

Reti a commutazione di circuito

ORA facciamo un passo indietro rispetto al capitolo precedente, andando a rianodare la storia a partire dal punto in cui le reti telefoniche si sono iniziate a sviluppare, che per prime si sono trovate a dover coniugare gli aspetti legati alla teoria del traffico con le tecnologie che via via si rendevano disponibili.

Dopo aver definito natura e scopo delle reti *di accesso* e *di trasporto*, ed aver sottolineato le differenze tra la moltiplicazione temporale di tipo *statistico* delle reti per dati e quella *deterministica* dei sistemi basati su trame e sulla commutazione di circuito, si ripercorre lo sviluppo delle reti dette appunto *a circuito*, dalla rete *plesiocrona* e la gerarchia PDH fino a quella *sincrona* o SDH, assieme alle diverse modalità di gestire la segnalazione, l'inserimento di tributari, la sincronizzazione, la struttura di trama ed i formati dei contenitori. Si affrontano quindi argomenti di natura *topologica*, ovvero di come i nodi della rete sono disposti sul territorio, definendo la natura dei dispositivi che operano su reti SDH basate su fibra ottica. Per ultimo viene affrontato il tema della *commutazione*, ovvero la funzione primaria dei nodi della rete che devono smistare le comunicazioni in transito attraverso instradamenti differenti, utilizzando matrici multistadio di commutazione spaziale, eventualmente corredate da elementi di commutazione temporale nei sistemi di moltiplicazione organizzati in trame.

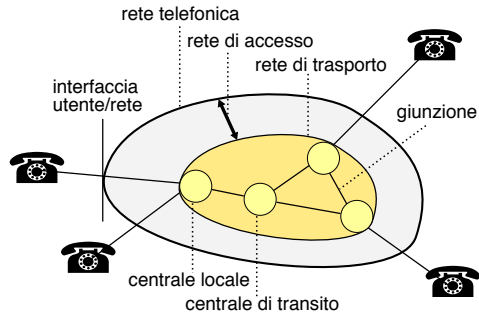
24.1 Introduzione

Rispetto ai collegamenti *punto-punto* in cui una unica sorgente informativa comunica con un unico destinatario, è assai più frequente il caso in cui i soggetti coinvolti affidano la comunicazione ad una *rete* di collegamento, consegnando il messaggio al *nodo* di commutazione a cui hanno accesso. Una volta individuato un percorso di *attraversamento* che coinvolga i nodi della rete più opportuni il messaggio giunge al destinatario, grazie anche all'impiego di informazioni addizionali dette *di segnalazione*.

Le nozioni che seguono fanno esplicito riferimento alle *reti di telefonia* per come si sono evolute a partire dalla fine dell'800, dette anche a *commutazione di circuito*. Gli aspetti legati alle *reti di trasmissione dati* che si sono sviluppate *durante e dopo* tale evoluzione sono sviluppati al cap. 23.

24.1.1 Elementi della rete telefonica

Con riferimento alla figura, discuteremo innanzitutto dei metodi di *multiplazione* che permettono alle diverse comunicazioni che terminano presso le *interfacce utente/reti* di essere aggregate da parte delle *centrali locali* per utilizzare un medesimo *collegamento di giunzione* interno alla *rete di trasporto*. Quindi, al § 24.8 esamineremo i metodi di *commutazione ed instradamento* con cui viene individuato il percorso che una comunicazione deve intraprendere tra l'ingresso e l'uscita dalla rete di trasporto.



24.1.2 La rete di accesso

È la parte più rilevante e *pesante* della rete, e consiste nel *doppino* in rame (pag. 646) che raggiunge la presa telefonica casalinga. All'interfaccia utente/reti sono così resi disponibili i *servizi* noti nel loro insieme come

- POTS (*Plain Old Telephone Service*) - vedi § 24.9.1;
- ISDN (*Integrated Service and Data Network*) - vedi § 24.9.2;
- ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) - che in realtà usa POTS solo come tramite per raggiungere una *rete IP* vedi § 24.9.4.

Oltre a questi, nella rete di accesso sono contemplate forme di collegamento anche diverse dal cavo, come

- accesso ottico - come per l'FTTH (vedi § 19.3.4.3), permettendo
 - di interconnettere un insieme più numeroso di collegamenti POTS già multiplati assieme, come nel caso di un grosso centralino aziendale, sovrappo-
nendosi allo scopo di un accesso ISDN-PRI;
 - di interconnettersi ad una rete IP ad una velocità maggiore di quella consentita dalla tecnologia ADSL;
- accesso radio
 - GSM¹ - noto anche come sistema cellulare di seconda generazione², usa una rete diversa da PSTN, ma vi si interconnette in modo naturale. Il GSM nasce come standard aperto, favorendone la diffusione mondiale e l'interoperabilità tra gestori (*roaming*), e si sviluppa in forma completamente numerica, sia per la codifica vocale (pag. 296), che per il meccanismo di accesso multiplo al mezzo trasmissivo³, che adotta una organizzazione in

¹http://it.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications

²La prima generazione si riferisce al sistema analogico TACS <http://it.wikipedia.org/wiki/TACS>

³http://en.wikipedia.org/wiki/Time_division_multiple_access

- trame; inoltre, ha introdotto la comunicazione dei messaggi SMS⁴;
- GPRS⁵ e UMTS⁶ - mentre il primo (detto di *generazione 2.5*) usa la rete GSM per trasmettere dati a pacchetto, con velocità dell'ordine di 30-70 kbps, il secondo (detto anche di *terza generazione* o 3G) supporta in modo integrato sia le comunicazioni vocali, che i dati a pacchetto, con velocità dell'ordine dei 300 kbps, che salgono (teoricamente) a 3 e 14 Mbps con le estensioni UMTS 2+ e HSDPA rispettivamente;
 - WiFi⁷ e WiMax⁸ - mentre il primo distribuisce l'accesso ADSL su di un'area di estensione casalinga, il secondo ha una copertura di qualche chilometro, e permette collegamenti in mobilità. Entrambi permettono l'interconnessione ad un *Internet Service Provider* o ISP.

Altri tipi di offerte invece *non possono* essere considerate di accesso alla rete, pur se realizzate sfruttando sia la rete di accesso che quella di trasporto, come nel caso di

- CDN (*Circuito Diretto Numerico*) - offre la connettività diretta e continuativa con un'altra (ben specifica) interfaccia utente/rete, e pertanto viene a mancare la componente di commutazione;
- VPN (*Virtual Private Network*) - come sopra, con la differenza che in questo caso la connettività è basata su di una comunicazione a pacchetto anziché a circuito.

24.2 Multiplazione

Il principio di raggruppare assieme più comunicazioni dirette alla medesima destinazione, in modo che condividano uno stesso mezzo trasmissivo, permette di

- tentare di occupare tutta la banda messa a disposizione dal mezzo trasmissivo;
- massimizzare la percentuale di utilizzo del mezzo, nel caso di sorgenti non continuamente attive (vedi § 22.3.4);
- semplificare la gestione e la manutenzione dei collegamenti a lunga distanza, essendo questi minori in numero.

Le tecniche di multiplazione possono operare secondo le modalità di

- *divisione di frequenza e di lambda* - ogni comunicazione usa una banda di frequenze diversa, come descritto al § 11.1.1 nel contesto dello studio dei segnali modulati, oppure al § 19.3.3.2 in quello della trasmissione su fibra ottica;
- *divisione di tempo* - ciascuna comunicazione avviene in intervalli di tempo diversi da quelli delle altre, facendo uso di canali numerici: viene affrontata nel resto di questo capitolo;

⁴<http://it.wikipedia.org/wiki/SMS>

⁵http://it.wikipedia.org/wiki/General_Packet_Radio_Service

⁶http://it.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System

⁷<http://it.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>

⁸<http://it.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

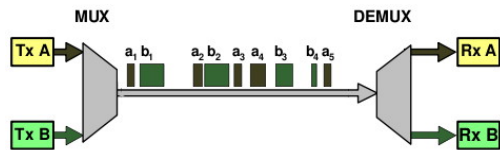
- *divisione di codice* - tutte le comunicazioni usano la stessa banda allo stesso tempo, ma ogni diverso destinatario è ancora in grado di distinguere il proprio messaggio, in virtù della *ortogonalità* tra i codici utilizzati (vedi § 7.6.2), come nella trasmissione *a spettro espanso* (§ 16.9);
- *divisione di spazio* - come nei sistemi *multiantenna* (cap. 21) che sfruttano la diversità di risposta in frequenza che si verifica sotto opportune condizioni.

24.2.1 Multiplazione a divisione di tempo

E' una modalità praticabile solo per segnali di natura *numerica*. Mentre per segnali campionati l'approccio è stato quello illustrato ai §§ successivi, per i segnali *dati* la tecnica di multiplazione è sempre stata basata sull'uso di un *pacchetto dati* (vedi § 22.5.1), attuando uno schema detto

Multiplazione statistica e commutazione di pacchetto In questo caso il mezzo trasmissivo non è impegnato in modo esclusivo, ma la trasmissione può avvenire in forma sporadica, ed i dati inviati ad intervalli irregolari. Questo motivo, assieme alla dimensione variabile delle singole comunicazioni, porta a suddividere la comunicazione in unità autonome indicate come pacchetto dati.

La multiplazione dei pacchetti avviene in modo *statistico*, senza riservare risorse a questo o quel tributario: il multiplatore si limita ad inserire i pacchetti ricevuti in apposite code, da cui li preleva (con un *bit rate* maggiore) per poterli trasmettere in sequenza, attuando una modalità di trasferimento *orientata al ritardo* (vedi § 22.4). La presenza di code comporta



- il determinarsi di un ritardo variabile ed imprevedibile
- la possibilità che la coda sia piena, ed il pacchetto in ingresso venga scartato

D'altra parte ogni pacchetto contiene le informazioni necessarie al suo recapito, facilitando l'instradamento (vedi § 24.7). A seconda dell'adozione di un principio di commutazione di tipo *a circuito virtuale* oppure a *datagramma* (vedi § 22.5.2.2), può essere presente o meno una *fase di setup* precedente l'inizio della comunicazione.

Multiplazione deterministica e commutazione di circuito La modalità usata nella rete telefonica è invece basata su di uno schema di multiplazione *con organizzazione di trama* (vedi § 22.5.2.1) e che determina un paradigma noto come *commutazione di circuito*, per il motivo che ora illustriamo.

Alle origini storiche della telefonia, nell'epoca dei telefoni *a manovella*, con la cornetta appesa al muro, la commutazione veniva effettuata *manualmente* da parte di un centralinista umano, che creava un vero e proprio *circuito elettrico* collegando fisicamente tra loro le terminazioni dei diversi utenti. Nel caso



in cui intervengano più centralinisti in cascata, la chiamata risulta instradata attraverso più centralini. Da allora, il termine commutazione di circuito individua il caso in cui

- è necessaria una fase di *setup* precedente alla comunicazione vera e propria, in cui vengono riservate le risorse;
- nella fase di setup si determina anche l'*instradamento* della chiamata nell'ambito della rete, che rimane lo stesso per tutta la durata della medesima;
- le risorse trasmissive restano impegnate in *modo esclusivo* per l'intera durata della conversazione.

Le cose non sono cambiate di molto (da un punto di vista concettuale) con l'avvento della telefonia numerica: in tal caso, più segnali vocali sono campionati e quantizzati in modo sincrono, ed il risultato (numerico) è moltiplicato in una *trama PCM* (§ 24.3.1), in cui viene riservato un intervallo temporale per ognuno dei flussi tributari.

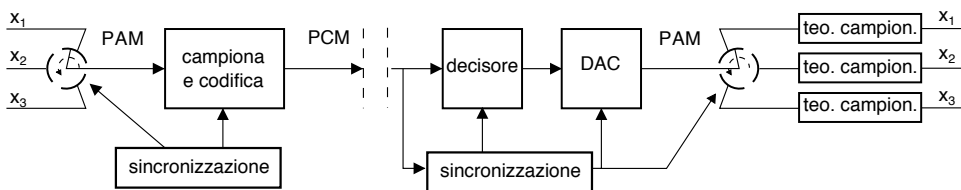
Ad ogni buon conto, si noti che un risultato della teoria del traffico (pag. 777) mostra come l'adozione di una strategia *orientata al ritardo* migliora notevolmente l'efficienza di utilizzo del mezzo stesso.

24.3 Rete plesiocrona

Questo termine si riferisce alla modalità di funzionamento quasi-sincrona adottata dalle centrali telefoniche, almeno finché la rete di trasporto non è divenuta capace di realizzare una modalità di moltiplicazione sincrona (§ 24.4). In entrambi i casi, i segnali vocali sono trasportati in forma numerica, moltiplicandone i campioni a divisione di tempo in modo deterministico, in accordo ad una organizzazione di trama realizzata presso la centrale di accesso, come descritto di seguito.

24.3.1 Trama PCM

Nella figura seguente sono rappresentati tre segnali *tributari*, campionati a turno alla stessa frequenza di 8 KHz, quantizzati ad 8 bit per campione con quantizzazione logaritmica (vedi § 4.3.2), e trasmessi (8 bit alla volta⁹) a turno su di un unico collegamento, producendo un segnale binario che prende il nome di PCM (*Pulse Code Modulation*¹⁰). In figura è evidenziato inoltre un blocco di sincronizzazione (§ 24.3.3) necessario a ricostruire la corretta sequenza ricevuta, in modo da redistribuire correttamente i campioni ai filtri di restituzione.



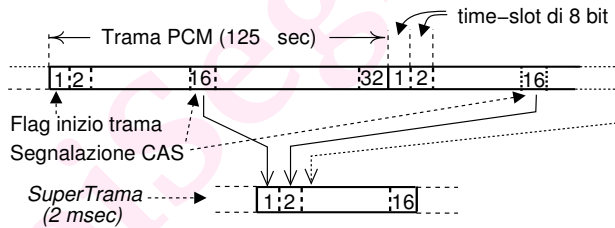
⁹La tecnica di moltiplicare un *blocco di bit* (in questo caso 8) alla volta prende il nome di *word interleaving*, distinto dal *bit interleaving*, in cui l'alternanza è a livello di bit.

¹⁰Il segnale PCM ispira il suo nome dal PAM (vedi § 24.9.5) in quanto ora, anziché trasmettere le *ampiezze* degli impulsi, si inviano i *codici* binari dei livelli di quantizzazione.

La struttura temporale ripetitiva che ospita i campioni dei singoli tributari prende il nome di *trama* (FRAME¹¹), ed è composta da 32 intervalli temporali detti *time-slot*. Trenta di questi ospitano a turno i bit di un campione proveniente da un numero massimo di 30 tributari¹², mentre i rimanenti due intervalli convogliano le informazioni di segnalazione¹³, che indicano lo stato dei singoli collegamenti (il 16° intervallo) e forniscono il sincronismo relativo all'inizio della trama stessa (il primo).

Le trame si susseguono ad una velocità pari alla frequenza di campionamento di ciascun tributario e quindi abbiamo $8000 \frac{\text{trame}}{\text{sec}}$; ognuno dei 32 $\frac{\text{intervalli}}{\text{trama}}$ ospita $1 \frac{\text{campione}}{\text{intervallo}}$, a sua volta formato da $8 \frac{\text{bit}}{\text{campione}}$, ottenendo così una velocità binaria complessiva di $8000 * 32 * 1 * 8 = 2048000 \frac{\text{bit}}{\text{sec}}$; per questo motivo ci si riferisce all'insieme come alla *trama PCM a 2 Mbit*. D'altra parte, essendo pari al periodo di campionamento la durata della trama è di $1/8000 = 125 \mu\text{sec}$.

Il primo time-slot della trama contiene una configurazione di bit sempre uguale, chiamata FLAG (*bandiera*, vedi § 22.5.2.1), che ha lo scopo di indicare ai circuiti di sincronismo l'inizio della trama stessa.



I dati di segnalazione contenuti nel 16° intervallo devono essere *diluiti* su più trame, per poter rappresentare tutti i 30 tributari¹⁴. Si è stabilito che occorra prelevare il 16° intervallo di 16 trame successive, per ricostruire una struttura detta *supertrama* (di $16 * 8 = 128$ bit) che rappresenta le informazioni di tutti i tributari (disponendo così di 4 bit/tributario/supertrama), e che si ripete ogni $16 * 125 = 2000 \mu\text{sec} = 2 \text{ msec}$.

In effetti nel 16° time-slot della trama sono presenti a turno, oltre ai bit di segnalazione relativi allo stato dei tributari, anche bit necessari alla sincronizzazione della supertrama (ossia un *flag*), mentre le informazioni di segnalazione sono ripetute più volte nella stessa supertrama, per proteggersi da eventuali errori di ricezione, che danneggiando l'informazione sullo stato dei canali, potrebbero causare la "caduta della linea".

¹¹FRAME significa più propriamente *telaio*, e in questo caso ha il senso di individuare una struttura, da "riempire" con il messaggio informativo.

¹²In figura è mostrato un esempio, in cui i campioni s_{ij} di N sorgenti S_i si alternano a formare una trama. Durante l'intervallo temporale tra due campioni, devono essere collocati nella trama tutti gli M bit/campione delle N sorgenti, e quindi la frequenza binaria (in bit/secondo) complessiva sarà pari a $f_b = f_c$ (campioni/secondo/sorgente) $\cdot N$ (sorgenti) $\cdot M$ (bit/campione).

¹³Vedi anche le sezioni 24.3.2 e 24.9.1.

¹⁴Gli 8 bit del 16° intervallo sono infatti insufficienti a codificare lo stato dei 30 tributari che contribuiscono al segnale TDM.

24.3.2 Messaggi di segnalazione

Come illustrato al § 24.9.1 la rete di accesso è sede di uno scambio di informazioni tra terminale e centrale locale, detta *segnalazione di utente*, che ha lo scopo di indicare la disponibilità della rete, il numero chiamato, l'attivazione della suoneria, ed i messaggi a ritroso di libero/occupato. L'inoltro di queste informazioni da parte della centrale di accesso verso la rete (e viceversa) può essere gestito secondo due diversi approcci.

Segnalazione associata al canale In questo caso la centrale di accesso inserisce le informazioni di segnalazione relative ad un tributario all'interno della *supertrama* di segnalazione, ottenuta collezionando i valori presenti nel 16° time-slot. Questa modalità viene indicata come *CAS* (*Channel Associated Signaling*), ed ha origine dalla conversione dei precedenti collegamenti analogici, in cui la segnalazione relativa ad ogni terminale viaggiava in modo indissolubilmente associato al segnale vocale, condividendo con questo il mezzo trasmissivo a commutazione di circuito¹⁵. Con la numerizzazione, si è inizialmente scelto di mantenere la segnalazione *associata* al segnale vocale, con la contropartita che quando, nell'attraversare una centrale di transito, una comunicazione è commutata su di una diversa linea di uscita, deve essere commutata anche la segnalazione associata.

La figura 24.1 mostra come la numerazione venga recepita da un organo di *controllo centrale*, che provvede a impostare il dispositivo di commutazione (§ 24.8), in modo che la comunicazione sia instradata verso la linea di uscita in direzione della destinazione. Quindi, l'informazione di segnalazione viene ri-associata nell'intervallo 16.

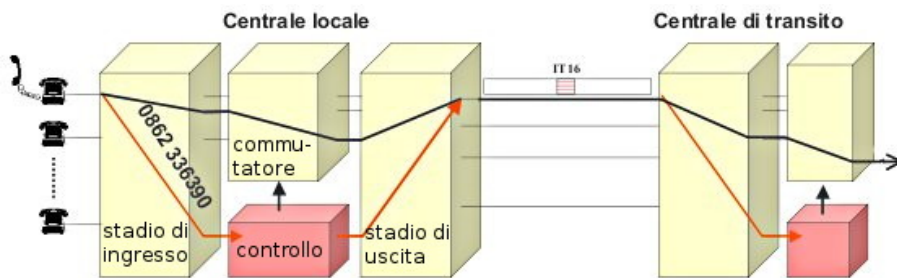


Figura 24.1: Controllo di centrale nel caso di segnalazione *associata al canale*

Segnalazione a canale comune Il primo passo evolutivo è stato quello di provvedere ad un *canale comune* di segnalazione direttamente collegato agli organi di controllo (vedi fig. 24.2), su cui poter convogliare la segnalazione relativa *a tutte* le comunicazioni in transito tra le due centrali.

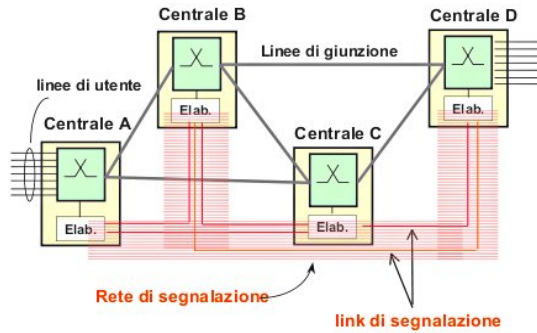
I messaggi di segnalazione, per loro natura, devono essere trasmessi solo quando si verificano degli eventi significativi, e per questo motivo sono ora inviati mediante dei *pacchetti dati*. Il passo successivo è quindi stato quello di realizzare una intera rete a *commutazione di pacchetto*, parallela a quella di transito su cui viaggiano (in modalità a circuito) le conversazioni vocali.

¹⁵Vedi ad es. https://en.wikipedia.org/wiki/In-band_signaling



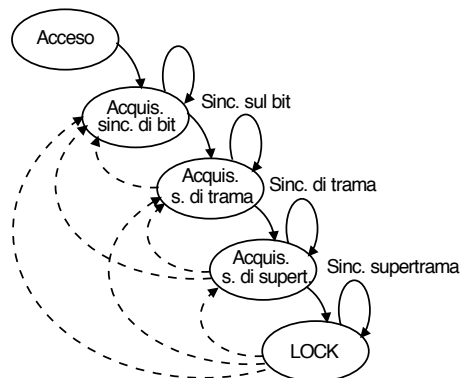
Figura 24.2: Separazione della segnalazione in un canale comune

In tal modo gli organi di controllo delle centrali sono in comunicazione diretta tra loro, secondo la modalità cosiddetta *ccs* (*common channel signaling*), mediante una rete a pacchetto dedicata alla segnalazione, sulla quale viaggiano i messaggi definiti da un apposito *sistema di segnalazione* (vedi § 24.9.3). Questo permette di centralizzare il controllo e la configurazione di tutte le centrali coinvolte nell'instradamento di una stessa comunicazione, rendendo così possibile la disponibilità di servizi come il trasferimento di chiamata, la conversazione a tre, l'avviso di chiamata....



24.3.3 Sincronizzazione di centrale

Alla figura seguente sono mostrati i diversi stati attraverso cui deve evolvere il dispositivo di sincronizzazione che opera sui flussi PCM CAS, prima di entrare nello stato di LOCK (*aggancio*) ed iniziare a poter leggere e smistare i contenuti dei diversi time-slot. Occorre infatti acquisire innanzitutto il sincronismo sul bit, sfruttando le caratteristiche del codice di linea utilizzato¹⁶; quindi si sfrutta la conoscenza della configurazione scelta per il flag di inizio trama, per individuare da dove iniziare a conteggiare gli intervalli temporali. Infine, viene individuato l'inizio della supertrama, grazie ad un'ulteriore configurazione prefissata, posta all'inizio della stessa. Per ogni stato esiste poi la possibilità (fortunatamente remota) di perdere il sincronismo ed *indietreggiare* (linee tratteggiate) nel diagramma di stato,



¹⁶Nel caso specifico, l'HDB3, pag. 444.

perdendo le comunicazioni in corso.

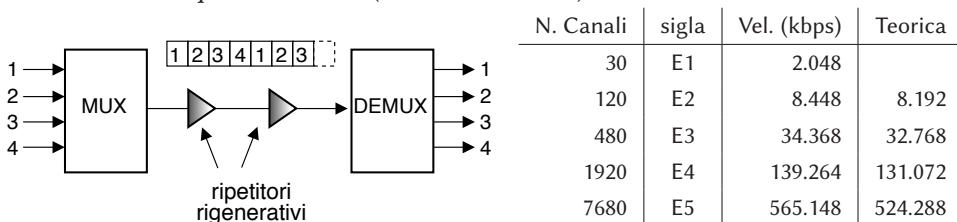
24.3.4 Multiplazione asincrona e PDH

L'argomento di questo paragrafo non va confuso con la *trasmissione* asincrona (quella START-STOP mostrata al § 15.7.1), che descrive una modalità di *inviare* informazioni numeriche; qui invece si tratta di *multiplare*, ossia come *mettere assieme* più comunicazioni.

Man mano che i nodi vicini alla *periferia* della rete di trasporto instradano il traffico verso quelli di livello gerarchico superiore, associati ad aree di influenza geografica più estesa (vedi § 24.5), i collegamenti di giunzione iniziano a trasportare un numero di tributari sempre più elevato, ottenuti *mettendo assieme* tutte le conversazioni contemporaneamente dirette verso la stessa destinazione. Considerando allo stesso tempo la necessità di dover svolgere nelle centrali la funzione di *commutazione*, è importante individuare metodi efficienti per *raggruppare* assieme più tributari, anche a velocità diverse, rendendo allo stesso tempo relativamente agevole *inserire* o *rimuovere* i singoli tributari. Rimandiamo al § 24.4 l'analisi di come avvenga il processo di multiplazione nel caso in cui esista una perfetta sincronizzazione tra gli elementi della rete, e trattiamo nel seguito il caso della rete *plesiocrona*.

Nella trama PCM (§ 24.3.1), tutti i 30 canali sono campionati congiuntamente, e più flussi a 2 Mbit possono a loro volta essere “messi assieme” in modalità *bit interleaved* (prendendo un bit alla volta da ogni tributario) mediante appositi dispositivi *multiplatori* (o MULTIPLEXER, o MUX). Il collegamento tra nodi può inoltre prevedere dispositivi detti *ripetitori rigenerativi* (uno o più di uno, vedi § 18.3.2) che oltre ad amplificare il segnale, lo “puliscono” dal rumore accumulato, decodificando i dati in ingresso per poi generare ex-novo il segnale numerico.

Il problema con questo modo di procedere è che i singoli tributari possono ragionevolmente avere origine da centrali differenti, ognuno con un proprio orologio indipendente, e quindi le loro velocità possono essere lievemente differenti l'una dall'altra¹⁷, pur essendo molto simili. In questo caso si dice che la rete opera in modo *plesiocrono*, ossia *quasi* isocrono (ma non del tutto).



In tabella riportiamo la gerarchia CCITT¹⁸, nota come *Plesiochronous Digital Hierarchy* (PDH), secondo la quale ad esempio 4 flussi da 2 Mbps (detti E1) sono multiplati in uno

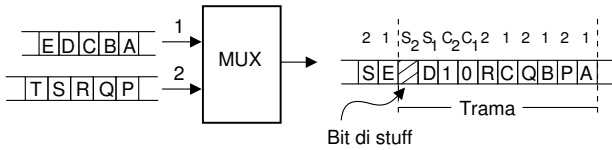
¹⁷Un oscillatore con precisione di una parte su milione, produce un ciclo in più o in meno ogni 10⁶; ad una velocità di 2 Mbps, ciò equivale a un paio di bit in più od in meno ogni secondo.

¹⁸Comité Consultatif International pour la Telephonie et Telegraphie. Questo organismo non esiste più, ed ora l'ente di standardizzazione ha nome ITU-T, vedi <https://it.wikipedia.org/wiki/ITU-T>.

da 8 Mb/sec (E2): notiamo che sebbene siano teoricamente sufficienti 8192 Mb/sec, in realtà il multiplexer ne produce di più (8448). La quantità in eccesso ha lo scopo di permettere la moltiplicazione di segnali non necessariamente sincroni, mediante la tecnica del *bit stuffing*¹⁹.

24.3.4.1 Bit stuffing

Consideriamo l'esempio in figura, con 2 tributari i cui bit vengono inseriti alternativamente in una trama da 4 bit/canale; il secondo risulta lievemente più lento. I primi 3 + 3 bit (ABC e PQR) vengono comunque alternativamente trasmessi, mentre il 4° bit di ciascun flusso può essere trasmesso o meno, a seconda se i tributari lo abbiano pronto. Per ottenere questo risultato i bit C_1 e C_2 (di controllo) valgono 0 oppure 1 a seconda se l'intervallo seguente (S_1 e S_2) contiene un dato valido oppure sia solo un *bit di stuff*, cioè vuoto, in quanto il tributario corrispondente è più lento rispetto alla velocità nominale. Ecco perché le velocità delle gerarchie superiori sono *abbondanti*: per ospitare i bit di controllo, necessari a gestire tributari non sincronizzati.



Il metodo illustrato permette in ricezione di effettuare il *destuffing*, e riottenere i flussi originari. Nella realtà le informazioni di controllo sono molto ridondate, perché se scambiassimo un bit di stuff per uno buono (o viceversa), distruggeremmo anche la struttura di trama del tributario che ha subito l'errore.

24.3.4.2 Add and Drop Multiplexer - ADM

La modalità *bit interleaved* con cui è realizzata la gerarchia PDH è particolarmente problematica qualora di desideri estrarre e/o introdurre un singolo tributario da/in un segnale moltiplicato di ordine elevato, ovvero realizzare una funzione detta *Add and Drop*. In questo caso è infatti necessario eseguire un'operazione inversa a quella di moltiplicazione, ovvero (vedi fig. 24.3) demoltiplicare l'intero flusso, compresi tutti gli altri tributari, e successivamente ri-moltiplicare di nuovo il tutto.

Questa caratteristica limita notevolmente la flessibilità delle configurazioni di rete ottenibili con questa tecnologia, e per i tributari passanti comporta l'aggiunta di un

¹⁹Da: TO STUFF = riempire.

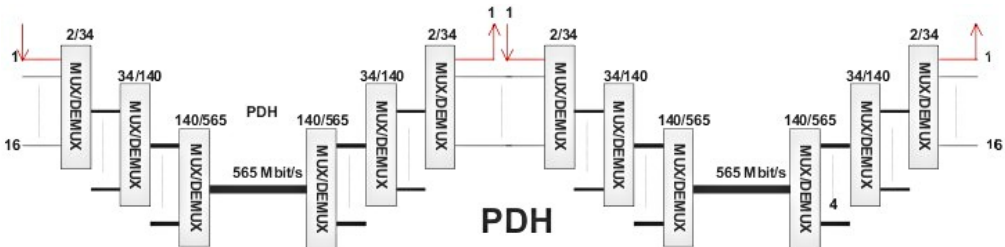


Figura 24.3: Gerarchia di moltiplicazione PDH e complessità di un ADD AND DROP MULTIPLEXER

ritardo temporale causato dalle operazioni di demultiplazione e ri-multiplazione. Nella pratica vengono usati solo flussi di tipo E1, E3 ed E4, che sono quelli più adatti per essere trasportati nella gerarchia sincrona SDH, multiplando direttamente sedici tributari a 2 Mbit/s all'interno di un unico flusso a 34 Mbit/s.

24.3.5 Sincronizzazione di rete

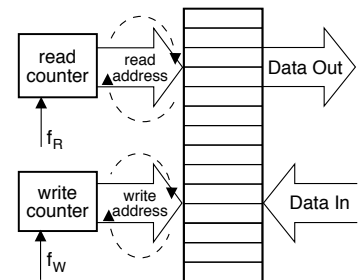
Se tutti i nodi della rete operassero alla stessa velocità, non sussisterebbero problemi nella multiplazione di più tributari. Nel caso in cui la sincronizzazione tra nodi sia completamente affidata ad un orologio di centrale di elevata precisione, si verifica il caso di funzionamento *plesiocrono*, che è quello prescritto per le centrali che interconnettono le reti di due diverse nazioni, o di due diversi operatori di telecomunicazioni. Ma questa non è l'unica soluzione.

Una alternativa è la sincronizzazione *mutua* tra centrali, in cui ognuna di queste emette i dati in uscita ad una frequenza pari alla media delle frequenze dei dati in ingresso. A parte fenomeni transitori durante i quali la rete è soggetta ad oscillazioni di velocità, relativi all'inserimento od alla disattivazione di centrali "topologicamente importanti", il metodo funziona ragionevolmente bene. Una seconda soluzione è una sincronizzazione di rete di tipo *gerarchico* in cui le centrali ricevono informazioni di sincronismo da soggetti "più importanti", come per configurazioni *Master-Slave* in cui il Master è una centrale ad elevata precisione, od un riferimento in comune come ad esempio un segnale proveniente da un satellite in orbita terrestre.

24.3.5.1 Elastic store

Si tratta di un accorgimento²⁰ idoneo ad *assorbire* le fluttuazioni della velocità di trasmissione, come ad esempio nel caso della sincronizzazione mutua. Mentre il *bit stuffing* (§ 24.3.4.1) è adottato nella multiplazione di più tributari in un livello gerarchico più elevato, l'*elastic store* è usato per compensare le diverse velocità tra tributari di eguale livello gerarchico in ingresso ad un elemento di commutazione (§ 24.8).

E' realizzato mediante un banco di memoria (di dimensione pari ad una trama), riempito (ciclicamente) con le parole (word) del flusso binario in ingresso, alla velocità f_W di quest'ultimo, alla posizione individuata dal contatore WRITE che si incrementa²¹ appunto a velocità f_W , e che torna a puntare all'inizio della memoria una volta raggiunto l'indirizzo più elevato. Un secondo puntatore READ viene utilizzato per leggere la memoria, alla velocità f_R richiesta, e prelevare i dati da inviare in uscita: se f_R e f_W sono differenti, READ e WRITE prima o poi si sovrappongono, causando la perdita o la ripetizione di una intera



²⁰Letteralmente: *magazzino elastico*.

²¹Il contatore WRITE, come anche READ, conta in binario, e si incrementa con frequenza f_W (f_R). Le parole binarie rappresentate da READ e WRITE forniscono l'indirizzo (all'interno del banco di memoria) in cui leggere i dati in uscita e scrivere quelli in ingresso rispettivamente.

trama, e nulla più²².

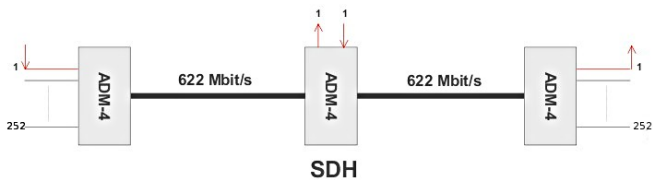
24.4 Gerarchia digitale sincrona

Definizione dei livelli gerarchici Come anticipato, la *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH²³) è una metodologia di moltiplicazione che presuppone un funzionamento perfettamente sincrono degli elementi di rete, ed ha solo una variante (nel Nord America), denominata SONET (*Synchronous Optical Network*), i cui livelli sono siglati STS oppure OC nel caso in cui ci si riferisca al segnale ottico corrispondente, e che interopera abbastanza bene con SDH. La tabella 24.1 elenca le velocità del *payload*²⁴ e di trasmissione associate ai diversi livelli della gerarchia di moltiplicazione SDH/SONET; la sigla STM sta per *synchronous transport module* ed il numero che segue indica il numero di flussi STM-1 che sono aggregati.

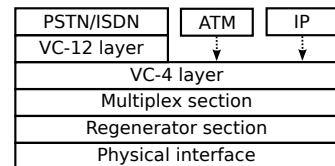
SONET	SDH	payload (kbps)	v. trasm. (kbps)
STS-1	-	48.960	51.840
STS-3	STM-1	150.336	155.520
STS-12	STM-4	601.344	622.080
STS-24	STM-8	1.202.688	1.244.160
STS-48	STM-16	2.405.376	2.488.320
STS-96	STM-32	4.810.752	4.976.640
STS-192	STM-64	9.621.504	9.953.280
STS-768	STM-256	38.486.016	39.813.120
STS-1536	STM-512	76.972.032	79.626.120

Tabella 24.1: Nomenclatura della gerarchia ottica e relative velocità

Multiplexer Add and Drop La differenza strutturale rispetto al PDH è che in SDH i tributari usano tutti lo stesso clock, da cui deriva la possibilità di aggiungere e togliere un singolo tributario senza alterare il flusso in cui è immerso, come esemplificato in figura, in cui 252 flussi PDH E1 concorrono a formare un multiplex STM-4.



Eterogeneità del trasporto L'SDH nasce allo scopo di consentire il trasporto di dati di diversa origine (PCM telefonico, ISDN, pacchetti Ethernet ed IP, celle ATM), come illustrato nella figura a fianco, che rappresenta impilate le diverse elaborazioni che i tributari devono subire per essere immessi nel flusso SDH.



²²Infatti il sincronismo di trama viene preservato; inoltre l'evento di sovrapposizione dei puntatori può essere rilevato, e segnalato ai dispositivi di demultiplicazione, in modo che tengano conto dell'errore che si è verificato.

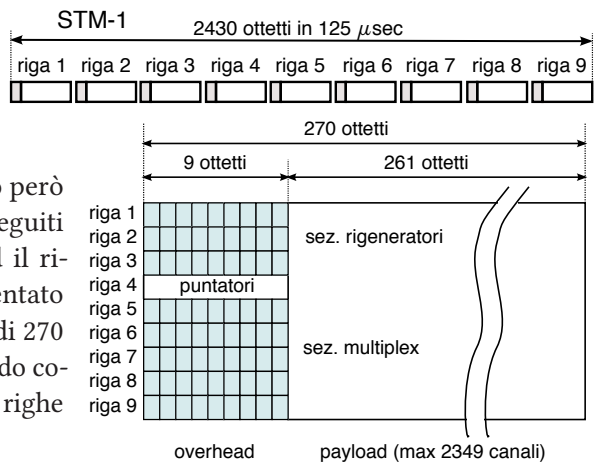
²³http://it.wikipedia.org/wiki/Synchronous_Digital_Hierarchy

²⁴Con il termine *payload* si indica il *carico pagante*, ossia i dati che vengono trasportati

Struttura di trama La gerarchia SDH si basa su di una struttura di trama di durata di 125 μ sec, durante i quali sono trasmessi in modalità *byte interleaved* una sequenza di ottetti provenienti da diversi tributari a 64 kbps che condividono la medesima sorgente di temporizzazione, cosicché ogni tributario può essere inserito o prelevato semplicemente scrivendo o leggendo sempre nello stesso punto (con la stessa fase) un ottetto ogni trama.

Synchronous Transport Module STM-1 Il livello più basso della gerarchia è indicato come STM-1, opera ad una velocità di 155.52 Mbit/s, può trasportare 63 flussi PDH E1 (ovvero 63 flussi * 32 timeslot/flujo = 2016 canali PCM) multiplati mediante una trama composta da 2430 ottetti, di cui 81 di segnalazione (in grigio) e 2349 di dati²⁵, ovvero usando un ottetto di segnalazione ogni 30 totali, quasi come avviene per il flusso PDH E1 (in cui c'è un intervallo di segnalazione, il 16°, ogni 31 canali voce).

Gli ottetti di segnalazione sono però ora raggruppati a gruppi di nove, seguiti da $29 \cdot 9 = 261$ ottetti di dati, ed il risultato è tradizionalmente rappresentato incolonnando le 9 sotto-sequenze di 270 ottetti come in figura, rappresentando così una trama come una matrice di 9 righe per 270 colonne.



Le componenti dell'overhead Le prime 9 colonne prendono il nome di *overhead* della trama, mentre la parte dati è indicata come *payload* (o carico pagante). L'overhead contiene informazioni di segnalazione strettamente inerenti al processo di multiplazione, ossia finalizzate all'espletamento di funzioni OAM (*Operation, Administration, Maintenance*), che sono ora associate ad un annidamento di sezioni di trasmissione: *path*, *multiplazione* e *rigenerazione*, vedi fig. 24.4. Il percorso (*path*) compiuto da un

²⁵Notiamo che la differenza tra i 2349 ottetti di payload ed i 2016 canali voce fornisce $2349 - 2016 = 333$ ottetti, che suddivisi per le nove righe, danno luogo a 37 ottetti per riga in più.

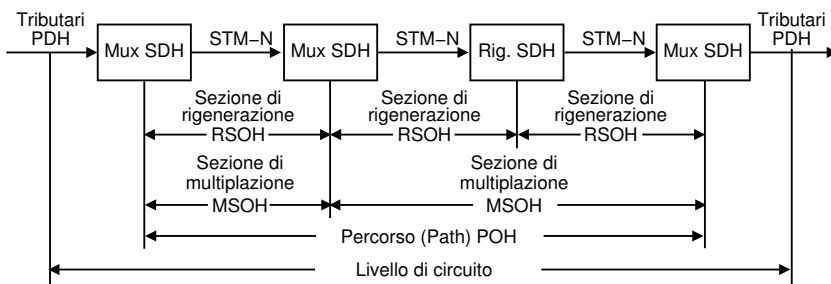


Figura 24.4: Definizione delle sezioni di path, multiplazione e rigenerazione di un multiplex SDH

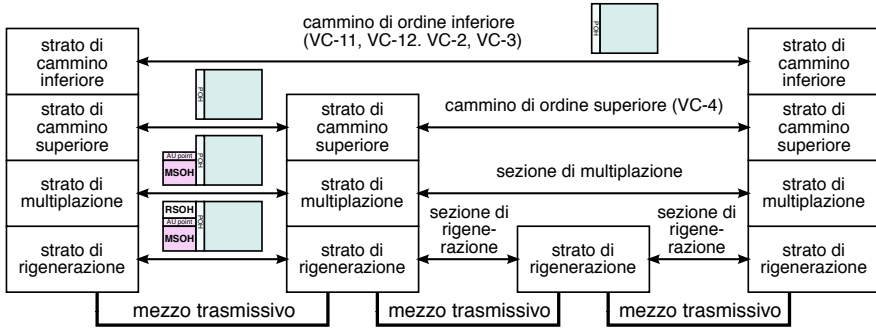
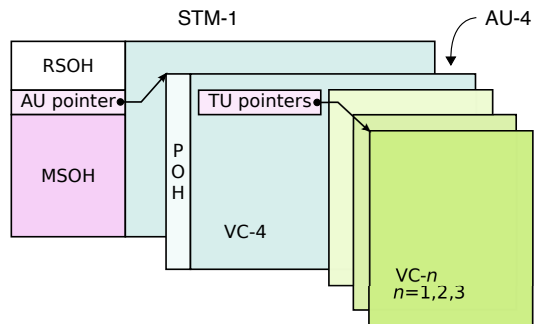


Figura 24.5: Stratificazione funzionale della segnalazione per moltiplicazione sincrona

singolo tributario si snoda infatti tra un unico moltiplicatore di ingresso ed un unico demoltiplicatore di uscita, ma ad ogni moltiplicatore *add and drop* (o commutatore) incontrato, viene definita una nuova *sezione di moltiplicazione*. Allo stesso modo, per ogni ripetitore rigenerativo incontrato (§ 18.3.2), è definita una nuova *sezione di rigenerazione*. Per ognuna di queste sezioni, è definito un *overhead* (OH) specifico per le operazioni OAM associate.

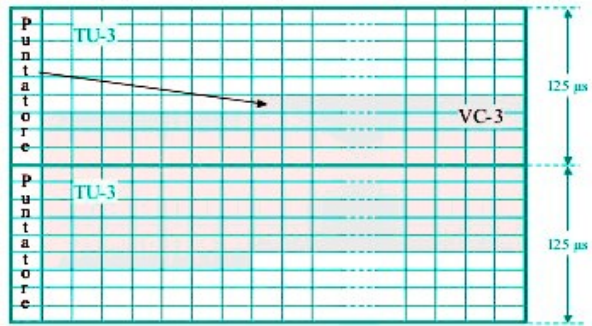
Dato che un ADM è anche rigeneratore, e che i dispositivi di ingresso / uscita del tributario sono anche ADM, si determina la *stratificazione funzionale* per la segnalazione schematizzata in fig. 24.5, in cui è evidenziato come l’overhead associato alle sezioni più esterne venga *impilato* su quello delle sezioni interne. Ma a differenza dell’incapsulamento (pag. 22.5.2.3) proprio dei formati di trasmissione a pacchetto, in questo caso i tre tipi di overhead (*Path POH*, *Multiplex Section MSOH*, e *Regenerator Section RSOH*) sono inseriti nella trama STM-1 in punti diversi, come mostrato dalla figura che segue.

Il puntatore all’unità amministrativa Nelle prime tre righe dell’overhead della trama STM-1 trova posto l’RSOH, che viene scritto dai dispositivi di rigenerazione, e quindi letto e ri-scritto ad ogni rigeneratore successivo; in particolare, alla prima riga sono presenti i flag che consentono di acquisire il sincronismo di trama. Nelle ultime cinque righe dell’OH troviamo il MSOH, scritto, letto e ri-creato dai dispositivi di moltiplicazione. Il POH trova posto all’interno del payload, e su questo torniamo tra brevissimo. Alla quarta riga dell’OH di trama troviamo un puntatore (*AU Pointer*), che specifica la posizione di inizio del payload (chiamato ora AU, o *Administrative Unit*) nell’ambito della struttura di trama.

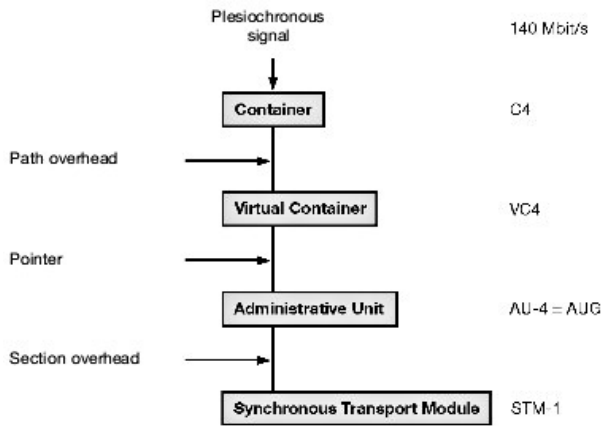


La presenza del puntatore AU deriva dalla volontà di ridurre al minimo l’uso di buffer e di evitare l’introduzione di ritardi di consegna; pertanto i dati da trasmettere *non* vengono inseriti nella struttura di trama all’inizio della stessa, bensì *al primo ottetto possibile* al momento della disponibilità dei dati stessi. Quindi, è più che normale il

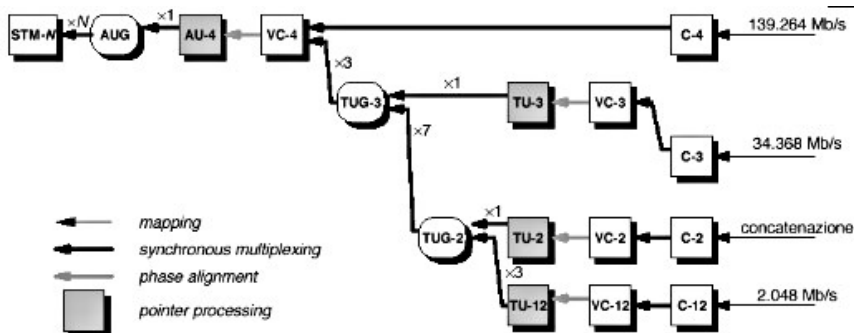
caso in cui la AU inizi a metà di una trama, e termini a metà della trama successiva, come illustrato nella figura che a lato. La coppia AU ed AU Pointer prende quindi il nome di *Administrative Unit Group* (AUG).



Virtual Container e Tributary Unit Il riempimento della AU con i dati da trasmettere, avviene (vedi figura seguente) mediante una serie di passi successivi. Viene per prima creatata la struttura dati detta *Container*, a cui si aggiunge il POH per ottenere un *Virtual Container*, da cui dopo l'aggiunta del puntatore deriva la AU. Notiamo ora che non necessariamente la AU deve essere riempita da un unico tributario; al contrario, la moltiplicazione serve appunto ad ospitarne diversi!! A questo scopo, più vc a bassa velocità possono essere a loro volta moltiplicati in modalità *byte interleaved*, per produrre una struttura dati intermedia indicata TU (*Tributary Unit*), che a sua volta può essere inserita assieme ad altre TU, all'interno del vc di ordine superiore.



Non approfondiamo oltre questo argomento, che richiede una buona dose di pazienza per essere analizzato a fondo, e ci limitiamo ad inserire un diagramma che mostra le possibilità di combinazione di tributari differenti, in accordo alle specifiche di ETSI.



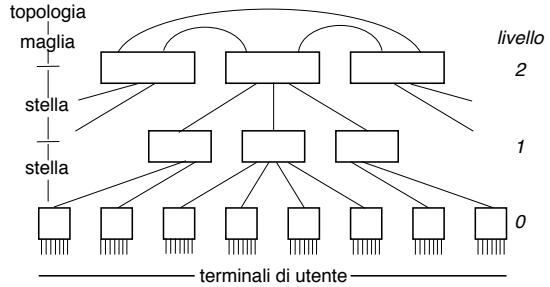
Esercizio Quanti canali voce entrano in un multiplex STM-1? *Risposta:* ci entra un AUG composto fino da 3 TUG-3, ognuno dei quali può contenere 7 TUG-2, che a loro volta

TeoriadeiSegnali.it

contengono 3 flussi PDH a 2 Mbit/s, ognuno con 30 canali PCM. Pertanto: $30 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 3 = 1890$ canali voce. In alternativa, qualora vc4 contenga un unico flusso E4 a 140 Mb, 1920 canali voce.

24.5 Topologia di rete

Nella figura a lato è riportata una possibile topologia di rete, a scopo puramente esemplificativo, dato che è un elemento su cui gli operatori godono di massima libertà. Il nostro esempio si riferisce ad una rete a 2 livelli, in cui i terminali di utente che fanno capo ad una stessa centrale locale di livello zero accedono alla rete per mezzo di un collegamento che moltiplica le comunicazioni provenienti dalla stessa centrale.



Come discusso al capitolo 22, il numero dei possibili collegamenti contemporanei è inferiore al numero di terminali di utente, ed è dimensionato applicando i metodi della teoria del traffico al caso in questione. Le centrali locali sono connesse *a stella* a quelle di livello 1, che realizzano gli instradamenti necessari alla comunicazione tra utenti geograficamente vicini, ma connessi a centrali locali diverse. Se, al contrario, due utenti sono connessi alla stessa centrale di livello zero, l'instradamento non esce dalla centrale locale. Le centrali di livello 1 sono a loro volta connesse a stella a quelle di livello 2, che gestiscono il traffico a livello nazionale; alcune di queste consentono anche di instradare i collegamenti verso altre reti (ad es. di altre nazioni od operatori). Le centrali di 2° livello sono connesse tra loro a *maglia* completa (MESH in inglese) in modo da consentire instradamenti alternativi anche nel caso in cui un collegamento tra centrali vada fuori servizio.

Nello specifico caso italiano²⁶, la denominazione attribuita alle centrali dei diversi livelli segue lo schema mostrato nella parte sinistra della figura 24.6: i terminali di

²⁶Sto parlando di qualcosa la cui odierna evoluzione mi è ignota, ma la storia merita di essere raccontata.



Figura 24.6: Topologia della rete telefonica Italiana

utente sono attestati presso gli *Stadi di Linea* (SL) tramite la rete di accesso, mentre gli SL sono collegati agli *Stadi di Gruppo Urbano* (SGU) tramite la rete di trasporto; infine, gli SGU sono collegati agli *Stadi di Gruppo di Transito* (SGT) tramite rete di trasporto in fibra ottica. La parte destra della figura mostra inoltre come questi elementi siano dislocati geograficamente per la regione Abruzzo, individuando la ripartizione del territorio, e mostrando come ad un livello inferiore agli stadi di linea, la rete di accesso si dirami ulteriormente attraverso gli armadi ed i box di distribuzione.

24.6 Rete in fibra ottica

Nel periodo iniziale le fibre ottiche sono state usate prevalentemente nella rete di trasporto tra centrali di grado gerarchicamente elevato, mentre ora trovano impiego anche nella sezione di accesso. Per ciò che riguarda le modalità di trasmissione ottica, si rimanda al § 19.3; nel seguito illustriamo i dispositivi utilizzati, la topologia risultante, ed i sistemi di protezione.

24.6.1 Dispositivi SDH

Come anticipato, la trasmissione SDH si avvale di elementi (vedi Fig. 24.7) che possono essere descritti in termini funzionali secondo la seguente classificazione:

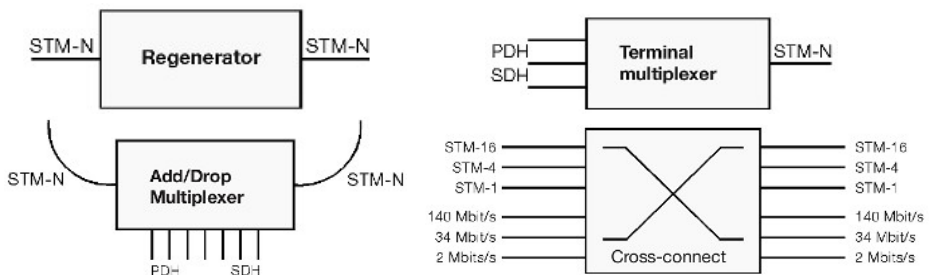


Figura 24.7: Dispositivi SDH

Rigeneratori Sono gli elementi di base, che consentono di suddividere in più tratte i collegamenti più lunghi, e che eliminano dal segnale in transito gli effetti del rumore e della dispersione temporale.

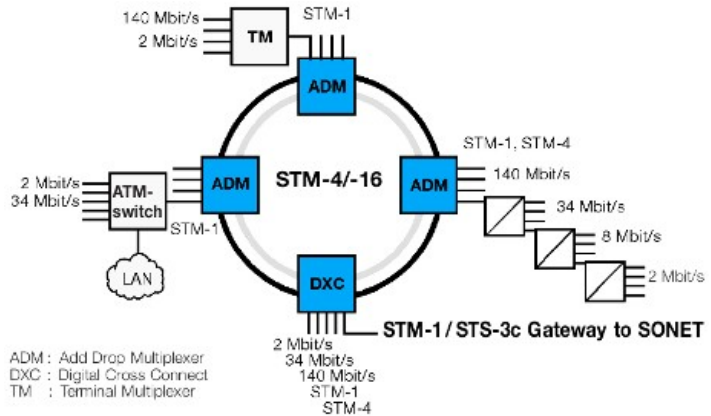
Multiplettori Combinano tributari PDH ed SDH, in modo da inserirli in flussi a velocità più elevate.

Multiplettori Add and Drop Permettono l'inserimento e l'estrazione di tributari a bassa velocità in/da un flusso in transito, e consentono la creazione di strutture ad anello.

Digital Cross Connect A differenza di un ADM, un DXC è interconnesso a più di un flusso SDH, e quindi può inserire un tributario (od un container) prelevato da un flusso entrante all'interno di un diverso flusso uscente, realizzando così la funzione di commutazione.

24.6.2 Topologia ad anello

Le reti in fibra ottica sono quasi sempre realizzate mediante degli *anelli* che congiungono tra loro i nodi di commutazione in forma ciclica. I dispositivi DXC (*Digital Cross Connect*) sono infatti interconnessi a più di un anello, e svolgono la funzione di commutazione delle comunicazioni che devono essere inoltrate verso gli altri anelli.



24.6.2.1 Rete di trasporto

Al 2002, l'interconnessione dei collegamenti SDH nazionali risultava permessa dalla struttura su tre livelli riportata in Fig. 24.8.

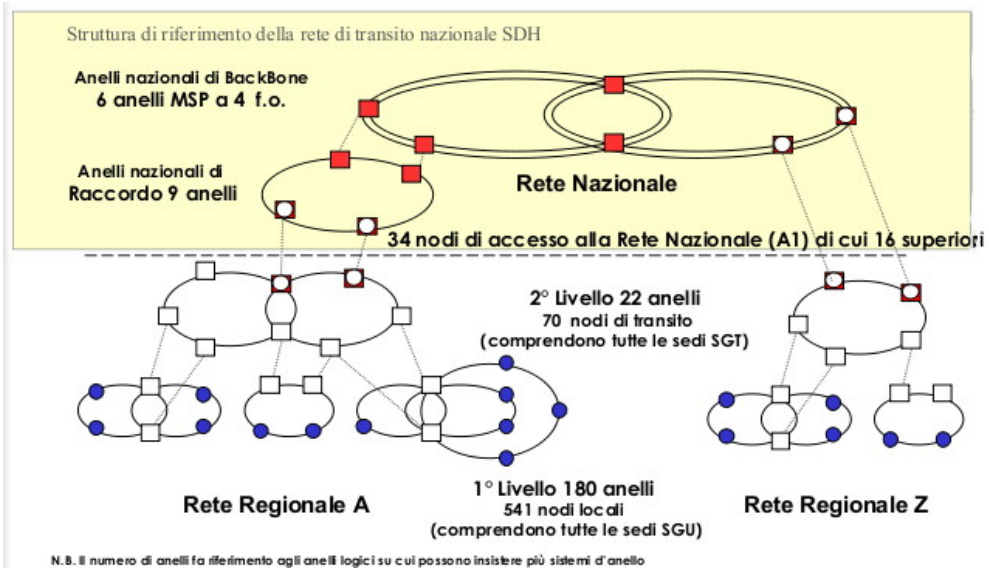


Figura 24.8: Struttura collegamenti SDH nazionali - anno 2002

24.6.2.2 Rete di accesso in fibra

La capacità del trasporto SDH di accettare tributari di tipo Ethernet o IP facilita la realizzazione di una rete completamente ottica, anche nella sezione di accesso. La fig. 24.9 mostra alcuni casi pratici di accesso in fibra ottica. Iniziando da destra, sono mostrate delle reti Gigabit Ethernet (pag. 811) residenziali, interconnesse mediante *switch di livello 2* ad un POP (*Point of Presence*), il cui router (12000) si interconnette ad un anello SDH a 622 Mbps, sul quale sono instradati i pacchetti IP diretti verso

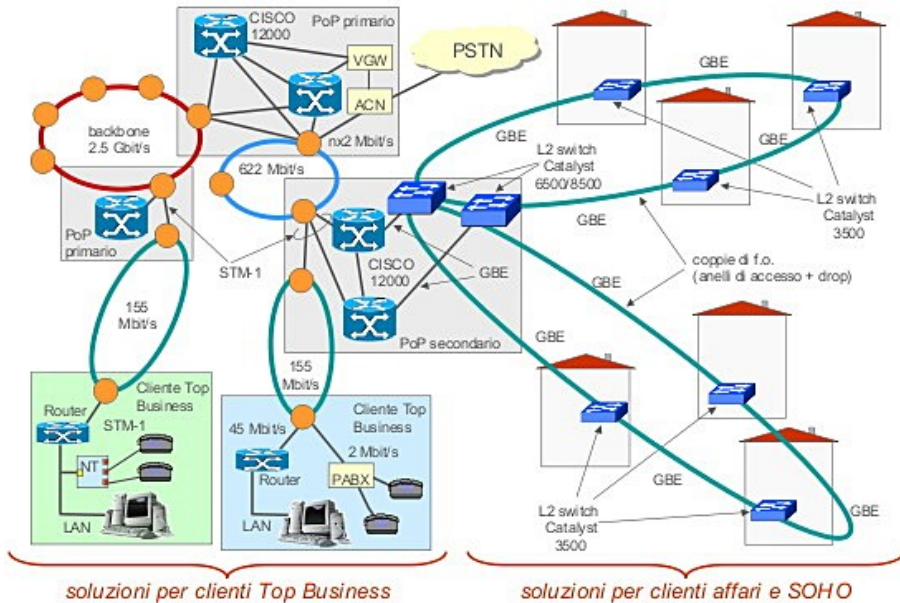


Figura 24.9: Diffusione della fibra ottica nella rete di accesso

Internet, per il tramite del POP primario. In basso a sinistra, sono mostrati accessi a due Megabit, contenenti sia traffico voce che dati, che vengono inseriti in anelli SDH da 155 Mbps: quello al centro inoltra i canali voce verso la PSTN, mentre quello di sinistra si interconnette nel *backbone* IP da 2.5 Gbps.

24.6.3 Sistemi di protezione automatica

L'abbondanza di ottetti OAM nella multiplazione SDH permette un monitoraggio costante della qualità del collegamento e di eventuali malfunzionamenti, al punto che gli stessi apparati di commutazione sono in grado di svolgere compiti di rimpiazzo automatico tra la linea andata fuori servizio, ed una riserva presente, come indicato nei seguenti schemi.

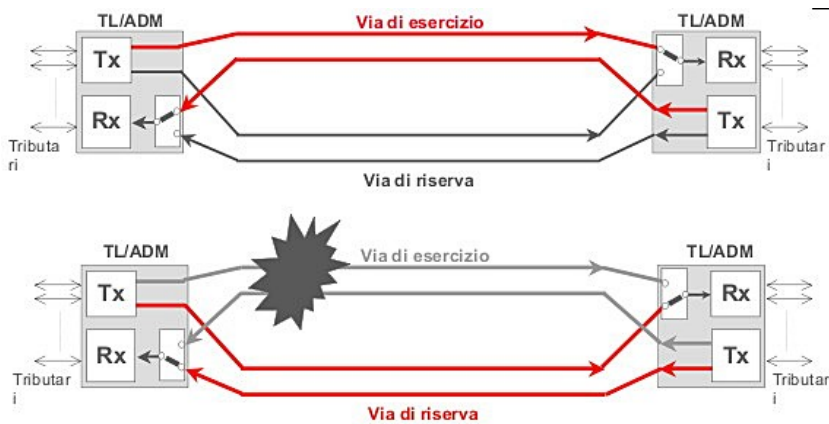


Figura 24.10: Sistema di protezione 1+1

Protezione 1+1 In questo caso, ogni collegamento (vedi fig. 24.10) è provvisto di un collegamento di riserva. Qualora la via di esercizio vada fuori servizio, i terminali di linea che sono posti agli estremi se ne avvedono pressoché immediatamente, e provvedono a commutare la comunicazione sulla via di riserva.

Collegamento ad anello Come nel caso precedente, per ognuna delle due direzioni di trasmissione è impegnata una diversa fibra ottica, ma in questo caso la via di ritorno (vedi fig. 24.11) si sviluppa investendo l'altra metà dell'anello, percorso nello stesso senso di rotazione. Aggiungendo un secondo anello di riserva (quello interno nella figura), anch'esso unidirezionale ma diretto in senso opposto al primo, la comunicazione può continuare anche nel caso in cui entrambi i collegamenti (generalmente co-locati) tra due nodi vadano fuori servizio.

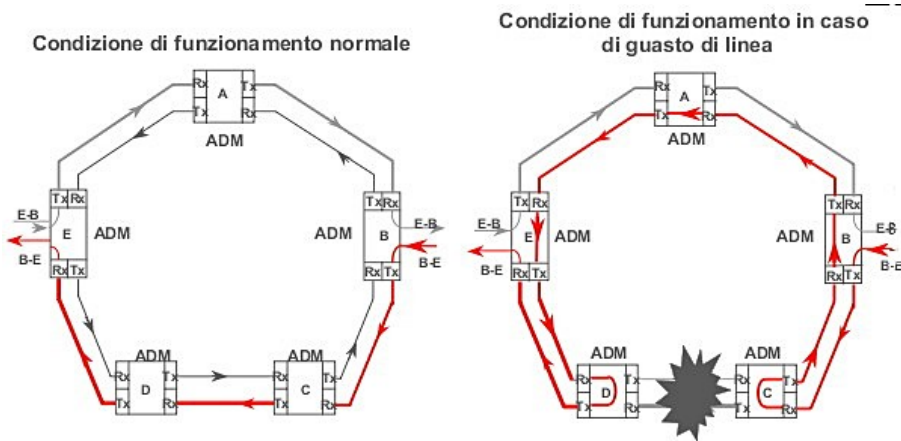


Figura 24.11: Configurazione ridondante ad anello

24.7 Instradamento

Per questo argomento sono fornite solo alcune definizioni estremamente sommarie di tre possibili strategie, adottate nel corso della evoluzione delle reti telefoniche:

END to END o *right-through* (da estremo ad estremo): la scelta del percorso è effettuata dalla centrale di origine, ad esempio in base al prefisso od all'inizio del numero, utilizzando delle *tabelle di routing* statiche. E' la modalità dell'inizio della telefonia, in cui i commutatori erano elettromeccanici, ed i collegamenti interni alla centrale e diretti verso le centrali erano *cablati*. Ha l'enorme svantaggio che i cambiamenti alla topologia della rete si devono riflettere in cambiamenti di tutte le tabelle - o *dei morsetti!*

Link-by-link o *own-exchange* (tratta per tratta): ogni centrale decide in autonomia dove instradare (in uscita) le connessioni entranti, in base a sue tabelle dinamiche, ovvero informazioni che giungono dalla rete stessa. Si adatta alle modifiche della topologia ma non è affidabile al 100 %, potendo ad esempio produrre dei *loop* (o circuiti viziosi);

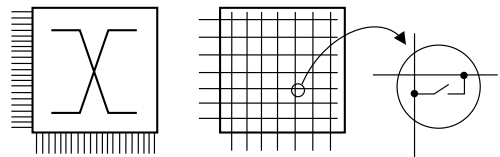
Tramite ccs (*Common Channel Signaling*, segnalazione a canale comune): le decisioni sull'instradamento sono demandate ad una rete di segnalazione parallela ed indipendente da quella del traffico smaltito, e che collega tutte le centrali ad un unico organo di controllo (il *canale comune*), il quale determina l'instradamento in base alla sua conoscenza dello stato del traffico nella rete, e comunica contemporaneamente a tutte le centrali coinvolte nell'instradamento, come configurare i propri organi di commutazione per realizzare il collegamento richiesto.

24.8 Commutazione

Illustriamo ora l'architettura dei dispositivi che consentono la cosiddetta *commutazione di circuito*, ovvero la creazione di un collegamento *stabile* tra due porte del commutatore, con un *impegno permanente di risorse fisiche* per tutta la durata del collegamento. L'altra modalità di commutazione, quella di *pacchetto*, è stata illustrata al cap. 22.

24.8.1 Reti a divisione di spazio

Individuano gli organi di commutazione che realizzano un collegamento fisico (elettrico) tra uno degli N ingressi ed una delle M uscite. Nel caso in cui $N > M$, la rete è un *concentratore*²⁷, mentre se $N < M$ la rete è un espansore; se $N = M$ la rete è quadrata e *non bloccante*. Il commutatore è rappresentato da un blocco con una "X" (in inglese *cross*, od incrocio), e può essere pensato come una matrice binaria in cui ogni elemento (1 o 0) rappresenta lo stato (chiuso od aperto) di un interruttore (realizzato ad esempio mediante un transistor) che collega una linea di ingresso ad una di uscita.



Realizzare in questo modo una rete non bloccante prevede l'uso di un numero di interruttori pari ad $N \cdot M$, dei quali solo $\min(N, M)$ sono utilizzati, anche nelle condizioni di massimo carico. Inoltre, nessun interruttore può essere "eliminato" senza precludere irrimediabilmente la possibilità di collegare qualunque ingresso a qualunque uscita. Allo scopo di utilizzare un numero ridotto di interruttori, sia per costruire reti non bloccanti oppure bloccanti con bassa probabilità di blocco, si ricorre alle...

24.8.2 Reti multistadio

...di cui alla figura 24.12 è riportato un esempio a 3 stadi, con gli N ingressi che sono ripartiti su r_1 reti più piccole con n ingressi, e le M uscite su r_3 reti con m uscite. Nel mezzo ci sono r_2 reti con r_1 ingressi ed r_3 uscite. Si può dimostrare che la rete complessiva è *non bloccante* se il numero di matrici dello stadio intermedio è almeno $r_2 \geq n + m - 1$ (condizione di CLOS²⁸). Una connessione da sinistra a destra ha ora la

²⁷ come ad esempio un centralino (PBX, PRIVATE BRANCH EXCHANGE) con 8 derivati (interni) e 2 linee esterne: se due interni parlano con l'esterno, un terzo interno che vuole anche lui uscire trova occupato. Si dice allora che si è verificata una condizione di *blocco*.

²⁸ E' una condizione *sufficiente* a scongiurare il blocco anche nella condizione *peggiore*. Tale circostanza si verifica quando:

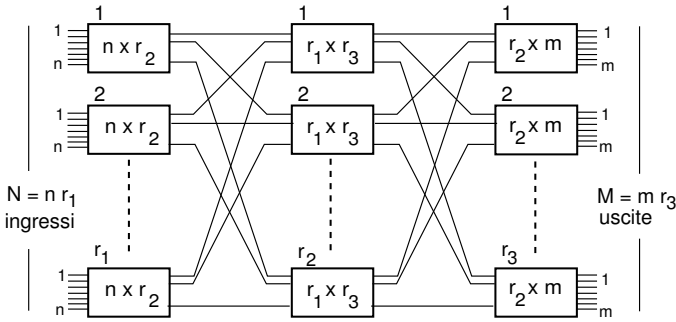
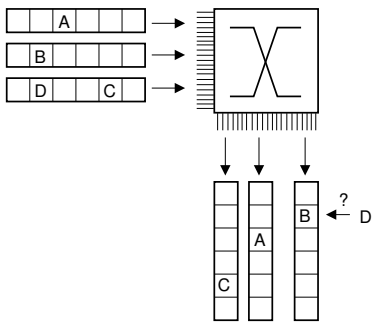


Figura 24.12: Rete a divisione di spazio a tre stadi

dunque vantaggioso rispetto ad un commutatore monostadio) a partire da $N \geq 24$. Ovviamente, la problematica relativa alle matrici di commutazione è molto articolata, coinvolgendo topologie più complesse, filosofie di instradamento, e tecniche per la stima delle probabilità di blocco. Tralasciamo ulteriori approfondimenti, per illustrare invece come realizzare dispositivi di commutazione per trasmissioni numeriche a *divisione di tempo*.

24.8.3 Commutazione numerica a divisione di tempo

Consideriamo il caso in cui si debbano commutare le comunicazioni associate ai singoli *time-slot* presenti in diversi flussi²⁹ numerici organizzati in trame. Avendo a disposizione solamente una matrice di commutazione spaziale, quest'ultima può essere



riprogrammata alla stessa frequenza dei *time-slot*, consentendo alle comunicazioni entranti di dirigersi verso i flussi uscenti in direzione delle rispettive destinazioni finali. La matrice spaziale, però, non può alterare l'ordine temporale dei dati in ingresso! Come rappresentato nella figura a lato, non può (ad esempio) inviare le conversazioni B e D sulla stessa linea uscente, in quanto si verifica un conflitto temporale. E' quindi evidente la necessità di introdurre uno stadio di *commutazione temporale*.

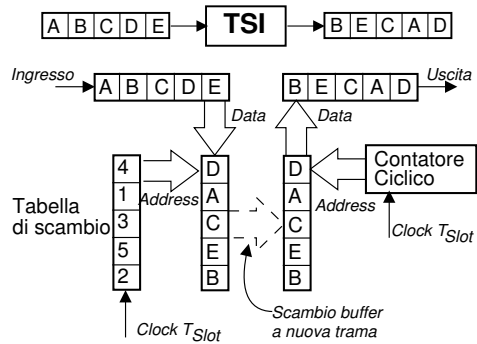
24.8.3.1 Time Slot Interchanger

Questo dispositivo è indicato come TSI (*Time Slot Interchanger*) ed ha la funzione di produrre in uscita una sequenza di dati identica a quella in ingresso, tranne per

- ▶ una matrice del primo stadio (i) ha $n - 1$ terminazioni occupate
 - ▶ una matrice del terzo stadio (j) ha $m - 1$ terminazioni occupate e
 - ▶ tali terminazioni non sono connesse tra loro, anzi le connessioni associate impegnano ognuna una diversa matrice intermedia e
 - ▶ si richiede la connessione tra le ultime due terminazioni libere di i e j
- ⇒ in totale si impegnano allora $m - 1 + n - 1 + 1 = m + n - 1$ matrici intermedie.

²⁹Le comunicazioni presenti in uno stesso flusso, ovvero appartenenti alla stessa trama, condividono la stessa origine/destinazione.

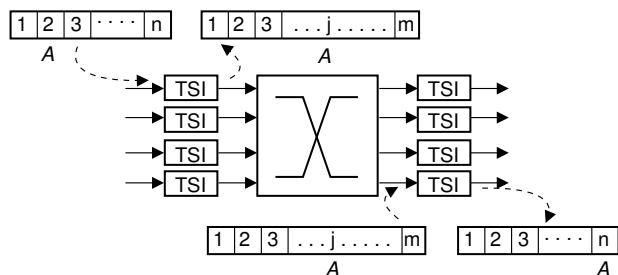
averne cambiato l'ordine temporale. In figura è mostrato un possibile schema di funzionamento: una trama entrante viene scritta, agli indirizzi ottenuti leggendo sequenzialmente la tabella di scambio, in un buffer di memoria (es.: *entra E e lo scrivo al 4° posto, poi entra D e va al 1° posto, etc.*). Prima dell'inizio di una nuova trama, il primo buffer è copiato in un secondo³⁰, che a sua volta viene letto con ordine sequenziale (partendo dall'alto), per creare la nuova trama in uscita. Ovviamente, è possibile anche la realizzazione opposta, con scrittura sequenziale e lettura secondo il nuovo ordinamento.



24.8.3.2 Commutazione bidimensionale

Così come un commutatore spaziale non è sufficiente, anche un TSI “da solo” è di scarsa utilità, non potendo instradare le comunicazioni su vie diverse. Combinando assieme le due funzioni si riescono a realizzare commutatori sia di tempo che di spazio, come la struttura a 3 stadi in figura, chiamata “TST” perché alterna uno stadio temporale, uno spaziale ed uno temporale.

Notiamo subito come in questo schema il numero di intervalli temporali *in uscita* dai TSI di ingresso è maggiore di quelli *in ingresso* ossia $m > n$ ⁽³¹⁾: ciò determina, per lo stadio spaziale, una frequenza di commutazione più elevata della



frequenza dei time-slot in ingresso. Una generica conversazione “A” che occupa il 2° slot del primo flusso può raggiungere (ad esempio) l’ultimo slot dell’ultimo flusso, occupando uno qualsiasi (j) degli m slot utilizzati dal commutatore spaziale. Aumentando il valore di m , si riduce la probabilità di blocco; in particolare, questa è nulla se $m = 2n - 1$ ⁽³²⁾.

Analizziamo i vantaggi conseguiti dalla commutazione numerica con un semplice esempio. Poniamo di voler commutare con lo schema illustrato 4 flussi PCM (con $n = 30$): i $4 * 30 = 120$ canali presenti sono commutati utilizzando solo $4 * 4 = 16$ interruttori, contro i $120 * 120 = 14.400$ interruttori necessari ad una matrice spaziale monostadio che svolga la commutazione dei 120 canali analogici !

³⁰La tecnica prende il nome di *double buffering*.

³¹Ovviamente, $m - n$ intervalli sono lasciati vuoti, in ordine *sparso* tra gli m .

³²Si confronti questo risultato con la condizione di Clos, fornita al § 24.8.2.

24.9 Appendici

Dopo aver illustrato le tecniche realizzative più generali, approfondiamo il funzionamento di una serie di metodi di accesso che hanno partecipato alla evoluzione delle reti a commutazione di circuito, fino alla moderna ADSL.

24.9.1 Plain old telephony services (POTS)

Il *buon vecchio servizio telefonico* consiste nel collegamento audio, nella banda del canale telefonico, attuato mediante un *terminale di utente* (telefono), e nella *segnalazione* (sempre *di utente*) necessaria ad instaurare il collegamento. L'insieme degli apparati che permette di interconnettere tra loro i telefoni di rete fissa è spesso indicato con l'acronimo PSTN (*Public Switched Telephone Network*), da cui si sono evoluti tutti gli sviluppi successivi delle telecomunicazioni.

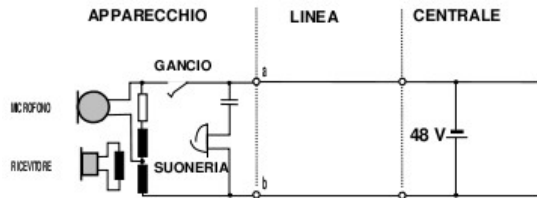
Quando la centrale locale deve far squillare il telefono invia sul doppiopino una tensione alternata che ne attiva la suoneria. Quando la cornetta dell'apparecchio telefonico viene sollevata³³, nel telefono si chiude un interruttore che determina lo scorrimento di una corrente continua nel *subscriber loop*, indicando la risposta da parte del chiamato.

Se viceversa siamo dal lato chiamante, sollevando la cornetta *allertiamo* la centrale di accesso, la quale dopo aver riservato le risorse necessarie (ivi compreso un time-slot in uno dei flussi PCM uscenti) ci manifesta la sua disponibilità ad acquisire il numero che intendiamo comporre, mediante l'invio di un *tono di centrale*.

All'interno del telefono troviamo un particolare trasformatore a quattro porte, detto *ibrido*³⁴, in grado di separare il segnale in ingresso da quello in uscita, in modo da inviare il primo all'altoparlante, e di inviare al secondo quello del microfono.

Per comporre il numero fino agli anni 80 erano in uso i *dischi combinatori*, che aprendo e chiudendo l'interruttore, determinavano una forma d'onda impulsiva, in cui il numero degli impulsi corrispondeva alla cifra immessa. Questo meccanismo è in diretta relazione alla presenza, nelle centrali telefoniche di prima generazione, dei motori passo-passo che determinavano l'azionamento dei commutatori di centrale.

Il disco combinatorio è stato poi soppiantato dalla attuale tastiera numerica DTMF (*Dual Tone Multi Frequency*), in cui ad ogni tasto (vedi lato sinistro della fig. 24.13) sono associate *due frequenze* che individuano la cifra (od il simbolo * e #) premuta, come descritto dalla figura. Viceversa, la segnalazione di utente nella direzione centrale -> utente avviene per mezzo di un codice basato su di un tono intermittente a 440 Hz³⁵, le cui durate sono descritte in basso a sinistra nella figura.



³³In inglese si dice andare OFF-HOOK, con riferimento storico al gancio su cui riporre la cornetta, presente nei primi modelli di telefono.

³⁴http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_coil

³⁵corrispondente al *la* centrale del pianoforte. Ho provato a verificare, e... a me arriva un la bemolle!

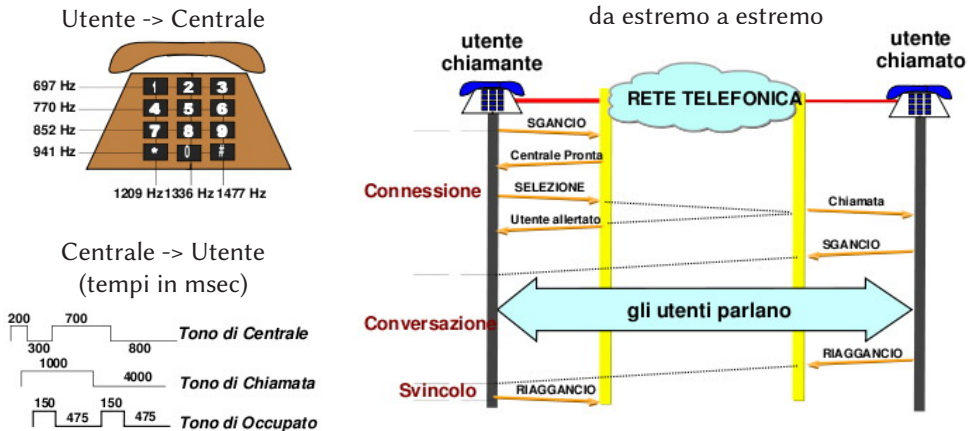


Figura 24.13: Segnalazione di utente

A seguito della ricezione del numero la centrale *di origine* coinvolge il resto della rete, impegnando risorse della stessa, ed individuando quali nodi attraversare per giungere a destinazione (fase di *istadamento*, in inglese *ROUTING*). Una volta contattata la centrale di destinazione, questa provvede a far squillare il telefono chiamato, ed inviare indietro un segnale di *RingBack* che produce presso il chiamante un *tono di libero*, oppure un segnale di occupato (*Busy*), nel caso in cui il chiamato sia già impegnato in altra conversazione.

Il risultato dei messaggi di segnalazione di utente è esemplificato nel lato destro di fig. 24.13, in cui è evidenziato come ogni conversazione è in realtà composta da tre fasi imprescindibili:

- formazione della connessione (*call setup*), in cui sono svolte le funzioni di indirizzamento, e vengono riservate da parte della rete le risorse necessarie alla comunicazione;
- mantenimento (*hold*), durante la quale le risorse impegnate sono utilizzate in modo esclusivo dalle parti in conversazione;
- svincolo (*release*) in cui le risorse impegnate sono liberate.

Il passaggio dalla telefonia analogica a quella numerica, in cui il segnale vocale è campionato e quantizzato come PCM, non ha di fatto alterato la presenza di queste tre fasi.

24.9.2 ISDN

La *Integrated Service Data Network*³⁶ è una modalità di accesso *numerico* alla rete telefonica, definito da una serie di standard reperibili presso l'ITU³⁷. In ISDN la conversione A/D avviene all'interno del terminale di utente, il quale può collegare allo stesso bus

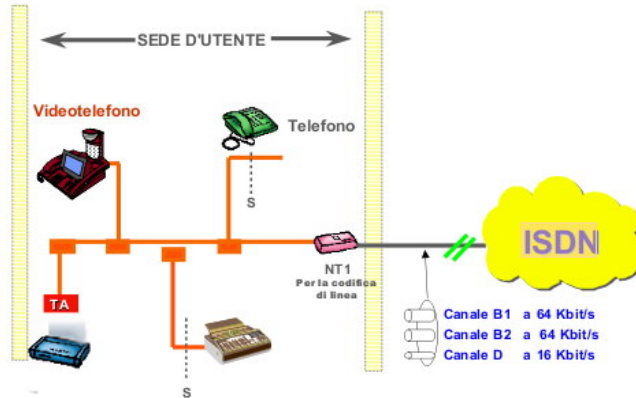
³⁶https://it.wikipedia.org/wiki/Integrated_Services_Digital_Network

³⁷<http://www.itu.int/rec/T-REC-I/e>

ISDN (interfaccia S³⁸ a quattro fili, utilizzante un codice di linea AMI), diversi dispositivi numerici, oppure anche analogici, interponendo per questi ultimi un dispositivo detto *Terminal Adapter* (TA). L'accesso alla rete da parte del dispositivo NT (*Network Termination*) connesso al doppino, corrisponde alla *Interfaccia U³⁹*, su cui è trasmesso un segnale a quattro livelli noto come 2B1Q⁴⁰, per il quale sono standardizzate due diverse velocità di trasmissione.

Nella modalità cosiddetta di *Accesso Base* (BRI, *Basic Rate Interface*), si ha a disposizione un collegamento numerico di banda base a 144 kbps, in cui trova posto una struttura di trama che ospita due canali voce (B1 e B2, da *Bearer*, ossia *portatore*, con dati PCM) a 64 kbps, in cui la trasmissione avviene in modo ininterrotto, e un canale dati (D) a 16 kbps, in cui la trasmissione avviene in modalità a pacchetto, ed in cui trovano posto le informazioni di segnalazione⁴¹, come il protocollo Q.931⁴².

Accesso Base ISDN



Nella modalità di *Accesso Primario* (PRI, *Primary Rate Interface*), adatta al collegamento di centralini, si hanno a disposizione 30 canali B (voce) a 64 kbps, ed un canale D (dati) di segnalazione a 64 kbps. Pertanto, PRI viene direttamente interconnesso al primo livello (E1) della gerarchia PDH descritta al § 24.3.4.

Dato che l'accesso ISDN preserva il flusso binario inviato sui canali B da estremo a estremo della rete, su quegli stessi canali possono essere inviate anche informazioni niente affatto vocali, ma bensì nativamente numeriche, purché il ricevente condivida le stesse modalità di interpretazione dei bit in arrivo. Sfruttando tale possibilità, sono stati (ad esempio) definiti i primi standard di videotelefonata H.320⁴³.

24.9.3 Sistema di segnalazione numero 7

Il *Signaling System #7* (SS7⁴⁴) è un insieme di protocolli di segnalazione telefonica a canale comune, usato per controllare la maggior parte delle chiamate telefoniche della PSTN

³⁸<http://hea-www.harvard.edu/~fine/ISDN/n-isdn.html>

³⁹<http://www.ralphb.net/ISDN/ifaces.html>

⁴⁰<https://it.wikipedia.org/wiki/2B1Q>

⁴¹<http://www.rhyshaden.com/isdn.htm>

⁴²<https://en.wikipedia.org/wiki/Q.931>

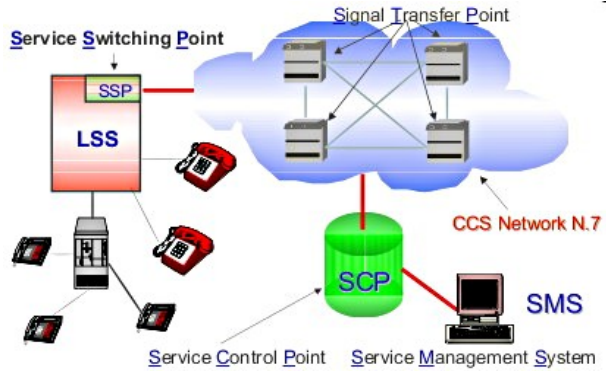
⁴³<https://it.wikipedia.org/wiki/H.320>

⁴⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Signalling_System_No._7

mondiale, che in questo caso prende il nome di *Intelligent Network* (IN⁴⁵). Oltre ad gestire la fase di instaurazione e abbattimento della chiamata, permette altri servizi come reindirizzamento, carte prepagate, SMS, numero verde, conferenza, richiamata su occupato...

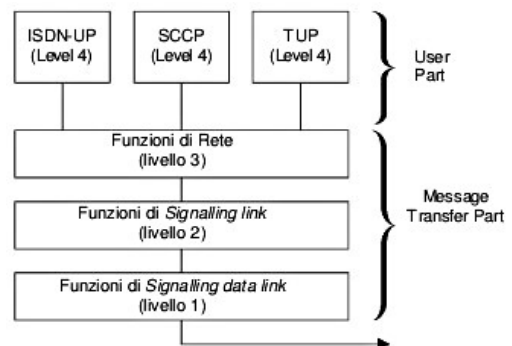
L'ss7 è descritto dalla serie di raccomandazioni ITU-T Q.700⁴⁶,

a cui aderiscono anche le varianti regionali descritte da altri enti normativi. I messaggi ss7 sono trasferiti mediante connessioni numeriche tra entità di segnalazione, ospitate nelle centrali telefoniche, indicate con i termini di



- *Service switching point* (SSP⁴⁷), che termina la segnalazione di utente, ed invia una query all'SCP per determinare come gestire la richiesta di servizio;
- *Signal Transfer Point* (STP⁴⁸), che instrada i messaggi SS7 tra le diverse entità della IN;
- *Service Control Point* (SCP⁴⁹), che interroga un *Service Data Point* (SDP⁵⁰), il quale a sua volta detiene un database che (ad es.) identifica il numero geografico a cui deve essere inoltrata una chiamata diretta ad un numero verde. Alternativamente, l'SCP può determinare la riproduzione di messaggi preregistrati, o richiedere ulteriore input da parte del chiamante, in base all'*Intelligent Network Application Protocol* (INAP⁵¹) che opera sopra il *Transaction Capabilities Application Part* (TCAP) della pila protocollare ss7.

Oltre alle entità che prendono parte alla architettura, ss7 è definito anche nei termini della gerarchia protocollare che descrive la stratificazione delle funzioni necessarie allo svolgimento dei servizi richiesti. Il semplice scambio dei messaggi tra le entità è basato su di una rete a commutazione di pacchetto, ed avviene in base alle procedure collettivamente in-



⁴⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_Network

⁴⁶<https://www.itu.int/rec/T-REC-Q.700/en>

⁴⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Service_switching_point

⁴⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Signal_Transfer_Point

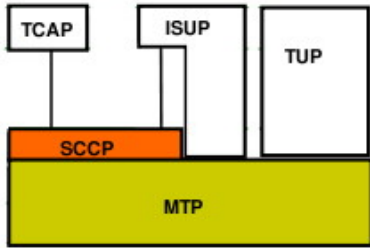
⁴⁹https://en.wikipedia.org/wiki/Service_control_point

⁵⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Service_data_point

⁵¹<https://en.wikipedia.org/wiki/INAP>

dicata come *Message Transfer Part* (MTP⁵²), responsabile della consegna affidabile dei messaggi ss7 tra le parti in comunicazione. Le funzioni di MTP sono stratificate su tre livelli, che dal basso in alto, si occupano degli aspetti di trasmissione tra le entità, della gestione degli errori in modo da garantire una comunicazione affidabile, e dell'instradamento dei messaggi tra le entità.

Al di sopra della MTP possono operare diversi protocolli detti di *User Part*, come ad esempio il *Signalling Connection Control Part* (sccp⁵³), che arricchisce le funzionalità di rete, offrendo ulteriori capacità di indirizzamento, ed un servizio orientato alla



connessione anziché a pacchetto; attraverso sccp possono operare processi applicativi basati sul *Transaction Capabilities Application Part* (TCAP⁵⁴).

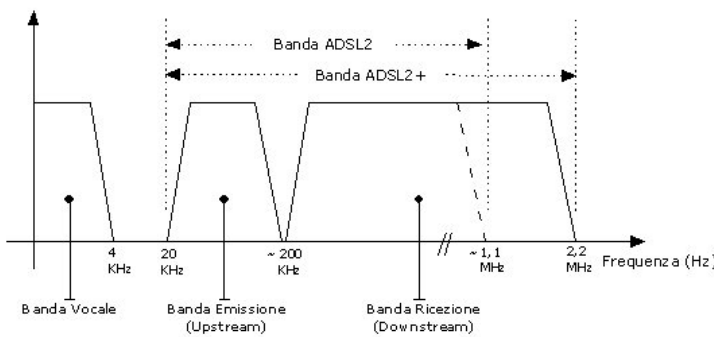
Altri esempi di User Part sono la *Telephone User Part* (TUP⁵⁵) e la *ISDN User Part* (ISUP⁵⁶). TUP è stata la prima UP ad essere definita, e fornisce il supporto all'offerta di servizi PSTN mediante la rete ss7. Attualmente è quasi ovunque rimpiazzato da ISUP, che

offre altri servizi, come ad esempio l'identificazione del chiamante, e che può dialogare con l'MTP anche per il tramite di sccp.

Qualora la rete di interconnessione tra le entità della IN sia una rete IP, allora sono da considerare gli ulteriori protocolli indicati come SIGTRAN⁵⁷ o *Signalling Transport*.

24.9.4 ADSL

L'*Asymmetric Digital Subscriber Line*⁵⁸ è l'insieme di tecnologie trasmissive e di rete per mezzo delle quali viene fornito l'accesso ad Internet *a banda larga* per il tramite del doppino telefonico (*subscriber loop*) in rame, già utilizzato per il normale servizio



telefonico POTS. L'uso condiviso del mezzo è reso possibile realizzando la trasmissione numerica ADSL su di una banda di frequenze *più elevate* di quelle usate da POTS, come mostrato in fi-

⁵²https://en.wikipedia.org/wiki/Message_Transfer_Part

⁵³https://en.wikipedia.org/wiki/Signalling_Connection_Control_Part

⁵⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Transaction_Capabilities_Application_Part

⁵⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Telephone_User_Part

⁵⁶https://en.wikipedia.org/wiki/ISDN_User_Part

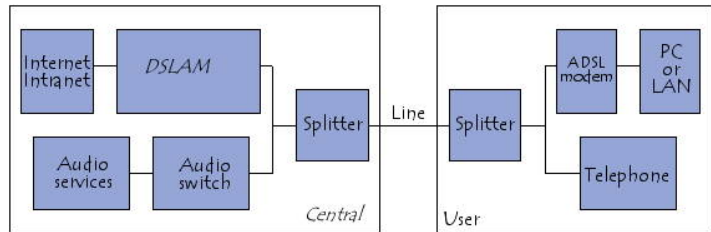
⁵⁷<https://en.wikipedia.org/wiki/SIGTRAN>

⁵⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Asymmetric_digital_subscriber_line

gura, dove sono rappresentati gli intervalli di frequenza riservati alla telefonia PSTN, ai dati in uscita (*upstream*) ed in ingresso (*downstream*).

La massima velocità di trasmissione è stata inizialmente posta rispettivamente pari ad 1 ed 8 Mbps per i due versi trasmissivi, anche in funzione della lunghezza del collegamento utente - centrale⁵⁹; successivamente, la massima velocità di ricezione è stata elevata rispettivamente a 12 e 20 Mbit/sec per gli standard ADSL2 e ADSL2+.

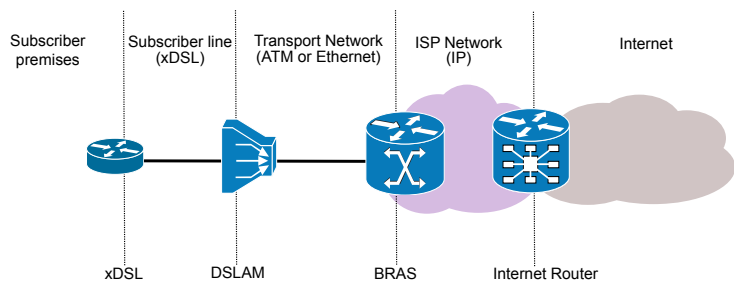
I due segnali (vocale e numerico) sono poi separati su linee differenti⁶⁰ inserendo, a valle della presa telefonica casalinga, un doppio filtro passa-alto e passa-



basso detto *splitter*⁶¹. Un filtro del tutto simile esiste anche dal lato centrale, in modo da inoltrare la componente in banda audio alla centrale POTS, e la componente dati verso un dispositivo DSLAM.

DSLAM e oltre Il *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* risiede nella centrale dell'operatore che offre il servizio POTS, provvede ad effettuare la demodulazione del segnale ADSL di ogni singolo utente, e si occupa di aggregare il traffico relativo a più utenti ed inviarlo verso gli ISP (*Internet Service Provider*) con cui gli utenti hanno un contratto di connessione ad Internet.

A questo fine può essere necessario attraversare prima una rete di trasporto⁶² basata su ATM o ETHERNET, che termina il traffico sul *Broadband Remote Access Server*



(BRAS)⁶³ dell'ISP, utilizzato da quest'ultimo anche per terminare il protocollo di strato di collegamento PPP⁶⁴, svolgere le funzioni di autenticazione dell'accesso, ed applicare eventuali *policy* a livello IP. Quindi, l'ISP provvede ad interconnettere il traffico del

⁵⁹All'aumentare della lunghezza del collegamento, oltre a ridursi la potenza ricevuta e quindi peggiorare l'SNR, aumenta l'entità della diafonia (di tipo NEXT, pag. 644) tra utenti differenti, determinando un ulteriore peggioramento di SNR, che la tecnica di modulazione affronta riducendo la velocità trasmissiva.

⁶⁰Ciò permette di non ascoltare nel telefono il *fruscio* della trasmissione ADSL, e di ridurre il rischio che le comunicazioni vocali determinino *la caduta* della connessione ADSL.

⁶¹I modem più recenti incorporano il passa alto al loro interno, e sono venduti assieme a splitter con la sola funzione passa basso per il canale vocale.

⁶²Non lasciarsi fuorviare dal ruolo di *trasporto* della rete, che in effetti assolve unicamente un ruolo di *livello due* (o di collegamento), in quanto il punto di uscita non è qualsiasi, ma l'ISP fornitore dell'utente.

⁶³https://en.wikipedia.org/wiki/Broadband_remote_access_server

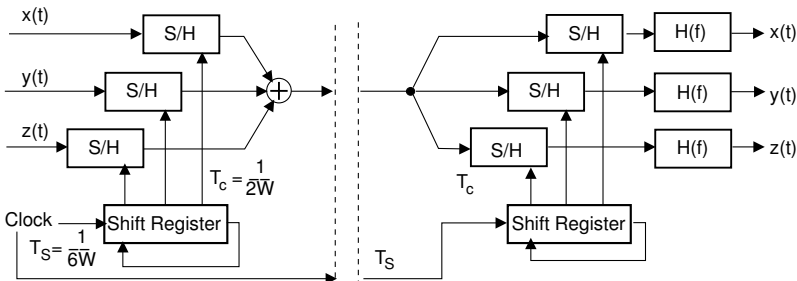
⁶⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Point-to-Point_Protocol

cliente con la rete Internet. Alternativamente, l'ISP può disporre di un *Point of Presence* (POP) nella stessa centrale in cui sono ospitati i DSLAM dei propri clienti⁶⁵, che in questo caso producono direttamente traffico IP, inoltrato verso la *core network* dell'ISP usando la sua stessa connettività.

DMT Il modem ADSL utilizza una tecnica di modulazione numerica multi-portante detta *Discrete Multi Tone*, in cui il flusso binario viene ripartito su più canali di frequenza contigui, ed il segnale analogico sintetizzato direttamente nel dominio della frequenza mediante il calcolo di una FFT, come previsto dalla tecnica di trasmissione OFDM (vedi § 16.8). In questo modo, oltre a semplificare le operazioni di equalizzazione, è possibile variare la velocità di trasmissione in modo indipendente per le diverse portanti, e mantenere buone prestazioni anche nel caso in cui l'SNR vari con la frequenza.

24.9.5 TDM mediante modulazione di ampiezza degli impulsi

Al tempo in cui la realizzazione del componente di quantizzazione (vedi § 4.3.1.1) presentava discrete difficoltà circuitali, si pensò⁶⁶ di sfruttare il teorema del campionamento (vedi § 4.1) per inviare su di un unico collegamento più comunicazioni multiplate a divisione di tempo (TDM = *Time Division Multiplex*). E' sufficiente infatti sommare alla funzione $x^\circ(t)$ introdotta al § 4.2.4 altri segnali simili, ad esempio $y^\circ(t)$, $z^\circ(t)$ come mostrato alla figura seguente, ognuno campionato a frequenza f_c , ma sfasato rispetto agli altri.



Da questa modalità di multiplexazione analogica deriva il termine *onda PAM*, che sta per *Pulse Amplitude Modulation*, ovvero modulazione ad ampiezza di impulsi; gli impulsi sono separati da un intervallo $T_s = \frac{1}{Nf_c}$, con N pari al numero di segnali multiplati. Il pedice s indica che si tratta di un *periodo di simbolo*. Il segnale $x_{PAM}(t)$ composto dalle 3 sorgenti dell'esempio della figura in alto è mostrato a lato, e può essere nuovamente campionato estraendo $x(nT_c)$, $y(nT_c)$, $z(nT_c)$, mentre i segnali $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$ sono riprodotti

⁶⁵Come ad es, nel caso dell'Unbundling: https://it.wikipedia.org/wiki/Unbundling_local_loop

⁶⁶La *pensata* non ebbe molte applicazioni, se non in ambito della commutazione interna ad esempio ad un centralino, a causa della sensibilità del metodo agli errori di temporizzazione, ed alle caratteristiche del mezzo trasmissivo su cui inviare il segnale PAM.

facendone passare gli impulsi campionati a frequenza f_c in un filtro di ricostruzione con banda $W \leq f_c/2$.

24.10 Riferimenti

Per questo capitolo un po' particolare, si elencano in modo distinto alcune fonti on-line a cui ci si è ispirati, e dalle quali sono state tratte alcune illustrazioni. Purtroppo mi avvedo che ora (2022) la quasi totalità degli indirizzi risulta *non più raggiungibile!* :-)

- La Rete di Telecomunicazioni http://net.infocom.uniroma1.it/corsi/impianti/lezioni_new/lez_1.pdf di *Stefano Paggi* <http://net.infocom.uniroma1.it/corsi/impianti/impianti.htm>
- ISDN <http://www-tlc.deis.unibo.it/Didattica/CorsiBO/RetiLB/lucidi/ISDN.pdf> di *Giorgio Corazza* <http://www-tlc.deis.unibo.it/Didattica/CorsiBO/RetiLB/>
- Sistema di Segnalazione SS No 7 <http://www.cedi.unipr.it/links/Corsi/telematica/Materiale/dispense/Telefonia/Ss7.pdf> di *A. Lazzari* <http://www.cedi.unipr.it/links/Corsi/telematica/Materiale/dispense.html>
- La segnalazione a canale comune http://primo.ing.uniroma1.it/materiale/Commutazione/2007_2008/IV.ppt di *Aldo Roveri*
- La Rete Telefonica <http://www.cedi.unipr.it/links/Corsi/telematica/Materiale/dispense/Telefonia/Telefonica.pdf> di *A. Lazzari*
- Understanding SONET/SDH <http://www.electrosofts.com/sonet/index.html>
- Reti Ottiche <http://net.infocom.uniroma1.it/corsi/ro/ro.htm> di *Andrea Baiocchi*

L'opera

Trasmissione dei Segnali e Sistemi di Telecomunicazione

è il risultato di un progetto ventennale di cultura libera, aggiornato di continuo ed evolutosi fino alla forma attuale. La sua disponibilità pubblica è regolata dalle norme di licenza CREATIVE COMMONS

*Attribuzione - Non commerciale -
Condividi allo stesso modo*



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.it>

e tutte le risorse relative al testo sono accessibili presso

<https://teoriadeisignali.it/libro/>

Puoi contribuire al suo successo promuovendone la diffusione e supportarne lo sviluppo attraverso una donazione, in buona parte devoluta ai progetti *open source*¹ che ne hanno resa possibile realizzazione e divulgazione. Ai donatori viene accordato un accesso *vitalizio* al formato PDF *navigabile* di tutte le edizioni presenti *e future*.

1

- . Lyx - <http://www.lyx.org/>
- . L^AT_EX - <https://www.latex-project.org/>
- . TeX Users Group - <https://tug.org/>
- . Inkscape - <http://www.inkscape.org/>
- . Gnuplot - <http://www.gnuplot.info/>
- . Octave - <http://www.gnu.org/software/octave/>
- . Geany - <https://www.geany.org/>
- . Linux - <https://www.linux.it/>
- . Free Software Foundation - <https://shop.fsf.org/>
- . GNOME Foundation - <https://www.gnome.org/>
- . Mozilla Foundation - <https://www.mozilla.org/it/>
- . Wikipedia - <https://it.wikipedia.org>
- . Internet Archive - <https://archive.org/about/>
- . Creative Commons - <https://creativecommons.it/chapterIT/>
- . WordPress - <https://it.wordpress.org/>
- . Phplist - <https://www.phplist.org/>