

# Notiziario Tecnico

Archivio

1/1994

 **TIM**

# La sincronizzazione nelle reti numeriche di trasporto

## Parte terza: la rete di sincronizzazione<sup>(1,2)</sup>

M. Carbonelli, D. De Seta, D. Perucchini (\*)

*In quest'ultima parte dell'articolo dedicato alla sincronizzazione delle reti numeriche, dopo aver presentato ad un livello molto generale lo stato dell'arte delle strategie di distribuzione di cronosegnali per la sincronizzazione delle reti numeriche di telecomunicazioni, viene affrontato il problema della caratterizzazione dei dispositivi di generazione e rigenerazione di cronosegnali di elevata qualità. A titolo di esempio di reti di sincronizzazione già realizzate, viene descritta la strategia di sincronizzazione delle centrali numeriche di commutazione della rete nazionale e vengono forniti alcuni cenni sullo stato della normativa della sincronizzazione delle reti di trasporto basate sulla gerarchia numerica sincrónica.*

### 1. Introduzione

Lo studio della sincronizzazione di rete, che è stato oggetto di numerosi lavori a partire dalla fine degli anni '60, è essenzialmente rivolto a due grandi temi: il primo riguarda l'individuazione dei principi di funzionamento e delle strategie di sincronizzazione di una rete di distribuzione dei segnali di sincronismo, il secondo comprende la caratterizzazione degli apparati, i cosiddetti orologi, coinvolti nella generazione dei segnali di temporizzazione. In questa terza e ultima parte dell'articolo dedicato alla sincronizzazione delle reti numeriche, vengono presi in esame gli aspetti più importanti del progetto di una rete di distribuzione del sincronismo, considerando le possibili strategie (par.2) e i dispositivi (par.3) per mezzo dei quali si realizza la distribuzione del cronosegnale. A tale riguardo, vengono introdotti i parametri e i criteri comunemente utilizzati per valutare la qualità degli orologi e della rete di sincronizzazione, dando qualche cenno sugli attuali orientamenti della normativa internazionale. Nell'ultimo paragrafo vengono descritti, a titolo d'esempio, l'architettura della rete nazionale di sincronizzazione delle centrali numeriche e gli orientamenti seguiti in ambito internazionale per la specifica della strategia e degli apparati di sincronizzazione delle reti di trasporto basate sull'SDH (par.4).

### 2. Strategie di sincronizzazione di rete

Le strategie di sincronizzazione di rete possono, in una prima suddivisione, essere classificate in base alla presenza o meno di una rete di distribuzione del cronosegnale di riferimento: secondo questo criterio, si possono individuare: la strategia *plesiocrona*, nel caso in cui non esista una rete di distribuzione, e le strategie *master-slave* e *mutua* nel caso in cui sia prevista una distribuzione nei vari nodi del cronosegnale di riferimento.

La trasmissione dei cronosegnali attraverso i vari nodi può avvenire o tramite collegamenti dedicati o utilizzando il cronosegnale associato a un flusso numerico che trasporta traffico. In entrambi i casi, il cronosegnale può essere affetto da disturbi, quali il jitter e il wander, accumulati durante il percorso trasmissivo.

#### 2.1 Strategia di tipo plesiocrono

La strategia di tipo plesiocrono prevede che ogni nodo della rete disponga di un orologio locale avente caratteristiche, controllate, di elevata precisione e stabilità a lungo termine. In base a quanto visto nel par.3.1.1 della prima parte dell'articolo, nelle reti completamente

---

(\*) ing. Marco Carbonelli, ing. Domenico De Seta, ing. Daniele Perucchini - Fondazione Ugo Bordoni - Roma

---

(1) Lavoro eseguito nell'ambito della Convenzione in atto tra l'Amministrazione delle Poste e Telecomunicazione e la Fondazione Ugo Bordoni.

(2) La prima e la seconda parte dell'articolo sono state pubblicate nel numero di agosto 1993 del Notiziario Tecnico SIP.

plesiocrone è inevitabile il verificarsi di slipp di sincronizzazione all'interfaccia di accesso delle centrali numeriche: tutto ciò che si può fare è controllare il tasso di slipp, sia imponendo più stringenti requisiti di precisione agli orologi dei nodi di rete, sia dimensionando opportunamente le memorie tampone presenti nelle unità di linea. Tuttavia una limitazione alle dimensioni delle memorie tampone è posta dall'esigenza di contenere il tempo di ritardo dei segnali attraverso il nodo di commutazione: perciò il maggiore controllo sul tasso di slipp, atto a garantire che le differenze di frequenza che si presentano siano trascurabili ai fini del funzionamento della rete e della qualità dei servizi offerti, è realizzato attraverso l'impiego di orologi di elevate caratteristiche. In pratica, per assicurare precisioni e stabilità quali sono quelle richieste dalla soluzione plesiocrona, è necessario ricorrere all'installazione di standard atomici primari al cesio in ogni nodo della rete. Questa soluzione richiede costi di installazione e manutenzione tuttora elevati, a fronte dei quali però offre una grande semplicità dal punto di vista del progetto, dell'espansione e della gestione della rete. Il regime di funzionamento plesiocrono rende inoltre i vari nodi sostanzialmente indipendenti tra loro in relazione agli effetti di eventuali guasti degli orologi locali: questi non interessano mai porzioni molto estese della rete e non richiedono quindi complesse procedure di riconfigurazione per assicurare continuità di funzionamento alla rete nel suo complesso. Ulteriore punto di forza della strategia plesiocrona, che ha avuto spesso un peso determinante per la scelta del gestore, è il fatto che in tale soluzione vengono evitate tutte quelle questioni di carattere "politico" che possono nascere dalla necessità di stabilire una qualche dipendenza gerarchica tra i vari nodi della rete sotto il profilo dei criteri di distribuzione del cronosegnale di riferimento: necessità che si presenta, invece, in tutti gli altri schemi di sincronizzazione conosciuti.

Tali aspetti hanno favorito l'adozione del funzionamento plesiocrono solo per le reti numeriche internazionali: queste debbono poter interconnettere tra di loro reti nazionali sia di tipo plesiocrono, sia di tipo sincrono, sia miste. A tale riguardo ricordiamo che il CCITT ha prodotto una raccomandazione concernente le specifiche dei cronosegnali generati dagli orologi di riferimento situati nei nodi di rete che terminano collegamenti numerici internazionali (Racc. G.811 [29]).

## 2.2 Strategia di tipo master-slave

I metodi di sincronizzazione di rete basati sulla distribuzione unidirezionale di cronosegnali di riferimento sono detti metodi dispotici, o anche di tipo *master-slave* (MS). Con l'aggettivo *unidirezionale* si intende che lo scambio di cronosegnali tra due nodi della rete avviene solo nel senso che va dal nodo

sincronizzante (*master*) al nodo sincronizzato (*slave*). Per la distribuzione dei cronosegnali si utilizza una rete di collegamenti con topologia a stella o ad albero: il nodo master trasmette a uno o più nodi slave il cronosegnale generato dal proprio orologio (*orologio principale o primario*) che viene utilizzato per sincronizzare gli orologi secondari. Nei nodi asserviti devono essere realizzate funzioni di base essenzialmente diverse a seconda dello stato della rete di distribuzione del cronosegnale di riferimento, in particolare:

- in condizioni di normale funzionamento (*modo sincronizzato*), viene generato un cronosegnale che, a meno di alterazioni generalmente controllabili, può essere considerato una replica del cronosegnale emesso dal nodo principale;
- qualora venga a mancare il segnale di sincronizzazione esterna, le unità di sincronizzazione devono fornire un riferimento autonomo di assegnata qualità (*modo autonomo*).

Nel modo sincronizzato il ricevitore di cronosegnale deve essere in grado di fronteggiare i due tipi di degradazione che usualmente affliggono i collegamenti numerici, cioè il jitter/wander e le microinterruzioni; mentre nel modo di funzionamento autonomo esso deve garantire, per un periodo di tempo dipendente dall'importanza del nodo di rete in cui l'orologio è situato, tassi di slipp adeguatamente contenuti.

Come è noto tali funzioni possono entrambe essere svolte utilizzando tecniche di sintesi di frequenza basate su circuiti con anello ad aggancio di fase (PLL).

La configurazione puramente a stella presenta alcuni aspetti molto positivi ai fini della funzionamento della rete e della qualità dei cronosegnali in essa disponibili, quali ad esempio la possibilità di mantenere circoscritta l'area di influenza di eventuali guasti sui collegamenti numerici, e la limitazione del rumore e del jitter accumulato. Tuttavia le reti di sincronizzazione realizzate nella pratica adottano una topologia ad albero, perché in genere non tutti i nodi sono raggiunti da collegamenti in grado di trasportare la sincronizzazione primaria: questo può essere dovuto sia a motivi economici, sia a situazioni di rete con struttura intrinsecamente gerarchica, sia a problemi derivanti dalla geografia del territorio interessato. In questo caso si parla specificatamente di strategia di sincronizzazione dispotico-gerarchica (HMS=Hierarchical Master-Slave). La soluzione con topologia ad albero, in cui cioè alcuni nodi secondari sono visti come master da altri nodi secondari, può assumere configurazioni molto diverse a seconda dei requisiti di precisione e delle esigenze di riconfigurazione della rete che si vogliono soddisfare: due importanti possibilità offerte da tale soluzione sono infatti quelle di consentire, in situazioni di guasto, l'instradamento alternativo dell'informazione di sincronizzazione e la riassegnazione dinamica dei ruoli di master e slave a nodi secondari della rete.

Le realizzazioni della strategia HMS che si possono incontrare nel panorama delle attuali reti di sincronizzazione prevedono una allocazione degli orologi nei nodi di rete in accordo a una gerarchia basata sui livelli di precisione, stabilità, affidabilità, ecc.

### 2.3 Strategia di sincronizzazione mutua

Quando ci si pone come obiettivo un funzionamento della rete di sincronizzazione in cui i nodi, al fine di ottenere un cronosegnale di riferimento comune, scambiano tra loro informazioni di sincronizzazione, è necessario prevedere collegamenti "bidirezionali" per la distribuzione dei cronosegnali tra i nodi della rete. Questo tipo di strategia, comunemente indicata come *sincronizzazione mutua*, non richiede l'impiego di orologi particolarmente precisi, perché la frequenza del cronosegnale comune è determinata come valore medio tra le frequenze di tutti gli orologi collegati in rete. Ogni orologio di rete deve adeguare la propria frequenza in accordo a un segnale di controllo generato a partire dalle differenze di fase con i cronosegnali emessi da tutti gli altri orologi.

Numerosi schemi realizzativi sono stati proposti e studiati per questa strategia di sincronizzazione: le caratteristiche e le prestazioni ottenibili sono molto diverse in funzione della complessità delle tecniche di controllo adottate.

Lo studio del comportamento dei sistemi di sincronizzazione mutua è basato sulla definizione di opportuni modelli matematici che, se si escludono gli schemi più elementari, presentano non poche difficoltà di analisi. I risultati riportati nella letteratura indicano che oltre alle notevoli complicazioni realizzative implicite nella struttura di tali sistemi, i più pesanti svantaggi per la qualità di funzionamento risiedono: nella presenza di anelli chiusi (*timing loops*) che pongono in primo piano il problema della stabilità a breve e a lungo termine della rete, nella difficoltà di determinare e controllare l'effettiva frequenza comune che si instaura nel sistema di orologi mutuamente accoppiati, e infine nella conseguente criticità dell'equilibrio complessivo della rete stessa. Per tali ragioni la strategia di sincronizzazione mutua non è stata adottata nella maggior parte dei sistemi reali, fra i quali si è preferito realizzare strategie di tipo HMS.

## 3. Gli orologi

In una rete di distribuzione della sincronizzazione, indipendentemente dalla strategia realizzata, vengono utilizzati dei dispositivi elettronici, brevemente chiamati orologi, che hanno il compito di generare i cronosegnali, vale a dire i segnali pseudo-periodici caratterizzati da una elevata precisione e stabilità di frequenza, che

vengono utilizzati per temporizzare gli apparati di una rete per telecomunicazioni.

La *precisione* fornisce una misura di quanto il valore della frequenza generata da un orologio possa essere reso, in sede di taratura, prossimo al valore nominale, mentre la *stabilità* dà una misura delle fluttuazioni di frequenza, rispetto al valore nominale, in un prefissato intervallo di tempo: quando l'intervallo di tempo in cui si osservano tali fluttuazioni è piccolo, si parla di stabilità a breve termine. La linea di demarcazione tra il breve e il lungo termine dipende dalle applicazioni considerate: ad esempio, nella caratterizzazione degli orologi primari destinati alla distribuzione del tempo universale si considera lungo termine un intervallo superiore al giorno, mentre in talune applicazioni di telecomunicazione si considera già lungo termine un intervallo superiore a 50 millisecondi (racc. G.811 e 812).

### 3.1 Grandezze per la caratterizzazione della stabilità degli orologi

Al fine di esplicitare il modello di cronosegnale introdotto nel par.2 della prima parte dell'articolo, occorre individuare, sulla base delle conoscenze dei fenomeni che intervengono nel funzionamento degli orologi, una adeguata rappresentazione matematica della frequenza istantanea  $f(t)$ .

Un'espressione comunemente utilizzata in letteratura per rappresentare  $f(t)$  è data da

$$f(t) = f_0 + f_d(t) + \frac{\dot{\phi}(t)}{2\pi} \quad (1)$$

ove

$$\begin{cases} f_0 = (f_{nom} + \Delta f) \\ f_d(t) = \sum_{k=1}^{M-1} \frac{q_k t^k}{k!} \end{cases}$$

in cui:

- $f_0$  è la parte costante (indipendente dal tempo) della frequenza media: il processo di frequenza  $f(t)$  non è, in generale, stazionario e, quindi, ha media dipendente dal tempo;
- $f_{nom}$  è la *frequenza nominale* dell'orologio, fissata in sede di progetto;
- $\Delta f$  è lo scarto tra  $f_0$  e  $f_{nom}$  (tale parametro è direttamente legato alla precisione con cui è stato tarato l'orologio);
- $f_d(t)$  rappresenta le *derivate in frequenza* dell'orologio, cioè lente variazioni di frequenza dovute a fenomeni di invecchiamento dei componenti (ad esempio, gli oscillatori al quarzo);

- $q_k$ , ( $k = 1, 2, \dots, M-1$ ), sono variabili aleatorie indipendenti dal tempo che modellano le derive di frequenza dell'orologio;
- $\dot{\varphi}(t) / 2\pi$  è un processo aleatorio che rappresenta le *fluttuazioni casuali di frequenza* dell'orologio (avendo indicato con  $\dot{\varphi}(t)$  la derivata del processo di rumore di fase  $\varphi(t)$ ), dovute ad instabilità di parametri circuitali, rumore interno di varia natura, instabilità della tensione di alimentazione, etc.

Usualmente le fluttuazioni casuali di frequenza vengono descritte in termini della *deviazione di frequenza normalizzata*  $y(t)$ ,

$$y(t) = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi f_{nom}} \quad (2)$$

o meglio, per ragioni di pratica misurabilità, del suo valore medio calcolato su un intervallo di osservazione  $\tau$ :

$$\langle y(t) \rangle_\tau \equiv \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} y(x) dx \quad (3)$$

Dal modello illustrato risulta che la precisione di un orologio è determinata dal parametro  $\Delta f$ , o, come è più usuale dal rapporto adimensionale  $\Delta f / f_{nom}$ , mentre la stabilità di frequenza è sostanzialmente legata ai fenomeni di deriva e al processo di fase  $\varphi(t)$ . La possibilità di caratterizzare la stabilità di un orologio è, perciò, condizionata all'individuazione di opportune grandezze che descrivano statisticamente il processo  $\varphi(t)$  e la sua derivata prima  $\dot{\varphi}(t)$ : tale problema è stato affrontato approfonditamente a partire dagli anni '60 in numerosi lavori. Nel 1971 un sottocomitato dell'IEEE ha raccomandato due grandezze per la caratterizzazione della stabilità degli orologi: la varianza di  $\langle y(t) \rangle_\tau$  e la cosiddetta varianza di Allan. Una descrizione approfondita delle definizioni, delle proprietà e dei problemi connessi con l'impiego di tali grandezze esula dagli scopi del presente lavoro.

Accanto alle suddette grandezze sono state introdotte, in sede di normativa internazionale (CCITT), altre grandezze esplicitamente legate, anziché alla frequenza generata dall'oscillatore, alla cosiddetta funzione  $T(t)$  *tempo generato*, definita come

$$T(t) \equiv \frac{\Phi(t)}{2\pi f_{nom}} \quad (4)$$

Nell'ipotesi in cui siano nulle le fluttuazioni casuali di fase, le derive in frequenza e la deviazione iniziale di frequenza  $\Delta f$ , tale funzione esprime il tempo assoluto  $T_{id}(t) = t$  generato da un oscillatore ideale. In fig. 1a sono rappresentate la  $T_{id}(t)$  e la  $T(t)$  in funzione del tempo  $t$ .

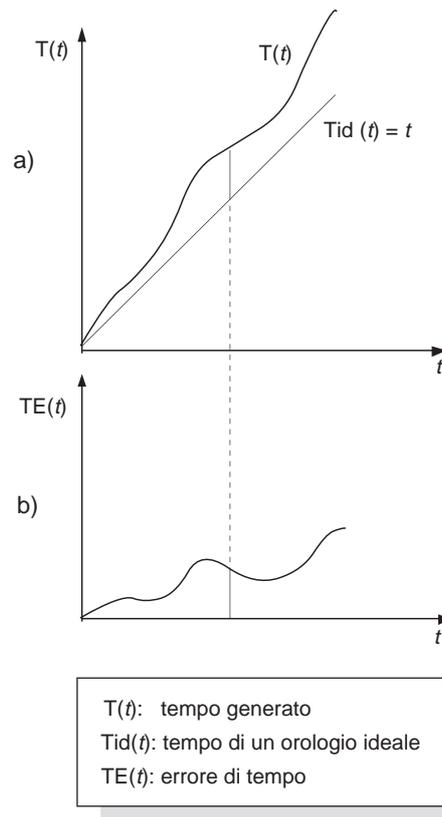


Figura 1 Rappresentazione grafica: a) delle funzioni  $T(t)$  tempo generato e  $T_{id}(t)$  tempo generato ideale; b) della funzione  $TE(t)$  errore di tempo

A partire dalla  $T(t)$  si definisce la funzione  $TE(t)$  *errore di tempo* (Time Error) come

$$TE(t) \equiv T(t) - T_{id}(t) = T(t) - t, \quad (5)$$

che esprime l'errore che un orologio reale commette nella misura del tempo assoluto, come esemplificato in fig. 1b.

Inoltre, si definisce la funzione  $TI(t;\tau)$  *intervallo di tempo generato* come

$$TI(t;\tau) \equiv T(t+\tau) - T(t); \quad (6)$$

tale funzione esprime la misura di un intervallo di tempo assoluto  $\tau$  valutato, a partire dall'istante  $t$ , per mezzo di un orologio reale che genera il tempo  $T(t)$ , come esemplificato in fig. 2.

Infine, a partire dalla definizione del  $TE(t)$ , si definisce la funzione  $TIE(t;\tau)$  *errore sull'intervallo di tempo* (Time Interval Error) come

$$TIE(t;\tau) \equiv TE(t+\tau) - TE(t) = TI(t;\tau) - \tau \quad (7)$$

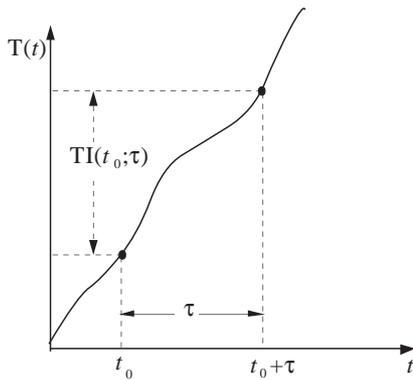


Figura 2 Significato del valore della funzione  $TI(t; \tau)$  all'istante  $t=t_0$

il cui significato è chiarito dalla fig. 3, dove si è scelto  $t=t_0$  come istante iniziale dell'intervallo di durata  $\tau$ .

È opportuno far notare che tutte le suddette funzioni ( $T, TI, TE, TIE$ ) sono realizzazioni di processi aleatori, in quanto sono definite a partire dalla fase  $\Phi(t)$  il cui modello matematico ha tra le sue componenti il processo aleatorio  $\varphi(t)$ . Pertanto, la caratterizzazione di tali grandezze può essere fatta solo in senso statistico. Nelle normative vigenti la grandezza statistica più comunemente usata è l' $MTIE(t; \tau)$  *errore massimo sull'intervallo di tempo* (Maximum Time Interval Error), definita come

$$MTIE(t; \tau) \equiv \max_{t \leq t' \leq t + \tau} \{TE(t')\} - \min_{t \leq t' \leq t + \tau} \{TE(t')\} \quad (8)$$

In fig. 4 viene esemplificato il calcolo di tale funzione per  $t=t_0$ .

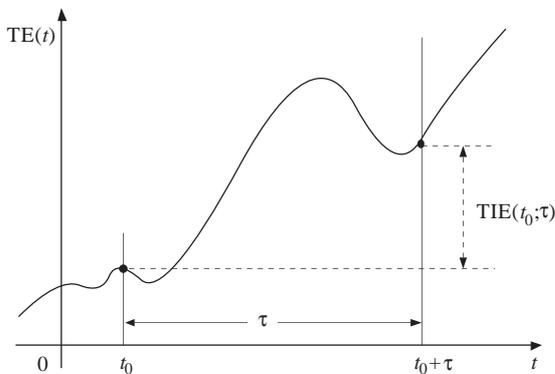


Figura 3 Significato del valore della funzione  $TIE(t; \tau)$  all'istante  $t=t_0$

### 3.2 Principio di funzionamento degli orologi asserviti

Nel campo delle telecomunicazioni, vengono utilizzati due tipi di sorgenti di cronosegnali di sincronismo: il primo, utilizza oscillatori atomici (per esempio, Cesio, Rubidio); il secondo, oscillatori al quarzo.

Gli oscillatori atomici, caratterizzati essenzialmente da una elevata stabilità a lungo termine e da una elevata precisione (e anche da un elevato costo), sono normalmente utilizzati come orologi master di una rete di distribuzione di segnali di sincronismo.

Gli oscillatori al quarzo, caratterizzati da una buona stabilità a breve termine (ma non a lungo termine), sono più diffusamente utilizzati per realizzare gli orologi asserviti, vale a dire dei dispositivi che sono in grado di generare un cronosegnale sufficientemente fedele al cronosegnale di riferimento fornito al loro ingresso. Gli orologi asserviti utilizzano dispositivi elettronici basati sulla tecnica ad aggancio di fase, denominati PLL (*Phase Locked Loops*). Lo schema di principio di un PLL è riportato in fig. 5, dove con  $S_{ref}$  si è indicato il cronosegnale di riferimento, con  $S_{out}$  il cronosegnale generato dal PLL e con VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) un oscillatore al quarzo controllato in tensione.

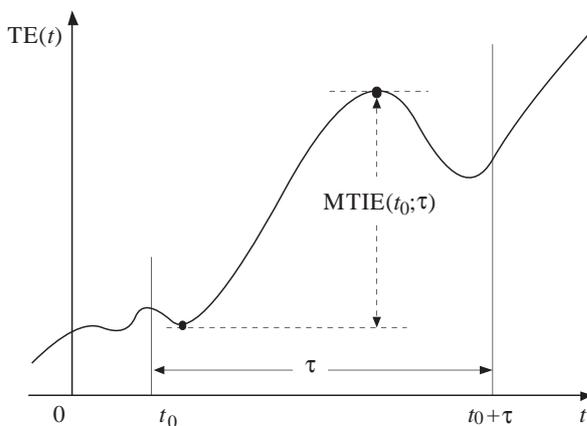


Figura 4 Calcolo della funzione  $MTIE(t; \tau)$  per  $t=t_0$

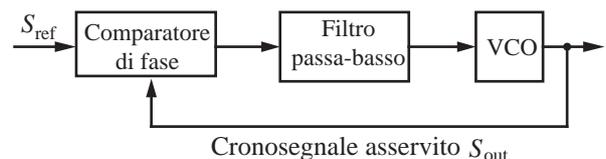


Figura 5 Schema di principio di un PLL

In un PLL il comparatore di fase fornisce in uscita un segnale che dà una misura della differenza di fase tra  $S_{ref}$  e  $S_{out}$ : tale segnale, dopo aver subito un filtraggio di tipo passa-basso, viene utilizzato nel VCO per adeguarne la frequenza di oscillazione in modo tale da ridurre la differenza di fase tra  $S_{ref}$  e  $S_{out}$ . Quando la suddetta differenza di fase è limitata entro un opportuno intervallo, dipendente dal tipo di comparatore (ad es.,  $\pm\pi/2$  per il comparatore di tipo moltiplicativo), si dice che il PLL è in modo di funzionamento *agganciato*. Nelle condizioni di funzionamento reali, il segnale di riferimento a un particolare PLL, che è stato generato da un altro PLL ed è stato trasportato lungo linee di trasmissione rumorose, può presentare salti di fase o variazioni istantanee della sua frequenza di entità tali da far uscire il PLL in esame dalla condizione di aggancio.

Il comportamento di un PLL è usualmente descritto da quattro parametri:

- il *campo di mantenimento statico dell'aggancio*  $\Delta\omega_{HI}$  (hold-in range), definito come lo scostamento massimo dalla pulsazione di oscillazione libera<sup>(3)</sup>  $\omega_L$  del VCO entro cui il PLL segue le variazioni lente della pulsazione di  $S_{ref}$ ;
- il *campo di mantenimento dinamico dell'aggancio*  $\Delta\omega_{PO}$  (pull-out range), definito come lo scostamento massimo entro cui il PLL segue le variazioni veloci (pressoché istantanee) della pulsazione di  $S_{ref}$ ;
- il *campo di cattura*  $\Delta\omega_{LI}$  (lock-in range), definito come lo scostamento massimo entro cui il PLL è in grado di agganciarsi rapidamente (in un tempo pari a  $1/\omega_L$ ) alla pulsazione di  $S_{ref}$ ;
- il *campo di recupero lento dell'aggancio*  $\Delta\omega_{PI}$  (pull-in range), definito come lo scostamento massimo entro cui il PLL è in grado di agganciarsi (anche in un tempo relativamente lungo) alla pulsazione di  $S_{ref}$ .

Da un'analisi approfondita del funzionamento del PLL si ricava che i quattro parametri sopra definiti soddisfano ai vincoli:

$$\Delta\omega_{HI} < \Delta\omega_{PO} < \Delta\omega_{PI} < \Delta\omega_{LI}. \quad (9)$$

Quando il PLL è in regime di funzionamento agganciato, la relazione ingresso-uscita, nell'ipotesi di piccole fluttuazioni della fase in ingresso, può essere descritta in termini di funzione di trasferimento nel dominio della frequenza: le variazioni veloci (jitter) presenti sul segnale di riferimento vengono attenuate con una legge di tipo passa basso dipendente dalle caratteristiche del filtro d'anello, del VCO e del comparatore di fase, mentre le variazioni lente (wander) passano inalterate, trasferendosi nel cronosegnaletto in uscita al PLL. Il segnale in uscita da un PLL è affetto, oltre che dal wander residuo derivante dal segnale di

riferimento, anche da jitter e wander generato all'interno del comparatore di fase, del filtro d'anello e del VCO. Tali rumori, che dipendono fortemente dalla tecnologia utilizzata nella realizzazione del PLL, pongono dei vincoli sul numero massimo di orologi schiavi in cascata che possono essere utilizzati per sincronizzare i nodi della rete.

In conclusione, si può affermare che la stabilità e la precisione del cronosegnaletto in uscita da un orologio asservito dipendono essenzialmente:

- dalla qualità del cronosegnaletto di riferimento;
- dalla risposta del PLL ai salti di fase e di frequenza presenti sul segnale di riferimento (generati, ad esempio, in conseguenza dei cambi di riferimento effettuati per esigenze di commutazione di protezione);
- dalla caratteristica di filtraggio del PLL nei confronti del jitter e del wander presente sul segnale di riferimento;
- dalla rumorosità intrinseca del comparatore di fase, del filtro passa-basso e dell'oscillatore al quarzo;
- dalle derive di frequenza del VCO quando l'orologio asservito è in modalità di funzionamento autonomo.

#### 4. Esempi di realizzazioni di una rete di sincronizzazione

##### 4.1 La sincronizzazione delle centrali di commutazione nella rete numerica nazionale

La struttura della rete nazionale di sincronizzazione delle centrali numeriche di commutazione, riportata in fig. 6, è del tipo gerarchico master-slave ad alternative preassegnate: in caso di assenza del segnale di riferimento in ingresso ad un orologio della rete di sincronizzazione è prevista la selezione, in base a una tabella di priorità, di segnali di riferimento alternativi atti a garantire il funzionamento sincrono con il master di rete. Il livello più alto, denominato livello 0, è costituito dall'Orologio Nazionale di Riferimento (ONR), ubicato a Roma presso l'Istituto Superiore Poste e Telecomunicazioni (ISPT). Gli orologi di livello 1A, oltre ad essere collegati tra loro per motivi di protezione, sono sincronizzati direttamente dall'ONR mediante collegamenti dedicati a 2048 kHz. Gli orologi di livello 1A previsti sono almeno tre e sono situati a Roma: il primo di essi si trova in una centrale nazionale intercontinentale, il secondo in una centrale nazionale continentale e il terzo in una centrale interdistrettuale di transito.

Gli orologi del livello 1B, cui appartengono le altre centrali intercontinentali, continentali e interdistrettuali di transito, ricevono i segnali di sincronismo, oltre che da altre centrali dello stesso livello, da almeno due centrali di livello 1A.

(3) Il VCO è in oscillazione libera quando il segnale di tensione che lo controlla è nullo.

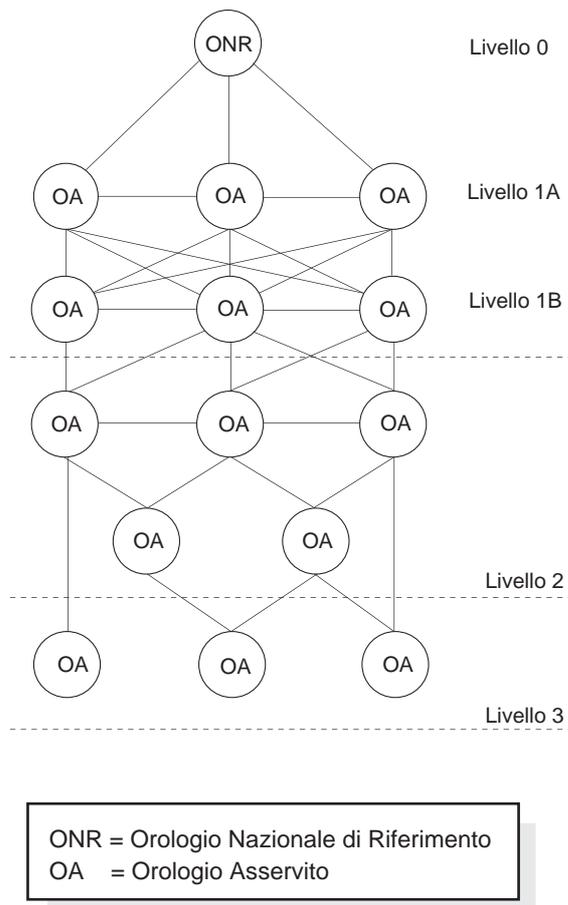


Figura 6 Struttura gerarchica della rete di sincronizzazione nazionale

Gli orologi del livello 2 sono collegati ad almeno due centrali di livello 1B o almeno ad altre due centrali di livello 2.

Infine, gli orologi del livello 3, che è costituito dalle centrali numeriche locali, sono asserviti ad orologi di livello 2.

Per la distribuzione dei segnali di sincronismo tra centrali si utilizzano flussi numerici a 2,048 Mbit/s e a 8,448 Mbit/s trasmessi sulla rete PDH. Ovviamente, gli orologi coinvolti nel processo di distribuzione del sincronismo, oltre a differenziarsi in base al livello di rete nel quale sono inseriti, si differenziano notevolmente anche per la qualità e per la complessità tecnologica: in modo del tutto generale, si può dire che nei livelli di rete superiori vengono utilizzati orologi con caratteristiche migliori rispetto a quelle degli orologi utilizzati nei livelli di rete inferiori. Le caratteristiche essenziali della rete di sincronizzazione italiana sono descritte nella Norma Tecnica N° 702 redatta dall'ISPT nel 1988. L'obiettivo di progetto della rete è quello di ottenere prestazioni, in termini di tasso controllato di slip sulla porzione nazionale di una connessione numerica internazionale a 64 kbit/s, in accordo con i dettami della Racc. G.822 [32].

#### 4.2 Strategie di sincronizzazione delle reti di trasporto basate sull'SDH

Come più volte accennato nei paragrafi precedenti, l'introduzione di reti di trasporto basate sull'SDH è strettamente connessa con la realizzazione di una rete di distribuzione della sincronizzazione che raggiunga tutti gli apparati installati nei nodi di rete (TM, DXC, ADM) e non solo le centrali numeriche di commutazione. Negli ultimi anni si sono sviluppate una grande attività di studio e un'intensa attività normativa a livello internazionale, finalizzate alla definizione di linee-guida per il progetto di una rete di sincronizzazione idonea per l'SDH: l'attività normativa ha portato alla stesura di alcune nuove raccomandazioni (G.803 [27], G.81s [31], G.783 [26]) e alla revisione di preesistenti raccomandazioni, finalizzata all'adeguamento in vista dell'introduzione delle reti sincrone (G.810 [28], G.811 e G.812 [30]).

Uno dei criteri fondamentali assunti nella fase di definizione della nuova rete di sincronizzazione è che in condizione di normale funzionamento gli orologi degli apparati SDH devono essere sincronizzati all'orologio primario di riferimento PRC al fine di garantire prestazioni di stabilità compatibili con i livelli di qualità specificati per la rete di trasporto.

Dal punto di vista dell'architettura di rete gli orologi utilizzati per la distribuzione della sincronizzazione sono classificati in quattro livelli: il primo comprende l'orologio di riferimento primario; il secondo e il terzo sono costituiti dagli orologi asserviti situati, rispettivamente, nei nodi di transito e nei nodi d'accesso; il quarto comprende tutti gli orologi degli apparati SDH. Le specifiche degli orologi primari sono riportate nella racc. G.811. Gli orologi di livello 2 e 3 sono denominati SSU (*Synchronization Supply Unit*): l'impiego dell'SSU quale dispositivo destinato a fornire la sincronizzazione a tutti gli apparati co-locati in un unico edificio è un concetto mutuato dall'architettura della rete di distribuzione realizzata negli Stati Uniti, secondo cui i segnali di sincronizzazione devono essere resi disponibili con formati e interfacce standardizzate (in maniera analoga a quanto si fa, ad esempio, per l'energia elettrica) dovunque debbano essere installati apparati numerici. Per le specifiche degli SSU si è concordato di adottare come punto di partenza la racc. G.812 che si riferisce agli orologi asserviti destinati a controllare il funzionamento plesiocrono dei collegamenti numerici internazionali. Infine, per gli orologi di livello 4, denominati SEC (*SDH Equipment Clock*), è tuttora in corso l'attività di standardizzazione: la struttura base delle specifiche è già stata delineata ed è contenuta nella bozza di raccomandazione provvisoriamente denominata G.81s.

La distribuzione della sincronizzazione tra gli orologi dei livelli gerarchici deve essere realizzata utilizzando cronosegnali che non risultino affetti dalle degradazioni prodotte dalle elaborazioni di puntatore. In pratica, due metodi sono previsti: l'estrazione della sincronizzazione

a partire dal segnale STM-N ricevuto e l'estrazione della sincronizzazione a partire da flussi numerici PDH che non siano stati trasportati nell'SDH.

Utilizzando gli SSU e i SEC è stata individuata una architettura della rete di distribuzione della sincronizzazione organizzata su due livelli denominati, rispettivamente, livello di distribuzione *intra-nodo* e livello di distribuzione *inter-nodo*. La distribuzione della sincronizzazione all'interno di un nodo di rete (distribuzione *intra-nodo*) è effettuata secondo una topologia a stella, come illustrato in fig. 7, in cui il master è rappresentato dall'SSU del nodo e gli orologi asserviti sono i SEC dei vari apparati presenti nel nodo.

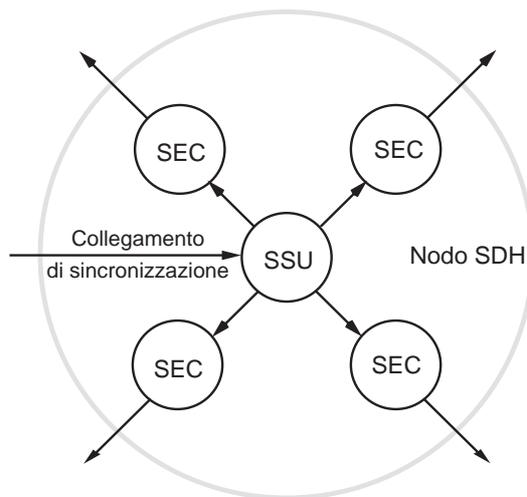


Figura 7 Architettura della distribuzione della sincronizzazione intra-nodo

Occorre notare che tutti i SEC del nodo ricevono la sincronizzazione solo dall'SSU del nodo, mentre l'SSU deriva il proprio riferimento dai collegamenti di sincronizzazione provenienti da altri nodi. La distribuzione della sincronizzazione fra nodi di rete (distribuzione *inter-nodo*) di rete è realizzata secondo una topologia ad albero, come illustrato in fig. 8. È importante rilevare che, nella strategia proposta, ogni orologio asservito deve, in ogni condizione di funzionamento della rete, ricavare il proprio segnale di riferimento solo da collegamenti che riconducono a una sorgente di sincronizzazione almeno dello stesso livello gerarchico; inoltre, devono essere assolutamente evitati i cosiddetti *timing loop*, cioè condizioni in cui il riferimento di temporizzazione in ingresso a un orologio sia riconducibile, attraverso il transito per altri orologi asserviti, al cronosegnale in uscita dall'orologio stesso.

Per la rete di sincronizzazione dell'SDH sono previsti quattro modi di funzionamento caratterizzabili come segue:

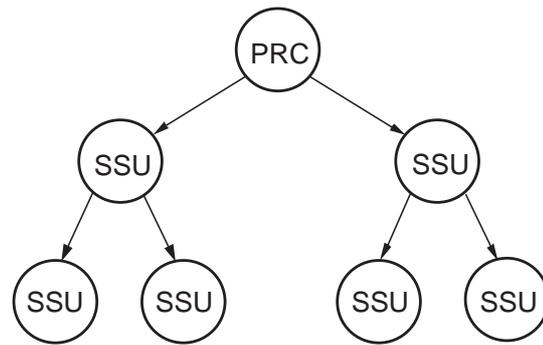
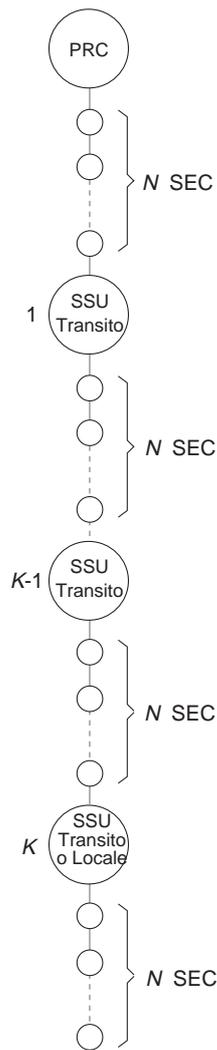


Figura 8 Architettura della distribuzione della sincronizzazione inter-nodo

- *modo sincrono*: tutti gli orologi della rete sono riconducibili a un unico PRC. Questo è il modo normale di funzionamento all'interno di una rete controllata da un unico gestore: in questo caso solo raramente si verificano aggiustamenti di puntatore negli apparati SDH;
- *modo pseudosincrono*: gli orologi della rete sono riconducibili a più di un PRC (tutti rispondenti alle specifiche della racc. G.811). Questo è il modo normale di funzionamento delle reti internazionali o multi-gestore. Gli aggiustamenti di puntatore si verificano in misura maggiore negli elementi di rete che sono di confine tra le varie sottoreti;
- *modo plesiocrono*: uno o più orologi della rete entrano in modalità di funzionamento autonomo a causa dell'assenza prolungata di ogni segnale di riferimento al loro ingresso. Gli aggiustamenti di puntatore si verificano con frequenze e modalità dipendenti dalla posizione del nodo nella rete SDH;
- *modo asincrono*: uno o più orologi della rete si trova a funzionare con deviazioni di frequenza che eccedono i limiti prescritti per il funzionamento autonomo. In tali condizioni l'apparato SDH non può trasmettere traffico ma solo eventuali segnali d'allarme.

Al fine di controllare mediante un opportuno dimensionamento della rete di sincronizzazione le degradazioni della stabilità del cronosegnale distribuito, si è adottato un approccio al progetto basato sulla configurazione di caso peggiore per le catene di orologi in cascata. In fig. 9 è riportato lo schema di riferimento provvisoriamente concordato in ambito CCITT dopo una complessa considerazione delle diverse situazioni nazionali. Gli orologi di nodo (SSU) sono interconnessi tramite sottocatene di  $N \leq 20$  orologi di apparato SDH (SEC) in cascata: la catena più lunga non deve contenere più di  $K=10$  SSU con un numero totale di SEC limitato a 60. Questi valori sono



Nello scenario di caso peggiore:  
 $K=10$ ,  
 $N=20$ , con il vincolo che il numero  
 totale di SEC sia limitato a 60

Figura 9 Configurazione di riferimento per le catene di orologi in cascata

stati derivati da calcoli teorici basati sull'uso di modelli matematici degli orologi asserviti e non tengono conto di ogni considerazione inerente l'affidabilità dei collegamenti di sincronizzazione.

## 5. Conclusioni

Nell'arco delle tre parti in cui è stato suddiviso questo articolo, si è tentato di tracciare un quadro generale degli aspetti fondamentali legati alla sincronizzazione

delle reti numeriche. Per la vastità degli argomenti considerati e tenuto conto dell'intenzione di rivolgersi a un lettore non necessariamente familiare con le problematiche trattate, il livello d'approfondimento dei singoli aspetti è stato necessariamente mantenuto nei limiti di una presentazione generale della materia. Al lettore che volesse ulteriormente arricchire le proprie conoscenze, si suggerisce di consultare la bibliografia riportata al termine di ciascuna parte, nella quale si è cercato d'individuare i più significativi contributi di carattere tecnico e normativo reperibili in letteratura.

## Bibliografia

- [1] Searle, C.L.; Brown, D.A.: *Comparison of performance criteria of frequency standards*. Proc. 16th Annual Symp. on Frequency Control, 1962, pp. 259-266.
- [2] Gersho, A.; Karafin, B.J.: *Mutual synchronization of geographically separated oscillators*. «Bell System Technical Journal», Vol. 45, 1966, pp.1689-1704.
- [3] Allan, D.W.: *Statistics of atomic frequency standards*. «Proceedings of the IEEE», Vol.54, n. 2, 1966, pp. 221-230.
- [4] Leeson, D.L.: *A simple model of feedback oscillator noise spectrum*. «Proceedings of the IEEE», Vol.54, 1966, p 329-330.
- [5] Cutler, L.S.; Searle, O.L.: *Some aspects of the theory and measurement of frequency fluctuations in frequency standards*. «Proceedings of the IEEE», Vol.54, n. 2, 1966, pp. 136-54.
- [6] Barnes, J.A. et al.: *Characterization of frequency stability*. «IEEE Transaction on instrumentation and measurement», Vol. IM-20, n. 2, 1971, pp.105-20.
- [7] Stover, H.A.: *Timing and synchronization of switched digital communications networks*. International Conference on Communications, 1976.
- [8] Decina, M.; Pietromarchi, A.; Bovo, A.; Musumeci, L.: *Development of network synchronization techniques in Italy*. International Conference on Communications, 1976.
- [9] Kroupa, V.F.: *Noise properties of PLL systems*. «IEEE Transaction on instrumentation and measurement», Vol. COM-30, n. 10, 1982, pp.2244-2252.
- [10] Best, R.E.: *Phase locked loops*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
- [11] Lindsey, W.C.; Ghazvinian, F.; Haggmann, W.C.; Dessouky, K.: *Network synchronization*. «Proceedings of IEEE», Vol. 73, n. 10, 1985, pp. 1445-1467.
- [12] Mungall, A.G.: *Frequency and time national standards*. «Proceedings of the IEEE», Vol.74, n. 1, 1986, pp.132-136.
- [13] Walls, F.L.; Allan, D.W.: *Measurements of frequency stability*. «Proceedings of the IEEE», Vol.74, n. 1, 1986, pp 162-67.

- [14] Walls, F.L.: *Frequency standards based on atomic hydrogen*. «Proceedings of the IEEE», Vol.74, n. 1, 1986.
- [15] Allan, D.W.: *Time and frequency (Time-Domain) characterization estimation, and prediction of precision clocks and oscillators*. «IEEE Transaction on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control», Vol. UFFC-34, n. 6, 1987, pp.647-654.
- [16] *Norma tecnica N. 702 per la sincronizzazione della rete numerica nazionale di telecomunicazioni*. Ministero delle Poste e Telecomunicazioni - Istituto Superiore P.T., edizione 1988.
- [17] Abate, J.E.; Butterline, E.W. et al.: *AT&T's new approach to the synchronization of telecommunication networks*. «IEEE Communications Magazine», Vol. 27, n. 4, 1989, pp. 35-45.
- [18] Kihara, M.: *Performance aspects of reference clock distribution for evolving digital networks*. «IEEE Communications Magazine», Vol. 27, n. 4, 1989, pp. 24-34.
- [19] Meyer, H.; Ascheid, G.: *Synchronization in digital communications*. John Wiley & Sons, New York, 1990, Vol.1.
- [20] Carbonelli, M.; De Seta, D.; Perucchini, D.: *Reference model and RTIErms for locked slave clocks*. CCITT XVIII, D.D.1590, Melbourne, dicembre 1991.
- [21] Attolini, G. et al.: *Gli orologi per la sincronizzazione delle reti numeriche: modelli, grandezze caratteristiche e stato della normativa*. «Note Recensioni Notizie», Vol. XL, n.3-4, 1991, pp.81-93.
- [22] Carbonelli, M.; De Seta, D.; Perucchini, D.; Ruffini, S.: *Synchronization of SDH networks: slave clock model and stability measures*. Proc. Globecom '92, Orlando, dicembre 1992, pp. 829-833.
- [23] Sexton, M.; Reid, E.: *Transmission networking: SONET and the Synchronous Digital Hierarchy*. Artech House, Boston, 1992.
- [24] Brugia, O.; Carbonelli, M.; De Seta, D.; Perucchini, D.; Ruffini, S.: *Caratterizzazione e analisi della stabilità degli orologi asserviti*. «Int. Rep. FUB», 3B02692, Roma, 1992.
- [25] Carbonelli, M.; De Seta, D.; Perucchini, D.: *TIErms accumulation along slave clock chains*. Proc. ICC '93, Ginevra, maggio 1993.
- [26] *Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks*. Rac. CCITT G.783, Ginevra, novembre 1992.
- [27] *Architectures of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH)*. Rac. CCITT G.803, Ginevra, giugno 1992.
- [28] *Consideration on timing and synchronization issues*. Rac. CCITT G.810, Blue Book, Melbourne, 1988.
- [29] *Timing requirements at the outputs of primary reference clocks suitable for plesiochronous operation of international digital links*. Rac. CCITT G.811, Blue book, Vol.III, fascicolo III.5, Melbourne, 1988.
- [30] *Timing requirements at the outputs of slave clocks suitable for plesiochronous operation of international digital links*. Rac. CCITT G.812, Blue book, Vol.III, fascicolo III.5, Melbourne, 1988.
- [31] *Timing characteristics of slave clocks suitable for operation in SDH equipments*. Draft Rac. CCITT G.81s, Ginevra, dicembre 1992.
- [32] *Controlled slip rate objectives on an international digital connection*. Rac. CCITT G.822, Blue book, Vol.III, fascicolo III.5, Melbourne, 1988.

# Criteri per il progetto di una rete di sincronizzazione nazionale

A. Mariconda, A. Manzalini (\*)

*Questo articolo, dopo una descrizione delle principali metodologie utilizzabili per la distribuzione di riferimenti di sincronizzazione in una rete di telecomunicazione complessa, si sofferma sulle caratteristiche di una rete di sincronizzazione nazionale adatta per la nuova gerarchia di multiplexazione sincrona SDH. Successivamente viene proposta più in dettaglio una possibile architettura della rete e ne viene brevemente descritta l'implementazione di un primo nucleo nell'ambito della rete pilota SDH della SIP.*

## 1. Introduzione

La soluzione del problema relativo alla distribuzione dei riferimenti di sincronizzazione in una rete estesa a livello geografico, affrontato fin dai tempi dell'introduzione della tecnica PCM (Pulse Code Modulation) nella seconda metà degli anni '50, ha costituito un fattore di fondamentale importanza nello sviluppo delle reti di telecomunicazione numeriche. Infatti in sintesi, "sincronizzare" vuol dire distribuire in ogni nodo della rete un segnale di riferimento che soddisfi determinate caratteristiche di stabilità e precisione in modo che gli apparati numerici della rete, quali ad esempio autocommutatori, ripartitori, multiplatori, terminali numerici operino sulla base di riferimenti temporali comuni. Ciò è condizione necessaria perché lo scambio di informazioni tra tali apparati possa avvenire senza che le memorie elastiche tendano a riempirsi o a svuotarsi eccessivamente. Infatti l'eccessivo riempimento o svuotamento delle memorie elastiche può portare rispettivamente alla perdita o alla duplicazione di gruppi di bit appartenenti al flusso trasmesso con una conseguente ripercussione sulla qualità dei servizi e sulle effettive capacità dei collegamenti. Tali eventi di perdita o duplicazione di gruppi di bit, noti con il termine 'slip' cioè "slittamenti", vengono provocati da dissintonie tra le temporizzazioni degli apparati tra cui è instaurato il

collegamento numerico. La sincronizzazione ha quindi l'obiettivo di consentire il trasferimento dell'informazione fra i sistemi numerici in assenza di slip o, in termini più realistici, in condizioni di tasso di slip "controllato". Essa comprende dunque quell'insieme di tecniche volte alla generazione del segnale di sincronismo ed alla sua distribuzione in rete.

La progettazione di una rete di sincronizzazione su scala nazionale costituisce un problema di notevole complessità. Infatti l'obiettivo della rete di sincronizzazione è di rendere disponibile un riferimento che rispetti determinate caratteristiche in termini di stabilità a breve ed a lungo termine e che sia il più possibile immune da disturbi tipici quali micro-interruzioni, jitter e wander<sup>(1)</sup>. Inoltre occorre considerare che i riferimenti di sincronizzazione vengono trasportati utilizzando collegamenti che, oltre ad introdurre ovviamente un ritardo di trasmissione, provocano sul segnale degradazioni e disturbi. Tali degradazioni, in alcuni casi (ad esempio, come verrà meglio illustrato in seguito, nei collegamenti SDH), possono derivare a loro volta proprio da imperfezioni nella distribuzione della sincronizzazione.

Da tali considerazioni, risulta già evidente come il

---

(\*) Ing. Alfonso Mariconda -SIP DG- Roma; Ing. Antonio Manzalini -CSELT- Torino

---

(1) Si definisce con il termine jitter lo scostamento (variazione di fase) non sistematico di un segnale numerico rispetto all'istante teorico in cui l'impulso dovrebbe avere ampiezza massima. Se tali scostamenti avvengono con frequenza inferiore ai 10 Hz viene utilizzato invece il termine wander.

progetto di una rete di sincronizzazione non possa essere effettuato “semplicemente” utilizzando orologi con determinate caratteristiche di stabilità ma implichi una serie di azioni preliminari volte alla esatta caratterizzazione degli orologi di apparato presenti in rete (che utilizzeranno il riferimento di sincronizzazione per agganciarsi in fase e frequenza), dei collegamenti da utilizzare per il trasporto dei riferimenti, della topologia e della architettura di rete più adatte allo scopo.

Tenute in considerazione le difficoltà sopra descritte, la necessità di affrontare lo sviluppo di una rete di sincronizzazione nazionale deriva anche dalla constatazione che i malfunzionamenti derivanti da imperfezioni nella distribuzione della sincronizzazione, hanno tipicamente la caratteristica di essere “latenti”, nel senso che possono presentarsi in maniera discontinua e non prevedibile, e di essere difficilmente controllabili. Inoltre essi possono avere un forte impatto direttamente sulle prestazioni di qualità di molti servizi forniti alla utenza.

Come precedentemente accennato, le imperfezioni nella distribuzione dei riferimenti di sincronizzazione hanno come conseguenza immediata la generazione di “slip” i quali provocano effetti differenti a seconda del tipo di servizio che viene trasportato sul collegamento. Studi condotti nel corso degli anni ottanta [1] hanno quantificato le degradazioni subite da alcuni servizi forniti alla utenza a causa di slip:

- la trasmissione di un fax di gruppo 3, ad esempio, a causa di un singolo slip può essere seriamente compromessa; infatti uno slip può provocare l’assenza di un massimo di otto linee orizzontali che, considerando una risoluzione di 100 linee/pollice, provoca la ricezione di una linea non significativa alta più di 2 mm. Inoltre questo tipo di malfunzionamento non viene rilevato dal fax che continua a trasmettere senza segnalare alcun errore e senza diminuire la velocità di trasmissione.
- Per quanto riguarda invece una trasmissione dati in banda fonica, un singolo slip causa un burst di errori su un intervallo temporale che può essere compreso tra 10 ms e 1.5 s la cui durata è funzione sia della frequenza di cifra, sia del tipo di modem utilizzato; durante questo periodo vengono trasmessi dati errorati ed in generale si rende necessaria una ritrasmissione o, in alcuni casi, un ‘reset’ del modem.
- Per quanto riguarda i servizi vocali, come è noto, un singolo slip provoca un “click” facilmente udibile che però non compromette la possibilità di conversare in maniera intelligibile (tipicamente alcuni “click” al minuto sono considerati tollerabili). Il problema può invece sorgere nel caso di trasmissione di voce criptata; infatti in questo caso lo slip può provocare la perdita della chiave con conseguente necessità di ritrasmissione della stessa; questo, dal punto di vista della sicurezza, può risultare inaccettabile (in questi casi non è tollerato più di uno slip al giorno). Il problema può sorgere ad

esempio nelle reti radiomobile numeriche.

- Per altri servizi quali, ad esempio, la trasmissione video numerica, i problemi causati da un singolo slip dipendono dalla tipologia degli apparati di codifica e di compressione utilizzati per la conversione analogico-numerica del segnale video; in generale la degradazione del segnale risulta più seria negli apparati di codifica a bassa frequenza di cifra nei quali un singolo slip causa l’oscuramento o la distorsione di alcune zone dell’immagine per periodi di alcuni secondi.

Risulta quindi evidente che la presenza di un elevato tasso di slip in una rete di telecomunicazione può avere un forte impatto sulle prestazioni in termini di qualità, tasso di errore, “throughput”<sup>(2)</sup> e ritardo di trasmissione sia su servizi di trasmissione dati che su servizi intrinsecamente analogici (voce, fax, video).

Le specifiche riguardanti la presenza di slip controllati in una rete di trasmissione sono riportate nella Raccomandazione ITU-T G.822 [2]. Questa Raccomandazione indica che in una rete perfettamente sincronizzata, con linee di trasmissione ideali, gli slip dovrebbero essere assenti. A causa della non idealità dei processi di trasmissione e sincronizzazione, gli slip sono comunque presenti e dipendono dalla stabilità a breve e lungo termine degli orologi asserviti e dalla presenza di jitter e wander sulle linee di trasmissione. In essa vengono quindi specificate le percentuali di tempo per cui è ammesso un fissato numero massimo di slip in un dato periodo (es. giorno; cfr. tab. 2). In particolare il controllo del jitter e del wander può essere ottenuto in parte utilizzando collegamenti che assicurino una ottima qualità trasmissiva, ma in maniera più efficace utilizzando orologi di nodo (SSU<sup>(3)</sup> - Synchronization Supply Unit) in ognuno dei nodi della rete di sincronizzazione (coincidenti tipicamente con i principali edifici di centrale), in grado di svolgere le due seguenti funzioni basilari:

- filtrare i disturbi presenti sul segnale di riferimento ricevuto, al fine di generare un’ottima approssimazione del segnale di sincronizzazione emesso dall’orologio primario (PRC-Primary Reference Clock) della rete di sincronizzazione (remoto), che possa essere utilizzata come riferimento dagli apparati installati in un edificio di centrale;

---

(2) Il throughput misura il numero medio di byte d’utente trasmessi in un collegamento nella unità di tempo.

(3) In ambito di normativa internazionale il termine SSU indica la funzione logica che accetta più riferimenti, si asserva ad uno di essi, lo filtra e distribuisce un numero di riferimenti in uscita. L’implementazione fisica di questa funzione può essere un apparato dedicato alla sincronizzazione (che prende il nome di SASE - Stand-Alone Synchronization Equipment) o può essere integrato in un apparato SDH o in un autocommutatore. Nel seguito del documento si parlerà sempre della funzione SSU anche se, il più delle volte, si intenderà la sua implementazione fisica come apparato stand-alone (SASE).

- in caso di assenza del riferimento, mantenere per un dato periodo minimo una frequenza di oscillazione, in generale ottenuta come media pesata delle frequenze misurate sul riferimento durante un certo intervallo di tempo prima che avvenisse l'interruzione (holdover).

La prima funzione fa sì che l'apparato SSU "rigeneri" il riferimento di sincronizzazione ricevuto riproducendo un segnale molto simile a quello emesso dal PRC. In prima approssimazione un SSU può essere considerato come un filtro passa-basso nei confronti del rumore di fase che quindi consente di ridurre le instabilità a breve termine (jitter) presenti sul segnale di riferimento ricevuto, provocate dagli apparati trasmissivi e dalle linee. In ultima analisi il segnale d'uscita di un SSU avrà la stabilità a lungo termine del PRC (remoto) e la stabilità a breve termine dell'orologio interno (locale).

Per quanto riguarda invece la seconda funzione, un SSU deve controllare il riferimento e, qualora rilevi delle interruzioni, portarsi in modalità di holdover. In seguito, una volta rilevato un riferimento nuovamente affidabile, tale SSU dovrà riagganciarsi al riferimento esterno in maniera tale però da limitare l'accumulo a lungo termine dell'errore di fase stesso (wander).

La principale motivazione per lo sviluppo di una nuova rete di sincronizzazione nasce dalla prevista introduzione nella rete di trasporto degli apparati SDH. Infatti, come descritto nel seguito dell'articolo, gli apparati SDH necessitano di riferimenti di sincronismo con caratteristiche di stabilità e precisione molto stringenti al fine di limitare l'attività del puntatore e ridurre, di conseguenza, il jitter sui tributari restituiti alle interfacce plesiocrone. Peraltro occorre attentamente valutare le possibilità di una piena integrazione tra la nuova rete e le reti di sincronizzazione già esistenti.

Nel seguito dell'articolo vengono brevemente introdotte le possibili architetture di una rete di sincronizzazione e le reti di sincronizzazione attualmente in esercizio in Italia. Successivamente vengono delineati i criteri per la definizione della struttura di una rete di sincronizzazione nazionale, con particolare riferimento alle specifiche esigenze della rete SDH. Infine si accenna ad alcuni problemi relativi al trasporto dei segnali di sincronismo sulla rete SDH.

## 2. Possibile struttura di una rete di sincronizzazione

Il problema della sincronizzazione di una rete di telecomunicazione estesa su scala nazionale può essere risolto sostanzialmente con metodi che si differenziano tra loro per la presenza o meno di segnali di controllo della sincronizzazione e per i tipi di segnali di controllo utilizzati. Di conseguenza le reti di sincronizzazione possono essere classificate in due categorie principali (fig. 1): reti sincrone, le quali a loro volta si differenziano per l'architettura di rete utilizzata e per le modalità di

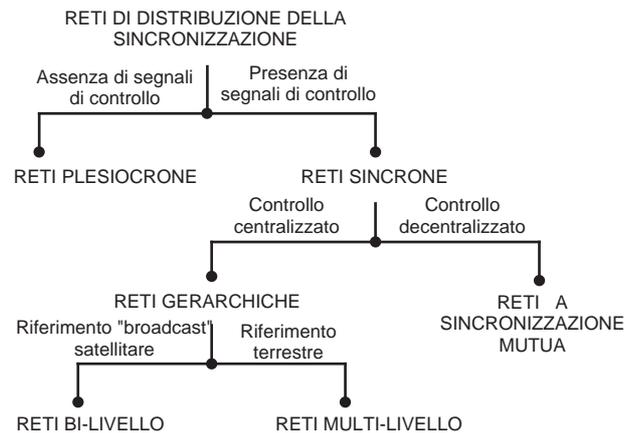


Figura 1 Classificazione delle reti di sincronizzazione

distribuzione del sincronismo tra gli orologi costituenti la rete stessa, e reti plesiocrone.

In generale infatti nelle reti sincrone tutti gli orologi costituenti la rete di sincronizzazione sono "agganciati" in fase ed in frequenza ad un riferimento che può essere ottenuto o utilizzando un orologio di precisione superiore a quella degli orologi di rete (reti master/slave) oppure effettuando una media delle frequenze di oscillazione di tutti o di alcuni orologi di rete (reti a sincronizzazione mutua).

Le reti plesiocrone invece sono in generale costituite da orologi che oscillano in maniera indipendente dagli altri orologi costituenti la rete e le cui prestazioni in termini di stabilità e precisione rientrano in assegnate specifiche.

Nel seguito del paragrafo vengono descritte in maggior dettaglio le tipologie di reti di sincronizzazione più comunemente implementate accennando ai pregi e difetti tipici delle differenti soluzioni.

### 2.1 Tecniche di sincronizzazione di rete

Come precedentemente descritto, sulla base delle tecniche di sincronizzazione adottate, le reti di telecomunicazione si possono classificare in due gruppi:

1. reti plesiocrone;
2. reti sincrone.

#### 2.1.1 Reti plesiocrone

Una rete plesiocrona può essere schematizzata come un grafo costituito esclusivamente da nodi senza alcun arco. Ciascun nodo della rete dispone di un orologio locale le cui prestazioni soddisfano assegnate specifiche in termini soprattutto di stabilità e precisione; tale orologio non riceve né trasmette alcun segnale di controllo che consenta di compensare eventuali scostamenti tra la sua frequenza di oscillazione libera e

quella degli altri orologi della rete. Di conseguenza, nonostante il fatto che le frequenze di tutti gli oscillatori siano tarate su uno stesso valore nominale in fase di installazione, poiché gli orologi di una rete plesiocrona sono indipendenti, lo scarto di fase tra di essi cresce linearmente a causa delle inevitabili differenze della frequenza di oscillazione reale. Inoltre altri fattori, quali derive (drift) di frequenza, dovute prevalentemente all'invecchiamento degli oscillatori, e rumore di fase, generato internamente negli orologi, possono contribuire all'accumulo dell'errore di fase fra i nodi della rete. Tale errore di fase può, in alcuni casi, eccedere un valore di soglia considerato accettabile, oltre il quale le prestazioni della rete vengono generalmente compromesse in maniera grave; in questo caso occorre tarare nuovamente tutti gli orologi di rete. L'intervallo temporale tra due fasi di taratura successiva degli orologi della rete è funzione della qualità degli oscillatori e della soglia di tolleranza del rumore di fase.

Tra i principali vantaggi della tecnica di temporizzazione adottata per le reti plesiocrone si sottolinea la semplicità di implementazione e la robustezza ai guasti derivante dal fatto che l'indipendenza di ciascun orologio da tutti gli altri fa sì che un guasto su di un oscillatore non abbia alcuna conseguenza sugli altri.

Lo svantaggio più evidente è rappresentato dagli elevati costi di manutenzione degli orologi e dalle periodiche calibrazioni di cui essi necessitano (vedi tab. 1).

La tecnica di sincronizzazione plesiocrona è utilizzata, ad esempio, nella rete di trasporto numerica attualmente in esercizio basata sulla gerarchia di moltiplicazione plesiocrona (PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy). Infatti gli apparati che realizzano la catena di moltiplicazione plesiocrona 2 - 8 - 34 - 140 - 565 Mbit/s non hanno un riferimento di sincronizzazione comune.

### 2.1.2 Reti sincrone

Una rete sincrone può essere schematizzata con un grafo costituito da nodi (orologi) ed archi (collegamenti di sincronizzazione).

In generale in ciascun nodo è presente almeno un orologio di edificio di centrale (SSU) costituito dall'oscillatore vero e proprio e da tutta la circuiteria necessaria per realizzare sia l'aggancio in fase e frequenza al segnale di riferimento sia l'elaborazione, la gestione e la distribuzione del segnale di sincronismo a tutti gli apparati dell'edificio di centrale in cui l'orologio è installato. A sua volta ciascun apparato o sistema presente nell'edificio di centrale deve essere dotato di un oscillatore in grado di asservirsi all'apparato SSU.

Gli archi del grafo rappresentano invece i collegamenti tra gli orologi di edificio di centrale che consentono di realizzare la struttura complessiva della rete di sincronizzazione, distribuendo il segnale di sincronismo

a tutti gli apparati di rete. Tali archi sono fisicamente costituiti da apparati trasmissivi e linee.

In una rete sincrone, tutti gli orologi sono agganciati in fase e frequenza ad un segnale di temporizzazione comune; di conseguenza il segnale di sincronismo generato da due orologi della rete in posizione remota è in media il medesimo.

Questa tecnica può essere realizzata secondo due modalità che si distinguono per la natura dei segnali di controllo che vengono utilizzati e per la architettura complessiva della rete:

- modalità con controllo centralizzato o sincronizzazione master-slave;
- modalità con controllo non centralizzato o sincronizzazione mutua.

Le reti che utilizzano la modalità con controllo centralizzato master-slave, sono dotate di un orologio primario (generalmente atomico) in grado di fornire il riferimento temporale a tutta la rete di sincronizzazione; tutti gli orologi della rete sono asserviti direttamente od indirettamente all'orologio primario. Esse sono schematizzabili con grafi ad albero (vedi tab. 1) aventi come radice l'orologio di riferimento primario (PRC).

Ogni orologio (slave) della rete riceve il riferimento da un orologio di livello gerarchico superiore (master) che, a sua volta, può ricevere il riferimento da un orologio di livello ancora superiore. L'orologio slave opera generando un segnale di errore (ottenuto comparando il riferimento ricevuto con il suo riferimento interno) che viene utilizzato per correggere la propria frequenza di oscillazione. Di conseguenza in regime stazionario tutti gli orologi della rete sono agganciati all'orologio primario.

Le reti gerarchiche master-slave possono, a loro volta, essere suddivise in reti bi-livello e reti multi-livello:

Nel primo caso tutti gli orologi della rete ricevono il riferimento direttamente dal PRC; una tipica realizzazione potrebbe ad esempio prevedere la distribuzione del sincronismo via satellite a tutti gli orologi della rete collocati su di un unico livello gerarchico.

Nel secondo caso, e più in generale, la distribuzione del segnale di sincronismo è articolata secondo più livelli gerarchici. Il PRC distribuisce il riferimento ad un numero limitato di orologi che, a loro volta, lo distribuiscono agli orologi dei livelli più bassi. In particolare un apparato di un determinato livello è asservito al livello gerarchico superiore e distribuisce il cronosegno ad apparati del livello immediatamente inferiore.

Il principale vantaggio derivante dalla utilizzazione della tecnica di sincronizzazione master-slave risiede nel fatto che, l'assenza di "loop"<sup>(4)</sup> di sincronizzazione (derivante dalla topologia ad albero di tali reti),

(4) Un loop di sincronizzazione si verifica quando almeno un orologio si asserva ad un segnale di riferimento tracciabile al segnale d'uscita da esso generato.

riduce la durata dei transitori che si verificano a seguito di riconfigurazioni di rete ad esempio per protezione, ed evita l'insorgenza di fenomeni di instabilità. Inoltre le reti master-slave sono relativamente facili da implementare.

Il principale svantaggio è rappresentato dal fatto che un guasto dell'orologio di riferimento (PRC), comporta la perdita del riferimento principale per tutta la rete. Questo problema può essere parzialmente risolto duplicando il PRC ed inoltre, nel caso di perdita di tutti i riferimenti primari, designando una gerarchia di orologi principali alternativi e disponendo l'oscillazione in holdover o free-running degli orologi privi di riferimento valido. In questo ultimo caso comunque, pur trascurando gli effetti della fase di transizione dovuta al cambio del riferimento principale di rete, gli orologi alternativi non avranno in generale le medesime prestazioni dei PRC e quindi le prestazioni della rete di sincronizzazione subiscono comunque un degrado.

Nelle reti che utilizzano la modalità di sincronizzazione mutua, non esiste invece un orologio principale di riferimento, bensì ogni orologio controlla la propria frequenza di oscillazione riducendo l'errore di fase tra il segnale generato ed una media dei riferimenti che riceve da un certo numero di altri orologi della rete. In questo caso cioè tutti gli orologi della rete contribuiscono equamente

alla determinazione del cronosegnale di sincronismo. Tali reti sono schematizzabili con grafi non completi dotati di archi bidirezionali tra i nodi (vedi tab. 1).

Il principale vantaggio della tecnica di sincronizzazione mutua deriva dal fatto che il controllo della frequenza di rete è decentralizzato e che quindi un guasto su di un orologio della rete non ha grande impatto sulle prestazioni complessive.

Tra i principali svantaggi della modalità di sincronizzazione mutua si sottolinea la dipendenza della frequenza e della stabilità del cronosegnale di rete dalla dinamica dei ritardi di propagazione dei segnali dei vari orologi. Inoltre questa tecnica comporta considerevoli problemi di stabilità e di gestione della rete nel suo complesso per la possibilità che si creino loops, soprattutto durante i transitori dovuti ad esempio alla disattivazione od alla aggiunta di un nodo.

Entrambe queste modalità di sincronizzazione possono prevedere tecniche di compensazione del ritardo introdotto dalla propagazione del cronosegnale di riferimento nel mezzo trasmissivo tra i nodi della rete, che possono in alcuni casi migliorarne le prestazioni. Tali tecniche sono alquanto complesse e richiedono generalmente dei canali bidirezionali per scambio di dati tra i nodi di rete; di conseguenza attualmente non è prevista l'utilizzazione.

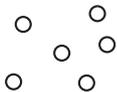
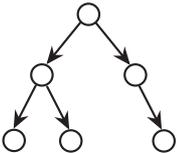
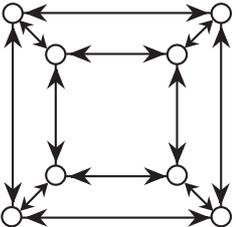
STRUTTURA DI RETE	VANTAGGI	SVANTAGGI
PLESIOCRONA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semplicità di implementazione</li> <li>• Indipendenza delle prestazioni di rete da guasti sul singolo nodo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessità di orologi di ottima qualità</li> <li>• Frequenti tarature degli orologi di rete</li> </ul>
MASTER-SLAVE 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assenza di loop di sincronizzazione</li> <li>• Semplicità di implementazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequenza di oscillazione della rete controllata a livello centralizzato</li> <li>• Necessità di riconfigurazione in caso di guasto dell'orologio master</li> <li>• Errore di tempo crescente col livello gerarchico</li> </ul>
SINCRONIZZAZIONE MUTUA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consente il controllo decentralizzato di tempo/frequenza</li> <li>• Necessità nei nodi di orologi di media qualità</li> <li>• Ogni nodo ha il medesimo peso sulle prestazioni di rete</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La frequenza e la stabilità di rete dipendono dai tempi di ritardo dei collegamenti tra i nodi</li> <li>• Presenza di loop di sincronizzazione</li> <li>• Elevata complessità di implementazione</li> </ul>

Tabella 1 Vantaggi e svantaggi di differenti architetture di rete di sincronizzazione

### 3. Principali reti di sincronizzazione per telecomunicazioni civili attualmente in esercizio in Italia

Le reti di sincronizzazione per telecomunicazioni civili attualmente in esercizio su scala nazionale in Italia sono gestite dalla SIP, dalla Iritel e dalla Italcable; esse sono state progettate al fine di sincronizzare le reti telefoniche numeriche e le reti specializzate per trasmissione dati. In particolare le principali reti di sincronizzazione SIP sono: la rete di sincronizzazione delle centrali di commutazione numeriche, quella dei permutatori (RED Ripartitori Elettronici Digitali) della Rete Flessibile e quella dei CDN (Collegamenti Diretti Numerici).

Come illustrato in fig. 2, la rete di sincronizzazione delle centrali numeriche è del tipo gerarchico master-slave strutturata su tre livelli secondo la Norma Tecnica N.° 702 dell'ISPT[3]; essa utilizza esclusivamente gli orologi interni di apparato delle centrali di commutazione e non prevede quindi attualmente l'utilizzazione di apparati di sincronizzazione (SSU). Il livello 1a è costituito da due Stadi di Gruppo di Transito (SGT) numerici situati entrambi a Roma (Roma Sud e Roma Inviolatella) che ricevono il segnale di sincronizzazione direttamente dall'Orologio Nazionale di Riferimento (ONR, situato anch'esso a Roma presso l'ISPT) mediante collegamenti a 2 MHz su fibra ottica e su cavo coassiale; essi distribuiscono i segnali di sincronizzazione agli autocommutatori di livello 1b (coincidenti con i restanti SGT) mediante flussi a 2 Mbit/s; questi ultimi, a loro volta, distribuiscono la sincronizzazione agli autocommutatori di livello 2 coincidenti con gli Stadi

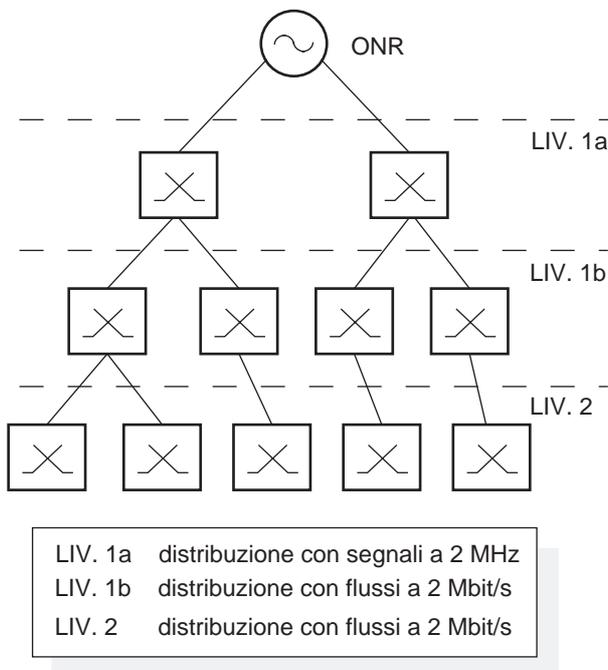


Figura 2 Struttura della rete di sincronizzazione degli autocommutatori numerici della SIP

di Gruppo Urbano (SGU) utilizzando sempre collegamenti a 2 Mbit/s.

La rete di sincronizzazione dei RED della Rete Flessibile è anch'essa di tipo gerarchico strutturata su tre livelli (anche in questo caso denominati livello 1a, livello 1b e livello 2). Inoltre essa è dotata nei nodi di livello 1a e di livello 1b (sostanzialmente coincidenti con i RED nodali della Rete Flessibile) di apparati esterni di sincronizzazione (SSU) dotati di oscillatori al quarzo che vengono utilizzati esclusivamente nel caso di perdita del segnale di sincronizzazione, proveniente dal livello di rete superiore, per migliorare le prestazioni di 'holdover'. I nodi di livello 1a ricevono il riferimento direttamente dall'ONR mediante collegamenti dedicati a 2 MHz; essi sono installati a Roma (Roma Sud (CTRL), Roma Centro e Roma Inviolatella); i rimanenti RED nodali appartengono tutti al livello 1b mentre i RED urbano distrettuali appartengono al livello 2. I riferimenti di sincronizzazione vengono trasportati utilizzando flussi a 2 Mbit/s. Inoltre, al fine di aumentare la disponibilità della rete, sfruttando le capacità di permutazione dei flussi a 2 Mbit/s assicurate dai RED stessi, è stato previsto, come illustrato in fig. 3, un anello di sincronizzazione che, in caso di guasto consente alla rete di riconfigurarsi in maniera tale da "eleggere" come orologio master un RED nodale di livello 1b installato a Milano ed in sequenza successiva, in caso di ulteriore guasto, un RED di Bologna, Napoli, Torino, Bari e Palermo.

La rete di sincronizzazione della CDN è anch'essa di tipo master-slave su tre livelli gerarchici. Il primo livello è costituito dall'ONR situato in Roma; il livello 2 comprende i tre nodi di Milano, Bologna e Napoli equipaggiati di SSU dotati di oscillatori al quarzo di buona qualità; il livello tre comprende diciassette nodi (Centri di Compartimento) dotati di SSU al quarzo. Tutte le interconnessioni tra i nodi di livello 1, 2 e 3 sono realizzate mediante flussi numerici a 2 Mbit/s.

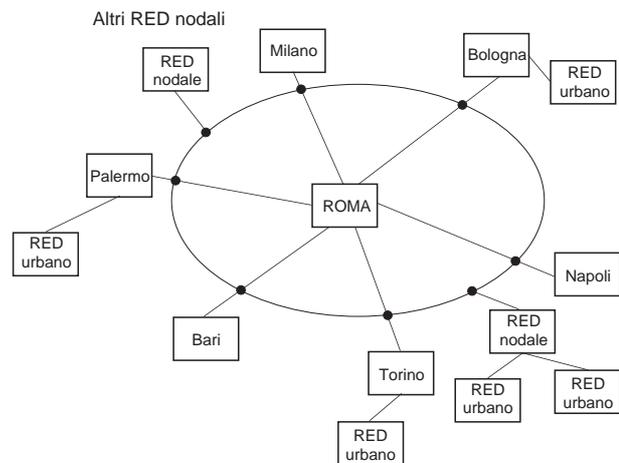


Figura 3 Schema delle interconnessioni tra i RED per la sincronizzazione della Rete Flessibile

Per quanto riguarda Iritel è in fase di installazione una rete di sincronizzazione per la rete a lunga distanza sincrona (SDH). Anche in questo caso la struttura della rete è gerarchica master-slave su tre livelli: il livello 1a è costituito dal nodo di Roma Centro (Trevi) il quale riceve il riferimento direttamente dall'ONR; il livello 1b è costituito da cinque nodi (situati a Roma, Milano, Bari, Palermo e Verona) mentre il livello 2 comprende gli altri 46 nodi distribuiti su tutto il territorio nazionale; i nodi sono costituiti da SSU dotati di oscillatori atomici al Rubidio nei nodi di livello 1a e 1b e di oscillatori al quarzo nei nodi di livello 2. I collegamenti tra il nodo di livello 1a ed i nodi di livello 1b sono duplicati ed in diversità di percorso; il numero totale di SSU previsti in rete è quindi di 52 unità ad installazione conclusa. Al giugno 1993 sono stati installati gli SSU in tutti i nodi di livello 1a e di livello 1b, mentre si sta procedendo alla installazione nei nodi di livello 2.

La centrale Roma Centro, essendo di livello 1a per la rete di sincronizzazione dell'Iritel, riceve il riferimento di sincronizzazione a 2.048 MHz direttamente dall'ONR installato presso l'ISPT, mediante due collegamenti, uno già operativo su cavo coassiale ed uno, in via di installazione, in fibra ottica. Per ragioni di affidabilità è previsto che nella centrale siano disponibili anche un riferimento proveniente da un orologio al Cesio della SIP ed uno proveniente da un orologio al Cesio della Italcable da utilizzarsi qualora venissero a mancare i collegamenti con l'ONR.

Per quanto riguarda infine Italcable, è attualmente in esercizio una rete di sincronizzazione gerarchica "master-slave" costituita da tre nodi: il nodo di Acilia, di livello 1a, che riceve il segnale di sincronizzazione a 2 MHz direttamente dall'ONR ed i nodi di Milano e Palermo, di livello 1b, che ricevono il segnale di sincronizzazione dal nodo di Acilia. Il collegamento tra l'ONR ed il nodo di Acilia è duplicato in diversità di percorso e di mezzo trasmissivo (ponte radio e fibra ottica), mentre la sincronizzazione dal nodo di Acilia ai due nodi di livello 1b viene trasportata su collegamenti a 2 Mbit/s. Gli SSU utilizzati in tutti e tre i nodi sono dotati di oscillatori al quarzo di elevata qualità.

#### 4. Possibili caratteristiche di una nuova rete di sincronizzazione per la SDH

La necessità di una nuova rete di sincronizzazione SIP, dotata di apparati specializzati per la distribuzione dei riferimenti sia agli autocommutatori numerici, sia agli apparati trasmissivi plesiocroni (RED 1/0) e sincroni (SDH), è suffragata sia dalla necessità di migliorare le prestazioni della rete trasmissiva attualmente in esercizio, sia soprattutto dai requisiti più stringenti degli apparati basati sulla gerarchia di multiplazione sincrona (SDH) di prossima introduzione. In questo caso infatti, come

descritto più in dettaglio nel § 4.3, uno degli aspetti critici per l'interlavoro tra PDH e SDH è quello di contenere il jitter ed il wander di rete, che possono provocare un'eccessiva attività del puntatore negli apparati SDH e, di conseguenza, indurre un ulteriore aumento del jitter sui tributari plesiocroni all'interfaccia di uscita della rete sincrona.

La definizione dei criteri di progetto di una rete di sincronizzazione nazionale è condizionata dall'architettura delle reti di sincronizzazione in esercizio, dalla configurazione dell'attuale rete di telecomunicazione, dalla relativa evoluzione e dalla necessità di ottimizzare i costi e le prestazioni dei servizi offerti.

Il progetto di una rete di sincronizzazione ha l'obiettivo di definire i seguenti parametri:

- tecnica di sincronizzazione;
- prestazioni delle sorgenti primarie;
- prestazioni e collocazione degli orologi di edificio di centrale (SSU);
- prestazioni della rete di sincronizzazione in termini di tasso di slip, jitter e wander riscontrabili sulla rete trasmissiva.

Inoltre poiché le prestazioni dei rami tra i nodi di sincronizzazione (SSU) sono dipendenti sia dalle caratteristiche delle linee, sia dagli orologi degli apparati trasmissivi attraversati, occorre considerare anche le prestazioni di questi ultimi, con particolare riferimento alla rete SDH.

Come visto precedentemente, la SIP ha attualmente in esercizio tre principali reti di sincronizzazione; nasce quindi l'esigenza di individuare un modello di riferimento che consenta di valutare la possibilità e/o l'opportunità di integrare queste in una unica rete di sincronizzazione rispondente anche alle nuove esigenze dettate dallo sviluppo della rete di trasporto SDH.

L'architettura di riferimento per la rete nuova di sincronizzazione nazionale è anch'essa conforme alla Norma Tecnica ISPT N° 702 [3] ed alla normativa definita dagli organismi internazionali di standardizzazione; essa è in linea, in particolare, con gli standard emergenti riguardanti l'introduzione della gerarchia di multiplazione sincrona SDH.

In particolare, la Raccomandazione ITU-T G.803 [4] definisce un modello di riferimento per la rete di sincronizzazione della SDH che prevede un Primary Reference Clock (PRC), conforme alla Raccomandazione ITU-T G.811 [6], al quale si asservono catene di  $K$  orologi asserviti (SSU) le cui specifiche sono definite nella Raccomandazione ITU-T G.812 [7]. Questi orologi sono interconnessi attraverso  $N$  elementi di rete SDH, ciascuno dei quali è dotato di un orologio interno (SEC - SDH Equipment Clock) conforme alla Raccomandazione ITU-T G.81s [8] (fig. 4).

Il numero  $N$  degli orologi di apparato è limitato dalla degradazione che il segnale di temporizzazione subisce attraverso la rete e quindi dipende dal livello di qualità del sincrosegnale richiesto dall'ultimo elemento di rete:

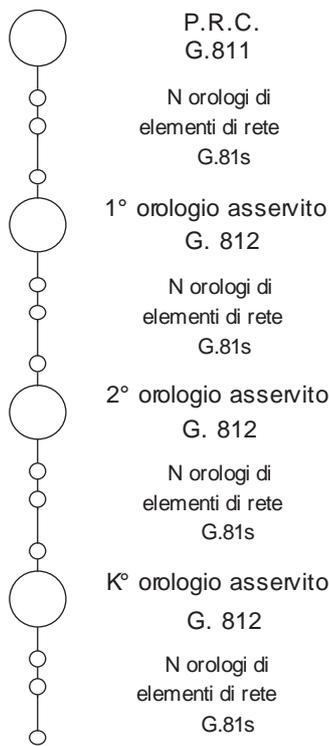


Figura 4 Modello di riferimento della rete di sincronizzazione

attualmente questa specifica è definita dalla maschera di stabilità a breve termine riportata nella Raccomandazione ITU-T G.783 [9] che prescrive i valori ammissibili del rumore di fase, espresso in termini del valore efficace dell'errore di intervallo di tempo  $TIE_{rms}^{(5)}$ , misurato all'uscita di un orologio in una sezione qualunque della rete di sincronizzazione.

Allo scopo di determinare le specifiche degli orologi asserviti, in riferimento ad un modello concreto di rete di sincronizzazione, sono stati fissati i valori massimi per  $N$  e  $K$  corrispondenti alla struttura di rete ritenuta, allo stato attuale, più critica:  $K=10$  ed  $N=20$  con il vincolo che il numero complessivo di orologi di elementi di rete SDH (SEC) sia limitato a 60. E' peraltro attualmente oggetto di studio l'ipotesi di ridurre ulteriormente tali valori, soprattutto per quanto riguarda il numero di SEC in cascata ( $N$ ), dato che, a fronte di simulazioni effettuate, sembra essere eccessivo.

#### 4.1 Tecnica di sincronizzazione di rete

L'architettura proposta per la nuova rete di sincronizzazione è di tipo master-slave. Ciascun nodo riceve i segnali di sincronismo provenienti da differenti orologi della rete. La scelta del segnale di sincronismo a cui asservire l'orologio del nodo è determinata secondo

(5) Per la definizione di questa ed altre grandezze citate vd. [17]

priorità assegnate in base alla posizione del nodo all'interno della rete di sincronizzazione.

La struttura specificata prevede il funzionamento sincrono della rete nazionale, che risulta plesiocrona rispetto alle reti degli altri paesi. Il livello 0 comprende il PRC cioè l'Orologio Nazionale di Riferimento (ONR) che genera il segnale di sincronismo campione che viene distribuito a tutti i restanti nodi della rete. In generale l'orologio di riferimento è costituito da un orologio atomico al cesio la cui stabilità è periodicamente controllata da laboratori metrologici accreditati. Il livello successivo è il livello 1, a sua volta suddiviso in livello 1a ed 1b.

Gli orologi di livello 1a sono asserviti, mediante collegamenti analogici a 2048 kHz conformi alla Raccomandazione ITU-TG.703 § 10, direttamente all'ONR.

Gli orologi di livello 1b, sono asserviti ai nodi di livello 1a ma, allo stesso tempo, nel caso venisse a mancare il riferimento, possono riconfigurarsi in maniera tale da "eleggere" uno di essi master di rete.

I nodi di livello 1b sono sorgenti di riferimento per i nodi di livello 2 che, a loro volta, forniscono la sincronizzazione ai nodi di livello 3 (fig. 5).

La distribuzione dei sincronismi tra i nodi della rete di sincronizzazione (distribuzione *inter-node*) avviene utilizzando normali collegamenti trasmissivi. Come soluzione obiettivo nel lungo termine si prevede di utilizzare il segnale di linea dei collegamenti SDH tra i nodi. Nel breve-medio termine potranno essere utilizzati canali a 2.048 Mbit/s trasportati sui consueti collegamenti in fibra ottica a 140 o 565 Mbit/s. Ulteriori dettagli sulle problematiche legate al trasporto dei riferimenti sono dati nel § 4.6.

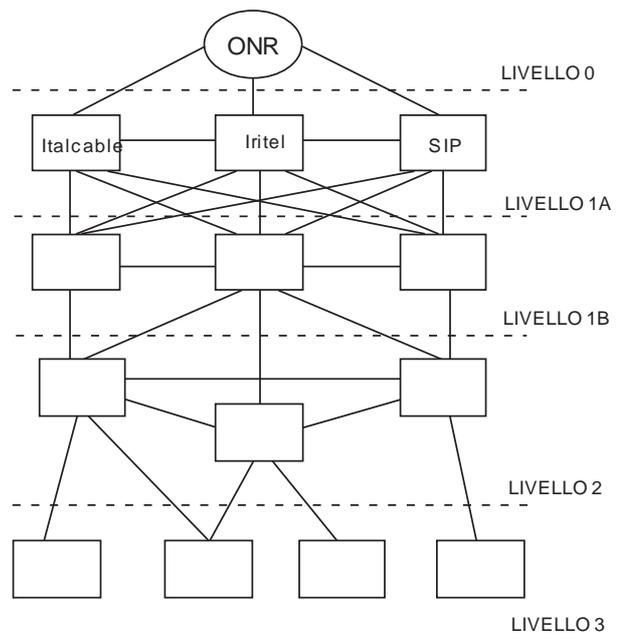


Figura 5 Architettura di rete di sincronizzazione conforme alla Norma Tecnica N. 702

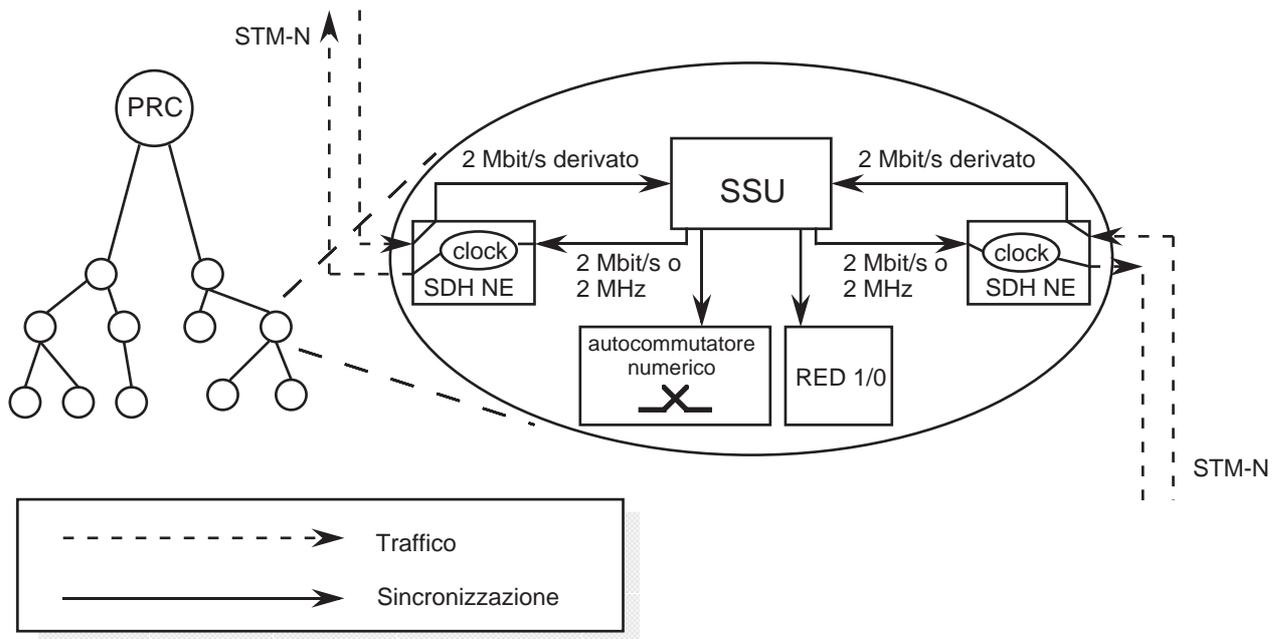


Figura 6 Distribuzione intra-node dei riferimenti di sincronismo

La distribuzione del sincronismo all'interno del nodo dall'apparato SSU agli apparati installati nel medesimo edificio di centrale (distribuzione *intra-node*) avviene utilizzando collegamenti a 2.048 Mbit/s o a 2.048 MHz dedicati con le modalità illustrate in fig. 6. La soluzione illustrata è da considerarsi anche in questo caso la soluzione obiettivo che sarà implementabile solamente a fronte di una estesa diffusione di sistemi sincroni nella rete di trasporto. Infatti come si può osservare il riferimento di sincronizzazione per l'apparato SSU viene estratto da un apparato SDH (che può essere sia un terminale di linea, sia un moltiplicatore, sia un ripartitore) e viene utilizzato un apparato SDH per trasmettere il sincronismo ai nodi di livello più basso.

#### 4.2 Prestazioni delle sorgenti primarie

Le caratteristiche delle sorgenti primarie devono essere conformi a quanto specificato nella Raccomandazione ITU-T G.811 [6].

Un PRC deve essere in grado di fornire un segnale di temporizzazione con uno scarto relativo di frequenza a lungo termine inferiore a  $10^{-11}$  rispetto all'Universal Time Coordinated (UTC) considerato il campione di tempo universale.

La stabilità in fase del PRC può essere descritta secondo le seguenti componenti:

- le discontinuità di fase dovute a disturbi transitori;
- le variazioni di fase a lungo termine;
- le variazioni di fase a breve termine.

Le discontinuità di fase dovute a disturbi transitori, ovvero al funzionamento interno dell'orologio, non devono superare 1/8 di Unit Interval<sup>(6)</sup> (UI) per i segnali a 1544 kbit/s o 2048 kHz; per quanto riguarda le variazioni di fase a lungo termine all'uscita di un PRC, espresse in termini della grandezza *Maximum Time Interval Error* (MTIE), la quale quantifica le massime variazioni di fase nell'intervallo di osservazione espresse in secondi, occorre rispettare i limiti definiti dalla maschera di fig. 7.

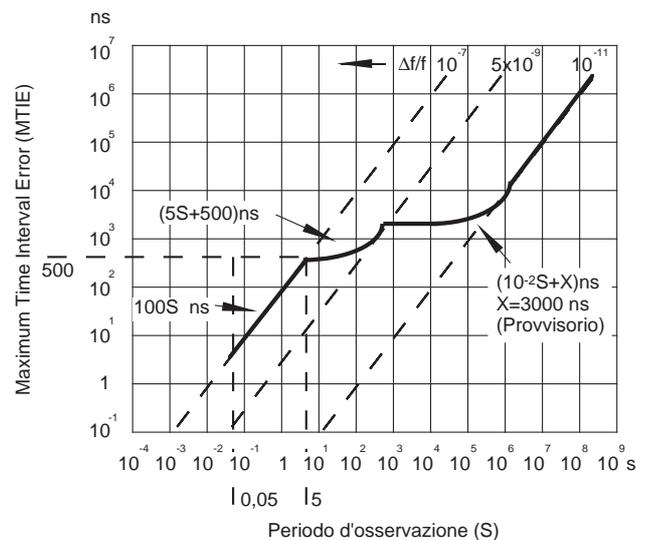


Figura 7 Variazioni di fase a lungo termine di un PRC

(6) Si definisce UI la durata del periodo di un segnale; ad esempio per un flusso a 1544 kbit/s un UI è pari a 647 nsec, mentre per un segnale di frequenza 2048 kHz un UI è pari a 488 ns.

Le variazioni di fase a breve termine non sono ancora state definite e sono tuttora oggetto di studio da parte degli appositi organismi internazionali.

### 4.3 Prestazioni degli orologi di edificio di centrale (SSU)

Gli apparati che hanno funzione di orologio di edificio di centrale (SSU) dovranno essere realizzati in conformità alla Raccomandazione ITU-T G.812 [7].

Al fine di soddisfare le specifiche indicate per la distribuzione della sincronizzazione, agli SSU sarà richiesto un efficace filtraggio del sincrosegnale cui sono asserviti; infatti, quest'ultimo risulta affetto dalle componenti di rumore di fase accumulate lungo il collegamento di sincronizzazione, anche per effetto della minore qualità degli orologi che temporizzano i diversi apparati trasmissivi presenti sul collegamento. I modelli e le simulazioni e le misure effettuate [15] dimostrano come il rumore di fase accumulato a monte di un SSU di banda adeguatamente stretta possa essere sensibilmente ridotto a valle. In queste condizioni, la qualità del sincrosegnale distribuito da un qualsiasi SSU appare confrontabile con quanto disponibile all'uscita di un analogo SSU prossimo al PRC.

L'esigenza di un adeguato filtraggio da parte degli SSU del rumore di fase da cui è affetto il sincrosegnale di riferimento è particolarmente stringente nel caso di reti SDH.

Infatti nella generazione della trama sincrona SDH, vengono utilizzati i puntatori i quali identificano la posizione dei carichi all'interno delle strutture di trasporto [16]; quando la differenza di fase fra il segnale di temporizzazione della struttura di trasporto e del carico trasportato supera una determinata soglia, il carico viene spostato all'interno della trama per compensare tale differenza di fase ed il puntatore viene aggiornato per identificare la nuova posizione del carico stesso. In altri termini l'attività del puntatore può consentire il trasporto del carico nella trama SDH nonostante sia presente una dissintonia dei segnali di sincronizzazione del carico e della trama. Tuttavia un'eccessiva attività del puntatore, causata da un eccessivo rumore di fase sui sincrosegnali, provoca un accumulo di jitter da puntatore generato all'atto della restituzione dei tributari plesiocroni all'interfaccia di uscita della rete sincrona.

I risultati di simulazioni effettuate sull'attività del puntatore in una rete SDH ([12],[13]) dimostrano come la statistica degli spostamenti del puntatore sia particolarmente sensibile al modello di stabilità a breve termine della rete di sincronizzazione. Nelle figure 8, 9, 10 si riportano i risultati relativi alla simulazione di due ore di funzionamento di una rete SDH composta da ventuno nodi: si osservi la dipendenza del numero degli spostamenti del puntatore dal

livello di rumore di fase presente in rete. In particolare, nel caso in cui il rumore di fase, espresso in termini della grandezza  $TIE_{rms}$ , sia di 100 ns, si osservano al massimo quattro spostamenti del puntatore (fig. 8); per un rumore di fase  $TIE_{rms}$  di 200 ns si raggiungono al massimo i settanta spostamenti (fig. 9), mentre nel caso di un  $TIE_{rms}$  pari a 300 ns si possono osservare fino a circa 180 spostamenti del puntatore (fig. 10).

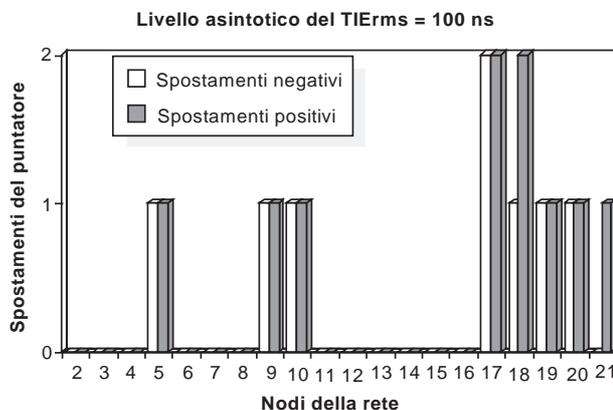


Figura 8 Simulazione dell'attività del puntatore in una rete SDH

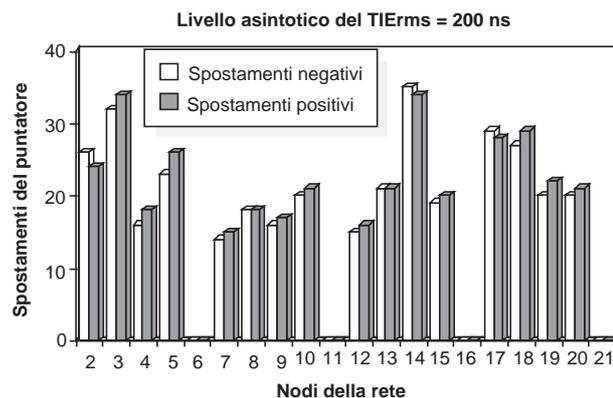


Figura 9 Simulazione dell'attività del puntatore in una rete SDH

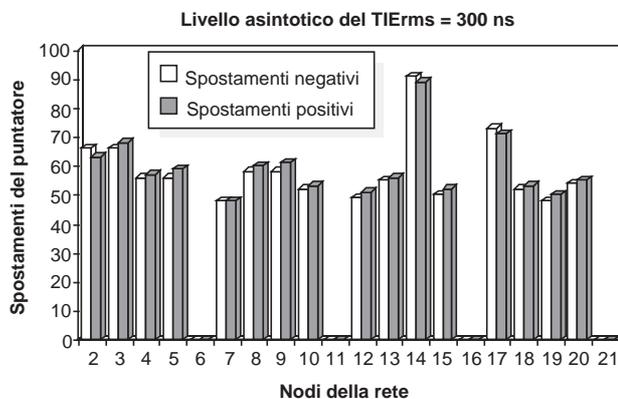


Figura 10 Simulazione dell'attività del puntatore in una rete SDH

Oltre a quanto osservato a proposito della soppressione del rumore di fase presente sul sincrosegnale di riferimento, all'apparato SSU è demandato il filtraggio di tutti i disturbi occasionali di linea (microinterruzioni, assenza di segnale,...), che altrimenti interesserebbero gli orologi degli apparati installati nel nodo, compromettendone significativamente le prestazioni.

In termini realizzativi, la predetta esigenza di ottenere filtri a banda stretta e la convenienza a ridurre l'onere delle operazioni di calibrazione degli oscillatori controllati, sembrano individuare nella classe dei PLL (Phase Lock Loop) numerici le soluzioni tecnologiche più indicate nella realizzazione dei circuiti di asservimento degli orologi SSU.

I requisiti delineati per gli SSU comportano per essi l'adozione di oscillatori in doppio di elevata stabilità (al rubidio o quarzi selezionati), in grado di garantire la precisione del sincrosegnale generato anche in caso di indisponibilità prolungata di ogni segnale di riferimento (condizione di holdover). L'esigenza di assicurare al sincrosegnale stesso la dovuta regolarità anche durante le transizioni nel modo di funzionamento dell'apparato SSU, ad esempio al fine di minimizzare l'errore di fase a bassa frequenza accumulato durante i periodi di holdover, prefigura una particolare complessità nella circuiteria di controllo dell'orologio.

La stabilità in fase degli SSU in condizioni di asservimento può essere descritta, come per i PRC, dalle discontinuità di fase dovute a disturbi transitori, dalle variazioni di fase a lungo termine e dalle variazioni di fase a breve termine.

Le discontinuità di fase dovute a disturbi transitori ovvero al funzionamento interno dell'orologio non devono superare secondo la raccomandazione ITU-T G.812 1/8 di UI per periodi di durata  $2^{11}$  UI; per periodi di durata maggiore, oltre a valere la precedente specifica per ogni sottointervallo di durata  $2^{11}$  UI, non si deve eccedere il limite massimo di 1 ms.

Per quanto riguarda le variazioni di fase a lungo termine occorre precisare la condizione di funzionamento dell'orologio; in particolare si distinguono i seguenti casi:

- funzionamento ideale con asservimento ad un segnale di riferimento privo di disturbi. Il rumore di fase espresso in termini della grandezza *Maximum Relative Time Interval Error* (MRTIE) all'uscita dell'orologio asservito deve rispettare la maschera di fig. 11:
- funzionamento reale; in questa condizione l'orologio si asserva ad un segnale di riferimento reale con jitter, wander, burst di errori, micro-interruzioni e disturbi in generale. Tale specifica non è ancora stata definita ma è oggetto di studio in sede di normativa internazionale;
- funzionamento in holdover: questa condizione si riferisce al caso in cui l'orologio asservito perde il segnale di riferimento per un significativo periodo di tempo. Per questa specifica, occorre distinguere il

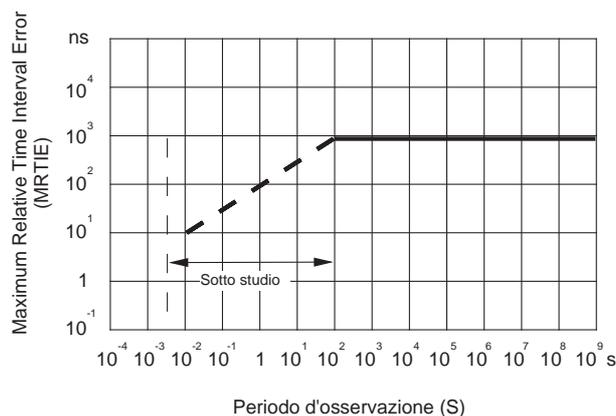


Figura 11 Maximum Relative Time Interval Error (MRTIE) di un SSU

caso di orologi di transito (per nodi non direttamente collegati all'utente) da quello di orologi locali (per nodi direttamente collegati all'utente). In particolare il rumore di fase espresso in termini della grandezza MRTIE all'uscita dell'orologio asservito deve rispettare la maschera di fig. 12:

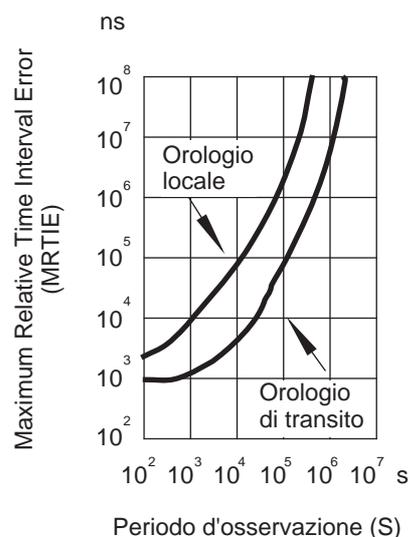


Figura 12 Funzionamento in holdover del SSU

La specifica relativa alle variazioni di fase a breve termine dovute al jitter non è ancora stata definita ed è in corso di studio in sede di normativa internazionale.

#### 4.4 Prestazione degli orologi di apparato SDH

In questo paragrafo vengono descritte le specifiche inerenti alle prestazioni degli orologi di apparato SDH. Infatti nella soluzione a regime precedentemente indicata, gli apparati SDH verranno utilizzati per il trasporto dei riferimenti tra i nodi della rete di sincronizzazione (distribuzione inter-node) e, di

conseguenza, le prestazioni del loro orologio interno avranno un forte impatto sulla qualità del segnale di sincronizzazione che arriverà agli SSU dei nodi.

Gli apparati SDH sono dotati di un unità di sincronizzazione che si asserva ad uno dei segnali di riferimento che riceve in ingresso. In particolare, il generatore di sincronismo, secondo la Raccomandazione ITU-T G.783 [9], deve essere in grado di selezionare il proprio riferimento tra i seguenti segnali:

- segnali di ingresso SDH di livello gerarchico N (STM-N con N=1, 4, 16);
- tributari a 2 Mbit/s qualora disponibili nell'apparato;
- riferimento esterno a 2.048 MHz.

A seconda dello stato di questi riferimenti di sincronismo, l'orologio di apparato prevede diversi modi di funzionamento; questi modi sono:

- modo ad oscillazione libera;
- modo ad aggancio di fase;
- modo holdover.

Nel modo ad oscillazione libera (free running), l'orologio interno opera senza alcun riferimento di sincronismo; in queste condizioni, per contenere l'attività del puntatore e quindi limitare l'accumulo di jitter è prescritta una precisione di  $\pm 4.6$  ppm<sup>(7)</sup>.

Il modo ad aggancio di fase si riferisce alle condizioni normali di funzionamento quando l'orologio interno si aggancia in frequenza e fase al proprio riferimento.

Per questa modalità di funzionamento si specifica, nella Raccomandazione ITU-T G.81s [8], la stabilità dell'orologio di apparato, espressa in termini di MTIE (fig. 13). Anche in questo caso, la maschera è oggetto di ulteriori studi e quindi non può ritenersi ancora assestata.

La modalità di holdover si riferisce alla condizione anomala in cui vengano a mancare tutti i possibili

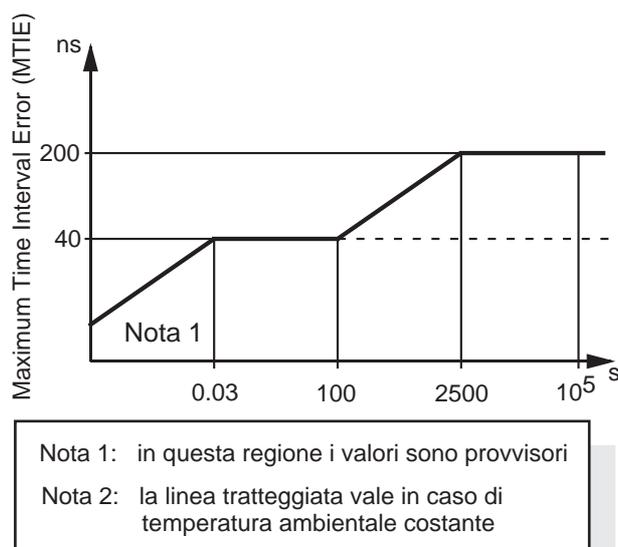


Figura 13 Maschera di instabilità dell'orologio di apparato

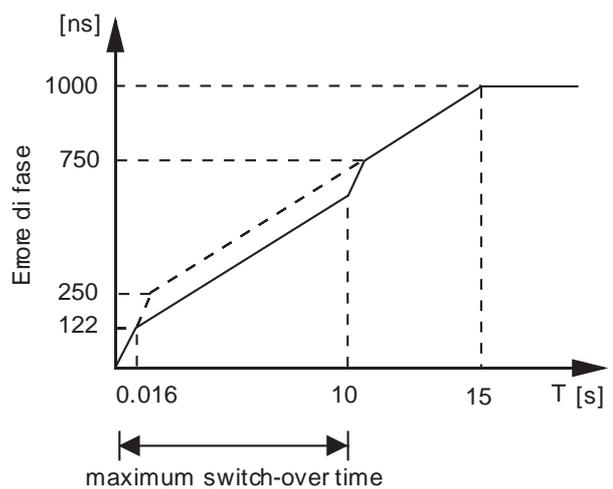


Figura 14 Massimo transitorio di fase dovuto allo scambio di riferimento

riferimenti di sincronismo per un periodo maggiore di 10 secondi; l'orologio interno tende a mantenere il più a lungo possibile il valore di frequenza memorizzato quando era ancora in condizioni di aggancio o comunque un valore di frequenza ottenuto come media su di un prefissato intervallo di tempo. In queste condizioni la Raccomandazione ITU-T G.81s [8] prescrive che il rumore di fase, espresso in termini della grandezza MTIE all'uscita dell'orologio, non ecceda i seguenti limiti provvisori, per tempi di osservazione S maggiori di 100 secondi:

$$MTIE(S) = aS + 0.5bS^2 + c \text{ [ns]}$$

dove S va misurato in secondi e  $a=50$ ,  $b=0.058$  e  $c=120$ . Tali valori sono ancora oggetto di ulteriori studi e non sono quindi da ritenersi definitivi.

Naturalmente in un periodo di tempo dipendente dalla bontà dell'orologio, la frequenza di oscillazione sarà soggetta ai fenomeni di deriva dell'orologio interno per il quale è prescritto uno scarto relativo di frequenza pari a  $\pm 4.6$  ppm.

La Raccomandazione ITU-T G.81s [8] stabilisce, infine, anche le specifiche relative al caso in cui il segnale di sincronismo sia temporaneamente perso per un periodo di tempo inferiore a 10 secondi: in tale situazione le variazioni relative di fase dell'uscita dell'orologio di apparato (errore di fase<sup>(8)</sup>) devono rispettare la maschera di fig. 14.

Questa maschera rappresenta il caso peggiore di movimento di fase accettabile durante una operazione

(7) ppm = parti per milione

(8) Si ricorda che un errore di fase di  $\alpha$  radianti corrisponde ad un errore temporale su un periodo del sincrosegnale (UI) pari ad una frazione  $\alpha/2\pi$  del periodo stesso.

di scambio del sincronismo per un orologio di apparato. I due tratti a pendenza più elevata tengono conto delle operazioni di scambio (perdita del sincronismo e successivo scambio sul nuovo riferimento).

Un'altra caratteristica importante dell'unità di sincronizzazione di un apparato SDH è la possibilità di forzare lo scambio sul modo di orologio. In altri termini l'orologio passa da una modalità di funzionamento ad aggancio in frequenza e fase alla modalità di holdover a seguito di un comando da operatore.

È previsto inoltre un ciclo di isteresi per prevenire continui scambi del modo di orologio in presenza di un riferimento di sincronismo instabile. In particolare si specifica di attendere che una sorgente di sincronismo sia stabile per un tempo compreso tra i 10 e 20 secondi prima di tornare alla modalità ad aggancio in frequenza e fase.

#### 4.5 Prestazioni della rete di sincronizzazione

Come precedentemente accennato, le caratteristiche della rete di sincronizzazione hanno un impatto diretto sulle prestazioni della rete trasmissiva in termini di slip, jitter e wander.

La verifica delle prestazioni della rete di sincronizzazione deve essere dunque effettuata sia mediante il conteggio degli slip trasmissivi, sia con una misura del jitter e del wander presenti alle interfacce della rete di trasmissione. Nei prossimi paragrafi vengono brevemente descritte sia le specifiche relative agli slip tollerabili, per i quali si prende come riferimento ancora la raccomandazione relativa ai collegamenti nazionali a 64 kbit/s, sia le specifiche relative al jitter ed al wander di rete.

##### 4.5.1 Slip di rete

Si ricorda che lo slip è la cancellazione o la ripetizione non desiderata di un messaggio informativo dovuto all'eccessivo riempimento od allo svuotamento delle memorie elastiche degli apparati di trasmissione o commutazione.

I requisiti riguardanti la presenza di slip controllati in una rete di trasmissione sono riportati nella Raccomandazione ITU-T G.822 [2] la quale specifica gli obiettivi relativi al tasso di slip controllato in una connessione nazionale a 64 kbit/s (tab. 2).

Nella categoria di prestazioni (a) non sussiste alcuna degradazione apprezzabile delle qualità dei servizi, mentre per la categoria (b) il tasso di slip indicato ha effetto su alcuni servizi (dati in particolare) degradandone le prestazioni. In caso di perdita estesa dei segnali di sincronismo o di guasto degli orologi, alcuni servizi possono essere ancora espletati, ma con prestazioni altamente degradate. Se il tasso di slip supera la soglia (c) le prestazioni del collegamento non sono più accettabili.

Categoria di prestazioni	Tasso medio di slip	Porzione di tempo (>1 anno)
(a)	≤ 5 slip in 24 ore	> 98.9 %
(b)	> 5 slip in 24 ore ≤ 30 slip in 24 ore	< 1.0 %
(c)	> 30 slip in 24 ore	< 0.1 %

Tabella 2 Obiettivi relativi al tasso di slip controllati su una connessione nazionale a 64 kbit/s

##### 4.5.2 Jitter e wander di rete

Le prestazioni della rete di sincronizzazione devono garantire che le prestazioni della rete di trasmissione SDH siano tali che i flussi restituiti all'interfaccia plesiocrona siano conformi alle specifiche riportate nella Raccomandazione ITU-T G.823 [10] per la gerarchia plesiocrona. Infatti, a differenza delle analoghe specifiche riportate nella Raccomandazione ITU-T G.825 [11] per la gerarchia sincrona, le prime appaiono più vincolanti in questo contesto perché sono proprio i flussi plesiocroni restituiti all'interfaccia SDH-PDH ad essere affetti dal jitter da puntatore, comportando di conseguenza le maggiori esigenze di sincronizzazione.

Il controllo del jitter e del wander presente in una rete numerica si basa sulle seguenti specifiche:

- limiti massimi di jitter e wander che non devono essere superati alle interfacce gerarchiche;
- limiti massimi di jitter e wander tollerabili alle interfacce plesiocrone di ingresso di un generico apparato;
- jitter emesso: massimo jitter di uscita in assenza di jitter di ingresso;
- funzione di trasferimento del jitter.

I limiti massimi di jitter e wander che non devono essere superati alle interfacce gerarchiche della rete, determinano le caratteristiche di accettazione di jitter che deve avere la circuiteria di ingresso degli apparati ai vari nodi della rete. In definitiva gli apparati devono essere in grado di tollerare sia le instabilità a breve termine degli orologi asserviti, sia il jitter ed il wander introdotto dal sistema trasmissivo. In fig. 15 si riporta il sistema di misura a cui fare riferimento per la lettura delle specifiche sul massimo jitter permesso alle interfacce, riportati nella tab. 3 [2]. Tale sistema prevede un rivelatore per la misura dell'ampiezza del jitter seguito da un filtro passa banda con opportune frequenze di cut-off a valle del quale si valuta l'ampiezza in UI del jitter ( $B_1$  e  $B_2$ ).

La fig. 16 e la tab. 4 riportano le specifiche relative al jitter ed al wander tollerato alle porte di ingresso degli apparati. Allo scopo di assicurare il funzionamento

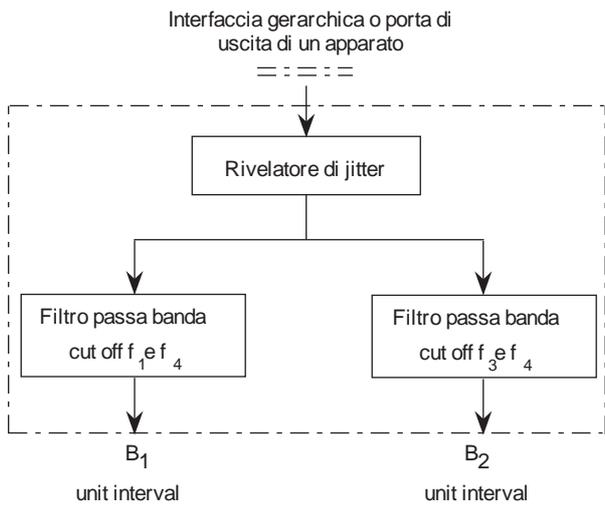


Figura 15 Sistema di misura di jitter e wander alle interfacce gerarchiche

bit rate (kbit/s)	B <sub>1</sub> [UI pp]	B <sub>2</sub> [UI pp]	f <sub>1</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>
64	0.25	0.05	20 Hz	3 kHz	20 kHz
2048	1.5	0.2	20 Hz	18 kHz (700 Hz)	100 kHz
8448	1.5	0.2	20 Hz	3 kHz (80 kHz)	400 kHz
34368	1.5	0.15	100 Hz	10 kHz	800 kHz
139264	1.5	0.075	200 Hz	10 kHz	3500 kHz

Tabella 3 Jitter e wander alle interfacce gerarchiche

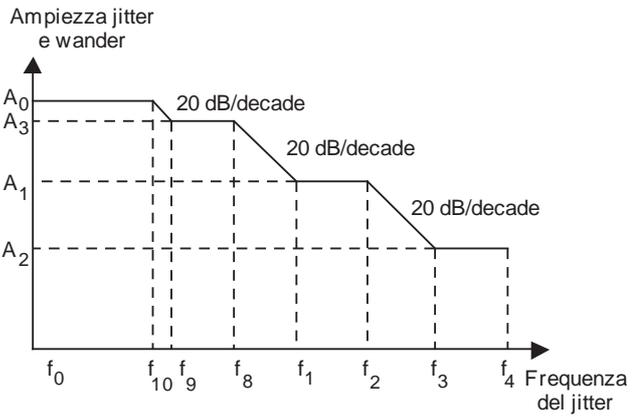


Figura 16 Maschera del jitter e wander tollerato

degli apparati tali specifiche devono essere compatibili con quelle relative al massimo jitter permesso alle interfacce gerarchiche. Il valore A<sub>2</sub> è legato all'apertura orizzontale del diagramma ad occhio del segnale trasmesso, mentre f<sub>3</sub> coincide con la frequenza di cut-off dei circuiti estrattori di tempo. Analogamente i valori A<sub>1</sub> ed f<sub>1</sub> rappresentano le specifiche per gli apparati demoltiplicatori asincroni. Il valore A<sub>0</sub> è stato introdotto come estremo superiore per il wander prodotto dalle escursioni termiche stagionali.

Il jitter emesso rappresenta il massimo jitter di uscita da un apparato in assenza di jitter di ingresso; il requisito su tale parametro, pur dipendendo dal tipo di apparato, non deve ovviamente eccedere il massimo jitter di rete consentito.

bit rate (kbit/s)	A <sub>0</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	f <sub>0</sub> [Hz]	f <sub>10</sub> [Hz]	f <sub>9</sub> [Hz]	f <sub>8</sub> [Hz]	f <sub>1</sub> [Hz]	f <sub>2</sub> [Hz]	f <sub>3</sub> [Hz]	f <sub>4</sub> [Hz]
64	1.15 (18μs)	*	0.25	0.05	1.2 · 10 <sup>-5</sup>	*	*	*	20	600	3 k	20 k
2048	36.9 (18μs)	18	1.5	0.2	1.2 · 10 <sup>-5</sup>	4.88 · 10 <sup>-3</sup>	0.01	1.667	20	2.4 k (93)	18 k (700)	100 k
8448	152 (18μs)	*	1.5	0.2	1.2 · 10 <sup>-5</sup>	*	*	*	20	400 (10.7 k)	3 k (80 k)	400 k
34368	618.6 (18μs)	*	1.5	0.15	*	*	*	*	100	1 k	10 k	800 k
139264	2506.6 (18μs)	*	1.5	0.075	*	*	*	*	200	500	10 k	3500 k

Nota 1: A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> sono ampiezze picco-picco espresse in Intervalli Unitari (UI).

Nota 2: i valori di A<sub>0</sub> tra parentesi rappresentano la deviazione di fase relativa tra il segnale entrante ed il segnale di temporizzazione interno derivato dall'orologio di riferimento.

Nota 3: nelle colonne f<sub>2</sub> e f<sub>3</sub> i valori mostrati tra parentesi sono specificati per le interfacce all'interno di reti nazionali.

Tabella 4 Jitter e wander tollerato alle porte di ingresso di un apparato

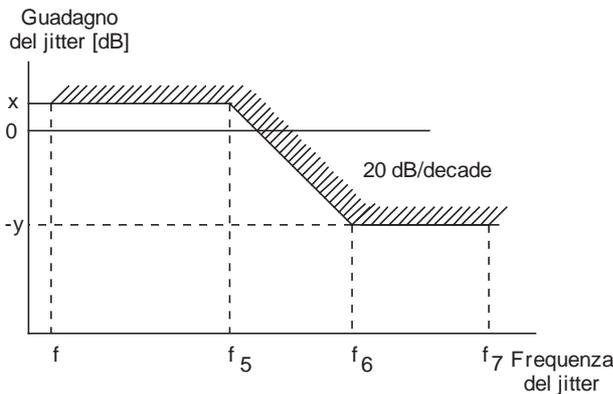


Figura 17 Funzione di trasferimento del jitter

La quarta specifica è inerente alla funzione di trasferimento del jitter definita come il rapporto fra l'ampiezza del jitter di uscita e di ingresso in funzione della frequenza del jitter stesso per un certa frequenza di cifra del segnale. La fig. 17 presenta la forma generale della funzione di trasferimento del jitter. Per i valori caratteristici dei parametri occorre fare riferimento alle relative Raccomandazioni.

4.5.3 Il controllo del jitter e del wander in reti basate sulla gerarchia numerica sincrona (SDH)

Come visto nel § 4.4, l'attività del puntatore nelle reti SDH si riflette nella generazione del jitter da puntatore che si traduce in un accumulo di jitter sui tributari restituiti all'interfaccia plesiocrona di uscita della rete sincrona. Uno dei più stringenti requisiti di progetto della rete SDH riguarda appunto il controllo e la limitazione del jitter da puntatore.

La Raccomandazione ITU-T G.825 [11] definisce le specifiche per il controllo del jitter e del wander in reti basate sulla gerarchia numerica sincrona (SDH). Tali specifiche si fondano sull'esigenza di definire un limite massimo del jitter e wander di rete non eccedibile alle interfacce gerarchiche, le specifiche dei singoli apparati ed un modello di studio e misura dell'accumulo del jitter e wander di rete.

Livello STM	f <sub>1</sub> [Hz]	f <sub>3</sub> [kHz]	f <sub>4</sub> [MHz]	B <sub>1</sub> [U1pp]	B <sub>2</sub> [U1pp]
STM-1	500	65	1.3	1.5	0.15
STM-4	1000	250	5	1.5	0.15
STM-16	5000	in studio	20	1.5	0.15

Tabella 5 Massimo jitter di uscita alle interfacce gerarchiche SDH

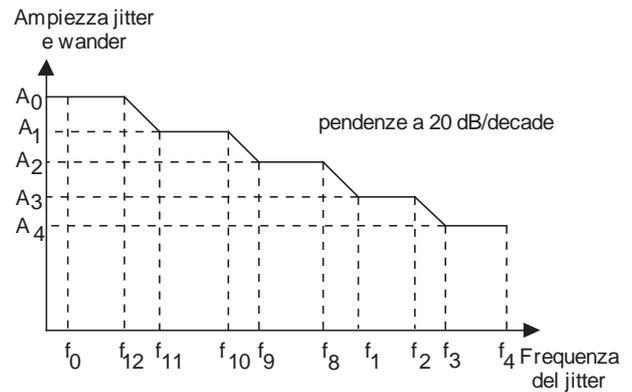


Figura 18 Maschera del jitter e wander tollerato alle porte di ingresso di un apparato SDH

Per la misura dei limiti massimi di jitter e wander in uscita alle varie interfacce gerarchiche, riportati in tab. 5, si fa riferimento allo stesso sistema di misura riportato in fig. 12.

Per garantire che l'interconnessione dei diversi apparati non comporti un accumulo di jitter superiore ai limiti di rete, nella Raccomandazione G.825 [11] vengono definite anche le specifiche relative alla generazione, alla funzione di trasferimento ed alla tolleranza del jitter per i singoli apparati SDH.

Le specifiche relative ai limiti inferiori dei valori massimi di jitter e wander tollerati alle porte di ingresso di un generico apparato SDH sono definite dalla fig. 18 e dalla tab. 6.

I requisiti relativi alla generazione ed alla funzione di trasferimento del jitter sono riportate rispettivamente nella Raccomandazione ITU-T G.958, per i rigeneratori, e nella Raccomandazione ITU-T G.783 [9], per moltiplicatori e cross-connect SDH. Si rimanda a queste raccomandazioni per un'informazione più specifica.

4.6 Implementazione della rete di sincronizzazione nazionale

Come si è visto nel paragrafo 3, le reti di sincronizzazione attualmente in esercizio utilizzano per la distribuzione della temporizzazione flussi a 2 Mbit/s, trasportati su sistemi trasmissivi plesiocroni. Tali flussi, per essere trasportati sulle lunghe distanze, vengono in generale moltiplicati nei flussi aggregati della gerarchia plesiocrona fino a 140 od a 565 Mbit/s e successivamente vengono demoltiplicati per essere restituiti nella località di destinazione. L'attraversamento della catena di moltiplicazione plesiocrona provoca un incremento del rumore di fase (jitter) del segnale di riferimento dovuto principalmente alle operazioni di "pulse-stuffing" effettuate dai moltiplicatori attraversati. Tale rumore di fase rimane comunque limitato entro valori tali da non inficiare le prestazioni della rete di

Livello STM	A <sub>0</sub> (18μs)	A <sub>1</sub> (2μs)	A <sub>2</sub> (0.25μs)	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	f <sub>0</sub> [Hz]	f <sub>12</sub> [Hz]	f <sub>11</sub> [Hz]	f <sub>10</sub> [Hz]	f <sub>9</sub> [Hz]	f <sub>8</sub> [Hz]	f <sub>1</sub> [Hz]	f <sub>2</sub> [Hz]	f <sub>3</sub> [Hz]
STM-1	2800	311	39	1.5	0.15	12 μ	178 μ	1.6 m	15.6 m	0.125	19.3	500	6.5 k	65 k
STM-4	11200	1244	156	1.5	0.15	12 μ	178 μ	1.6 m	15.6 m	0.125	9.65	1000	25 k	250 k
STM-16	44790	4977	622	1.5	0.15	12 μ	178 μ	1.6 m	15.6 m	0.125	12.1	5000	*	*

Tabella 6 Jitter e wander tollerato alle porte di ingresso di un apparato SDH

sincronizzazione nel lungo termine<sup>(9)</sup>.

Nella fase iniziale di introduzione degli SSU nei principali nodi della rete di sincronizzazione è quindi possibile utilizzare canali a 2 Mbit/s plesiocroni per il trasporto dei riferimenti di sincronizzazione. Gli SSU sono in grado di ridurre fortemente sia il rumore di fase provocato dai sistemi trasmissivi plesiocroni attraversati, sia l'impatto delle microinterruzioni sui flussi a 2 Mbit/s. E' chiaro tuttavia che questa è una soluzione adottabile solamente nel breve-medio termine quando la disponibilità di sistemi trasmissivi SDH sarà ancora limitata.

In una fase successiva, a fronte di una crescente diffusione dei sistemi SDH nella rete trasmissiva, il trasporto del segnale di sincronismo dovrà avvenire utilizzando i segnali di linea ottici sincroni STM-N. In ogni caso non potranno essere utilizzati tributari plesiocroni trasportati su sistemi sincroni in quanto questi ultimi possono essere affetti da componenti di jitter aleatorie provocate dalla attività dei puntatori nella trama SDH.

Nel contesto di rete SDH l'orologio di edificio (SSU) assume una particolare rilevanza in quanto dovrebbe agire da filtro allo scopo di garantire la stabilità del segnale di temporizzazione fornita agli elementi di rete per minimizzare gli spostamenti del puntatore. Esso gioca quindi un ruolo fondamentale per far sì che il desincronizzatore restituisca all'interfaccia plesiocrona un flusso che sia conforme alle specifiche sul jitter e sul wander definite nella Raccomandazione ITU-T G.823 [10] e quindi sui tassi di slip definite nella Raccomandazione ITU-T G.822 [2].

Per quanto riguarda la tipologia e la collocazione degli SSU, è ipotizzabile l'impiego di orologi al rubidio e/o di orologi al quarzo di elevate prestazioni per i nodi di livello 1a e di livello 1b interessati da notevoli volumi di traffico, e di orologi al quarzo per i restanti nodi (livelli 2 e 3).

I nodi di livello 1a potranno essere localizzati in due o tre Stadi di Gruppo di Transito (SGT) ubicati nelle città dove è disponibile un riferimento di alta qualità (ad esempio Roma e Torino); i nodi di livello 1b potranno essere localizzati nei rimanenti SGT, mentre i nodi di livello 2 e 3 potrebbero coincidere con gli Stadi di Gruppo

Urbani (SGU) interessati da traffico pregiato (ad esempio nei centri urbani con alta densità di utenza affari).

Il numero totale degli SSU in rete può essere stimato, almeno in una prima fase, attorno alle 100 unità.

#### 4.7 Sperimentazione di un primo nucleo della rete di sincronizzazione nazionale nell'ambito della rete pilota SDH

Attualmente la SIP è impegnata nella installazione di una rete pilota SDH che prevede, come prima fase, l'implementazione di anelli di moltiplicatori sincroni ADM-4 (622 Mbit/s) per i collegamenti tra SGU urbani; successivamente è prevista l'interconnessione tra gli anelli suddetti utilizzando sistemi di linea SDH a 2.5 Gbit/s e ripartitori sincroni. I primi due anelli verranno installati entro il 1994 a Roma e Torino.

In tale ambito è stata prevista la sperimentazione di un primo nucleo della rete di sincronizzazione nazionale utilizzando, come illustrato in fig. 19, un SSU nel nodo "capo-maglia" di ognuno degli anelli installati. Inizialmente l'apparato SSU installato a Roma (livello 1a) asservirà l'apparato SSU di Torino (livello 2) utilizzando un collegamento a 2 Mbit/s su rete plesiocrona; successivamente appena la rete pilota si estenderà fino a fornire un collegamento sincrono tra i vari anelli, l'interconnessione tra gli SSU avverrà utilizzando i segnali di linea ottici come illustrato, a scopo esemplificativo, in fig. 20. In questo modo si ha la possibilità di effettuare la sperimentazione in campo delle prestazioni del primo nucleo di rete di

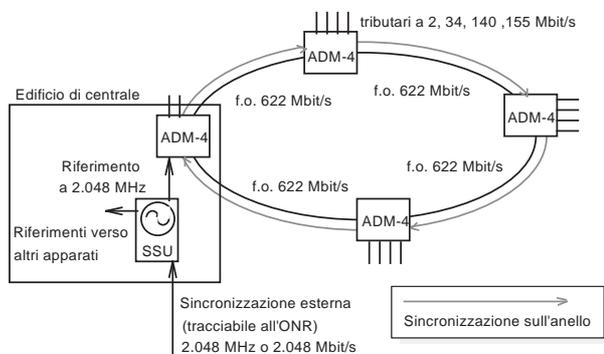


Figura 19 Schema di sincronizzazione di un anello "stand-alone"

(9) A seguito di misure effettuate su alcune tratte della rete di sincronizzazione degli autocommutatori numerici e dei RED 1/0 tale jitter risulta attorno ai 50 nsec (0.1 UI a 2.048 Mbit/s) per intervalli di osservazione fino ad 1 minuto [14].

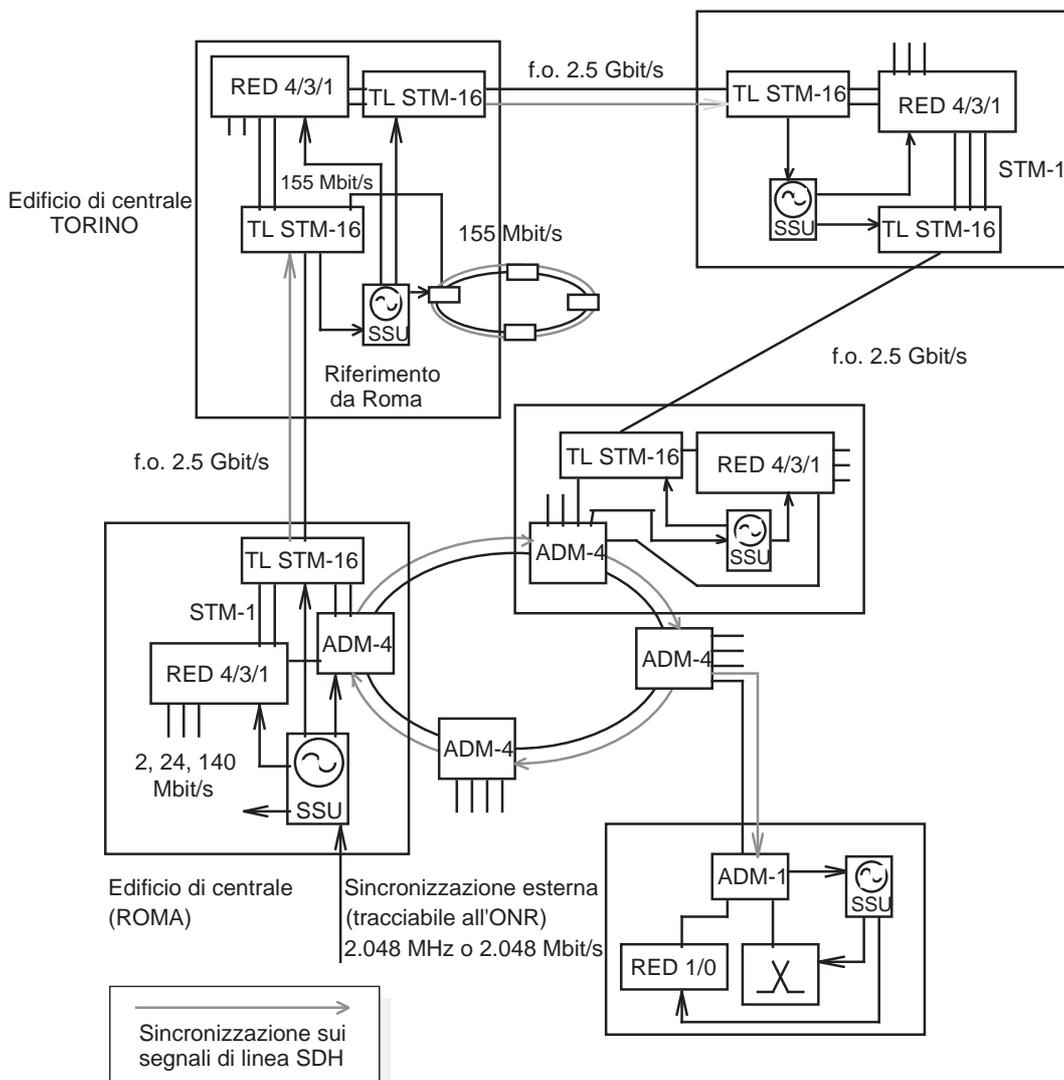


Figura 20 Schema di sincronizzazione per rete magliata

sincronizzazione nazionale e di approfondire tutti gli aspetti ancora aperti anche in ambito internazionale relativi alla gestione delle protezioni dei flussi che trasportano i riferimenti di sincronizzazione.

## 5. Conclusioni

La realizzazione di una rete di sincronizzazione unica capace di rendere disponibili, nei principali edifici di centrale, sinrosegnali rispondenti ad appropriate caratteristiche di stabilità, utilizzabili sia per gli apparati di trasmissione, sia per gli autocommutatori, consente nel breve termine di incrementare le prestazioni in termini di qualità trasmissiva della rete di telecomunicazione esistente.

Nell'ottica dell'introduzione dei sistemi basati sulla SDH, una nuova rete di sincronizzazione diventa invece necessaria per far sì che siano sfruttabili appieno tutte le potenzialità della gerarchia sincrona di moltiplicazione ed inoltre per consentire il trasporto su tratte sincrone di flussi plesiocroni limitando il degrado delle prestazioni.

Quest'ultimo punto è di importanza fondamentale soprattutto nella fase di transizione tra tecnica plesiocrona e tecnica sincrona, durante la quale i flussi numerici plesiocroni dovranno poter attraversare "isole" sincrone.

Per quanto riguarda l'architettura della rete di sincronizzazione, è ormai consolidata anche in ambito internazionale l'adozione di reti gerarchiche provviste di meccanismi di riconfigurazione capaci di mantenere entro limiti prestabiliti le prestazioni anche nel caso di perdita o degrado del riferimento. Sono invece ancora da approfondire gli aspetti legati alla utilizzazione del segnale ottico di linea dei flussi SDH per il trasporto del sincronismo.

La disponibilità di una rete di sincronizzazione con elevate prestazioni consente inoltre di fornire "valore aggiunto" a servizi pregiati, ad esempio di trasmissione dati, in quanto il cliente avrebbe la possibilità di estrarre dai flussi numerici a lui forniti un riferimento di sincronizzazione rispondente a date caratteristiche di stabilità e precisione con evidenti vantaggi anche dal punto di vista della immagine verso il cliente.

**Bibliografia**

- [1] Abate, J. E. et al.: *AT&T's new approach to the synchronization of telecommunication networks*. «IEEE Communications Magazine», aprile 1989.
- [2] *Controlled slip rate objectives on an international digital connection*. ITU-T Recommendation G.822, 1980.
- [3] Norma Tecnica N 702 dell'Istituto Superiore Poste e Telecomunicazioni (ISPT).
- [4] *Architectures of transport networks based on the Synchronous Digital Hierarchy (SDH)*. ITU-T Recommendation G.803, luglio 1992.
- [5] *Consideration on timing and synchronization issues*. ITU-T Recommendation G.810, 1988.
- [6] *Timing requirements at the outputs of primary reference clocks suitable for plesiochronous operation of international digital links*. ITU-T Recommendation G.811, giugno 1992.
- [7] *Timing requirements at the outputs of slave clocks suitable for plesiochronous operation of international links*. ITU-T Recommendation G.812, giugno 1992.
- [8] *Timing characteristics of slave clocks suitable for operation in SDH equipment*. ITU-T Recommendation G.81s, giugno 1992.
- [9] *Characteristics of SDH multiplexing equipment functional blocks*. ITU-T Recommendation G.783, novembre 1992.
- [10] *The control of jitter and wander within digital network which are based on the 2048 kbit/s hierarchy*. ITU-T Recommendation G.823, luglio 1992.
- [11] *The control of jitter and wander within digital networks which are based on the Synchronous Digital Hierarchy*. ITU-T Recommendation G.825, luglio 1992.
- [12] Manzalini, A.: *Simulazione dell'attività del puntatore in una rete SDH*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 92.218, 16 giugno 1992.
- [13] Manzalini, A.: *Introduzione alle problematiche sulla sincronizzazione di rete*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 92.626, 22 dicembre 1992.
- [14] Bonello, R.; Manzalini, A.; Mariconda, A.; Misul, R.C.: *Rete di sincronizzazione nazionale: considerazioni su risultati di misure e parametri di progetto*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 93.350.
- [15] Bonello, R.; Manzalini, A.: *Caratterizzazione dell'orologio di edificio OSA Oscilloquartz CTO 5542 (quarzo OCXO 8661): parametri di aggancio, jitter accettato e trasferito*. Nota Tecnica CSELT, TO/S/R - 94.015.
- [16] Mariconda, A.; Misul, R.C.; Parente, F.; Pietroiusti, R.: *La nuova gerarchia di multiplazione sincrona (SDH)*. «Notiziario Tecnico SIP», Vol. 1, n. 1, luglio 1992.
- [17] Carbonelli, M.; De Seta, D.; Perucchini, D.: *La sincronizzazione nelle reti numeriche di trasporto. Parte terza: la rete di sincronizzazione* (in questo numero del «Notiziario Tecnico SIP»).

**Acronimi**

ISPT	Istituto Superiore Poste e Telecomunicazioni
MTIE	Maximum Time Interval Error
MRTIE	Maximum Relative Time Interval Error
ONR	Orologio Nazionale di Riferimento
PCM	Pulse Code Modulation
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PRC	Primary Reference Clock
RED	Ripartitori Elettronici Digitali
rms	root mean square
SASE	Stand Alone Synchronization Equipment
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SEC	SDH Equipment Clock
SGT	Stadio di Gruppo di Transitio
SGU	Stadio di Gruppo Urbano
SSU	Synchronization Supply Unit
STM-N	Synchronous Transport Module di livello N
TIE	Time Interval Error
UI	Unit Interval
UTC	Universal Time Coordinated

# La “Parte di Utilizzazione per ISDN” nel sistema di segnalazione su canale comune N. 7

F. Panaioli, G. Raneri (\*)

*In questo articolo vengono illustrate le principali funzioni e caratteristiche della Parte di Utilizzazione per ISDN (ISUP) che, nell'ambito dei sistemi di segnalazione su canale comune, è impiegata per il trattamento delle chiamate a commutazione di circuito della Rete Numerica Integrata nei Servizi (ISDN). Viene anche presentata al lettore una breve analisi storica sulla evoluzione della ISUP per meglio comprendere le tappe principali dell'attività di specifica svolta in SIP su questo tema, dal Servizio Pilota ISDN fino alla realizzazione del Servizio ISDN a Larga Scala.*

## 1. Generalità

La Parte di Utilizzazione per ISDN (denominata ISDN-UP o anche ISUP) è il protocollo del sistema di segnalazione su canale comune N.7 (CCS7 - Common Channel Signalling system N.7) che fornisce le funzioni di segnalazione necessarie per il trattamento delle chiamate a commutazione di circuito della Rete Numerica Integrata nei Servizi (ISDN - Integrated Services Digital Network).

In riferimento alla struttura del CCS7 (fig. 1), la ISUP si colloca come blocco funzionale di livello quattro che, alla pari di altre Parti di Utilizzazione (TUP-Telephone User Part, DUP-Data User Part, ecc.), utilizza il servizio di trasporto fornito dai primi tre livelli della MTP (Message Transfer Part) per lo scambio dei messaggi di segnalazione fra autocommutatori numerici di una rete ISDN.

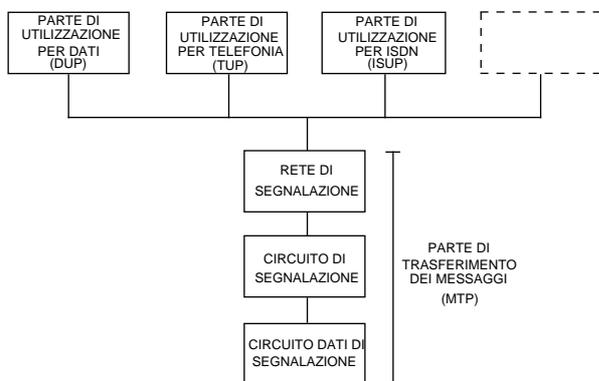


Figura 1 Struttura funzionale a livelli del Sistema di segnalazione su canale comune N.7 (CCS7)

## 2. Obiettivo della ISUP

L'obiettivo della ISUP è riconducibile all'obiettivo stesso della ISDN: fornire all'utente un facile accesso ad una molteplicità di servizi attraverso un singolo collegamento alla rete.

La ISDN, infatti, consente al gestore di mettere a disposizione dei propri utenti una rete in grado di fornire connessioni complete, capaci di supportare un ampio e variegato insieme di servizi, inclusi servizi di trasmissione della voce e dei dati.

Per quanto concerne i servizi a commutazione di circuito, l'infrastruttura di una rete ISDN (fig. 2) è costituita essenzialmente da interfacce standard e multiuso per l'accesso dei terminali di utente (accesso base e accesso primario), da una rete di circuiti numerici (rete di giunzioni) e da una rete di segnalazione su canale comune per mezzo della quale gli elaboratori di comando delle centrali scambiano le informazioni necessarie per dare supporto ai servizi richiesti dagli utenti.

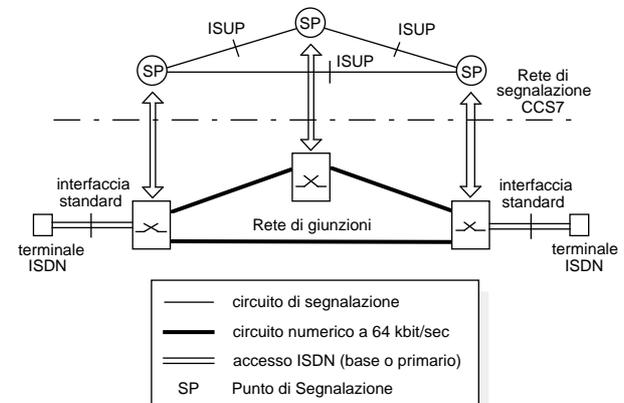


Figura 2 Infrastruttura di una ISDN per i servizi a commutazione di circuito

(\*) Ing. Fabrizio Panaioli, ing. Giovanni Raneri -SIP DG- Roma

Questa infrastruttura dotata, da un lato, di un protocollo di segnalazione utente-rete a standard internazionale (es. il protocollo *DSS1 - Digital Subscriber Signalling system N.1*), dall'altro, del protocollo di segnalazione ISUP come interfaccia di segnalazione degli autocommutatori numerici, permette il raggiungimento pieno di tale obiettivo.

### 3. Evoluzione della ISUP

La prima definizione internazionale della ISUP risale al 1984, quando il CCITT pubblicava le Raccomandazioni Q.761-764 del "Libro Rosso" (*ISUP Red Book*). Questa versione della ISUP rappresentava un primo tentativo di normalizzare, su scala mondiale, un protocollo di segnalazione orientato all'interconnessione delle reti ISDN. Ciononostante, la *ISUP Red Book* ebbe di fatto una limitata diffusione nelle reti di telecomunicazione, in quanto le funzioni di base del protocollo non erano state definite con sufficiente grado di completezza per consentirne la piena utilizzazione. Solo alcuni paesi si cimentarono a definire una specifica nazionale della ISUP basata su queste raccomandazioni.

In Italia, considerando che lo sviluppo di una specifica basata sulla *ISUP Red Book* avrebbe richiesto una consistente integrazione delle suddette raccomandazioni CCITT e la definizione di significative componenti nazionali del protocollo che rapidamente sarebbero divenute obsolete con l'evoluzione della ISUP CCITT, si preferì realizzare la ISDN nazionale -il cosiddetto Servizio Pilota ISDN- sul protocollo TUP-N (*Parte di Utilizzazione per Telefonia-Nazionale*, edizione 1983) che a quel tempo era ritenuta una specifica più stabile e completa; così, il livello quattro del sistema di segnalazione su canale comune (CCS7) per il Servizio Pilota ISDN fu realizzato adattando ed estendendo le procedure ed i messaggi di segnalazione della TUP-N ai requisiti della ISDN. Questo nuovo protocollo, finalizzato nel maggio del 1986, fu denominato "TUP-E" (*Parte di Utilizzazione per Telefonia-Estesa*).

Parallelamente, in ambito europeo, iniziò intorno al 1985 un'attività di specifica, condotta da quattro paesi: Francia, Germania, Italia e Regno Unito, con l'obiettivo di definire una versione avanzata della TUP, pubblicata nel *Red Book* del CCITT, per l'interconnessione delle reti ISDN europee. Questa versione del protocollo, finalizzata nel dicembre del 1986, fu denominata "TUP+" (*Telephone User Part-Plus*).

Nel corso del quadriennio di studi successivo (1984-1988), che ha prodotto i libri blu del CCITT, molte parti delle raccomandazioni Q.761-764 furono rivisitate e, nel 1988, fu pubblicata una nuova versione della ISUP, denominata «ISUP Blue Book», strutturalmente diversa dalla versione precedente. Vennero riviste le procedure di segnalazione e la corrispondente messaggistica,

relative alle funzioni di base del protocollo (instaurazione, mantenimento, supervisione e abbattimento delle connessioni), e vennero definite ulteriori procedure e messaggi di segnalazione per dare supporto a nuove prestazioni e ad un insieme di servizi ISDN.

Le raccomandazioni Q.761-764, pubblicate nel libro blu del CCITT, se da un lato offrivano una documentazione completa e stabile della ISUP, utilizzata da molti gestori come base per la definizione di una specifica nazionale, dall'altro non consentivano di realizzare tra le diverse reti ISDN una comune interfaccia di segnalazione, per via delle numerose opzioni che esse comprendevano.

### 4. La ISUP come normativa internazionale

Con la realizzazione di versioni nazionali della *ISUP Blue Book*, apparve evidente l'esigenza di definire una specifica internazionale in cui fossero fissati i requisiti della ISUP (*Blue Book*) necessari per interconnettere le diverse reti ISDN che andavano man mano realizzandosi; in particolare, questa specifica avrebbe dovuto definire, nel dettaglio, l'interfaccia di segnalazione per il controllo e la gestione dei circuiti compresi tra due autocommutatori internazionali. Questa tematica fu affrontata in sede CCITT (quadriennio di studi 1988-1992). Alla fine del 1990, si concluse un ciclo di lavori che portò alla pubblicazione della "Raccomandazione Q.767".

Attraverso l'istituto per la normalizzazione delle telecomunicazioni (*ETSI-European Telecommunications Standards Institute*), questa raccomandazione è divenuta normativa europea per l'interconnessione delle reti ISDN. Essa è oggi pubblicata dall'ETSI con il seguente codice di riferimento: "ETS 300 121". Nel prosieguo di questa trattazione la ISUP definita nella suddetta normativa è denominata "ISUP-I" (*ISUP-Internazionale*). Scopo di questa normativa è:

- 1) definire i requisiti di segnalazione per la diffusione di un insieme omogeneo di servizi ISDN in tutte le reti europee;
- 2) normalizzare le procedure di segnalazione per il controllo e la gestione dei circuiti internazionali;
- 3) favorire il processo di armonizzazione riducendo, per quanto possibile, le potenziali discrepanze dovute alle diverse prestazioni delle reti nazionali.

Il risultato ottenuto è stato quello di una specifica -la normativa ETS 300 121- che definisce il "nucleo base" delle funzioni della *ISUP Blue Book* per l'interconnessione degli autocommutatori internazionali.

In Italia, come vedremo nel seguito, questa normativa (ETS 300 121) è stata recepita da SIP come specifica nazionale della ISUP, denominata "ISUP-S" (*ISUP per rete SIP*).

### 5. Struttura della ISUP

La ISUP definisce i messaggi e le procedure di segnalazione da impiegare tra gli autocommutatori numerici di una ISDN. Le funzioni in essa definite possono essere suddivise in:

- a) funzioni per il trattamento della chiamata base;
- b) funzioni per l'espletamento di servizi supplementari.

Le funzioni per il trattamento della chiamata base comprendono tutte quelle procedure di segnalazione necessarie per l'instaurazione, il mantenimento e l'abbattimento di un collegamento. Queste funzioni garantiscono la formazione di un collegamento tra due utenti, prescindendo dalle procedure aggiuntive necessarie per dare supporto ai singoli servizi richiesti dall'uno o dall'altro utente del collegamento.

Attraverso queste procedure di chiamata base, la rete realizza, tratta per tratta, il collegamento tra autocommutatori di origine e di destinazione, mettendo a disposizione le risorse di rete (sia di commutazione che di trasmissione) per garantire il tipo di connessione richiesto dall'utente chiamante (es. connettività numerica per trasmissione dati a 64 kbit/sec oppure dispositivi di controllo dell'eco nel caso di comunicazioni di tipo telefoniche via satellite).

Per quanto concerne i servizi, la ISUP definisce un insieme di procedure di segnalazione aggiuntive a quelle di chiamata base, per ogni servizio supportato dal protocollo.

In generale, le procedure di chiamata base sono residenti in tutti gli autocommutatori dotati della ISUP; mentre le funzioni aggiuntive -quelle per dare supporto ai servizi supplementari- possono anche interessare un ristretto numero di autocommutatori di un collegamento (es. solo l'autocommutatore di origine, solo gli autocommutatori di origine e di destinazione, ecc.); ciò dipende dal tipo di servizio e da come tale servizio viene realizzato in rete. In questi casi, gli autocommutatori non coinvolti nelle funzioni tipiche di un dato servizio, provvedono semplicemente a far transitare trasparentemente le informazioni (messaggi o parti di un messaggio) che, per quel servizio, vengono trattati da altri autocommutatori del collegamento.

Si consideri, ad esempio, il servizio supplementare *Identificazione della linea chiamante*, che consiste nel rendere nota all'utente abbonato al servizio l'identità (il numero) dell'utente chiamante nel momento in cui l'abbonato riceve la chiamata. Il servizio richiede che siano definiti un insieme di procedure nell'autocommutatore di origine (ove è attestato l'utente chiamante), per la generazione e l'invio del numero dell'utente chiamante (durante la fase di instaurazione del collegamento), e un insieme di procedure presso l'autocommutatore di destinazione (ove è attestato l'utente abbonato al servizio) per consentire di ricevere tale informazione -il numero del chiamante- e di presentarla, dopo opportuni controlli, al terminale ISDN dell'utente chiamato, prima che questi risponda alla chiamata. Nell'ambito di questo servizio,

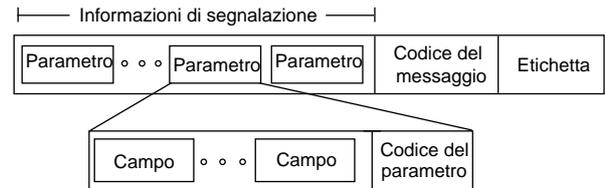


Figura 3 Struttura del messaggio ISUP

nessuna procedura aggiuntiva è richiesta invece negli autocommutatori intermedi di un collegamento, se non quella di inoltrare (verso l'autocommutatore di destinazione) l'informazione ricevuta sul numero del chiamante.

La struttura della ISUP permette, in generale, di definire procedure di segnalazione per nuovi servizi senza che ciò implichi la modifica di tutto il protocollo. Ciascun servizio viene realizzato attraverso la definizione di un insieme aggiuntivo di procedure e di messaggi di segnalazione (o parti di messaggi) che, in alcuni casi, possono ridursi a modifiche minime alle procedure di chiamata base.

Questa flessibilità deriva dalla tipica struttura "a blocchi" dei messaggi di segnalazione (fig. 3).

Il messaggio ISUP, identificato dal suo codice, è costituito da blocchi di informazioni, tra loro indipendenti, denominati *parametri*. Ciascun parametro, identificato a sua volta da un proprio codice, porta uno o più elementi di segnalazione, (denominati *campi*) che, a seconda del loro contenuto informativo, sono utilizzati dagli elaboratori di centrale per eseguire una o più operazioni oppure, più semplicemente, per segnalare determinati eventi. Questa struttura consente di definire, per ogni nuova applicazione della ISUP, nuovi parametri che possono essere inclusi in nuovi messaggi oppure inclusi in messaggi già definiti senza che, in questo secondo caso, sia necessaria la ridefinizione degli stessi messaggi o delle procedure che li utilizzano.

Contrariamente, nella TUP i messaggi sono organizzati in gruppi di tipo funzionale; ciascun gruppo definisce rigidamente la struttura dei messaggi di appartenenza. Ciascun messaggio TUP, infatti, oltre all'etichetta, è costituito dalla cosiddetta *Intestazione* (fig. 4a) suddivisa in due campi detti "H0" e "H1". In base alla codifica di questi campi vengono identificati, rispettivamente, il gruppo funzionale di appartenenza

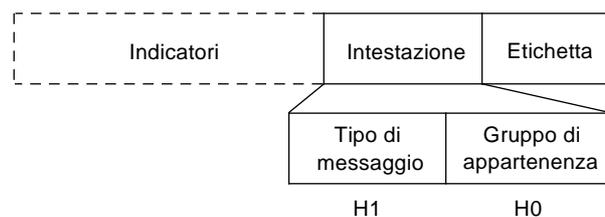


Figura 4a Struttura del messaggio TUP

del messaggio ed il tipo di messaggio: ad esempio, H0=0110 e H1=0101 indicano rispettivamente il gruppo funzionale denominato "messaggi di supervisione della chiamata" ed il tipo di messaggio, all'interno del gruppo, denominato "messaggio di risposta" (fig. 4b).

H1 = 0101		H0 = 0110	
Messaggio di risposta	Messaggi di supervisione della chiamata	Etichetta	

Figura 4b Formato del "messaggio di risposta" in TUP

Per alcuni gruppi funzionali i messaggi di appartenenza possono anche includere, in un apposito campo detto *Indicatori*, informazioni aggiuntive. Ad esempio, il "messaggio di indirizzo completo" (fig. 4c), che di per sé indica il raggiungimento della condizione di fine selezione, porta anche ulteriori indicazioni sullo stato dell'utente chiamato (es. utente libero).

H1 = 0001		H0 = 0100	
Indicatori dello stato dell'utente	Messaggio di indirizzo completo	Messaggi di esito positivo della chiamata	Etichetta

Figura 4c Formato del "messaggio di indirizzo completo" in TUP

Definire una nuova applicazione per la TUP, che richieda nuove informazioni di segnalazione da scambiare tra gli autocommutatori e nuove procedure, implica la risoluzione di non poche problematiche relative alla compatibilità dell'applicazione rispetto al resto del protocollo, poiché non esiste in TUP una netta separazione tra procedure di segnalazione per la chiamata base e quelle per i servizi supplementari.

L'introduzione di una nuova versione della TUP, estensione di una versione precedente (com'è stato per la TUP-E in Italia), richiede quindi la risoluzione dei problemi di interfunkionamento tra differenti sistemi di segnalazione.

Grazie alle caratteristiche di flessibilità della ISUP, invece, l'introduzione di una nuova funzione in rete (nuovo servizio, nuova prestazione), non richiede la definizione di procedure di interfunkionamento tra i sistemi che implementano questo protocollo, in quanto ciascuna implementazione della ISUP è in grado di interagire con versioni diverse di questo protocollo garantendo almeno il corretto espletamento delle procedure di chiamata base.

Con la disponibilità della ISUP in tutti gli autocommutatori della rete, viene a crearsi per la prima volta una situazione favorevole per il gestore, in cui l'introduzione di un nuovo rilascio della ISUP in una porzione di rete, non comporta problemi di

incompatibilità tra porzioni di rete dotate di versioni diverse dello stesso protocollo ISUP.

Ad esempio, nei collegamenti tra autocommutatori SIP ed autocommutatori Iritel ed Italcable, in cui sono presenti versioni diverse della ISUP, non sono richieste funzioni aggiuntive per il loro adattamento.

## 6. Metodi di segnalazione della ISUP

Le procedure ISUP si basano su due metodologie per lo scambio delle informazioni di segnalazione tra autocommutatori della ISDN:

- metodo tratta per tratta (*link-by-link*);
- metodo da estremo a estremo (*end-to-end*).

Il metodo *link-by-link* è il metodo convenzionale di segnalazione -fra l'altro, l'unico metodo di segnalazione adottato nella TUP- che consiste nel fatto che i messaggi di segnalazione, relativi ad una data chiamata, vengono elaborati in tutti gli autocommutatori coinvolti nel collegamento e, normalmente, si riferiscono al controllo e alla supervisione dei circuiti (giunzioni) tra essi interposti. Nel seguito si riportano alcuni messaggi del protocollo ISUP utilizzati in quest'ambito. Ciascun messaggio, porta all'interno dell'etichetta il codice del circuito (giunzione) al quale il messaggio si riferisce; questo codice è denominato "CIC" (*Circuit Identification Code*).

La figura seguente (fig. 5) illustra un esempio di struttura del messaggio ISUP denominato Initial Address.

a) Messaggio di indirizzo iniziale

(IAM - *Initial Address Message*)

Il messaggio IAM è il primo messaggio inviato dall'autocommutatore di origine nella fase di instaurazione di una chiamata. Il messaggio include un insieme di informazioni, fra cui anche le cifre di selezione, necessarie per l'espletamento di tutte le procedure di chiamata base richieste per quel collegamento (es. informazioni sul tipo di connettività e sul tipo di segnalazione richiesta, sulla categoria d'origine, ecc.), nonché su alcuni servizi richiesti dall'utente (es. servizio *Identificazione della linea connessa*).

b) Messaggio di indirizzo successivo

(SAM - *Subsequent Address Message*)

Questo messaggio, inviato in avanti, permette di trasferire le cifre di selezione successive a quelle inviate nel messaggio IAM, quando queste non sono inviate "in blocco" nel messaggio IAM.

c) Messaggio di indirizzo completo

(ACM - *Address Complete Message*)

Questo messaggio è inviato a ritroso ed è utilizzato per segnalare la condizione di fine selezione. Esso

Tipo di connettività richiesta	Identità del chiamante	Categoria del chiamante	Cifre di selezione	Codice del messaggio	Etichetta
--------------------------------	------------------------	-------------------------	--------------------	----------------------	-----------

Figura 5 Struttura del messaggio Initial Address

inoltre trasporta informazioni sulla presenza nel collegamento di sistemi di segnalazione diversi da quello ISUP (indicatori d'interlavoro) e sul tipo e stato dell'utente chiamato (es. indicazione di utente libero). Anche questo messaggio può trasportare informazioni significative per servizi richiesti dall'utente (es. servizio *Segnalazione da utente a utente*).

d) Messaggio di risposta  
(ANM - Answer Message)

Il messaggio ANM è inviato a ritroso per indicare il passaggio allo stato attivo del collegamento (stato di conversazione). Questo messaggio è sempre preceduto dal messaggio ACM e, come quest'ultimo, può trasferire informazioni relative a servizi di utente (es. l'identità della linea connessa).

e) Messaggio di risposta automatica  
(CON - Connect Message)

Questo messaggio, inviato a ritroso, è utilizzato per effettuare l'immediato passaggio allo stato attivo di un collegamento. Esso è utilizzato in alternativa ai messaggi ACM ed ANM.

f) Messaggio di sospensione  
(SUS - Suspend Message)

Questo messaggio assume il significato di "fine conversazione" quando è generato dalla rete, a ritroso, a seguito del riaggancio del chiamato POTS (*Plain Old Telephone Subscriber*).

Può essere utilizzato per sospendere una comunicazione, senza che siano rilasciate le risorse di rete, quando, a generare il messaggio, è un utente ISDN (chiamante o chiamato) che richiede l'attivazione del servizio supplementare *Trasportabilità del terminale*. Questo servizio consente all'utente di spostare un terminale da un attacco ad un altro, all'interno di una medesima installazione di accesso alla rete, mantenendo lo stato attivo della chiamata.

g) Messaggio di ripristino  
(RES - Resume Message)

Permette di ripristinare le condizioni di chiamata precedente all'invio del messaggio SUS.

Nel caso di utente POTS, il messaggio RES assume il significato di "seconda risposta", ed è generato dalla rete quando l'utente chiamato, durante la fase di fine conversazione, sgancia nuovamente il microtelefono.

Nel caso di utente ISDN, dopo l'invio del messaggio SUS, l'utente genera il messaggio RES per riprendere la conversazione.

h) Messaggio di svincolo  
(REL - Release Message)

È il messaggio utilizzato per liberare le risorse impegnate nel collegamento. Questo messaggio, inviabile in entrambi i versi, può trasportare informazioni sul tipo di fallimento di chiamata (fig. 6).

i) Messaggio di controllo svincolo  
(RLC - Release Complete Message)

Questo messaggio viene inviato in riscontro al messaggio REL.

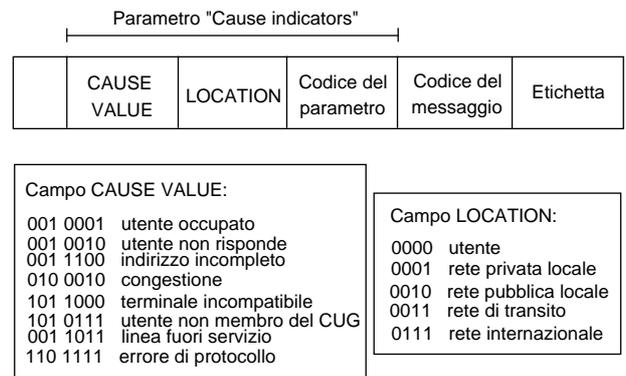


Figura 6 Struttura del messaggio Release

Il metodo *end-to-end* è caratterizzato dal fatto che gli autocommutatori intermedi di un collegamento (autocommutatori di transito) non vengono coinvolti nella elaborazione dei messaggi di segnalazione scambiati tra i nodi estremi. Questo metodo, ad esempio, è impiegato quando, per l'espletamento di un dato servizio, vengono scambiati, tra origine e destinazione di un collegamento, messaggi che non sono significativi per i nodi di transito, ma al più quest'ultimi provvedono al loro trasferimento senza entrare nel merito del contenuto stesso dei messaggi.

Tornando al metodo *link-by-link*, vediamo con un esempio (fig. 7) come, nell'ambito delle procedure di chiamata base, i messaggi sopra elencati siano utilizzati dagli autocommutatori di una ISDN per instaurare una chiamata tra due utenti. Si suppone che l'utente chiamante (utente A) voglia instaurare un collegamento numerico per effettuare, con l'utente chiamato (utente B), una comunicazione dati a 64 kbit/s. Nell'esempio di fig. 7, viene illustrata la sequenza di messaggi della ISUP scambiati tra gli autocommutatori della rete. In questa figura viene illustrata anche la corrispondenza tra i messaggi ISUP e quelli del protocollo di accesso a standard ETSI, denominato "DSS1" (*Digital Subscriber Signalling system n.1*), scambiati sull'interfaccia utente-rete.

L'utente A invia nel messaggio di accesso (Setup) le cifre di selezione più un insieme di informazioni che in parte sono utilizzate dagli autocommutatori per

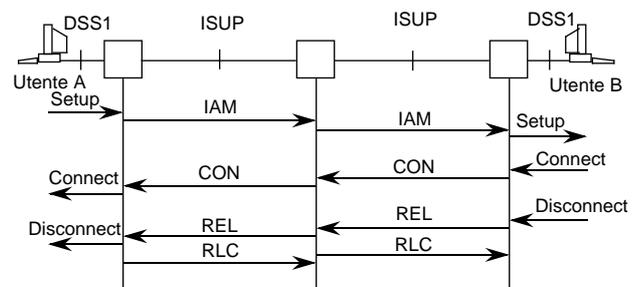


Figura 7 Esempio di chiamata tra utenti ISDN

determinare le risorse di rete da impiegare nel collegamento, dall'altro sono utilizzate dal terminale dell'utente chiamato (utente B) per determinare il tipo di comunicazione da stabilire con il terminale chiamante.

Attraverso il messaggio IAM, la rete effettua l'instradamento, tratta per tratta, della chiamata mettendo a disposizione del collegamento circuiti a 64 kbit/sec necessari alla trasmissione numerica richiesta dall'utente. Le informazioni da estremo a estremo inviate dal terminale del chiamante vengono trasferite attraverso la rete, tramite lo stesso messaggio IAM, fino al terminale del chiamato (tramite il messaggio Setup).

Raggiunto il terminale chiamato, che nell'esempio si suppone sia capace della risposta automatica (Connect), viene stabilita la fase attiva della chiamata determinata dall'invio a ritroso del messaggio CON.

La risposta automatica è una caratteristica dei terminali dati automatici ISDN. Con la segnalazione ISUP è possibile, dalla fase di costruzione del collegamento (trattamento del messaggio IAM), passare direttamente alla fase di conversazione (tramite il messaggio CON) senza transitare per quella intermedia di fine selezione (trattamento del messaggio ACM). La ISUP, quindi, permette la formazione di un collegamento in due modi: a) attraverso le tre fasi convenzionali della telefonia, tipiche della segnalazione TUP (impegno → fine selezione → risposta), come in fig. 8; b) attraverso sole due fasi (impegno → risposta), come visto in fig. 7.

Un'altra caratteristica dei terminali ISDN, e supportata dalla ISUP, è la possibilità di iniziare la disconnessione del collegamento sia da parte del chiamante che del chiamato; ciò è reso possibile in quanto il messaggio di svincolo della ISUP (messaggio REL) può essere inviato

in entrambi i versi (svincolo simmetrico), contrariamente alla TUP in cui il messaggio di svincolo può essere inviato solo in avanti. In fig. 7 l'utente B, infatti, può richiedere la disconnessione del collegamento (Disconnect); la rete provvede alla liberazione, tratta per tratta, delle risorse di rete dedicate a quel collegamento mediante i messaggi REL e RLC. In particolare, il messaggio REL viene inviato per richiedere all'autocommutatore adiacente la liberazione delle risorse impegnate; mentre il messaggio RLC è inviato da questi, in riscontro al messaggio REL, per segnalare l'avvenuta liberazione di tali risorse.

La fig. 8 illustra invece il trattamento di una chiamata tra utenti POTS. Contrariamente alla fig. 7, in cui si era ipotizzato che l'utente chiamante inviasse le cifre di selezione "in blocco", quindi trasferite in rete in un unico messaggio (IAM), nel caso di utente chiamante POTS le cifre di selezione vengono inviate in rete attraverso il messaggio IAM e messaggi SAM; questa modalità d'invio delle cifre è denominata "modalità in sovrapposizione".

La figura mostra anche lo scambio di messaggi nelle fasi di fine conversazione (messaggio SUS) e seconda risposta (messaggio RES), fasi tipiche della telefonia convenzionale.

### 7. Servizi e prestazioni della ISUP

I servizi ISDN supportati dal protocollo ISUP sono classificabili in: a) servizi portanti, b) teleservizi, c) servizi supplementari. La tabella seguente (tab. 1) elenca, in particolare, i servizi definiti negli standard ETSI e quindi supportati dalla ISUP-I.

Per quanto riguarda le prestazioni offerte dalla ISUP, si può meglio comprendere le potenzialità di questo protocollo raffrontandolo con il protocollo di segnalazione TUP.

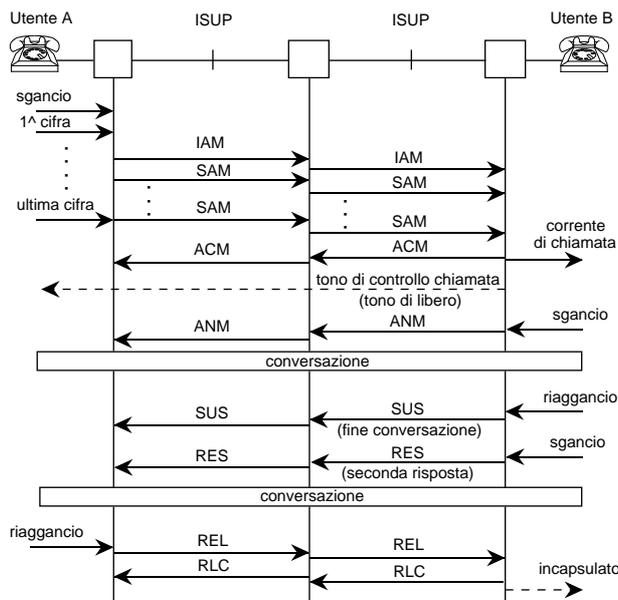


Figura 8 Esempio di chiamata tra utenti POTS

Servizi portanti	-voce -audio in banda 3.1 kHz -numerico a 64 kbit/s senza restrizioni
Teleservizi	-telefonia -telefax gr.2/3 -telefax gr.4 -modo misto -teletex -videotex
Servizi supplementari	-identificazione della linea chiamante (con/senza restrizioni) -identificazione della linea connessa (con/senza restrizioni) -gruppo chiuso di utenti -segnalazione da utente a utente -selezione passante -multinumero -sottoindirizzamento -trasportabilità del terminale

Tabella 1 Servizi a standard ETSI supportati dalla ISUP-I

Come visto in precedenza, la TUP è stata definita per applicazioni telefoniche; essa quindi è utilizzata per il trattamento delle chiamate a commutazione di circuito tra due utenti per la comunicazione fonica (voce o dati in banda fonica tramite modem). La trasmissione numerica è possibile con la TUP soltanto nell'ambito di particolari reti predisposte per la trasmissione dati a commutazione di circuito, come la RFD (*Rete Fonia Dati*) in Italia.

Se escludiamo quest'ultima limitata applicazione, che comunque ha comportato un adattamento della TUP, possiamo affermare che la ISUP consente di soddisfare i requisiti di segnalazione per l'integrazione della telefonia, della trasmissione dati e, più in generale, dei servizi più evoluti offerti all'utenza.

Oltre alla capacità di risposta automatica e di svincolo bidirezionale del collegamento (fig. 8), la segnalazione ISUP permette di trasferire informazioni sulla presenza di tratte, nel collegamento, servite da altri sistemi di segnalazione (informazioni di interlavoro), oppure trasferire informazioni sul tipo di segnalazione d'accesso dell'utente. Ad esempio, in riferimento alla fig. 8, i messaggi IAM e ACM portano rispettivamente l'indicazione che gli utenti chiamante e chiamato sono di tipo POTS; mentre, nel caso di fig. 7, i messaggi IAM e CON portano l'indicazione che gli utenti sono di tipo ISDN.

Con la ISUP sono possibili funzioni avanzate di instradamento basate sulla capacità di determinare, oltre al tipo di connettività (analogica o numerica), anche il tipo di segnalazione richiesto per un dato collegamento (è possibile trasferire nel messaggio IAM l'informazione che la segnalazione ISUP è richiesta, preferita oppure non richiesta su tutto il collegamento).

Si consideri, ad esempio, lo scenario di fig. 9 in cui una chiamata provenga da una giunzione controllata da ISUP (ricezione del messaggio IAM); si supponga inoltre che la chiamata venga instradata dall'autocommutatore verso una direzione per la quale siano disponibili circuiti liberi (non già impegnati) appartenenti a tre tipi diversi di segnalazione: a) segnalazione associata (*CAS-Channel Associated Signalling System*), b) segnalazione TUP, c) segnalazione ISUP.

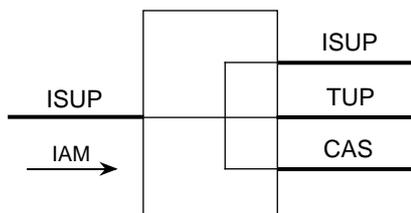


Figura 9 Autocommutatore intermedio con tre diverse segnalazioni uscenti

L'autocommutatore sceglie il circuito uscente da impegnare in funzione di due tipi di informazioni che trova nel messaggio IAM in due campi distinti: il campo detto *Transmission medium requirement (TMR)*, contenente l'indicazione sul tipo di connettività richiesto, ed il campo *ISUP preference indicator (IPI)* che porta l'indicazione sul tipo di segnalazione richiesto.

Il campo TMR indica essenzialmente il tipo di connettività richiesto per dare supporto ai servizi portanti indicati in tab. 1: a) numerico a 64 kbit/sec senza restrizioni, b) audio in banda 3.1 kHz, c) voce. Il campo IPI, invece, indica la priorità di scelta della ISUP rispetto ad altri tipi segnalazione: a) ISUP richiesta, b) ISUP preferita, c) ISUP non richiesta.

La tab. 2 evidenzia la relazione esistente tra le indicazioni contenute nei suddetti campi ed il tipo di segnalazione uscente prescelto dall'autocommutatore nello scenario di fig. 8.

Come detto in precedenza (cfr. § 6), le procedure di svincolo simmetrico consentono invece una migliore utilizzazione delle risorse di rete in quanto permettono di ridurre i tempi di occupazione dei circuiti impegnati in un collegamento grazie alla eliminazione della fase di fine conversazione. Nella TUP, la fase di fine conversazione non causa la liberazione immediata del collegamento. Il messaggio di svincolo, che libera i circuiti impegnati, viene sempre inviato nel verso che va da origine a destinazione di un collegamento. La ISUP, pur mantenendo la capacità di gestire la fase di fine conversazione alla stessa stregua del protocollo TUP, è anche in grado di inviare il messaggio di svincolo (messaggio REL di fig. 7) nel verso a ritroso permettendo così la liberazione immediata del collegamento a seguito di una richiesta di svincolo da parte dell'utente chiamato (Disconnect di fig. 7).

La ISUP permette anche di fornire all'utente ISDN informazioni puntuali sull'evento di causa dei fallimenti di chiamata. Con la segnalazione TUP era previsto un gruppo funzionale di messaggi -i messaggi di esito negativo della chiamata- che forniva un numero limitato

TMR	IPI	Tipo di segnalazione
"64 kbit/sec"	"ISUP richiesta"	ISUP
	"ISUP preferita"	ISUP
	"ISUP non richiesta"	ISUP (1 <sup>a</sup> scelta) TUP (2 <sup>a</sup> scelta)
"3.1 kHz"	"ISUP richiesta"	ISUP
	"ISUP preferita"	ISUP (1 <sup>a</sup> scelta) TUP/CAS (2 <sup>a</sup> scelta)
	"ISUP non richiesta"	ISUP/TUP/CAS
"voce"	"ISUP richiesta"	ISUP
	"ISUP preferita"	ISUP (1 <sup>a</sup> scelta) TUP/CAS (2 <sup>a</sup> scelta)
	"ISUP non richiesta"	ISUP/TUP/CAS

Tabella 2 Tipo di segnalazione uscente compatibile con i valori dei campi TMR e IPI.

di indicazioni di fallimento. Questi messaggi, fra l'altro, potevano essere utilizzati solamente nel verso a ritroso e soltanto prima della fase di conversazione.

Con la segnalazione ISUP, quando si verifica un evento che determina il fallimento di una chiamata (in qualunque fase della chiamata), viene utilizzato il messaggio di svincolo (messaggio REL) che, come detto in precedenza, può essere inviato in entrambi i versi del collegamento per liberare immediatamente le risorse impegnate. Questo messaggio contiene, in un apposito parametro (denominato *Cause indicators*), le informazioni sulla causa che ha determinato la liberazione del collegamento. Più in dettaglio, il parametro contiene due tipi di informazioni (fig. 6): *a*) il campo *Location* che indica l'elemento di rete che ha generato il messaggio di fallimento (es. centrale locale, di transito, utente, centrale privata, ecc.); *b*) il campo *Cause value* che esprime la causa di fallimento (es. congestione, occupato, guasto, chiamata rifiutata, utente non risponde, ecc.).

La ISUP definisce complessivamente 31 cause diverse di fallimento che potenzialmente possono essere estese ulteriormente raggiungendo 127 valori. In prospettiva, la capacità della ISUP di segnalare congiuntamente il tipo di causa di fallimento e l'elemento di rete che l'ha determinato potrebbe essere utilizzata dal gestore, nell'ambito delle funzioni di esercizio e manutenzione, per migliorare la qualità del servizio, attraverso la definizione di misure di traffico in grado, ad esempio, di discriminare più puntualmente fra cause di fallimento dovute alla rete e cause imputabili all'utenza, oppure mediante la generazione di annunci fonici inviati all'utente diversificati in base all'evento di fallimento.

Questo sistema di segnalazione, nonché le procedure per la fornitura dei servizi indicati in tab. 1, sono state definite nella normativa dell'ETSI (cfr. ETS 300 121) per essere implementate negli autocommutatori internazionali al fine di costituire, come detto in precedenza, una interfaccia di segnalazione standardizzata per i collegamenti ISDN internazionali. Ovviamente, l'applicazione della ISUP-I sull'interfaccia internazionale non è sufficiente per realizzare una ISDN transnazionale. I Paesi europei aderenti al Memorandum d'intesa per l'ISDN, infatti, si sono impegnati nel realizzare una ISDN nazionale dotata del protocollo ISUP e di interfacce di accesso utente-rete standardizzate.

L'adozione, da un lato, di interfacce di accesso a norma ETSI permette la interscambiabilità dei terminali ISDN su scala europea; mentre, dall'altro, l'implementazione della segnalazione ISUP favorisce il processo di armonizzazione delle reti e la fornitura standardizzata dei servizi di cui in tab. 1 per tutto il bacino di utenza ISDN europea.

## 8. La ISUP in Italia

Sulla base delle normative dell'ETSI, in Italia è stata finalizzata, nel gennaio del 1991, una specifica che definisce una versione della ISUP-I - denominata ISUP-S- adattata agli autocommutatori della rete SIP.

Questa specifica definisce i requisiti aggiuntivi del protocollo ISUP-I per uso nazionale. La specifica della ISUP-S viene definita "per differenze" rispetto allo standard ETS 300 121. In particolare, vengono indicate le parti della normativa da realizzare per fornire le prestazioni ed i servizi a standard ETSI e, dove necessario, vengono integrate con le prestazioni tipiche della rete nazionale.

Lo scopo di quest'approccio è quello di richiedere ai fornitori una ISUP per la rete SIP quanto più possibile corrispondente alla ISUP-I, le cui differenze si limitano, appunto, alla definizione delle applicazioni nazionali della ISUP-I.

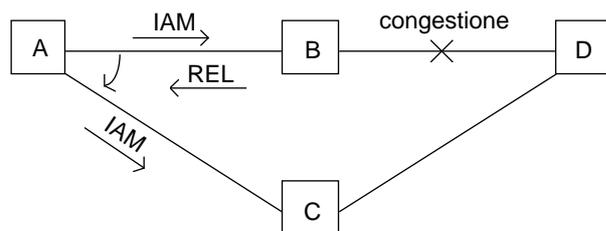
Le prestazioni aggiuntive della ISUP-S, rispetto alla versione internazionale, sono:

- la prestazione denominata "Identificazione abbonato disturbatore", utilizzata per identificare le chiamate destinate a particolari utenti quali ad esempio quelli associati ai servizi di emergenza (es. 112, 113, ecc.);
- la "Offerta e richiamata", impiegata nell'ambito dei servizi di decade 1 che richiedono l'inclusione (es. 197 - *Chiamata urbana urgente*) e nel traffico da operatrice;
- l'utilizzo di codici extra-decadici per instradare le chiamate verso particolari numeri interni di rete, che trova applicazione nell'ambito dei servizi di Rete intelligente (es. Rete privata virtuale);
- la tassazione con conteggio passante, ovvero la possibilità di trasferire gli impulsi di conteggio tra due centrali, limitatamente a chiamate che coinvolgono servizi di decade 1 o particolari servizi di Rete intelligente;
- la procedura di tassazione mediante il trasferimento dello scaglione tariffario.

Oltre alle suddette prestazioni, per permettere di migliorare il grado di servizio offerto dalla rete SIP, la ISUP-S fornisce le procedure di segnalazione di supporto alla funzione denominata "Reinstradamento automatico del traffico" (*crank-back*).

Questa funzione permette di recuperare una quota di traffico perso per effetto della congestione di rete. Il *crank-back* opera nella fase di costruzione di un collegamento utilizzando la segnalazione ISUP-S come mezzo di trasporto delle informazioni necessarie agli autocommutatori coinvolti in queste procedure per determinare la possibilità di effettuare il reinstradamento del tentativo di chiamata. Il *crank-back* viene effettuato nell'ambito dei livelli di rete in cui un tentativo di chiamata può impegnare al massimo solo due tratte attraverso tre nodi (es. A→B→D di fig. 10).

Con riferimento all'esempio di fig. 10, se per un tentativo di chiamata viene rilevata la congestione sulla direzione uscente (B-D), e se questa direzione

Figura 10 Configurazione di rete per il *crank-back*

è tale da consentire un reinstradamento del tentativo, l'autocommutatore «B» invia a ritroso, mediante la segnalazione ISUP-S, il messaggio di svincolo con una indicazione che il *crank-back* è ammesso; l'autocommutatore «A», alla ricezione di questa informazione, e se il fascio da cui riceve questo messaggio (A-B) è configurato in modo da consentire l'applicazione del *crank-back*, effettua il reinstradamento del tentativo di chiamata su una via alternativa (A-C).

Per quanto concerne i servizi offerti, oltre a quelli indicati in tab. 1 per utenti di tipo ISDN, la ISUP-S permette di offrire agli utenti ISDN i servizi telefonici già offerti agli utenti POTS o in via di diffusione. In generale, tali servizi -i cosiddetti *Servizi Telefonici Supplementari* (STS)- non richiedono alcun supporto da parte della segnalazione di rete. La ISUP-S provvede, in alcuni casi, a trasferire informazioni aggiuntive che permettono un migliore utilizzo di questi servizi. Nel caso, ad esempio, del servizio "Trasferimento di chiamata", la ISUP-S permette agli autocommutatori di segnalare il numero di trasferimenti subiti da una chiamata in modo da impedire eventuali trasferimenti multipli.

In base alle precedenti considerazioni, la ISUP-S e la ISUP-I non devono essere intesi come due versioni di un protocollo di segnalazione -la ISUP- strettamente utilizzati per la formazione di collegamenti ISDN. Devono invece intendersi come parti di utilizzazione del canale comune, tra loro perfettamente compatibili, l'uno in ambito nazionale l'altro sull'interfaccia internazionale, in grado di dare supporto sia a collegamenti tra utenti di tipo omogeneo (es. ISDN-ISDN, POTS-POTS) sia a collegamenti eterogenei (es. ISDN-POTS).

In particolare, la ISUP-S consente di servire ogni tipo di traffico comprese le chiamate verso servizi di decade 1 e servizi della rete intelligente, e di essere impiegato in tutti i collegamenti di tipo interdistrettuali e distrettuali della rete SIP costituita da autocommutatori numerici con funzioni di SGU (Stadio di Gruppo Urbano) e SGT (Stadio di Gruppo di Transito), e tra questi e gli autocommutatori internazionali (Iritel e Italcable).

## 9. Sviluppi successivi della ISUP

Dopo la pubblicazione (nel 1990) della "Raccomandazione Q.767" da parte del CCITT, e della normativa "ETS 300 121" dell'ETSI, si iniziò a livello internazionale una attività per definire una nuova versione della ISUP che, oltre a comprendere le procedure e la messaggistica previste nella versione precedente, includesse anche le funzioni necessarie per dare supporto ad un insieme più ampio e variegato di servizi e prestazioni ISDN. I servizi riportati in tab. 1 avrebbero quindi costituito soltanto una parte dell'insieme di servizi ISDN supportati da questa nuova versione della ISUP. Le due organizzazioni internazionali -il CCITT e l'ETSI- arrivarono così alla finalizzazione della seconda versione della ISUP, quasi contemporaneamente, alla fine del 1992: il CCITT pubblicava, come risultato del quadriennio di studi (1988-1992), le nuove "Raccomandazioni Q.761-764" (la cosiddetta *ISUP White Book* oppure *ISUP '92*); mentre in ETSI, nella prima metà del 1993, veniva approvata la specifica "ETS 300 356" contenente la seconda versione della ISUP-I (denominata *ISUP-I v2*).

In Italia, l'attività di specifica svolta in ambito SIP si sta orientando verso un graduale allineamento della ISUP-S ai servizi e prestazioni offerti dalla ISUP-I v2, dando priorità a quei servizi per cui si prevede un maggior interesse da parte del mercato.

Tale approccio è possibile grazie alle caratteristiche di flessibilità della ISUP che rendono possibile la coesistenza in rete di differenti versioni dello stesso protocollo senza che ciò comporti alcun degrado del servizio.

Con la introduzione della ISUP nella ISDN, infatti, vengono raggiunti due importanti risultati per il gestore: a) creare le condizioni in cui sia possibile introdurre nella rete nuove prestazioni con la sicurezza che, nella fase transitoria in cui non tutti gli autocommutatori della rete siano stati ancora aggiornati con il nuovo rilascio, venga garantita una qualità di servizio almeno pari a quella offerta all'utenza prima dell'inizio della diffusione del nuovo rilascio; b) possibilità di interconnettere direttamente autocommutatori che implementano versioni diverse della ISUP senza dover implementare procedure aggiuntive per l'interfunzionamento dei due sistemi.

### 9.1 Il servizio di Prenotazione su occupato

Uno dei servizi, definiti nella *ISUP-I v2*, di maggior interesse per SIP è rappresentato dal servizio di "Prenotazione su occupato" (in ETSI denominato *CCBS - Call Completion on Busy Subscriber*). Per questo servizio, definito a livello internazionale solo per utenza di tipo ISDN, SIP ha realizzato una specifica -estensione di quella dell'ETSI- il cui obiettivo è quello di offrire il servizio sia a utenti ISDN che a utenti POTS.

Il servizio CCBS consente all'utente chiamante (fruitore del servizio), qualora trovasse l'utente desiderato occupato, di richiedere alla rete di essere richiamato

automaticamente e quindi di essere connesso con il chiamato non appena quest'ultimo si rendesse libero.

La prestazione CCBS permette un uso più razionale della rete con effetti benefici sulla qualità di servizio in quanto, da un lato, consente il recupero di una quota di traffico perso per effetto dei tentativi falliti su utente occupato; dall'altro, permette di ridurre la percentuale di utilizzo delle risorse di rete inutilmente impegnate per effetto dei ripetuti tentativi di chiamata sull'utente occupato.

Data la complessità delle procedure di segnalazione richieste per dare supporto a questo servizio, è stato necessario definire un insieme di requisiti aggiuntivi della rete di segnalazione: il sistema di segnalazione su canale comune (CCS7) della rete SIP deve equipaggiarsi delle funzionalità SCCP (*Signalling Connection Control Part*) e TCAP (*Transaction Capabilities Application Part*) distribuite in tutti gli autocommutatori dotati di ISUP-S.

Infatti, per l'espletamento del servizio CCBS, è necessario stabilire tra i nodi estremi di un collegamento (autocommutatori di origine e di destinazione) dei meccanismi di associazione ("dialogo"), non correlate alla costruzione di un collegamento a commutazione di circuito, tramite i quali vengono effettuate le diverse operazioni previste dal servizio (es. a seguito della richiesta di attivazione del servizio da parte dell'utente fruitore, il nodo di origine richiede al nodo di destinazione di attivare il monitoraggio dello stato dell'utente chiamato). Queste operazioni vengono scambiate tra nodi di origine e destinazione attraverso messaggi del protocollo TCAP che utilizza il servizio di trasporto dei blocchi funzionali SCCP+MTP. In particolare, le funzioni SCCP richieste sono quelle che permettono

l'instradamento dei messaggi TCAP sulla base del numero del chiamato (per i messaggi inviati da origine a destinazione) e sul numero del chiamante (per quelli inviati nel verso opposto). Queste funzioni richiedono un meccanismo di traduzione delle cifre del numero di utente in codice del punto di segnalazione (DPC) dell'autocommutatore a cui il messaggio è destinato. Questo meccanismo di traduzione è noto come *Global title translation*.

La fig. 11 illustra lo scambio di informazioni tra autocommutatori di origine e di destinazione per l'espletamento di questo servizio.

A seguito del fallimento di chiamata per utente occupato (scambio dei messaggi IAM e REL del protocollo ISUP), l'utente chiamante può richiedere l'attivazione del servizio. In questo caso, l'autocommutatore di origine invia verso l'autocommutatore di destinazione un messaggio TCAP contenente la richiesta di attivazione del servizio CCBS. A seguito della ricezione di questo messaggio, l'autocommutatore di destinazione inizia a controllare lo stato dell'utente chiamato e, al verificarsi della condizione di utente libero, provvede a comunicare tale condizione all'origine attraverso l'invio di un messaggio TCAP (messaggio di "richiamata" di fig. 11).

Il messaggio di richiamata permette all'autocommutatore di origine di avvisare l'utente abbonato -attraverso un particolare squillo del suo telefono- che l'utente desiderato è adesso libero. A questo punto, l'utente abbonato dovrà semplicemente sganciare il microtelefono per essere automaticamente connesso all'utente desiderato, senza dover ricomporre il numero telefonico.

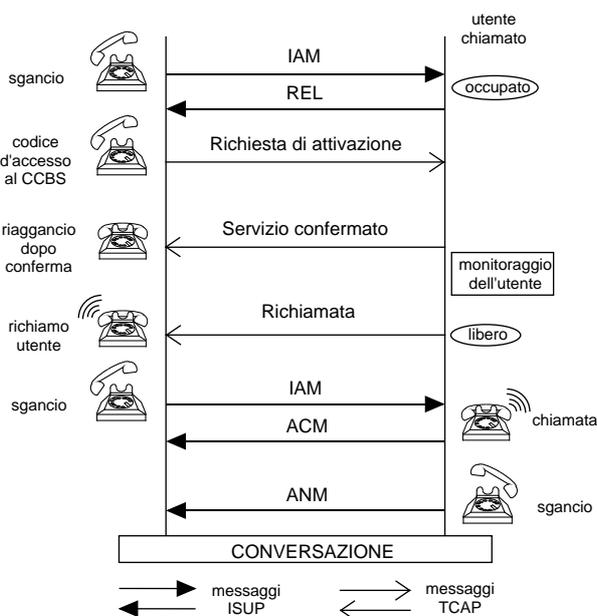


Figura 11 Esempio di procedura per il servizio di Prenotazione su occupato

### Bibliografia

- [1] *Specifications of Signalling System No. 7. Raccomandazioni CCITT Q.721-724 e Q.761-764, Red Book, Malaga-Torremolinos, 1984.*
- [2] *Specifications of Signalling System No. 7. Raccomandazioni CCITT Q.721-724 e Q.761-764, Blue Book, Melbourne, 1988.*
- [3] *Recommendation Q.767; Application of the ISDN User Part of CCITT Signalling System No. 7 for the international ISDN interconnections. Normativa ETSI ETS 300 121, Ginevra, 1990.*
- [4] *Signalling System No. 7; Integrated Services Digital Network (ISDN) User Part VERSION 2 for the international ISDN interconnections. Normativa ETSI ETS 300 356, 1992.*
- [5] *Segnalazione su canale comune; Parte di utilizzazione per ISDN per rete SIP. Specifiche di Accettazione dei Sistemi di Commutazione Numerici (SASCN), SIP-DG SASCN 6-1480/1.*
- [6] *Servizio di Richiamata su occupato. Specifiche di*

- |      |   |       |   |
|------|---|-------|---|
|      | Accettazione dei Sistemi di Commutazione Numerici (SASCN), SIP-DG SASCN 6-2540/1.   | SCCP  | Signalling Connection Control Part        |
| [7]  | <i>Integrazioni alla specifica ISUP-S e applicazioni delle funzioni SCCP per il servizio "Richiamata su occupato" (CCBS-S). Specifiche di Accettazione dei Sistemi di Commutazione Numerici (SASCN), SIP-DG SASCN 6-2530/1, ed. settembre 1993.</i> | SGT   | Stadio di Gruppo di Transito              |
| [8]  | <i>Integrated Services Digital Network (ISDN); Routing; In support of ISUP version 1 services. Normativa ETSI ETS 300 100, aprile 1992.</i>   | SGU   | Stadio di Gruppo Urbano                   |
| [9]  | <i>Esercizio e manutenzione per sistemi con prestazioni ISDN; Istradamento. Specifiche di Accettazione dei Sistemi di Commutazione Numerici (SASCN), SIP-DG SASCN 3-1730/1.</i>   | STS   | Servizi Telefonici Supplementari          |
| [10] | <i>Procedure aggiuntive di analisi della numerazione, istradamento e tassazione per la segnalazione su canale comune. Specifiche di Accettazione dei Sistemi di Commutazione Numerici (SASCN), SIP-DG SASCN 3-1820/1.</i>                           | SUS   | Suspend                                   |
| [11] | <i>Istradamento del traffico; Reinstradamento automatico. Specifiche di Accettazione dei Sistemi di Commutazione Numerici (SASCN), SIP-DG SASCN 3-1195/1.</i>   | TCAP  | Transaction Capabilities Application Part |
|      |   | TMR   | Transmission Medium Requirement           |
|      |   | TUP-E | Telephone User Part-Estesa                |
|      |   | TUP-N | Telephone User Part-Nazionale             |

## Acronimi

ACN	Autocommutatore Numerico
ACM	Address Complete
ANM	Answer
CAS	Channel Associated Signalling system
CCBS	Call Completion on Busy Subscriber
CCS7	Common Channel Signalling system N°7
CON	Connect
DPC	Destination Point Code
DSS1	Digital Subscriber Signalling system N°1
DUP	Data User Part
ETS	European Telecommunication Standard
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
IAM	Initial Address
IPI	ISUP Preference Indicator
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISUP	ISDN User Part
ISUP-I	ISDN User Part-Internazionale
ISUP-N	ISDN User Part-Nazionale
ISUP-S	ISDN User Part-SIP
MTP	Message Transfer Part
POTS	Plain Old Telephone Subscriber
REL	Release
RES	Resume
RFD	Rete Fonia Dati
RLC	Release Complete
RI	Rete Intelligente
SAM	Subsequent Address

# L'ISDN e la caratterizzazione della rete di distribuzione

M. Titli, A. Tofanelli (\*)

*La rete di distribuzione costituisce la parte più capillare dell'intera infrastruttura di telecomunicazioni ed assorbe una porzione considerevole degli investimenti complessivi. La possibilità di utilizzare pienamente l'attuale rete di distribuzione in rame gioca un ruolo fondamentale nel successo dell'ISDN. Poiché detta rete è stata progettata per la trasmissione di segnali in banda fonica, banda ben inferiore a quanto richiede l'ISDN, ne è derivata la necessità di una sua puntuale caratterizzazione al fine di conoscerne a fondo le prestazioni in funzione degli apparati trasmissivi ISDN. Sin dal 1991 SIP ha avviato campagne di misura allo scopo, interessando progressivamente l'intero territorio nazionale. A partire dal '93 detta caratterizzazione è stata orientata a verificare anche la possibilità d'introduzione in rete di sistemi trasmissivi che richiedono bande più elevate di frequenze. Nel presente articolo si illustrano le scelte metodologiche compiute ed i risultati più rilevanti delle misure eseguite negli anni '91-'92, primo fra tutti la conferma della possibilità di usare la rete di distribuzione per fornire all'utenza l'accesso base ISDN nella quasi totalità dei casi e senza particolari problemi.*

## 1. Introduzione

La rete di distribuzione in rame rappresenta per tutti i Gestori di telecomunicazioni (TLC) un elevato investimento economico ed è pertanto evidente l'interesse sia allo sfruttamento il più a lungo possibile delle immobilizzazioni effettuate sia ad un suo sempre migliore utilizzo (a fine '92 quella SIP serviva circa 23,7 milioni di collegamenti principali e 370000 accessi alle reti per dati, con uno sviluppo di 106,985 milioni di km cto, realizzati per il 98,35% su portanti in rame); essa costituisce infatti la via di accesso alla rete di TLC ed occupa quindi un ruolo primario nel miglioramento della qualità dei servizi esistenti e nella predisposizione di nuovi e più avanzati. Originariamente questa rete fu realizzata con l'obiettivo di trasportare il canale telefonico di base di 4 kHz, ma l'incremento delle richieste di allacciamenti telefonici e di nuovi servizi ha comportato e comporta un continuo ampliamento della capacità trasmissiva.

E' oggi ipotizzabile l'utilizzo della rete di distribuzione in rame anche quando la banda di frequenze da trasmettere è ben maggiore di 4 kHz, permettendo quindi il rinvio degli investimenti onerosi richiesti dalla posa sostitutiva delle fibre ottiche (quest'ultima può essere limitata ai casi in cui la velocità di cifra richiesta la rende economicamente giustificata), ma anticipando parzialmente l'offerta di

servizi che richiederebbero una rete totalmente ottica. Lo sviluppo della tecnologia di integrazione su larga scala ed il progresso avvenuto nelle tecniche di trasmissione e di codifica del segnale (che ha consentito di ridurre al minimo l'occupazione di banda ed i conseguenti problemi di diafonia e di attenuazione) permettono infatti di utilizzare le coppie simmetriche della rete di distribuzione per il trasporto di flussi dati bidirezionali a 160 kbit/s dell'accesso base ISDN (Integrated Services Digital Network) e, in un futuro molto prossimo, di altri ad ancora maggior velocità, quali l'HDSL (High bit-rate Digital Subscriber Loop), l'ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Loop) ed il VHDSL (Very High bit-rate Digital Subscriber Loop), con semplici criteri di impiego delle coppie. E' infatti ulteriore interesse dei Gestori sia semplificare le procedure d'installazione e di manutenzione della rete, essendo essa caratterizzata da notevoli costi di esercizio, sia realizzare la massima coesistenza dei nuovi sistemi (tra loro, nonché tra questi ed i servizi preesistenti) nell'ambito dello stesso cavo e quindi un elevato riempimento dei cavi stessi.

Per una verifica della possibilità di una semplice e rapida introduzione in rete di distribuzione dei nuovi servizi, che richiedono come già detto frequenze ben maggiori di quelle proprie della telefonia analogica tradizionale, è fondamentale acquisire una buona conoscenza delle caratteristiche elettriche e trasmissive della rete stessa a dette frequenze. I maggiori Gestori di TLC, tra i quali France Telecom, Deutsche Bundespost Telekom, British Telecom e le Bell Operating

---

(\*) dr. Mario Titli -SIP DG- Torino; ing. Adler Tofanelli -CSELT-Torino

Companies, hanno condotto negli ultimi anni campagne di misura a tale scopo.

Anche la SIP sin dal '91 ha in corso, con la collaborazione dello CSELT, misure su un campione di coppie inizialmente appartenenti ai centri delle città interessate dal servizio pilota ISDN, al fine di ricavare appropriate indicazioni principalmente sull'accesso base (il collegamento per l'accesso primario è progettato caso per caso); successivamente l'interesse è stato rivolto a sistemi a velocità di cifra superiori ed a zone a minor densità telefonica.

I risultati delle misure eseguite negli anni '91÷'92 confermano la possibilità di usare la rete di distribuzione in rame per fornire l'accesso base ISDN senza particolari problemi; quelli relativi alle misure effettuate nel corso del '93, al momento in fase di elaborazione, forniranno le prime indicazioni circa la possibilità di utilizzo della rete a frequenze di cifra superiori.

## 2. Obiettivi e caratteristiche procedurali delle campagne SIP di caratterizzazione della rete di distribuzione

### 2.1 Obiettivi

Gli obiettivi che SIP ha inteso conseguire con l'avvio delle campagne in oggetto erano essenzialmente:

- accrescere le conoscenze sulla rete di distribuzione in rame dal punto di vista delle caratteristiche elettriche e topografiche, con riferimento all'accesso base ISDN;
- affinare le norme d'impianto per l'accesso base ISDN mediante la definizione di criteri e di vincoli all'assegnabilità dello stesso;
- definire norme di esercizio e di manutenzione semplici ed efficaci.

### 2.2 Procedure

Allo scopo di uniformare l'esecuzione delle misure e di rendere sicuro il trasferimento dei risultati delle stesse si è sin dall'inizio convenuto di acquisire risultati omogenei per tutto il territorio nazionale, adottando quindi un unico tipo di strumentazione di misura, un'uniforme raccolta dei risultati mediante la registrazione degli stessi su supporto magnetico e la loro archiviazione in una base dati relazionale in vista di un'affidabile loro gestione ed elaborazione. È stata inoltre standardizzata la modalità di trasferimento dei

dischetti verso il centro di raccolta (SIP/DG-Torino), da dove, successivamente ad un'analisi formale mirata ad evidenziare tempestivamente eventuali errori d'esecuzione delle misure (e procedere quindi ad una loro riesecuzione), i dischetti sono stati trasferiti a CSELT per l'elaborazione.

### 2.3 Strumentazione

La scelta della strumentazione è stata effettuata in funzione della caratterizzazione delle principali cause di degrado dei parametri trasmissivi delle coppie in rame, cause che sono essenzialmente:

- i disturbi di tipo impulsivo provenienti sia dall'ambiente delle TLC (ad esempio dagli autocommutatori elettromeccanici), sia dall'ambiente esterno;
- la diafonia<sup>(1)</sup> indotta da altri segnali presenti su coppie situate nell'ambito dello stesso settore di cavo (v. ad es. filodiffusione, teletax a 12 kHz, TD, PCM, ISDN, etc.).

Per le misure del rumore impulsivo, da parte CSELT è stato sviluppato un apposito strumento [1] (figg. 1a e 1b) che permette la rilevazione dei disturbi presenti su una coppia e la loro classificazione in funzione dell'ampiezza e della durata, in diretta relazione con i parametri indicati dalla Raccomandazione CCITT G.821. Le tensioni spurie presenti nelle coppie sotto misura sono prima filtrate, in modo analogo a quanto effettuerebbe il filtro presente nella sezione di ricezione del sistema trasmissivo per l'accesso base ISDN, quindi confrontate con sei soglie spaziate tra loro di 3 dB. Dette soglie sono assimilabili a quelle presenti nell'apparato ricevente ISDN e corrispondono ad attenuazioni del collegamento comprese tra i 22 ed i 37 dB. Il superamento di dette soglie da parte del rumore campionato è pertanto in relazione con il tasso di errore che si manifesterebbe qualora sulla stessa coppia fosse presente il sistema trasmissivo considerato. In questo modo la stima della qualità della linea è significativa dal punto di vista



Figura 1a Strumento di misura dei disturbi impulsivi

(1) Per diafonia si intende il trasferimento di potenza da un circuito di comunicazione ad un altro a causa di accoppiamento elettromagnetico; essa si manifesta con un doppio effetto: il primo risentito dall'utente che ha il proprio ricevitore vicino alla sorgente del disturbo (paradiafonia) ed il secondo da quello collegato all'estremo opposto del circuito (telediafonia).

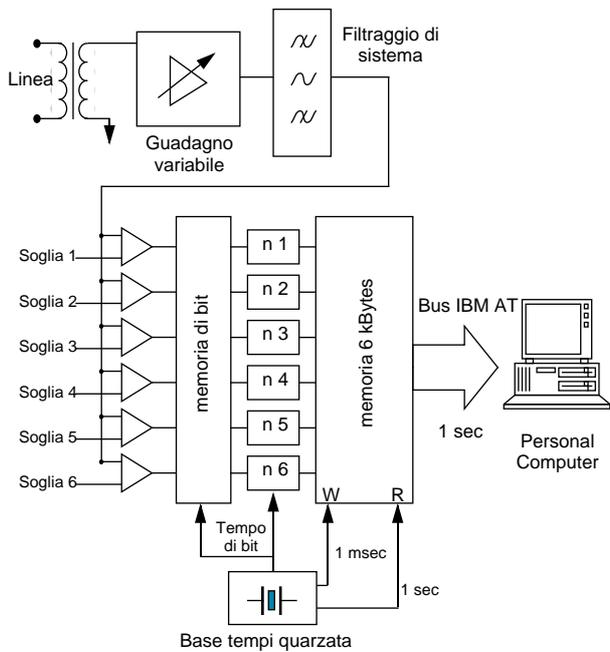


Figura 1b Schema a blocchi dello strumento di misura dei disturbi impulsivi

quantitativo, nei termini di stima delle prestazioni; essa risulta inoltre immediata ed è confrontabile con la Raccomandazione G.821 che indica un degrado massimo ammesso per la rete di distribuzione pari a:

- minuti degradati: < 1,5%
- secondi affetti da errore: < 1,2%
- secondi severamente affetti da errore: < 0,015%

Il dispositivo è costituito da un'unità di interfaccia, da una scheda di elaborazione che si inserisce in un personal computer e da un programma di elaborazione e di gestione. Le misure sono effettuate collegando lo strumento alle coppie attestata al permutatore e terminando l'estremo lontano delle stesse con una resistenza di 150 Ohm. La durata delle misure è rilevante ai fini d'ottenere risultati significativi; in base all'esperienza pregressa è necessario che esse si protraggano per almeno due giorni lavorativi [1].

Per le misure di diafonia ci si è indirizzati verso strumenti commerciali, individuando un sistema composto da tre unità portatili (due trasmettitori collegati tra loro via modem ed un ricevitore) in grado di caratterizzare contemporaneamente ed in modo semiautomatico sino a 25 coppie. Detto sistema, denominato "LEA 7662 - Automatic ISDN multi-pair qualifier", è prodotto dalla filiale francese della società americana CXR (figg. 2a e 2b).

Il sistema è in grado di effettuare le seguenti misure:

- attenuazione d'inserzione a 40 kHz;
- paradiafonia e telediafonia;
- resistenza in corrente continua di ciascun collegamento;
- isolamento tra i due conduttori di una coppia e tra ciascun suo conduttore e la terra.

La tecnica di misura utilizzata consiste nell'inviare

sulle n-1 coppie in misura una sequenza pseudocasuale con la codifica di linea utilizzata dall'accesso base ISDN e nel valutare il segnale raccolto sull'ennesima.

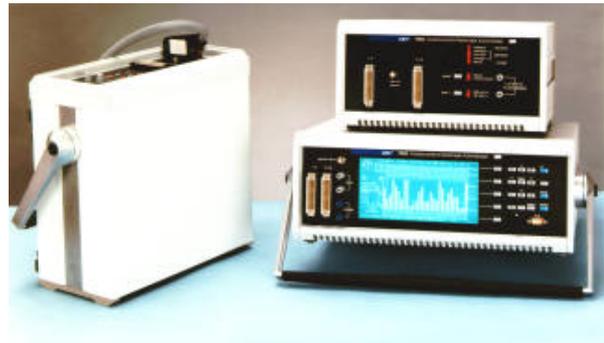
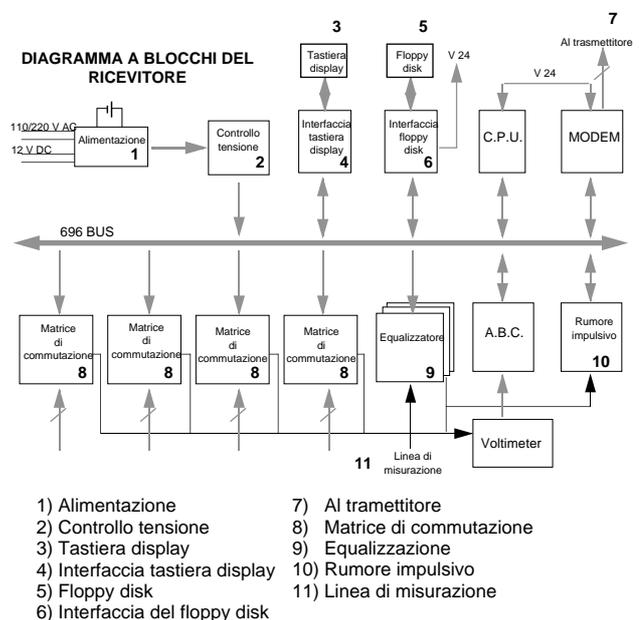
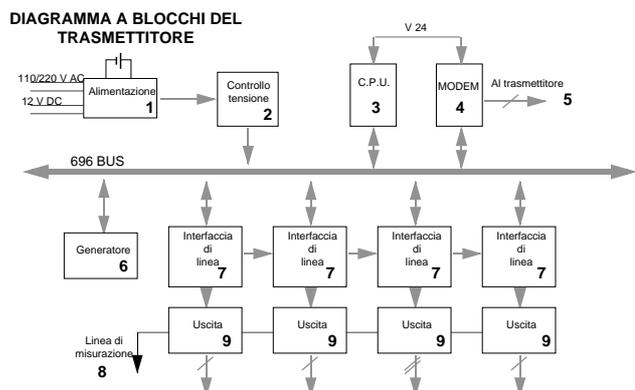


Figura 2a Strumento di misura LEA 7662 della CXR



- 1) Alimentazione
- 2) Controllo tensione
- 3) Tastiera display
- 4) Interfaccia tastiera display
- 5) Floppy disk
- 6) Interfaccia del floppy disk
- 7) Al trasmettitore
- 8) Matrice di commutazione
- 9) Equalizzazione
- 10) Rumore impulsivo
- 11) Linea di misurazione



- 1) Alimentazione
- 2) Controllo tensione
- 3) CPU
- 4) Modem
- 5) Al ricevitore
- 6) Generatore
- 7) Interfaccia di linea
- 8) Linea di misurazione
- 9) Uscite

Figura 2b Schema a blocchi dello strumento LEA 7662

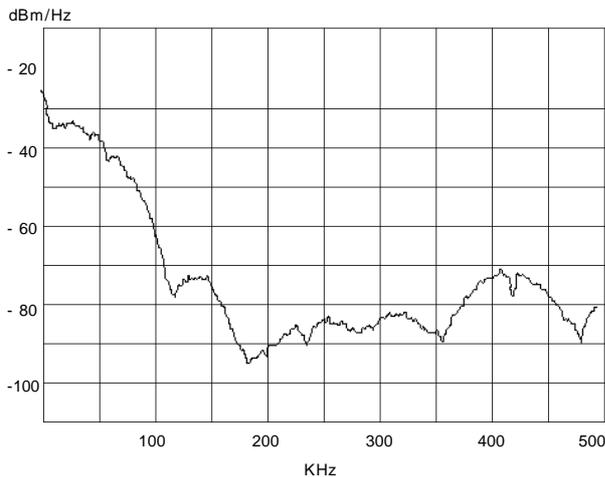


Figura 3 Andamento tipico dello spettro di densità di potenza per il segnale dell'accesso base ISDN

La fig. 3 mostra l'andamento tipico dello spettro di densità di potenza del segnale dell'accesso base ISDN. Nel caso in cui si vogliono individuare separatamente i contributi delle coppie disturbanti è prevista anche la possibilità d'inviare la predetta sequenza su una sola coppia. La predetta tecnica, utilizzando come disturbanti segnali di linea analoghi a quello implementato dall'accesso base, è più veloce rispetto ad un'analisi frequenziale di tipo tradizionale. I tempi di misura variano infatti da venti minuti circa nel primo caso a due ore circa quando si valuta separatamente il contributo di ciascuna coppia rispetto a tutte le altre.

L'esame delle procedure di utilizzo degli strumenti CXR ha messo sin dall'inizio in evidenza la necessità di un apposito addestramento del personale delle Direzioni Regionali (DR) che li avrebbe dovuti utilizzare. Questa fase ha anche consentito di recepire dal personale operativo SIP indicazioni e suggerimenti utili sotto il profilo metodologico ed organizzativo per la successiva fase di misura. I tre esemplari di detto sistema acquisiti da SIP hanno permesso di iniziare la prima campagna di misure nell'agosto del '91.

## 2.4 Scelta del campione di misura

Premesso che la significatività di ogni campagna di caratterizzazione dipende essenzialmente dalle caratteristiche del campione prescelto, nel senso che è fondamentale un'accorta scelta delle tipologie di rete da caratterizzare, volendo minimizzare il numero delle misure ma nel contempo ottenere informazioni generalizzabili con sufficiente confidenza, per quanto riguarda il rumore impulsivo le coppie da misurare sono state individuate tra quelle prossime a coppie portanti servizi potenzialmente disturbanti l'accesso base ISDN (in particolare filodiffusione, teletax a 12 kHz, TD, etc.); recentemente sono state sottoposte ad indagine, ma non ancora ad elaborazione, anche coppie per le quali sono stati rilevati valori critici di diafonia.

Per la diafonia si è invece adottata una scelta guidata, fomendo alle DR indicazioni per l'individuazione delle coppie da sottoporre a misura, al fine di interessare diverse tipologie di rete. Si sono in particolare suddivise le coppie da misurare:

- secondo la loro ubicazione (in zone centrali di policentriche, in cinture di policentriche ed in centri urbani minori);
- in base al Capitolato SIP del cavo di appartenenza.

Sono inoltre state considerate anche coppie con derivazioni in parallelo, al fine di valutare il peggioramento introdotto sulla diafonia dalla presenza delle derivazioni stesse. Nella scelta della lunghezza delle coppie sono state privilegiate le condizioni limite di funzionamento del sistema trasmissivo (ciò risulta evidente nel grafico di fig. 4, in cui è riportata la distribuzione cumulativa di una stima delle lunghezze [3] della rete italiana e quella del campione sottoposto a misura). La posizione nel cavo delle coppie da misurare è stata individuata in modo da evidenziare i casi in cui i fenomeni di para e tele diafonia sono fattori limitanti per un elevato riempimento; le coppie da misurare contemporaneamente sono pertanto state scelte all'interno di uno stesso settore del cavo (ipotizzando trascurabile la diafonia tra settori diversi) ed il più possibile vicine tra loro.

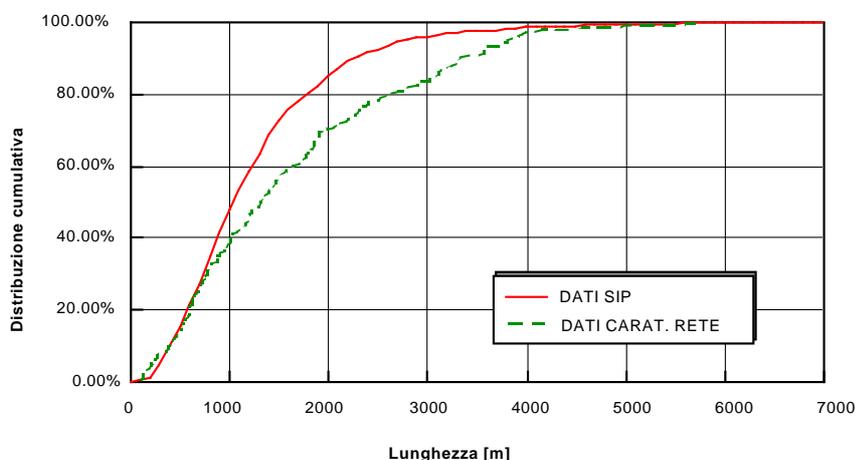


Figura 4 Confronto tra la distribuzione cumulativa delle lunghezze delle coppie della rete di distribuzione italiana e quella del campione di coppie misurato nel '92

L'entità del campione della campagna '91 [4], sulla base delle risorse disponibili in DR, era stato stimato per la diafonia in circa 3500 coppie e per il rumore impulsivo in 50 coppie appartenenti alle città interessate dal servizio pilota ISDN. Per quella '92÷'93 [5] SIP ha deciso di estendere il campione all'intera rete nazionale. Per questa seconda campagna alle DR sono state indicate le percentuali di coppie da scegliere nelle reti policentriche [6], nelle zone periferiche di tali policentriche e nelle reti dei piccoli centri urbani, come pure le percentuali per i diversi tipi di cavo-posa (posa aerea o sotterranea, isolamento in aria o plastico), al fine d'ottenere un campione significativo per ciascuna tipologia di rete. La scelta definitiva delle coppie è stata effettuata congiuntamente da SIP DG e da ciascuna DR in modo da tenere conto delle diverse realtà territoriali. Considerato che nei primi due anni di campagne il 67% delle coppie misurate apparteneva alla rete primaria, nel '93 è stato indicato al personale delle DR di concentrare le misure sulla rete secondaria e su quella complessiva (primaria + secondaria).

Per ottenere dalle misure il massimo delle informazioni è stata infine identificata una serie di parametri atti a descrivere in maniera significativa l'ambiente di misura e la topologia del collegamento in esame. Questo aspetto ha assunto un ruolo fondamentale per il raggiungimento degli scopi preposti, in quanto ha consentito di correlare i dati di misura con quelli cartografici; per raccogliere dette informazioni è stato sviluppato un software [7] utile agli operatori nell'inserimento nel database dei dati descrittivi necessari.

### 3. Campagne di misura

Le misure sono state eseguite dal personale delle DR con la supervisione della DG; l'impegno complessivo per il personale delle DR è stato di circa 5 anni-uomo (a.u.) nel '91, di 4 a.u. nel '92 ed è stimato in circa 16 a.u. per il '93÷'94.

La fig. 5 illustra una tipica postazione di misura della diafonia sulla rete secondaria; il ricevitore (che funge da unità master) ed il trasmettitore locale, entrambi situati su auto sociale, sono collegati alle coppie dal lato armadio; il trasmettitore remoto è collegato all'altro estremo (cassetta di distribuzione).

Le campagne di misura finora svolte hanno consentito di caratterizzare, a fine '93, 9275 coppie per quanto riguarda la diafonia valutata nel campo di frequenze dell'accesso base, 1502 nel campo di frequenze dell'accesso primario e 338 per il rumore impulsivo.

In tabella 1 è riportata la ripartizione delle coppie misurate per quanto riguarda la diafonia misurata nel campo di frequenze dell'accesso base.



Figura 5 Tipica postazione di misura in campo

## 4. Risultati di rilievo

Nel seguito sono presentati alcuni dei risultati ottenuti dalle campagne di misura '91 e '92, in particolare quelli più rilevanti ai fini dell'introduzione in rete dell'accesso base ISDN, ed alcune indicazioni significative sul comportamento delle diverse tipologie di cavi presenti in rete. Prima di presentare detti risultati è tuttavia opportuno sottolineare le seguenti ulteriori considerazioni in merito al sistema trasmissivo utilizzato per l'accesso base ISDN.

### 4.1 Limiti prestazionali del sistema trasmissivo

L'Appendice II alla Raccomandazione ITU G.621 relativa al sistema trasmissivo con codice di linea 2B1Q<sup>(2)</sup> prescrive per l'attenuazione del collegamento, alla frequenza di 40 kHz, un limite massimo di 40 dB per un corretto funzionamento del sistema stesso (tasso d'errore inferiore a 10<sup>-7</sup>). Detto limite è in relazione con le caratteristiche della rete di distribuzione statunitense che ha collegamenti di lunghezza mediamente maggiore di quelli europei. L'ETSI, nella prospettiva di ridurre il costo dei sistemi trasmissivi, ha riveduto il predetto limite specificatamente per i paesi europei, indicando in

Rete primaria	Rete secondaria	Rete complessiva
5501	1918	1856
59,3%	20,7%	20%

Tabella 1 Ripartizione delle coppie per le diverse tipologie di rete in riferimento alle misure di diafonia

(2) Trattasi di un codice 4-AM, che associa un simbolo quaternario ad ogni due bit di informazione.

36 dB di attenuazione il valore che garantisce ancora il funzionamento dei sistemi con codice di linea 2B1Q ed in 32 dB quello per i sistemi con codice 4B3T. Alcune prove condotte nei laboratori dello CSELT hanno confermato che, in presenza di attenuazione di linea di 32 dB, i sistemi trasmissivi utilizzando il codice 4B3T presentano un tasso d'errore inferiore a  $10^{-7}$ , in accordo con le Norme ETSI.

La presenza di derivazioni in parallelo alla coppia comporta riflessioni con conseguente incremento dell'eco, dell'attenuazione e della distorsione (interferenza intersimbolica) sul segnale utile; secondo la normativa internazionale, confermata da prove di laboratorio, il sistema ne tollera fino a 2 (in questo caso vi è una riduzione del 20% circa della massima attenuazione consentita). Il campione di coppie utilizzato nelle misure eseguite nel '91-'92 aveva una derivazione in parallelo nel 4% dei casi e due derivazioni nello 0.5% dei casi. Non sono state prese in considerazione coppie con più di due derivazioni.

Per ragioni di sicurezza del personale la tensione massima di telealimentazione è attualmente fissata in 70 V ( $68 \pm 2$  V) all'uscita della centrale, con la limitazione della corrente a 50 mA. Con questi valori, considerando che in condizioni di emergenza l'NT1 (Network Termination 1, cioè la postazione di utente) può assorbire fino a 1100 mW dall'interfaccia di rete, ne consegue che la resistenza di linea deve essere inferiore a 1000 Ohm. Come si desume dalla fig. 6, il 98 % dei collegamenti misurati è risultato ben al di sotto di questo valore, con una lunghezza massima degli stessi intorno ai 4000 m. Occorre ricordare che nella scelta della lunghezza delle coppie, come già detto al punto 2.4, sono state privilegiate le condizioni limite di funzionamento del sistema trasmissivo.

Prove di laboratorio condotte in CSELT hanno mostrato che deve essere garantito un rapporto S/N

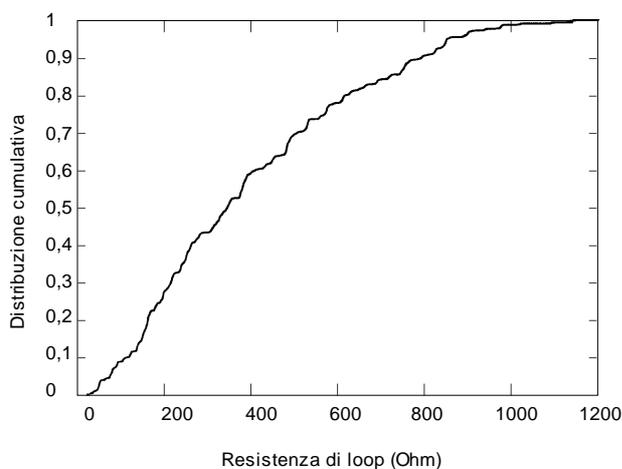


Figura 6 Distribuzione cumulativa della resistenza di loop: la maggior parte dei collegamenti esaminati (98%) è inferiore al limite dei 1000 Ohm

(rumore di diafonia) di almeno 25 dB per poter assicurare un funzionamento del sistema con tasso d'errore migliore di  $10^{-7}$ . Questa indicazione, associata ai risultati di altre misure in laboratorio, ha permesso di definire un'area di operatività su un diagramma attenuazione di paradiafonia/attenuazione di linea (nel seguito indicata con l'acronimo PSL/DLL - Power Sum Loss/Digital Line Loss), nella quale le prestazioni del sistema trasmissivo rispettano i limiti imposti dalla Raccomandazione G.821. Questa area è riportata in fig. 9 per permettere di valutare la qualità della rete di distribuzione in rapporto alla diafonia.

#### 4.2 Risultati riguardanti la diafonia: metodo del Power Sum Loss

L'obiettivo fondamentale del metodo in oggetto è quello di analizzare le prestazioni delle coppie della rete di distribuzione in funzione dell'attenuazione di linea e di quella di diafonia, nell'ipotesi di un fattore di riempimento del cavo pari al 100% di coppie con accessi base ISDN, prescindendo dai disturbi impulsivi. Nella definizione della PSL si immagina di avere un intero settore (100 coppie) che trasporta accessi base ISDN; in questa condizione ogni singola coppia può quindi essere disturbata da tutte le altre 99, assimilabili ad un'unica coppia disturbante con un valore di attenuazione di diafonia per definizione pari alla PSL, come schematizzato in fig. 7. Il segnale disturbante presente su una singola coppia per effetto delle altre è caratterizzato da uno spettro di potenza analogo a quello del segnale utile ISDN (v. fig. 3), ma con distribuzione gaussiana delle ampiezze. Per maggiori dettagli in merito al calcolo della PSL si può far riferimento alla bibliografia [8].

Poiché le misure di paradiafonia eseguite con la strumentazione CXR/LEA7662 sono relative ad un numero N di coppie molto più limitato rispetto a quello di un settore intero (esso è infatti compreso tra 6-7 coppie fino ad un massimo di 25), è stato necessario ricorrere ad una elaborazione per ricavare il valore della PSL per ciascuna coppia in esame. Poiché lo scarto di telediafonia aumenta di 3 dB per ogni raddoppio di

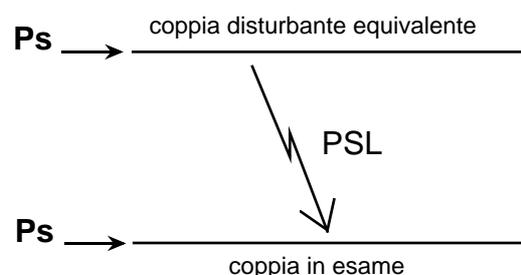


Figura 7 Definizione di Power Sum Loss o PSL

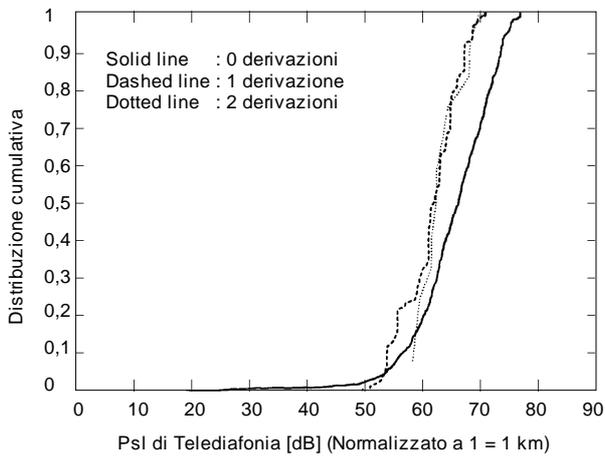


Figura 8 Distribuzione cumulativa dello scarto di telediafonia (PSL) normalizzato a 1 km ed alla frequenza di 40 kHz

lunghezza del collegamento, per avere una rappresentazione omogenea, che permettesse il confronto di coppie con diverse lunghezze (v. fig. 4 per la statistica delle lunghezze delle coppie misurate), il PSL per la telediafonia è stato normalizzato ad 1 km. La fig. 8 riporta l'andamento della distribuzione cumulativa dei valori normalizzati della PSL di telediafonia, distinguendo i casi in relazione al numero di derivazioni; è particolarmente evidente come la presenza delle derivazioni comporti per la telediafonia un peggioramento valutabile in circa 5÷6 dB, il che può essere spiegato dal fatto che le derivazioni introducono dei tratti ulteriori di accoppiamento lungo il collegamento.

Dalla predetta figura si può dedurre che circa il 50% delle coppie ha un valore di telediafonia, alla frequenza di 40 kHz, migliore di 60 dB.

Considerando ora il fenomeno della paradiafonia, che è il fattore più critico in fatto di limitazione della lunghezza massima di tratta, è stato ripetuto il calcolo della PSL, senza normalizzarla in funzione della lunghezza del collegamento, in quanto essa compare come attenuazione (DLL in dB in fig. 9) sull'asse verticale. I risultati della campagna '92 sono riportati in fig. 9, ove ogni punto è rappresentativo del valore della PSL di paradiafonia di una coppia e dell'attenuazione della coppia stessa; nella medesima figura è pure riportata la maschera (v. linea continua) che indica i limiti di funzionamento del sistema trasmissivo. Detta maschera è anche stata ridotta di 5 dB (curva a) per tener conto dell'influenza della telediafonia e di un ulteriore margine di 2 dB (curva b) per tener conto dei fenomeni di accoppiamento di diafonia particolarmente sfavorevoli che in una percentuale ridotta di casi si possono manifestare tra coppie appartenenti alla stessa quarta(3).

(3) La quarta è costituita da quattro conduttori disposti in quadrato; ad ogni quarta appartengono due circuiti, formati dai conduttori che occupano i vertici opposti di questo quadrato.

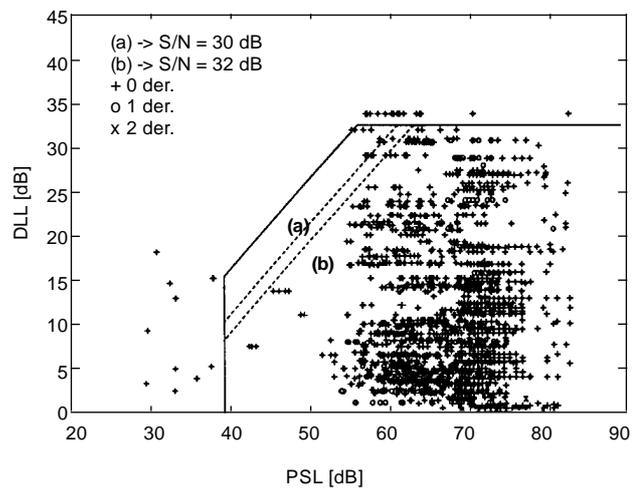


Figura 9 Rappresentazione nel piano PSL/DLL dei risultati delle misure di paradiafonia per l'accesso base ISDN

Anche in questo grafico si sono distinti i risultati a seconda del numero di derivazioni presenti.

La fig. 9 evidenzia che la maggior parte dei collegamenti considerati è all'interno della maschera, il che significa che per quanto concerne la diafonia il comportamento della rete per l'accesso base ISDN risulta più che accettabile. La tab. 2 fornisce un quadro sintetico dei risultati sopraddetti.

La tab. 2 evidenzia come per un rapporto S/N di 32 dB, in assenza di derivazioni, più del 97% delle coppie è in grado di supportare l'accesso base ISDN nella condizione di riempimento totale del settore di un cavo.

Le analisi precedenti sono anche state svolte distinguendo le coppie misurate in base al Capitolo SIP del cavo di appartenenza. Poiché i collegamenti in esame sono risultati in gran parte di tipo misto, l'indagine è stata limitata alla paradiafonia ed a quei collegamenti caratterizzati da una tipologia di cavo omogenea nella tratta uscente dal permutatore; il contributo alla diafonia

	% di punti fuori maschera		
	PARA (curva continua)	PARA+TELE (curva a)	PARA+TELE+2 dB (curva b)
Rapporto S/N di PARA	25 dB	30 dB	32 dB
0 Derivazioni	1.5 %	2.2 %	2.9 %
1 Derivazione	4.4 %	4.9 %	7.6 %
2 Derivazioni	11 %	17.5 %	24 %

Tabella 2 Quadro riassuntivo delle misure di diafonia: è riportata la percentuale di punti che cade al di fuori della maschera di operatività definita sul piano PSL/DLL

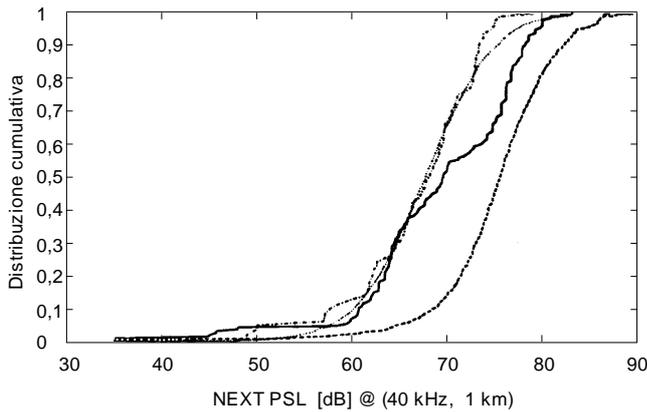


Figura 10 Distribuzione cumulativa dei valori di paradiafonia in rapporto al tipo di cavo (con un fattore di riempimento pari al 100%); i valori sono normalizzati alla lunghezza di 1 km; la linea tratteggiata rappresenta il cavo a Cap. 1240, quella continua il cavo a Cap. 1033, quella puntinata a Cap. 1031 e la linea a tratto e punto a cavi di altri Capitoli

dovuto ai fenomeni di paradiafonia è infatti preponderante nel primo tratto della linea. Nel caso della telediafonia non sarebbe stato possibile eliminare i contributi successivi dovuti a coppie appartenenti a cavi differenti. La fig. 10 permette di rilevare che il cavo con isolamento di tipo plastico (Capitolato 1240), di concezione più recente, ha un comportamento migliore mediamente di 8÷9 dB rispetto a quello con isolamento in aria (Capitolato 1031).

#### 4.3 Risultati riguardanti i disturbi impulsivi

I risultati riportati nel seguito sono stati ottenuti da una prima elaborazione condotta con metodi non totalmente automatizzati [8]; è in fase di predisposizione un database in grado di permettere un'analisi automatica e più dettagliata di tutti i dati raccolti. Detti risultati mostrano che le cause dei disturbi impulsivi tipici dell'ambiente della telefonia, sono legate all'intensità del traffico (v. fig. 11), ma non dipendono da specifici servizi che comportano una occupazione di banda elevata; non è stata infatti rilevata una diretta ed evidente correlazione tra servizi ed il rumore impulsivo. Data la limitatezza del campione a tutt'oggi esaminato (51 coppie) e la mancanza di correlazioni con la diafonia, è al momento possibile formulare solo delle ipotesi che potranno trovare una conferma dall'elaborazione delle misure in corso.

A titolo di esempio sono riportati in dettaglio i risultati relativi alla soglia di 28 mV, rappresentativa del comportamento del sistema trasmissivo con linee che presentano un'attenuazione di circa 31 dB (quasi corrispondente al massimo della portata del sistema trasmissivo attuale, già dichiarata pari a 32 dB per il codice 4B3T). Si è posta particolare attenzione alla

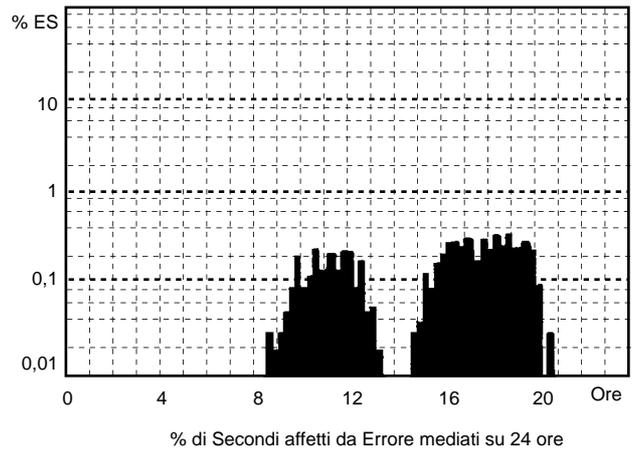


Figura 11 Esempio di andamento medio della percentuale di secondi affetti da errore mediati sulle 24 ore. Si osserva un andamento che rispecchia l'intensità del traffico telefonico con un numero crescente di secondi affetti da errore durante le ore lavorative

statistica del valore medio della percentuale di secondi affetti da errore e alla percentuale di secondi affetti da errore nel quarto d'ora peggiore; quest'ultimo è definito come il quarto d'ora con numero massimo di secondi affetti da errore. I risultati relativi alla soglia di 28 mV ed alle circa 50 coppie misurate sono riportati nella fig. 12.

Dalla fig. 12 si rileva che il 9% delle linee con attenuazione superiore a 31 dB non soddisfa la Raccomandazione G.821 per quanto riguarda i secondi affetti da errore nelle condizioni medie, mentre tale percentuale sale al 54% nei momenti di maggiore traffico, corrispondenti al quarto d'ora peggiore. Tuttavia, per valutare correttamente le statistiche riportate in fig. 12, occorre tenere presente che il

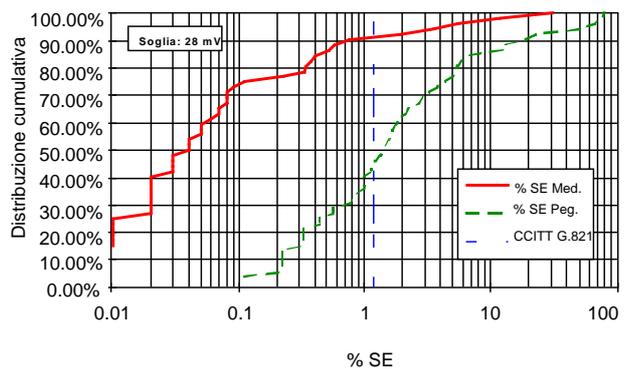


Figura 12 Distribuzione cumulativa della percentuale della media dei secondi affetti da errore e del quarto d'ora peggiore per una soglia di 28 mV (corrisponde ad un'attenuazione di linea di circa 31 dB). I risultati possono essere confrontati con il limite stabilito nella Raccomandazione CCITT G.821 (secondi affetti da errore < 1.2%)

comportamento apparentemente molto critico ivi rilevabile è relativo a tratte decisamente lunghe. Con riferimento alla statistica delle lunghezze del rilegamento d'utente nella rete di distribuzione italiana riportata in fig. 4, l'incidenza di tratte così lunghe è molto bassa (non oltre l'1.2%). In base a questa considerazione, l'impatto sulle prestazioni complessive di rete può essere considerato modesto, pari a circa lo 0.1% nella condizione media e circa lo 0.6% nella condizione peggiore.

Come prima interpretazione delle elaborazioni si può affermare che il fenomeno dei disturbi impulsivi, nella statistica delle linee esaminate, non comporta in media dei degradi consistenti delle prestazioni; sono tuttavia possibili, particolarmente per i collegamenti con elevata attenuazione, degradi momentanei, ma significativi, delle prestazioni in occasione delle ore di punta di traffico.

## 5. Conclusioni

I risultati delle campagne di misura condotte da SIP negli anni '91-'92 confermano la possibilità di utilizzare nella quasi totalità dei casi la rete di distribuzione in rame per la fornitura dell'accesso base ISDN, consentendo così di impiegare ancora e più a fondo l'elevato investimento economico costituito da detta rete.

Per quanto riguarda i problemi legati alla tealeimentazione, il 98% delle coppie misurate rientra infatti ampiamente nei limiti dei sistemi attualmente disponibili, che ammettono una resistenza massima di loop di 1000  $\Omega$  ed un'attenuazione di linea massima di 32 dB a 40 kHz (nel caso del codice 4B3T).

Per quanto concerne invece la diafonia oltre il 95% delle coppie misurate risulta in grado di trasportare i flussi a 160 kbit/s dell'accesso base senza richiedere una selezione delle stesse. Le elaborazioni conclusive (che saranno disponibili entro la seconda parte del 1994) delle misure eseguite nella banda di frequenze dell'accesso base ISDN e quelle delle misure effettuate nella banda di frequenze dell'accesso primario (misure al momento pianificate sino a fine '94), forniranno maggiori indicazioni sul comportamento della rete a tali frequenze e potranno essere utili per predisporre un modello teorico della rete stessa.

## Ringraziamenti

*Gli autori desiderano ringraziare i colleghi R/ETR-SL cavi delle Direzioni Regionali SIP per l'impegno posto nell' eseguire le misure di caratterizzazione e nel superare le difficoltà e gli imprevisti e quelli dello CSELT per l'elaborazione dei risultati delle misure.*

## Bibliografia

- [1] Bertok, E.; Ferro, M.: *Dispositivo per la caratterizzazione dei disturbi impulsivi*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 91.452, 26 settembre 1991.
- [2] Ferro, M.; Magnone, L.; Milani, S.: *Analisi del funzionamento dello strumento Automatic ISDN multi-pair cable qualifier LEA Mod. 7662/1*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 91.482, 11 ottobre 1991.
- [3] Tortia, G.; Ferrero, P.G.: *Caratterizzazione della rete telefonica distrettuale italiana*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 88.033, 26 gennaio 1988.
- [4] Titli, M.: *Caratterizzazione della rete di distribuzione - Attività dei mesi marzo-aprile*. Promemoria PSSI/RS-CCR, n. 91.022, 23 aprile 1991.
- [5] Titli, M.: *Riunione per l'avvio della campagna di misure '92-'93 per la caratterizzazione della rete di distribuzione*. Promemoria R/RS-CC, n. 92.018, 3 luglio 1992.
- [6] Titli, M.; Tofanelli, A.: *Criteri generali di individuazione delle coppie per la campagna di misure '92-'93 di caratterizzazione della rete di distribuzione*. «Nota tecnica CSELT», 93.012, 21 settembre 1993.
- [7] Titli, M.; Vailati, P.: *Manuale del programma RADICA '92*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 92.044, 17 settembre 1992.
- [8] Magnone, L.; Mercinelli, R.; Tofanelli, A.: *Caratterizzazione della rete di distribuzione per il servizio ISDN: dati e risultati della campagna di misura 1991*. «Rapporto Tecnico CSELT», RR 92.452, 9 settembre 1992.

# Global System for Mobile communications (GSM): le caratteristiche e l'applicazione nella rete SIP

M. Giordani, F. Grimaldi, M. Santinelli (\*)

*A partire dal 1982, anno di nascita in ambito CEPT del Comitato Tecnico GSM, SIP ha sempre partecipato in maniera fortemente costruttiva e propositiva a tutte le attività, sia nazionali sia internazionali, connesse con la definizione e lo sviluppo del sistema radiomobile numerico Pan-Europeo.*

*Dalla seconda metà del 1990, a questo importante ed esaltante lavoro di ricerca e standardizzazione si è anche affiancata una intensa attività di progetto, sperimentazione e realizzazione della rete che ha permesso a SIP di aprire il servizio commerciale ad Ottobre 1992 in linea con gli obiettivi e gli impegni fissati a livello internazionale dal MoU/GSM.*

*Oggi, a meno di due anni della data del 1° Ottobre 1992, nonostante le notevoli difficoltà finora incontrate sia in fase di progetto e realizzazione della rete sia in fase di esercizio, difficoltà principalmente dovute alle grandi novità presenti nel sistema, nelle tecnologie utilizzate e negli apparati, la rete GSM realizzata e gestita da SIP è una realtà in evoluzione che, grazie al lavoro ed al contributo continuo di tutte le entità coinvolte, si appresta ad uguagliare e quindi superare il successo ottenuto con la rete ETACS.*

## 1. Introduzione

Le attività impiantistiche relative alla realizzazione di una rete GSM in Italia sono state avviate da SIP approssimativamente dalla seconda metà del 1990 con l'attuazione della cosiddetta "fase sperimentale".

I passi più significativi di questa fase sono stati:

- fine 1990:** installazione a Roma di un primo MSC;
- Luglio 1991:** installazione a Roma della prima stazione radio base;
- Ottobre 1991:** sperimentazione, in occasione del Telecom '91 a Ginevra, delle procedure di Roaming Internazionale utilizzando la stazione radio base di Roma e le stazioni radio base sperimentali messe a disposizione dall'Amministrazione Svizzera.

A partire dai primi mesi del 1992, completata la fase di analisi delle proposte tecnico-economiche, è stata avviata da SIP l'attività impiantistica che, in linea con gli obiettivi fissati in sede internazionale dal MoU/GSM, ha permesso di realizzare la rete con la quale è stato aperto il servizio commerciale nell'Ottobre 1992. A quella data, la rete

radiomobile GSM era in particolare costituita da sette MSC e 256 stazioni radio base (1.434 ricetrasmittitori) ed assicurava il servizio sulle direttrici autostradali e nelle principali città della "T" formata dagli assi Torino-Milano-Venezia e Milano-Bologna-Firenza-Roma-Napoli. Sempre nel 1992, il servizio era quindi esteso anche alla regione Friuli Venezia Giulia con la copertura dell'asse Venezia-Udine-Tarvisio.

A fine 1992 erano complessivamente attive 341 stazioni radio base per un totale di 903 celle (1.806 ricetrasmittitori).

Nel corso del 1993 la rete è stata ulteriormente estesa, sia nella capacità sia nella copertura, ottenendo a fine anno una struttura costituita da 12 MSC e 855 stazioni radio base (1.932 celle) equipaggiate con 3.458 ricetrasmittitori. A quella stessa data, la copertura della rete GSM era pari al 40 % del territorio nazionale ovvero a circa il 75 % dell'area con popolazione residente.

Sebbene l'obiettivo principale per l'anno in corso sia quello di conseguire in linea di massima lo stesso livello di servizio e la stessa copertura della rete ETACS, la reale evoluzione della rete sarà strettamente correlata sia all'incremento di utenza e traffico previsti, sia agli obiettivi strategici di qualità e copertura definiti in ambito Aziendale.

Congruentemente con l'assegnazione di banda finora effettuata dal Ministero delle Poste e delle Telecomunicazioni, la rete GSM sviluppata da SIP utilizza oggi solo 24 canali radio (dal canale radio GSM n. 65 al canale radio GSM n. 88).

---

(\*) ing. Marcello Giordani, ing. Franco Grimaldi, ing. Maurizio Santinelli -SIP DG- Roma

## 2. La struttura di copertura radio

Com'è noto il successo di una rete radiomobile dipende soprattutto dalla rapidità con cui sono soddisfatte le esigenze di servizio espresse dagli utenti.

Nel caso della rete GSM sviluppata da SIP, considerando l'elevato grado di servizio raggiunto oggi dalla rete ETACS, è evidente che per "attirare" utenti nel nuovo sistema occorre fornire prestazioni perlomeno analoghe a quelle oggi disponibili nella rete analogica e questo è soprattutto vero per quanto riguarda l'estensione ed il grado della copertura.

L'esigenza quindi di estendere al massimo la copertura radio della rete GSM in un tempo relativamente breve, cercando al tempo stesso di uguagliare e/o superare le prestazioni qualitative presenti nella rete ETACS, è stata sempre considerata con la massima attenzione nella definizione dei programmi relativi alla rete radiomobile numerica.

Oltre a ciò, l'avvento sulla scena Italiana del secondo Gestore radiomobile, ovvero della concorrenza, modificando pesantemente le condizioni di riferimento ha reso sempre più importante e strategico il soddisfacimento in maniera mirata dell'obiettivo sopra esposto. Ciò ha comportato in molti casi la necessità di rimodellare le politiche di sviluppo al fine di ottenere, in tempi estremamente contenuti, una struttura di rete fortemente competitiva soprattutto in quelle aree che risultano essere caratterizzate da una elevata valenza strategica e di mercato.

Nei due paragrafi che seguono saranno brevemente descritte le scelte ed i criteri adottati da SIP per il progetto e per la realizzazione della copertura radio.

### 2.1 Criteri di progetto utilizzati per la definizione e la pianificazione della rete di copertura

Le caratteristiche tecniche del sistema GSM sono state specificate con l'obiettivo primario di avere a disposizione un sistema radiomobile in grado di gestire una elevata capacità di utenza.

Per raggiungere questo obiettivo, nelle fasi di studio e di definizione delle specifiche sono state particolarmente curati tutti quegli aspetti tecnici e funzionali connessi sia con la possibilità di utilizzare in rete "cluster di copertura" aventi dimensioni limitate (ovvero elevato riutilizzo frequenziale) sia la possibilità di realizzare celle di copertura aventi raggi di dimensioni fortemente ridotte (circa 100 - 200 metri).

Come noto il fattore che maggiormente incide sulla possibilità di utilizzare "cluster di copertura" di dimensioni ridotte è la **resistenza** del sistema radio all'interferenza (sia cocanale sia da canale adiacente) ovvero il rapporto minimo **Segnale Utile/Segnale Interferente** ( $C/I_{min}$ ) che deve essere garantito nella struttura di copertura per ottenere un prefissato livello di qualità.

Le caratteristiche radioelettriche adottate nel sistema GSM sono tali per cui la rete radio è di fatto in grado di operare con valori di  $C/I_{min}$  pari a circa 9 dB (invece dei tipici 18-20 dB necessari per i sistemi analogici).

Grazie a questa capacità di resistere ai segnali interferenti, considerando anche altre funzioni previste nel sistema, quali ad esempio il **Controllo Dinamico della Potenza Trasmessa, la funzione di Trasmissione Discontinua (DTX), il Frequency Hopping (FH)**, ecc, con il sistema GSM è di fatto possibile pianificare la rete utilizzando cluster di copertura a 9 celle del tipo 3 x 3 (tre siti ognuno con tre celle direttive). E' chiaramente evidente come questa struttura di copertura risulti essere molto più efficiente di quella ad esempio utilizzata nella rete ETACS in cui la dimensione del cluster è pari a 21 (7 x 3).

Sebbene le suddette funzioni di sistema, essenziali per poter realizzare cluster di copertura a 9 celle, siano considerate **obbligatorie** per i **terminali mobili**, esse risultano essere solo **opzionali** per gli **appareati di rete**.

Come conseguenza di questo fatto e della complessità del sistema GSM, ne deriva che alcune delle funzioni sopra menzionate non sono ancora disponibili negli apparati installati in rete ovvero, qualora disponibili, non sono state ancora completamente validate.

In tale contesto, per la pianificazione della propria rete, SIP è stata di fatto costretta ad utilizzare una struttura di copertura basata su cluster a 12 celle del tipo 4 x 3 (quattro siti ognuno con tre celle direttive) che è meno critica dal punto di vista della gestione interferenziale. Chiaramente questa struttura di copertura, qualora comparata con quella a 9 celle, risulta però essere meno efficiente.

L'utilizzo in rete di cluster di copertura a 9 celle (3 x 3) è stato quindi posticipato all'istante in cui, in funzione dello sviluppo della utenza e del traffico, sarà necessario adeguare la struttura di copertura, globalmente o in parte, per renderla più efficiente nell'uso delle frequenze. Chiaramente per poter fare ciò è necessaria la presenza negli impianti delle funzioni sopra dette. Allo stato attuale degli sviluppi e delle verifiche è previsto che tali funzioni siano operative in tutti gli impianti della rete nei primi mesi del 1995.

Oltre alla scelta sopra detta, relativa alla dimensione del cluster di copertura, per il progetto della rete GSM sono stati adottati i seguenti criteri generali:

- 1 il numero di canali fonici installati nelle varie celle della rete è dimensionato in funzione del traffico offerto considerando un grado di perdita medio di progetto pari al 2%. Oltre a ciò, per questioni di affidabilità ed indipendentemente dalle necessità derivanti dal traffico offerto, ogni cella di copertura sarà tipicamente equipaggiata, a regime, con almeno due portanti radio (ridondanza dei canali di segnalazione comune).
- 2 L'area di servizio è definita esclusivamente con riferimento alle seguenti due classi di terminali:  
terminali "Hand-Held" di classe 4 (2 Watt)  
terminali "Veicolari" di classe 2 (8 Watt).

Come per la rete ETACS, a regime, la copertura per i

terminali "Hand-Held" sarà garantita a livello "outdoor" in tutti i centri abitativi con più di 20.000 abitanti. Per le grandi Aree Metropolitane (Roma, Milano, ecc.) sono stati comunque avviati progetti "ad hoc" mirati ad incrementare e migliorare anche il livello di copertura "indoor".

I valori limite di campo elettrico utilizzati da SIP in fase di progetto per la definizione delle aree di copertura delle due reti radiomobili a 900 MHz sono riportati nella tab. 1. Nella tabella i valori limite relativi agli apparati "Hand-Held" si riferiscono alla copertura "outdoor".

- 3 A regime, la rete GSM avrà una copertura radio a livello nazionale almeno equivalente a quella oggi disponibile nella rete ETACS.

Poiché i vincoli più pesanti da superare per realizzare l'obiettivo sopra detto derivano principalmente dall'enorme difficoltà di reperire i siti per le stazioni radio base ovvero nel realizzare nuovi sistemi radianti nei siti già utilizzati per la rete ETACS, per il progetto e la realizzazione della rete GSM si farà in linea di massima riferimento all'utilizzo delle stesse stazioni radio base e degli stessi sistemi radianti della rete ETACS.

Nell'effettuare il progetto radio della rete GSM, in particolare si cercherà di utilizzare tutte quelle stazioni della rete ETACS che, in linea con le esigenze di copertura e di capacità richiesta, non creino però problemi di compatibilità con le caratteristiche tecniche del sistema (ad esempio non saranno utilizzate le stazioni radio che, essendo installate in siti posti in posizione orografica molto elevata, sono caratterizzate da un'area di copertura fortemente estesa, maggiore di 35 km, e che quindi genererebbero sia problemi di scavalco, sia problemi di accesso e di interferenza).

Alle stazioni radio base della rete ETACS saranno altresì affiancate tutta una serie di nuove realizzazioni (equipaggiate esclusivamente con apparati GSM) mirate soprattutto al superamento dei limiti di copertura derivanti principalmente dalla differenza esistente tra la sensibilità degli apparati GSM e degli apparati ETACS (vedere a titolo di esempio i limiti di campo elettrico riportati nella tab. 1).

## 2.2 Il Sottosistema Radio (BSS)

Per la realizzazione della struttura radio di copertura sono oggi utilizzati da SIP due diversi Sottosistemi Radio (BSS) che si differenziano principalmente per la capacità della logica di controllo delle stazioni radio base (Base Station Controller, BSC).

A seconda della configurazione di impianto realizzata e della fornitura, le celle di copertura (BTS) sono in particolare interconnesse o a BSC di "elevata capacità", in grado cioè di controllare migliaia di canali di traffico ovvero centinaia di celle, o a BSC di "media capacità" in grado cioè di controllare centinaia di canali di traffico ovvero decine di celle.

I Sottosistemi Radio (BSS) di "elevata capacità", sono costituiti da BSC, forniti dalla Ericsson, che controllano e gestiscono, tramite l'utilizzo di una

	AREA URBANA		AREA EXTRAURBANA	
	ETACS	GSM	ETACS	GSM
Hand - Held (classe 4)	47 dB $\mu$ V/m	54 dB $\mu$ V/m	44 dB $\mu$ V/m	49 dB $\mu$ V/m
Veicolare (classe 2)	40 dB $\mu$ V/m	44 dB $\mu$ V/m	35 dB $\mu$ V/m	41 dB $\mu$ V/m

Tabella 1 Valori minimi del campo elettrico utilizzati in fase di progetto per la definizione delle aree di copertura nelle reti radiomobili SIP

interfaccia "Abis" proprietaria, le BTS prodotte dalla stessa Ericsson ovvero dalla Italtel. Nella rete SIP le BTS sviluppate da Italtel sono inoltre fornite ed installate anche dalla società Alcatel/Telettra.

Il BSC prodotto dalla Ericsson si basa sulla tecnologia AXE ed utilizza macchine simili a quelle già impiegate nelle centrali di commutazione radiomobile.

Nelle configurazioni di impianto finora realizzate, il BSC di elevata capacità è di norma allocato nello stesso sito in cui è installata la centrale di commutazione radiomobile a cui è connesso; inoltre, essendo questo elemento caratterizzato da una elevatissima capacità elaborativa (le attuali macchine sono in grado di controllare circa 500 portanti radio equipaggiate con canali "full rate"), ad un MSC è tipicamente interconnesso un solo BSC (per motivi logistici e per semplificare i futuri sviluppi di rete a questa regola fanno oggi eccezione le sole installazioni relative agli MSC di Roma e Milano).

I Sottosistemi Radio (BSS) di "media capacità", sono oggi forniti da un Consorzio costituito da Marconi/Ote/Siemens.

Allo stato attuale degli sviluppi tecnologici, ovvero con riferimento agli apparati finora installati, il suddetto BSS utilizza un BSC che è caratterizzato da una capacità elaborativa tale da poter gestire 60 portanti radio "full rate".

In considerazione della notevole compattezza del BSC sviluppato dal Consorzio Marconi/Ote/Siemens, in tutti gli impianti finora realizzati, utilizzando gli apparati forniti dal suddetto Consorzio, il BSC è sempre co-locato nello stesso sito in cui sono installati i BTS controllati.

## 3. La struttura del Sottosistema di Rete (NSS)

La struttura della rete GSM sviluppata da SIP è organizzata su due livelli gerarchici:

- 1° livello gerarchico: accesso;
- 2° livello gerarchico: transito.

Il primo livello, ossia quello di accesso, è costituito dai nodi MSC che sovrintendono alla gestione della copertura e che quindi sono interconnessi agli impianti BSS. Il secondo livello, ossia quello di transito, è costituito invece dagli impianti che permettono di connettere tutti gli MSC tra di loro sia per quanto

riguarda la fonia sia per quanto riguarda la segnalazione.

Con riferimento all'attuale situazione impiantistica (Aprile 1994), la rete è in particolare composta da tre "centri stella", che sono localizzati rispettivamente nelle città di Milano, Roma e Napoli (questi impianti coincidono peraltro con gli MSC che svolgono le funzioni di primo livello) e da altri nove MSC, posti rispettivamente a Torino, Bologna, Venezia, Genova, Firenze, Ancona, Cagliari, Bari e Palermo, che hanno solo funzioni di primo livello (accesso). Ognuno di quest'ultimi MSC è interconnesso con i tre impianti di livello superiore.

Oltre alla classificazione già detta, i dodici nodi di cui sopra sono funzionalmente suddivisi in due classi:

- nodi MSC aventi funzioni di HLR, VLR e transitio: Milano, Roma e Napoli;
- nodi MSC aventi solo funzione di VLR.

Congruentemente con le regole di instradamento che saranno descritte al paragrafo 4, tutti i nodi della rete sono in grado di effettuare le operazioni di interrogazione verso l'HLR relativo all'utente chiamato. Questa modalità operativa consente di trattare localmente le chiamate che, originate in un'area (sia chiamate originate da rete fissa sia da rete mobile), sono dirette a mobili operanti nella stessa area; ad esempio le chiamate originate dalla rete fissa di Torino, se dirette a mobili che operano nell'area di copertura gestita dall'MSC di Torino, saranno trattate solo da questo MSC.

Ognuno dei tre nodi MSC/HLR è anche equipaggiato con un Centro di Autenticazione (AUC), fornitore delle informazioni necessarie per i processi di autenticazione relativi agli utenti di competenza. I tre sistemi AUC a loro volta sono collegati ad un sistema denominato Master AUC (MAUC) che, allocato a Roma presso il centro che produce i moduli di utente (SIM Card), ha il compito di inviare agli AUC di competenza le informazioni relative ai moduli prodotti (per ogni SIM Card prodotta sono inviati all'AUC competente i parametri IMSI e  $K_i$ ).

Per la realizzazione dei dodici nodi di rete è stato impiegato il sistema AXE prodotto dalla Ericsson.

Indipendentemente dal fatto che il nodo sia utilizzato come MSC/HLR/VLR o come MSC/VLR, ovvero indipendentemente dai BSS controllati, nei dodici nodi è utilizzato un identico insieme di programmi operativi ed applicativi.

L'impiego di un unico prodotto software comporta evidenti vantaggi gestionali e ha peraltro consentito di ridurre notevolmente il tempo necessario per effettuare il collaudo e la messa a punto della rete, dando così la possibilità a SIP di rispettare gli impegni internazionali presi in ambito MoU/GSM.

La potenzialità di indirizzamento di ogni singolo nodo consente di gestire fino a circa 64.000 record HLR e circa 64.000 record VLR. Considerando che, nella attuale struttura di rete, solo tre nodi sono configurati come HLR, esiste oggi una capacità di indirizzamento pari a circa 192.000 utenti.

Questa capacità di indirizzamento in teoria può essere estesa a circa 768.000 utenti qualora si utilizzino, con

funzione di HLR, anche gli ulteriori nove nodi oggi configurati solo come MSC/VLR.

Questa possibilità, parzialmente condizionata dal carico che si genera sugli elaboratori a causa della gestione dei processi di chiamata e tassazione, che nella rete GSM è molto maggiore di quello riscontrabile nelle applicazioni di telefonia fissa o radiomobile ETACS, non sarà però perseguita da SIP in quanto, già nel breve termine, si prevede di utilizzare in rete HLR "Stand-alone", di elevata capacità, che permetteranno di conseguire un elevato grado di affidabilità e flessibilità gestionale.

Tutti i nodi di commutazione sono connessi tra di loro e con la rete fissa utilizzando il Sistema di Segnalazione a Canale Comune CCITT n. 7. In particolare, nella rete è utilizzata la TUP-N (Telephone User Part-Nazionale), per la realizzazione di tutte le connessioni foniche, e la MAP (Mobile Application Part) per la realizzazione di tutte le connessioni non foniche relative al servizio radiomobile quali ad esempio aggiornamento della localizzazione, interrogazione di localizzazione o di instradamento, invio del roaming number, autenticazione, ecc.

### 3.1 Evoluzione della struttura di Rete

In fig. 1 è schematicamente rappresentata l'evoluzione prevista per la rete GSM.

Gli obiettivi di evoluzione della rete possono essere così sintetizzati:

- aumento della capacità della rete in termini di record HLR;
- aumento della flessibilità e della affidabilità;
- elevata integrazione tra rete ETACS e rete GSM.

L'inserimento in rete di quattro HLR stand-alone di elevata capacità (circa 300.000 record ognuno), rendendo disponibile una capacità pari a circa 1.200.000 utenti, predisporrà la rete ad ulteriori sviluppi futuri.

L'accesso agli HLR stand-alone sarà gestito da nodi STP che svolgeranno funzioni di instradamento della segnalazione.

La struttura con nodi STP presenta evidenti vantaggi in termini di struttura di rete in quanto, essendo ogni STP collegato a tutti gli HLR, è sufficiente collegare ogni MSC ad una coppia di STP, utilizzando vie trasmissive diversificate, per garantire il corretto funzionamento della segnalazione anche in caso di "down" di uno dei nodi STP ovvero di una via trasmissiva; in assenza dei nodi STP, per ottenere lo stesso livello di affidabilità, si dovrebbe collegare ciascun MSC a tutti gli HLR utilizzando una doppia via trasmissiva.

L'utilizzo dei nodi STP per collegare gli MSC con gli HLR ha inoltre l'ulteriore vantaggio di poter attrezzare un HLR di riserva che, sebbene utilizzato normalmente come Test Plant, in caso di guasto prolungato di un HLR operativo è inseribile in rete in tempi brevissimi con funzioni di "disaster recovery". In questo caso infatti, è possibile ricaricare sull'HLR di riserva i dati di un HLR di rete in un tempo

dell'ordine di 15 - 20 minuti, procedendo nel contempo a modificare l'istadamento della segnalazione sui soli nodi STP. Tutta l'operazione potrebbe quindi essere conclusa in circa un'ora dal momento in cui si assume la decisione di ricorrere all'HLR di "disasterrecovery". Questa opportunità è di fondamentale importanza specialmente se rapportata al numero di abbonati che andrebbero fuori servizio in caso di guasto prolungato nell'HLR operativo.

Poiché la condivisione degli impianti con la rete ETACS renderà necessario inserire in rete 4 nodi dedicati alla funzione STP (uno per ogni HLR), a tali nodi saranno assegnate anche le funzioni di transito per l'istadamento del traffico di fonia attualmente svolte dai nodi MSC di Roma, Milano e Napoli, che manterranno quindi solo le funzioni di accesso come tutti gli altri MSC.

La struttura evidenziata in fig. 1, peraltro già realizzata per la rete ETACS, individuando nei nodi di transito/STP l'elemento comune tra le due reti, consentirà inoltre una gestione unitaria e semplificata del costante processo di sviluppo del servizio radiomobile. Ciò in quanto si potranno rendere disponibili in entrambe le reti nuovi servizi e/o nuove prestazioni agendo sui soli nodi di transito/STP, senza dover intervenire su tutti gli MSC. Ulteriori applicazioni possono essere previste per servizi di Rete Intelligente, utilizzando i nodi di transito/STP come punti di accesso verso i nodi SSP (Service Switching Point) di rete fissa.

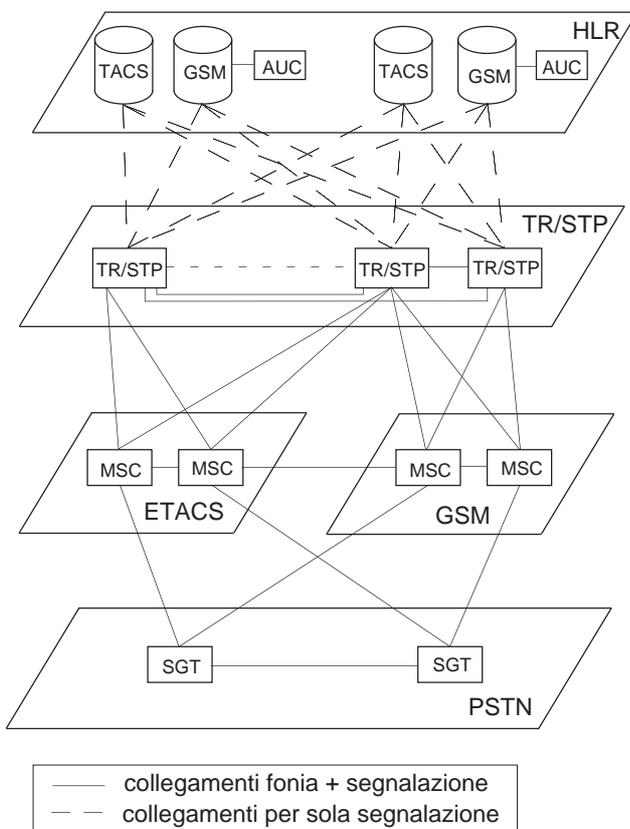


Figura 1 Evoluzione della struttura di rete GSM ed integrazione con la rete ETACS

#### 4. Gli instradamenti

Le modalità di instradamento del traffico, oltre che dipendere dalla struttura di rete, risentono della peculiarità del servizio che nasce come Europeo.

I criteri di base **oggi** adottati per l'istadamento del traffico sono i seguenti:

- il traffico originato da utente fisso nazionale/internazionale e diretto ad utente mobile GSM è offerto, dalla centrale di origine, alla centrale radiomobile (MSC) più vicina. Questo MSC, individuata la localizzazione del mobile chiamato tramite interrogazione dell'HLR, instrada la chiamata fino alla centrale di destinazione interamente sulla rete radiomobile. Questa modalità operativa permette di istradare le chiamate originate da rete fissa e dirette ad utenti GSM col percorso più breve;
- il traffico originato da rete radiomobile GSM e diretto ad utenti della rete telefonica nazionale, è instradato dall'MSC, che ha in carico la connessione, verso il nodo di rete fissa più vicino alla destinazione utilizzando la rete radiomobile. Nel breve, questa modalità di instradamento sarà però modificata ed il traffico originato da rete GSM sarà instradato direttamente su rete fissa; ciò consentirà alla rete radiomobile di non dover più amministrare i piani di numerazione della rete fissa economizzando al tempo stesso sui circuiti interni a lunga distanza;
- il traffico originato da utenti GSM e diretto ad altri utenti della stessa rete radiomobile è instradato completamente all'interno delle rete GSM;
- il traffico originato da utenti GSM e diretto ad utenti della rete TACS (e viceversa), è instradato direttamente verso la rete radiomobile di destinazione che provvederà quindi ad instradarlo secondo le modalità ivi previste;
- il traffico da utente mobile GSM verso utenti internazionali, sia fissi sia mobili, è instradato direttamente su rete fissa che provvede ad inviarlo verso gli ISC.

#### 5. La numerazione

Il piano di numerazione prevede l'utilizzo di tre indicativi distrettuali (335, 338 e 339) che consentono di assegnare circa due milioni e quattrocentomila utenze. L'ampiezza della numerazione consentirà di gestire con tranquillità il servizio senza dover ricorrere ad interventi di ampliamento dei dati di istadamento con il servizio attivo ed a riservare archi di numerazione omogenei a classi di utenze particolari.

Poiché nella rete GSM un utente "Roaming" in un Paese estero deve essere raggiunto, su base chiamata, tramite l'utilizzo di un numero provvisorio istradabile su PSTN, nel piano di numerazione della rete GSM occorre riservare un arco di numerazione per le procedure di Roaming Internazionale. Nella rete SIP sono stati riservati

circa 100 mila numeri dell'indicativo 338, che sono utilizzati sia per le procedure di Roaming Internazionale sopra dette sia per la gestione della mobilità nazionale.

## 6. Il Roaming Internazionale

La funzione di Roaming Internazionale prevista nel sistema, consente agli utenti di una rete GSM di operare nell'ambito dell'area di servizio della rete di un altro Operatore estero utilizzando le risorse messe a disposizione da quest'ultimo (ovvero della rete estera "visitata" Visited-PLMN) come se fosse nell'area di servizio della rete di "casa" (Home-PLMN).

La funzione di Roaming Internazionale richiede che i nodi HLR dell'Operatore radiomobile "Home" siano raggiungibili ed interrogabili dai nodi MSC/VLR dell'Operatore radiomobile "Visitato", ovvero che i nodi HLR e VLR siano connettabili tramite l'impiego del Sistema di Segnalazione a Canale Comune CCITT n. 7 con parte utilizzatrice MAP. Il servizio sovranazionale comporta quindi la necessità di interconnettere le reti dei vari Operatori in modo da permettere lo scambio dei messaggi MAP. Per questo scopo, SIP ed Iritel hanno messo a punto una rete di segnalazione (fig. 2) che consente di instradare i messaggi MAP tra SIP e gli Operatori GSM esteri.

Nel corso del 1994, la rete di segnalazione sarà raddoppiata con l'utilizzo di due ulteriori nodi ISC anche questi localizzati a Roma e a Milano.

Con riferimento alla attuale situazione di Roaming Internazionale, la SIP è oggi (Aprile 1994) connessa ed ha siglato accordi bilaterali con altri 21 Operatori GSM (uno svizzero, due tedeschi, tre svedesi, due norvegesi, due danesi, due finlandesi, due francesi, due inglesi, uno greco, due portoghesi, uno austriaco ed uno lussemburghese).

Nel breve periodo saranno invece estese le prove e gli accordi di Roaming Internazionale anche ai seguenti ulteriori Operatori esteri: Belgacom (Belgio), Eircell (Irlanda), PTT Netherlands (Olanda), Panafon (Grecia), Westel 900 (Ungheria) e Optus (Australia).

L'esperienza acquisita dopo 17 mesi di esercizio consente di affermare che la prestazione è di sicura utilità e convenienza.

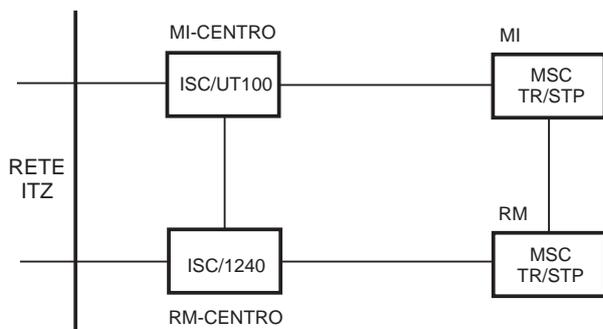


Figura 2 La rete di segnalazione per il Roaming Internazionale

## 7. I servizi

Nel seguito si elencheranno sommariamente alcuni dei servizi più interessanti che, oltre a quelli ISDN e supplementari di utente, saranno sviluppati e resi disponibili nella rete GSM.

### 7.1 I servizi di messaggia breve (Short Message Service)

Il servizio permetterà di trasmettere/ricevere messaggi alfanumerici dal/nel terminale GSM. I messaggi alfanumerici ricevuti oltre ad essere visualizzati dal terminale sono altresì memorizzati nella SIM Card.

Dal punto di vista delle modalità operative e di instradamento il servizio può essere classificato in:

- Short Message Service per messaggi "punto-punto" terminati sul mobile (SMS-MT);
- Short Message Service per messaggi "punto-punto" originati dal mobile (SMS-MO);
- Short Message Service per messaggi "punto-multipunto" (SMS Cell Broadcasting: SMS-CB).

Nel primo caso i messaggi sono inviati da "sorgenti esterne" alla rete radiomobile (fornitori di informazioni e servizio) oppure da altri mobili. Le "sorgenti esterne" sono connesse ad uno o più centri di "memorizzazione ed inoltra" (store and forward) che a loro volta sono interconnessi ai nodi MSC/VLR utilizzando la segnalazione MAP.

Nel secondo caso i messaggi sono inviati dai mobili al centro/i di "memorizzazione ed inoltra" che a sua volta li invierà ad altri mobili od utilizzatori esterni.

Nel terzo caso i messaggi sono invece inviati da una sorgente di informazione (ad esempio un centro servizi) verso una o più celle di copertura. Gli apparati radio presenti nelle celle interessate al messaggio provvedono quindi alla loro diffusione con modalità "broadcasting" (punto-multipunto). Il messaggio può quindi essere ricevuto da tutti i mobili che si trovano ad operare nell'area di copertura delle celle coinvolte dal processo di diffusione.

### 7.2 Il servizio di Segreteria Telefonica

Ogni utente della rete GSM avrà a disposizione la possibilità di attivare/disattivare il servizio di registrazione delle chiamate in arrivo. In particolare il servizio potrà essere attivato/disattivato in maniera indipendente per i seguenti quattro casi:

- utente con terminale spento;
- utente libero non risponde;
- utente occupato;
- utente fuori copertura.

A differenza di quanto avviene oggi nella rete ETACS, il servizio sarà inoltre fornito della prestazione di notifica all'utente della giacenza di uno o più messaggi fonici utilizzando la prestazione di Short Message Service.

Il servizio di segreteria telefonica sarà ovviamente disponibile anche nel caso in cui l'utente sia visitatore di una rete estera. Per evitare che una chiamata, diretta ad un utente Roaming all'estero, sia reinstradata in Italia con lo stesso identificativo di utente, generando in tal caso un "loop", l'attuazione di questa prestazione richiederà l'utilizzazione di un particolare piano di numerazione dedicato alle "caselle di segreteria".

Altre particolarità del servizio saranno:

- consentire l'attivazione/disattivazione della "casella di segreteria" anche nel caso in cui l'utente si trovi Roaming preso un'altra rete;
- consentire in futuro il dispaccio di messaggi fonici, la memorizzazione di messaggi fax ed altre prestazioni che via via si renderanno disponibili.

### 7.3 Doppia SIM

Il servizio consente di inviare chiamate, tramite un unico numero telefonico, ad un utente configurato con due SIM Card diverse di cui una è definita come "principale" mentre l'altra è considerata "secondaria". La chiamata in ingresso alla rete è dapprima instradata ed irradiata utilizzando come riferimento i parametri della SIM "principale" quindi, nel caso in cui non si ottenga risposta, la chiamata è nuovamente instradata e irradiata utilizzando i parametri della SIM "secondaria". Entrambe le SIM Card sono però abilitate ad espletare il traffico uscente indipendentemente.

La documentazione degli addebiti verso gli utenti avverrà con un'unica bolletta in cui però sono distinti i conti relativi alle due SIM Card.

Il servizio sarà compatibile con i servizi di segreteria telefonica, con la chiamata trasferita incondizionata e con la prestazione di Roaming Internazionale che sarà però consentita alla sola SIM Card "principale".

## 8. La tassazione

La tassazione nella rete sviluppata da SIP è realizzata, in accordo a quanto concordato nel MoU/GSM, tramite la documentazione di tutte le chiamate originate che ottengono risposta.

Questo principio vale anche per tutte le chiamate originate dagli utenti stranieri visitatori.

I nodi MSC, in accordo alle specifiche MoU/GSM, realizzano quattro tipi di documentazione (cartellini):

tipo 1: è il cartellino inerente alle chiamate originate da un qualsiasi utente;

tipo 2: è il cartellino originato dalla rete GSM "Home" quando la chiamata entrante è deviata verso un proprio utente che è Roaming presso un'altra rete GSM estera;

tipo 3: è il cartellino generato dalla rete GSM "Visitata" per una chiamata entrante diretta ad un utente visitatore estero;

tipo 4: è il cartellino generato dalla rete GSM quando una chiamata entrante viene trasferita ad altro numero in quanto l'utente GSM chiamato ha attivato il servizio supplementare di chiamata trasferita.

In base alle regole fissate in ambito internazionale, l'utilizzo dei cartellini consente di tassare l'utente GSM per:

- tutte le chiamate originate, qualunque sia la rete GSM di copertura (tipo 1);
- tutte le chiamate a lui dirette quando è roaming in una rete di un altro operatore estero (tipo 3);
- tutte le chiamate trasferite (tipo 4).

Il cartellino di tipo 2 è utilizzato tra gli Operatori come riscontro.

La ripartizione degli introiti nonché le modalità di scambio delle documentazioni di tassazione sono regolati sulla base di accordi bilaterali siglati tra i vari Operatori.

## Bibliografia

- [1] *GSM Thecnical Specification*. ETSI.
- [2] Proakis, J.G.: *Digital Communications*. McGraw Hill, New York, 1998.
- [3] Grimaldi, F.; Zingarelli, V.: *Sistemi Radiomobili Cellulari*. SSGRR, L'Aquila, 1992.
- [4] Mouly, M.; Pautet, M-B.: *The GSM System for Mobile Communications*. Micheal MOULY Consultant.
- [5] *Piano tecnico per il sistema radiomobile numerico Pan-Europeo operante nella gamma dei 900 MHz*. SIP, Aggiornamento Luglio 1992.
- [6] *Relazione per il Consiglio Superiore Tecnico delle Poste Telecomunicazioni e Automazione. Oggetto: Sistema Radiomobile Numerico Pan-Europeo*. Ministero delle Poste e Telecomunicazioni, Luglio 1992.
- [7] *MoU GSM*. GSM Handbook-Phase 1, GSM MoU Permanent Reference document SE.01.
- [8] Giordani, M.; Grimaldi, F.: *Reti radiomobili cellulari: il sistema a 900 MHz analogico standard ETACS*. «Notiziario Tecnico SIP», Vol. 2, n. 1, Aprile 1993.
- [9] Eynard, C.; Grimaldi, F.; Pattini, F.: *Global System for Mobile communications (GSM): le caratteristiche tecniche e le prestazioni*. «Notiziario Tecnico SIP», Vol. 2, n. 3, Dicembre 1993.
- [10] *Cellular Mobile Telephone System CME 20. System Description*. Ericsson, Edizione Dicembre 1991.
- [11] *MR-9 Stazione Radio Base per il Sistema Radiomobile Numerico Europeo*. Siemens, Edizione Settembre 1991
- [12] *Sistema Radiomobile Cellulare GSM: Stazione Radio Base BTS 902. Descrizione Tecnica*. Italtel, Edizione Luglio 1993.
- [13] *Norma Tecnica di Installazione RBS 200 (Ericsson)*. SIP DG DRM/RR-ST, Versione 0.1 Giugno 1992.
- [14] *Norma Tecnica di Installazione MR9 (Marconi/Ote/Siemens)*. SIP DG DRM/RR-ST, Versione 0.1 Giugno 1992.
- [15] *Norma Tecnica di Installazione BTS 902 (Italtel)*. SIP DG DRM/RR-ST, Versione 0.1 Giugno 1993.

# Impianti di telecomunicazione interferiti da fenomeni di natura elettrica

G. Baroncelli, G. Pierucci (\*)

*Nell'articolo sono esaminati i principali fenomeni causa di interferenze di tipo elettrico che si manifestano sulle reti di telecomunicazione. In particolare sono esaminati i fenomeni che riguardano direttamente i portanti fisici della rete siano essi in rame o in fibra ottica, sotterranei o aerei. Sono altresì esaminate le varie tipologie di protezioni adottabili che variano in dipendenza del fenomeno che causa l'interferenza e che quindi necessitano di essere integrate per ottenere una protezione di tipo globale dei portanti fisici. E' presentato infine uno studio relativo alla messa a terra delle funi portanti dei cavi aerei. Lo studio è basato sia su esperienze dirette ricavate nel corso degli anni durante la gestione e l'esercizio degli impianti, sia su un calcolo teorico che conferma le esperienze di gestione. Nell'articolo è dapprima descritta l'impiantistica utilizzata da SIP per la realizzazione di linee di telecomunicazione su portante fisico. E' infatti compito del gestore degli impianti curare la loro progettazione tenendo conto anche dei fenomeni di interferenza succitati. Un buon gestore deve però conciliare l'esigenza inderogabile di sicurezza dell'impianto con l'economicità dello stesso in termini di realizzazione prima e di esercizio poi. Da questa considerazione è scaturita l'esigenza di affrontare uno studio che permettesse di determinare l'esatto impiego degli impianti di terra in termini di quantità e qualità. Dallo studio è emerso che la realizzazione di impianti di terra a cui collegare la fune portante a inizio e fine della palificazione non è sempre necessario come fino ad oggi si è ritenuto. Da misurazioni effettuate sul campo è infatti emerso, come ovvio, che le tensioni indotte sulle funi portanti i cavi di telecomunicazione sono direttamente proporzionali alla lunghezza della palificazione stessa. Più in dettaglio è stato possibile dimostrare come, ai fini della sicurezza dell'uomo e dell'impianto, la messa a terra della fune portante per palificazioni di lunghezza inferiore ai 1000 m è assolutamente ininfluente.*

## 1. Introduzione

Le problematiche relative alle interferenze di natura elettrica su linee di telecomunicazione stanno assumendo col passare del tempo sempre maggiore importanza: l'attenzione alla sicurezza del personale è cresciuta in maniera significativa nel corso degli ultimi anni e, d'altro canto, il sempre maggior utilizzo di elettronica in rete ha diminuito la capacità delle apparecchiature di resistere alle interferenze di natura elettrica.

Nel presente contributo si esaminano i principali fenomeni, causa di interferenze elettriche sui portanti fisici di telecomunicazione sotterranei o aerei. Sono esaminate le diverse soluzioni adottabili per la realizzazione delle protezioni relative ad ogni singola sorgente di interferenza e quindi i motivi che rendono necessaria la realizzazione di una protezione integrata che tenga conto della realtà impiantistica.

Sono infine presentati i risultati di uno studio, relativo alla messa a terra della fune portante cavi aerei, dal quale emergono interessanti considerazioni, in termini di sicurezza, sulla effettiva necessità di realizzare connessioni ad impianti di terra della fune portante indipendentemente dalla sua lunghezza e dalla zona di posa dell'impianto aereo.

## 2. Generalità sulla struttura di rete SIP

I collegamenti della rete SIP possono essere sinteticamente suddivisi su due livelli: rete di giunzione e rete di accesso.

La **rete di giunzione** comprende tutti i collegamenti tra le centrali di telecomunicazione; i collegamenti di rete di giunzione sono generalmente ad alta capacità trasmissiva con flussi da 34 Mbit/s (480 canali telefonici) in su, ed i portanti utilizzati sono in fibra ottica, in cavo coassiale o in ponte radio. La lunghezze delle tratte di un collegamento di rete di giunzione variano da alcuni chilometri fino a circa 80 km. Tratte di lunghezza

---

(\*) Ing. Guido Baroncelli, ing. Giuliano Pierucci -SIP DG- Roma

maggior parte riguardano generalmente la rete Iritel.

La **rete di accesso** è costituita dai collegamenti dalle sedi del cliente alle centrali e può essere a sua volta suddivisa in due parti: rete di distribuzione, primaria e secondaria, e raccordo d'abbonato. La rete di distribuzione primaria comprende tutti i collegamenti tra centrale ed armadi ripartilinea o tra centrale e multiplex installati sul territorio, la capacità trasmissiva di questi collegamenti varia dai 64 kbit/s (4 kHz) fino a 155 Mbit/s nel caso di apparati Add Drop Multiplex in tecnologia SDH.

I portanti della rete di distribuzione primaria sono oggi per la maggior parte in rame (collegamenti centrale-armadio ripartilinea) ed in un numero limitato di casi in fibra ottica (collegamenti centrale-multiplex); l'orientamento attuale tuttavia è verso un crescente impiego di portanti in fibra ottica in questa parte della rete.

La rete di distribuzione secondaria comprende i collegamenti tra armadio ripartilinea e distributore (costituito da elementi denominati box, chiostrina, armadietto) o, nei casi di impiego di sistemi in alta frequenza, tra multiplex e sede del cliente; questa parte della rete è generalmente realizzata con portanti in rame anche se per particolari clienti affari sono impiegati collegamenti in fibra ottica fino alla sede del cliente. Infine la parte di rete di accesso denominata raccordo d'abbonato si estende dal distributore fino alla sede del cliente ed è costituita da cavetti in rame o da collegamento in fibra ottica. Le lunghezze delle tratte dei collegamenti in rete di accesso variano comunque da un minimo di qualche decina di metri fino ad un massimo di qualche chilometro nel rispetto di alcune regole impiantistiche: distanza ohmica dalla centrale non superiore a 1000 ohm, equivalente di riferimento nei limiti prescritti dal Piano Regolatore delle Telecomunicazioni.

### 3. Tipologie di portanti fisici utilizzati da SIP

I portanti fisici utilizzati per la realizzazione della rete SIP comprendono cavi in rame ed in fibra ottica sia aerei che sotterranei. I cavi sotterranei sono posati in trincea generalmente all'interno di appositi manufatti (tritungolo per fibre ottiche) o in tubazione.

#### 3.1 Cavi in rame

I cavi in rame sono impiegati quasi esclusivamente per collegamenti in rete di distribuzione. Non vengono più posati cavi in rame di tipo coassiale per la posa all'esterno delle centrali anche se sono ancora in esercizio nella rete di giunzione.

I cavi in rame a coppie simmetriche hanno potenzialità che variano dalle 30 alle 2400 coppie per i cavi sotterranei e da 1 a 200 coppie per quelli aerei. Tutti i cavi in rame sono dotati di guaina metallica di rivestimento ad

eccezione del cavetto autoportante aereo costituito da una singola coppia. Come rivestimento della guaina metallica è impiegata una guaina in materiale isolante, generalmente realizzata in PVC.

#### 3.2 Cavi in fibra ottica

I cavi in fibra ottica sono utilizzati sia in rete di giunzione sia in rete di distribuzione. Essi sono generalmente costituiti da un nucleo interno nel quale sono contenute le fibre ottiche disposte in apposite scanalature, da una guaina esterna metallica e da un rivestimento isolante. Fa eccezione il cavo aereo che non contiene all'interno alcun elemento metallico.

Le potenzialità dei cavi variano da 20 a 400 fibre ottiche per quelli sotterranei e da 10 a 20 fibre ottiche per quelli aerei.

Nel passato, in alcuni casi estremamente rari, sono stati utilizzati anche cavi in fibra ottica contenenti all'interno coppie in rame utilizzate per scopi di servizio.

## 4. Interferenze di natura elettrica

Le interferenze di natura elettrica si manifestano in presenza di elementi metallici che, come chiarito nel paragrafo precedente, sono presenti in tutti i cavi utilizzati nel campo delle telecomunicazioni. L'unica eccezione è costituita dal cavo aereo in fibra ottica, completamente realizzato con materiali dielettrici.

Le cause che generano le interferenze di natura elettrica sui cavi di telecomunicazione possono essere suddivise in diverse tipologie secondo quanto riportato di seguito.

#### 4.1 Interferenze da induzioni

Le interferenze da induzioni sono causate da correnti circolanti nel terreno che si concatenano con i cavi sia sotterranei sia aerei; le correnti possono essere generate o da guasti su elettrodotti ad alta tensione (3° classe) o da scariche atmosferiche causate da fulminazioni indirette. In entrambi i casi si generano f.e.m. indotte sugli elementi metallici costituenti i cavi di telecomunicazione per effetto delle correnti che si concatenano con i cavi stessi (legge di Faraday-Neumann-Lenz). Nel caso di induzione dovuta a guasto per messa a terra accidentale di una fase di un elettrodotto ad alta tensione sul cavo si genera una f.e.m. a 50 Hz; nel caso di induzione dovuta a scariche atmosferiche la tensione presente sul cavo è a frequenze più elevate. Questa diversità impone una differenziazione nelle protezioni da adottare ai fini della sicurezza e, ai fini della protezione e della sicurezza, i due tipi di induzione descritti devono essere trattati separatamente.

Anche le prescrizioni che regolamentano le

interferenze in questione sono diverse e, in particolare, per le induzioni da elettrodotti valgono le indicazioni contenute nella Norma CEI 103-6 edizione 1991 mentre per le induzioni dovute a scariche atmosferiche si deve far riferimento alla Circolare Ministeriale DCST/3/2/7900/42285/2940 del 18.2.1982, oggi in fase di revisione.

#### 4.2 *Interferenze da accoppiamenti di tipo resistivo*

Le interferenze da accoppiamento di tipo resistivo sono causate dalla iniezione diretta di correnti vaganti sugli elementi metallici del cavo. Accoppiamenti di questo tipo possono verificarsi per cavi sotterranei nel caso di contatto diretto con cavi elettrici (caso molto raro) o di sopraelevamento del potenziale di terra oltre il valore limite di resistenza della guaina isolante dei cavi (generalmente circa 10 kV); i sopraelevamenti di potenziale possono essere causati dal funzionamento di spandenti di terra o da fulminazioni.

Nel caso di cavi aerei gli accoppiamenti di tipo resistivo possono verificarsi nelle situazioni di sottopasso di elettrodotti qualora le due linee vengano accidentalmente a contatto e le linee elettriche non abbiano all'esterno un'adeguata protezione ovvero nei casi di fulminazione diretta.

Le prescrizioni che regolamentano questo tipo di interferenze sono contenute nella Norma 103-2 CEI e nella Circolare Ministeriale DCST 3/2/7900/42285/2940 del 18.2.1982.

#### 4.3 *Interferenze da accoppiamenti di tipo capacitivo*

Le interferenze da accoppiamenti capacitivi sono causate da vicinanza tra elettrodotti eserciti in alta tensione (> 100 kV) e linee di telecomunicazione aeree. Generalmente interferenze di questo tipo sono riscontrabili solo su palificazioni portanti il cavetto per la rete di accesso senza schermo metallico; molto raramente vengono interferite linee di telecomunicazione aeree portanti cavo.

La f.e.m. che si manifesta sul cavo per accoppiamento capacitivo non è pericolosa ai fini della sicurezza. Tra le interferenze di tipo elettrico l'accoppiamento di tipo capacitivo è la meno pericolosa ma anche la meno frequente.

Questo tipo di interferenza non è trattata in nessuna delle Norme sulla materia.

### 5. **Protezioni**

Ognuna delle interferenze di natura elettrica sopra specificata richiede naturalmente un'adeguata prevenzione in fase di progettazione delle linee di telecomunicazione ed un attento studio relativo alle protezioni adottabili. E' infatti molto importante minimizzare gli effetti delle possibili interferenze già in

fase di progettazione della linea di telecomunicazione.

Le maggiori difficoltà in termini di progettazione delle protezioni contro le interferenze elettriche derivano dalla necessità di doverle spesso integrare per far fronte a tutti i diversi tipi di interferenza che possono presentarsi contemporaneamente sui cavi di telecomunicazione.

Nel seguito si presentano le protezioni specifiche per ogni singola tipologia di interferenza e quindi si esamina come si possa integrarle nella singola realtà impiantistica.

#### 5.1 *Protezioni da induzioni causate da elettrodotti o linee di trazione in c.a.*

Questo tipo di interferenza si esercita sia sui cavi interrati sia su quelli aerei dotati di elementi metallici. Nel caso di elettrodotto aereo si considerano interferite tutte le linee di telecomunicazione che si estendono fuori dai centri abitati in una fascia di 3 km ai lati dell'elettrodotto o all'interno degli abitati in una fascia di 300 m. Nel caso di elettrodotto sotterraneo la fascia di interferenza si estende per 30 m ai lati dell'elettrodotto.

I criteri di protezione adottabili sono numerosi ma non sempre è facile prevenire l'insorgere dell'interferenza tramite una progettazione che segua criteri predefiniti.

La Norma di riferimento nel caso di induzioni da elettrodotti è la CEI 103-6; per le induzioni causate da linee di trazione esercite in corrente alternata è in fase di preparazione una Norma a cura del Sottocomitato 103-A del CEI.

La Norma CEI 103-6 impone il non superamento di limiti di f.e.m. indotte sulle parti metalliche della linea di telecomunicazione: 650 V per elettrodotti a grande sicurezza di servizio (durata del guasto inferiore a 0,5 s) o 430 V negli altri casi. E' possibile calcolare preventivamente la f.e.m. indotta una volta noti i parametri essenziali delle due linee interferenti: correnti di guasto (intensità e frequenza), resistività del terreno, posizione mutua dei due impianti. Nel caso di una singola linea di telecomunicazione che possa essere interferita da un elettrodotto, il calcolo viene effettuato riconducendosi al modello semplice di due linee parallele, una delle quali genera per induzione una f.e.m. sull'altra. Poiché in generale le due linee interferenti ed interferite non corrono parallele per tutto il tratto interessato, occorre effettuare il calcolo suddividendo il tratto in esame in sezioni, la cui lunghezza influenza la precisione dei risultati finali. Infatti, ad una suddivisione più fine corrisponde una maggiore accuratezza; occorre quindi cercare un compromesso tra la mole dei calcoli da eseguire, che aumenta al crescere del numero di sezioni considerate, e la precisione dei risultati. Per ogni sezione della suddivisione adottata il calcolo della f.e.m. si effettua secondo il semplice modello delle linee parallele, pesando il risultato in funzione dell'angolo formato effettivamente dalle linee interferenti ed interferite nella sezione considerata.

Una volta riscontrato il superamento dei limiti di f.e.m. indotta è necessario progettare le protezioni e quindi rieseguire i calcoli al fine di assicurare il rispetto dei limiti.

In pratica, se si esclude il caso del singolo cavo di telecomunicazione interferito da un elettrodotto, e si considera invece, come spesso accade in realtà, una intera rete di telecomunicazione interferita, lo svolgimento accurato della valutazione delle f.e.m. indotte diventa molto complesso e richiede un appropriato programma di calcolo, sviluppato allo scopo, che tenga conto in dettaglio della topologia della rete interferita e delle linee interferenti.

Le protezioni adottabili in questa ipotesi sono:

- 1) scelta del tipo di cavo da utilizzare: i cavi di telecomunicazione infatti differiscono notevolmente tra loro in termini strutturali; si passa dai cavi in rame senza schermo (cavetto autoportante) ai cavi in fibra ottica completamente dielettrici (cavo in fibra ottica per posa aerea);
- 2) messa a terra delle parti metalliche costituenti il cavo in punti opportuni lungo la linea; la messa a terra per le guaine dei cavi può essere fatta direttamente mentre per le coppie in rame è naturalmente necessario utilizzare scaricatori collegati a terra: le terre in tale caso, per assicurare un adeguato funzionamento degli scaricatori e quindi una adeguata protezione, devono essere di basso valore ohmico (generalmente inferiore ai 20 ohm);
- 3) per le sole guaine dei cavi è possibile operarne il sezionamento in punti opportuni lungo la linea in modo da evitare il superamento dei limiti di f.e.m. indotta che, come noto, dipende anche dalla lunghezza delle linee interferenti;
- 4) impiego di canalette metalliche al cui interno posare il cavo di telecomunicazione; questa protezione è utilizzata solo in un numero di casi molto limitato casi estremi in quanto risulta essere molto gravosa dal punto di vista tecnico-economico.

## 5.2 Protezioni dalle scariche atmosferiche

Anche in questo caso l'interferenza riguarda sia i cavi sotterranei sia i cavi aerei con elementi metallici.

Per questo tipo di interferenza le eventuali precauzioni da prendere in fase progettuale dipendono essenzialmente dalla conoscenza del livello di ceraunicità (numero medio di giornate "temporalesche" in un anno) della zona di posa; esistono apposite mappe che forniscono indicazioni al riguardo.

La Norma di riferimento è la Circolare Ministeriale DCST/3/2/7900/42285/2940 del 18.2.1982; in essa sono descritti i criteri di protezione da adottare nelle diverse tipologie di impianto. Per esaminare le protezioni possono essere distinte tre situazioni impiantistiche tipiche:

- cavetto in rame; senza schermo, generalmente aereo;

- cavo aereo; fascettato su una fune portante metallica e sempre dotato di schermo metallico ad eccezione del cavo in fibra ottica che è completamente dielettrico;
- cavo interrato; sempre dotato di schermo metallico.

Di seguito sono esaminate le protezioni da impiegare a seconda della tipologia impiantistica.

### 5.2.1 Cavetto in rame

Il cavetto in rame è utilizzato per la parte terminale dell'impianto chiamata raccordo d'abbonato e si estende dal distributore fino all'attacco d'utente. Devono essere sempre adottate protezioni dalle scariche atmosferiche quando il cavetto è aereo e si estende fuori dai centri abitati per lunghezze superiori ai 500 m.

In particolare le protezioni adottate da SIP sono ottenute mediante l'impiego di:

1. scaricatori lato cavo e lato abbonato se la linea in cavetto è aerea e si estende per una lunghezza superiore a 400 m (la Circolare Ministeriale sopra citata indica 500 m);
2. scaricatori lato utente indipendentemente dalla lunghezza del raccordo di abbonato, se la linea in cavetto aereo è particolarmente esposta<sup>(1)</sup> (la Circolare Ministeriale impone l'impiego di scaricatori lato utente se la linea è particolarmente esposta e si estende per una lunghezza superiore a 400 m);
3. collegamento ad impianti di terra della fune portante (se presente) all'inizio e alla fine della palificazione ed ogni 200-300 m se la linea è realizzata in zone particolarmente esposte<sup>(2)</sup>.

### 5.2.2 Cavo aereo con schermo metallico

Questi cavi sono in rame, sono dotati di schermo metallico e sono sorretti tramite fascettatura su una fune portante.

Le protezioni adottate contro le scariche atmosferiche sono:

1. collegamento ad un impianto di terra della guaina del cavo e della fune portante in corrispondenza degli estremi della palificazione e per la fune portante ogni 200-300 m se la linea di telecomunicazione si estende in zona particolarmente esposta. In questo caso gli impianti di terra sono "di forma"; quindi, devono essere realizzati rispettando criteri

(1) Si definisce "Linea particolarmente esposta alle scariche atmosferiche" ogni linea che si estende in zone con resistività del terreno superiore a  $250 \Omega \cdot m$  e livello ceraunico medio superiore alle 15 giornate temporalesche l'anno.

(2) Si definisce "Zona particolarmente esposta alle scariche atmosferiche" una zona caratterizzata da un livello ceraunico medio superiore alle 15 giornate temporalesche l'anno.

geometrici e non è imposto nessun valore resistivo. Questo criterio è giustificato dalla necessità di dover disperdere correnti a frequenze elevate: infatti, l'espressione dell'impedenza di un conduttore, che possieda sia componenti resistive che induttive, è data da  $R+j\omega L$ , ove  $R$  è la resistenza,  $L$  l'induttanza e  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  essendo la frequenza considerata; questa espressione mostra che la componente resistiva è predominante solo per frequenze al di sotto di una soglia critica, dipendente dei rapporti dei valori di  $R$  ed  $L$ ; per frequenze superiori a questa soglia l'induttanza non è più trascurabile e il fattore determinante per un buon funzionamento dell'impianto di terra è la sua impedenza e non soltanto la sua componente resistiva; diviene allora importante controllare il valore di  $L$  e quindi anche la geometria dell'impianto di terra;

2. connessione ad impianti di terra di fune portante e guaina del cavo deve essere realizzata anche in presenza di cassette di protezione impiegate per l'alloggiamento degli scaricatori;
3. continuità elettrica della fune portante dall'inizio alla fine della palificazione. Questo criterio deve essere rispettato anche in brevi interramenti;
4. continuità elettrica delle guaine dei cavi nei punti di transizione da sotterraneo ad aereo;
5. impiego dello stesso tipo di cavo utilizzato per la posa aerea anche per i brevi interramenti.

### 5.2.3 Cavo interrato con schermo metallico

Questi cavi sono in rame o in fibra ottica e sono posati in trincea o in tubazione. Per questo tipo di impianti le protezioni contro le scariche atmosferiche devono essere previste nel caso di posa fuori dei centri abitati.

Le protezioni adottate negli impianti della SIP, in accordo con la Circolare Ministeriale sopra ricordata, sono:

1. connessione delle guaine metalliche dei cavi ad impianti di terra in corrispondenza dei punti terminali; garanzia inoltre della continuità elettrica delle guaine dei cavi in corrispondenza di giunti o di altri punti di sezionamento;
2. posa di una fune di guardia ad una distanza di circa 30 cm sulla verticale del cavo; questa protezione è attuata in dipendenza dell'esposizione della zona di posa alle scariche atmosferiche e dell'importanza dei cavi da proteggere.

### 5.3 Protezioni da accoppiamenti di tipo resistivo

Devono essere considerate tutte le possibili cause di iniezione diretta di corrente sulle parti metalliche degli impianti di telecomunicazione. Interferenze di questo tipo possono presentarsi nel caso di contatti diretti con linee

elettriche o nel caso di sopraelevamenti di tensioni di terra dovute a funzionamento di spandenti di terra o a fulminazioni.

I contatti diretti tra le linee elettriche e quelle di telecomunicazione sono quasi sempre dovuti a sottopassi di linee elettriche aeree in bassa tensione (BT) da parte di linee di telecomunicazione aeree dotate di fune portante. In questi casi le prescrizioni al riguardo, (Norma CEI 103-2 e Decreto Ministeriale n. 21 del 21.3.1988), prevedono come unico criterio di protezione il rispetto di distanze di sicurezza. Dall'esperienza di esercizio SIP è invece risultato che, pur costruendo gli impianti a norma, si può verificare, sia pure in casi estremamente rari e per eventi eccezionali, il contatto tra l'elettrodotto BT e la fune portante delle palificazioni di telecomunicazione. Per proteggere gli impianti anche in questi casi, la SIP ha allo studio nuove regole impiantistiche che, oltre al rispetto delle distanze di sicurezza, prevedono anche la continuità della fune portante e l'impiego di elementi isolanti sui tiranti dei pali. Queste regole sono in grado di garantire un ancora maggiore grado di sicurezza rispetto all'attuale anche in presenza di situazioni anomale che causino il contatto diretto.

Le protezioni adottate finora dalla SIP e prescritte nelle Norme nel caso di cavi posati nelle vicinanze di spandenti di terra prevedono il rispetto di distanze di sicurezza in relazione alla tenuta del rivestimento isolante presente su tutti i cavi SIP interrati. Nel caso le distanze di sicurezza non possano essere rispettate i cavi di telecomunicazione devono essere inseriti all'interno di canalette metalliche rispondenti alle prescrizioni indicate nella Circolare Ministeriale DCST del 1982.

Nei casi infine di ingresso di cavi di telecomunicazione all'interno di aree soggette a sopraelevamenti del potenziale di terra oltre i limiti consentiti, le norme di impianto SIP, nel caso di cavi in rame, prevedono l'impiego di trasformatori di isolamento e cavetti ad alto isolamento (50 kV) e, nel caso di cavi in fibra ottica, l'impiego di cavi completamente dielettrici.

### 5.4 Protezioni da accoppiamenti di tipo capacitivo

Le interferenze dovute ad accoppiamenti di tipo capacitivo, come si è già avuto modo di sottolineare al precedente paragrafo 4.3, sono sicuramente le meno pericolose e le meno frequenti.

Questo tipo di interferenza può verificarsi nel caso di parallelismi entro una fascia di qualche decina di metri tra linee di telecomunicazione aeree ed elettrodotti eserciti a tensioni superiori ai 100 kV. Gli impianti di telecomunicazione più soggetti ad accoppiamenti di tipo capacitivo sono le linee aeree in cavetto.

Le protezioni adottabili in questo caso sono l'impiego di fune portante metallica collegata ad impianti di terra alla quale attaccare mediante fascette metalliche i cavetti oppure in casi estremi l'interramento della tratta di linea interessata dall'interferenza. In ogni caso le normative

interne della SIP non permettono di realizzare giunti entro una fascia che si estende per 50 m ai lati dell'elettrodotto in alta tensione (A.T.).

### 5.5 Integrazione delle protezioni nella realtà impiantistica SIP

Come risulta dai paragrafi precedenti ogni singola tipologia di interferenza richiede adeguate contromisure appositamente studiate per essa. A volte talune protezioni, valide per un tipo di interferenza, risultano essere meno idonee per un altro tipo che viceversa potrebbe risultare favorita.

A titolo di esempio si consideri l'interruzione delle guaine metalliche ricoprenti i cavi: questo intervento risulta essere un ottimo sistema per le interferenze dovute ad induzioni da elettrodotti, ma è controproducente per la protezione contro le fulminazioni per la quale è opportuna la continuità della guaina metallica dei cavi.

Dalle considerazioni fin qui esposte può essere dedotto che il tipo di protezioni da adottare nei confronti di interferenze di tipo elettrico deve essere attentamente valutato caso per caso; non è possibile stabilire una soluzione impiantistica che possa essere sempre utilizzata indipendentemente dalle situazioni al contorno.

Allo scopo di chiarire con un esempio, si consideri le linee di distribuzione aeree in zone rurali, ove la tipica protezione adottata riguarda la salvaguardia dalle sovratensioni indotte da fulminazioni. Tale protezione è ottenuta tramite l'utilizzo di "scaricatori" collegati con un impianto di messa a terra, collocato nelle vicinanze del sito di abbonato, che garantisce una resistenza verso terra inferiore a 20  $\Omega$ . Non è infrequente il caso in cui l'utente sia anche collegato ad una linea di alimentazione elettrica a media tensione (20 kV), come accade nel caso di piccole aziende dislocate fuori dei centri abitati. In tali casi, negli ultimi metri del raccordo di abbonato si utilizzano cavi rivestiti con isolanti adatti a resistere a tensioni di decine di kV allo scopo di proteggere il circuito di telecomunicazione da sovratensioni originate da eventuali guasti a terra dell'impianto elettrico dell'abbonato stesso. In questa situazione, un guasto sulla linea elettrica a media tensione cui è allacciato l'abbonato può provocare innalzamenti del potenziale elettrico del terreno circostante per un'estensione dipendente dalla natura del terreno stesso e che può arrivare a qualche km<sup>2</sup>. Può allora accadere che la sovratensione nel terreno faccia scattare lo scaricatore connesso all'impianto di messa a terra del cavo telefonico (dato che tali dispositivi sono *bidirezionali*) con conseguente immissione di corrente sul cavo stesso. In questo esempio, la soluzione che è stata adottata consiste nell'eliminare l'impianto di messa a terra e nell'integrare la protezione dell'utente dalle sovratensioni condotte dal cavo e la protezione del cavo dai sopraelevamenti del potenziale di terra dell'impianto dell'utente, utilizzando un trasformatore di separazione

posto tra cavo e terminazione presso utente.

Una corretta progettazione di una linea di telecomunicazione in cavo deve quindi prevedere l'integrazione delle diverse protezioni necessarie in modo tale da non creare situazioni di contrapposizione. Questo è uno dei motivi che giustifica differenti modalità di protezione per ogni tipo di interferenza elettrica; infatti disporre di più soluzioni permette di volta in volta di scegliere la migliore e di rispettare la compatibilità con le altre protezioni.

## 6. Studio sull'opportunità della messa a terra della fune portante i cavi aerei di telecomunicazione

Le Norme di legge ad oggi in vigore obbligano alla messa a terra della fune portante cavi aerei all'inizio ed alla fine delle palificazioni. La Circolare Ministeriale DCST 3/2/7900/42285/2940 del 18.2.1982 nel Capitolo II tratta della protezione dagli effetti delle scariche atmosferiche e, in particolare, al paragrafo 2.4.4.1 prescrive "*Le linee in cavo aereo con schermo metallico posate su palificazione debbono essere protette: a) collegando ad un impianto di terra la fune portante il cavo aereo alle due estremità della palificazione...*".

Le funi portanti delle palificazioni devono quindi essere connesse ad un impianto di terra all'inizio e al termine della palificazione, indipendentemente dalla loro lunghezza e dal grado di esposizione ai fenomeni atmosferici della zona di posa.

La stessa Circolare Ministeriale nel paragrafo 2.4.2 prescrive le protezioni da adottare nel caso di posa di un cavetto aereo autoportante: in questo caso l'adozione delle protezioni è subordinata alla lunghezza dell'impianto aereo ed all'esposizione della zona di posa.

Quella segnalata appare essere un'incongruenza: infatti, a parere degli scriventi, l'obbligo della connessione della fune portante ad impianti di terra non sembra poter essere giustificato dagli aspetti legati alla sicurezza delle persone e degli impianti.

Per esporre le motivazioni di quanto affermato si riportano i risultati di uno studio relativo alla messa a terra della fune portante. Per completezza di trattazione è stato trattato anche il caso relativo al contatto diretto tra la fune portante ed una linea elettrica, anche se, come già detto, nessuna normativa prevede l'adozione di impianti di terra per la fune portante come protezione per i contatti diretti in quanto questi devono essere evitati con una corretta progettazione degli impianti.

### 6.1 Scariche atmosferiche

Nel caso di fulminazione il fenomeno che si manifesta sulla fune portante metallica è una tensione indotta di tipo impulsivo. Nel caso di tensioni impulsive la Norma CEI progetto 289 fissa una soglia di pericolosità per

l'uomo in termini di energia anziché di corrente o tensione. Il valore limite di energia indicato nella Norma succitata è 20 Joule.

Nella trattazione che segue si considera la resistenza minima del corpo umano pari a 1000  $\Omega$  per il percorso mano-mano. Viene preso in considerazione il percorso della corrente attraverso il corpo umano di tipo mano-mano in quanto questa è la situazione più gravosa ed inoltre risulta essere realistica nel caso di un operatore su una scala che venga in contatto contemporaneamente con la fune portante ed un tirante di una palificazione.

Nel seguito è considerato il solo caso di fulminazione indiretta perché la fulminazione di tipo diretto ha basse probabilità di verificarsi e questa probabilità è ulteriormente diminuita se si considera la probabilità del verificarsi contemporaneo dei due eventi: fulminazione diretta e contatto di un operatore con la fune portante.

### 6.1.1 Fulminazione indiretta

In questo caso il fulmine cade nelle vicinanze della palificazione ed i suoi effetti si possono ricondurre all'induzione di corrente sulle parti metalliche della palificazione e, quindi, anche sulla fune portante.

Se la fune portante non è connessa a terra tutta l'energia derivante dalla fulminazione si dissipa attraverso il corpo umano. Indicando con  $E_u$  la massima energia dissipabile dal corpo umano (20 J) il legame con la tensione indotta è fornito con buona approssimazione da:

$$E_u = \frac{V^2 t_e}{1.4 R_u}$$

con:  $V$  = tensione indotta sulla fune portante;  $t_e$  = tempo di discesa equivalente all'emivalore:  $10^{-3}$  s;  $R_u$  = resistenza minima del corpo umano: 1000  $\Omega$ .

Al fine di approssimare al meglio l'energia associata ad una fulminazione reale composta di più scariche è stato utilizzata la costante di tempo  $t_e$ . Questo termine è la costante di tempo dell'esponenziale che rappresenta una forma d'onda che ha la stessa ampiezza e lo stesso contenuto energetico di quella associata ad un fulmine reale [1].

Dall'espressione indicata è possibile ricavare il valore della tensione indotta  $V$  necessaria perché l'energia in gioco sia inferiore alla soglia di pericolosità per l'uomo che, come detto, è 20 J. Con le ipotesi sopra riportate si ricava un valore di tensione di circa 5,3 kV.

Una verifica dei valori di tensione indotta calcolati può essere ottenuta, confrontandoli con i valori di tensioni indotte già misurati sperimentalmente per linee in cavetto di bronzo [1], [2].

Infatti, a parità di lunghezza, appare del tutto ragionevole supporre simili i valori di tensione indotta su una fune portante di una palificazione o su un cavetto in bronzo come quello utilizzato per la sperimentazione citata.

I risultati ottenuti dalle misurazioni effettuate su una

linea in cavetto di bronzo di lunghezza di circa 1 km indicano che in oltre il 90% dei casi non sono state misurate sovratensioni superiori a 1,5 kV, inoltre, il tempo equivalente di discesa all'emivalore è risultato dell'ordine dei 100  $\mu$ s.

Considerando che il valore di tensione indotta ricavato nella presente trattazione è stato calcolato considerando un tempo di discesa equivalente all'emivalore di  $10^{-3}$  s, può essere quindi affermato che: le sovratensioni indotte sulla fune portante di una palificazione di lunghezza limitata (1-2 km) non costituiscono fonte di pericolo per l'uomo.

### 6.2 Contatti diretti

Si ha un contatto diretto quando, per cause accidentali ed eccezionali, viene meno il rispetto della distanza di sicurezza tra linee elettriche e fune portante di una palificazione portante cavi di telecomunicazione. Da esperienze di esercizio degli impianti, il caso più comune di contatto diretto è risultato essere quello relativo al sottopasso di una linea elettrica BT (trifase 380 V) da parte di una linea aerea di TLC. Se una fase della linea elettrica viene in contatto con la fune portante della palificazione questa si porta ad un potenziale di 220 V rispetto a terra. Purtroppo, a causa delle impedenze in gioco, la corrente che scorre nella fune non è sufficiente a far intervenire i dispositivi di sicurezza che interrompono la fornitura di elettricità; la situazione di pericolo che si crea è perciò di tipo permanente.

La situazione più gravosa dal punto di vista della sicurezza si ha nel caso in cui una persona tocchi contemporaneamente la fune in tensione ed il tirante di un palo a potenziale nullo: in questo caso infatti il contatto è del tipo mano-mano e la corrente che attraversa la persona scorre con un percorso che attraversa il torace.

Considerando la resistenza della fune di guardia pari a 0,0079  $\Omega$ \*m (fune da 6 mm), la resistenza minima del corpo umano nel percorso mano-mano pari a 1000  $\Omega$  e la resistenza interna della linea elettrica di 2  $\Omega$ , si riportano di seguito i risultati relativi alla corrente che percorre il corpo umano nel caso di una palificazione lunga 500 m.

I calcoli sono stati effettuati considerando o no la presenza di impianti di terra per la fune portante:

IMPIANTI DI TERRA	CORRENTE ATTRAVERSO L'UOMO
nessun impianto di terra	220 mA
un impianto di terra ad una estremità (20 $\Omega$ )	195 mA
impianti di terra alle due estremità (20 $\Omega$ )	185 mA

Tabella 1

Come noto la massima corrente che può scorrere attraverso il corpo umano per un tempo indefinito in condizioni di sicurezza è dell'ordine dei 40 mA.

La realizzazione di impianti di terra a cui connettere la fune portante non è quindi risolutiva per la sicurezza dell'uomo nel caso di contatti diretti accidentali. Per raggiungere una situazione di sicurezza sarebbe infatti necessario realizzare impianti di terra con una resistenza di 1-2 ohm.

### 6.3 Commenti ai risultati

Dai risultati mostrati nei paragrafi precedenti appare giustificata la necessità sopra espressa di riesaminare la norma che prevede il collegamento ad impianti di terra della fune portante dei cavi aerei di telecomunicazione prescindendo dalle diverse situazioni ambientali e dalle differenti situazioni impiantistiche: la messa a terra della fune portante non contribuisce infatti in maniera significativa a garantire la sicurezza delle persone nei casi di palificazioni di lunghezza inferiore ai 500-1000 m.

Infatti nel caso di fulminazione indiretta si è chiarito al punto precedente come l'adozione di terre agli estremi della fune portante non è necessaria per la sicurezza in quanto i livelli di tensione indotta, associati ai tempi di durata del fenomeno considerato, non comportano pericolo nel caso di contatti accidentali di persone.

Infine, considerando anche il caso dei contatti diretti, l'introduzione di terre agli estremi della palificazione, non riduce sufficientemente la quota parte di corrente che scorre attraverso il corpo umano, in quanto sarebbe necessario scendere a valori di terra prossimi a 1 ohm. Una conferma la si può ritrovare nelle attuali prescrizioni vigenti che non considerano la realizzazione di terre per la protezione da questo tipo di interferenza.

Volendo comunque aumentare il grado di sicurezza per questo tipo di interferenza risultano essere risolutive soluzioni impiantistiche basate sull'adozione di elementi isolanti da applicarsi sui tiranti dei pali. Su questi temi in SIP sono in corso di esame alcune proposte da sperimentare sui nuovi impianti.

## 7. Conclusioni

Nel presente contributo è stato presentato un quadro generale legato alle problematiche relative alle interferenze di tipo elettrico che possono manifestarsi sulle linee di telecomunicazione. Dopo una presentazione delle soluzioni impiantistiche normalmente adottate dalla SIP, sono state esaminate le principali caratteristiche attinenti i cavi di telecomunicazione e le loro modalità di posa. Sono stati poi riassunti i principali metodi di protezione dalle interferenze di tipo elettrico ed è stato mostrato come solo una progettazione selettiva

delle protezioni permetta di raggiungere un livello di immunità atto a garantire la sicurezza degli impianti.

Infine è stata presentata una valutazione sulla connessione ad impianti di terra delle funi portanti i cavi aerei di telecomunicazione ed è stato messo in evidenza come la messa a terra della fune portante non è risolutiva ai fini della sicurezza degli impianti. A volte, in determinate situazioni impiantistiche questa soluzione sembra essere ininfluente; infatti, per ottenere i benefici attesi, sarebbe necessario realizzare impianti di terra con un valore ohmico molto ridotto ( $< 1 \Omega$ ) e come tale in molte località difficilmente realizzabile e soprattutto mantenibile.

## Bibliografia

- [1] Esposito, F.; Meineri, G.; Guglielmina, M.; Pomponi, R.: *Lightning surges measured on telephone subscriber lines*. EMC Symposium Zurich, March 1985.
- [2] Pomponi, R.; Kijima, H.; Parente, M.; Popp, E.; Scott, W.A.; Zeddani, A.: *Surge voltages and currents measured on telecommunication subscriber lines*. EMC Symposium Zurich, March 1993.

## Le fibre ottiche nelle reti di distribuzione

Un esame, anche sommario, dei meccanismi di propagazione dei segnali nelle fibre ottiche, posti in relazione alle caratteristiche delle fibre stesse, fa subito intravedere la grande capacità trasmissiva potenziale di questo mezzo portante; una capacità che può apparire perfino inutilmente esuberante rispetto alle necessità che si presentano nella realizzazione di arterie e di tronchi di una moderna rete di telecomunicazione, quanto meno in una prospettiva di breve termine.

Ma un'analisi più approfondita, del problema di disporre concretamente della citata capacità, impone che si tenga conto sia delle reali caratteristiche delle fibre fisicamente realizzabili e prodotte industrialmente, sia dei fenomeni di "non linearità" che influenzano la propagazione, sia, infine, dello *stato dell'arte* nella generazione, nella modulazione e nella rivelazione dei segnali ottici. L'effettiva utilizzazione di una quota importante della capacità potenziale delle fibre implica, infatti, che il problema sia affrontato ricorrendo a soluzioni sistemiche più articolate di quella fondata sul solo incremento della frequenza di cifra con cui modulare un unico segnale ottico; in pratica con la combinazione di diverse tecniche.

Gli orientamenti attuali, che tengono appunto conto dello stato dell'arte, si sviluppano lungo quattro filoni di ricerca, tre dei quali, *più maturi*, sono già in fase di sperimentazione in campo. Essi sono: l'aumento della frequenza di cifra di un unico segnale in banda base che modula il segnale ottico; l'impiego di più sottoportanti, ad esempio a microonde, (ciascuna delle quali modulata da un segnale in banda base) che insieme modulano un segnale ottico; l'impiego di più portanti ottiche, generate indipendentemente, diversificate nella lunghezza d'onda (WDM). Il quarto filone, oggi ancora oggetto di indagini e di sperimentazioni di laboratorio, prevede l'impiego di segnali ottici impulsivi generati da diverse sorgenti e multiplati nel dominio del tempo (OTDM).

Le tecniche che si riconducono sostanzialmente alla generazione con sorgenti ottiche indipendenti (terza e quarta) e quelle che invece si basano sulla (modalità di) modulazione di una sola sorgente (prima e seconda) possono, peraltro, essere simultaneamente utilizzate per un migliore impiego della capacità trasmissiva della fibra. E' ovvio che la concreta utilizzazione di ognuna delle tecniche richiamate è subordinata alla disponibilità, in ricezione, di opportuni dispositivi di demodulazione e/o di demultiplazione. Nel complesso i limiti delle prestazioni ottenibili derivano da fattori intrinseci e/o tecnologici delle varie parti del sistema.

Lo scenario sinteticamente delineato è però tutt'altro che esauriente, dato che non contiene alcuna considerazione di tipo tecnico-economico, peraltro ben difficile da puntualizzare in un quadro tecnologico in rapida evoluzione anche, e forse soprattutto, per quanto concerne i costi dei dispositivi ottici ed optoelettronici. Si tratta di un aspetto che va valutato in correlazione con le condizioni di impiego di tali dispositivi: l'intensità di utilizzazione, che può giustificare l'uso di componenti di elevato costo unitario, e le situazioni reali (ambientali, stabilità e continuità dell'alimentazione ecc.) in cui saranno chiamati ad operare.

Come accade in modo ricorrente nelle reti gerarchiche commutate, le condizioni in cui è tipicamente più difficile trovare un bilanciamento tra costi e prestazioni si verificano nelle parti periferiche del sistema, specificamente in quelle utilizzate da singoli utenti o da piccoli gruppi di utenti. Le reti di distribuzione sono di fatto un'area critica a questo proposito, non solo in relazione all'intensità di utilizzazione, ma anche per le più gravose condizioni ambientali e le maggiori difficoltà di esercizio. Ciò giustifica gli studi e le sperimentazioni per mettere a punto sistemi in fibra ottica adatti a questa particolare, ma quantitativamente importantissima, area di impiego.

E' anzi da sottolineare che, in relazione all'elevata incidenza del costo della rete di distribuzione nell'economia dell'intera rete complessa, gli sviluppi in corso per migliorarne l'efficienza tecnico economica sono seguiti con particolare interesse da tutti i gestori dei sistemi Telecomunicazioni "nazionali", responsabili dell'erogazione di "teleservizi", fino agli utilizzatori terminali.

Anche la SIP, ovviamente, segue con grande attenzione questo argomento, su cui il Notiziario Tecnico intende pertanto fornire, nell'ambito di un ciclo di articoli, informazioni aggiornate.

Nell'articolo che segue sono esposti gli orientamenti e le sperimentazioni in corso presso alcuni organismi di ricerca ed industriali riguardanti specificamente le tecniche WDM.

*p. r.*

# Trasmissioni ottiche a moltiplicazione di lunghezza d'onda

S. Rotolo, E. Vezzoni (\*)

*La rete di distribuzione è soggetta ad una forte spinta evolutiva: da un lato l'Utenza richiede servizi sempre più numerosi, e a banda elevata, dall'altro gli operatori necessitano di reti e sistemi sempre più potenti e flessibili. L'applicazione di tecniche di moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda (WDM), eventualmente spinta fino a raggiungere spaziature minime fra i canali (HDWDM), offre una risposta efficace ad entrambe le esigenze. Oltre ad aumentare la capacità di trasporto, infatti, la molteplicità di lunghezza d'onda consente anche di realizzare funzioni di rete, quali la selezione e l'instradamento dei canali, nel dominio ottico. Numerose realizzazioni sperimentali hanno già variamente dimostrato la validità di questo approccio. La rapida evoluzione della tecnologia dei dispositivi optoelettronici, dal canto suo, sta rendendo disponibili componenti sempre più sofisticati (sorgenti sintonizzabili DFB o DBR, filtri sintonizzabili, amplificatori), che consentiranno alle reti ottiche di dispiegare tutte le loro potenzialità.*

## 1. Introduzione

Quando, nella rete di distribuzione, accanto alla semplice telefonia, si intenda offrire un insieme di altri servizi, in particolare quelli a larga banda, nasce l'esigenza di moltiplicare più segnali, e di trasmetterli sulla stessa fibra. In alternativa o a complemento della moltiplicazione di tipo elettronico, in cui il trasmettitore è costituito da un solo laser, modulato contemporaneamente da più canali d'informazione opportunamente combinati (ad esempio mediante moltiplicazione a divisione di tempo oppure mediante moltiplicazione di sottoportante), può risultare conveniente introdurre tecniche di moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM), in cui più portanti laser, operanti a lunghezze d'onda diverse ( $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ), sono modulate indipendentemente dalle diverse sorgenti di informazione [1]. Il ricevitore deve, corrispondentemente, includere un dispositivo in grado di selezionare le differenti lunghezze d'onda, così da consentire la rivelazione indipendente dei diversi canali.

Le tecniche di moltiplicazione basate sull'uso delle lunghezze d'onda consentono di disporre di canali ottici in grado di funzionare in modo "trasparente" rispetto al formato di modulazione ed alla topologia fisica dei collegamenti di rete. Si possono quindi trasportare sulla stessa fibra, indifferentemente e contemporaneamente, segnali digitali e analogici, sincroni e asincroni.

Nella rete di distribuzione a larga banda è verosimile che il numero dei canali da trasmettere possa raggiungere le decine o le centinaia: si pensi, tipicamente, alla distribuzione di servizi televisivi di tipo diffusivo, o a tariffa ("pay TV"), o a richiesta ("TV on demand"). Sono quindi necessarie tecniche di moltiplicazione e demoltiplicazione che consentano una elevata densità di canali, ovvero una contenuta spaziatura tra le portanti. Ciò è particolarmente vero se si utilizzano, nella rete, amplificatori ottici in fibra drogata con Erblio, che, operando fra 1530 e 1560 nm, limitano l'ampiezza dell'intervallo di lunghezze d'onda disponibili a circa 30 nm. Ciò implicherebbe, corrispondentemente, una spaziatura fra i canali di qualche nm o decimo di nm (in unità di frequenza, centinaia o decine di GHz). Tecniche di moltiplicazione ottica che prevedono tali spaziature sono generalmente definite tecniche "WDM ad alta densità" o High Density WDM (HDWDM) [2].

---

(\*) Ing. Salvatore Rotolo -Italtel- Castelletto di Settimo Milanese;  
ing. Emilio Vezzoni -CSELT- Torino

## 2. Sistemi ed apparati basati su tecniche WDM avanzate

L'evoluzione dei sistemi verso tecniche di moltiplicazione in lunghezza d'onda ad alta densità costituisce, nell'ambito della Rete di Distribuzione, un tema di ricerca di notevole interesse. E' possibile analizzarne, sotto molteplici punti di vista, gli aspetti caratterizzanti.

- Premessa fondamentale che consente l'introduzione del WDM ad alta densità nella rete è la possibilità di trasmettere, con la stessa fibra, più portanti ottiche anche molto ravvicinate tra loro, senza che queste si disturbino reciprocamente (almeno fino a che le potenze in gioco non generino effetti non lineari).
- Il progressivo sviluppo di laser a spettro stretto, di laser sintonizzabili e di filtri ottici molto selettivi rende possibile lo sfruttamento efficiente della banda disponibile nelle fibre ottiche monomodali, consentendo la moltiplicazione ottica di decine o centinaia di canali.
- La presenza di amplificatori ottici a fibra drogata con Erblio limita l'intervallo di lunghezze d'onda utilizzabili alla regione compresa tra 1530 e 1560 nm; ciò costituisce un ulteriore incentivo all'impiego efficiente della larghezza di banda disponibile, e quindi all'introduzione di canali con spaziatura fine.
- La "trasparenza" della fibra rispetto ai sistemi multi-canale WDM o HDWDM permette di realizzare espansioni progressive della capacità delle reti ottiche esistenti e, al contempo, di concepire nuove architetture e sistemi che meglio utilizzano la "nuova dimensione" della lunghezza d'onda, in aggiunta a quelle del tempo e dello spazio. Ciò può significare, ad esempio, l'utilizzo dell'associazione fra lunghezza d'onda e segnale per svolgere funzioni di livello più elevato di quello puramente trasmissivo, quali ad esempio l'instradamento di canali, la loro commutazione, la suddivisione dei servizi trasportati. E' possibile l'efficace impiego di tecniche WDM anche per funzioni relative alla gestione di rete: si pensi ad esempio all'uso di lunghezze d'onda assegnate a canali ridondanti, per aumentare il grado di protezione dei collegamenti, o a canali di servizio, per la diagnosi/controllo della rete.
- La futura introduzione dei sistemi multicanale più complessi, ad esempio di tipo coerente, è legata alla possibilità di integrazione dei componenti optoelettronici, condizione necessaria per la riduzione dei costi.

Nel seguito, ponendosi in un'ottica evolutiva, si farà riferimento soprattutto alla moltiplicazione ottica ad alta densità, descrivendo sia le possibili funzioni di rete così ottenibili che le relative tecnologie.

## 3. Funzioni di rete in tecnica WDM

Si illustrano qui, con alcuni esempi chiarificatori, le possibili funzioni realizzabili [2] in una rete ottica con tecniche WDM e HDWDM: diffusione di una molteplicità

di canali (broadcasting) e loro selezione sulla base della lunghezza d'onda; instradamento passivo dei segnali sulla base della lunghezza d'onda; commutazione dei segnali sulla base della lunghezza d'onda.

- a) *Reti ottiche a largabanda di tipo passivo con selezione del canale sulla base della lunghezza d'onda.* Il principio di funzionamento di questo tipo di reti è descritto in fig. 1. In questo caso la topologia preferibile per la rete è quella a stella, con tanti ingressi e tante uscite quanti sono rispettivamente i canali da trasmettere e gli utenti che li ricevono. Sono possibili diverse configurazioni, a seconda che i trasmettitori, o i ricevitori, o entrambi siano sintonizzabili.
  - a1) Nel caso in cui le sorgenti operino a lunghezza d'onda prefissata ed i ricevitori siano invece sintonizzabili, il sistema può assolvere le funzioni di tipo diffusivo ("broadcast"), con selezione del canale da parte dell'utente.
  - a2) Nel caso in cui le sorgenti siano a lunghezza d'onda variabile ed i rivelatori funzionino a lunghezza d'onda fissa, la ricezione di un dato canale da parte di un dato utente viene decisa dal gestore del centro di trasmissione. Si noti che i collegamenti di tipo multipunto-punto (da più trasmettitori ad un solo utente) sono possibili solamente con filtri di ricezione capaci di selezionare più lunghezze d'onda contemporaneamente.
  - a3) Nel caso in cui sia i trasmettitori che i ricevitori ottici siano sintonizzabili, possono essere realizzate funzioni più complesse. E' possibile anche ottimizzare il numero di lunghezze d'onda presenti; esiste, però, l'inconveniente di possibili "blocchi" della rete creati dalle contese tra i vari segnali che possono essere evitate solo dall'uso di protocolli di comunicazione complessi.
- b) *Reti ad instradamento passivo dei segnali sulla base della lunghezza d'onda.* Il principio di funzionamento di questo tipo di reti è descritto in

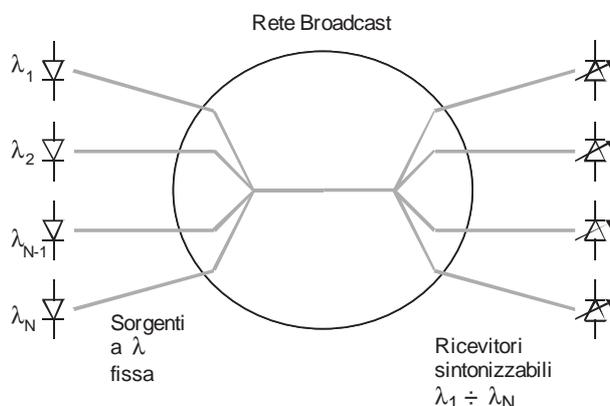


Figura 1 Rete di tipo passivo con selezione del canale in ricezione

fig. 2. La rete contiene elementi selettivi in lunghezza d'onda disposti in maniera tale che percorsi diversi vengano univocamente determinati da prefissate lunghezze d'onda  $\lambda_i$ ; l'opportuna assegnazione della lunghezza d'onda di trasmissione, effettuata con sorgenti sintonizzabili, consente quindi l'impostazione univoca del percorso che il segnale effettuerà all'interno della rete.

c) *Reti con commutazione dei segnali sulla base della lunghezza d'onda.* Le possibili funzioni di commutazione sulla base della lunghezza d'onda fanno riferimento a due tipi di sistemi.

- c1) Il segnale viene commutato da un percorso ad un altro, in maniera dinamica, facendo commutare i filtri ottici che, nel nodo, realizzano l'instradamento sulla base della diversità di lunghezza d'onda. Si realizza in pratica un commutatore a "divisione di spazio" basato sull'uso della molteplicità in lunghezze d'onda.
- c2) Il segnale subisce un'effettiva trasposizione di portante da una lunghezza d'onda ad un'altra. Questa funzione può essere espletata in maniera complessa con una conversione optoelettronica seguita da una successiva riconversione elettro-ottica; nel secondo passo di conversione, un laser sintonizzabile permette la scelta della nuova lunghezza d'onda. Componenti più sofisticati, ancora oggetto di ricerca, possono eseguire la conversione di lunghezza d'onda direttamente nel dominio ottico (si tratta, in pratica, di laser che, eccitati da un segnale ottico di ingresso, ne emettono, all'uscita, la replica esatta, ma ad una diversa lunghezza d'onda).

Combinando opportunamente le funzioni disponibili è possibile realizzare architetture e sistemi non concepibili fuori dallo "spazio delle lunghezze d'onda". Un'applicazione importante, resa possibile dai sistemi di commutazione descritti, consiste nella realizzazione di moltiplicatori con funzioni di tipo "Drop/Insert" ottiche, ove l'inserimento e/o l'estrazione di canali viene effettuata sulla base della lunghezza d'onda del segnale.

Nel paragrafo successivo si esaminano alcune realizzazioni dimostrative di sistemi basati sull'uso di

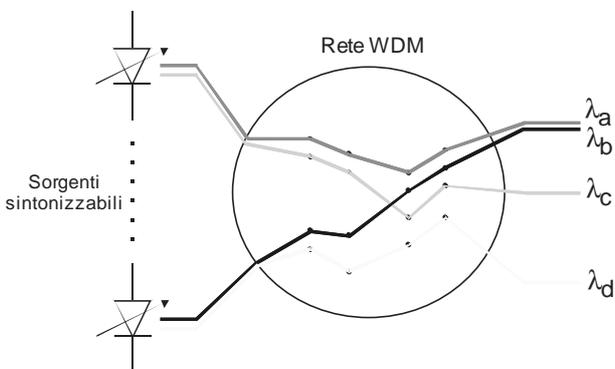


Figura 2 Rete ad instradamento dei segnali su base WDM

tecniche HDWDM, ritenute particolarmente significative. E' bene precisare che tali dimostrazioni sono confinate, per il momento, all'ambito della ricerca.

#### 4. Realizzazioni dimostrative di sistemi HDWDM

##### 4.1 Passive Photonic Loop (PPL) e Hybrid Passive Photonic Loop (HPPL)

Queste reti sono state proposte da Bellcore ed appartengono alla categoria delle reti ottiche di distribuzione totalmente passive (Passive Optical Networks, PONs); quelle, cioè, che prevedono l'utilizzo di apparati elettronici soltanto nelle installazioni di centrale o di utente.

Ricordiamo incidentalmente i notevoli vantaggi di una rete puramente passiva:

- I componenti elettronici/elettro-ottici per la conversione E/O e O/E sono totalmente assenti negli armadi di distribuzione intermedi; essi hanno costi elevati ed abbassano, in ogni caso, il grado di affidabilità della rete.
- Non esistono problemi di alimentazione degli armadi di distribuzione posizionati in rete.
- Il controllo e la manutenzione di una rete costituita da soli elementi passivi è più semplice.

Lo schema di principio della rete PPL (Passive Photonic Loop [3]) è illustrato in fig. 3. Lo schema, come detto, ha natura completamente passiva ed impiega la tecnologia ottica non solo per la trasmissione da Terminazione di Linea a Terminazione di Utente (come avviene per le PONs di tipo tradizionale), ma anche per l'assegnazione dei canali all'utente (ONU) e l'instradamento dei segnali. La circuiteria elettronica è confinata in centrale e presso l'utente, che avrà trasmettitori e ricevitori dedicati per una determinata banda. La terminazione di linea contiene  $N$  trasmettitori ed  $N$  ricevitori connessi mediante dispositivi WDM; ciascuna terminazione di utente contiene un trasmettitore ed un ricevitore ai quali sono interfacciate le fibre che si

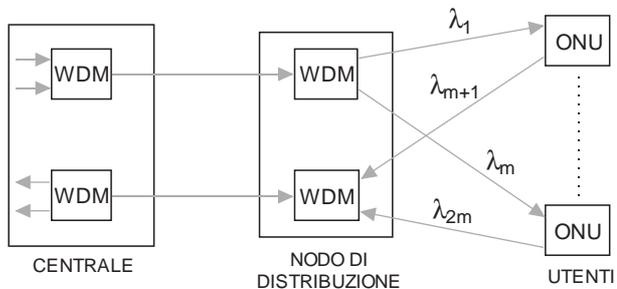


Figura 3 Rete PPL (Passive Photonic Loop)

diramano dall'armadio di ripartizione. Vengono assegnate due specifiche lunghezze d'onda, una per ogni direzione di trasmissione. In questa rete, la funzione di instradamento del segnale è effettuata tramite la selezione della lunghezza d'onda associata al canale. La spaziatura fra le lunghezze d'onda è di  $2 \div 4$  nm.

La topologia risultante è a "stella doppia". Può anche essere adottata una topologia a "stella singola" nel caso di utenti situati in vicinanza della centrale o con esigenze di elevata capacità di traffico (utente "affari"). La rete PPL si presta particolarmente bene alla soluzione Fiber To The Home (FTTH), con WDM alloggiati nell'armadio di distribuzione e le fibre dedicate che raggiungono l'utente.

La rete HPPL (Hybrid Passive Photonic Loop [3]) è una possibile variante della struttura sopra descritta. Lo schema di principio è illustrato in fig. 4. L'architettura di rete viene definita "ibrida" poiché, alla PPL, viene sovrapposta una struttura ad albero realizzata con diramatori di potenza ottica non selettivi nel 'Nodo di Distribuzione' (vedi PS in fig. 4). Il canale associato ai servizi video diffusivi può essere realizzato tramite un segnale composito modulato analogicamente a moltiplicazione di sottoportante. Nel suo complesso, la rete HPPL può supportare contemporaneamente servizi di tipo commutato e di tipo diffusivo. L'infrastruttura, come per la PPL, comprende 2 fibre per utente.

Sia la rete PPL che la rete HPPL consentono la possibilità

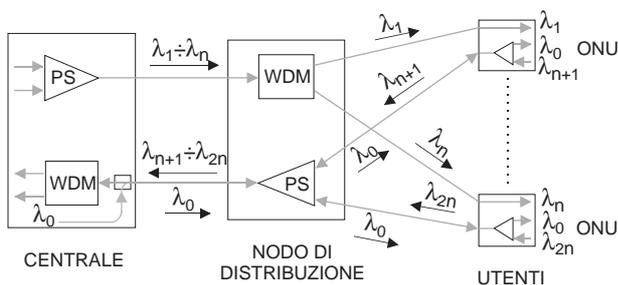


Figura 4 Rete HPPL (Hybrid Passive Photonic Loop)

di evoluzione, grazie all'inserimento di altre lunghezze d'onda.

E' riportata nel seguito la descrizione di due dimostrazioni sperimentali di PPL, ritenute particolarmente significative.

#### 4.1.1 Dimostratore A

Lo schema di questa realizzazione sperimentale è rappresentato in fig. 5. E' utilizzata la "finestra" intorno a 1550 nm; 20 portanti, spaziate di 2 nm, con larghezza spettrale pari a 0.3 nm, vengono trasmesse su una prima tratta centrale-armadio di circa 10 Km, e su una successiva tratta armadio-utente di altri 3 Km. Il collegamento è bidirezionale ed indipendente per ogni utente. In centrale sono presenti 10 ricevitori e 10 laser di tipo Distributed Feedback (DFB; i laser devono essere stabilizzati in temperatura per garantire la stabilità delle frequenze operative). Le frequenze di cifra adottate in questo esperimento sono di 600 Mbit/s e di 1.2 Gbit/s.

Oltre alla sperimentazione basata sull'uso di laser DFB, è stata realizzata una dimostrazione che impiega sorgenti LED nella terminazione di utente; si tratta della prima applicazione di LED in un esperimento di rete in fibra monomodale e con tecnica HDWDM. I LED usati, di tipo commerciale "a emissione di testa" (in cui la radiazione è emessa in direzione ortogonale allo strato attivo), trasmettono su 10 canali verso la centrale. I canali trasmissivi sono stati ottenuti usando la tecnica della partizione spettrale ("spectral slicing"), nella quale lo spettro di emissione di uno dei LED viene "affettato", cioè suddiviso in più componenti spettrali adiacenti mediante una batteria di filtri ottici a banda stretta 'in parallelo', centrati a lunghezze d'onda diverse, fino a coprire l'intero spettro di emissione del LED. Il singolo canale assegnato ad ogni utente viene selezionato e trasmesso dal WDM sulla fibra verso la centrale. Nonostante la limitazione di potenza dovuta all'effetto di filtraggio si è ottenuta, in questo modo, una trasmissione bidirezionale a 384 kbit/s, sufficiente per l'accesso N-ISDN.

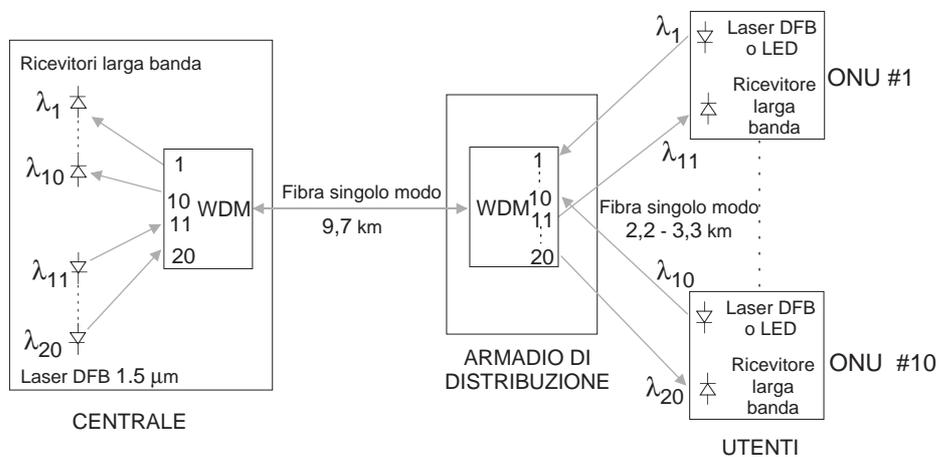


Figura 5 Rete PPL: realizzazione sperimentale (dimostratore A)

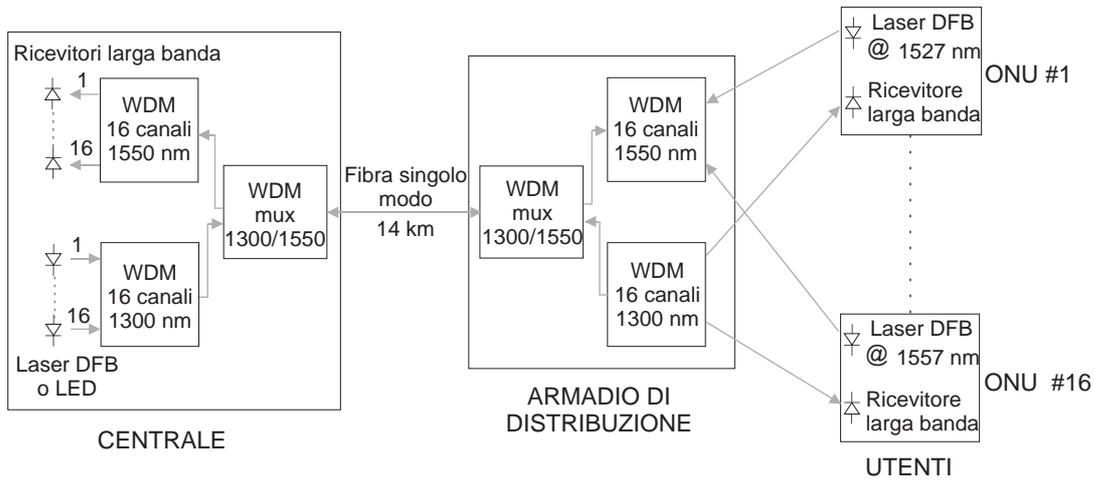


Figura 6 Rete PPL: realizzazione sperimentale (dimostratore B)

#### 4.1.2 Dimostratore B

Lo schema di questa seconda realizzazione sperimentale è rappresentato in fig. 6. Il numero di canali trasmessi è stato incrementato sfruttando entrambe le finestre trasmissive della fibra a 1300 nm e 1550 nm, massimizzando così l'uso della banda disponibile. In seconda finestra sono stati usati, per la trasmissione da centrale a utente, 16 canali spazati di 4 nm, utilizzando i rimanenti 16 canali in terza finestra spazati di 2 nm per la trasmissione in senso opposto. Le frequenze di cifra adottate e le distanze di trasmissione sono analoghe a quelle del dimostratore precedente.

E' da sottolineare il fatto che entrambi i dimostratori sono basati sull'uso di componenti disponibili commercialmente, allo scopo di dimostrare la fattibilità tecnico-economica per una rapida introduzione operativa in rete.

NxN del tipo a fibre fuse. Ogni nodo contiene un unico trasmettitore realizzato con un laser, che emette una predeterminata lunghezza d'onda. In questo modo, la lunghezza d'onda è anche parametro identificativo del canale. La stella di tipo "broadcast" consente di inviare tutti i segnali a tutti i nodi collegati alla rete. In ricezione, ogni nodo viene equipaggiato con un demultiplicatore di lunghezza d'onda a reticolo, che esegue la funzione di separazione dei canali, ed una schiera di ricevitori; in questo modo tutti i segnali vengono simultaneamente raccolti da ogni nodo. Si viene a creare una rete passiva, non-bloccante (non esistono possibili "contese" tra segnali tutti a lunghezza d'onda diversa), equivalente ad una rete completamente magliata. La natura "trasparente" dei componenti ottici utilizzati rende il tutto capace di trasportare indifferentemente segnali digitali o analogici, anche con banda molto estesa.

#### 4.2 LAMBDANET

Lo schema di principio della rete LAMBDANET, proposta da Bellcore, è illustrato in fig. 7 [2]. La topologia di rete è a stella ed è fisicamente realizzata da un accoppiatore

#### 4.3 RAINBOW

Lo schema di principio della rete RAINBOW [4], proposta da IBM, è illustrata in fig. 8. La topologia della rete è a "stella" e, come per la rete

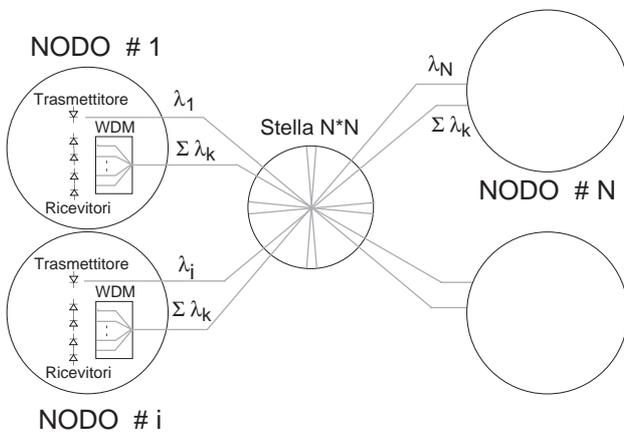


Figura 7 Rete LAMBDANET

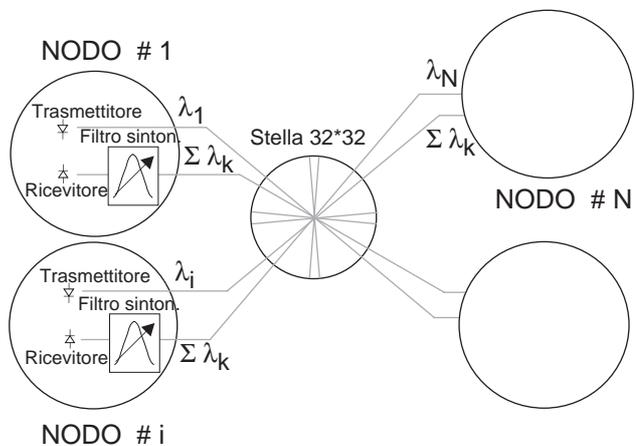


Figura 8 Rete RAINBOW

LAMBDANET, è realizzata mediante un accoppiatore  $N \times N$  del tipo a fibre fuse. Ogni nodo di rete è collegato alla stella tramite due fibre: la prima per la trasmissione, la seconda per la ricezione. Ogni trasmettitore utilizza un laser di tipo DFB che emette ad una determinata lunghezza d'onda (ad ogni nodo è associata una lunghezza d'onda diversa). La spaziatura tra i canali può essere di alcune frazioni di nanometro ( $10 \div 20$  GHz). La parte di ricezione di ogni nodo comprende un filtro ottico miniaturizzato, di tipo Fabry-Perot a fibra.

Nella rete RAINBOW il protocollo di trasmissione è di tipo WDMA (Wavelength Division Multiple Access): il trasmettitore che vuole instaurare una connessione emette una particolare richiesta; i ricevitori, quando non sono impegnati su un collegamento già esistente, eseguono una ricerca di tipo ciclico su tutta la banda ottica fino a che non trovano un segnale a loro destinato (il tempo di sintonizzazione è di circa 1 ms). Rispetto a protocolli tradizionali di tipo TDMA o CDMA, il WDMA presenta un grosso vantaggio: nessun circuito elettronico nella rete funziona a velocità maggiore della frequenza di cifra trasmessa.

## 5. Diffusione di segnali televisivi

Un'area di possibile applicazione, particolarmente interessante per le tecniche HDWDM, è quella relativa alla distribuzione di segnali televisivi (TV, HDTV) all'utenza residenziale.

Sebbene, per questo tipo di reti, appaia tuttora più conveniente l'utilizzo di tecniche a modulazione di sottoportante ("Sub-Carrier-Multiplexing", o SCM) [5], cioè tecniche di moltiplicazione elettrica di molte portanti (elettriche) modulate trasmesse su di un unico segnale ottico, bisogna tuttavia registrare l'esistenza di un gran numero di esperimenti volti a dimostrare la realizzabilità di sistemi con moltiplicazione

WDM. In effetti, l'utilizzo di molte lunghezze d'onda, coesistenti su di un'unica fibra senza problemi di disturbo reciproco, ben si presta alla trasmissione di un gran numero di segnali diffusivi affasciati su di un'unica rete ottica di distribuzione. In questo caso la topologia ad albero è quella che garantisce, a minor costo, la maggiore condivisione del mezzo trasmissivo tra gli utenti. In trasmissione si avranno tante sorgenti quanti sono i canali da affasciare, ognuna sintonizzata alla lunghezza d'onda assegnata al relativo canale. La selezione del canale da parte dell'utente avverrà tramite ricevitori che si avvalgono della rivelazione diretta con filtraggio ottico, ovvero della rivelazione eterodina. Questa applicazione non presenta requisiti di tempi di sintonia particolarmente veloci, e questo rende il ricevitore un po' più semplice e quindi meno costoso.

Tra le numerose dimostrazioni sperimentali realizzate ne ricordiamo 3 tra le più significative, tutte operanti con amplificatori ottici a fibre drogate con Erblio:

### - Rete WDM con canali televisivi digitali

La dimostrazione sperimentale, realizzata ai BT Laboratories, prevede la distribuzione di 160 canali televisivi PAL a 7203 utenti [6], secondo lo schema indicato in fig. 9. I segnali video sono codificati digitalmente e trasportati da portanti ottiche con spaziatura pari a circa 4 nm. È stata dimostrata la possibilità di espandere la rete fino a 384 canali per 5.6 milioni di utenti.

### - Rete WDM con canali televisivi analogici e digitali

La dimostrazione sperimentale, realizzata in Bellcore, prevede la distribuzione di 100 canali televisivi analogici (10 portanti ottiche, ognuna modulata da un diverso gruppo di 10 segnali analogici) e 6 canali digitali (ognuno associato a una diversa portante ottica) a 4096 utenti [7], secondo lo schema indicato in fig. 10. I segnali video sono trasportati sia da segnali codificati in forma digitale che da segnali multiplati analogicamente. La spaziatura tra i canali usata è pari a circa 1.5 nm.

### - Rete HDWDM con 100 canali digitali

La dimostrazione sperimentale, che prevede la distribuzione di 100 canali digitali a 622 Mbit/s

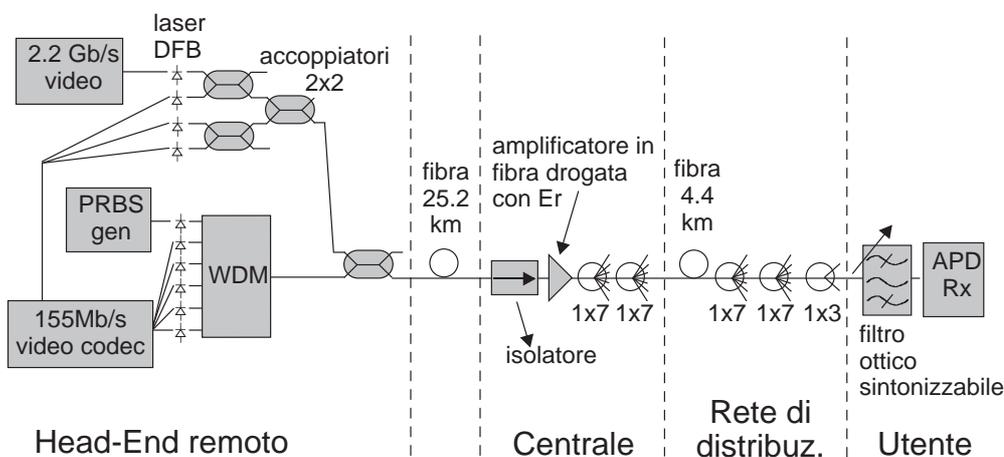


Figura 9 Rete WDM con 160 canali televisivi digitali distribuiti a 7203 utenti

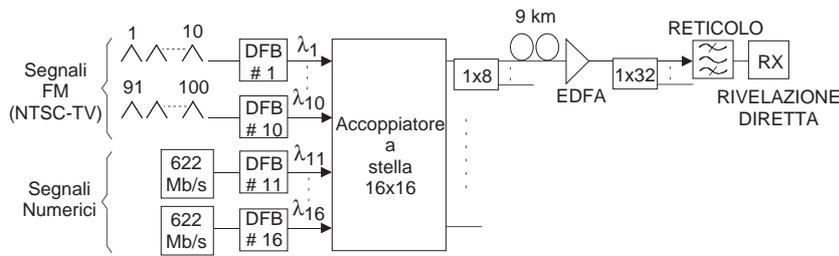


Figura 10 Rete WDM con 100 canali televisivi analogici e 6 canali televisivi digitali distribuiti a 4096 utenti

mediante una stella 128X128, è stato realizzato all'NTT [8] secondo lo schema indicato in fig. 11. I segnali utilizzati sono a 622 Mbit/s con modulazione FSK e rivelazione diretta mediante filtro ottico (interferometro Mach-Zhender in guida ottica). La spaziatura tra i canali è di 10 GHz ( $\approx 0.1$  nm).

### 6. Allocazione delle lunghezze d'onda

In vista dell'utilizzazione nella rete di distribuzione di molte lunghezze d'onda, assume fondamentale importanza il problema della "allocazione" di queste all'interno dello spettro ottico. Una normativa su questo argomento è richiesta da una serie di esigenze:

- *l'evoluzione*: una determinata scelta non deve precludere la possibilità di fornire sulla stessa rete nuovi servizi quando, per l'appunto, nasca la necessità di una sua espansione;
- *il costo*: l'uso dei componenti disponibili allo stato dell'arte deve poter garantire il conseguimento delle specifiche per la applicazione desiderata; inoltre, il costo dei componenti opto-elettronici può essere ridotto solo da adeguate economie di scala;
- *la manutenzione*: un appropriato intervallo di lunghezze d'onda deve essere destinato al controllo e alla manutenzione di rete, ad esempio, con tecniche di riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR); è auspicabile che queste funzioni vengano espletate in maniera non intrusiva, cioè non influenzino il traffico esistente sulla rete.

I sistemi di accesso basati su PONs attualmente in fase di sperimentazione fanno generalmente uso della "finestra"

intorno a 1310 nm per i servizi di tipo interattivo (bidirezionali, tipicamente POTS e N-ISDN) mentre la "finestra" intorno a 1550 nm viene destinata ai servizi di tipo distributivo (unidirezionali, tipicamente canali televisivi. Questa soluzione può essere identificata come "tradizionale". La banda della fibra non viene ancora sfruttata in modo particolarmente significativo. E' richiesto l'impiego di un accoppiatore ottico e di un componente WDM all'interno della Terminazione di Linea (LT), dal lato di centrale, e di ogni Terminazione di Rete, dal lato dell'utente.

In ambito di normativa ETSI esiste già una indicazione precisa (TM1-WG2), tendente ad assegnare la banda intorno a 1310 nm al traffico di tipo interattivo (almeno per la direzione che dall'utente va verso la centrale). Tale scelta viene sostenuta soprattutto con l'intendimento di far crescere il mercato potenziale dei diodi laser in II<sup>^</sup> finestra e quindi far diminuire il loro costo.

E' anche tendenza generale allocare nella banda intorno a 1550 nm il traffico distributivo nella direzione da centrale verso utente, allo scopo di trarre il massimo giovamento dall'utilizzo degli amplificatori ottici per questa applicazione.

La situazione si fa assai più complessa nel caso degli emergenti sistemi a larga banda (B-ISDN), per i quali si voglia applicare la tecnica di moltiplicazione WDM a più alto grado di densità.

All'interno del Programma RACE, che promuove la ricerca europea sui temi della rete a larga banda, sono nate le prime due proposte di allocazione delle lunghezze d'onda [9]. Entrambe sono basate sulla suddivisione delle due finestre principali di trasmissione in due semi-bande, centrate approssimativamente intorno a 1310 nm e 1550 nm, nella seguente maniera:

- I - semi-banda "1300-" : da 1270 a 1320 nm
- II - semi-banda "1300+" : da 1335 a 1385 nm
- III - semi-banda "1500-" : da 1400 a 1485 nm
- IV - semi-banda "1500+" : da 1500 a 1600 nm

Il contenuto delle due proposte è riassunto in tab. 1.

Con riferimento alle reti ottiche passive (PON), i laboratori BTL, che tra i primi ne hanno proposto l'applicazione in rete di distribuzione, hanno anche formulato una proposta di allocazione delle lunghezze d'onda; essa è riassunta in fig. 12. In questo caso vengono usate 2 fibre per ogni collegamento di utente.

Sulla prima fibra, nella direzione "downstream" (da centrale a utente), intorno a 1310 nm, vengono trasportati

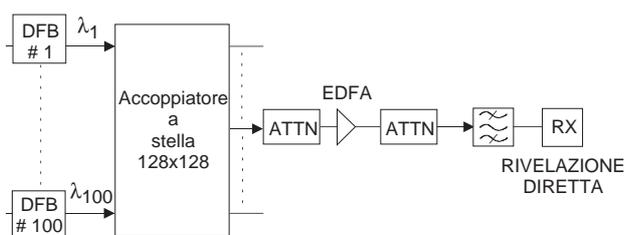


Figura 11 Rete WDM con 100 canali digitali a 622 Mbit/s distribuiti su stella ottica 128x128

semi-banda	Proposta A	Proposta B
1300-	ISDN upstream	ISDN upstream
1300+	TV upstream (segnalazione)	ISDN downstream
1500-	ISDN downstream	TV upstream (trasmissione)
1500+	TV downstream	TV downstream

Tabella 1 Proposte RACE per l'allocazione delle lunghezze d'onda

Lunghezza d'onda	Bit-rate	Servizi	Modo	Fattore di diramaz.
1280 nm	155 Mbit/s	APON (basata su ATM, dati alta veloc., due vie)	downstream	28
1300 nm	20 Mbit/s	TPON (telefonía e dati bassa velocità)	simplex duplex	112 56
1320 nm	2.2 Gbit/s	BPON (video digitale 32 canali)	broadcast	28
1340 nm	2.2 Gbit/s	BPON	broadcast	28
1510-1519 nm	155 Mbit/s	APON	upstream	28
1520-1600 nm	155 Mbit/s	singolo canale video commut.	downstream	28

Tabella 2 Proposta BTRL per l'allocazione delle lunghezze d'onda

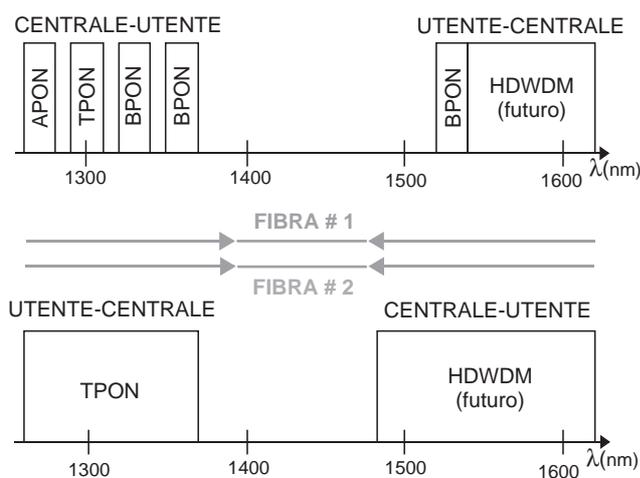


Figura 12 Allocazione delle lunghezze d'onda proposte da BTL

## 7. Tecnologie per HDWDM

Nei sistemi WDM più portanti ottiche con diversa lunghezza d'onda ( $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ), ognuna delle quali modulata con un diverso segnale, vengono trasmesse sulla stessa fibra; il trasmettitore multicanale WDM è quindi costituito da più sorgenti ottiche modulate indipendentemente. Il ricevitore consiste in un dispositivo in grado di selezionare le differenti lunghezze d'onda e di inviarle a rivelatori distinti.

Mentre la moltiplicazione (ossia la sovrapposizione di  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  nella stessa fibra) può essere realizzata in modo semplice utilizzando un combinatore (non selettivo in lunghezza d'onda), sia pure al prezzo di una perdita d'inserzione di almeno  $1/N$ , la demoltiplicazione è più critica, richiedendo necessariamente l'impiego di un dispositivo spettralmente selettivo. Va sottolineato che, poiché il demoltiplicatore va collocato presso l'utente, i problemi di costo e affidabilità sono particolarmente rilevanti.

I processi di demoltiplicazione possono essere effettuati utilizzando diversi tipi di dispositivi. I demoltiplicatori fin qui realizzati e disponibili commercialmente, ad esempio, sono generalmente basati sull'uso di filtri interferenziali o di accoppiatori direzionali selettivi, in fibra o in guida ottica. Con queste tecniche la spaziatura fra i canali è tipicamente di alcune decine di nm, per limiti propri delle tecnologie menzionate. Si tratta pertanto di una moltiplicazione a bassa densità, con numero di canali limitato ad alcune unità, adatta al più a consentire la trasmissione bidirezionale sulla stessa fibra, od un limitato incremento della capacità di sistemi già esistenti. Per la trasmissione multicanale a larga banda nella rete di distribuzione è invece verosimile che il numero dei canali da trasmettere sia molto maggiore ( $10 \div 100$ ). Ciò richiede la disponibilità di tecniche di moltiplicazione e demoltiplicazione adeguate.

Una tecnica di demoltiplicazione efficiente, sotto questo profilo, è quella basata sull'uso di un reticolo di diffrazione,

servizi APON (ATM-PON), TPON (Telephone-PON), BPON (Broadband-PON); nella direzione "upstream" (da utente a centrale), intorno a 1550 nm, vengono trasportati servizi APON e viene riservata la rimanente banda per futuri sistemi HDWDM. Sulla seconda fibra, nella direzione "upstream", intorno a 1310 nm, viene trasportato il servizio TPON; nella direzione "downstream" viene riservata la banda intorno a 1550 nm per futuri sistemi HDWDM.

In tab. 2 viene presentata una schematizzazione più completa della proposta BT [6], che include anche i "bit rate" ritenuti necessari per i vari servizi ed il "fattore di diramazione" che fornisce una indicazione della dimensione di ogni singolo sistema.

Per quanto riguarda la posizione degli USA, Bellcore sembra favorire la allocazione della banda di lunghezze d'onda intorno a 1310 nm per i servizi a banda stretta, lasciando la regione dei 1550 nm per i nuovi servizi emergenti. La allocazione proposta ricalca, in buona misura, la proposta B del RACE; l'evoluzione dei sistemi video digitali è ancora aperta verso i 1310 nm o i 1550 nm.

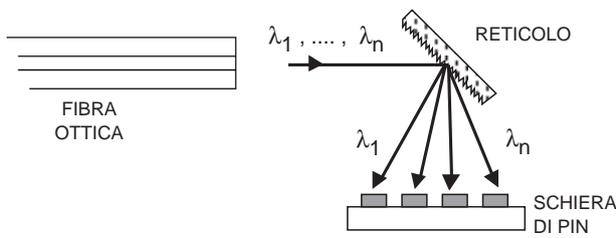


Figura 13 Demultiplicazione di un segnale HDWDM con reticolo e schiera di rivelatori

secondo lo schema di fig. 13. Le  $n$  lunghezze d'onda trasmesse vengono diffratte ad angoli diversi e individualmente rivelate da una schiera di  $n$  fotorivelatori (PIN, per semplicità), rendendo così contemporaneamente disponibili, alle uscite, gli  $n$  canali trasmessi. Per ridurre il costo di un simile demultiplicatore è fondamentale poter integrare la schiera di PIN ed i successivi stadi amplificatori in forma monolitica. Esistono già esempi di realizzazioni di questo tipo, fra cui un circuito integrato optoelettronico su Fosforo di Indio (InP) che include 8 PIN ed i relativi stadi amplificatori, per un totale di circa 80 componenti, che ne fanno il più complesso integrato optoelettronico fin qui realizzato su InP [10].

Il limite alla riduzione della spaziatura dei canali è determinato dal livello di diafonia fra canali adiacenti. Tale effetto dipende dalle caratteristiche di selettività del reticolo e dall'allargamento spettrale delle sorgenti ("chirping") sottoposte a modulazione diretta d'intensità. Difficilmente si può scendere, con questo approccio, a spaziature inferiori a  $1 \pm 2$  nm.

È possibile ridurre ulteriormente la spaziatura fra i canali facendo ricorso a filtri ottici particolarmente selettivi o alla rivelazione eterodina. In tal caso, si può scendere fino a valori dell'ordine di 0.1 nm, corrispondenti, in frequenza, a  $\approx 10$  GHz.

La realizzazione di spaziature così fini pone diversi problemi, sia dal punto di vista della modulazione che da quello della demultiplicazione. Anzitutto, non è più possibile utilizzare la modulazione diretta di intensità, dato che questo implica un allargamento dinamico dello spettro ("chirp") di alcuni decimi di nm, paragonabile o superiore alla spaziatura fra i canali. Diviene allora indispensabile ricorrere o ad un modulatore di intensità esterno, posto che esso sia privo di effetti di chirp, ovvero ad una modulazione con piccolo segnale, sfruttando in questo caso il chirp, cioè lo spostamento della frequenza, come effetto utile per trasmettere informazione. La prima soluzione è più costosa, perché richiede un dispositivo in più, che comporta, inoltre, perdite addizionali di diversi dB. Col secondo approccio si ottiene invece, in modo molto semplice, una modulazione in frequenza (FM), che può essere di tipo analogico o di tipo numerico (FSK), a seconda delle applicazioni; occorre prevedere quindi, presso il ricevitore, qualche sistema in grado di discriminare la frequenza.

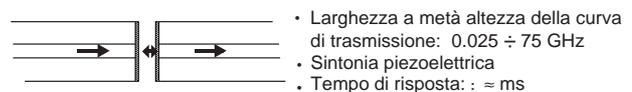
Dal punto di vista del ricevitore, è necessario disporre di un dispositivo o, più in generale, di una tecnica in grado di

selezionare canali collocati a  $\approx 0.1$  nm l'uno dall'altro. Questo obiettivo può essere raggiunto in due modi diversi: se la rivelazione è diretta, occorre un filtro ottico ad altissima risoluzione; se la rivelazione è eterodina la funzione filtrante è già implicita nel ricevitore, ed è estremamente efficace essendo effettuata a frequenza intermedia.

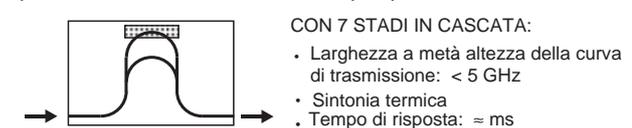
In caso di rivelazione diretta, una adeguata selettività può essere raggiunta, ad esempio, con risonatori Fabry Perot in fibra o in guida, con filtri interferenziali in guida ottica, o anche con strutture laser DFB usate sotto soglia come amplificatori selettivi. Le caratteristiche di alcuni di questi filtri, ricavate dalla letteratura, sono riportate in fig. 14. Dato che la funzione di trasferimento di questi dispositivi ha generalmente una forma a campana, è possibile usare il bordo di tali filtri, nella regione di miglior linearità, per ottenere allo stesso tempo anche la funzione di discriminazione di frequenza. Si noti che, in questo caso, la modulazione di frequenza delle sorgenti (ad esempio FSK) può efficacemente coesistere con la rivelazione diretta e con selezione del canale eseguita mediante filtro ottico. Si noti ancora che, a differenza del demultiplicatore a reticolo di diffrazione, i filtri sopra citati consentono di selezionare un solo canale per volta (in pratica, trasmettono una lunghezza d'onda e riflettono le altre).

In alternativa ai sistemi a rivelazione diretta con filtraggio ottico del canale, i sistemi con rivelazione eterodina [11] rappresentano il modo forse più sofisticato per realizzare una ridotta spaziatura fra i canali. Più portanti ottiche, modulate indipendentemente, vengono inviate sulla stessa fibra; al lato ricevitore il terminale comprende un laser sintonizzabile (oscillatore locale) che consente di selezionare il canale desiderato (fig. 15). La struttura del ricevitore risulta così più complessa di quella di un ricevitore a rivelazione diretta, in quanto sono richiesti, per ogni terminale d'utente, un laser sintonizzabile, un miscelatore ottico ed un sistema di aggancio e di stabilizzazione della frequenza.

**a) RISONATORE FABRY-PEROT IN F.O. (AT&T)**



**b) FILTRO INTERF. IN GUIDA OTTICA (NTT)**



**c) FILTRO/AMPLIFICATORE DFB (NTT, NEC)**

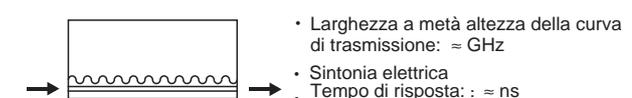


Figura 14 Filtri ottici sintonizzabili

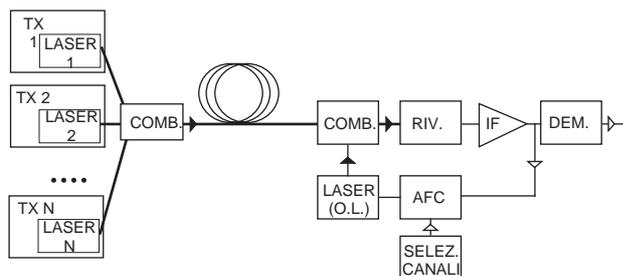


Figura 15 Sistema coerente multicanale

La realizzazione di sistemi ottici multicanale ad alta densità pone alcuni problemi specifici.

Il laser utilizzato deve essere a singolo modo longitudinale e, nel caso di rivelazione eterodina, la larghezza di riga del laser deve essere una frazione della frequenza di cifra, variabile da  $10^{-1}$  a  $10^{-4}$ , a seconda del tipo di modulazione e demodulazione. La larghezza di riga dei laser DFB attualmente disponibili commercialmente è nel migliore dei casi di  $\approx 10$  MHz. I sistemi più tolleranti sono, da questo punto di vista, quelli di tipo FSK, che accettano larghezze di riga relative del 10%; questo spiega l'ampia diffusione di questo tipo di modulazione nelle sperimentazioni realizzate in molti laboratori [12].

Data la piccola separazione fra i canali, un problema importante è quello della stabilizzazione in frequenza (relativa e/o assoluta) della lunghezza d'onda delle sorgenti, cui si oppongono le fluttuazioni della temperatura e le lente derive dovute all'invecchiamento dei componenti.

Per le applicazioni più avanzate possono essere richieste stabilità delle frequenze portanti entro alcune centinaia di MHz. Poiché la stabilità in frequenza dei diodi laser è limitata dalle fluttuazioni termiche e dall'invecchiamento, sono state sviluppate diverse tecniche di stabilizzazione, sia della spaziatura fra più portanti, generalmente basate sull'uso di risonatori ottici, sia del valore assoluto della frequenza di emissione, mediante aggancio alla riga di assorbimento di un gas [13].

Come già osservato in precedenza, sono di particolare interesse per la loro semplicità ed efficacia i sistemi con modulazione FSK, basati sulla modulazione diretta della frequenza del laser. Sfortunatamente, la tipica risposta dei laser DFB alla modulazione in frequenza è assai poco uniforme, specie a bassa frequenza, il che introduce pesanti penalità. Il problema può essere risolto con un circuito di equalizzazione o con l'adozione di codici (AMI, CMI) che conferiscano al segnale di linea un ridotto contenuto di energia alle basse frequenze. Una soluzione radicale è attesa dalla commercializzazione dei laser DFB o DBR multielettrodo (fig. 16), che dovrebbero presentare una risposta FM più uniforme.

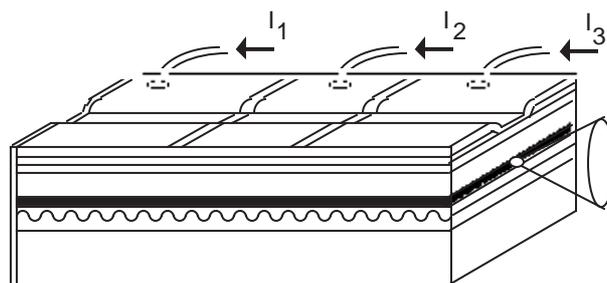


Figura 16 Laser DFB multielettrodo

Un problema particolare presente nel caso di rivelazione eterodina è originato dall'esigenza che lo stato di polarizzazione del segnale ottico ricevuto coincida con quello dell'oscillatore locale: le inevitabili fluttuazioni introdotte dal collegamento in fibra possono distruggere questa condizione, fino a portare alla scomparsa totale del segnale. Possibili soluzioni prevedono l'impiego di ricevitori con struttura complessa (diversità di polarizzazione [14] o controllo automatico della polarizzazione [15]), efficienti ma non del tutto compatibili con l'esigenza, propria della rete di distribuzione, di semplicità e basso costo del ricevitore presso l'utente; ovvero l'uso di fibre a mantenimento della polarizzazione, praticamente improponibile, tuttavia, allo stato attuale per il costo elevato e la maggiore attenuazione delle medesime, rispetto alle normali fibre singolo modo. Una soluzione alternativa [16] consiste nel commutare velocemente, entro il singolo bit, lo stato di polarizzazione del segnale trasmesso, in modo che, qualunque sia la fluttuazione introdotta dalla fibra, metà della potenza trasmessa sia sempre ricevuta (fig. 17). Al prezzo di una relativamente modesta riduzione di potenza si ottiene quindi un sistema molto "robusto", rispetto alle fluttuazioni di polarizzazione, in cui l'unica complessità viene inglobata nei trasmettitori (in numero limitato), mentre i ricevitori (in numero molto elevato, nella rete di distribuzione) possono mantenere la struttura più semplice ed economica possibile.

Il limite ultimo al massimo numero di canali che si possono rendere disponibili all'utente è determinato dalla possibilità di sintonizzare il filtro ottico o l'oscillatore locale su un intervallo di lunghezze d'onda il più esteso possibile. Nel caso dei filtri Fabry Perot o dei filtri interferenziali precedentemente citati, è possibile la sintonia su intervalli di  $100\div 1000$  volte rispetto alla larghezza di banda del filtro stesso; ad esempio, è possibile ottenere filtri con risoluzione di  $0.1$  nm, sintonizzabili su più di  $10$  nm. Si possono, in questo modo, realizzare sistemi con diverse decine di canali. Con laser DFB convenzionali, usati sotto soglia come amplificatori/filtri o sopra soglia come oscillatori locali, la sintonia può essere

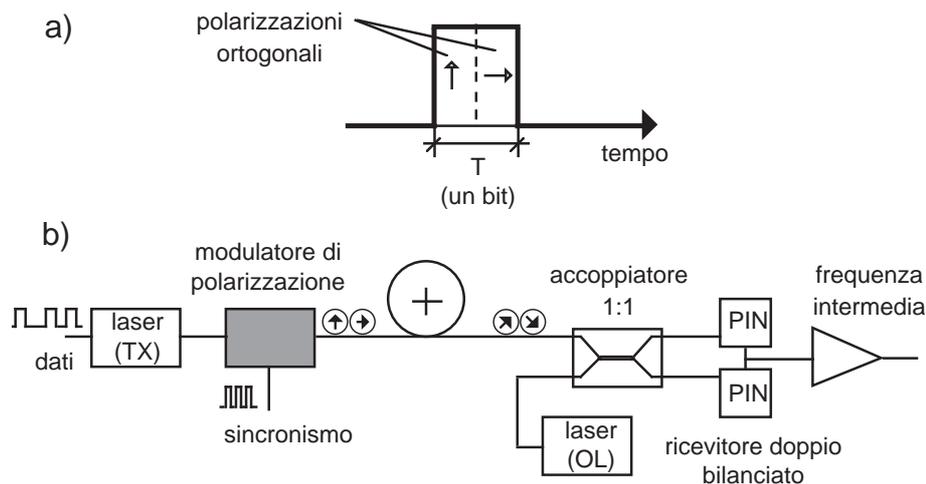


Figura 17 Sistema con rivelazione eterodina e commutazione di polarizzazione: a) principio, b) schema del collegamento

eseguita variando la temperatura del dispositivo (il coefficiente di variazione della frequenza con la temperatura è dell'ordine di 10 GHz/°C); tale metodo è tuttavia intrinsecamente lento. La frequenza può essere fatta variare efficientemente modificando la corrente di iniezione (coefficiente:  $\approx 10$  GHz/mA sotto soglia,  $\approx 1$  GHz/mA sopra soglia); in tal caso, però, variano anche potenza emessa e larghezza di riga, in modo tale che difficilmente si può ottenere un intervallo di sintonia maggiore di 0.3÷0.4 nm (corrispondente a 3-4 canali). L'introduzione di laser DFB o DBR a più elettrodi (fig. 16) dovrebbe consentire di estendere l'intervallo di sintonia a diversi nm, cioè a qualche decina di canali.

In termini di selettività non esistono grosse differenze, allo stato attuale, fra sistemi a rivelazione diretta con filtro ottico e sistemi a rivelazione eterodina: in entrambi i casi sono possibili selettività fino a circa 0.1 nm. La rivelazione eterodina consente tuttavia di poter sagomare la forma del filtro (un circuito elettronico che opera a frequenze intermedie di 1÷10 GHz) in modo ottimale, dal punto di vista della attenuazione della diafonia; più difficile è, invece, ottenere una risposta spettrale "squadrate" da un filtro ottico. Per quanto riguarda la struttura del ricevitore, i sistemi multicanale a rivelazione diretta sono concettualmente più semplici; richiedono, tuttavia, l'uso di filtri ottici abbastanza sofisticati, attualmente disponibili solo in forma discreta e, quindi piuttosto costosa.

In entrambi i casi, la prospettiva di una possibile introduzione commerciale passa forzatamente attraverso l'integrazione optoelettronica, specie nel ricevitore, per ridurre i costi. Da questo punto di vista, a parità di condizioni, non è detto che l'integrazione di un ricevitore a rivelazione diretta con filtro ottico sia necessariamente molto più semplice di quella di un

ricevitore eterodina: se, ad esempio, si utilizza un filtro di tipo DFB (che più di altri risonatori si presta ad una integrazione in forma planare), occorre in pratica integrare una struttura laser, del tutto simile all'oscillatore locale richiesto per il ricevitore eterodina. Nel bilancio complessivo occorre anche mettere in conto la miglior sensibilità di quest'ultimo.

## 8. Amplificazione Ottica

L'amplificatore ottico si inserisce nella rete in tutti i casi in cui si debbano compensare attenuazioni rilevanti introdotte dalla linea o dall'inserimento di dispositivi passivi. Si tratta quindi di una funzione fondamentale, ad esempio, nella rete di distribuzione, là dove l'uso di divisori di potenza, accoppiatori, filtri, ecc. penalizza pesantemente il bilancio di potenza dei collegamenti. In particolare, in un contesto distributivo, le tecniche di moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda possono trarre notevole vantaggio dalla presenza in rete di questi componenti, in grado di operare su regioni spettrali sufficientemente ampie da consentire la trasmissione di molti o moltissimi canali ad un numero elevato di utenti.

In effetti, l'amplificatore ottico può essere idealmente visto come un dispositivo praticamente "trasparente" rispetto alle caratteristiche del segnale trattato e della rete in cui è inserito, essendo la sua funzione primaria unicamente quella di fornire in uscita una replica amplificata del segnale ottico presente al suo ingresso: per questo, ad esempio, può essere impiegato sia nei sistemi a rivelazione diretta e modulazione di intensità che nei sistemi coerenti a modulazione di frequenza, in cui l'ampiezza del segnale è costante. Nelle

reti di distribuzione gli amplificatori ottici, compensando le perdite per diramazione, consentono di aumentare il numero degli utenti connessi [17].

L'amplificazione ottica può essere ottenuta utilizzando due diverse tecnologie:

- *amplificatori a semiconduttore* (fig. 18): si tratta essenzialmente di diodi laser le cui faccette sono state opportunamente trattate per ottenere bassissime riflettività; altri accorgimenti possono essere introdotti per ridurre ulteriormente la riflettività residua (striscia inclinata, finestre antiriflesso), per ottenere un comportamento indipendente dallo stato di polarizzazione (struttura guidante simmetrica), per aumentare la potenza di saturazione (materiale attivo "Multi-Quantum-Well").
- *amplificatori a fibra attiva* (fig. 19): si tratta di spezzoni di fibre ottiche singolo modo drogate con additivi appartenenti al gruppo delle terre rare (erbio, neodimio), che, pompate da un laser esterno, operante ad una lunghezza d'onda inferiore, possono dar luogo ad emissione stimolata e quindi ad amplificazione del segnale di ingresso. Il fatto di utilizzare una struttura amplificante in fibra ottica consente perdite di accoppiamento trascurabili e indipendenza dallo stato di polarizzazione del segnale.

I dispositivi appartenenti ad entrambe le categorie possono essere utilizzati come amplificatori di linea, come preamplificatori a monte del fotorivelatore o come amplificatori "booster" per incrementare la potenza d'uscita della sorgente. Entrambe le soluzioni, a semiconduttore e a fibra, hanno ormai raggiunto la maturità tecnologica, e sono disponibili commercialmente. Sulla base delle conoscenze attuali gli amplificatori ottici a fibra attiva risultano superiori rispetto a quelli a semiconduttore in termini di guadagno utile, potenza di

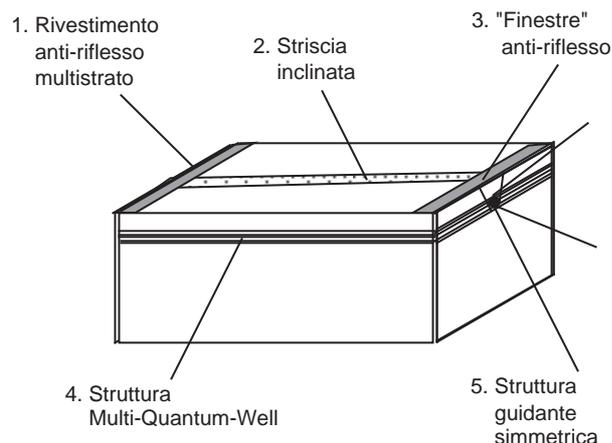


Figura 18 Amplificatore ottico a semiconduttore e possibili accorgimenti intesi a migliorarne le prestazioni

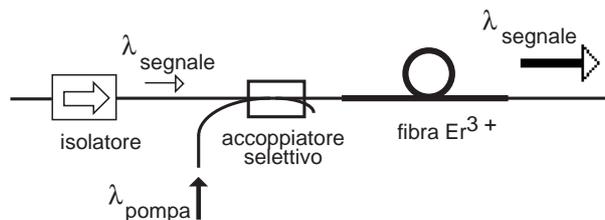


Figura 19 Amplificatore ottico a fibra attiva

saturazione, insensibilità alla polarizzazione, rumore, diafonia (nei sistemi multi-canali); per contro, gli amplificatori a semiconduttore risultano più piccoli, possono essere integrati con altri componenti a semiconduttore (sorgenti e ricevitori), non richiedono altri componenti esterni (pompa, accoppiatore) e sono potenzialmente meno costosi; le caratteristiche migliori ottenibili da queste famiglie di dispositivi sono confrontate in tab. 3. I dispositivi commerciali possono avere prestazioni inferiori, od essere ottimizzati solo relativamente ad alcuni specifici parametri.

Sono già numerose le dimostrazioni sperimentali utilizzando amplificatori ottici in reti multi-canali. A titolo di esempio, oltre alla già citata dimostrazione di fattibilità di un sistema a 100 canali, con impiego di un unico amplificatore a fibra drogata con Erblio [8], si può ricordare un altro, significativo esperimento realizzato in Giappone da NTT, che ha dimostrato la possibilità di raggiungere 65536 utenti con 40 canali televisivi NTSC a modulazione d'ampiezza e 7 canali televisivi HDTV a modulazione di frequenza [18].

	DIODO LASER	FIBRA Er <sup>3+</sup>
Guadagno interno (dB)	30	45
Guadagno fibra-fibra (dB)	22	40
Ondulazioni in banda (dB)	1	0
Differenza di guadagno TE/TM (dB)	0.5	0.5
Larghezza di banda (nm)	30 ÷ 40	30
Potenza di saturazione (dBm)	-5 ÷ 15	20
Cifra di rumore (dB)	6	3.5
Intermodulazione	alta	bassa

Tabella 3 Migliori prestazioni degli amplificatori ottici

## Bibliografia

- [1] Brackett, C.A.: *Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications*. «IEEE Journal on Selected Areas in Communications», Vol. 10, n. 6, Oct. 1990.
- [2] Wagner, S.S.; Kobrinski, H.: *WDM applications in broadband telecommunications*. «IEEE Communication Magazine», Mar. 1992.
- [3] Lemberg, H.L.: *Passive Optical Networks*. OFC'92, Short Course 125, Feb. 1992.
- [4] Miller, G. K.: *The RAINBOW network*. Lightwave, Mar. 91.
- [5] Wagner, R.E.: *Multichannel Lightwave Network*. OFC'92, Short Course 109, Feb. 1992.
- [6] Hill, G.R.: *Wavelength domain optical network technique*. «Proc.IEEE», Vol.77, n. 1, Jan. 1989, pp.121-132.
- [7] Way, W. et al.: *Simultaneous distribution of multichannel analog and digital video channels to multiple terminals using high-density WDM and a broadband in-line Erbium doped fiber amplifier*. «IEEE Photonic Technology Letters», Vol. 2, n. 9, pp. 665-668, 1990.
- [8] Inoue, K.; Toba, H. et al.: *100-channel common amplification using an Er<sup>3+</sup> doped fiber amplifier*. Proc. of Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting, Monterey, Aug. 1990, paper TuA3.
- [9] *RACE Common Functional Specifications*. Issue A, doc. 5, IBC ACCESS, p. E330/4-6, Dec. 1990.
- [10] Lee, W.S. et al.: *Monolithic Eight-Channel Photoreceiver Array OEICs for HDWDM applications at 1.55 μm*. «Electronics Letters», Vol. 28, 26 Mar. 1992.
- [11] Bachus, E.J.; Braun, R.P. et al.: *Coherent optical multicarrier systems*. «IEEE Journal on Lightwave Technology», Vol.LT-7, n. 2, Feb. 1989, pp. 375-384.
- [12] Vodhanel, R.S. et al.: *FSK Heterodyne Transmission Experiments at 560 Mbit/s and 1 Gbit/s*. «Journal of Lightwave Technology», Vol.LT-5, n. 4, April 1987, pp. 461-468.
- [13] Vezzoni, E.; Gambini, P.; Puleo, M.: *Laser frequency stabilisation techniques for optical communications*. Proc. 16th ECOC, Amsterdam, Sept. 16-20, 1990, Vol. 2, pp. 943-950.
- [14] Gance, B.: *Polarisation independent coherent optical receiver*. «IEEE Journal on Lightwave Technology», Vol. LT-5, n. 2, Feb. 1987, pp. 274-276.
- [15] Walker, N.G.; Walker, G.R.: *Polarisation control for coherent optical fibre systems*. «British Telecom Technol. Journal», Vol. 5, n. 2, Apr. 1987, pp. 63-76.
- [16] Marone, G.; Poggiolini, P.; Vezzoni, E.: *Polarisation independent detection by synchronous intra-bit polarisation switching in optical coherent systems*. Proc.ICC'90, Atlanta, 1990, paper 345.3.
- [17] Hill, A.M.; Payne, D.B. et al.: *High capacity broadcasting in the local loop with an EDFA amplifier*. Proc. 1st IEEE Workshop on PON's, London, May 1990, 8.2/1.
- [18] Kikushima, K.; Yoneda, E. et al.: *Simultaneous distribution of AM/FM FDM TV signals to 65536 subscribers using 4 stage cascade EDFAs*. Proc. of Optical Amplifiers and their Applications Topical Meeting, Monterey, Aug. 1990, paper WB1.

## Abbreviazioni ed acronimi

AMI	Alternate Mark Inversion
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network
BPON	Broadband Passive Optical Network
BTRL	British Telecom Research Laboratories
CDMA	Code Division Multiple Access
CMI	Code Mark Inversion
DBR	Distributed Bragg Reflector
DFB	Distributed Feedback
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
FTTH	Fiber To The Home
HDTV	High Definition Television
HDWDM	High Density Wavelength Division Multiplexing
HPPL	Hybrid Passive Photonic Loop
IBM	International Business Machines
LED	Light Emitting Diode
LT	Line Termination
N-ISDN	Narrowband Integrated Services Digital Network
NTSC	National Television System Committee
NTT	Nippon Telephone & Telegraph
ONU	Optical Network Unit
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
PAL	Phase Alternation Line
PON	Passive Optical Network
POTS	Plain Ordinary Telephone Service
PPL	Passive Photonic Loop
RACE	Research and development in Advanced Communication technologies in Europe
SCM	Sub-Carrier Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TPON	Telephone Passive Optical Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WDMA	Wavelength Division Multiple Access