-8 Istogramma normalizzato dell'errore sul PPS

L'area di ogni settore rappresenta la frequenza relativa (probabilità) dell'intervallo in ascisse (classe o "bin") corrispondente. Il vettore"D"delle misure di errore di fase è caratterizzato da:

- Valore atteso $E\{D\} = -4.704\ ns$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 38.218\ ns$;
- Valore minimo $D_{min} = -78.99\ ns$;
- Valore massimo $D_{MAX} = 82.28\ ns$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 161.27\ ns$.

Dalle osservazioni sopra, è possibile in generale affermare nel caso in oggetto che l'errore di fase tra i PPS dei due apparati è confinato all'interno degli 80 ns.

$$PPS_{Err} \leq |80|\ ns$$

Tale valore verrà utilizzato più avanti come indice di riferimento nelle soluzioni di sincronizzazione basate su reti a pacchetto.

7.2 Performance di frequenza tra ricevitori GPS

Per poter valutare gli effetti apportati dai ponti radio (e più in generale dalle reti a pacchetto) sulla distribuzione della frequenza mediante il paradigma ibrido "IEEE1588v2 & SyncE", è necessario comprendere la qualità del riferimento di frequenza messo a disposizione dalle apparecchiature "master clock", una volta agganciate stabilmente per almeno 48h alla rete GPS.

Le apparecchiature SyncSwitch e SB-V01GPS a disposizione possono entrambe fungere da "Primary Reference Clock" quando sincronizzate alla rete di satelliti GPS mediante il ricevitore installato a bordo; entrambi gli orologi dispongono inoltre di un'uscita analogica (sinusoidale o ad onda quadra) a 10 MHz utile per poter essere raffrontata con la stessa tipologia d'uscita presente a valle della catena di sincronizzazione, sullo "slave clock". In generale, gli orologi con oscillatori interni nella modalità "free-run" non disciplinata, tendono a discostarsi dalle caratteristiche ideali di riferimento a 10 MHz seguendo invece le caratteristiche e la deriva in frequenza dell'oscillatore locale; questo fenomeno ci si aspetta sia tanto più evidente quanto è più economico l'oscillatore.

Il comportamento atteso per uno "slave clock" che dalla modalità di oscillazione free-run passa ad una modalità agganciata ad un riferimento esterno, è quello di un miglioramento della stabilità dell'output a 10 MHz rispetto a quanto invece misurato in free-run.

Pertanto, più avanti, le performance di sincronizzazione saranno valutate comparando le caratterizzazioni statistiche dei segnali a 10 MHz tra:

- "master clock" agganciato alla rete GPS;
- "slave clock" in free-run;

- “slave clock” sincronizzato con il “master clock”.

I segnali a 10 MHz dei due “master clock” sono stati acquisiti più convenientemente in modo contemporaneo mediante i due canali “A” e “B” del dispositivo di acquisizione dati USB.

Entrambe le apparecchiature “master” sono state connesse alla corrispettiva antenna GPS con ricevitore in stato di “fix” continuativo e stabile da 48h.

Il SyncSwitch offre un’uscita sinusoidale al 10 MHz di 3.6 Vpp, mentre l’uscita del SB-V01GPS è un’uscita a 10 MHz tendenzialmente quadra, da 2.3 Vpp (Figura 7-9).

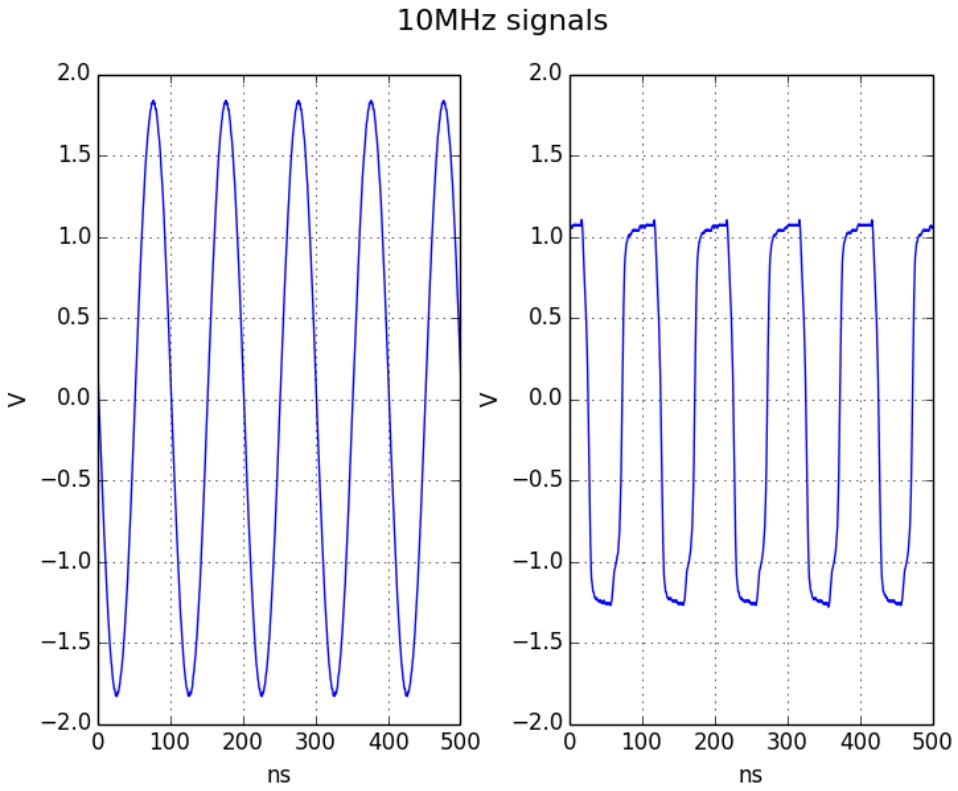


Figura 7-9 GPS: Uscite riferimenti di frequenza a 10 MHz

I due segnali acquisiti in formato digitale sono stati confrontati ciascuno con un segnale numerico ideale a 10 MHz, mediante uno script Python; ogni periodo di ciascun segnale in

esame è stato valutato mediante un algoritmo d'individuazione dello "*zero-crossing*" (Figura 7-10) agente sui fronti di salita e che sfrutta l'interpolazione lineare per la stima dell'attraversamento dello zero mediante i due dati di segno opposto più vicini ed a cavallo dello zero.

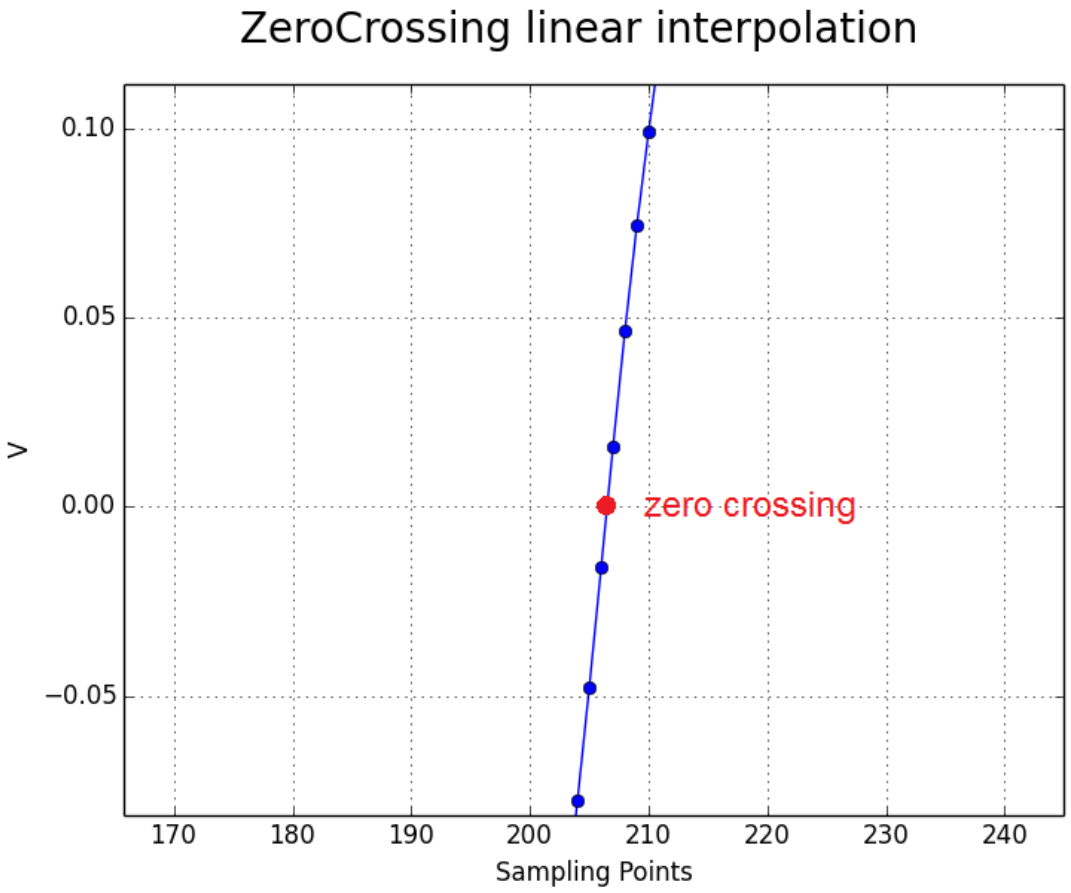


Figura 7-10 Interpolazione tra campioni per la stima dello "zero-crossing"

I due segnali sono stati acquisiti con accoppiamento in AC per sfruttare il passaggio per lo zero.

7.2.1 Caratterizzazione uscita 10 MHz SyncSwtich

La figura sotto riporta il TIE stimato per l'uscita analogica a 10 MHz dell'apparato SyncSwitch, quando questo è agganciato stabilmente alla rete di satelliti GPS da 48h (Figura 7-11).

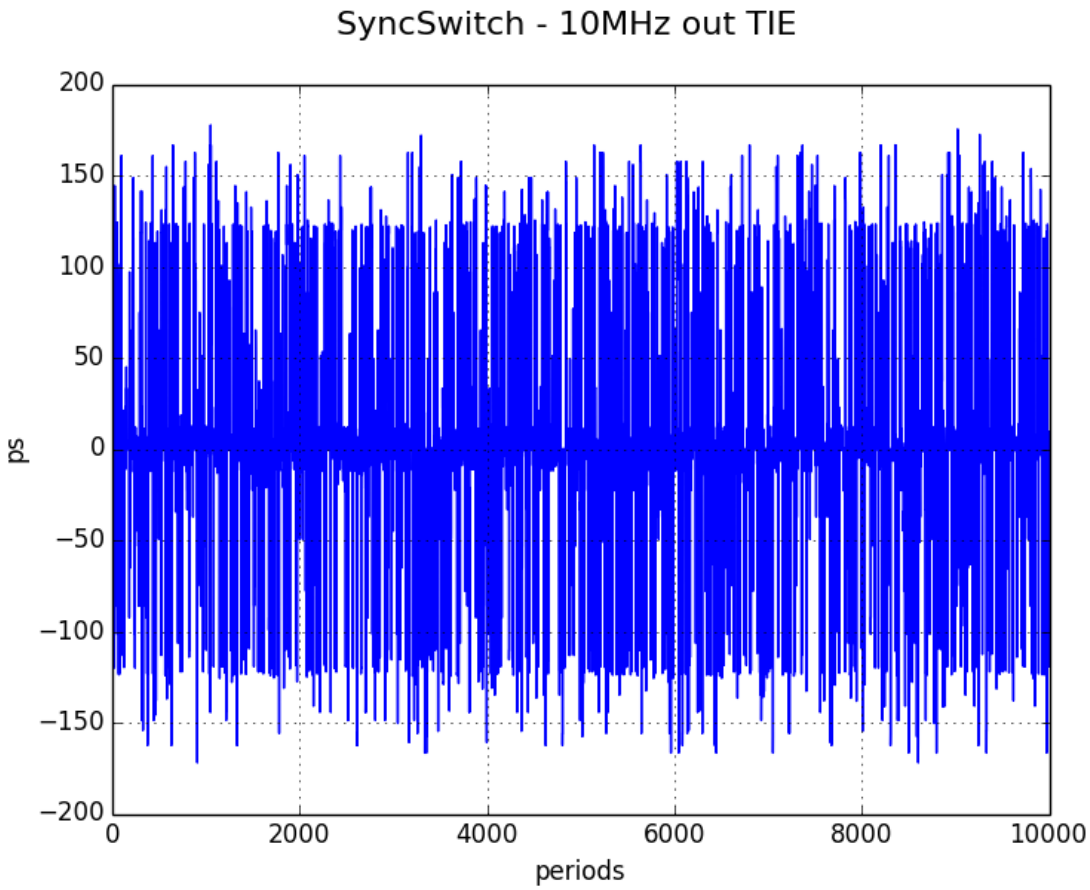


Figura 7-11 TIE dell'uscita a 10 MHz SyncSwitch quando agganciato alla rete GPS

La caratterizzazione statistica del set di dati di figura sopra è la seguente:

- Valore atteso $E\{D\} = -1.402\ ps$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 56.44\ ps$;
- Valore minimo $D_{min} = -171.99\ ps$;
- Valore massimo $D_{MAX} = 177.63\ ps$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 349.62\ ps$.

Andando a riportare i dati su di un istogramma normalizzato ad "1" con "bin = 70", si tenta di approssimare la PDF dell'errore di fase espresso in nanosecondi (Figura 7-12).

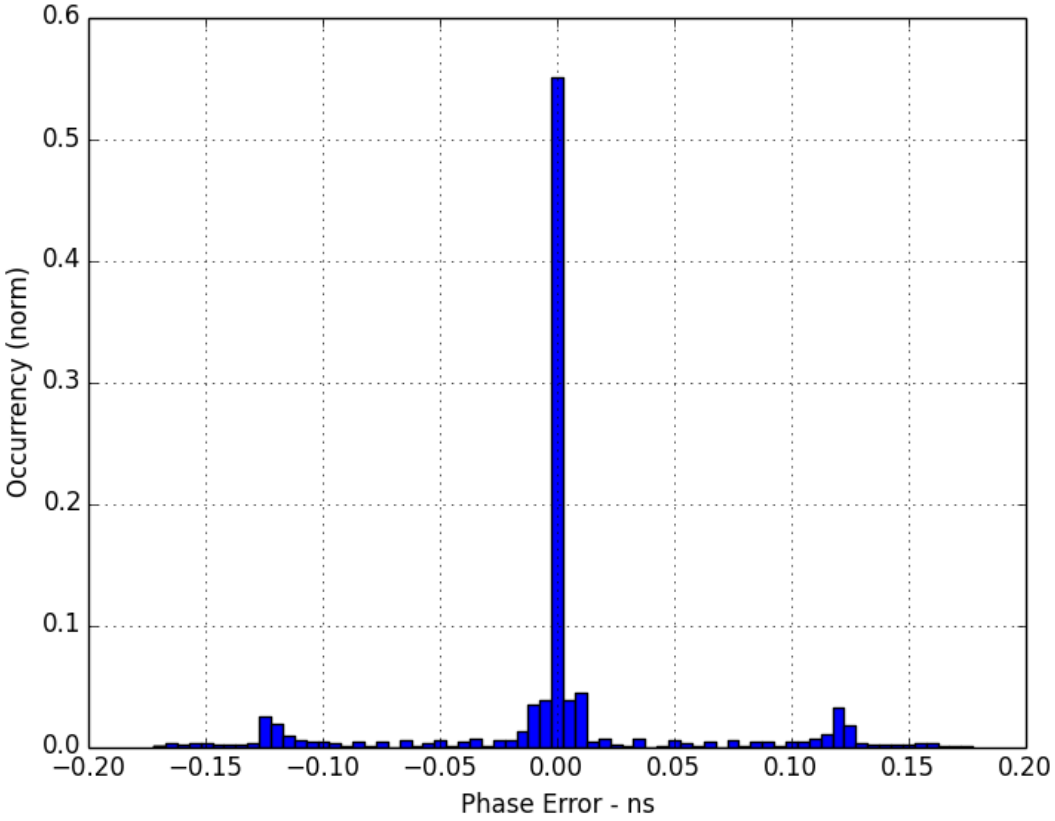


Figura 7-12 SyncSwitch (GPS): Istogramma normalizzato errore PPS

7.2.2 Caratterizzazione uscita 10 MHz SBV01-GPS

In modo analogo a quanto fatto per il SyncSwitch, in Figura 7-13 è riportato il grafico del TIE con la sua caratterizzazione statistica.

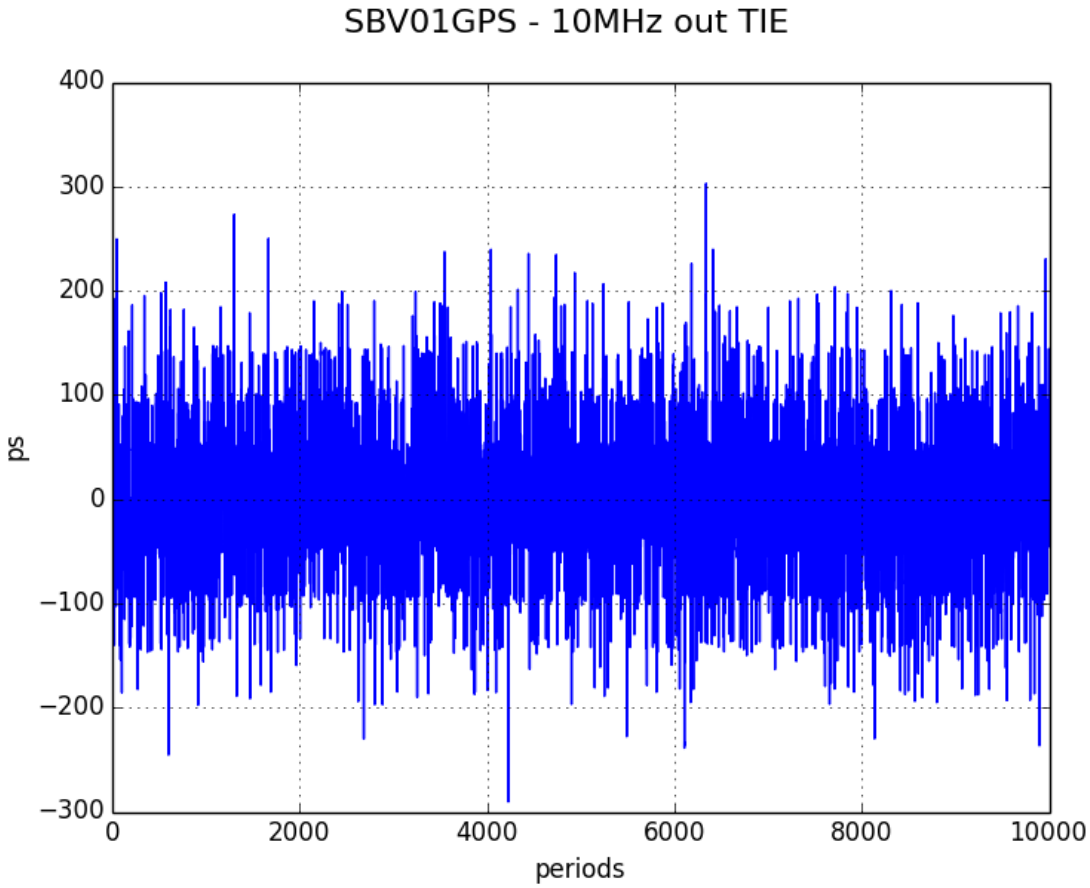


Figura 7-13 TIE dell'uscita a 10 MHz SB-V01 quando agganciato alla rete GPS

- Valore atteso $E\{D\} = -1.740 ps$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 64.08\ ps$;
- Valore minimo $D_{min} = -290.46\ ps$;
- Valore massimo $D_{MAX} = 302.09\ ps$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 592.55\ ps$.

Comparando le caratterizzazioni statistiche, l'apparecchiatura SB-V01GPS risulta meno accurata del SyncSwitch nel mantenimento della stabilità in frequenza, come ci si sarebbe

potuti aspettare tenendo conto del fatto che il SB-V01GPS è un apparato di classe più economica ed è equipaggiato con un oscillatore locale di performance inferiori rispetto al SyncSwitch.

Nella Figura 7-14 è riportato l'istogramma normalizzato ad "1" dell'errore di fase in approssimazione della sua PDF, con "bin = 70". L'accumulo delle occorrenze è meno distribuito attorno allo zero rispetto al SyncSwitch, e presenta alcuni picchi secondari quasi simmetricamente distribuiti.

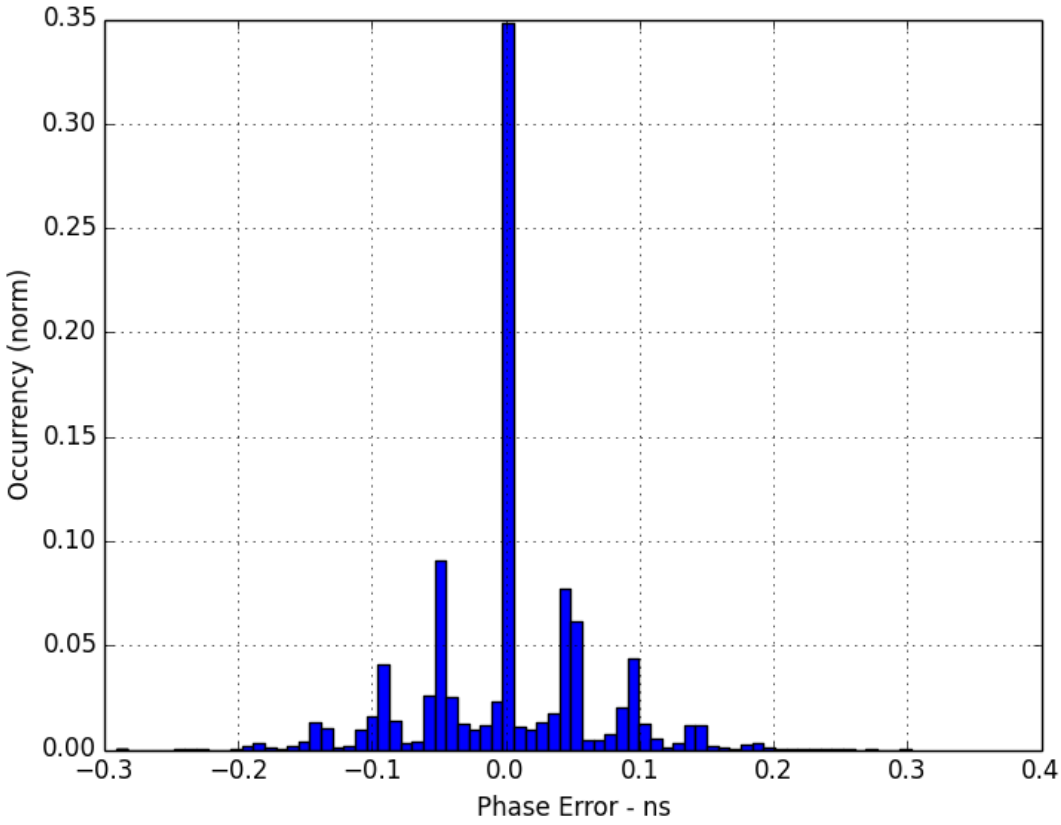


Figura 7-14 SB-V01GPS: Istogramma normalizzato errore PPS

7.3 Performance di fase mediante PTPv2 (SB-V01GPS, SyncSwitch)

Con questa verifica si è voluto stimare l'accuratezza di fase massima raggiungibile tra gli apparati SyncSwitch e SB-V01GPS, supportati dal solo protocollo PTPv2 in condizioni di quasi idealità, mediante un collegamento di rete Ethernet diretto realizzato con un cavo patch di 1,5 m in CAT5e.

Inizialmente il solo SyncSwitch è sincronizzato stabilmente con la rete di satelliti GPS da 48h, mentre il SBV01-GPS è sprovvisto di antenna GPS e collegamento Ethernet; è stato inoltre configurato per accettare il solo protocollo PTP come sorgente di sincronizzazione. L'apparato è stato poi privato dell'alimentazione elettrica per 5h, per poi essere avviato nuovamente e lasciato operare autonomamente in modalità free-run. Infine è stata disattivata la funzionalità SyncE "Master" sul SyncSwitch e i due apparati sono stati tra loro collegati con il solo cavo Ethernet CAT5e in standard 568B, come mostrato in Figura 7-15.

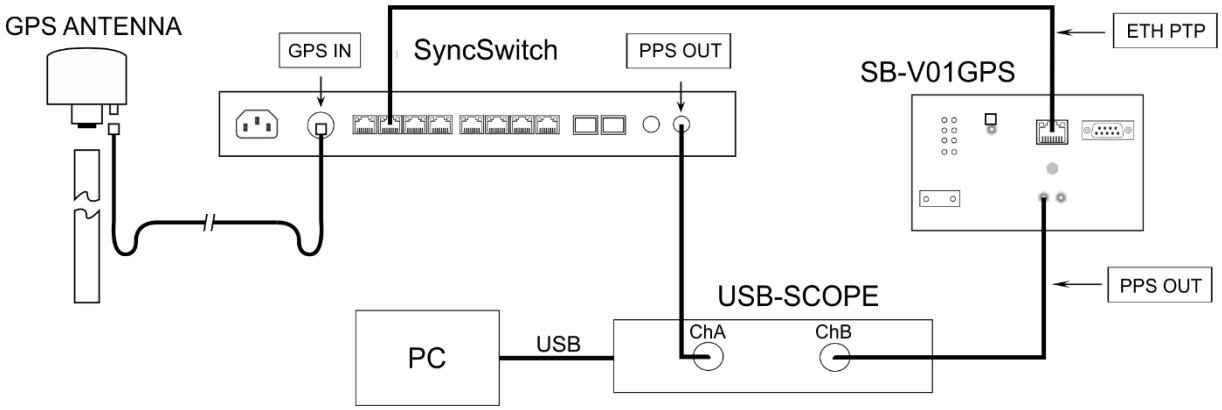


Figura 7-15 Setup caratterizzazione apparati in sincronizzazione diretta PTPv2

Entrambi gli apparati sono stati configurati per gestire il protocollo PTP secondo il profilo "default".

Inizialmente, in assenza di una sorgente di sincronizzazione per l'apparato slave, la distanza di fase tra i due segnali PPS è arbitraria e dipende dall'istante di accensione dello Slave clock; nel test in oggetto la distanza tra i due PPS si attestava attorno ai 500 ms.

Collegato il cavo patch Ethernet tra i due apparati, lo SB-V01GPS riduce la distanza del suo PPS rispetto a quello di riferimento, partendo da un valore iniziale di 2.5 µs come mostrato in figura sotto. La finestra di osservazione di 24h mostra che l'apparato Slave è in grado di ridurre la distanza del PPS dal riferimento al di sotto del microsecondo dopo solamente un'ora ed al di sotto dei 500 ns dopo 12 ore, per infine assestarsi stabilmente attorno

ai 240 ns dopo la ventitreesima ora (Figura 7-16).

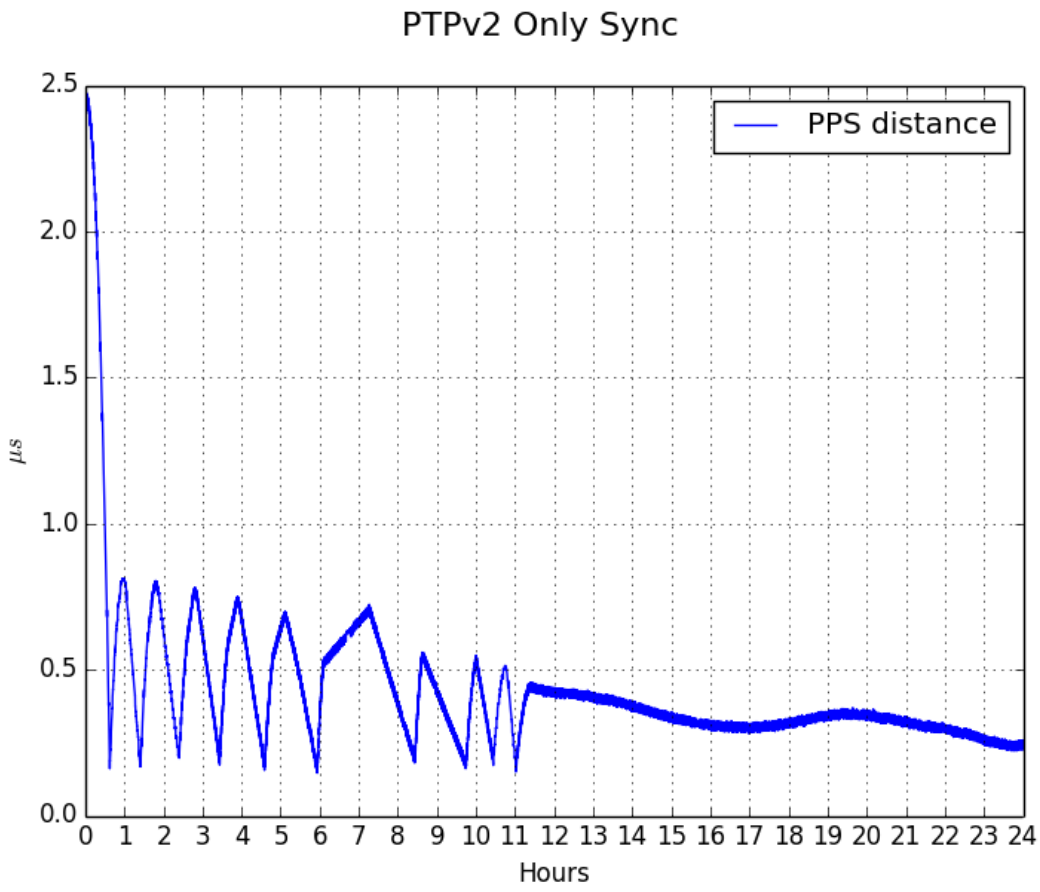


Figura 7-16 Convergenza della sincronizzazione PTPv2 diretta

- Valore atteso $E\{D\} = 246.11\ ns$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 10.87\ ns$;
- Valore minimo $D_{min} = 221.98\ ns$;
- Valore massimo $D_{MAX} = 274.51\ ns$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 52.53\ ns$.

7.4 Performance di fase mediante PTPv2 & SyncE

7.4.1 Coppia apparati SyncSwitch e SBV01-GPS

Ripetendo la precedente esperienza, con una distanza iniziale 0.4 µs, con la modalità SyncE "Master" (PRC) abilitata sul SyncSwitch ed avendo predisposto il SBV01-GPS come SyncE "Slave", l'apparato slave manifesta rapidamente i benefici di un riferimento interno più stabile ed accurato nella fase di disciplinamento del clock; su una finestra temporale di 12h si osservano i seguenti parametri:

- Valore atteso $E\{D\} = 181.18\ ns$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 18.81\ ns$;
- Valore minimo $D_{min} = 133.69\ ns$;
- Valore massimo $D_{MAX} = 235.15\ ns$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 101.46\ ns$.

L'andamento temporale della differenza tra i PPS dei due apparati, considerando come riferimento il SyncSwitch, è mostrato in Figura 7-17.

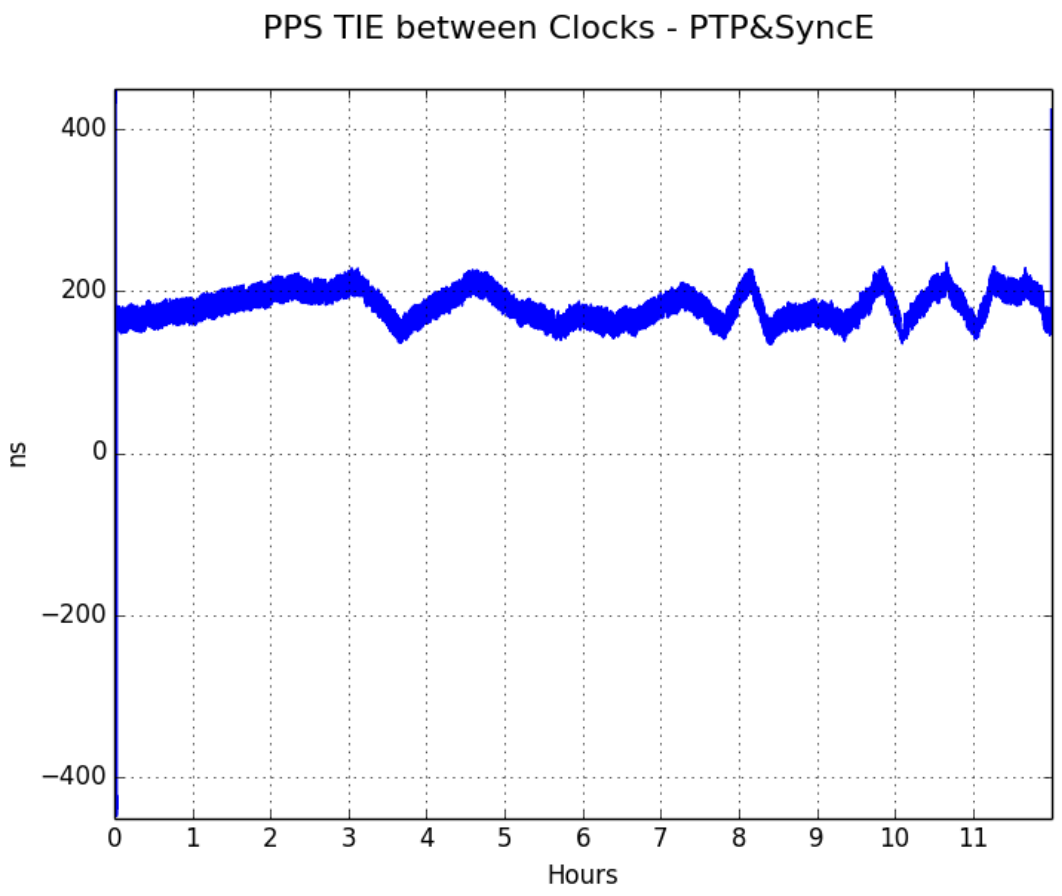


Figura 7-17 TIE tra apparati in sincronizzazione diretta ibrida PTPv2/SyncE

Gli effetti benefici sono meglio evidenti nella figura sotto, in cui è mostrato in rosso l'istante temporale nel quale è stata abilitata la funzionalità SyncE sul SyncSwitch: l'apparato SBV01-GPS ha impiegato 51 secondi per migliorare la distanza in termini di PPS rispetto al suo riferimento (Figura 7-18), partendo da un valor medio di 443.7 ns per arrivare ad un valor medio di 164.8 ns, quest'ultimo stimato nei primi 8 minuti di lavoro nella nuova modalità ibrida PTPv2-SyncE.

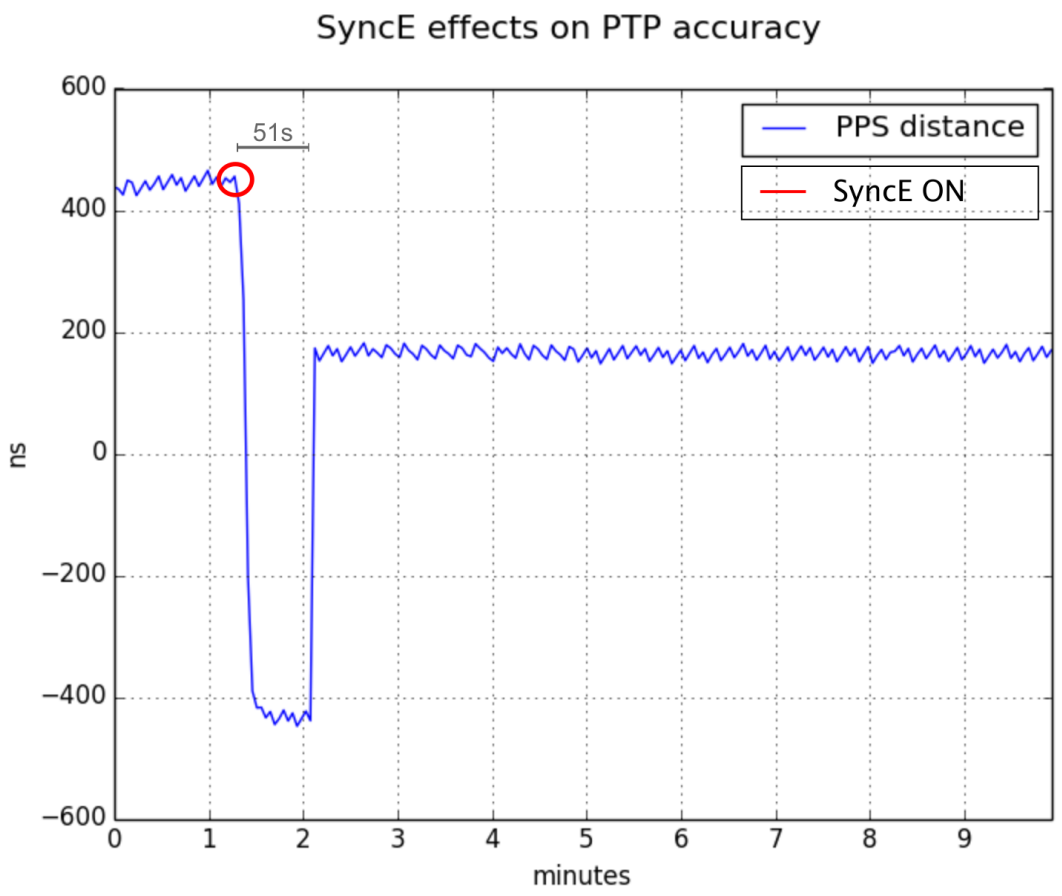


Figura 7-18 Benefici introdotti dal SyncE sul PTPv2

L'esperienza appena mostrata prova che il contributo del SyncE non solo migliora l'accuratezza di fase dell'apparato Slave a stabilizzazione avvenuta, ma può contribuire a migliorare le performance di convergenza in termini temporali verso una soglia stabile.

7.4.2 Coppia apparati SB-V01GPS e SB-V01

Nei risultati sperimentali del precedente paragrafo sono stati evidenziati i benefici che la presenza del SyncE può apportare agli apparati "Slave".

In questo paragrafo viene esaminata la combinazione tra apparati della stessa famiglia, lo SB-V01GPS e lo SB-V01, rispettivamente configurati come "Master" (sia nella logica PTP che SyncE) e "Slave".

In questo caso lo SB-V01GPS è stabilmente agganciato alla rete satellitare GPS da 48h, e viene collegato con un cavo *patch* Ethernet in CAT5e 568B della lunghezza di 1.5 m direttamente allo SB-V01, acceso da 48h in modalità "free-run": questo intervallo di tempo garantisce all'elettronica interna, e soprattutto all'oscillatore locale, l'avvenuta stabilizzazione in temperatura.

Lo schema di collegamento è mostrato in Figura 7-19.

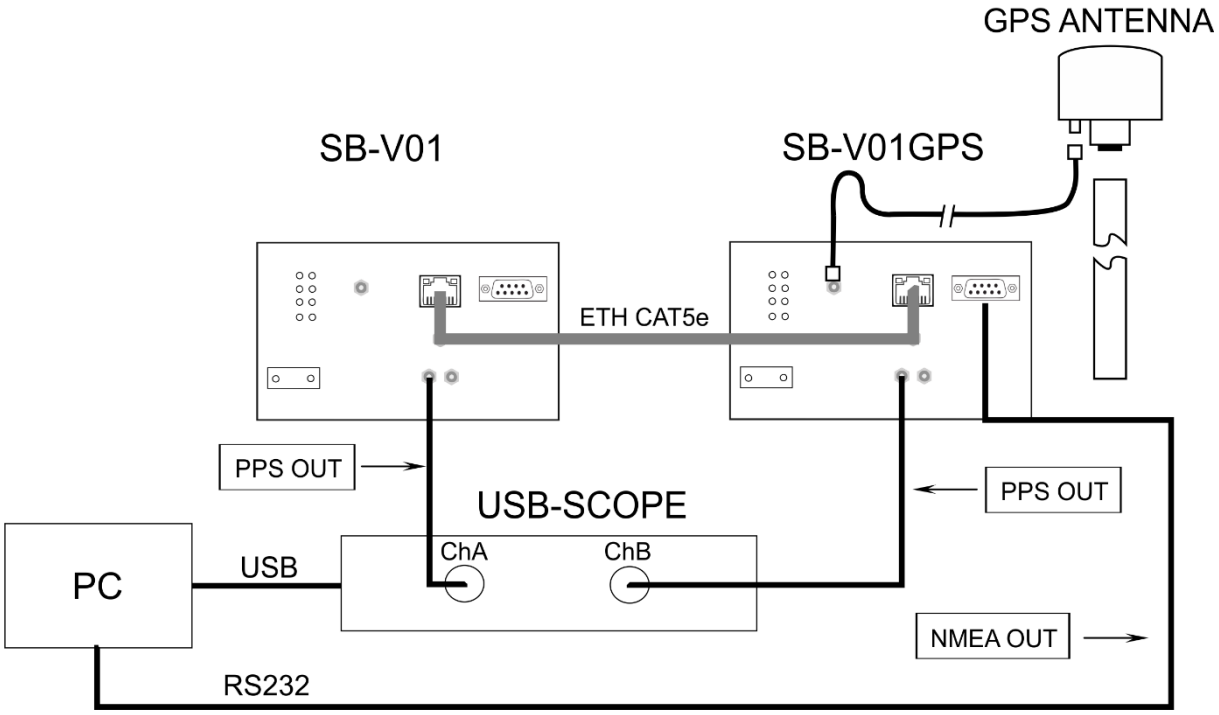


Figura 7-19 Schema di collegamento diretto apparati SB-V01

Durante il test della durata di 17h, mediante un PC ed il programma "RS232 Data Logger", è stato monitorato lo stato dei satelliti (Figura 7-20) riportato dal ricevitore del SB-V01GPS sulla porta seriale.

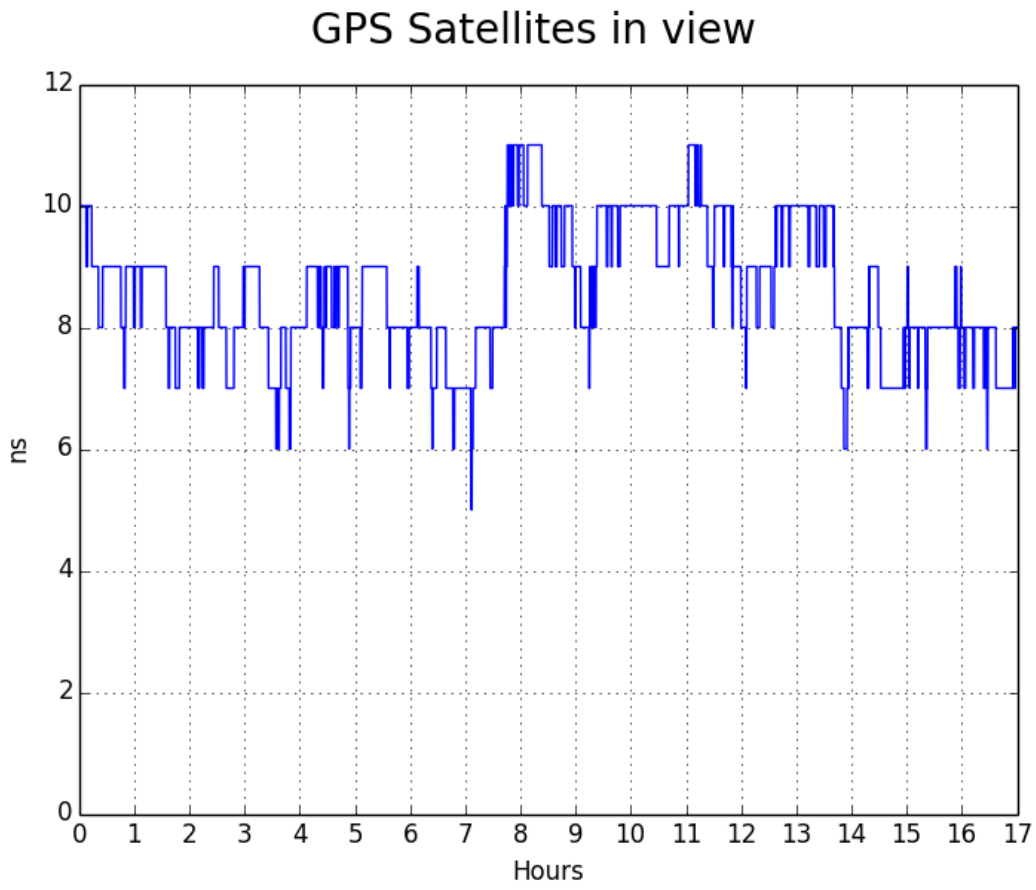


Figura 7-20 Stato dei satelliti in vista da SB-V01GPS

In Figura 7-21 l'andamento dell'errore del PPS "Slave" in riferimento al "Master".

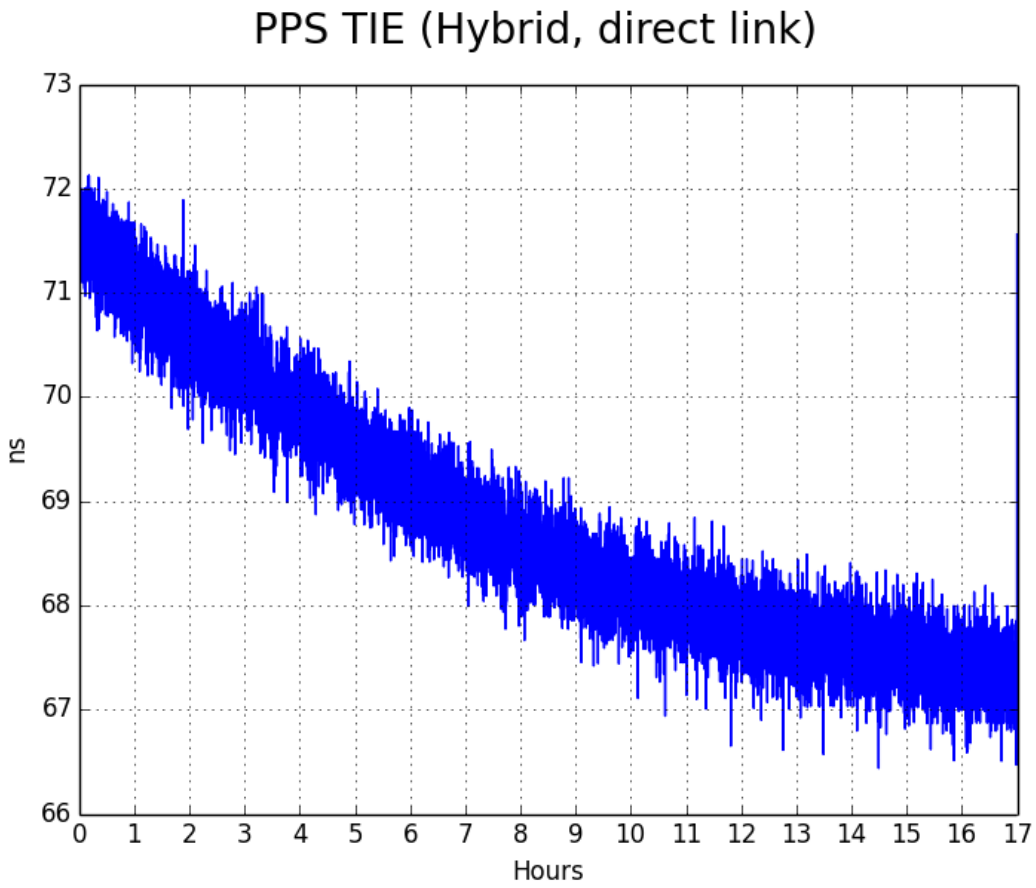


Figura 7-21 Distanza tra PPS negli apparati della famiglia SB-V01

Dopo la sedicesima ora, l'apparato "Slave" si stabilizza a regime con la caratterizzazione statistica a seguire, riferita all'istogramma di Figura 7-22:

- Valore atteso $E\{D\} = 67.42\ ns$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 0.278\ ns$;
- Valore minimo $D_{min} = -66.47\ ns$;
- Valore massimo $D_{MAX} = -71.56\ ns$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 5.09\ ns$.

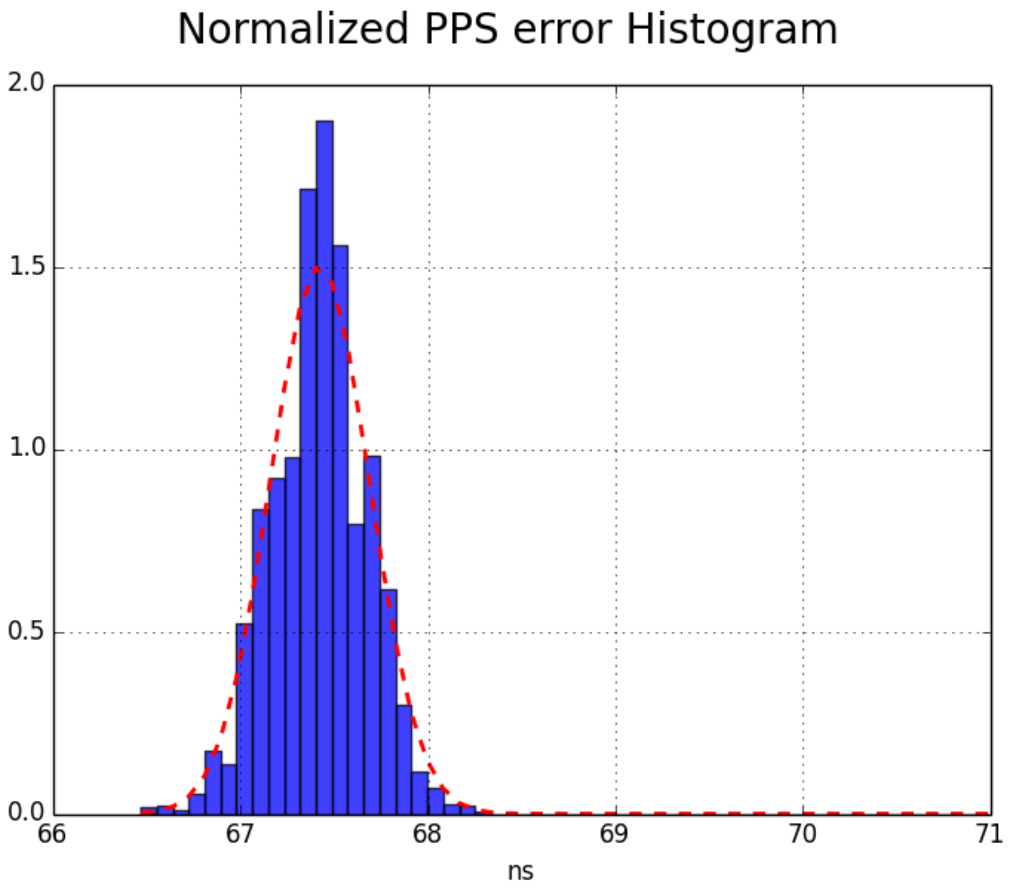


Figura 7-22 Istogramma dell'errore del PPS Slave rispetto al Master

7.5 Architettura del collegamento punto-punto

Il banco di prova proposto intende simulare un'architettura di sincronizzazione per la PQ basata sul collegamento radio più elementare, quello P2P.

Il banco (Figura 7-23) è stato suddiviso in due sezioni:

- "Nodo Master", estremità della catena contenente la sorgente di riferimento;
- "Nodo Slave", l'altra estremità ospitante il sistema "Slave" di estrazione della sincronizzazione.

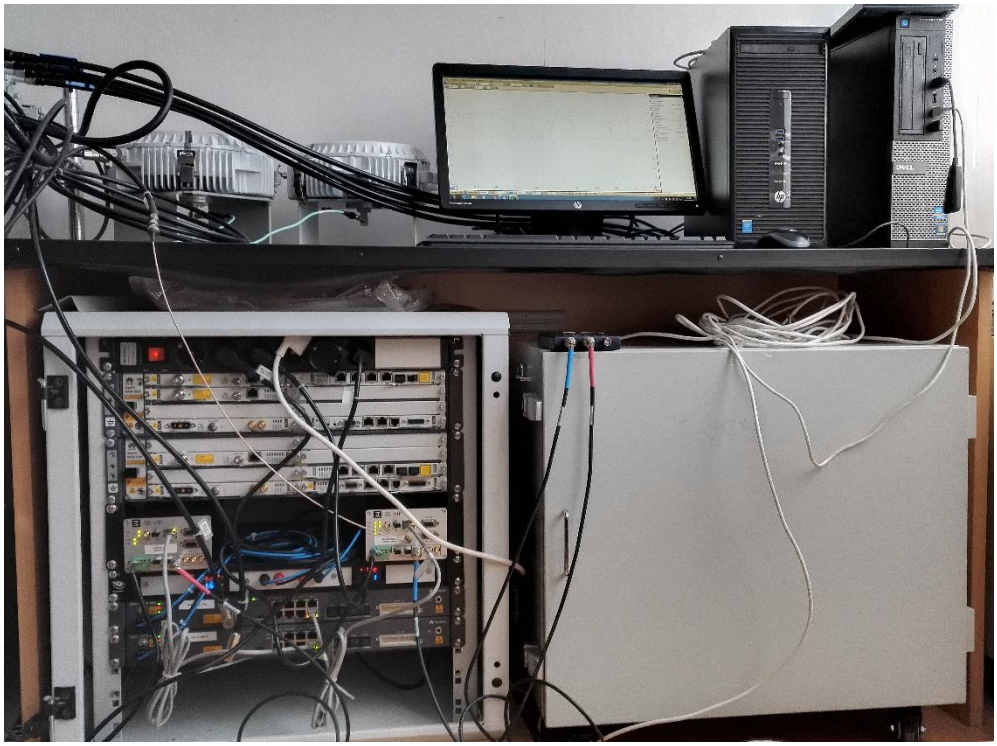


Figura 7-23 Foto del banco di prova completo

7.5.1 Nodo Master

Con riferimento alla Figura 7-24, la sorgente di riferimento scelta per fase e frequenza (PRS/PRC) è un SyncSwitch dotato di ricevitore con antenna GPS ed operante in modalità "GrandMaster Clock"; il SyncSwitch è stato configurato per distribuire sulle sue porte Gigabit Ethernet sia il riferimento di frequenza a livello fisico, su supporto SyncE, che la messaggistica PTPv2 su protocollo UDP/Multicast e profilo "default".

L'uscita analogica PPS è connessa al canale d'ingresso "A" di un oscilloscopio digitale PicoScope, per essere successivamente comparata con il segnale PPS estratto dall'orologio "Slave" disposto all'altra estremità del collegamento.

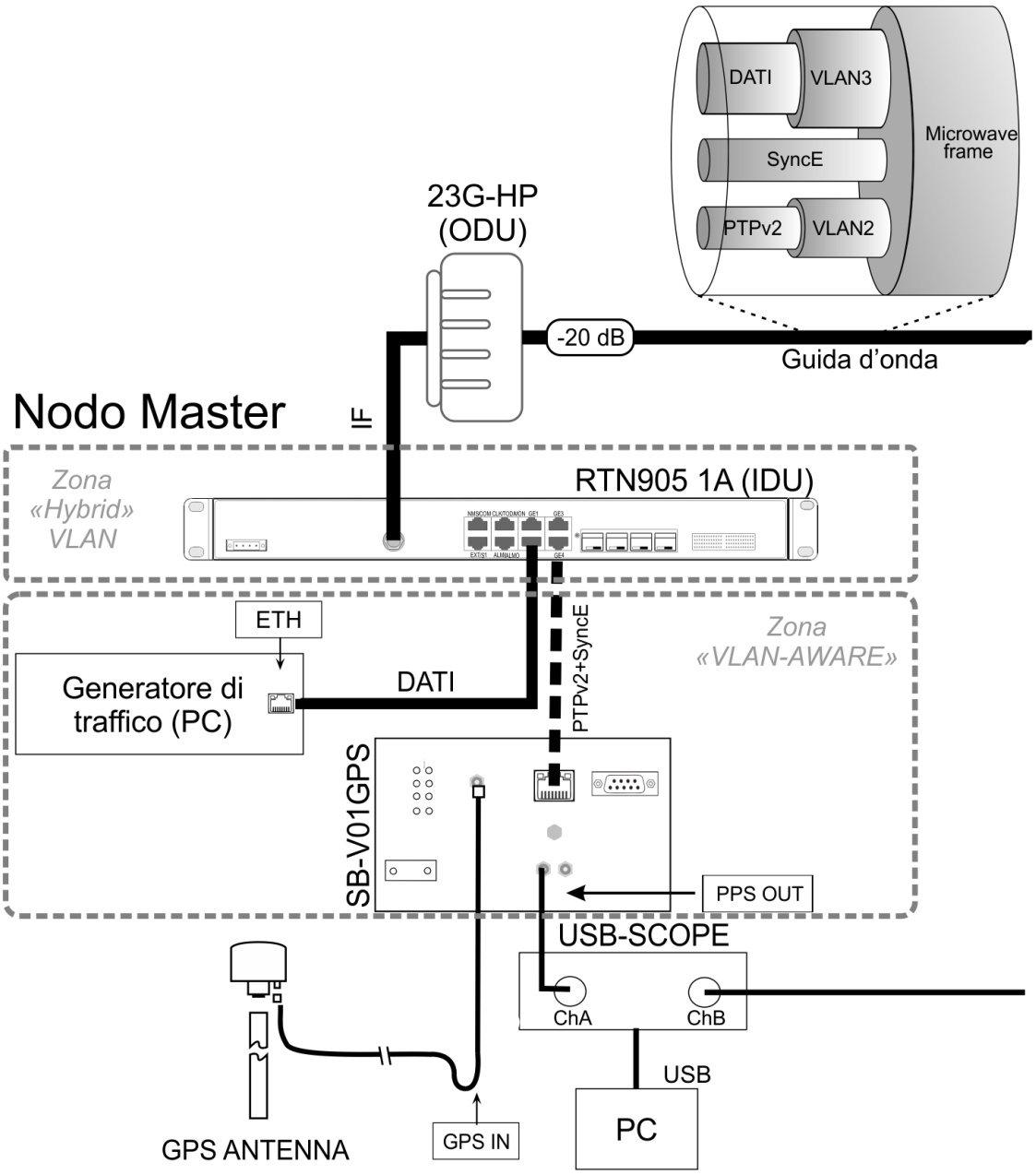


Figura 7-24 Setup del Nodo Master

Un PC desktop "Dell Optiplex 790", con sistema operativo Windows™ 7, è utilizzato come sorgente di volume costante di traffico dati (DATI) sulla sua interfaccia di rete Ethernet (ETH), mediante i software iPerf (v. 2.0.5-3 win32) e D-ITG (v. 2.8).

La porta ETH del PC ed una delle porte del SyncSwitch sono connesse ciascuna tramite un cavo "patch" Ethernet CAT5e alla IDU dello RTN905, rispettivamente sulle porte GE2

e GE4. Le porte GE2 e GE4 della IDU sono configurate per marcare ("tag") il traffico a pacchetti in ingresso (*access*) rispettivamente con i VLAN-ID "2" e "3"; la porta GE4 è inoltre configurata per accettare in ingresso un riferimento fisico di frequenza SyncE.

Questa configurazione delle porte GE2 e GE4 sulla IDU permette di separare i tre flussi:

- **Dati**, ovvero tutto il traffico che non riguarda la sincronizzazione (OAM, dati di PQ, desktop remoto, aggiornamenti, ecc.);
- **Messaggistica PTPv2**, destinata al trasporto delle informazioni di fase;
- **SyncE**, per il trasporto del riferimento di frequenza a livello fisico.

I flussi così separati ed identificati possono essere processati all'interno della IDU per assegnare priorità più elevata al traffico PTP e banda minima garantita (impostata a 2 Mbps), mediante le politiche di QoS su base porta fisica/VLAN.

Sebbene il generatore di traffico ed il SyncSwitch si trovino nello stato di "VLAN aware", i flussi di dati da essi generati sono incapsulati ciascuno in una VLAN diversa, e ciascun apparato non è così in grado di essere a conoscenza del traffico generato (o ricevuto) dall'altro.

La IDU dello RTN905 del nodo master provvede dunque ad effettuare il "tagging" e lo "un-tagging" dei pacchetti "da" e "verso" gli apparati ad esso collegati; i tre flussi vengono poi inseriti nella trama radio in banda base che transita dalla porta IF della IDU verso la ODU, mediante un cavo coassiale lungo 1.8 m e che provvede anche all'alimentazione della ODU stessa, ad una tensione continua di -48 V.

La ODU è l'elemento che porta "in aria" i frame radio, occupandosi di traslare di banda i segnali in trasmissione ed in ricezione, e di effettuare le opportune amplificazioni degli stessi. È connessa alla corrispettiva ODU del "Nodo Slave" mediante la serie:

- adattatore da flangia a connettore SMA;
- attenuatore di segnale da -20 dB da 1 W;
- guida d'onda coassiale da 1,5 m;
- attenuatore di segnale da -20 dB da 1 W;

- adattatore da flangia a connettore SMA.

L'utilizzo delle ODU in guida d'onda permette di simulare una condizione ideale di diretta visibilità (LOS) tra le ODU ed al contempo evitare:

- irraggiamento di microonde a cose e persone nei locali adiacenti al banco di test;
- fenomeni di saturazione del segnale e conseguente danneggiamento dei ricevitori, grazie anche all'impiego dei due attenuatori di segnale.

La ODU è stata dunque configurata per emettere la minore potenza d'uscita possibile (2 dBm, Figura 7-25), tale da non causare danneggiamenti al ricevitore della ODU contrapposta, ed al contempo ottenere un eccellente qualità del segnale radio (-40.8 dBm), necessaria per portare i collegamento alla massima capacità supportabile.

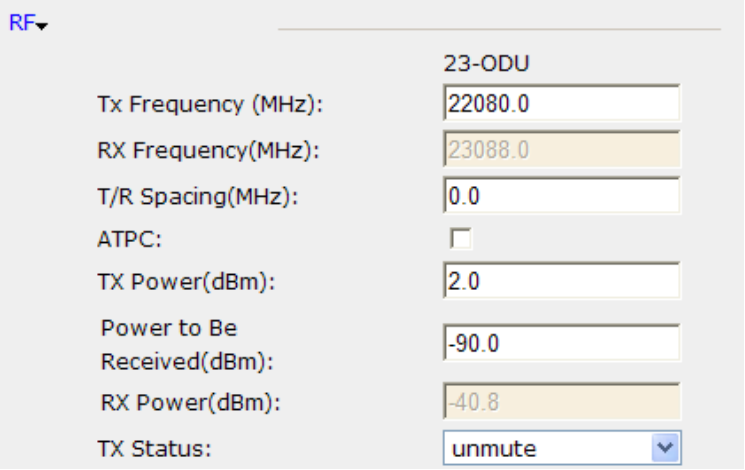


Figura 7-25 Configurazione radio delle ODU 620 23GHP

7.5.2 Nodo Slave

Al nodo "Slave" il frame radio viene ricevuto dalla ODU che traspone in banda base il segnale, trasferendolo alla IDU mediante il cavo IF da 1,8 m. La IDU provvede a smistare i tre flussi informativi sulle porte Gigabit Ethernet, secondo la corrispondenza:

- segnale SyncE a livello PHY sulla porta GE4;
- messaggistica PTPv2 per la sincronizzazione in fase sulla porta GE4;
- flusso di pacchetti dati non concorrenti alla sincronizzazione, sulla porta GE2.

La IDU provvede ad indirizzare le VLAN “2” e “3” rispettivamente sulle porte GE2 e GE4, ed al contempo effettuare l’operazione di “un-tagging” in modo che le apparecchiature connesse a valle della IDU si trovino in una zona “VLAN aware”. Analogamente al caso del nodo Master, le apparecchiature a valle della IDU non possono vedere ciascuna il traffico dell’altra; in questo modo si sono creati 3 diversi flussi informativi distinti, parimenti a 3 diverse interconnessioni, ma tutti viaggianti sul medesimo supporto radio.

Il traffico di riposta generato dal nodo Slave, quale:

- messaggistica “Delay_Req” del meccanismo PTP;
- messaggistica TCP del flusso “DATI”.

Viene marchiato dalla IDU (*access*) con il corrispettivo VLAN-ID, in modo che la comunicazione sia pienamente bidirezionale su ogni VLAN, con corrispondenza porta-a-porta tra le due IDU, Master e Slave.

Un PC “Dell Optiplex 755” operante con Windows™ 7 riceve il traffico sulla sua interfaccia ETH dalla porta GE2 della, utilizzando uno dei due *tool* software iPerf (v. 2.0.5-3 win32) o D-ITG (v. 2.8).

Come mostrato in Figura 7-26, l’orologio SB-V01GPS, configurato in modalità “Slave Clock”, riceve il segnale SyncE e la messaggistica PTPv2 dalla porta GE4 della IDU e provvede tramite il suo meccanismo “PTP Servo” a regolare l’orologio interno per allinearsi in fase ed in frequenza ai riferimenti.

L’uscita PPS dell’orologio SB-V01-GPS viene collegata al canale “B” di un oscilloscopio digitale USB serie “PicoScope”, affinché sia possibile comparare la distanza con il PPS di riferimento presente sul canale “A” relativo all’orologio Master.

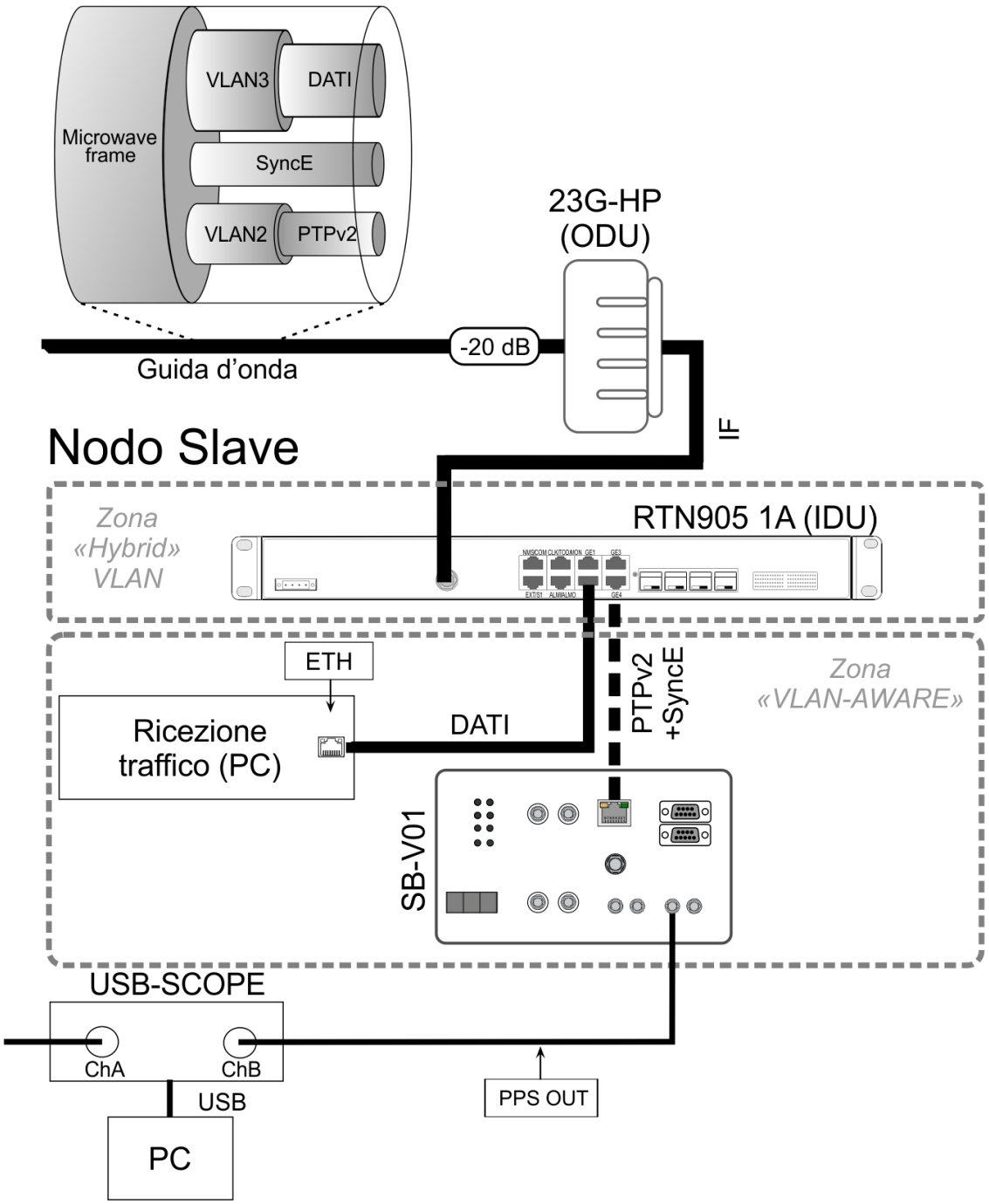


Figura 7-26 Setup del Nodo Slave

7.6 Generazione del traffico dati

La generazione del traffico dati sul collegamento radio è affidata a due PC che eseguono un'istanza software dedicata a tale scopo, uno dei due strumenti a scelta tra "iPerf" e "D-ITG".

7.6.1 iPerf

"iPerf" [102] è uno strumento software "open-source" per misurazioni attive della massima banda dati raggiungibile sulle reti a pacchetti IP, sia cablate che wireless; è un'applicazione eseguibile da riga di comando (*shell*) disponibile per più sistemi operativi ("cross-platform") e, disponendo del codice sorgente "C", è possibile effettuare il "porting"[87] dello stesso su piattaforme specifiche, come ad esempio i sistemi "embedded".

Il *tool* può generare separatamente ma non contemporaneamente flussi di dati ("stream") TCP ed UDP per misurare le prestazioni della rete che li trasporta, al fine di caratterizzarla e/o ottimizzarla. Lo stesso codice eseguibile ingloba le funzionalità di "client" e "server" e misura la capacità di rete tra due terminazioni (E2E), sia in modo unidirezionale ("one-way") che bidirezionale ("two-way").

Quando impiegato per verificare la capacità del traffico UDP, iPerf permette di specificare la dimensione del datagramma e fornisce informazioni di perdita di pacchetto ("packet loss") e jitter (variazione di latenza); nella modalità TCP misura la capacità del "payload" del pacchetto.

L'output a schermo (Figura 7-27) sono dei report periodici marcati temporalmente e contenenti il quantitativo di dati trasferiti e la capacità misurata. La versione utilizzata per i test di questo lavoro è la "2.0.5-3 win32". Nell'esempio di figura sotto, iPerf nella modalità "server" in ricezione di otto flussi TCP da un'altra istanza applicativa "client" avviata sulla stessa macchina.

[87] Processo di trasposizione di un componente software, volto a consentirne l'uso in un ambiente di esecuzione diverso da quello originale.

```
C:\temp\iperf-2.0.5-3-win32>iperf -s
------------------------------------------------------------
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 63.0 KByte (default)
------------------------------------------------------------
[  4] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65132
[  5] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65133
[  6] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65134
[  7] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65135
[  8] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65136
[  9] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65137
[ 10] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65138
[ 11] local 127.0.0.1 port 5001 connected with 127.0.0.1 port 65139
[ ID] Interval       Transfer     Bandwidth
[ 10]  0.0-10.1 sec   940 MBytes   780 Mbits/sec
[  6]  0.0-10.1 sec   956 MBytes   793 Mbits/sec
[  7]  0.0-10.1 sec   981 MBytes   814 Mbits/sec
[  8]  0.0-10.1 sec   929 MBytes   771 Mbits/sec
[ 11]  0.0-10.1 sec   964 MBytes   800 Mbits/sec
[  4]  0.0-10.2 sec   971 MBytes   801 Mbits/sec
[  5]  0.0-10.2 sec   924 MBytes   762 Mbits/sec
```

Figura 7-27 iPerf Server

È disponibile un'interfaccia grafica di gestione del *tool* scritta in codice "Java" e denominata "jPerf" (Figura 7-28) che assembla le opzioni necessarie all'esecuzione della riga di comando e produce dei report grafici.

Figura 7-28 JPerf – interfaccia GUI per iPerf

7.6.2 D-ITG

Acronimo di "Distributed Internet Traffic Generator" è una piattaforma "open-source"[88] sviluppata presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica l'Università Federico II di Napoli [103] in grado di generare tipologie differenti di traffico a livello di pacchetto, secondo possibili distribuzioni stocastiche dello stesso. Permette le impostazioni di dettagli come il tasso di trasmissione e la sua durata, e la generazione di report con indicazioni sulla capacità, il jitter e la "packet loss" in trasmissione.

[88] http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/

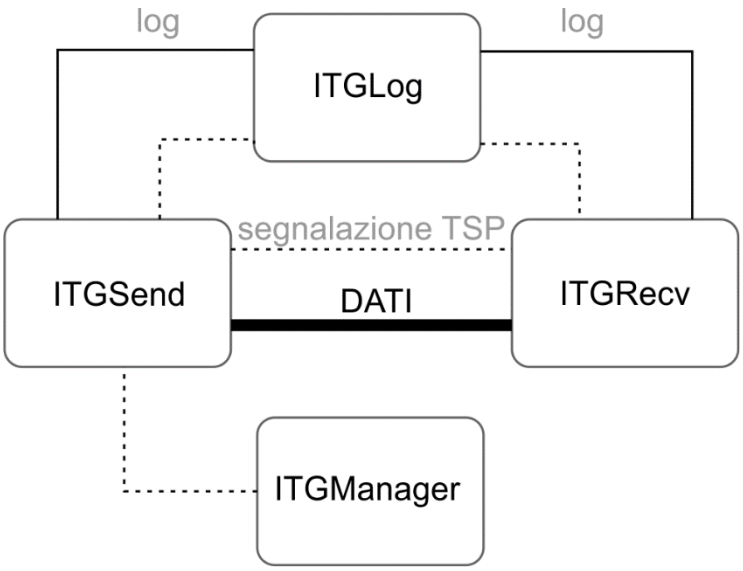


Figura 7-29 Architettura moduli software D-ITG

L'architettura multi-componente (Figura 7-29) del *framework* è composta dai 6 parti:

- **ITGSend**. È l'elemento software che provvede alla generazione del traffico e può operare in modalità *single-thread* ad un flusso (Figura 7-30), *multi-thread*[89] a più flussi paralleli su protocolli diversi (Figura 7-31), e come servizio ("daemon") gestito da ITGManager.
- **ITGRecv**. Lavora sempre come servizio concorrente in ascolto di nuove connessioni; quando un flusso è in arrivo, ITGRecv avvia un nuovo *thread* a cui è affidata la responsabilità di gestire la comunicazione con il mittente. Ogni flusso è ricevuto da un *thread* dedicato.
- **ITGManager**. Permette di gestire l'architettura in maniera remota; si appoggia allo strato ITGApi per controllare ITGSend.
- **TSP**. "Traffic Specification Protocol" è il protocollo di comunicazione su canale di segnalazione TCP condiviso tra trasmettitore e ricevitore, con cui vengono controllati i parametri di generazione del traffico, gestendo le fasi di autenticazione e scambio d'informazioni su un processo di generazione dati.

[89] Suddivisione di un processo in due o più filoni o sotto processi che vengono eseguiti concorrentemente.

- **ITGLog**. È un server di raccolta dei "log" in esecuzione su un host diverso da ITGSend ed ITGRecv, dedicato alla raccolta dei log dei diversi *thread* di trasmissione e ricezione, mediante un protocollo di segnalazione.
- **ITGDec**. Elemento che lavora in *post-processing* per l'analisi e la generazione di statistiche, a partire dai file di *log* collezionati da ITGLog. È in grado di determinare valori medi di *throughput*, ritardo, *jitter* e perdita di pacchetto sia sull'intera durata del test che su finestre di durata arbitraria.

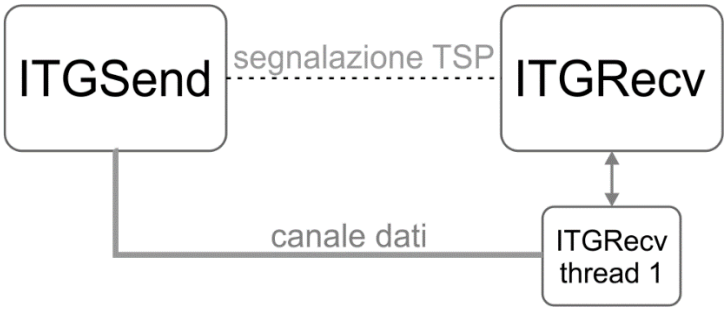


Figura 7-30 D-ITG in *thread* singolo

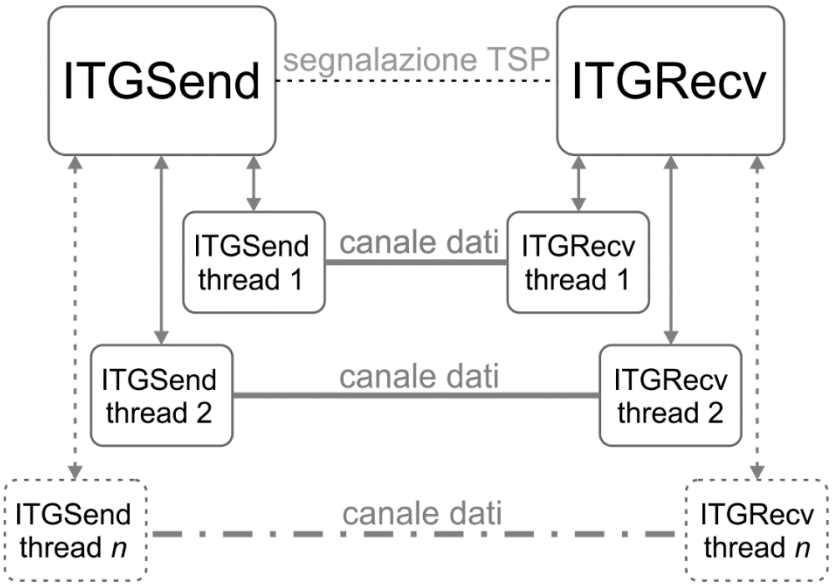


Figura 7-31 D-ITG in *thread* multipli

D-ITG è un generatore di traffico in grado di produrre e ricevere traffico a livello di rete (ICMP), di trasporto (UDP e TCP) e a livello applicativo (emulando protocolli Telnet, DNS e VoIP). Il numero di pacchetti inviati per secondo e la loro dimensione possono essere costanti, o variabili aleatorie per la modellazione del flusso di traffico, mediante la scelta di una distribuzione da associare, tra: costante, uniforme, normale, Cauchy, Poisson, Pareto, gamma ed esponenziale.

Le misure che possono essere ottenute sono di tipo "one-way-delay" nel solo senso "trasmettitore/ricevitore" e "round-trip-time-delay", in cui viene misurato il tempo necessario ai pacchetti per attraversare la rete nei due versi.

I processi D-ITG sono avviabili da riga di comando ("command shell"), tuttavia è possibile gestirli più facilmente con il *front-end* "D-ITG GUI" in linguaggio "Java" (Figura 7-32).

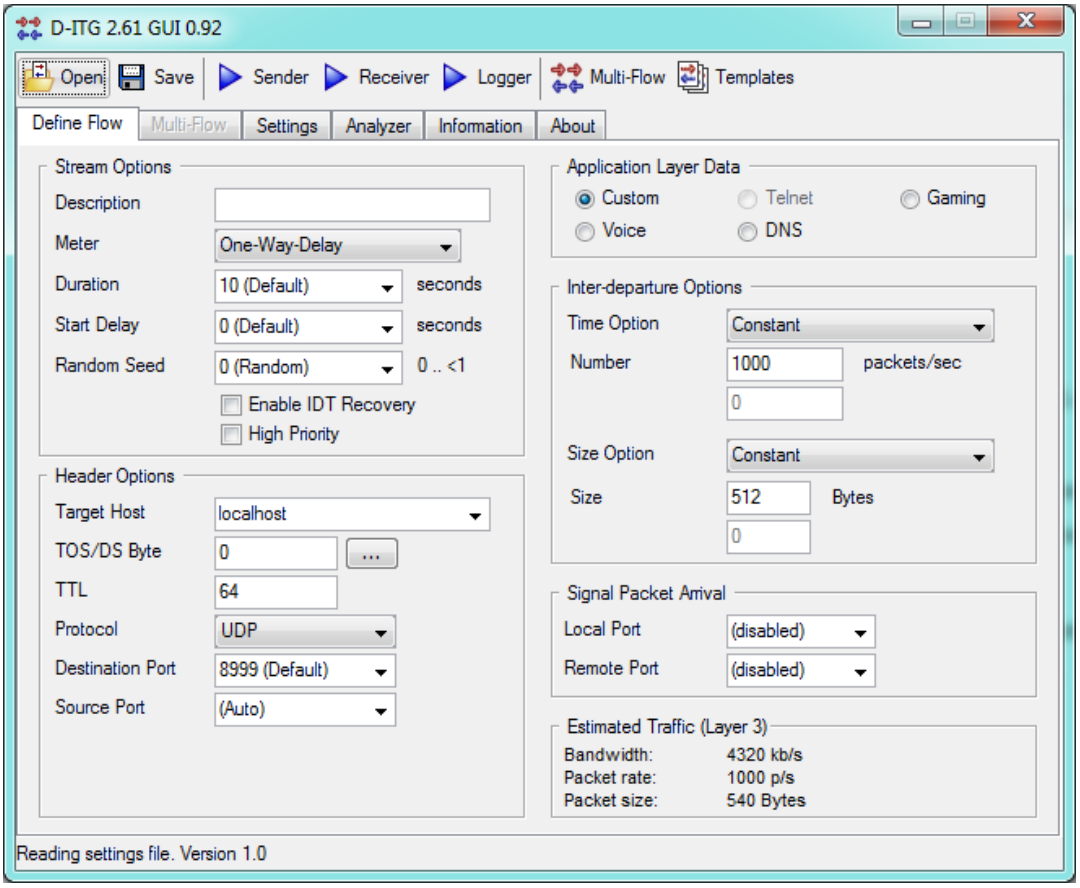


Figura 7-32 Interfaccia GUI per D-ITG

7.6.3 Limiti di capacità del TCP

La capacità massima ("throughput") ottenibile con il protocollo TCP è determinato da fattori come il "round-trip time" (RTT) e gli errori di bit.

La scelta dell'ampiezza della finestra TCP (RWIN, "Receive Window") è un parametro essenziale per determinare l'efficienza del collegamento: essa rappresenta la quantità di dati che un calcolatore può accettare senza mandare alcun feedback (ACK, "acknowledge") al mittente del messaggio, necessario a determinare la validità del pacchetto e la sua eventuale ritrasmissione. Al termine della trasmissione di un pacchetto, il mittente attende un "ACK" dal ricevitore per procedere alla trasmissione del pacchetto successivo: se lo ACK non soggiunge dopo un prestabilito *timeout*, il mittente provvede ad inviare nuovamente il pacchetto; questo meccanismo conferisce al TCP un elevato livello di affidabilità nel trasferimento dei dati.

Tuttavia, anche in assenza di perdita di pacchetti (e dunque in presenza di ritrasmissioni), la finestra di ricezione più limitare il "throughput" secondo la relazione:

$$throughput \leq \frac{RWIN}{RTT}$$

Per ogni segmento ricevuto, nell'intestazione del TCP viene segnalato lo spazio libero nel buffer allocato per la connessione, al fine di evitare la perdita di pacchetti dovuta a spazio insufficiente nel buffer ("overhead"). Il mittente deve allocare la stessa quantità di memoria poiché deve mantenerli fino alla ricezione dello ACK per un'eventuale ritrasmissione. Se i feedback per arrivare al mittente richiedono un tempo maggiore di quello impiegato dal buffer del trasmettitore per saturare, si può bloccare la trasmissione dei pacchetti. Inoltre, alcuni dispositivi potrebbero avere una quantità limitata di memoria per i segmenti TCP; così la massima dimensione del corpo dati ("payload") di un segmento TCP, detta "Maximum Segment Size" (MSS)[90] deve essere opportunamente bilanciata sulla rete per ottenere prestazioni ottimali: tenuto conto che le intestazioni ("header") TCP e IP occupano assieme 40 byte

[90] RFC 793

senza “payload”, la scelta di un MSS troppo basso in fase di negoziazione (“handshake”) può risultare inefficiente in termini di consumo di banda.

Il protocollo IP è generalmente trasportato su *frame* Ethernet che ha una dimensione di trama compresa tra 64 e 1518 byte; di questi ultimi 1500 sono per il campo, mentre i restanti 18 sono costituiti da 14 byte d’intestazione Ethernet più 4 byte di controllo di ridondanza ciclico (CRC, “Cyclic Redundancy Check”). È chiaro che i pacchetti IP possono avere dunque un massimo di 1500 byte, ed una dimensione massima di 1480 byte per il “payload”, corrispondenti al segmento TCP incapsulato IP. Il TCP a sua volta ha un header di 20 byte, pertanto il suo massimo *payload* è di 1460 byte. Lo MSS definisce la dimensione del buffer allocato presso il dispositivo di ricezione in grado d’immagazzinare i dati TCP contenuti in un singolo datagramma IP, e può raggiungere una dimensione di 64KB, la massima grandezza di un datagramma IP. Per calcolare lo MSS si può utilizzare la relazione

$$MSS = MTU - 40$$

Dove la MTU è “Maximum Transmission Unit”, che indica la massima dimensione in byte di un pacchetto IP inviato attraverso un protocollo di comunicazione in una rete di telecomunicazioni, solitamente associato alle interfacce di comunicazione come schede di rete e porte seriali. Tipicamente per le interfacce Ethernet l’MTU di 500 byte (Figura 7-33).

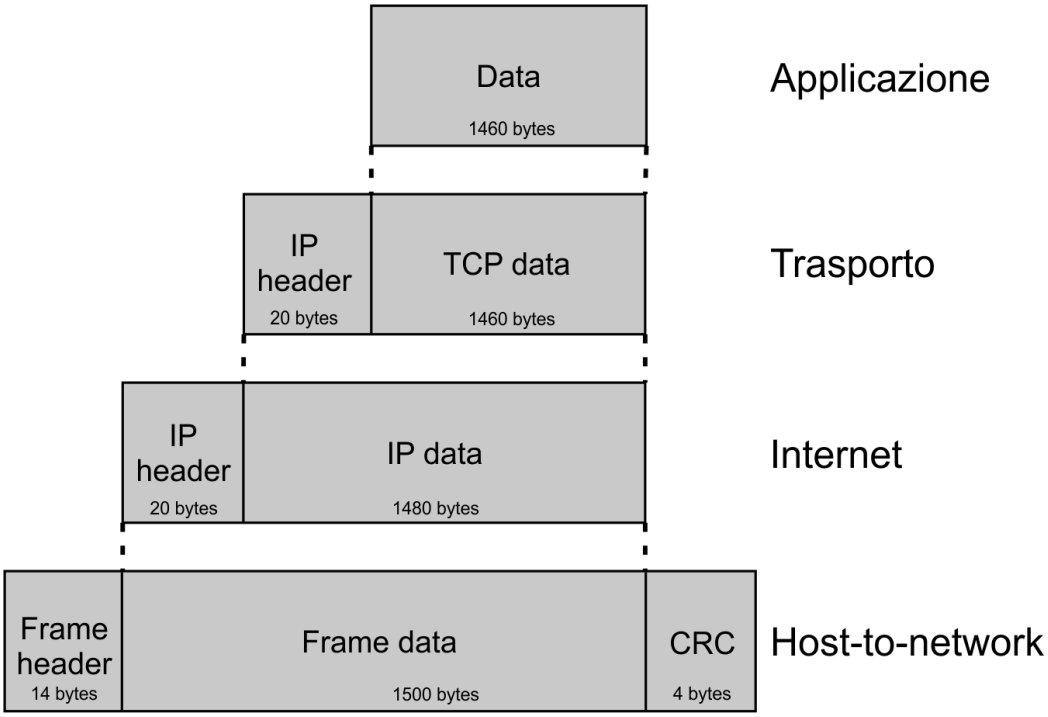


Figura 7-33 Frame Ethernet e livelli di protocollo di rete

Un host che deve trasmettere un pacchetto IP deve tenere conto della MTU dell'interfaccia su cui deve essere trasmesso; in collegamenti eterogenei, il pacchetto potrà incontrare segmenti di rete con una MTU inferiore e sui cui non potrebbe essere trasmesso se non attraverso il processo di "frammentazione", che divide il pacchetto originale in due o più pacchetti di dimensioni inferiori; i pacchetti così generati sono contrassegnati in modo che il destinatario sia in grado di riassemblare il pacchetto originale. Questo processo tuttavia è un'operazione computazionalmente onerosa (in termini di utilizzo di CPU[91] e memoria) per i router in cui il pacchetto transita e per lo host che deve ricostruire il messaggio, e pertanto va evitato. Lo "MTU del percorso" è il valore più elevato di MTU che può transitare un percorso di rete senza essere ulteriormente frammentato: la tecnica per l'individuazione di questo valore, detta PMTUD ("Path MTU Discovery"), è descritta nella RFC 1191 ed ha lo scopo di evitare la frammentazione del pacchetto: un router che non è in grado di gestire la frammentazione, ad esempio perché la *flag* "Don't Fragment" (DF) è abilitata all'interno del

[91] "Central Processing Unit".

messaggio, rigetta il pacchetto e risponde alla richiesta con un messaggio ICMP ("Internet Control Message Protocol") contenente l'informazione "Destination Unreachable".

Un'altra limitazione dovuta alla frammentazione del pacchetto è quella che se il frammento di un datagramma è perso a causa ad esempio della congestione di rete, allora l'intero datagramma IP deve essere ritrasmesso.

Altro fattore impattante la velocità di trasmissione raggiungibile in TCP è la perdita di pacchetto ("packet loss"), calcolabile come:

$$thoughput = \frac{MSS}{RTT\sqrt{P_{loss}}}$$

Dove P_{loss} è la probabilità di perdita del pacchetto.

7.7 Performance di sincronizzazione su collegamento punto-punto

In questo paragrafo si andranno a valutare le prestazioni di sincronizzazione in fase e frequenza raggiungibili con l'architettura descritta nel paragrafo 7.5.

La simulazione è volta a verificare che il ponte radio sia in grado, in condizioni di pieno traffico dati, di garantire con continuità il trasferimento sia del segnale SyncE che della messaggistica PTP, affinché l'apparato Slave a valle del collegamento radio possa mantenere le performance di sincronizzazione senza essere influenzato da altre tipologie di traffico in transito sullo stesso collegamento.

7.7.1 Configurazione del collegamento Microwave

Il ponte radio è configurato tramite la porta di gestione "NMS" utilizzando il software proprietario di WebLCT, con il quale è possibile effettuare la ricerca (*discovery*) degli apparati connessi.

Come mostrato nella Figura 7-34, il ponte radio è predisposto per lavorare il modalità "Hybrid" e può trasportare sia la sincronizzazione di livello fisico (E1) che il traffico a pacchetti (ETH). L'interfaccia "ISU3" è il modem della singola terminazione e supporta lo schema di diversità "Unprotected" (1+0).

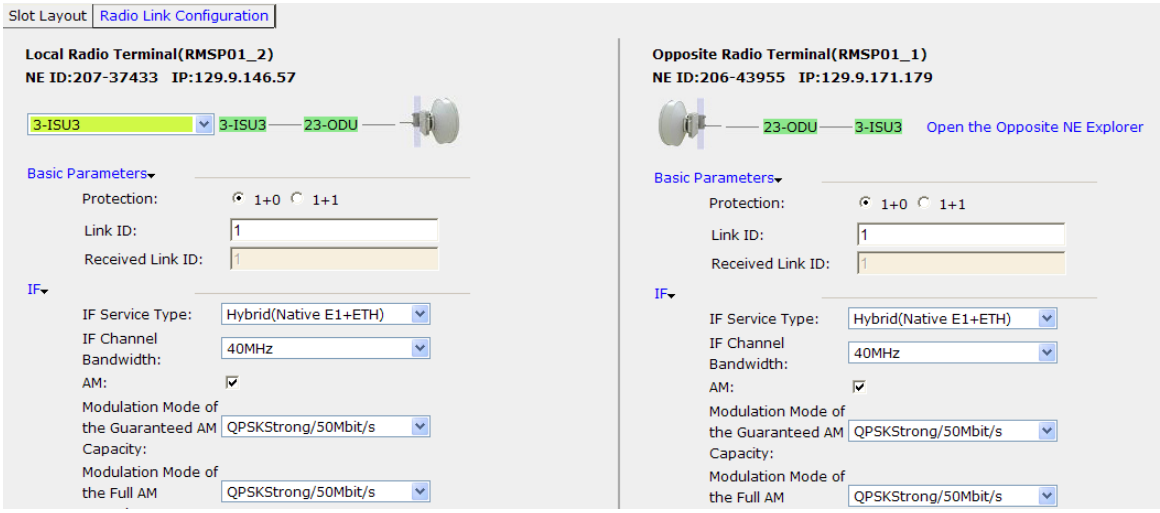


Figura 7-34 Vista parziale sezione “Radio Link Configuration” del *tool* WebLCT

Nella sezione “IF” del pannello “Radio Configuration Link” sono configurabili la larghezza di banda del canale IF e le modulazioni che il ponte radio può applicare nel caso di banda minima garantita e di massima capacità di canale; la voce “AM” indica lo stato di abilitazione della funzionalità “Adaptive Modulation” che, come già visto nel paragrafo 5.5.2, regola automaticamente il livello di modulazione più adatto alla qualità del canale attuale, dipendente dalle condizioni meteo ed ambientali tra le due terminazioni del collegamento radio.

Poiché il livello di modulazione scelto dalla funzionalità AM è dipendente dall’intensità del segnale ricevuto ma soprattutto dalla rumorosità del canale, non è necessario per gli scopi di questo lavoro inserire nel collegamento in guida degli attenuatori variabili ed un generatore di rumore bianco (o di multipath) per simulare il degrado del canale; disattivando infatti la funzionalità AM, si possono impostare staticamente le modulazioni d’interesse corrispondenti a condizioni ambientali più o meno vantaggiose (Figura 7-35).

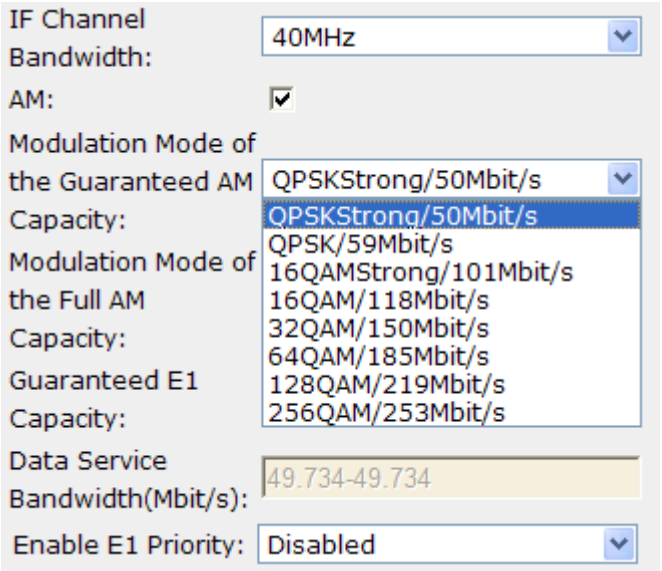


Figura 7-35 Impostazione delle modulazioni sul collegamento radio

Per simulare le condizioni di lavoro del collegamento radio più stressanti, è stata impostata la modulazione più robusta corrispondente a “QPSK Strong” (“Quadrature Phase Shift Keying”), sia per la capacità minima garantita che per le piene prestazioni. Questo consente di limitare la capacità del collegamento a soli 50 Mbps e di poter utilizzare l’interfaccia di rete Fast Ethernet a 100 Mbps di un comune PC per generare un traffico dati sufficiente a saturare la capacità del canale.

7.7.2 Sincronizzazione a piena banda disponibile

In questo scenario si è lasciata l’intera capacità di collegamento (da 50 Mbps) a disposizione dei meccanismi di sincronizzazione tra gli orologi SB-V01GPS (Master) e SB-V01 (Slave); in questo modo si è voluto verificare che il ponte radio non contribuisse significativamente all’incremento della distanza tra il PPS “Master” e quello “Slave”.

Gli orologi, già tra loro sincronizzati con collegamento diretto come nel paragrafo 7.4.2, sono stati scollegati e connessi ciascuno alla porta GE4 della rispettiva terminazione del ponte radio Microwave; nelle successive 48h si è monitorato la distanza tra i PPS degli apparati, per verificare l’influenza del collegamento radio sulla qualità della sincronizzazione di fase (Figura 7-36).

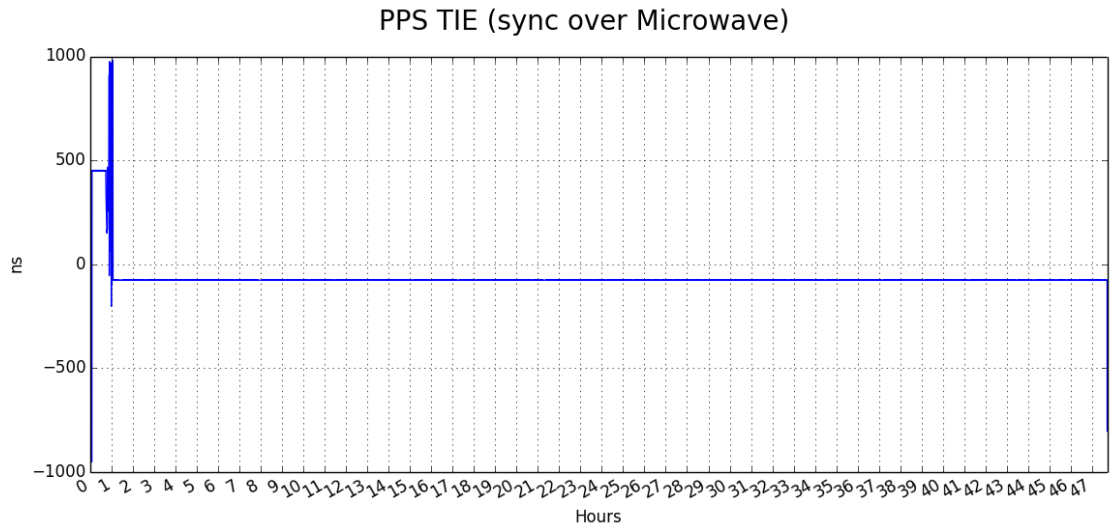


Figura 7-36 TIE del PPS Slave, sincronizzazione su collegamento radio P2P

Si è osservato che gli apparti sono stati in grado di ripristinare gli effetti dell'interruzione della sincronizzazione in meno di un'ora, da un lato scostando il valore atteso dallo 0 di altri 9 ns circa, dall'altro migliorando la stabilità in termini di valore picco-picco. La caratterizzazione statistica del PPS è a seguire, il relativo istogramma è in Figura 7-37.

- Valore atteso $E\{D\} = -76.40ns$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 0.266\ ns$;
- Valore minimo $D_{min} = 66.46\ ns$;
- Valore massimo $D_{MAX} = 71.56\ ns$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 2.77\ ns$.

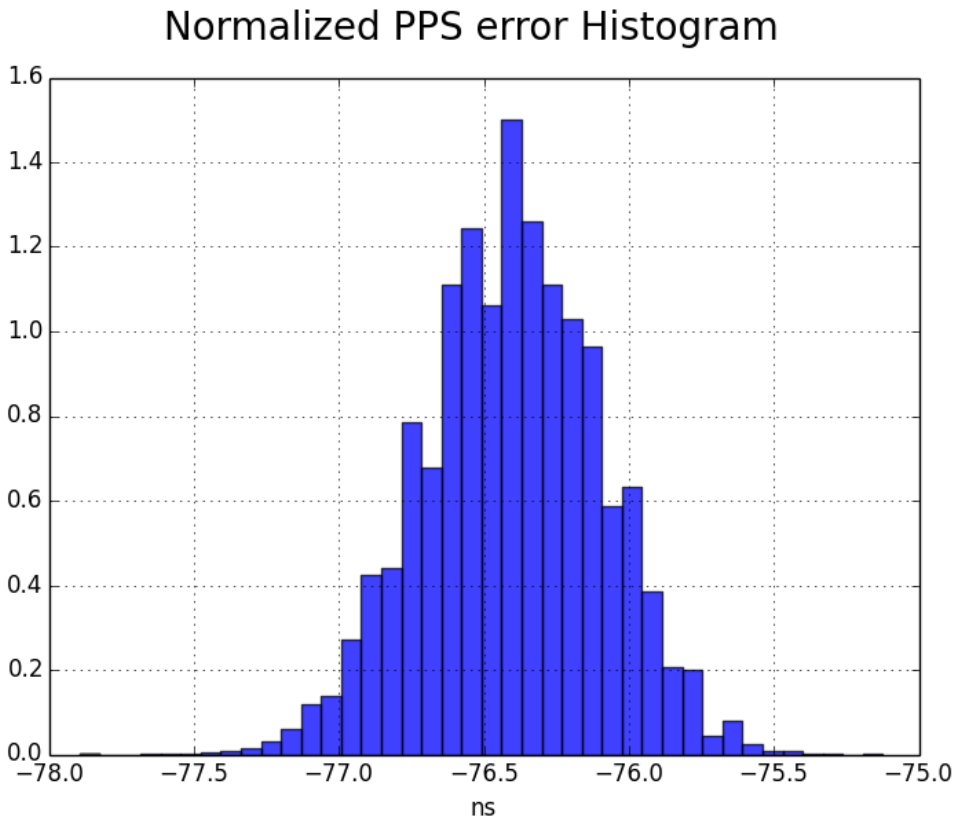


Figura 7-37 Istogramma del PPS, sincronizzazione su collegamento radio P2P

7.7.3 Sincronizzazione a pieno carico di traffico

In questo scenario, rispetto al precedente, sono stati inseriti due PC (PC1 e PC2) collegati alle porte GE2 delle corrispettive terminazioni del collegamento, mentre i due orologi erano stabilmente sincronizzati da 48h, con la distanza tra PPS statisticamente caratterizzata nel paragrafo precedente.

Il PC1, al "Nodo Master" è stato impiegato come generatore di traffico UDP unidirezionale verso il PC2 del "Nodo Slave", utilizzando il software iPerf 2.0.5-3 nella modalità *client* sul "Nodo Master" e *server* sul "Nodo Slave".

Questo test, della durata di 4h, ha lo scopo di verificare l'influenza del traffico di rete congestionante il collegamento radio sulle prestazioni di sincronizzazione tra i due apparati SB-V01.

Il comando utilizzato sul PC1 "client" per generare il traffico UDP con una banda di 50 Mbps è

Iperf –c ip_pc2_server –b 50 –t 14400

Mentre sul PC2 “server” è stato utilizzato il comando

Iperf –s –u

Nelle 4h di durata del test (pari a 14400 secondi) sono stati inviati dal client 83.9 GB ad un ritmo medio di 50 Mbps, di cui il server ha ricevuto solo 79.5 GB con una perdita di pacchetto di circa il 5.2%, come mostrato in Figura 7-38.

```
[  3] 14230.0-14240.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14240.0-14250.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14250.0-14260.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14260.0-14270.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14270.0-14280.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14280.0-14290.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14290.0-14300.0 sec  59.7 MBytes  50.1 Mbits/sec
[  3] 14300.0-14310.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14310.0-14320.0 sec  59.6 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14320.0-14330.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14330.0-14340.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14340.0-14350.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14350.0-14360.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14360.0-14370.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14370.0-14380.0 sec  59.7 MBytes  50.1 Mbits/sec
[  3] 14380.0-14390.0 sec  59.7 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] 14390.0-14400.0 sec  59.6 MBytes  50.0 Mbits/sec
[  3]  0.0-14400.0 sec  83.9 GBytes  50.0 Mbits/sec
[  3] Sent 61276318 datagrams
[  3] Server Report:
[  3]  0.0-14401.2 sec  79.5 GBytes  47.4 Mbits/sec   1.184 ms 3197491/61276317
(5.2%)
[  3]  0.0-14401.2 sec  1 datagrams received out-of-order

C:\Users\test\Desktop\iperf-2.0.5-3-win32\iperf-2.0.5-3-win32>_
```

Figura 7-38 Traffico UDP a 50 Mbps iniettato nel collegamento P2P

I 50 Mbps saturano il collegamento radio (100% carico di traffico) impostato con una modulazione “QPSK Strong” da 50 Mbps (paragrafo 7.7.1), di cui 2 Mbps sono riservati come banda garantita per il solo traffico di sincronizzazione, su base VLAN/porta.

L’andamento del TIE dell’orologio “Slave” nelle 4h di durata del test è riportato in Figura 7-39.

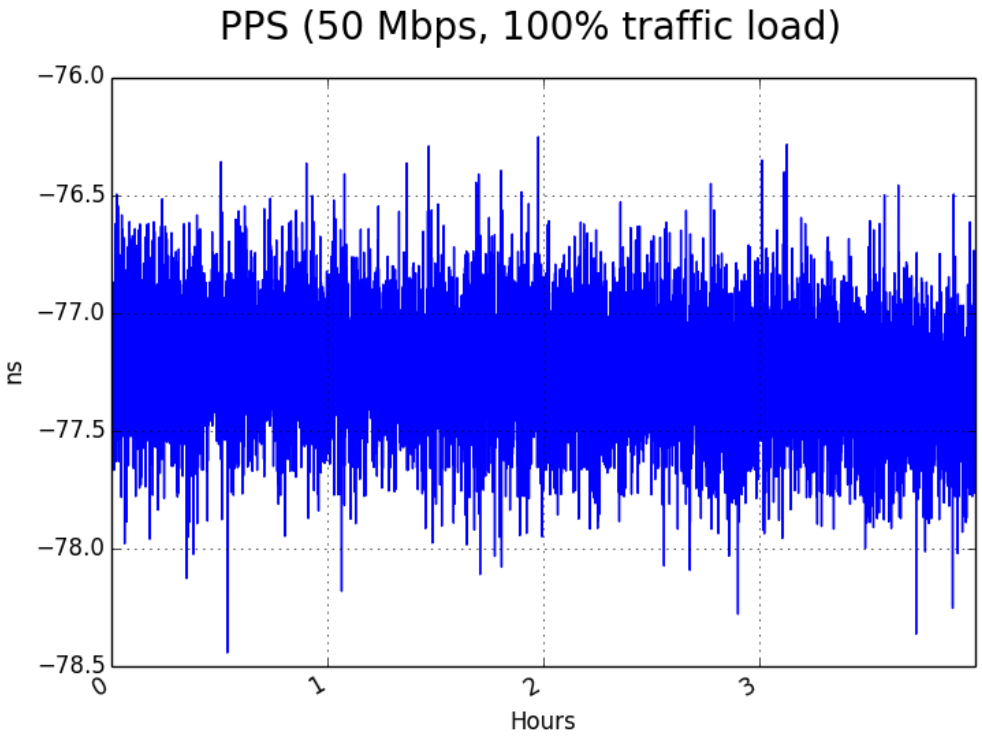


Figura 7-39 TIE del PPS Slave in riferimento al Master, durante iniezione UDP

A seguire, la caratterizzazione statistica del PPS ed il relativo istogramma (Figura 7-40).

- Valore atteso $E\{D\} = -77.24\ ns$;
- Deviazione standard $\sigma_D = 0.248\ ns$;
- Valore minimo $D_{min} = -78.44\ ns$;
- Valore massimo $D_{MAX} = -76.25\ ns$;
- Valore picco-picco $D_{pp} = 2.19\ ns$.

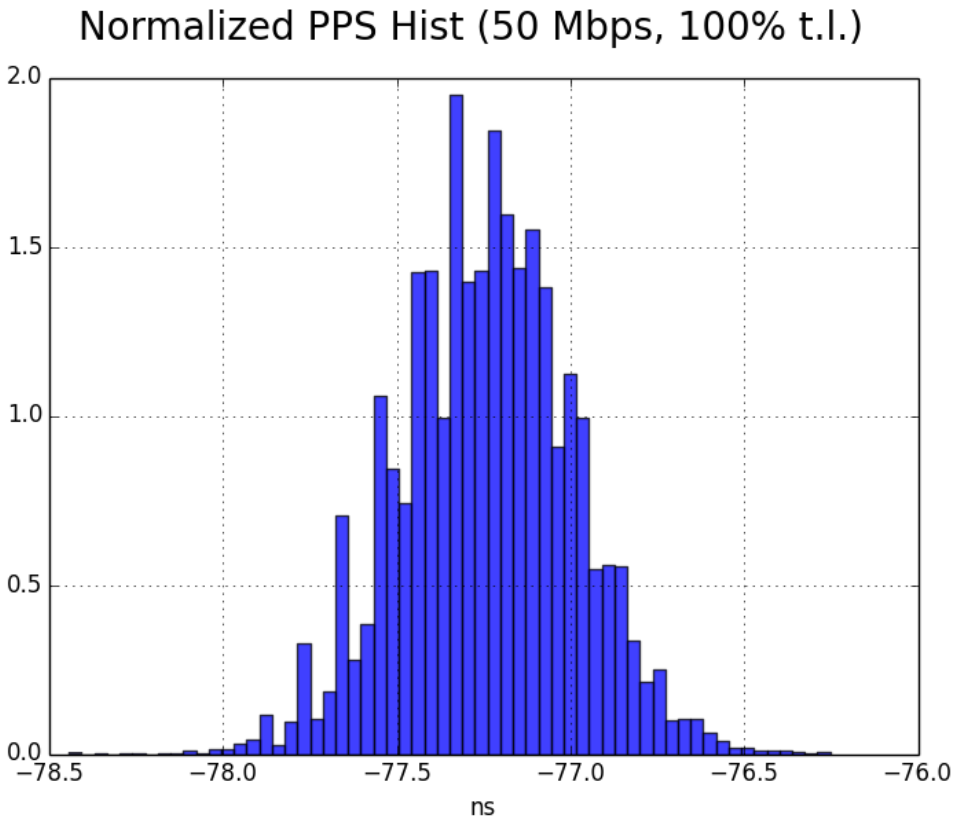


Figura 7-40 Istogramma del PPS Slave durante iniezione di traffico UDP a 50 Mbps

Dai dati ottenuti si nota che il valore atteso è aumentato di meno di 1 ns, ma al contempo è migliorata ulteriormente la stabilità in riferimento ai valori picco-picco di distanza tra PPS.

L'iniezione di traffico UDP a saturare la capacità di canale non ha mostrato significativi impatti sulle performance di sincronizzazione degli orologi, a dimostrare che il meccanismo di prioritizzazione del traffico del ponte radio sono efficaci nel mantenimento dello stato di sincronizzazione tra gli orologi.

7.7.4 Sintonizzazione a pieno carico di traffico

Gli orologi SB-V01 sono collegati alle rispettive terminazioni del ponte radio P2P, e sono tra loro stabilmente sincronizzati in fase e frequenza da oltre 48h, mediante il collegamento radio; sulle porte GE2 fluisce il traffico dati UDP a 50 Mbps generato dal software "iPerf", nel verso dal "Nodo Master" al "Nodo Slave" come nel paragrafo 7.7.3.

In questo scenario si vuole verificare la capacità del "Nodo Slave" di recuperare la sincronizzazione di frequenza fornita dal "Nodo Master" e di ricostruire in uscita, sulla porta predisposta, un segnale a 10 MHz di caratteristiche statistiche comparabili al suo riferimento Master.

L'operazione di verifica viene effettuata portando le uscite a 10 MHz di ciascun orologio sui canali A e B di un oscilloscopio digitale connesso ad un PC e da questo controllato tramite il software PicoScope (Figura 7-41); i campioni dei segnali, acquisiti simultaneamente, hanno la stessa base dei tempi e, dopo essere stati immagazzinati in dei file di testo CSV, possono essere caratterizzati utilizzando uno script Python in *post-processing*.

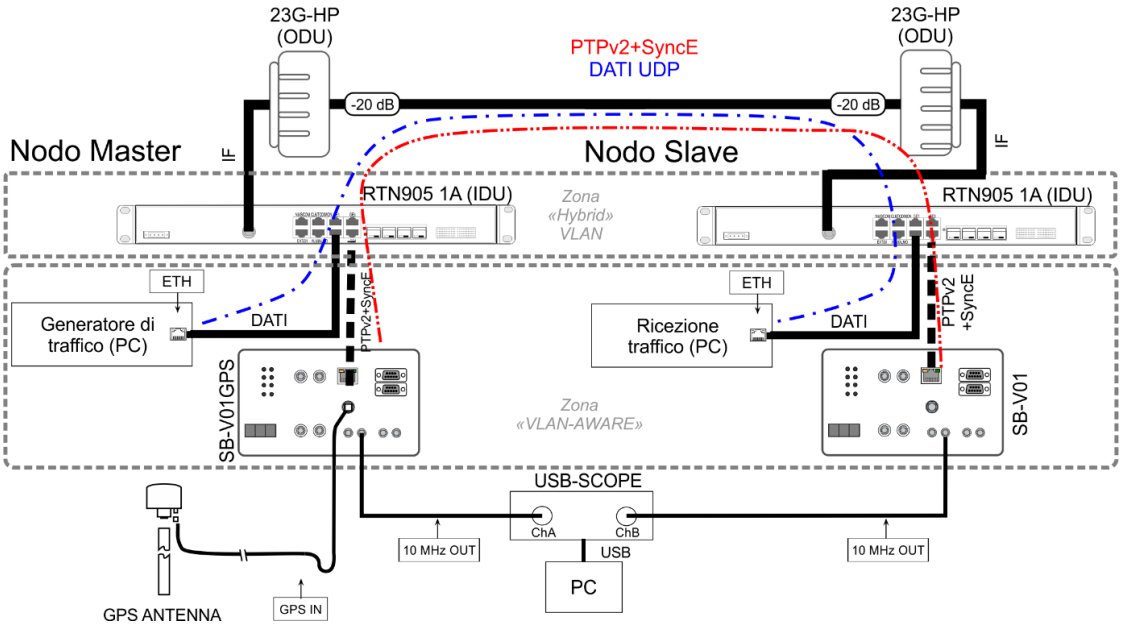


Figura 7-41 Schema di verifica della sintonizzazione su collegamento P2P

I test per la caratterizzazione sono eseguiti su un *set* di 10000 misurazioni di periodo per ciascun segnale in esame. In Figura 7-42 e Figura 7-43 sono riportati rispettivamente i TIE degli orologi Master e Slave, rispetto ad un segnale di riferimento ideale da 10 MHz generato all'interno dello script di elaborazione in Python.

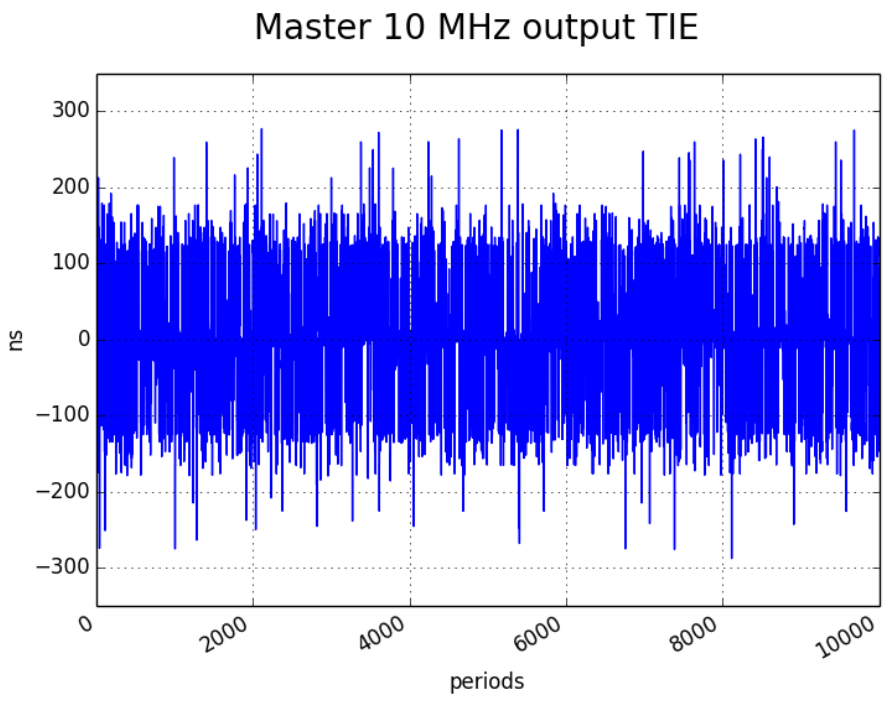


Figura 7-42 TIE uscita 10 MHz dell'orologio Master, durante iniezione UDP4

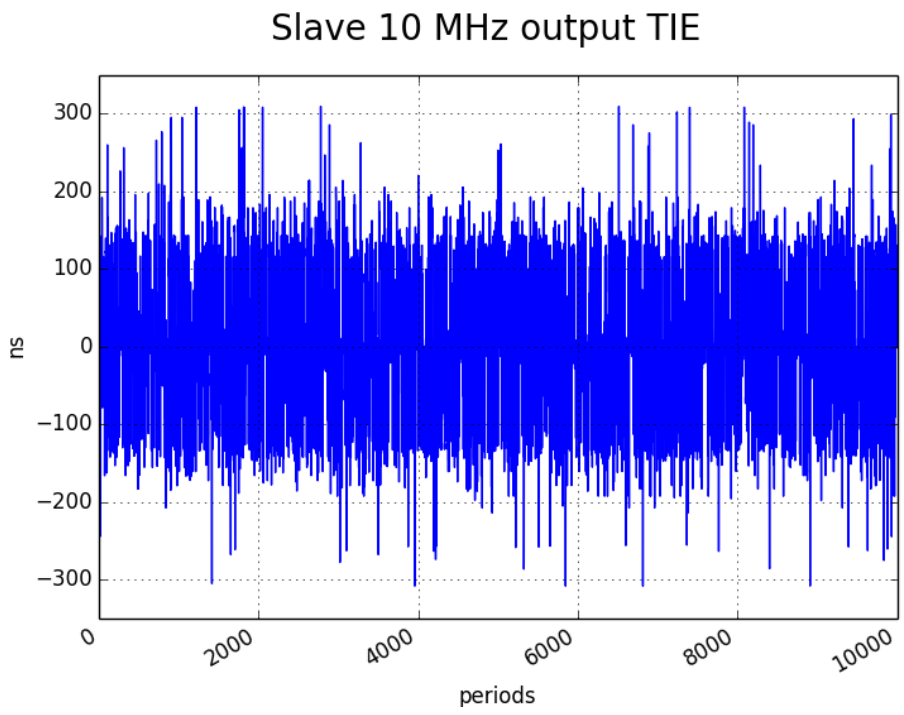


Figura 7-43 TIE dell'uscita 10 MHz dell'orologio Slave, durante iniezione UDP

Nella tabella sotto sono riportati assieme per paragone le caratterizzazioni dei clock Master e Slave.

Tabella 7-3 Caratterizzazioni uscite 10 MHz: confronto master/slave

Parametro	**Master**	**Slave**
Valore atteso $E\{D\}$	$1.08\ ps$	$1.78\ ps$
Deviazione standard σ_D	$74.89\ ps$	$79.92\ ps$
Valore minimo D_{min}	$-287.65\ ps$	$-308.07\ ps$
Valore massimo D_{MAX}	$276.93\ ps$	$309.16\ ps$
Valore picco-picco D_{pp}	$564.58\ ps$	$617.23\ ps$

Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state ricercate e valutate le tecniche di sincronizzazione oggi disponibili e più diffuse nei settori civile ed industriale, operanti sia a livello fisico che supportate da reti a pacchetti, al fine d'individuare quelle più idonee a soddisfare i requisiti di accuratezza necessari per gli scopi di monitoraggio distribuito della Power Quality del "Laboratorio di Misure" e, al contempo, più adatte ad essere trasportare in modo "wireless" mediante un ponte radio a microonde. Nel variegato panorama degli standard per la sincronizzazione sono state individuate ed approfondite le tecniche SyncE e PTPv2, impiegabili in modo complementare in una soluzione ibrida, in grado di fornire prestazioni di sincronizzazione di fase e frequenza superiori alla sola metodologia PTPv2: si è sperimentato infatti che l'utilizzo di una sorgente SyncE per il disciplinamento del meccanismo PTPv2 porta ad una convergenza più rapida del meccanismo stesso, nonché ad una riduzione ulteriore della distanza tra i segnali PPS a confronto.

Prima di procedere alla valutazione delle performance di sincronizzazione raggiungibile sul ponte radio con la strumentazione a disposizione, per quanto riguarda l'informazione di fase, si è ricavato un termine di paragone andando a misurare nel tempo la distanza tra i PPS di due orologi dotati di ricevitori GPS, sottoposti alle stesse condizioni ambientali. Da questo test è emerso che, nonostante gli apparati sottendessero alla stessa porzione di cielo in vista e nelle medesime condizioni di servizio, la distanza tra i corrispettivi PPS può raggiungere gli 80 ns e variare in modo repentino nell'arco di pochi minuti.

Per quanto riguarda il riferimento di frequenza, si è proceduto alla caratterizzazione statistica delle uscite analogiche a 10 MHz dell'orologio scelto come "Master" (SB-V01GPS) quando agganciato alla rete GPS, e dell'orologio "Slave" (SB-V01) operante invece in "free-run"; successivamente, nella valutazione delle performance su ponte radio, si è andato a verificare che la caratterizzazione statistica dell'apparato "Slave" fosse in linea con quella del "Master", a dimostrazione del beneficio introdotto dalla tecnica SyncE nei confronti della stabilità.

Si è valutata dunque l'abilità del ponte radio in configurazione P2P nel trasportare correttamente le informazioni di sincronizzazione in regime di capacità di banda minima, corrispondente ad una condizione radio ambientale fortemente degradata, in cui i blocchi AM ed ATPC portano il ponte radio a lavorare al livello di modulazione più robusto, il "QPSK

Strong" a 50 Mbps. In questo scenario si è prima caratterizzato il comportamento a regime delle uscite PPS e clock, ovverosia trascorse 48h dalla sincronizzazione tra i due orologi; successivamente, utilizzando il software iPerf, si è iniettato sul ponte radio per 4h del traffico UDP a 50 Mbps costanti, su porte fisiche corrispondenti a VLAN separate dal traffico di sincronizzazione. Sull'altra terminazione del ponte si è sperimentata una perdita di pacchetto attorno al 5.2%, mentre la distanza tra PPS non ha subito peggioramenti, a dimostrazione che le tecniche di QoS applicate hanno correttamente conferito al traffico di sincronizzazione una più elevata priorità rispetto al traffico dati.

I test effettuati hanno mostrato dunque che con gli orologi a diposizione è possibile impiegare un ponte radio in collegamento punto-punto per il trasporto a distanza della sincronizzazione, ottenendo delle prestazioni in termini di accuratezza di fase paragonabili alla massima escursione di fase tra due siti, tra loro sincronizzati mediante due ricevitori GPS generici; nonostante l'accuratezza della soluzione basata risulti mediamente inferiore a quella provata con il GPS, essa presenta una migliore stabilità nel tempo attorno al suo valore atteso.

Si può dunque certamente ipotizzare di utilizzare un collegamento radio punto-punto per fornire in primo luogo connettività dati ad un sito di monitoraggio della PQ, in secondo luogo trasmettervi la sincronizzazione tramite tecniche SyncE e PTPv2 come soluzione tampone in circostanze di guasto o d'indisponibilità della sorgente GPS: gli orologi SB-V01GPS possono infatti scegliere automaticamente a *runtime* la sorgente qualitativamente migliore disponibile per disciplinare il proprio orologio locale interno.

Questa possibile soluzione alternativa alla comune sincronizzazione satellitare, in grado di portare la sincronizzazione ad una distanza di circa 10 km (con un solo *hop*) dalla sorgente di riferimento, è in grado di raggiungere capacità di alcune centinaia di Mbps. Inoltre, nonostante lo studio proposto ipotizzi il trasporto dei segnali di sincronizzazione con un singolo *hop*, esso offre lo spunto per indagare, all'occorrenza, anche l'utilizzazione di più ponti radio in cascata (multi-hop) con una radio frequenza di lavoro più bassa, con i quali è possibile ipotizzare di poter coprire distanze nell'ordine delle decine di chilometri: in questo caso è importante caratterizzare temporalmente l'intera catena ed adottare le strategie "on-path" per ridurre quanto più possibile il fenomeno della "Packet Delay Variation", rimanendo in un *time-budget* ancora accettabile per gli scopi di Power Quality.

Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno supportato in ogni forma nella stesura della tesi: a loro va la mia gratitudine, e tengo a precisare che solamente a me spetta la responsabilità per eventuali errori o imprecisioni contenute in questo lavoro.

Un sentito ringraziamento va al mio tutor, il Prof. Maurizio Caciotta, che mi ha accompagnato in questo percorso di formazione, consigliandomi nell'affrontare gli argomenti di approfondimento ed al contempo lasciandomi sempre libero di sperimentare per mio conto.

Ringrazio il Prof. Fabio Leccese, consigliere della Scuola Dottorale EDEMOM, per il supporto datomi in questi anni nella preparazione delle pubblicazioni, ed il Prof. Giuseppe Schirripa Spagnolo, coordinatore della scuola, per il supporto organizzativo del corso di studio.

La mia gratitudine va anche ai miei responsabili d'azienda Rino Buccio e Giovanni Solito, che mi hanno permesso di coniugare quest'attività con quella lavorativa, mettendomi a disposizione il ponte radio su cui operare ed il locale in cui allestire il banco di prova. In questo contesto, ringrazio Digital Instruments srl nelle figure di Marco Muritti e Giulio Mazzoleni per il supporto tecnico sui loro apparati e per il prestito del SyncSwtich con cui sono stati effettuati alcuni dei test. Un pensiero di riconoscimento va inoltre ad Antonio Trifirò, Roberto Diana e Luciano Rampini che, in momenti diversi, mi hanno fatto ottenere in prestito le apparecchiature di misura con cui sono state svolte alcune verifiche sugli apparati in prova. Un affettuoso saluto e ringraziamento agli amici del Laboratorio di Misure, in particolare a Sabino Giarnetti, Stefano Di Pasquale e Marco Cagnetti, sempre disponibili a confronti interessanti e costruttivi.

Ringrazio i miei genitori, i miei suoceri e soprattutto Sara, mia compagna di vita, la quale è stata oltremodo paziente quando, durante questi tre lunghi anni, ho sottratto del tempo al nostro rapporto per dedicarmi al percorso di dottorato.

Non mi è possibile infine citare tutti coloro che in questi anni mi hanno supportato moralmente incitandomi ed interessandosi del mio percorso dottorale: a costoro, amici e conoscenti, un sincero pensiero di gratitudine.

Bibliografia e sitografia

[1] P. Moreira, J. Serrano, T. Wlostowski, P. Loschmidt e G. Gaderer, «White rabbit: Sub-nanosecond timing distribution over ethernet,» *International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, ISPCS 2009.*, pp. 1-5, 2009.

[2] M. Caciotta, S. Giarnetti, F. Leccese e D.Trinca, «Development of an USB Data Acquisition System for Power Qual ity and Smart Metering applications,» *Proc. of 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering – EEEIC2012,* pp. ISBN 978-1-4577-1828-1. 9, May 2012.

[3] M. Caciotta, S. Giarnetti, F. Leccese e D. Trinca, «A Multi-Platform Data Acquisition Device for Power Quality Metrological Certification,» *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering,* n. ISBN: 978-1-4244 -5371-9, 2010.

[4] ANSA, «ANSA.it Economia,» ANSA, 14 01 2016. [Online]. Available: http://www.ansa.it/sito/notizie/economia/2016/01/13/telecom-marchio-va-i-pensione-resta-tim_7e8f4c68-4313-45bb-b203-1e1957a7eafd.html. [Consultato il giorno 01 02 2016].

[5] S. DiPasquale, S.Giarnetti, F.Leccese, D.Trinca, M.Cagnetti e M.Caciotta, «A Distributed Web-Based System for Temporal and Spatial Power Quality Analysis,» in *Power Quality Issues in Distributed Generation*, InTech, 2015.

[6] A. Sutton, «Building better backhaul,» *Engineering Technology Magazine*, vol. 6, n. 5, pp. 72,75, June 2011.

[7] P. Briggs, R. Chundury e J. Olsson, «Carrier Ethernet for mobile backhaul,» *IEEE Communication Magazine,* vol. 48, n. 10, pp. 94-100, Oct. 2010.

[8] Italtel, «Italtel,» 2015. [Online]. Available: http://vintage.italtel.com/en/mobile-backhaul-ita. [Consultato il giorno 12 03 2016].

[9] Y. Serizawa, F. Fujikawa, T. Shioyama, Y. Ishihara, S. Katayama, T. Kase e A. Ishibashi, «Wide-Area Situational Awareness (WASA) system based upon international standards,» *11th International Conference on Developments in Power Systems Protection,* pp. 1 - 6, 2012.

[10] ITU-T, *Time and phase synchronization aspects of packet,* ITU, 2013.

[11] MEF, *A Formula for Deploying IEEE 1588v2 and Synchronous Ethernet: Investigate – Test - Deploy,* MEF, 2012.

[12] Huawei Technologies Co., Ltd., *Synchronous Ethernet and IEEE 1588v2 Technology White Paper,* Shenzhen, Republic of China, 2012.

[13] Silicon Laboratories Inc., Austin, Texas, 2014.

[14] dB Levels, Inc., «http://www.dblevels.com/,» 2012. [Online]. Available: http://www.dblevels.com/IEEE%201588%20Tutorial.ppsx. [Consultato il giorno 24 06 2015].

[15] A. Alpert, «Chronos Technology,» Novembre 2008. [Online]. Available: http://www.chronos.co.uk/files/pdfs/itsf/2006/session4/26-Alpert.pdf. [Consultato il giorno 28 06 2015].

[16] J. Ferrant, M. Gilson, S. Jobert, M. Mayer, L.Montini, M. Ouellette, S. Rodrigues e S. Ruffini, Synchronous Ethernet and IEEE 1588 in Telecoms: Next Generation Synchronization Networks, Hoboken (NJ, USA): Wiley-ISTE, 2013.

[17] M. Lixia, *IEEE 1588 Synchronization in distributed measurement systems for electric power networks,* Cagliari: Università di Cagliari, 2012.

[18] T. Beary, «www.tmjbeary.com,» 13 01 2015. [Online]. Available: https://openclipart.org/detail/191659/gps-satellites-trilateration. [Consultato il giorno 28 03 2016].

[19] Sconosciuto, «Wikipedia,» 2015. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_posizionamento_globale. [Consultato il giorno 05 01 2016].

[20] T. Włostowski, *Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network*, Varsavia: Warsaw University of Technology, 2011.

[21] «Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics,» National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing, 05 02 2016. [Online]. Available: http://www.gps.gov/systems/gps/control/. [Consultato il giorno 08 02 2016].

[22] The Royal Academy of Engineering, *Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities*, Londra (UK): The Royal Academy of Engineering, 2011.

[23] R. Clarke e R. Knake, Cyber War: The Next Threat to National Security and What to Do About It, New York (NY, USA): Ecco, 2011.

[24] BBC, «'North Korea jamming' hits South Korea flights,» BBC, 02 05 2012. [Online]. Available: http://www.bbc.com/news/world-asia-17922021. [Consultato il giorno 13 03 2016].

[25] C. Curry, «Chronos Technology Ltd,» 22 02 2012. [Online]. Available: http://www.chronos.co.uk/files/pdfs/pres/2012/GNSSVulnerability/Chronos_GAARDIAN_SENTINEL_Update.pdf. [Consultato il giorno 13 03 2016].

[26] T. C. T. a. T. G. R. C. Council, *IRIG serial time code formats*, New Mexico: Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range, 2004.

[27] Cyber Sciences, «Overview of IRIG-B Time Code, technical note 102,» 2014. [Online]. Available: http://www.cyber-sciences.com/documents/TN-102_IRIG-B.pdf. [Consultato il giorno 01 03 2016].

[28] R. Grohman, L. Mellenbruch e F.J.Sowic, *Special Hardware for ARL Analysis of ACODAC Data - Technical Report*, Austin: Texas University at Austin, 1974.

[29] Oscilloquartz S.A., *Synchronization Networks Based on Synchronous Ethernet*, Switzerland: Oscilloquartz, 2009.

[30] L. Montini, *Synchronization: state of the art, standards, options and solutions,* Barcellona (Spain): Cisco, 2013.

[31] Albedo Telecom, *Synchronous Ethernet explained - White Paper,* Barcellona (Spain): Albedo Telecom, 2012.

[32] D. Mills, *DCNET Internet Clock Service,* COMSAT Laboratories, 1981.

[33] V. Pettiti, F. Cordara e R. Costa, «INRiM - Campioni atomici al cesio,» [Online]. Available: http://www.inrim.it/res/tf/download/campioni.pdf. [Consultato il giorno 01 03 2016].

[34] D. L. Mills, «Network Time Protocol Version 4 Reference and Implementation Guide,» *NTP Working Group, Technical Report 06-6-1,* p. 90, 2006.

[35] G. Huston, «Protocol Basics – The Network Time Protocol,» APNIC Lab, 10 03 2014. [Online]. Available: https://labs.apnic.net/?p=462. [Consultato il giorno 28 03 2016].

[36] K. Marzullo, *Maintaining the Time in a Distributed System: An Example of a Loosely-Coupled Distributed Service,* Department of Electrical Engineering, Stanford University, 1984.

[37] NIST, «NIST Home, EL, Intelligent Systems Division, IEEE, Introduction to IEEE 1588,» National Institute of Standards and Technology, 11 09 2014. [Online]. Available: http://www.nist.gov/el/isd/ieee/intro1588.cfm. [Consultato il giorno 10 03 2016].

[38] J. Eidson, «A Detailed Analysis of IEEE 1588,» in *Measurement, Control and Communication using IEEE 1588* , Londra, Springer, 2006, pp. 61-131.

[39] C. Gordon, *Introduction to IEEE 1588 & Transparent Clocks - White Paper,* Wellington (Nuova Zelanda): Tekron, 2009.

[40] J. Eidson, *IEEE-1588 Standard Version 2 - A Tutorial,* Palo Alto (USA): Agilent Technologies, 2006.

[41] M. Princ, *Implementing an IEEE 1588 V2 Node on the Kinetis K60 Using the Freescale MQX IEEE 1588 Communication Library,* Roznov Czech System Center: Freescale Semiconductor, 2011.

[42] K. Correll e N. Barendt, «Design considerations for software only implementations of the IEEE 1588 precision time protocol,» *Conference on IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems,* 2006.

[43] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, S. Rinaldi e A. Taroni, «Synchronization of the probes of a distributed,» in *Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and,* Vienna, IEEE ISPCS 2007, 2007, p. 33–40.

[44] T. Cook, *Proving Performance of Packet Sync Equipment and Networks,* San Jose (CA, USA): WSTS2013, 2013.

[45] Hirschmann, *Precision Clock Synchronization, The Standard IEEE 1588 - White Paper 1.2,* Hirschmann.

[46] H. Weibel, *Technology Update on IEEE 1588: The Second Edition of the High Precision Clock Synchronization Protocol,* Winterthur (Switzerland): Zurich University of Applied Sciences Institute of Embedded Systems (InES), 2009.

[47] J. Chapman, R. Chopra e L. Montini, *The DOCSIS Timing Protocol (DTP) Generating Precision Timing Services from a DOCSIS System,* Boston (MA, USA): NCTA Spring Technical Forum, 2011.

[48] H. Weibel, *IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol and Synchronous Ethernet,* Zurich University of Applied Sciences, 2012.

[49] Veex inc., *SyncE/1588v2 Basics (poster),* Veex inc., 2010.

[50] Symmetricom Inc., *Synchronization for Next Generation Networks—The PTP Telecom Profile (White Paper),* San Jose (CA, USA): Symmetricom Inc., 2011.

[51] Alcatel-Lucent, «7750 SR OS Basic System Configuration Guide 11.0r5,» Alcatel-Lucent, 2012. [Online]. Available: https://infoproducts.alcatel-

lucent.com/html/0_add-h-f/93-0070-10-01/7750_SR_OS_System_Basics_Guide/images/System-Intro.15.1.05.jpg. [Consultato il giorno 28 03 2016].

[52] T. Cook, *Delivery of Time & Timing using Packet Networks,* Nizza (France): ITSF2012, 2012.

[53] Calnex Solutions Ltd, *Meeting the 1us challenge: Testing Boundary Clocks and Transparent Clock (Application Note),* Linlithgow (UK): Calnex Solutions Ltd, 2012.

[54] D. M. H. Weibel, *Pre-Standard Prototype Implementation of an End-to-End Transparent Clock,* Winterthur (Switzerland): Zurich University of Applied Sciences, 2006.

[55] MEF, «MEF Wiki Home Page,» MEF, 2016. [Online]. Available: https://wiki.mef.net/pages/viewpage.action?pageId=29230774. [Consultato il giorno 01 03 2016].

[56] A. Malibayev, S. Nasre, Y. Kao e D. Dash, *The applicability of 1588 Time Synchronization over Packet Delay Variance Compensation Scheme in the Wireless Backhaul Network,* Boulder (CO, USA): University of Colorado at Boulder, 2014.

[57] O. P. Valls, *GPS time synchronization through IEEE-1588,* Praga: Università Tecnica Ceca di Praga, 2011.

[58] D. Arnold, «What Makes a Master the Best?,» News and Tutorials from Meinberg, 14 11 2013. [Online]. Available: http://blog.meinbergglobal.com/2013/11/14/makes-master-best/. [Consultato il giorno 23 06 2015].

[59] J. Lewis, *se of Combined Synchronous Ethernet & IEEE-1588 in Wireless TDD applications,* Zarlink, 2009.

[60] Texas Instruments, *AN-1730 DP83640 Synchronous Ethernet Mode: Achieving Sub-Nanosecond Accuracy in PTP Applications,* Dallas (TX, USA): Texas Instruments, 2013.

[61] P. Moreira e I. Darwazeh, «Digital femtosecond time difference circuit for CERN's timing system,» *London Communications Symposium 2011,* 2011.

[62] D. Sullivan, D. Allan, D. Howe e F. Walls, *NIST Technical Note 1337, "Characterization of Clocks and Oscillators,* NIST, 1990.

[63] S. Palermo, «ECEN 720: High-Speed Links Circuits and Systems,» 2015. [Online]. Available: http://www.ece.tamu.edu/~spalermo/ecen720.html. [Consultato il giorno 13 09 2015].

[64] L. Cruz, *Jitter Analysis,* Porto (Portogallo): Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

[65] National Instruments s.r.l., «Understanding and Characterizing Timing Jitter,» National Instruments, 2016. [Online]. Available: http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/mi/lang/en/pg/1/sn/n17:mi,n21:40/fmid/8881/. [Consultato il giorno 13 03 2016].

[66] SiTime Corporation, *Clock Jitter Definitions and Measurement Methods (AN10007 rev.1.2),* Sunnyvale (CA, USA): SiTime Corporation, 2014.

[67] Tektronix, *Jitter Analysis: A Brief Guide to Jitter (Reference),* Tektronix, 2005.

[68] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling e B. Flannery, Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing, New York (NY, USA): Cambridge University Press, 2007.

[69] S. Bregni, «Measurement of Maximum Time Interval Error for Telecommunications Clock Stability Characterization,» *IEEE Transactions on instrumentation and measurement,* vol. 45, n. 5, pp. 900 - 906, 1996.

[70] JDSU, *Real-Time Wander Measurement,* Milpitas (CA, USA): JDS Uniphase Corporation, 2008.

[71] A. Dobrogowski e M. Kasznia, *Methods for real-time calculation of Maximum Time Interval Error,* Poznań (PL): Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne, 2008.

[72] A. Pietiläinen, *Packet TDEV, MTIE, and MATIE for Estimating the Frequency and Phase Stability of a Packet Slave Clock,* Nokia Siemens Networks , 2008.

[73] Calnex Solutions, *Jitter and Wander in Sync-E , Calnex Technical Brief CX3002 V9,* Calnex Solutions, 2011.

[74] Anritsu Corporation, *MP1580A Portable 2.5G/10G Analyzer (Application Note),* Tokyo (Japan): Anritsu Corporation, 2001.

[75] Agilent Technologies, *Accelerate Design Verification by Characterizing Clock Jitter Using Phase Noise Measurements - White Paper,* USA: Agilent Technologies, 2008.

[76] Tektronix Inc., *Jitter Analysis: A Brief Guide to Jitter - Reference,* USA: Tektronix Inc., 2005.

[77] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatziargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor e V. Vittal, «Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance,» *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 20, n. 4, p. 1922 – 1928, 2005.

[78] M. A. Baseer, «Travelling Waves for Finding the Fault Location in Transmission Lines,» *Journal Electrical and Electronic Engineering,* vol. 1, n. 1, pp. 1-19, 2013.

[79] B. Baumgartner, C. Riesch e M. Rudigier, *IEEE 1588/PTP: The Future of Time Synchronization in the Electric Power Industry,* Klaus (Austria): OMICRON electronics GmbH, 2015.

[80] V. Pallares-Lopez, A. Moreno-Munoz, M. Gonzalez-Redondo, R. Real-Calvo, I. M. Moreno-Garcia, J. M. F. Arias, A. G. d. Castro e J. J. G. d. l. Rosa,

«Synchrophasor for Smart Grid with IEEE 1588-2008,» *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE),* pp. 1237 - 1242, 2011.

[81] M. Jackson, «BT Trials Wireless-to-the-Cabinet VDSL Broadband in the Village of Westow,» ISPreview, 10 02 2015. [Online]. Available: http://www.ispreview.co.uk/index.php/2015/02/bt-trials-wireless-cabinet-vdsl-broadband-village-westow.html. [Consultato il giorno 13 03 2016].

[82] Huawei Technologies Co., Ltd, *Future-Oriented Microwave Transport Network v.1.1,* Huawei Technologies Co., Ltd, 2014.

[83] MEF, *Microwave Technologies for Carrier Ethernet Services,* Los Angeles (CA, USA): MEF, 2011.

[84] T. Naveh, *Mobile Backhaul: Fiber vs. Microwave (White Paper),* Ceragon Networks Ltd, 2009.

[85] Huawei Technologies Co., Ltd, *OptiX RTN 905 Radio Transmission System - Feature Description 3,* Huawei Technologies Co., Ltd, 2012.

[86] Huawei Technologies Co., Ltd, *OptiX RTN 905 Radio Transmission System - Product Description 2,* Huawei Technologies Co., Ltd, 2012.

[87] J. Wells, Multigigabit Microwave and Millimeter-Wave Wireless Communications, Nordwood (MA, USA): Artech House, 2010.

[88] A. Graham, N. Kirkman e P. M. Paul, Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands: A Practical Approach, Chippenham (UK): Wiley & Sons, 2006.

[89] Alcatel-Lucent, *Synchronization in Microwave Networks (White Paper),* Alcatel-Lucent, 2011.

[90] Ceragon Networks, *Best practices for implementing IEEE-1588 in Wireless Backhaul - Technical Brief,* Ceragon Networks, 2011.

[91] L. Montini, *Utilization of IEEE 1588-2008 BC and TC in Telecom Environment,* Roma (Italy): ITSF 2009, 2009.

[92] Huawei Technology Co., Ltd., Ethernet OAM Technology White Paper 2.0, Huawei Technology Co., Ltd., 2015.

[93] Juniper Networks Inc., *Ethernet OAM - A Technical Overview (White Paper)*, Sunnyvale (CA, USA): Juniper Networks Inc., 2010.

[94] I. Genna, «Internet e neutralità della rete,» *Consumatori Diritti e Mercato,* n. 1, 2010.

[95] Digital Instruments srl, *SB-V01 All-in-one timing solution for smart grid and substation automation,* Bresso (Italy): Digital Instruments srl.

[96] Huawei Technologies Co., Inc., *OptiX RTN 905 Radio Transmission System IDU Hardware Description,* Shenzhen: Huawei Technologies Co., Inc., 2012.

[97] O. K. Tonguz, N. Wisitpongphan, J. S. Parikh, F. Bai, P. Mudalige e V. K. Sadekar, «On the broadcast storm problem in a mobile ad hoc network,» *3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems,* pp. 1-11, 2006.

[98] Digital Instruments srl, *Gigabit Ethernet Synchronous Switch - Manual rev 1.1,* Bresso (MI, IT)): Digital Instruments srl, 2014.

[99] Times Microwave Systems, «Reference Data and Application Notes,» 2016. [Online]. Available: https://www.timesmicrowave.com/documents/resources/TL16p63refdataappnotes.pdf. [Consultato il giorno 13 03 2016].

[100] Python Software Foundation, «Python.org,» 23 05 2015. [Online]. Available: https://www.python.org/downloads/release/python-2710/. [Consultato il giorno 20 01 2016].

[101] E. Software, «RS232 Data Logger,» 2016. [Online]. Available: http://www.eltima.com/download/rs232_data_logger.exe. [Consultato il giorno 15 03 2016].

[102] J. Dugan, J. Estabrook, J. Ferbuson, A. Gallatin, M. Gates, K. Gibbs, S. Hemminger, N. Jones, F. Qin, G. Renker, A. Tirumala e A. Warshavsky, «iPerf

- The network bandwidth measurement tool,» ESnet, 2016. [Online]. Available: https://iperf.fr/. [Consultato il giorno 01 03 2016].

[103] A. Botta, A. Dainotti e A. Pescapè, «A tool for the generation of realistic network workload for emerging networ-king scenarios,» *Computer Networks (Elsevier)*, vol. 56, n. 15, pp. 3531-3547, 2012.

[104] Ceragon, *Best practices for implementing IEEE-1588 in Wireless Backhaul - Technical Brief*, Ceragon, 2011.

[105] Ceragon, *Best practices for implementing IEEE-1588 in Wireless Backhaul*, Ceragon, 2011.

[106] A. Pietiläinen, *Packet TDEV, MTIE and MATIE for estimating the frequency and phase stability of a packet slave clock*, Nokia Siemens Networks, 2008.

Elenco delle Figure

Figura 1-1 Architettura sito di monitoraggio per la Power Quality 13
Figura 1-2 Esempio di sincronizzazione di frequenza 19
Figura 1-3 Esempio di sincronizzazione di fase 19
Figura 1-4 Esempio di sincronizzazione di reti SONET/SDH..... 20
Figura 1-5 Schema gerarchico di tracciabilità a *"stratum"* 21
Figura 1-6 Timing Clock Distribution: differenza tra "External" e "Line" 21
Figura 1-7 Corrispondenza tra Network Elements tra reti SDH e SONET 22
Figura 1-8 Controllo di flusso nelle reti a pacchetto..... 23
Figura 1-9 Temporizzazioni sincrone e asincrone 23
Figura 2-1 Geolocalizzazione satellitare GPS [18]..... 27
Figura 2-2 Schema di funzionamento del GPS 28
Figura 2-3 Distribuzione geografica dei centri di controllo a terra per il GPS 29
Figura 2-4 Jammer GNSS veicolare 34
Figura 2-5 Signal Identification Numbers negli IRIG time-codes..... 36
Figura 2-6 Esempio di codifica IRIG..... 40
Figura 2-7 Temporizzazione tra elementi di rete SyncE..... 41
Figura 2-8 Gerarchia degli elementi per la sintonizzazione SyncE 42
Figura 2-9 Holdover Protection 43
Figura 2-10 Comparazione delle catene di riferimento SyncE, SDH e SONET 44
Figura 2-11 Differenza architetturale tra interfacce Ethernet native e SyncE [11]..... 44
Figura 2-12 Trasmissione di pacchetti con temporizzazione asincrona e SyncE [13].... 45
Figura 2-13 Struttura del messaggio ESMC 49
Figura 2-14 Gerarchia a "stratum" per gli orologi NTP 52
Figura 2-15 Formato del pacchetto NTP..... 54
Figura 2-16 Pacchetto NTP analizzato con software "Wireshark"..... 57
Figura 2-17 Meccanismo di messaggi NTP 58
Figura 2-18 Timestamping PTP software 61
Figura 2-19 Timestamping PTP Hardware assistito 61
Figura 2-20 Supporto "On-Path" per le reti PTP 63

Figura 2-21 Architettura di una “Timestamp Unit” software 64
Figura 2-22 Meccanismo di messaggistica PTP Hardware Assistito..... 65
Figura 2-23 Architettura di una TSU hardware assistita da interfaccia MII..... 66
Figura 2-24 Esempio di meccanismo di sincronizzazione PTP 70
Figura 2-25 Differenza di avvolgimento in cavi “*twisted-pairs*” Ethernet 71
Figura 2-26 Analogie tra tecniche PTP, ACR ed NTP 71
Figura 2-27 Messaggio PTP nel frame Ethernet 72
Figura 2-28 Scambio messaggi PTP in modalità “Unicast” [51]..... 78
Figura 2-29 Formato del messaggio PTP [49] 79
Figura 2-30 Boundary Clock..... 83
Figura 2-31 Effetti dei Boundary Clock sull’accumulo della PDV 83
Figura 2-32 Boundary Clock: *hop* di separazione tra Server e Client 85
Figura 2-33 Transparent Clock: compensazione del ritardo di transito del pacchetto.... 86
Figura 2-34 Effetti dei Transparent Clock sulla PDV..... 87
Figura 2-35 Transparent Clock 88
Figura 2-36 Misure del ritardo “End-to-End” e “Peer-to-Peer” [48]..... 89
Figura 2-37 Transparent Clock: meccanismo “End-to-End” 90
Figura 2-38 Transparent Clock: meccanismo “Peer-to-Peer”..... 90
Figura 2-39 Catena di temporizzazione PTP attraverso nodi asincroni [13] 91
Figura 2-40 Meccanismo decisionale “Best Master Clock” 93
Figura 2-41 Diagramma di flusso algoritmo SD..... 96
Figura 2-42 Diagramma di flusso algoritmo BMC 97
Figura 2-43 Esempio di gerarchia ottenibile con BMCA 97
Figura 2-44 Sincronizzazione PTP senza supporto SyncE 105
Figura 2-45 Sincronizzazione PTP con supporto SyncE (ibrida) 105
Figura 2-46 Relazioni tra IEEE1588-2008 e SDO..... 113
Figura 3-1 Jitter e SNR nel diagramma “ad occhio”..... 116
Figura 3-2 Jitter deterministico 117
Figura 3-3 Classi di jitter 118
Figura 3-4 Modulazione di fase in presenza di jitter..... 120
Figura 3-5 Jitter periodico..... 121

Figura 3-6 Jitter dipendente dai dati....122
Figura 3-7 Duty cycle di un segnale di clock....122
Figura 3-8 Distorsione del duty cycle (DCD)....123
Figura 3-9 DCD: fronti del segnale nel diagramma “ad occhio”....123
Figura 3-10 PDF risultante da una DCD....124
Figura 3-11 Pulse Width Distortion (PWD)....124
Figura 3-12 Jitter casuale....126
Figura 3-13 Jitter totale....128
Figura 3-14 Jitter: persistenza infinita su oscilloscopio....129
Figura 3-15 Cicli di clock per il Long-Term Jitter....132
Figura 3-16 Time Interval Error....133
Figura 3-17 Time Interval Error in relazione al periodo di clock [66]....134
Figura 3-18 Campionamento ed interpolazione negli oscilloscopi digitali....136
Figura 3-19 Maximum Time Interval Error....138
Figura 3-20 Rimozione dell’offset nel Maximum Relative Time Interval Error....139
Figura 3-21 Maschera ITU-T G.810 per l’MTIE....139
Figura 3-22 Time Deviation (TDEV)....140
Figura 3-23 Codifica bipolare, RZ e NRZ....142
Figura 3-24 Keysight N4906B Serial BERT....143
Figura 3-25 Anritsu MP1797A – 40G Jitter Analyzer....144
Figura 3-26 [Keysight 5372A Frequency & Time Interval Analyzer....145
Figura 3-27 Keysight E5052B SSA....146
Figura 3-28 Infinium DCA-X 86100D Wide-Bandwidth Oscilloscope....147
Figura 4-1 Travelling Wave Fault Location....151
Figura 4-2 Sincronizzazione nelle sottostazioni di energia....152
Figura 5-1 Microwave all-indoor: Aviat Networks TRuepoint 6500....160
Figura 5-2 Microwave in configurazione “split-mount”....161
Figura 5-3 Microwave in configurazione “all-outdoor”....162
Figura 5-4 Zona di Fresnel....163
Figura 5-5 Ponti radio in impiego “Wireless To The Cabinet”....166
Figura 5-6 Bande licenziate e libere in relazione alla distanza di collegamento [82]....167

Figura 5-7 Composizione spettrale delle bande licenziate e libere 167
Figura 5-8 Multiservice Aggregation Layer 171
Figura 5-9 Adaptive Modulation e capacità di canale [85] 173
Figura 5-10 Combinazione tecniche XPIC e CCDP [86] 176
Figura 5-11 Accoppiamenti d'antenna *direct* e *split mount* 176
Figura 5-12 Adjacent Channel Alternated Polarization (ACAP) 177
Figura 5-13 Frequency Diversity 177
Figura 5-14 Schemi di diversità più comuni 179
Figura 5-15 Sincronizzazione per servizi tradizionali di telefonia mobile [89] 181
Figura 5-16 Sincronizzazione di fase per tecnologie mobili moderne [89] 181
Figura 5-17 Rete di sincronizzazione non omogenea [89] 183
Figura 5-18 Riduzione della PDV con supporto funzionalità "On-Path" nativo 184
Figura 5-19 Strati della OAM 186
Figura 6-1 Configurazione "a stella" per la distribuzione della sincronizzazione 187
Figura 6-2 Estensione della configurazione di distribuzione "a stella" 188
Figura 6-3 Schema di collegamento MW punto-punto per la Power Quality 189
Figura 6-4 Collocazione degli apparati di test in armadio rack 192
Figura 6-5 Schema del banco di test per la sincronizzazione su ponte-radio 193
Figura 6-6 Armadio rack allestito per il banco di prova 193
Figura 6-7 Digital Instruments SB-V01 194
Figura 6-8 Schematizzazione del pannello frontale SB-V01GPS 195
Figura 6-9 SB-V01, esempio di applicazione con IED [95] 196
Figura 6-10 SB-V01GPS, segnali di uscita agganciati in fase 198
Figura 6-11 Mean Well CLG-100-48 199
Figura 6-12 Schematizzazione pannello frontale unità di energia 199
Figura 6-13 OptiX RTN905, IDU ed ODU 201
Figura 6-14 Huawei OptiX RTN905 IDU [96] 202
Figura 6-15 Schema pannello frontale OptiX RTN905 IDU [96] 203
Figura 6-16 Schema a blocchi IDU [96] 203
Figura 6-17 OptiX RTN905 ODU [96] 204
Figura 6-18 Schema a blocchi ODU [86] 207

Figura 6-19 Configurazione delle latenze da interfaccia di gestione WebLCT 209
Figura 6-20 Trasporto sorgenti di riferimento fisiche su ponti-radio [85] 210
Figura 6-21 Hop nella catena di sincronizzazione Microwave [85] 211
Figura 6-22 Classificazione e *profilazione* del traffico [86] 213
Figura 6-23 Incapsulamento PTP di livello 2 in frame IEEE 802.1q 213
Figura 6-24 Incapsulamento PTP a livello IP in frame IEEE 802.1q 214
Figura 6-25 Esempio d'impiego reti VLAN 215
Figura 6-26 Frame Ethernet *taggato* 216
Figura 6-27 VLAN: collegamenti *access* e *trunk* 218
Figura 6-28 Digital Instruments SyncSwitch [98] 221
Figura 6-29 Schema pannello posteriore SyncSwitch [98] 221
Figura 7-1 Compensazione del ritardo dovuto al cavo GPS, nei sistemi SB-V01 226
Figura 7-2 Setup caratterizzazione apparati GPS 227
Figura 7-3 PicoScope: distanza segnale PPS tra apparati GPS 228
Figura 7-4 Sentenze NMEA 231
Figura 7-5 Grafico dei satelliti in vista e stato del "fix" 231
Figura 7-6 Sorgenti di riferimento multiple per SB-V01 232
Figura 7-7 Andamento temporale della differenza tra PPS dei ricevitori 233
Figura 7-8 Istogramma normalizzato dell'errore sul PPS 234
Figura 7-9 GPS: Uscite riferimenti di frequenza a 10 MHz 236
Figura 7-10 Interpolazione tra campioni per la stima dello "zero-crossing" 237
Figura 7-11 TIE dell'uscita a 10 MHz SyncSwitch quando agganciato alla rete GPS . 238
Figura 7-12 SyncSwitch (GPS): Istogramma normalizzato errore PPS 239
Figura 7-13 TIE dell'uscita a 10 MHz SB-V01 quando agganciato alla rete GPS 240
Figura 7-14 SB-V01GPS: Istogramma normalizzato errore PPS 241
Figura 7-15 Setup caratterizzazione apparati in sincronizzazione diretta PTPv2 242
Figura 7-16 Convergenza della sincronizzazione PTPv2 diretta 243
Figura 7-17 TIE tra apparati in sincronizzazione diretta ibrida PTPv2/SyncE 245
Figura 7-18 Benefici introdotti dal SyncE sul PTPv2 246
Figura 7-19 Schema di collegamento diretto apparati SB-V01 247
Figura 7-20 Stato dei satelliti in vista da SB-V01GPS 248

Figura 7-21 Distanza tra PPS negli apparati della famiglia SB-V01 249
Figura 7-22 Istogramma dell'errore del PPS Slave rispetto al Master 250
Figura 7-23 Foto del banco di prova completo 251
Figura 7-24 Setup del Nodo Master 252
Figura 7-25 Configurazione radio delle ODU 620 23GHP 254
Figura 7-26 Setup del Nodo Slave 256
Figura 7-27 iPerf Server 258
Figura 7-28 JPerf – interfaccia GUI per iPerf 259
Figura 7-29 Architettura moduli software D-ITG 260
Figura 7-30 D-ITG in *thread* singolo 261
Figura 7-31 D-ITG in *thread* multipli 261
Figura 7-32 Interfaccia GUI per D-ITG 262
Figura 7-33 Frame Ethernet e livelli di protocollo di rete 265
Figura 7-34 Vista parziale sezione "Radio Link Configuration" del *tool* WebLCT 267
Figura 7-35 Impostazione delle modulazioni sul collegamento radio 268
Figura 7-36 TIE del PPS Slave, sincronizzazione su collegamento radio P2P 269
Figura 7-37 Istogramma del PPS, sincronizzazione su collegamento radio P2P 270
Figura 7-38 Traffico UDP a 50 Mbps iniettato nel collegamento P2P 271
Figura 7-39 TIE del PPS Slave in riferimento al Master, durante iniezione UDP 272
Figura 7-40 Istogramma del PPS Slave durante iniezione di traffico UDP a 50 Mbps 273
Figura 7-41 Schema di verifica della sintonizzazione su collegamento P2P 274
Figura 7-42 TIE uscita 10 MHz dell'orologio Master, durante iniezione UDP4 275
Figura 7-43 TIE dell'uscita 10 MHz dell'orologio Slave, durante iniezione UDP 275

Elenco delle Tabelle

Tabella 1-1 Requisiti di accuratezza di fase per ambito applicativo 17
Tabella 2-1 Formati degli IRIG Time Codes 35
Tabella 2-2 Codifica del suffisso IRIG 38
Tabella 2-3 Formati di codice ammissibile per IRIG 39
Tabella 2-4 SyncE: prestazioni caratteristiche EEC Option1 ed Option2 46
Tabella 2-5 Livelli di qualità nella messaggistica SSM 48
Tabella 2-6 Descrizione campi dello Ethernet Synchronization Messaging Channel 50
Tabella 2-7 Parametri globali protocollo NTP 53
Tabella 2-8 Interfacce di sincronizzazione Physical Layer e Packet Layer 60
Tabella 2-9 Descrizione messaggi PTP di tipologia “Event” 73
Tabella 2-10 Descrizione messaggi PTP di tipologia “General” 74
Tabella 2-11 Descrizione *header* del messaggio PTP 81
Tabella 2-12 Matrice di comparazione tra IEEE1588 e SyncE 92
Tabella 2-13 PTP: formato del messaggio *Announce* 98
Tabella 2-14 Matrice di comparazione tra NTP e PTP 101
Tabella 2-15 Interoperabilità tra porte Ethernet e SyncE 103
Tabella 2-16 Interoperabilità in frequenza tra Ethernet e SyncE 103
Tabella 2-17 Matrice comparativa tra SyncE e IEE E1588, con supporto TC 107
Tabella 3-1 Fattore moltiplicativo del BER 127
Tabella 4-1 Classi di performance per gli IED 152
Tabella 5-1 Matrice di comparazione tra Microwave e fibra ottica 168
Tabella 5-2 Esempi di alta-affidabilità in alcune metropoli internazionali 180
Tabella 5-3 Funzionalità “Operation Administration & Management” 185
Tabella 5-4 Funzionalità dei livelli di OAM e standard di riferimento 186
Tabella 6-1 Caratteristiche tecniche “Mean Well CLG-100-48” 200
Tabella 6-2 Tipologie di ODU compatibili con OptiX RTN905 205
Tabella 6-3 Caratteristiche segnale IF 206

Tabella 6-4 Classi di servizio per VLAN 219
Tabella 6-5 Mapping tra code di trasmissione e tipologia di traffico (IEEE 802.1p) ... 220
Tabella 7-1 Tempi di ritardo per tipologia di dielettrico impiegato 224
Tabella 7-2 Formato campi del messaggio NMEA “$GPGGA” 230
Tabella 7-3 Caratterizzazioni uscite 10 MHz: confronto master/slave 276

Acronimi

ACAP	Adjacent Channel Alternated Polarization
ACL	Access Control List
ACR	Automatic Clock Recovery
ADC	Analog to Digital Converter
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AM	Adaptive Modulation
ANSI	American National Standards Institute
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AT&T	American Telephone and Telegraph Company
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATPC	Automatic Transmit Power Control
BC	Boundary Clock
BCD	Binary-Coded Decimal
BER	Bit Error Ratio
BERT	Bit Error Ratio Tester
BITS	Building Integrated Timing Supply
BMCA	Best Master Clock Algorithm
BNC	Bayonet Neill–Concelman
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BT	British Telecom
BTS	Base Transceiver Station
BUJ	Bounded Uncorrelated Jitter
C/A	Course Acquisition
C2C	Cycle to Cycle
CAD	Computer-Aided Design
CAPEX	Capital Expenditure
CAR	Committed Access Rate
CASE	Computer-Aided Software Engineering

CCDP	CoChannel Dual Polarization
CDMA	Code Division Multiple Access
CDR	Clock and Data Recovery
CE	Customer Edge
CERN	Conseil européen pour la recherche nucléaire
CES	Circuit Emulation Service
CF	Control Functions / Correction Field
CFI	Canonical Format Indicator
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CoS	Class of Service
CPU	Central Processing Unit
CS	Circuit Switching
DAS	Data Acquisition System
DC	Direct Current / Duty Cycle
DCD	Duty Cycle Distortion
DCLS	Direct Current Level Shift
DCR	Differential Clock Recovery
DDJ	Data Dependent Jitter
DDMTD	Digital Dual Mixer Time Difference
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DIN	Deutsches Institut für Normung
DJ	Deterministic Jitter
DL	Down Link
DSC	Data Set Comparison
DSCP	Differentiated Services Code Point
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DUT	Device Under Test
E2E	End to End
EEC	Ethernet Equipment Clock
EEC	Ethernet Equipment Clocks
ELAN	Ethernet (transparent) LAN
E-Line	Ethernet (private) Line

eMBMS	evolved Multimedia Broadcast Multicast Service
EMI	Electro Magnetic Interference
EOP	Ethernet Over PDH
EOS	Ethernet Over SDH
ESMC	Ethernet Synchronization Messaging Channel
FCS	Frame Check Sequence
FD	Frequency Diversity
FDD	Frequency Division Duplex
FDR	Frame Delay Range
FDV	Frame Delay Variation
FE	Fiber Ethernet
FTTC	Fiber To The Cabinet
GE	Giga Ethernet
GIWF	Generic Inter Working Function
GM	Grand Master (clock)
GMT	Greenwich Mean Time
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events
GPS	Global Position System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HA	High Availability
HSB	Hot StandBy
HW	Hardware
IDU	InDoor Unit
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEN	Internet Engineering Note
IETF	Internet Engineering Task Force
IF	Inter Frequency

IP	Internet Protocol (Network Layer)
IPv4	Internet Protocol Version 4 (also IPv6)
IRIG-B	Inter-Range Instrumentation Group time code type B
ISCPS	International Symposium on Precision Clock Synchronization
ISI	Inter-symbol interference
ITU	International Telecommunication Unit
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council
LAN	Local Area Network
LANE	Local Area Network Emulation
LHC	Large Hardon Collider
LNA	Low Noise Amplifier
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MAT	Microwave Aware Transmission
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MD5	Message Digest Algorithm 5
MEF	Metro Ethernet Forum
MEN	Metro Ethernet Network
MII	Media Independent Interface
MIMO	Multiple-Input/Multiple-Output
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MRTIE	Maximum Relative Time Interval Error
MTIE	Maximum Time Interval Error
MW	Microwave
NAVSTAR	NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System
NC	Network Controller
NE	Network Element
NGN	Next Generation Networks

NM	Node Management
NMEA	National Marine Electronics Association
NNI	network node interface
NRZ	Non Return to Zero
NTP	Network Time Protocol
O&M	Operations and Management
OAM	Operations Administration and Management
OC	Ordinary Clock
OCXO	oven-controlled crystal oscillator
OCXO	Oven-Controlled crystal Oscillator
ODU	OutDoor Unit
OMT	OrthoMode Transducer
OPEX	Operating Expenditure
OPS	On Path Support
ORT	Optimized Radio Transmission
OS	Operating System
OSSP	Organization Specific Slow Protocol
P2P	Point To Point
PCB	Printed Circuit Board
PCI	Peripheral Component Interconnect
PCM	Pulse Code Modulation
PCP	Priority Code Point
PCS	Phase Changing Speed
PD	Pattern Detector / Polarization Diversity
PDF	Probability Density Function
PDH	Primary Digital Hierarchy
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PDU	protocol data unit
PDV	Packet Delay Variation
PE	Polietilene
PG	Pattern Generator
PHB	Per Hop Behavior

PHY	Physical Layer
PLL	Phase Locked Loop
PMU	Phasor Measurement Unit
PoP	Point of Presence
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
pps	packets per second
PPS	Pulse Per Second
PRC	Primary Reference Clock
PRC	Primary Reference Clock
PRMC	Primary Reference Master Clock
PRS	Primary Reference Source
PSD	Power Spectral Density
PSN	Packet-Switched Network
PTFE	Politetrafluoroetilene
PTP	Precision Time Protocol
PTP	Precision Time Protocol (IEEE 1588)
PTP	Precision Time Protocol (Application Layer)
PVID	Port Virtual Identifier
PVT	Position Velocity Time
PWE	Pseudo Wire Emulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QL	Quality Level
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RFC	Request for Comments
RJ	Random Jitter
RMS	Root Mean Square
RNC	Radio Network Controller
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol
RTU	Remote Terminal Unit

RZ	Return to Zero
SATM	Service Aware Traffic Management
SBS	Straight Binary Seconds
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SD	State Decision
SDA	Synchronization Distribution Architecture
SDA	Synchronization Distribution Architecture
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDO	Standards Development Organization
SEC	SDH Equipment Clock
SerDes	Serializer/Deserializer
SLA	Service Level Agreement
SMA	Sub Miniature version A
SMC	SONET Minimum Clock
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal to Noise Ratio
SOF	Start Of Frame
SONET	Synchronous Optical NETwork
SSM	Synchronization Status Messages
SSU	Synchronization Supply Unit
SW	Software
SyncE	Synchronous Ethernet
TAI	Temps Atomique International
TC	Transparent Clock
TCXO	temperature compensated crystal oscillator
TD	Time Delay
TDD	Time Division Duplex
TDEV	Time deviation
TDM	Time Division Multiplexing
TDR	Time-Domain Reflectometry
TIE	Time Error Interval

TIM	Telecom Italia Mobile
TJ	Total Jitter
TLV	Type Length Reserve
ToD	Time of Day
ToS	Top of Second
TPID	Tag Protocol Identifier
TSIP	Trimble Standard Interface Protocol
TSU	Time Stamp Unit
TTL	Transistor-Transistor Logic
TVE	Total Vector Error
TWTT	Two-Way Time Transfer
TWTT	Two-Way Time Transfer
TXCO	Temperature-Compensated crystal Oscillator
UDP	User Datagram Protocol (Transport Layer)
UI	Unit Interval
UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Systems
UNI	User Network Interface
USB	Universal Serial Bus
USDOD	United States Department Of Defense
UTC	Coordinated Universal Time
UUID	Universally Unique Identifier
VF	Velocity Factor
VID	VLAN Identifier
VLAN	Virtual Local Area Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
Vp	Velocity Propagation
WAMS	Wide Area Monitoring Systems
WAN	Wide Area Network
WASA	Wide Area Situational Awareness
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplexing

WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WR	White Rabbit
WTTC	Wireless To The Cabinet
XPD	Cross Polarization Discrimination
XPIC	Cross Polarization Interference Cancellation