



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

LA QUALITÀ DELLA VOCE SU RETI IP

Relatore: Prof. Giuseppe Tronca

Laureando: RICCARDO POLLIS

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

Indice

1	Introduzione	1
2	Breve storia rete telefonica	3
2.1	Rete telefonica analogica	4
2.2	Rete telefonica digitale	6
2.3	ADSL	7
3	Traffico voce su rete dati	11
3.1	Reti a commutazione di circuito	11
3.2	Reti a commutazione di pacchetto	12
3.3	Confronto	13
3.4	Protocollo IP	14
3.4.1	Datagramma IP.....	15
3.5	Traffico voce su reti a commutazione di pacchetto	16
4	Problemi e vantaggi di VoIP	19
4.1	Ritardo	19
4.1.1	Ritardo di propagazione	19
4.1.2	Ritardo di gestione	20
4.1.3	Ritardo di accoramento	20
4.2	Jitter	21
4.3	Eco	23
4.4	Perdita Pacchetti	25
4.5	QoS	27
4.6	Distorsione vocale	28
4.7	Vantaggi di VoIP	30

5 Realizzare una rete VoIP di qualità	33
5.1 Conversione analogico digitale	33
5.2 Codifica vocale	33
5.2.1 Standard di codifica	34
5.2.2 Effetti della codifica sulla qualità	35
5.2.3 Tecniche di codifica per migliorare la qualità	36
5.3 Costruzione dei pacchetti	38
5.4 Valutazione della qualità della voce	39
5.4.1 Mean option score (MOS)	40
5.4.2 Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM)	41
Conclusioni	43
Appendice A:	45
Misura della distorsione vocale	
Appendice B:	51
Tipi di codec	

Capitolo 1

Introduzione:

Negli ultimi anni nelle reti telefoniche si è assistito ad un sorpasso del traffico dati su quello voce. Questo è potuto avvenire grazie alla nascita di sistemi, come la famiglia DSL, che hanno permesso di usare una rete nata per le chiamate anche per trasmettere dati in grandi quantità attraverso l'utilizzo del protocollo IP.

Questa grande diffusione delle reti IP ha portato ad una drastica riduzione dei prezzi di tutti gli apparati di rete di questo settore con un conseguente possibile risparmio per chi volesse investire su questa tecnologia.

Lo scopo di VoIP (Voice Over Internet Protocol) è quello di fare convergere anche la telefonia sulla rete dati, si potrà così avere un'unica rete trasparente rispetto all'informazione da trasportare.

Le reti VoIP sono cresciute molto rapidamente sia in termini di dimensioni di mercato, che di evoluzione tecnologica e si sta cercando di ottenere un servizio più economico della telefonia tradizionale, ma che mantenga la stessa qualità.

Il costo sulla chiamata con questa tecnologia, al momento, è sicuramente inferiore a quello della telefonia tradizionale, anche se si può ipotizzare che quando si arriverà ad avere una qualità del servizio comparabile ci sarà anche un aumento dei costi dovuto alle spese degli investimenti per migliorare la qualità.

Nel seguito dopo aver analizzato le evoluzioni della telefonia che hanno portato alla rete attuale, ed aver considerato le differenze tra la rete a commutazione di circuito e quella a commutazione di pacchetto, utilizzata da VoIP, verrà trattato l'aspetto della qualità della voce.

La qualità è un termine che può assumere diversi significati. Qui viene usato per esprimere come il cliente percepisce la voce e quanto è soddisfatto del servizio che gli viene offerto.

La qualità intesa come Quality of Service (QoS) invece si riferisce ad un'insieme di funzioni intelligenti di smistamento del traffico all'interno della rete e verrà invece solo accennata e non analizzata in modo approfondito.

Si esamineranno quindi tutti i problemi che nascono se si vuole trasmettere un traffico di tipo real-time sulla rete dati e quali accorgimenti costruttivi si possono utilizzare per avere una buona qualità della voce.

Per concludere si vedrà quali sono i vantaggi nell'utilizzare VoIP e come è possibile misurare la qualità percepita dall'utente, in modo da poter capire se questo è soddisfatto del servizio offerto oppure cosa può essere migliorato.

Capitolo 2

Breve storia rete telefonica

Il telefono fu inventato nel 1876 da Meucci. All'inizio era solo un doppio trasduttore che aveva il compito di trasformare la voce in un segnale elettrico e viceversa.



Figura 2.1: Telefono di Meucci

La prima trasmissione della voce, effettuata nel 1876, era una semplice chiamata su circuito, ovvero c'era un cavo che connetteva fisicamente i due apparecchi telefonici. Era quindi solo possibile sollevare la cornetta telefonica e comunicare con una sola persona ovvero quella all'altro capo del circuito.

2.1 Rete telefonica analogica

Nel tempo la rete telefonica si è evoluta sempre di più, permettendo di collegare tra loro molti utenti con una linea di tipo bidirezionale (potevano parlare contemporaneamente entrambi gli utenti) . Si è reso quindi necessario introdurre una numerazione telefonica per capire con quale utente della rete si voleva parlare.

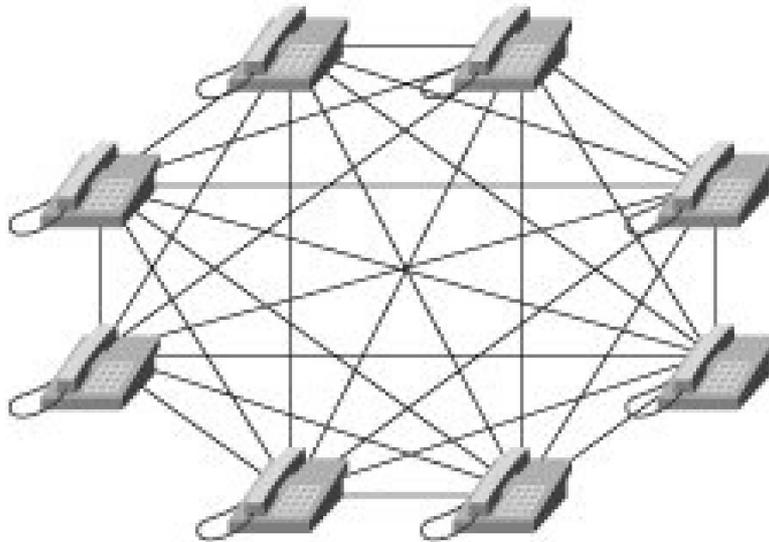


Figura 2.2: Rete completamente connessa

Il primo ostacolo da superare, per costruire la rete telefonica, era quello di capire come collegare tra loro un numero elevato di linee telefoniche. Ci si rese ben presto conto che non era possibile realizzare un collegamento per ogni coppia di telefoni (Figura 2.2). Utilizzando questo metodo, infatti, i collegamenti totali sarebbero stati:

$$\binom{N}{2} = \frac{N!}{2!(N-2)!}$$

Dove N è il numero di utenti della rete.

Quindi in una rete con diverse centinaia di milioni di utenti sarebbero stati necessari un numero enorme di collegamenti , bisognava allora trovare un metodo alternativo.

Per risolvere questo problema si pensò di usare una rete a stella (Figura 2.3). Tale rete prevedeva di collegare tutti gli utenti ad un centralino che metteva in comunicazione le due persone che lo richiedevano.

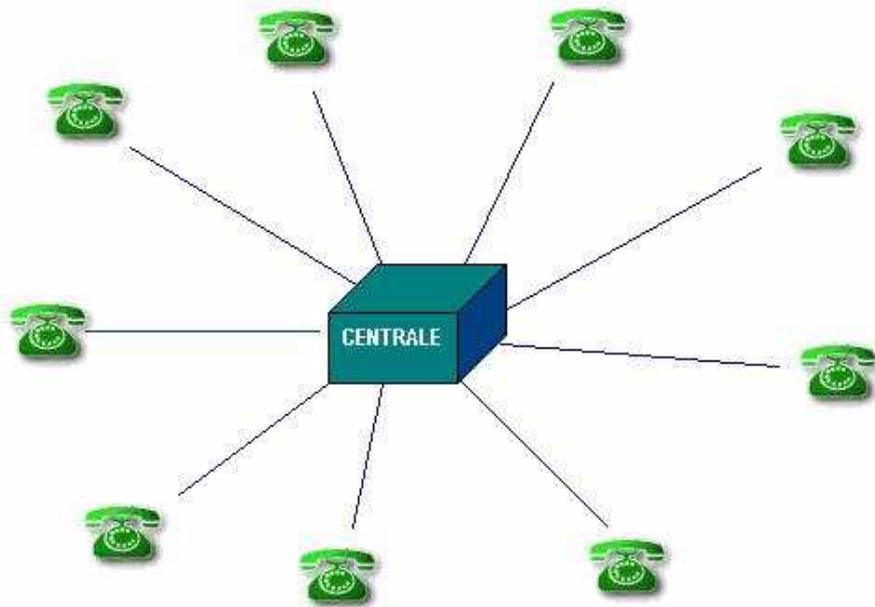


Figura 2.3: Rete a stella

Il centralino fu inventato da Bell nel 1877, all'inizio era un dispositivo con tanti morsetti nel quale una persona (il centralinista) aveva il compito di collegare manualmente i due utenti che desideravano comunicare. Dovrà passare quasi un secolo prima che il centralinista sia sostituito da centrali elettroniche.

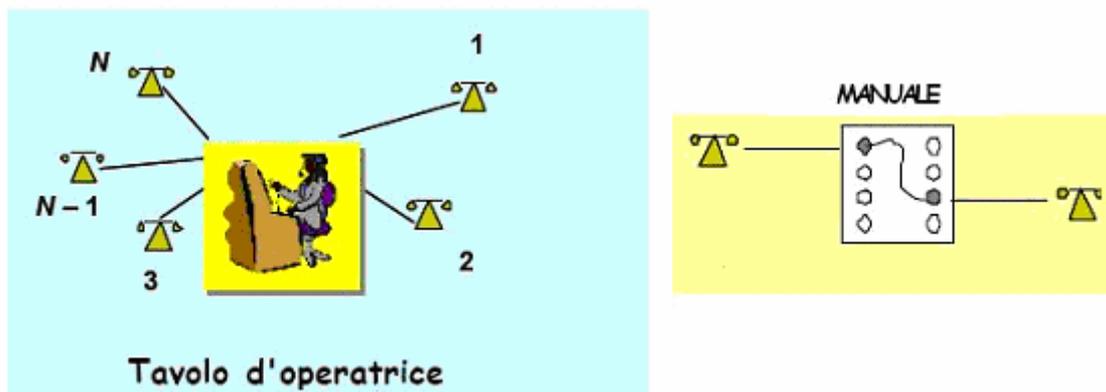


Figura 2.4: Centralino con operatore

Con l'introduzione del centralino diventava quindi possibile collegare tra loro N utenti con solo N collegamenti. Non era però possibile realizzare una rete così estesa utilizzando un solo centralino, si sarebbero dovuti realizzare collegamenti troppo lunghi e di conseguenza cavi e sistemi di rigenerazione, per contrastare l'attenuazione dei segnali, troppo costosi.

La soluzione adottata fu quindi quella di fare una rete a stella per ogni zona e poi collegare tra loro i vari centralini con cavi migliori rispetto al tradizione doppino (coassiali prima e fibra poi) in modo da poter coprire grandi distanze. Il collegamento tra centrali doveva essere studiato in modo statistico per evitare che gli utenti trovassero frequentemente la linea occupata.

Con il tempo, grazie a tecniche come la forchetta telefonica, all'uso di cavi e modulazioni che permettevano di trasportare sempre più informazione e grazie anche ai passi avanti nel mondo dell'elettronica, fu possibile espandere sempre di più la rete telefonica.

Per rendersi conto di questa espansione basti pensare che già nel 1968 si era arrivati a trasportare su cavo coassiale, grazie a tecniche di modulazione FDM, fino a 60 MHz il che vuol dire avere a disposizione 10000 canali fonici.

2.2 Rete telefonica digitale

La rete telefonica introduce ovviamente del rumore, inoltre, visto che il segnale subisce delle attenuazioni, è necessario amplificarlo dopo una certa tratta, ma così facendo è inevitabile amplificare anche il rumore ed eventuali altri disturbi.

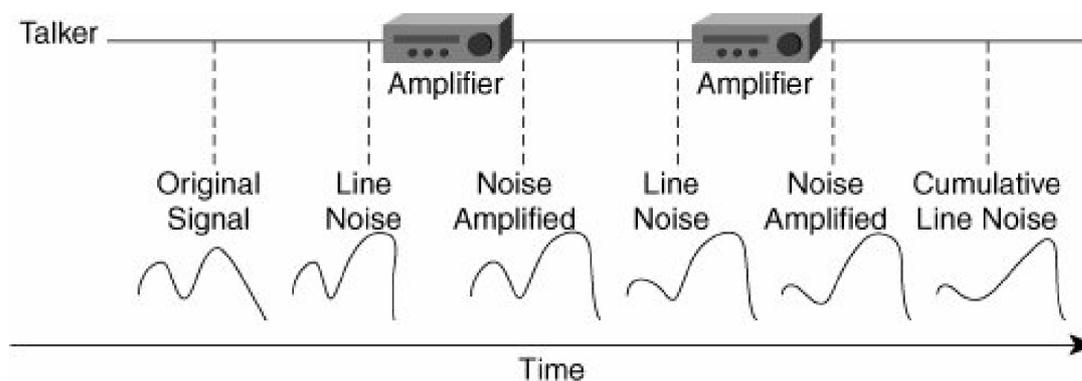


Figura 2.5: Amplificazione del rumore

Si immagini ora di non trasmettere un segnale analogico, ma uno digitale, trasformando il segnale in una sequenza di bit e poi associando ad ogni simbolo una certa forma d'onda. A questo punto non ha più importanza di quanto viene distorto il segnale trasmesso, ma solo che esso sia corretto nel punto di decisione.

Inoltre non è più necessario amplificare il segnale ad ogni tratta, ma si può più semplicemente decodificarlo e ritrasmetterlo ogni volta, così non c'è più il problema dell'amplificazione del rumore.

Vediamo ora come è possibile ottenere un segnale digitale partendo da uno analogico: Il metodo di codifica più comune di un segnale vocale analogico in sequenze digitali di 1 e 0 è la modulazione PCM:

Secondo il teorema di Nyquist il segnale deve essere campionato al doppio della sua frequenza, quindi per avere una trasmissione della voce di buona qualità è necessario prendere 8000 campioni al secondo.

Non è sufficiente effettuare il campionamento per avere una forma d'onda digitale, ma è anche necessario quantizzare il segnale, il PCM per fare questo utilizza una codifica a 256 livelli (8 bit).

Il Bit Rate del segnale è quindi:

$$R = 8 * 2B = 8 * 8000 = 64 \text{ kbit/s}$$

Trasmettendo segnali digitali e utilizzando tecniche di modulazione di tipo TDM si è arrivati a trasmettere su cavo coassiale fino a 565 Mbit/s, il che vuol dire con una banda equivalente di 565 MHz avere fino a 7000 canali voce.

Successivamente con l'evoluzione della fibra ottica e dei sistemi di modulazione WDM si è arrivati a trasmettere fino a 10 Gbit/s.

Le considerazioni fatte fino ad ora si riferiscono però solo ai collegamenti a lunga distanza tra centrali. Per quanto riguarda la rete d'accesso, dalla centrale all'utente, la situazione è molto diversa in quanto, nonostante le enormi evoluzioni tecnologiche che ci sono state negli ultimi anni, sostituire il tradizionale doppino telefonico avrebbe costi per l'utente troppo elevati.

Il passo successivo, per rendere digitale anche la rete d'accesso, è stata la rete integrata nei servizi ISDN (Integrated Services Digital Network) nella quale i vari segnali non sono distinti in base alla loro natura.

Quindi per quanto riguarda la voce non c'è più un segnale analogico che arriva al telefono, ma un segnale digitale e di conseguenza l'apparecchio telefonico deve essere in grado di decodificare il segnale ricevuto.

L'ISDN, migliora lo sfruttamento dei cavi in rame esistenti, permettendo ad esempio di fornire 2 canali a 64 kbit/s, che possono essere usati sia per la fonia che per i dati, e uno a 16 kbit/s usato per la segnalazione.

Con l'ISDN viene ridotta di molto la diafonia e buona parte dei disturbi che erano presenti nella rete telefonica tradizionale.

2.3 ADSL

Nel nuovo millennio lo sviluppo di Internet e il suo uso rivolto ormai a tutte le fasce di utenti, attraverso le tre principali classi di servizio: Web, e-mail e file transfert, rese sempre più evidente l'inadeguatezza della rete d'accesso esistente, la quale non era nata per un traffico di tipo dati e metteva a disposizione una banda molto limitata.

Nella Tabella 2.1 vengono riportati alcuni dei nuovi servizi di cui si potrebbe usufruire avendo a disposizione una connessione adeguata:

Informazione e Comunicazione	Intrattenimento	Televisione e multimedia
		Foto/video
		Audio-HiFi
		Gioco
	Socio-Culturali	Accesso da remoto a LAN aziendale
		Telelavoro, lavoro cooperativo
		Home news, Info-push e comunità virtuali
		Home banking, acquisti e pagamenti on-line
		Telemedicina, Teledidattica
	Telecomunicazioni	Integrazione con cellulari, PDA ecc. per mobilità
		Servizi telefonici
		Videocomunicazione
		E-mail
Automazione Domestica	Sicurezza	Telesoccorso
		Antintrusione, video controllo
		Antincendio, antifughe gas
	Gestione Ambiente	Distribuzione energetica e consumi
	Robotica Domestica	Gestione automatizzata apparecchi di casa

Tabella 2.1: Servizi Internet

La soluzione migliore per risolvere questo problema fu quella dell'utilizzo della famiglia xDSL (concepita agli inizi degli anni '90) che consentiva di usare il doppio telefonico già esistente, trasportando su di esso un traffico con un bit-rate molto più elevato di quello disponibile fino a quel momento.

In particolare la più usata dagli utenti privati fu la tecnologia ADSL, caratterizzata da un traffico asimmetrico.

Questa si basa su una modulazione di tipo DMT (Discrete Multi Tone Modulation) che consiste nel dividere il segnale in 255 toni distanziati di 4.3 KHz ed arrivare così ad avere una velocità di 640 kbit/s in upstream e fino a 8 Mbit/s in downstream .

Per quanto riguarda l'allocazione in banda, al fine di non disturbare il canale fonico tradizionale, l'ADSL sfrutta la banda al di sopra di 32 kHz (al di sopra di 271 KHz nel caso sia presente una rete ISDN) e fino a 1.1 Mhz..

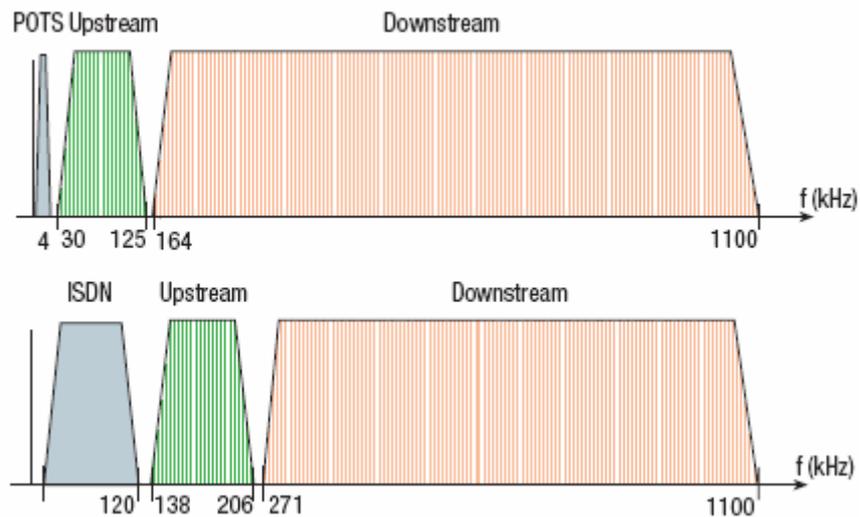


Figura 2.6: Allocazione in frequenza ADSL

Capitolo 3

Traffico voce su rete dati

In questo capitolo verranno analizzate le differenze tra la rete a commutazione di circuito, usata dalla telefonia tradizionale, e quella a commutazione di pacchetto, usata dalla rete dati e da VoIP.

Successivamente si analizzerà il protocollo IP in quanto la tecnologia VoIP (Voice Over Internet Protocol) ne fa uso.

Infine si analizzeranno i problemi per trasmettere un traffico di tipo voce su una rete a commutazione di pacchetto, nata per trasportare dati.

3.1 Reti a commutazione di circuito

La commutazione di circuito (circuit-switching) è utilizzata nelle tradizionali linee telefoniche. Prevede che la connessione tra due nodi della rete venga realizzata attraverso un cammino fisico scelto, nodo per nodo, con assegnate modalità di instradamento.

Il segnale da trasmettere rimane quindi compatto e viene stabilito un percorso riservato unicamente ad esso fino al termine della trasmissione.

Prima di iniziare la comunicazione è necessario creare il cammino fisico che verrà usato per la trasmissione (circuit set up), il quale verrà in seguito abbattuto alla fine della comunicazione (circuit tear down) liberando di conseguenza le risorse trasmissive.

Nella Figura 3.1 viene riportato un esempio di collegamento tra due telefoni A e B tramite una rete a commutazione di circuito, passando attraverso vari nodi.

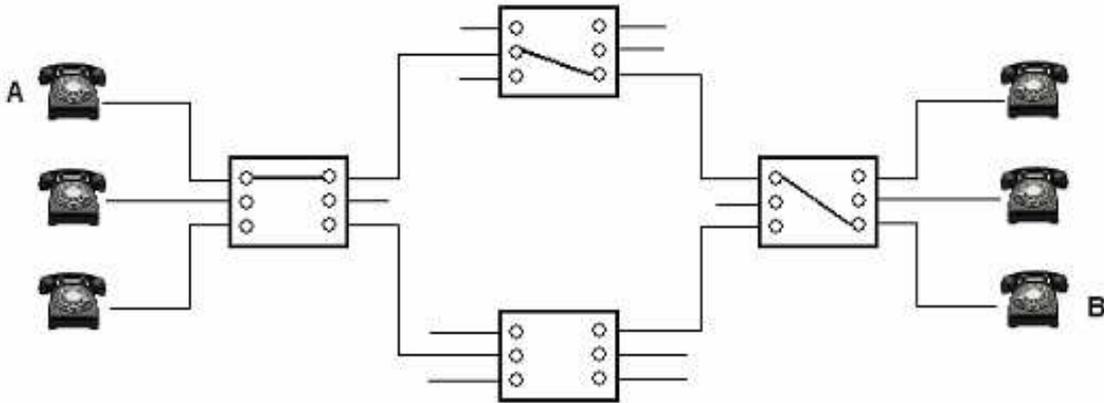


Figura 3.1: Rete a commutazione di circuito

3.2 Reti a commutazione di pacchetto:

La commutazione di pacchetto (packet switching) consiste nel dividere il messaggio da trasmettere in pacchetti, ciascuno contenente anche delle informazioni di controllo come, ad esempio, gli identificativi del mittente e del destinatario (contenuti nell'header)

Quando un nodo intermedio riceve un pacchetto, dopo aver consultato l'header, decide quale è il percorso migliore che questo può prendere per raggiungere la sua destinazione. Il percorso seguito di conseguenza non è lo stesso per tutti i pacchetti e dipende dalle condizioni della rete.

I pacchetti al ricevitore possono non arrivare in ordine, quindi devono essere riordinati, questo è possibile grazie all'utilizzo dell'informazione contenuta nell'header.

Tale tecnica non comporta l'attivazione di una linea di comunicazione dedicata tra trasmettitore e ricevitore, ma consente l'utilizzo di una linea da parte di più utenti in contemporanea, massimizzando così l'utilizzo dei mezzi trasmissivi impiegati.

Nella Figura 3.2 viene riportato un esempio che aiuta a capire il concetto di commutazione di pacchetto:

Un messaggio viene diviso in 5 parti ed inoltrato nella linea, si può notare che i pacchetti seguono percorsi diversi.

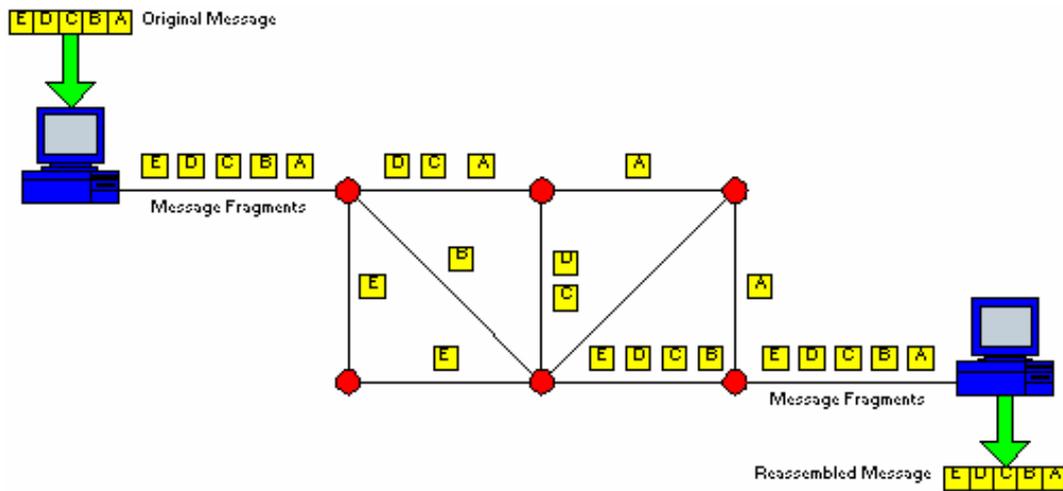


Figura 3.2: Rete a commutazione di pacchetto

Ecco un confronto tra i vantaggi e gli svantaggi delle reti a commutazione di pacchetto e quelle a commutazione di circuito.

3.3 Confronto

COMMUTAZIONE DI CIRCUITO	COMMUTAZIONE DI PACCHETTO
<p>SVANTAGGI:</p> <p>Ritardo per istaurare la connessione.</p> <p>Bassa efficienza nell'uso del mezzo in quanto la connessione è dedicata ad un solo utente.</p> <p>Bisogna riservare il cammino fisico per tutto il tempo della conversazione.</p>	<p>VANTAGGI:</p> <p>Nessun ritardo di instaurazione della connessione.</p> <p>Efficienza nell'instradamento: Condivisione di uno stesso canale trasmissivo tra più sorgenti, si ha così il massimo sfruttamento del canale.</p> <p>I canali fisici sono utilizzati solo per il tempo strettamente necessario.</p>

<p>Perdita della connessione in caso di guasto del canale</p> <p>Costo elevato a causa della allocazione riservata del canale.</p> <p style="text-align: center;">VANTAGGI:</p> <p>Non sono richiesti tempi di instradamento.</p> <p>Avendo una connessione dedicata c'è sempre una banda garantita in quanto il trasmettitore è l'unico a utilizzare il canale (connessione più sicura).</p> <p>Il messaggio non viene scomposto e arriva quindi sempre in ordine al ricevitore</p> <p>Semplicità di realizzazione.</p>	<p>Si adatta ad improvvise situazioni di congestione della rete o ai guasti: Se un nodo risulta saturo può comunicare tale situazione ai nodi adiacenti, i quali instraderanno i successivi pacchetti lungo percorsi alternativi.</p> <p>Costo basso grazie alla condivisione del canale trasmissivo.</p> <p style="text-align: center;">SVANTAGGI:</p> <p>Serve un tempo di instradamento che dipende dal numero di pacchetti e dalla velocità di trasmissione della linea.</p> <p>Se ci sono più pacchetti da trasmettere contemporaneamente vengono memorizzati in una coda, si rischia quindi di avere ritardi o nella peggiore delle ipotesi di perdere pacchetti.</p> <p>C'è la necessità di dividere il messaggio in pacchetti e successivamente ricostruirlo, i pacchetti possono arrivare in disordine.</p> <p>Servono protocolli più complessi</p>
--	--

3.4 Protocollo IP

IP è il protocollo su cui attualmente si basa la rete internet, nasce negli anni 70 grazie ad una serie di ricerche fatte dalle università americane su richiesta del ministro della difesa.

Questo protocollo fornisce una tecnica di trasmissione dati di tipo connection less, orientata al pacchetto ed inoltre, di tipo best effort in quanto non c'è nessuna garanzia

sulla consegna dei pacchetti, il servizio viene di solito reso affidabile ai livelli superiori (TCP).

Ogni pacchetto oltre a contenere i dati del messaggio da inviare deve avere altre informazioni e in particolare la destinazione del pacchetto stesso, non essendoci una connessione prefissata tra trasmettitore e ricevitore.

3.4.1 Datagramma IP:

Il protocollo IP prevede quindi che le informazioni vengano strutturate in unità chiamate datagrammi IP, la cui lunghezza massima è 65535 byte.

Questi possono essere considerati divisi principalmente in due parti:

- Il campo dati, il quale contiene il messaggio da inviare
- L'intestazione (*header*) che contiene appunto le informazioni necessarie per instradare il pacchetto nella rete.

Nella Figura 3.3 viene illustrato come è fatto un datagramma IP:

Version	HLEN	Service Type	Total Length	
Identification			Flags	Fragment Offset
Time to Live	Protocol		Header Checksum	
Source IP Address				
Destination IP Address				
Options				Padding
Dati				
•••				

Figura 3.3: Datagramma IP

Di seguito viene riportata la descrizione dei principali campi:

- ⇒ Version: Versione, attualmente è usata la IPv4
- ⇒ HLEN (IP header length) : Fornisce la lunghezza dell'header
- ⇒ Service Type: Definisce le caratteristiche del servizio(ad esempio la priorità)
- ⇒ Total length: Lunghezza complessiva del datagramma (dati + header)

Può rivelarsi necessario dividere un pacchetto in unità più piccole in base alle caratteristiche della rete.

Nella seconda riga del datagramma sono contenute le informazioni necessarie per la frammentazione:

- ⇒ Identification: Numero identificativo del datagramma originario (16 bit)
- ⇒ Flags: Bit per il controllo della frammentazione (3 bit)

⇒ Fragment Offset: Posizione del frammento nel datagramma di origine (13 bit)

Terza riga:

- ⇒ Time To Live: Numero di nodi da passare prima che il pacchetto venga eliminato (8 bit)
- ⇒ Protocol: Da informazioni sul tipo di traffico trasportato al livello superiore (8 bit)
- ⇒ Header Checksum: Controlla integrità dell'header e NON dei dati avendo a che fare con un servizio Best Effort (16 bit)

Nella quarta e quinta riga sono contenuti rispettivamente l'indirizzo IP del trasmettitore e quello del ricevitore, che si rendono necessari avendo a che fare con un sistema connection less.

Sesta riga:

- ⇒ Options: campo di dimensioni variabili, è opzionale, contiene informazioni sulle operazioni che devono essere effettuate durante il percorso
- ⇒ Padding: campo di dimensioni variabili, è utilizzato per far raggiungere all'area d'intestazione una dimensione di 32 bit o un suo multiplo

Le prime sei righe del datagramma costituiscono quindi il suo header, lo spazio rimanente, che dipende dalle dimensioni totali del datagramma, è ovviamente destinato alla informazione utile, la quale costituisce il vero messaggio da trasmettere.

3.5 Traffico voce su reti a commutazione di pacchetto

Come è stato visto in precedenza, la telefonia tradizionale usa una rete a commutazione di circuito per trasmettere la voce, mentre la rete a commutazione di pacchetto è usata per trasmettere dati.

Se si vuole utilizzare la telefonia sul protocollo IP bisogna tenere conto che questo è stato studiato per applicazioni di tipo non real time (e-mail, file transfer, web). Queste sono caratterizzate da un traffico discontinuo, che può richiedere picchi di banda anche molto elevati ed essere costituito da tempi anche lunghi di inattività.

Il traffico voce non ha invece queste caratteristiche ed è di tipo continuo. Potrebbe quindi sembrare sconveniente l'uso di una rete a commutazione di pacchetto per la trasmissione di segnali vocali.

Bisogna però considerare che già nel 2001 il traffico dati aveva superato di molto il traffico voce (Figura 3.4) e questa differenza sta aumentando sempre di più.

In questo scenario assume quindi importanza la convergenza della voce su reti di tipo dati, ovvero l'obiettivo è quello di avere un'unica rete con una quantità sempre maggiore di servizi.

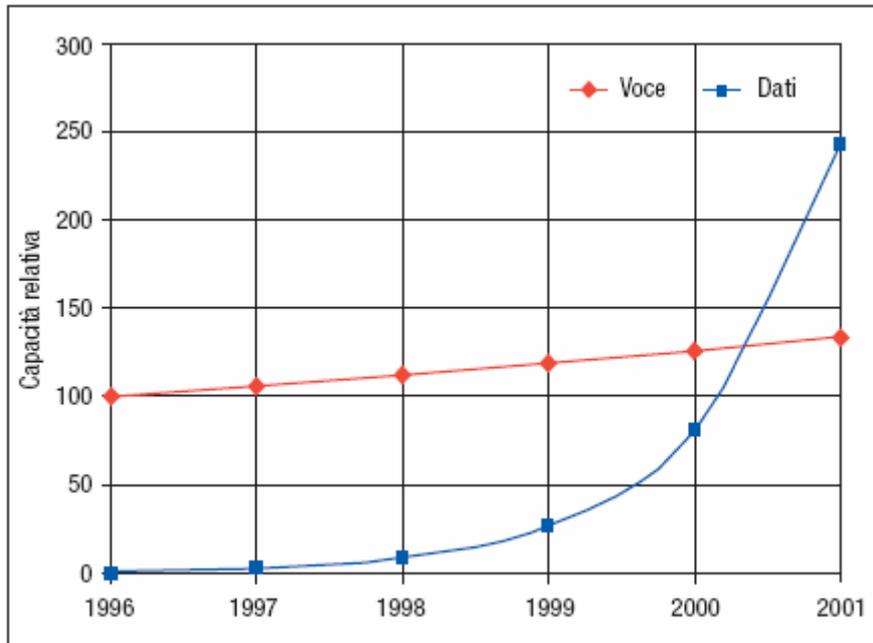


Figura 3.4: Traffico voce

Per avere un corretto funzionamento della rete è importante capire esattamente le risorse che la utilizzeranno.

Usando la rete a pacchetto con i tradizionali flussi dati la progettazione è relativamente semplice. Di solito infatti è nota a priori quanta banda occuperà ogni servizio, inoltre avendo servizi che sono sensibili alla perdita di pacchetto, ma non ai ritardi, nel caso peggiore si verifica solo un rallentamento delle operazioni.

Teoricamente usando un traffico voce dovrebbe essere agevole il dimensionamento dal punto di vista della banda necessaria, in quanto abbiamo a che fare con un traffico continuo e quasi costante.

In realtà non è tutto così semplice perché il segnale vocale prima di essere trasmesso viene campionato e compresso e quindi l'effettivo bit rate dipende dagli algoritmi usati.

Bisogna poi tenere conto del fatto che, come è stato detto in precedenza, abbiamo a che fare con segnali real time e quindi sensibili ai ritardi e come si vedrà in seguito questo è uno dei fattori che maggiormente influenza la **qualità** del segnale vocale.

Capitolo 4

Problemi e vantaggi di VoIP

La tecnologia Voice Over IP presenta dei problemi realizzativi in più rispetto a quelli della telefonia tradizionale. Per capire se si riesce ad avere una qualità, comparabile con quella della PSTN, è necessario considerare tutti i vari problemi contrapposti ai vantaggi dell'usare una rete dati per trasmettere un segnale vocale.

Verranno quindi analizzati tutte le problematiche da superare per arrivare ad avere una buona qualità, in seguito si vedrà però quali sono i vantaggi che si possono avere facendo convergere la voce su rete dati.

4.1 Ritardo

Si definisce ritardo il tempo che il segnale vocale (nel caso di VoIP i pacchetti) impiega ad andare dal trasmettitore al ricevitore.

Si può facilmente intuire che se c'è un tempo di attesa troppo elevato, tra il momento in cui il segnale è inviato e quello in cui arriva, la comunicazione può risultare difficile e viene quindi ridotta di molto la qualità.

Si possono distinguere tre tipologie di ritardo:

4.1.1 Ritardo di Propagazione:

Si tratta del ritardo della propagazione del segnale sulla linea fisica.

La luce nel vuoto si propaga alla velocità di $3 * 10^8 \frac{m}{s}$ il che vuol dire che, se vogliamo

collegare due punti a distanza di 20000 km, per percorrerla sono necessari circa 70 ms.

Da solo questo tipo di ritardo è quasi impercettibile all'orecchio umano, ma unito ad

altri ritardi può causare un degrado della voce.

4.1.2 Ritardo di gestione:

Questo ritardo è dovuto a tutti i processi necessari per inoltrare il segnale nella rete. Se nella tradizionale rete telefonica analogica possono essere considerati rilevanti solo i tempi di commutazione dei vari nodi, per la rete dati dobbiamo sommare anche altri tempi dovuti, ad esempio, alla elaborazione numerica dei segnali e alla compressione dei pacchetti.

4.1.3 Ritardo di accodamento:

Se i pacchetti vengono memorizzati in una coda, a causa di una congestione della linea, si ha come risultato un ritardo di accodamento. Questa situazione può verificarsi se sono stati inviati più pacchetti di quelli che la linea è in grado di gestire.

Il ritardo di accodamento ovviamente non esiste per la rete a commutazione di circuito mentre è presente nella rete dati.

Il protocollo IP è stato ideato per applicazioni di tipo non real time nelle quali il ritardo non ha grande importanza, ma la cosa fondamentale invece è non avere perdita di dati. Se si vuole usare una applicazione real time è invece necessario rendere minimo questo ritardo per avere un livello di qualità accettabile.

La raccomandazione G.114 ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector) specifica che, per ottenere una buona qualità della voce, si dovrebbe avere un valore di ritardo punto-punto non superiore a 150 ms, come si può vedere nella Figura 4.1.

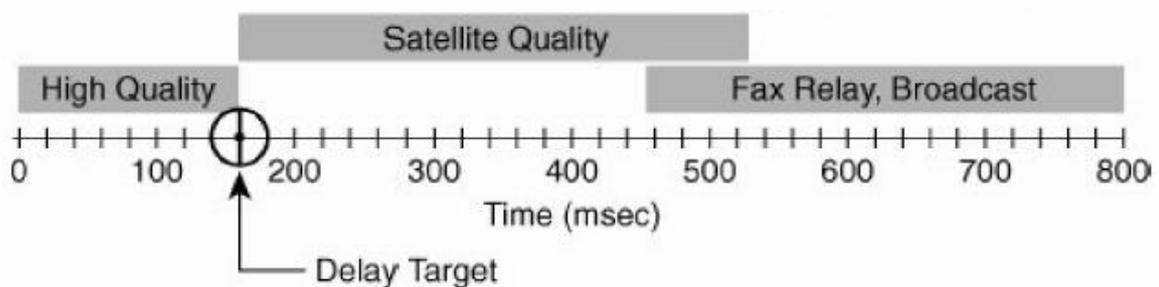


Figura 4.1: Ritardo secondo la raccomandazione G.114

Il ritardo accettabile dipende ovviamente dal sistema di trasmissione utilizzato, ad esempio, in un sistema di trasmissione satellitare, non esistendo alternative, si possono accettare ritardi più elevati.

4.2 Jitter

Questo è un problema che interessa le reti vocali a pacchetto, consiste nella variabilità nel tempo di arrivo dei pacchetti.

Il mittente trasmette i pacchetti ad intervalli di tempo regolari, ma questi possono essere ritardati dalla rete e di conseguenza non arrivare al destinatario con la stessa regolarità temporale.

Nella Figura 4.2 viene fatto un esempio in cui vengono spediti tre pacchetti A,B,C. In ricezione i pacchetti A e B arrivano ad intervalli di tempo regolari, mentre C viene ricevuto in ritardo.

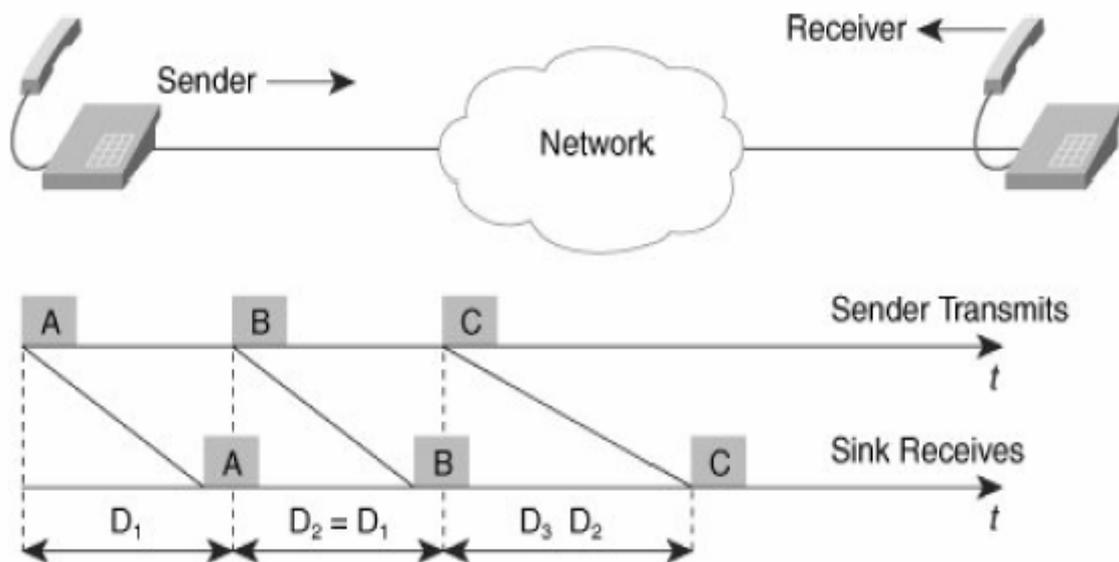


Figura 4.2: Variabilità nel tempo di arrivo dei pacchetti (Jitter)

Si può superare il problema della variabilità del tempo di arrivo dei pacchetti attraverso l'introduzione di un buffer, ma in questo modo si aumenta anche il ritardo della rete. Se ci sono grandi valori di jitter si rende necessario l'utilizzo di un buffer di grandi dimensioni, questo comporta un aumento notevole del ritardo e di conseguenza un peggioramento della qualità.

Bisogna quindi prestare particolare attenzione, quando si realizza la rete, a prendere adeguate precauzioni per ridurre il jitter. Inoltre è conveniente l'utilizzo di buffer dinamici, in quanto questi sono in grado di cambiare dimensione in funzione dello stato della rete.

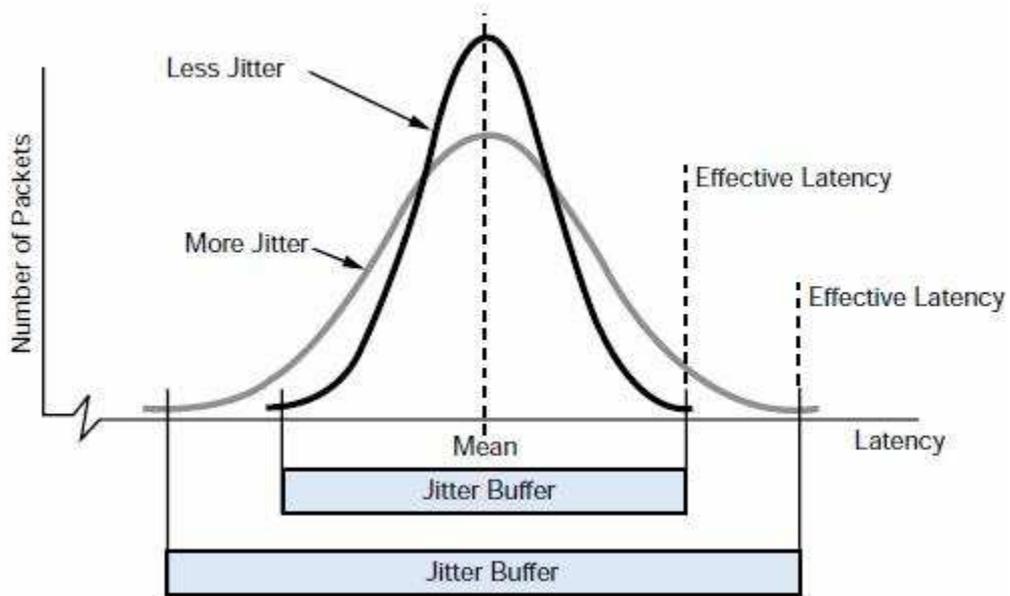


Figura 4.3: Jitter e Ritardo al variare delle dimensioni del Buffer

4.2.1 Funzionamento di un Jitter buffer:

L'obiettivo di questo buffer è quello di ridurre gli effetti del jitter quando si trasmette un segnale vocale su reti a commutazione di pacchetto.

Il nome jitter buffer può creare confusione perché può erroneamente far pensare a qualcosa di simile ai buffer usati per lo streaming audio-video mentre questo può essere più che altro definito come un sincronizzatore di pacchetto.

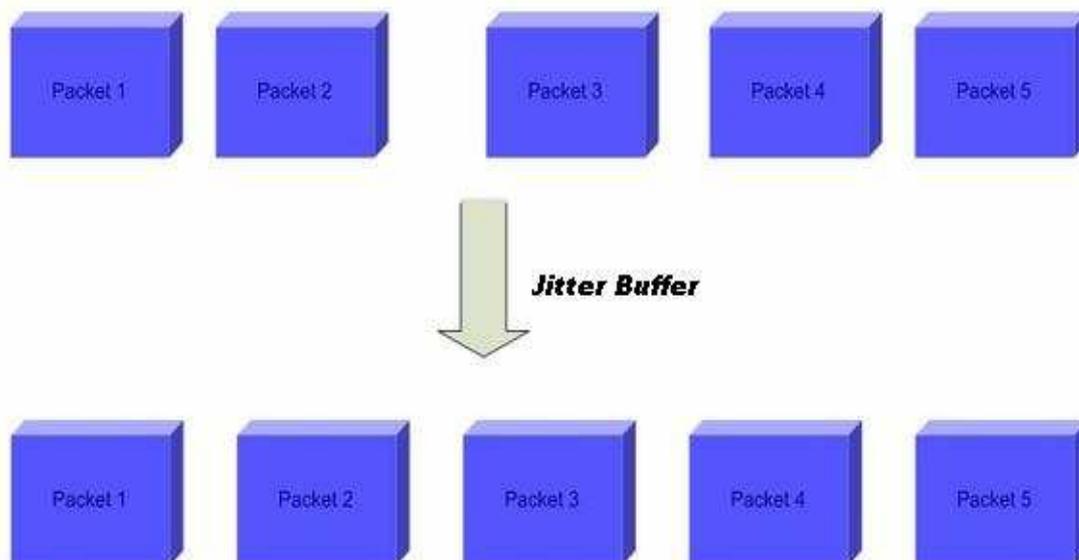


Figura 4.4: Effetto di un Jitter Buffer

La distinzione tra il jitter buffer e quello audio-video è che, per il secondo, la velocità con cui il segnale viene ricevuto può essere significativamente più bassa rispetto alla velocità a cui devono essere riprodotti i dati.

Proprio per questo è necessario memorizzare un tratto sufficientemente grande del segnale ricevuto, per evitare di avere pause nella riproduzione.

Nel caso audio-video il buffer è quindi solo un segmento di memoria che viene scritto fino a che avanza la riproduzione.

Per quanto riguarda il jitter, invece, il buffer è un blocco di memoria di dimensioni necessarie per contenere un certo numero di volte (N) la dimensione del carico utile del pacchetto ricevuto.

Invece di essere consegnato direttamente al codec il carico utile viene immagazzinato in un segmento di memoria e la sua posizione viene indicata da un puntatore.

A questo punto viene fatto partire un segnale di clock e dopo un tempo di hold T_H prefissato il pacchetto segnato dal puntatore, che è il successivo a dover essere processato, viene estratto e dato al codec e il puntatore viene spostato sul segmento successivo della memoria.

Durante il tempo di hold gli altri pacchetti ricevuti sono controllati in base al numero di sequenza e scritti nella loro posizione corretta in memoria, in quanto non sempre questi arrivano in ordine.

Il risultato di tutto questo è che tutti i pacchetti che arrivano con ritardo inferiore a T_H saranno al loro posto e soprattutto al momento giusto, non avendo quindi jitter.

4.3 Eco

L'eco in una conversazione telefonica può essere molto fastidioso e in alcuni casi può rivelarsi anche insopportabile.

Quando si parla è normale sentire la propria voce e questo può rivelarsi rassicurante, il problema si inizia ad avere quando si ascolta la propria voce con un ritardo superiore ai 25 ms, in questi casi la conversazione può risultare disturbata.

Nelle rete telefonica analogica l'eco nasce perché vengono usati solo 2 fili invece che 4 per avere una trasmissione full-duplex, ma, teoricamente, l'eco dovrebbe essere eliminato con l'utilizzo di un trasformatore ibrido.

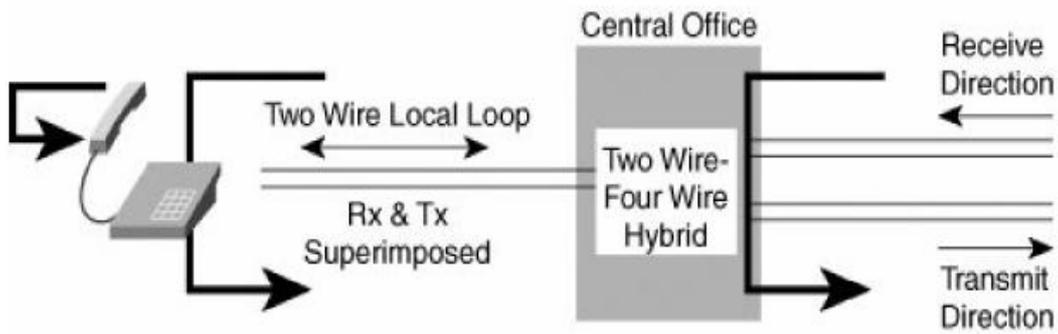


Figura 4.5: Eco causato da un errore di impedenza

In pratica non si riesce ad avere una cancellazione totale in quanto, per dimensionare correttamente il trasformatore ibrido, l'impedenza del doppino telefonico dovrebbe essere sempre nota, cosa che nella realtà non avviene.

L'eco della rete analogica può quindi essere ridotto con l'uso di appositi cancellatori d'eco oppure facendo un attento controllo sugli errori di impedenza.

Nelle attuali reti a pacchetto è invece possibile costruire dei cancellatori d'eco digitali (realizzati con filtri FIR adattivi) oppure la cancellazione dell'eco può essere eseguita direttamente via software.

In questo tipo di reti non risulta possibile invece usare cancellatori d'eco analogici, in quanto questi tagliano le alte frequenze e risultano quindi non utilizzabili in reti ISDN oppure ADSL.

Un cancellatore d'eco digitale consiste in un elaboratore, il quale ha il compito di analizzare il segnale trasmesso e quello ricevuto e dal loro confronto generare un "eco stimato".

Sottraendo questo valore al segnale ricevuto si dovrebbe avere un segnale idealmente senza eco, anche se nella realtà non si riesce ad eliminare l'eco completamente, ma si può cercare di ridurlo il più possibile.

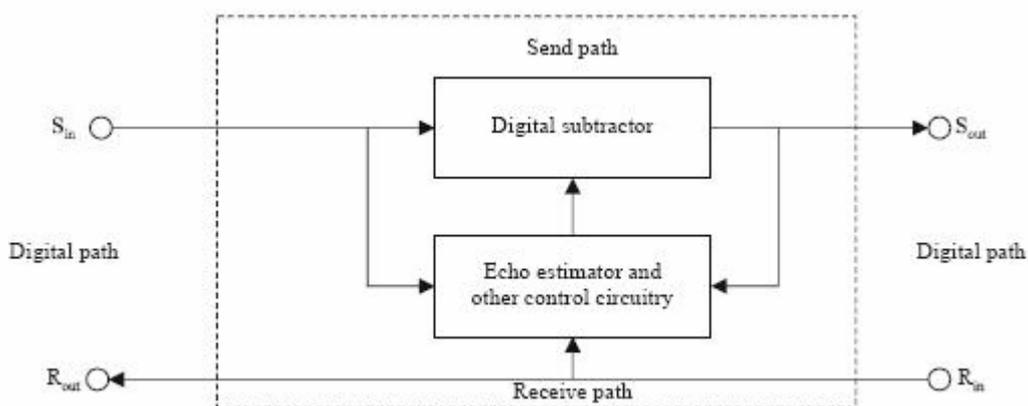


Figura 4.6: Cancellatore d'eco digitale

Configurare il livello appropriato di cancellazione d'eco, nelle reti voice over IP, è molto importante per la qualità in quanto:

- ⇒ Se non si configura un livello sufficiente di cancellazione gli utenti potranno udire l'eco.
- ⇒ Se si configura un livello troppo elevato ci potrebbe volere troppo tempo per arrivare alla cancellazione.

La raccomandazione ITU-T G.168 specifica come dovrebbe essere costruito un cancellatore d'eco.

4.4 Perdita di pacchetti

Nelle reti dati la perdita di pacchetti è un problema molto comune e per tanto da non trascurare. La causa spesso è la condizione di saturazione della rete, la quale porta a scartare i pacchetti che non possono essere accodati.

Le reti solitamente si basano sull'andamento dei pacchetti persi nel tempo per capire il loro stato e di conseguenza per ridurre il numero di pacchetti da inviare.

Bisogna però ricordare che la voce, a differenza dei dati, è meno sensibile alla perdita dei pacchetti ed invece, essendo real time, è più sensibile al ritardo e al jitter. Non può quindi essere una soluzione accettabile quella di ritrasmettere i pacchetti persi, in quanto si aumenterebbe di tanto il ritardo.

Un pacchetto si considera perso se non viene ricevuto nel momento atteso (che è un intervallo di tempo variabile). Nel capitolo 5, quando si parlerà di codifica, si vedrà che esistono degli algoritmi che permettono di sostituire il pacchetto mancante con un altro, in base ad una certa regola implementata dal decodificatore.

La perdita di un pacchetto comunque interessa solamente 20 ms di parlato, di conseguenza l'ascoltatore medio difficilmente noterà questa mancanza.

Usando l'algoritmo di occultamento più semplice, ovvero quello di ripetere l'ultimo pacchetto (codifica G.729), si può tollerare una perdita media del 5 % durante una chiamata.

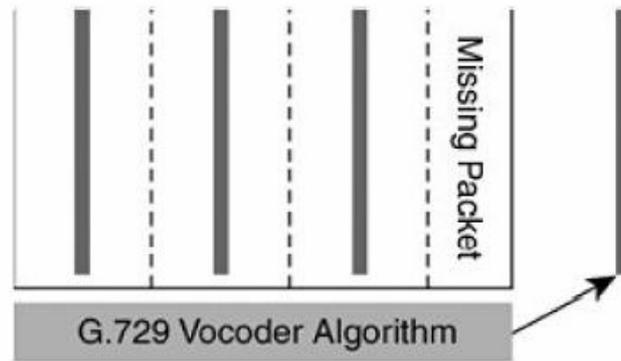


Figura 4.7: Occultamento dei pacchetti della codifica G.729

Si può quindi affermare che in applicazioni real time, come la voce, il problema della perdita di pacchetti può essere limitato utilizzando degli algoritmi di occultamento. Questo metodo è efficiente fino a che la perdita è limitata, e questo dipende prevalentemente dal traffico presente nella rete.

Nella Figura 4.6 viene mostrato quali devono essere i valori di perdita di pacchetti percentuali e di ritardo per avere una buona qualità secondo la raccomandazione G.114 del ITU-T.

Si può vedere che per avere una buona qualità il ritardo deve essere meno di 150 ms e la perdita di pacchetti inferiore al 10%.

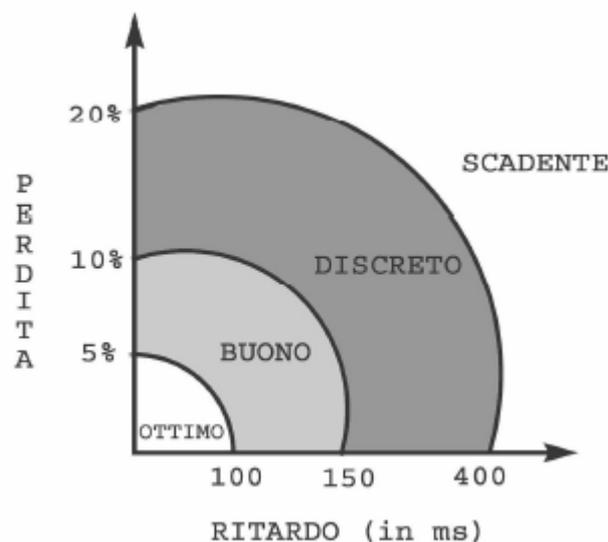


Figura 4.8: Perdita di pacchetti e ritardo accettabili in base alla qualità

4.5 QoS

L'aspetto del traffico sulla rete e quindi anche la possibilità di avere perdita di pacchetti, ritardi o jitter dipende da come è implementata la rete e dalla sua intelligenza (la capacità di auto-gestirsi). Tutti questi aspetti prendono il nome di QoS (Quality of Service).

La QoS in particolare si occupa di gestire due aspetti:

1. Gestire le priorità dei vari flussi di traffico che arrivano nella rete. Bisogna conciliare l'obiettivo di dare garanzie prestazionali a certi tipi di traffico con quello di massimizzare il fattore di utilizzo dell'infrastruttura.
2. Controllare il flusso di pacchetti trasmessi dai vari utenti e successivamente in tutta la rete. Questo è un obiettivo fondamentale se si vogliono evitare congestioni e quindi la perdita di un numero elevato di pacchetti, con conseguente abbassamento della qualità vocale.

Ci sono vari approcci utilizzabili per la QoS:

- **Best Effort** : In questo caso nella rete non è presente nessun meccanismo di QoS, la rete cerca di trasportare il traffico al meglio senza nessuna garanzia di prestazione, se ci sono congestioni il traffico è semplicemente scartato. Risulta evidente che implementando una rete con un approccio simile la qualità percepita dall'utente risulterà molto bassa.
- **Differentiated Services (DiffServ)** - a volte chiamato "*Soft QoS*": i pacchetti di dati sono suddivisi in classi e contrassegnati. Con l'approccio DiffServ la rete offre servizi differenziati trattando alcune classi di traffico meglio di altre
- **Reserved Services** : Riserva delle risorse specifiche per particolari tipi di traffico.

Non basta scegliere di usare uno di questi tre approcci i quali infatti non sono alternativi, ma complementari.

Nella realtà di Internet le problematiche tecniche e di architettura della gestione del QoS sono mescolate a considerazioni organizzative, risulta quindi molto complesso definire delle regole che valgano sempre.

Se facciamo la scelta di andare oltre il modello best-effort e di definire diverse classi di traffico, occorre decidere a chi appartiene la responsabilità di associare i pacchetti alle diverse classi e accettare l'idea che chi gestisce la rete non tratterà tutti i flussi allo stesso modo.

Il servizio offerto dalle reti Internet è tradizionalmente di tipo Best Effort.

Per trasmettere la voce su IP è quindi necessario dare delle garanzie sulla QoS, che non sono normalmente richieste per traffico di tipo non real-time.

4.6 Distorsione vocale:

Quando si trasmettono dei segnali bisogna prestare particolare attenzione alla distorsione, in quanto è uno dei principali parametri da considerare per valutare la qualità della voce.

La distorsione ha infatti l'effetto di rendere la voce sentita dagli utenti innaturale, in quanto vengono creati dei suoni che sarebbero improducibili dalla voce umana.

Oltre alla distorsione della forma d'onda che può essere introdotta dai dispositivi elettronici, problema che era presente anche nella telefonia tradizionale, bisogna considerare anche altre possibili cause rilevabili in qualsiasi rete digitale:

- Rumore di quantizzazione che non viene adeguatamente filtrato oppure che non è mascherato dal normale rumore di linea:
Quando viene usata una modulazione PCM, ad esempio, il divario tra i valori di ampiezza codificati e l'ampiezza effettiva del segnale, viene chiamato rumore di quantizzazione.
Questo provoca una distorsione del segnale, di conseguenza l'utente potrà notare una raucedine nella voce. Bisogna però considerare che, solitamente, il rumore ambientale è più grande di quello di quantizzazione e quindi tende a coprirlo.
- Un elevato bit error rate nella trasmissione del segnale digitale o la perdita di campioni:
Nella trasmissione di un qualsiasi segnale digitale è presente un certo tasso di errore nella trasmissione, il risultato è una deformazione della forma d'onda che viene ricostruita al ricevitore.
A seconda di quanto spesso avvengono e di come sono distribuiti gli errori il segnale può risultare più o meno distorto. Se il tasso di errore è sufficientemente piccolo e gli errori sono distribuiti può essere che il segnale sia comunque comprensibile dall'utente, anche se, questo potrebbe notare qualcosa di strano nel suono.
Lo stesso ragionamento vale per la perdita dei pacchetti, ma in questo caso l'entità della distorsione dipende dall'algoritmo di occultamento usato.
- Livelli di segnale troppo elevati inviati al codificatore:
Si verifica distorsione vocale anche quando viene inviato al codificatore un segnale che ha un livello troppo grande, tale da eccedere il valore massimo per il quale il dispositivo è stato progettato.
Se questo accade tutti i valori che superano il livello di soglia vengono codificati con il livello massimo, risultando indistinguibili tra loro. Il risultato sarà che

quando viene ricostruita la forma d'onda questa risulterà avere gli estremi "squadri" (Figura 4.7).

Questo effetto può essere molto fastidioso per l'utente, risulta quindi opportuno dimensionare il codificatore in modo tale che questo non avvenga.

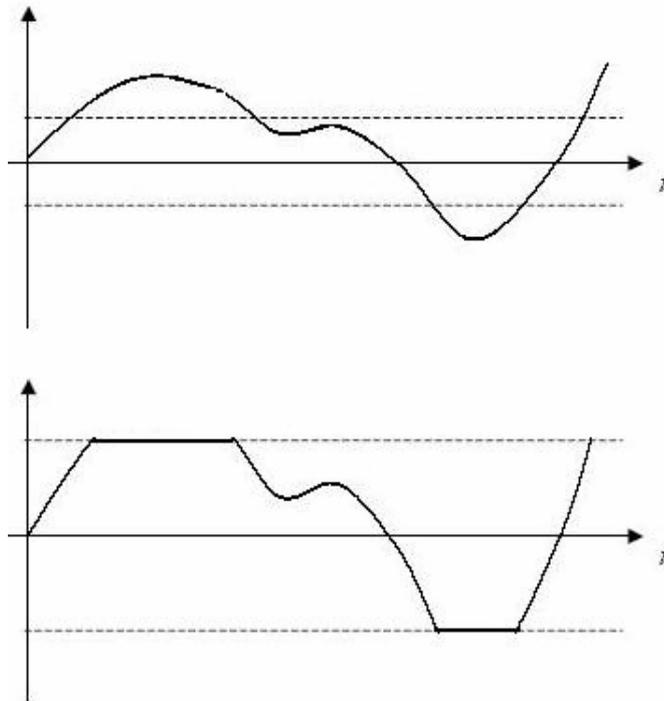


Figura 4.9: Distorsione prodotta da livelli di segnale troppo elevati

Nelle reti a commutazione di pacchetto la distorsione vocale può essere più o meno influente in base a questi fattori:

1. Lo spazio tra i campioni
2. Il numero di campioni vocali per pacchetto
3. La perdita di pacchetti, e i metodi per occultarla
4. Bit error rate

La distanza tra i campioni e il numero di campione per pacchetto determinano quanta informazione del segnale originale viene persa e quindi la gravità della deformazione che si ha quando si verifica la perdita di un pacchetto.

La perdita di pacchetti, il metodo di occultamento usato e il bit error rate definiscono, invece, la potenziale gravità della deformazione subita dalla forma d'onda a causa dei pacchetti mancanti.

Un'altra caratteristica che influenza l'entità della distorsione è il tipo di codec usato, ma di questo si parlerà nel capitolo successivo quando si tratterà l'argomento della codifica.

4.7 Vantaggi di VoIP:

Vengono di seguito descritti i vantaggi nell'usare VoIP rispetto alla telefonia tradizionale:

Risparmio economico:

Uno dei principali vantaggi ed il motivo che spinge ad arrivare alla convergenza tra dati e voce in un'unica rete, è sicuramente quello del risparmio economico.

Per farsi un'idea dell'impatto, che potrebbe avere la diffusione di VoIP, nella Figura 4.10 viene riportata la previsione fatta ancora nel 2001, e ampiamente rispettata, delle perdite economiche causate da VoIP alle telefonate internazionali della telefonia classica.

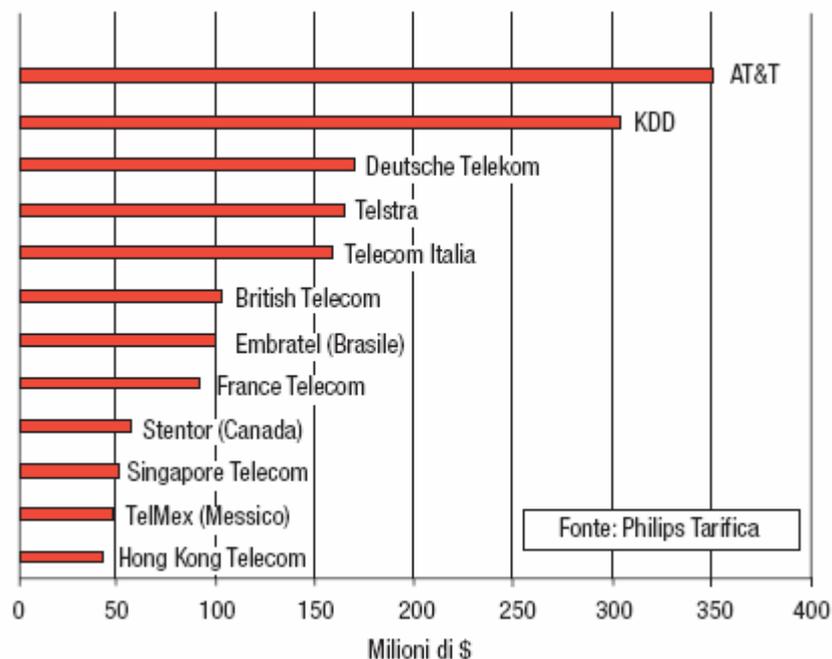


Figura 4.10: Perdite economiche della telefonia tradizionale

Non sempre però il risparmio nei costi delle chiamate è sufficiente da solo per giustificare la spesa per avere un servizio VoIP con adeguata qualità.

La convenienza dell'investimento da sostenere per passare a VoIP dipende soprattutto dall'area geografica e dal costo che hanno le chiamate in quella zona.

Per fare un esempio in Nord America, già qualche anno fa, alcune grandi aziende pagavano anche meno di 3 centesimi al minuto le chiamate a lunga distanza entro gli Stati Uniti. Si capisce facilmente come, con queste condizioni, difficilmente un'azienda sia disposta ad investire nel VoIP solo per risparmiare sulla tariffa della singola chiamata.

Facilità di apportare modifiche alla rete:

Un vantaggio che ha VoIP rispetto alle tradizionali reti PSTN è la possibilità di spostare un telefono in un punto desiderato, mantenendo sempre lo stesso numero e senza necessità di modificare i collegamenti fisici già esistenti.

Se si vuole capire l'utilità di questa cosa basta pensare che il costo che devono sostenere le aziende per spostare un telefono, dovuto alla manodopera e alle configurazioni del centralino, è di svariate centinaia di euro, costi che sarebbero assenti su una rete VoIP.

Maggiori servizi:

Utilizzando per il VoIP dei computer sarebbe possibile salvare tutti i messaggi vocali nello stesso server dei messaggi di posta elettronica, si potrebbe quindi anche decidere di ascoltare questi messaggi vocali a distanza oppure di rispondere con una e-mail.

L'esempio appena fatto è solo uno dei possibili servizi a valore aggiunto che un utente potrebbe avere usando VoIP, un altro possibile servizio potrebbe essere quello di ricevere l'avviso di chiamata sullo schermo del proprio PC mentre si sta navigando in Internet .

Si può dire quindi che con l'utilizzo del VoIP si potrebbero avere molti più servizi rispetto alla telefonia tradizionale, bisogna però considerare che molti di questi servizi sono utili più a livello aziendale che di privati.

Proprio per questo motivo per il momento le reti VoIP sono molto più diffuse a livello aziendale, non comportando ancora per i privati un grande vantaggio, visto che questi sono poco interessati ai servizi ulteriori da esso offerti.

Sfruttamento della banda:

Le tecniche di codifica di VoIP, che consistono nella compressione della voce e nell'uso di tecniche di soppressione dei silenzi, permettono un notevole risparmio di banda rispetto alla modulazione TDM delle reti telefoniche PSTN.

Per rendersi conto di questo basta pensare che in media più del 50% della chiamata è costituita da silenzio, quindi solo tramite l'utilizzo di tecniche di soppressione dei silenzi è possibile avere un risparmio notevole.

Capitolo 5

Realizzare una rete VoIP di qualità

Verranno analizzate in questo capitolo alcune tecniche realizzative che permettono di aumentare la qualità della voce.

Si vedrà in seguito come è possibile capire se la voce che arriva al destinatario è caratterizzata o meno da una buona qualità, quindi si analizzeranno dei metodi che permettano di valutare questa qualità.

5.1 Conversione analogico – digitale

La voce, come ogni segnale fisico, è di tipo analogico, per usare una rete di tipo digitale è necessario effettuare una conversione analogico digitale.

Spesso, nelle reti telefoniche dei paesi industrializzati, si verificano più conversioni analogico/digitale o viceversa, ogni volta che se ne verifica una il parlato e la forma d'onda tendono a diventare meno assomiglianti a quelle di partenza.

Le attuali reti telefoniche sono in grado di gestire fino a sette conversioni prima che la qualità della voce venga influenzata, bisogna però considerare che più il segnale è compresso meno risulta resistente alle conversioni.

Per evitare una perdita della qualità vocale si rivela quindi opportuno progettare ambienti Voice Over IP che richiedano il minore numero di conversioni possibili.

Bisogna però segnalare che, ad esempio, le reti VoIP con codec PCM G.711 sopportano meglio i problemi provocati dalla conversioni analogico-digitale rispetto alle attuali reti telefoniche.

5.2 Codifica vocale

Come è stato visto nel secondo capitolo, la trasmissione di segnali di tipo analogico non è l'ideale dal punto di vista del rumore perché quando si amplifica il segnale aumenta anche il rumore presente sulla linea.

Nel caso invece di campioni digitali questo problema non esiste, è possibile infatti rigenerare dopo ogni tratta il segnale. Questo è stato il motivo principale per il quale le reti telefoniche sono diventate digitali.

La classica modulazione PCM a 64 Kbit/s, usata per le reti PSTN, non è adatta per il VoIP. Il protocollo IP prevede infatti di dividere il messaggio in pacchetti ognuno contenente un header, di conseguenza risulta necessario trasmettere più informazione. Questo è un problema perché si può arrivare alla saturazione della banda a disposizione e ad avere ritardi.

Per risolvere il problema si utilizzano degli algoritmi di compressione che interessano sia l'header che i dati del pacchetto, questo tipo di codifica per comprimere il segnale prende il nome di codifica di sorgente.

Limitando il bit rate del segnale c'è anche il vantaggio che diventa possibile introdurre qualche bit di controllo d'errore.

5.2.1 Standard di codifica:

La codifica vocale è standardizzata dall'ITU-T che specifica come un segnale analogico vocale deve essere codificato in un flusso digitale.

Per progettare una codifica bisogna tenere conto sia del numero minimo di bit che devono essere ragionevolmente contenuti in un pacchetto, sia del throughput che deve essere raggiunto per trasmettere il segnale.

Ecco i più diffusi standard di codifica per la telefonia e la trasmissione della voce a pacchetti :

- G.711: descrive la tecnica di codifica della voce PCM a 64 Kbit/s, la voce codificata è già nel formato corretto per essere inviata nella rete telefonica pubblica o per passare tramite un centralino PBX.
- G.726: descrive la codifica ADPCM a 40,32,24,16 Kbit/s che è una codifica di tipo differenziale in cui vengono codificate le variazioni tra un campione e l'altro.
- G.728: descrive una variante a 16 Kbit/s a basso ritardo della compressione della voce CELP (Code-excited linear prediction)
- G.729: descrive una compressione CELP che consente di codificare la voce in flussi da 8 kbit/s

- G.723.1: descrive una tecnica di compressione che può essere utilizzata per la voce o altri componenti audio del servizio multimediale a basso bit-rate. A questo codec sono associati due bit-rate 5.3 Kbit/s (basato su tecnologia CELP) e 6.3 Kbit/s (buona qualità e maggiore flessibilità).

Nella Tabella 5.1 vengono riportate le principali caratteristiche di alcune delle codifiche sopra descritte:

Codec	Encoding Technique	Voice Segment Duration, ms	Encoded Segment Size, bits	Data Rate, bit/s
G.711	Pulse-code modulation (PCM)	0.125	8	64,000
G.723.1	Multipulse maximum-likelihood quantization (MP-MLQ)	30	189	6,300
G.723.1	Algebraic-code-excited linear prediction (ACELP)	30	158	5,300
G.729	Code-excited linear prediction (CELP)	10	80	8,000

Tabella 5.1: Caratteristiche codifiche ITU-T

5.2.2 Effetti della codifica sulla qualità:

Le caratteristiche della codifica usata hanno degli effetti principalmente su due aspetti della qualità della voce percepita dall'utente:

1. **Ritardo:** Il decodificatore deve essere in grado di ricevere l'intero pacchetto prima di procedere all'elaborazione dei dati. Viene quindi introdotto un ritardo che, ad esempio, per il G.723.1 è di 65 ms (35 ms per la codifica e 30 ms per la decodifica).
2. **Fedeltà del segnale:** La digitalizzazione della voce riesce solo ad approssimare il segnale analogico, che quindi non risulterà mai identico a quello di partenza. Di conseguenza, anche se la trasmissione digitale fosse perfetta, ci sarebbe sempre una differenza tra il segnale reale e quello che sente l'utente al ricevitore. I codificatori usati devono essere tali da rendere minima questa differenza in modo che non sia percepita dall'orecchio umano. Eventuali deviazioni dal segnale atteso daranno origine a delle distorsioni della forma d'onda (speech distortion) di cui si è già parlato nel capitolo 4.

Per quanto riguarda la distorsione del segnale, si può notare che non viene riportato, tra le caratteristiche dei codec, un indice che misuri la distorsione vocale in corrispondenza

di un determinato bit rate, nonostante sia possibile stimare tale valore (come si vede nell'APPENDICE A).

Il motivo principale è che questo parametro non sembra avere una grande utilità nel predire la percezione dell'utente. Molto più utile è invece effettuare un confronto tra le misure di distorsione dei vari codec, anche a diversi bit rate, e determinare quale sembra introdurre la distorsione minore.

Ad esempio alcuni test eseguiti mostrano che la voce trasmessa usando un codec G.729 a 8 kbit/s, senza perdita di dati, è valutato buono quanto o addirittura meglio di un codec G.711 a 64 kbit/s .

Risultati come questo suggeriscono che bisogna usare una certa cautela nel cercare di valutare la distorsione vocale percepita dall'utente, perché, anche se in generale una velocità di trasmissione dati più elevata corrisponde ad una maggiore fedeltà del segnale, l'orecchio e il cervello umano processano le forme d'onda dando risultati che a volte non sono in accordo con le supposizioni teoriche.

Di conseguenza se si effettuano test soggettivi in laboratorio, senza tenere conto di tutto quello che può succedere in una rete di telecomunicazioni, si rischia di avere risultati sbagliati oppure che tendono ad accentuare la differenza tra i vari codec. Basta pensare che, in determinate circostanze, solo la presenza del rumore può rendere trascurabile la distorsione vocale.

5.2.3 Tecniche di codifica per migliorare la qualità:

Ci sono poi altre caratteristiche che un codificatore può implementare per migliorare la qualità del segnale:

Soppressione del silenzio: Il codificatore può essere usato, tramite il controllo del segnale, per trasmettere solo nei momenti in cui effettivamente c'è voce. Questo viene fatto per minimizzare il flusso di dati necessario alla trasmissione del segnale ed inoltre ha anche l'effetto di ridurre la percezione del rumore.

Questa funzione viene solitamente implementata con un rilevatore di attività vocale o VAD (voice activity detection).

Quando si ha l'attività vocale il VAD consente ai pacchetti di essere trasmessi, mentre, se si ha lo stato di silenzio, il VAD "chiude" momentaneamente la trasmissione.

Poiché normalmente la conversazione umana è costituita da silenzio per circa la metà del tempo, l'utilizzo di tale dispositivo permette un risparmio medio di banda di circa il 30-40 %.

Nella figura 5.1 si può apprezzare di quanto varia la capacità di canale necessaria alla trasmissione di un flusso voce (codificato con la raccomandazione ITU-T G.729) nel caso in cui il VAD sia attivato (sotto) o meno (sopra).

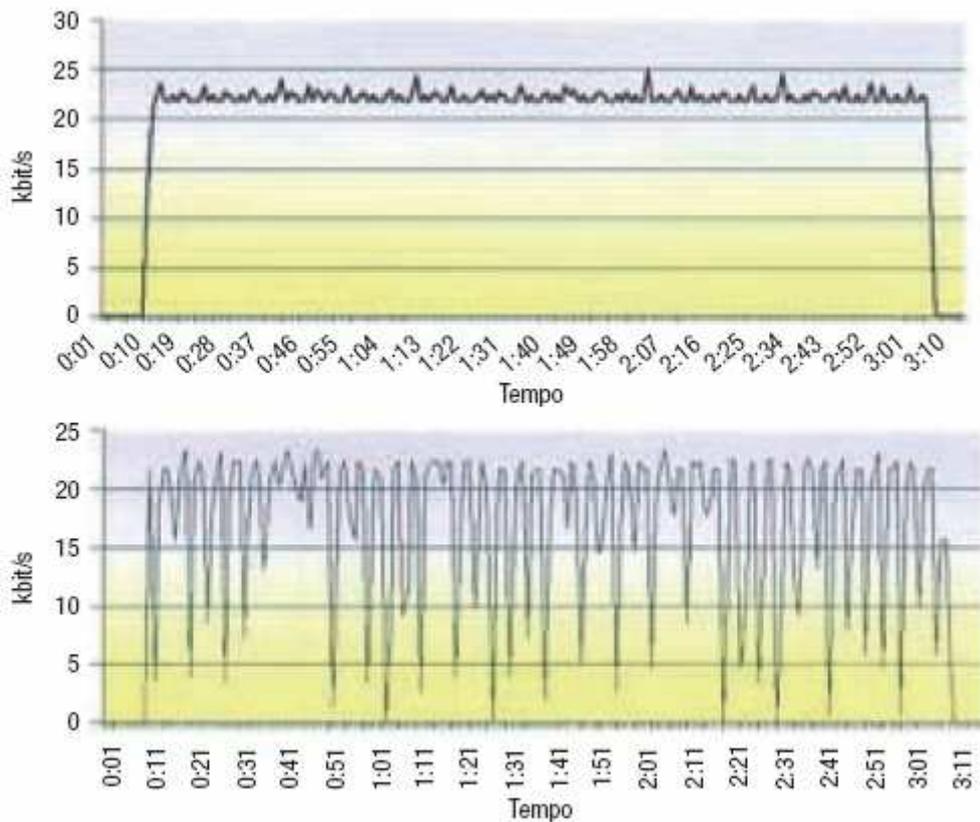


Figura 5.1: Capacità di canale necessaria usando o meno il VAD

La soppressione dei silenzi può creare anche alcuni problemi.

Ad esempio nel caso in cui ci sia un volume della voce basso, il VAD può incontrare difficoltà nel rilevare l'inizio e la fine delle parole. Di conseguenza l'utente può accorgersi che al suono ricevuto manca una parte, questo effetto è chiamato "VAD clipping".

Un altro possibile problema è che nei momenti di silenzio si arriva ad avere una totale assenza di segnale nella linea, un minimo di rumore invece sarebbe desiderabile per capire che il collegamento è ancora attivo.

Comfort noise: Una delle caratteristiche delle linee digitali è che non c'è rumore quando nessuno sta parlando, questa assenza di rumore dà la sensazione all'utente che si sia interrotta la conversazione.

Per eludere questo problema il decodificatore può essere programmato per inserire un rumore pseudo-aleatorio chiamato comfort noise.

Bisogna valutare attentamente se inserire o meno questo rumore e il suo livello. Questo dipende principalmente dalla percezione del cliente in quanto si deve valutare se lo infastidisce di più la sensazione di interruzione della conversazione oppure il rumore presente.

Occultamento della perdita dei pacchetti: Esiste la possibilità che alcuni pacchetti non arrivino in tempo al ricevitore, per ridurre l'effetto dei campioni mancanti il decodificatore può essere programmato per riempire gli spazi vuoti.

Il metodo più semplice è quello di inserire un campione uguale al precedente, un altro metodo un po' più complesso può essere quello di generare il campione che meglio si abbina con quello precedente e quello successivo.

5.3 Costruzione dei pacchetti:

Un'altra caratteristica che influenza la qualità della voce percepita dall'utente è la modalità di costruzione dei pacchetti.

Come già visto una rete a commutazione di pacchetto è implementata raccogliendo una serie di bit e aggiungendo un header che contiene l'informazione necessaria per trasmettere il pacchetto attraverso la rete.

Ecco i parametri di cui bisogna tenere conto nella costruzione dei pacchetti per avere una buona qualità:

- **Dimensione dell'header:**
L'informazione da aggiungere ad ogni pacchetto deve essere sufficiente per garantire che questo segua il percorso corretto e per permettere la ricostruzione del messaggio in ricezione.
Se si costruisce un header troppo grande aumenta il numero di bit da trasmettere con un conseguente spreco di banda.
Risulta anche possibile comprimere l'header, ma aumenta il rischio di perdere dei pacchetti.

- **Dimensione del Payload :**
Un metodo per ridurre l'effetto dell'incremento di bit dovuto all'header (overhead) è quello di aumentare la dimensione del messaggio utile dei pacchetti. Questo però, come spiegato per la codifica, ha il costo di aumentare il ritardo e quindi di avere una perdita di qualità vocale.
Ad esempio se il traffico utile è incrementato da 189 bit a 378 bit viene ridotto l'overhead, il ritardo però passa da 37,5 ms a 67.5 ms quindi viene quasi raddoppiato.

Nella Tabella 5.2 viene riportato un esempio di bit rate necessari al variare della dimensione del payload e della compressione dell'header.

Configuration		No Header Compression		2-byte RTP Header		5-byte RTP, UDP, IP Header	
Codec	Payload	Data Rate, kbit/s	Handling Overhead	Data Rate, kbit/s	Handling Overhead	Data Rate, kbit/s	Handling Overhead
		G.729	One 10-ms sample	40	4.0	32	3.0
	Two 10-ms samples	24	2.0	20	1.5	10.0	0.25
	Four 10-ms samples	16	1.0	14	0.75	9.0	0.125
G.711	One 10-ms sample	96	0.5	88	0.375	68.0	0.0625
	Two 10-ms samples	80	0.25	76	0.1875	66.0	0.03125
G.723.1	One 30-ms sample*	16	2.025	8.05	1.519	5.45	0.03165
	One 30-ms sample†	17	1.693	8.00	1.27	6.46	0.02646

*5300 bit/s.

†6300 bit/s.

Note: Handling overhead (HO) is expressed as the ratio of the amount of handling data to the amount of injected data, so that the volume of injected data is inflated by the factor (1 + HO).

Tabella 5.2: Bit Rate al variare delle dimensioni del Payload

Nella costruzione dei pacchetti, in base alla qualità desiderata e alla banda disponibile, bisogna quindi trovare un giusto compromesso tra la dimensione dell'header e quella del payload .

5.4 Valutazione della qualità della voce

Dopo aver visto quali sono i vari problemi che si presentano nella realizzazione di una rete vocale su protocollo IP, rimane la questione di come valutare la qualità che i clienti percepiscono.

Ci sono due modi per valutare la qualità della voce: il metodo soggettivo oppure quello oggettivo. Il primo è la verifica fatta dall'orecchio umano dell'utente, l'altro metodo è quello che può essere eseguito tramite un computer.

Il metodo oggettivo può rilevare particolari che sarebbero impossibili da individuare usando il metodo soggettivo, ma che potrebbero anche rivelarsi inutile al fine di soddisfare il cliente.

Proprio per questo motivo la telefonia VoIP e tutti i suoi sistemi di codifica e compressione, vengono sviluppati e regolati sulla base di misure soggettive della qualità vocale.

Le misure oggettive, quali ad esempio quelle della distorsione e del rapporto segnale rumore, non sono spesso in relazione con la qualità percepita dall'orecchio umano che è il parametro principale da considerare.

5.4.1 Mean Opinion Score (MOS)

Una valutazione soggettiva molto comune, che viene usata per valutare la qualità dei codec vocali, è quella chiamata MOS (Mean Opinion Score) che consiste nell'eseguire un test su un determinato gruppo di utenti.

Avendo a che fare con un parametro soggettivo è molto importante avere a disposizione un campione più ampio possibile di utenti a cui fare il test. Ad ogni utente viene fatto ascoltare del materiale, che devono valutare con un valore compreso tra 1 e 5, successivamente si fa la media delle valutazioni ottenute.

MOS	Quality	Impairment
5	Excellent	Imperceptible
4	Good	Perceptible but not annoying
3	Fair	Slightly annoying
2	Poor	Annoying
1	Bad	Very annoying

Tabella 5.3: Valori delle valutazioni MOS

La verifica MOS può anche essere usata per vedere come varia la qualità della voce aggiungendo diversi livelli di rumore di sottofondo oppure codifiche e decodifiche multiple o qualsiasi altra cosa che possa degradare il segnale.

Vengono riportate nella Tabella 5.4 le valutazioni MOS di alcuni codec ITU-T, è interessante considerare la relazione tra il bit-rate e la valutazione del codec per fare un confronto tra costo (nel senso di bit da trasmettere) e qualità.

Compression Method	Bit Rate (Kbps)	Sample Size (ms)	MOS Score
G.711 PCM	64	0.125	4.1
G.726 ADPCM	32	0.125	3.85
G.728 Low Delay Code Excited Linear Predictive (LD-CELP)	15	0.625	3.81
G.729 Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Predictive (CS-ACELP)	8	10	3.92
G.729a CS-ACELP	8	10	3.7
G.723.1 MP-MLQ	6.3	30	3.9
G.723.1 ACELP	5.3	30	3.65
iLBC Freeware	15.2	20	3.9
	13.3	30	

Source: Cisco Labs

Tabella 5.4: Valutazioni MOS di alcune codifiche ITU-T

5.4.2 Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM)

Un possibile metodo oggettivo per misurare la qualità della voce è contenuto nella raccomandazione P.861 del ITU-T e si chiama PSQM (Perceptual Speech Quality Measurement).

PSQM usa un algoritmo psico-acustico per analizzare il segnale trasmesso e quello ricevuto e assegna un valore numerico che va da 0 (segnale non degradato) a 6.5 (segnale altamente degradato).

Questo metodo di valutazione presenta due difetti fondamentali nel suo utilizzo nel campo della voce:

- ⇒ La valutazione data da una macchina potrebbe non coincidere con la percezione dell'orecchio umano.
- ⇒ L'algoritmo è stato sviluppato per individuare i difetti causati dalla compressione e decompressione e non è in grado di rilevare altri problemi come la perdita di pacchetti o il jitter.

Conclusioni

La qualità della voce su reti IP è legata a molti fattori. Oltre a quelli presenti nella rete telefonica tradizionale, come ad esempio livello sonoro, ritardo, eco, rumore, diafonia, si è visto che bisogna contrastare la nascita di nuovi problemi come ritardo, jitter, compressione, perdita di pacchetti.

Per il momento VoIP non è ancora una sistema molto diffuso, ma il problema non è di tipo tecnologico perchè, come si è visto, le tecniche per arrivare ad una buona qualità esistono già e in più sono in continua evoluzione. Investendo qualche risorsa economica, si potrebbe facilmente ottenere una rete vocale all'altezza della telefonia tradizionale.

Il problema è più che altro di tipo commerciale perché sono in pochi ad essere disposti a scommettere su questa nuova tecnologia, un possibile utilizzo su più larga scala si potrà avere solo e se ci sarà una ulteriore riduzione dei costi.

Fare convergere tutti i tipi di traffico su una sola rete rappresenta comunque un grande obiettivo per il futuro in quanto ci sarebbe una grande semplificazione della rete telefonica.

Rimane da superare il grande ostacolo di riuscire a fare questo mantenendo una buona qualità e prezzi accessibili a tutti.

Appendice A

Misurazione della distorsione vocale

Negli ultimi anni si sono fatti grandi passi avanti nella tecnologia per fare misurare oggettive della distorsione vocale, basti pensare che nel 1980 il metodo migliore si basava su simulatori elettromeccanici.

Per avere sistemi di misura più affidabili bisogna attendere l'evoluzione dell'informatica e dell'elettronica, i calcolatori dovevano infatti essere in grado di svolgere operazioni complesse come l'acquisizione, l'immagazzinamento della forma d'onda e soprattutto l'elaborazione dei dati ottenuti.

Il nuovo obiettivo da perseguire, grazie alle innovazioni tecnologiche, era quello di creare delle misure di distorsione vocale in grado di soddisfare i seguenti requisiti:

1. Deve essere possibile quantificarle attraverso il trattamento di immagini digitali di forme d'onda complesse
2. Devono riflettere la differenza tra la voce naturale e quella distorta che arriva all'utente
3. I risultati ottenuti con queste misure devono rispecchiare quelli ottenuti usando misure soggettive

Dopo numerosi tentativi, per fare misure che rispettassero questi parametri, sono state elaborate quattro differenti tipi di misure che si distinguono in psico-acustiche o elettro-acustiche le quali a loro volta, in base al tipo di acquisizione dei dati, si dividono in attive e passive.

	Attive: Basate sul confronto di quello che si è ricevuto con quello che si è trasmesso.	Passive: Basate solo su quello che si è ricevuto senza sapere cosa è stato trasmesso.
Elettro-Acustiche : Basate solo sulle caratteristiche della forma d'onda	Tone Multifrequency	Analisi dell'andamento dei segnali PCM
Psico-Acustiche: Basate sia sulle caratteristiche della forma d'onda sia che sulla percezione umana del suono.	PSQM (Perceptual Speech Quality Measure) PAMS (Perceptual Analysis Measurement System)	Estensione della PAMS

Tabella A.1: Tipi di misure di distorsione

Vengono ora analizzate le varie tecniche di misura illustrate nella tabella A.1:

TECNICHE DI MISURA ATTIVE:

Le tecniche di misura attive si basano sulla trasmissione di un segnale di cui sono note le caratteristiche. La forma d'onda viene acquisita dal ricevitore della rete telefonica da analizzare, poi si procede al confronto del segnale trasmesso con quello ricevuto.

Misure Elettro-acustiche:

Queste sono state le prime misure effettate in quanto, basandosi solo sulla natura del segnale elettrico, risultavano le più semplici da realizzare.

Un esempio di misure elettro-acustiche attive è quella chiamata **Tone Multifrequency** che consiste nel trasmettere un segnale di test appositamente generato e confrontalo con il segnale al ricevitore.

Nella Figura A.1 viene riportato un esempio di acquisizione di forme d'onda al trasmettitore e al ricevitore, si può notare che la seconda forma d'onda (al ricevitore) risulta distorta.

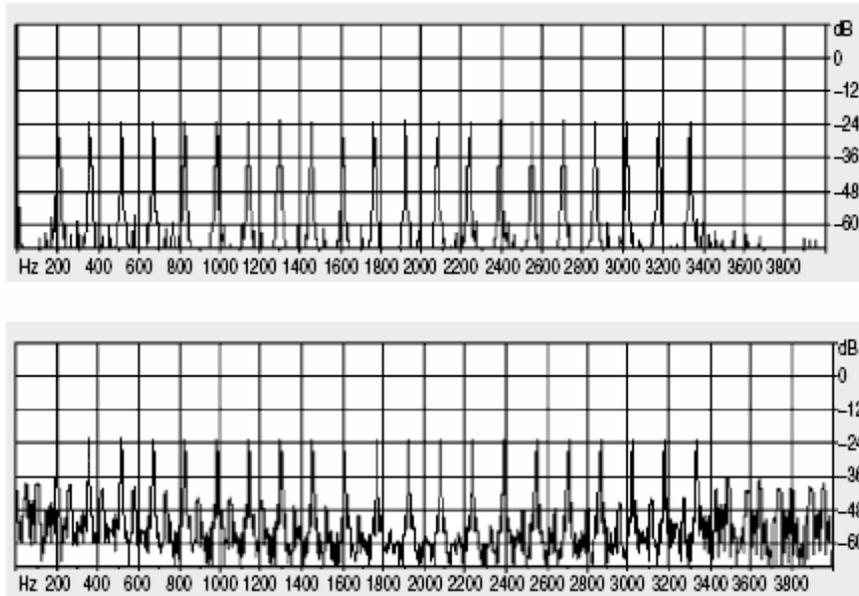


Figura A.1: Confronto tra segnale trasmesso e ricevuto

Con questa misurazione è possibile trovare il livello di distorsione della forma d'onda, questo può essere quantificato con un parametro che viene chiamato rapporto segnale distorsione. Nella Tabella A.2 sotto vengono riportati degli esempi di rapporti segnale-distorsione con l'utilizzo di diversi tipi di codifiche.

Codec Type		Characteristic Signal-to-Distortion Ratio, dB
Speed, kbit/s	Encoding	
64	PCM	38
40	ADPCM	26
32	ADPCM	22
24	ADPCM	16
16	ADPCM	10
8	CELP	2-10

Tabella A.2: Rapporto segnale distorsione

Misure Psico-Acustiche:

La misura Tone Multifrequency vista prima è di tipo Elettro-Acustico e per tanto tiene conto solo delle caratteristiche elettriche del segnale trasmesso e non di come l'utente percepisce il suono.

Un sistema di misura più complesso di quello, basato sul semplice confronto dal punto di vista elettrico delle due forme d'onda, si può ottenere nel seguente modo:

1. Prestare particolare attenzione sulla costruzione del segnale, che non deve più essere solo un segnale elettrico, ma deve essere più simile possibile al segnale prodotto da una voce umana, alternando quindi istanti in cui si parla (c'è segnale) a momenti di silenzio (assenza di segnale).
2. Effettuare confronti tra segnale ricevuto e trasmesso che mettano in risalto gli effetti della distorsione che sono più fastidiosi per l'orecchio umano.

Un esempio di metodo di misura psico-acustico attiva è il **PSQM** (Perceptual Speech Quality Measure) contenuto anche nella raccomandazione P.861 del ITU-T e già analizzato nel capitolo 5.

Questo metodo consiste nel generare un segnale di test che tiene conto delle caratteristiche considerate prima nel punto 1, controllare i parametri della trasmissione come il livello del segnale e il rumore ed infine fare una misura che rispetti le caratteristiche del punto 2. Risulta utile dimostrare i risultati ottenuti con misure di tipo soggettivo.

Un'altra tecnica di misura psico-acustico attiva è la **PAMS** (Perceptual Analysis Measurement System) che è molto simile alla PSQM e segue la stessa procedura, le due tecniche differiscono solo per qualche piccolo dettaglio realizzativo.

Proprio a causa della loro somiglianza nel 2001 sono state raccolte dal ITU-T in un'unica raccomandazione P.682

TECNICHE DI MISURA PASSIVE:

Una limitazione di tutte le tecniche attive per la misura della distorsione vocale è che si necessita di un segnale di prova per fare il confronto.

Si può facilmente intuire che in alcuni casi una misura del genere può essere problematica, si pensi ad esempio ad una rete già in funzione in cui, per fare una misura attiva, bisognerebbe interrompere un collegamento ed inserire un segnale di test.

Visto che non sempre è possibile inserire un segnale di prova, bisogna essere in grado anche di fare misure su segnali che non si conoscono a priori (misure passive), questo viene fatto sia con misure elettro-acustiche che psico-acustiche.

Misure Elettro-Acustiche:

Esiste un metodo per verificare se una forma d'onda è distorta anche senza sapere quale è il segnale di partenza.

Questo metodo consiste nel considerare che alcuni andamenti della forma d'onda non possono essere stati causati da una voce umana, un esempio può essere la presenza di picchi a determinate frequenze.

Diventa quindi possibile creare un modello matematico contenente alcune condizioni che devono essere verificate per avere una forma d'onda il più possibile priva di distorsione.

Ad esempio un cambiamento troppo veloce del forma d'onda risulterà innaturale e pertanto si potrà dire che è presente della distorsione. Il modello matematico si accorgerà di questa variazione troppo veloce facendo la derivata dell'ampiezza del segnale rispetto al tempo e confrontandola con un certo valore di soglia.

Le misure elettro-acustiche passive consistono quindi nel prendere i campioni del segnale e con un algoritmo elaborare i dati ottenuti per considerare, usando un modello matematico, se quel segnale è distorto.

Questo tipo di misura della distorsione è molto usata nelle reti a commutazione di pacchetto per il trasporto della voce, in quanto non necessitano di una interruzione della linea per fare una misura, sono facili da realizzare e sono poco influenzate dalla perdita di pacchetti.

Misure Psico-Acustiche:

Un esempio di misura psico-acustica passiva è un'estensione della misura PAMS applicata però a misure che non necessitano di inviare segnali di prova.

In pratica si ricostruisce il segnale trasmesso, intercettando la forma d'onda di partenza, dopo di che si può procedere ad una misura PAMS classica, ovviamente la PAMS usata per misure attive è molto più precisa, ma a volte non essendo possibile fare una misura attiva ci si può accontentare di una soluzione del genere.

Appendice B

Tipi di Codec

Il termine codec è un'abbreviazione di codificatore/decodificatore. Quello che viene codificato è un segnale acustico e con la decodifica si produce un'immagine di questo segnale.

Esistono varie sigle tecniche per distinguere le codifiche e le modulazioni usate come ad esempio PCM (pulse code modulation), ADPCM (adaptive delta-modulation pulse code modulation) e CELP (code-excited linear predictive)

In modo generale si può comunque dividere i codec in due tipologie di base, a seconda che la codifica produca un'immagine digitale o la descrizione funzionale della forma d'onda di partenza. Di seguito sono descritte le differenze tra queste due categorie:

IMMAGINE DIGITALE (MODULAZIONE PCM):

Un'immagine digitale di una forma d'onda analogica è un insieme di valori composti da delle ampiezze campionate ad intervalli regolari.

Per molti codec telefonici comuni il rate di campionamento è di 8000 campioni al secondo (2 volte il valore della banda del segnale analogico), con periodo di campionamento che è quindi di 0.125 ms.

Per ognuno di questi campioni l'ampiezza della forma d'onda viene quantizzata e memorizzata, tutti i valori registrati vengono poi trascritti in rappresentazioni digitali composte da un certo numero di bit.

Per fare questo senza usare stringhe di bit, che potrebbero risultare troppo lunghe da trasmettere, è stata sviluppata una tecnica chiamata **companding**.

L'immagine digitale che arriva al ricevitore viene quindi decodificata, in modo che ad ogni byte ricevuto venga associato un impulso elettrico, per questo motivo questa tecnica viene anche chiamata **PCM** (pulse code modulation)

Compadding:

Il companding è una tecnica di compressione-espansione di tipo non lineare che consiste nel comprimere il segnale prima di spedirlo sul canale e in seguito di espanderlo al ricevitore.

Utilizzando un algoritmo di companding è anche possibile ridurre il rapporto segnale rumore.

In Nord America e in Giappone viene usato un algoritmo di companding chiamato μ -law mentre l'algoritmo usato in Europa prende il nome di A-law.

DESCRIZIONE FUNZIONALE:

La creazione e la trasmissione di immagini digitali di forme d'onda è una tecnica molto buona per trasmettere la voce su canali digitali.

Con una modulazione PCM a 8 bit e quindi bit rate di 64 kbit/s, al ricevitore dopo la decodifica si crea un segnale analogico che per l'orecchio umano risulta quasi indistinguibile dal segnale originale.

Tuttavia i codec PCM che lavorano a rate più bassi (32 kbit/s o 16 kbit/s) non conservano allo stesso modo la forma d'onda originale.

Sono stati sviluppati quindi dei codec che permettono di superare questo ostacolo. Per fare questo non viene creata semplicemente una immagine digitale della forma d'onda da trasmettere, ma viene effettuata una trasformazione partendo dal presupposto che le forme d'onda sono quelle prodotte dalla voce umana.

Questi tipi di codec sono stati elaborati partendo dalle seguenti considerazioni:

- ⇒ Da studi sui segnali fisici, prodotti dalla voce umana, sappiamo che ci sono un numero molto limitato di forme d'onda che un piccolo segmento vocale può assumere.
- ⇒ Studi sull'orecchio umano dimostrano, inoltre, che molte variazioni di queste forme d'onda non sono rilevate dal nostro orecchio il quale le filtra.

La conseguenza di queste due considerazioni è che, invece di una mappatura delle ampiezze ad intervalli di tempo regolari, è più conveniente fare una mappatura di un insieme di ampiezze in una forma d'onda scelta tra alcune di base.

Quindi invece di una singola ampiezza viene processato e campionato un intero segmento del segnale acustico per determinare:

- Quale tra alcune forme d'onda disponibili è più vicina al segnale originale
- Quali sono i parametri che meglio si adattano alla generazione della forma d'onda osservata

Solitamente la lunghezza del campione analizzato a seconda del codec usato è compreso tra i 10 e i 30 ms.

Supponiamo ad esempio di avere un campione di 10 ms, che rappresenterebbe un insieme di 80 byte di ampiezza dei dati dell'immagine digitale, con un codec che usa la descrizione funzionale come il G.729 questo campione può essere ridotto a 10 byte (come si può vedere nell'immagine sotto).

Code Word Allocation	Number of Bits
Line spectrum pairs	18
Adaptive codebook delay	13
Pitch delay parity	1
Fixed codebook index	26
Fixed codebook sign	8
Codebook gains	6
Codebook gains	8
Total:	80 bits = 10 bytes

Tabella B.1: Distribuzione dei bit nei campioni

Tutti i valori presenti nella Tabella B.1 sono scelti effettuando un'analisi statistica per avere la descrizione funzionale migliore possibile per segmenti della durata di 10 ms.

Il codec G.729 (anche chiamato CELP) riduce quindi di molto il bit rate necessario per trasmettere il segnale rispetto ai codec basati sulla semplice modulazione PAM, in questo caso si passa infatti da 64 kbit/s a 8 kbit/s.

La qualità di un segnale CELP è ovviamente inferiore a quella del PCM, ma test soggettivi hanno dimostrato che la differenza percepita dagli utenti tra i due segnali è spesso trascurabile.

Bibliografia

- [1] J.Davidson, J.Peters, Voice over IP Fundamentals-2nd Edition, Cisco Press, 2006
 - [2] W.C. Hardy, Voice Service Quality, McGraw-Hill, 2003
 - [3] B. Fadini, A. Pescapè, G. Ventre, Integrazione di reti e servizi: Il “trasporto della voce” sulle reti IP, Mondo digitale, Marzo 2003
 - [4] D.Ciscato, Rete IP e internet (un quadro evolutivo), Mondo Digitale, Marzo 2008
 - [5] A.Bonati, B.Costa, G.Vannucchi, DSL:Una famiglia di sistemi trasmissivi per l’accesso ai servizi a banda larga, Mondo Digitale, Giugno 2003
 - [6] Intel, Overcoming Barriers to High-Quality Voice over IP Deployments, 2003
 - [7] Cisco, Quality of Service for Voice over IP Solutions Guide, Versione 1.0
 - [8] Wikipedia, (2010). Disponibile all’indirizzo: <http://it.wikipedia.org>
-