

Simulazione n. 2 della seconda prova scritta di Telecomunicazioni per l'Esame di Stato (a cura del prof. Onelio Bertazioli)

Lo sviluppo delle applicazioni Internet ha posto il problema della velocità nella ricezione di informazioni. Per gli utenti collegati tramite linea telefonica, infatti, la lentezza dello scaricamento dei dati da Internet è motivo di disagio. Ciò è stato evidenziato dalla distorsione dell'acronimo WWW in *World Wait Web*. Una delle alternative nella realizzazione di un collegamento veloce a Internet nelle zone non raggiunte dal servizio ADSL è quella di utilizzare in ricezione un collegamento via satellite, per consentire la ricezione ad almeno 640 kbit/s.

In un sistema di questo genere si utilizza un normale collegamento su rete telefonica (PSTN) per l'invio delle richieste all'Internet Service Provider (ISP) da parte degli utenti, mentre dopo il reperimento delle informazioni stesse il Provider utilizza un collegamento digitale via satellite per l'invio delle informazioni richieste.

Si suppone che il **collegamento via satellite** sia così strutturato.

Stazione di terra

- Il sistema trasmittente adotta la **modulazione QPSK** (nota anche come 4-PSK o 4-QAM) per trasmettere verso il satellite un segnale modulato che trasporta un flusso di bit ad alta velocità derivante dalla modulazione di più segnali digitali;
- Il flusso di bit è protetto contro gli errori con la tecnica FEC (Forward Error Correction) con code rate pari a 3/4;
- il segnale emesso dal trasmettitore è caratterizzato da una potenza pari a **100 [W]**, da una frequenza pari a **14 [GHz]** e da un'occupazione di banda pari a **36 [MHz]**;
- il segnale modulato è inviato a un'antenna parabolica avente **diametro di 5 [m]** tramite un feeder che, assieme ad altri elementi, introduce complessivamente un'**attenuazione di 5 dB**.

Oltre all'attenuazione dello spazio libero, si desidera avere per l'uplink un margine del collegamento (che tenga conto delle attenuazioni supplementari causate da pioggia, ecc.) pari a **8 dB**.

Satellite

Viene impiegato un satellite posto in orbita geostazionaria a **36000 km** di altezza.

La **sezione ricevente** del satellite (tratta uplink) è composta da

- antenna parabolica ricevente con diametro di **2 [m]**;
- feeder con attenuazione di **3,5 dB**;
- rigeneratore e mixer per la traslazione in frequenza.

La temperatura di rumore dell'antenna è pari a **254° K**, mentre il fattore di rumore dell'apparato ricevente è pari a **1 dB**.

La **sezione trasmittente** del satellite (tratta **downlink**) opera alla frequenza di **11,2 [GHz]** ed è caratterizzata da un EIRP pari a **55 dB_w**.

Stazione ricevente a terra

Il segnale viene ricevuto a terra da una normale antenna parabolica per segnali TV, caratterizzata da una temperatura di rumore di **80° K**. Il segnale captato dall'antenna viene traslato in frequenza da un LNB, Low Noise Block converter costituito da un mixer in discesa (downconverter) e da un LNA (Low Noise Amplifier), caratterizzato da una figura di rumore $F_{dB}=0,7$ e, tramite un cavo coassiale lungo 10 m caratterizzato da un'attenuazione di 20 dB/100 m, giunge a una scheda inserita in un PC.

Oltre all'attenuazione dello spazio libero, si desidera avere per il downlink un margine del collegamento pari a **3 dB**.

Il **collegamento di terra** tra utente e ISP (Internet Service Provider), per l'invio delle richieste, può essere realizzato tramite la normale rete telefonica (PSTN).

Il candidato, formulate le ipotesi aggiuntive ritenute necessarie, dopo aver illustrato l'architettura dei protocolli impiegata per la comunicazione su Internet e aver proposto uno schema a blocchi del sistema, analizzi **una delle due tratte del collegamento**, rispondendo ai quesiti posti.

1. Collegamento via satellite.

Il candidato:

- a) illustri le caratteristiche della modulazione impiegata e determini il massimo bit rate (lordo) che è possibile supportare sfruttando completamente la banda a disposizione;
- b) descriva la tecnica per la correzione d'errore FEC (Forward Error Correction) e calcoli il bit rate massimo effettivo al netto della ridondanza introdotta dalla FEC stessa;
- c) a sua scelta
 - analizzi il collegamento di uplink e, sapendo che si desidera ottenere una probabilità di errore sul simbolo non superiore a 10^{-9} per cui l' **E_b/N_0 non deve essere inferiore a 15 [dB]**, verifichi se esso è ben dimensionato;

oppure

- analizzi il collegamento di downlink per determinare il **diametro minimo della parabola ricevente TV** che consente di avere in ricezione un **S/N di almeno 15 [dB]**.

2. Collegamento di terra via rete telefonica PSTN.

Il candidato:

- a) proponga il tipo di **modem fonico** che ritiene più adatto per il collegamento via rete telefonica PSTN, illustrandone lo schema a blocchi, descrivendo la modulazione utilizzata in trasmissione e proponendo uno schema a blocchi del modulatore e del demodulatore;
- b) illustri le caratteristiche del protocollo di livello 2 utilizzato nell'accesso a Internet via PSTN;
- c) calcoli la capacità teorica del canale telefonico utilizzabile dal modem PSTN, sapendo che esso è caratterizzato da una banda utile di 3500 Hz e da un S/N di 38 dB e verifichi se essa è sufficiente a supportare il bit rate con cui opera il modem;
- d) determini il numero di stati che dovrebbe poter assumere il segnale modulato trasmesso dal modem per poter operare con un bit rate pari alla capacità del canale, supponendo che la velocità di modulazione sia pari alla banda del canale.

Durata della prova: 6 ore.

E' consentito l'uso di manuali tecnici e calcolatrici scientifiche non programmabili.

Non è consentito l'uso di libri di testo e appunti personali.

Non è consentito l'uso di telefoni cellulari, PDA, notebook e apparecchi simili, che devono essere spenti e posti in luogo adatto.

Soluzione

Per la trattazione delle tematiche inerenti la simulazione di tema d'esame proposta si rimanda al libro di testo

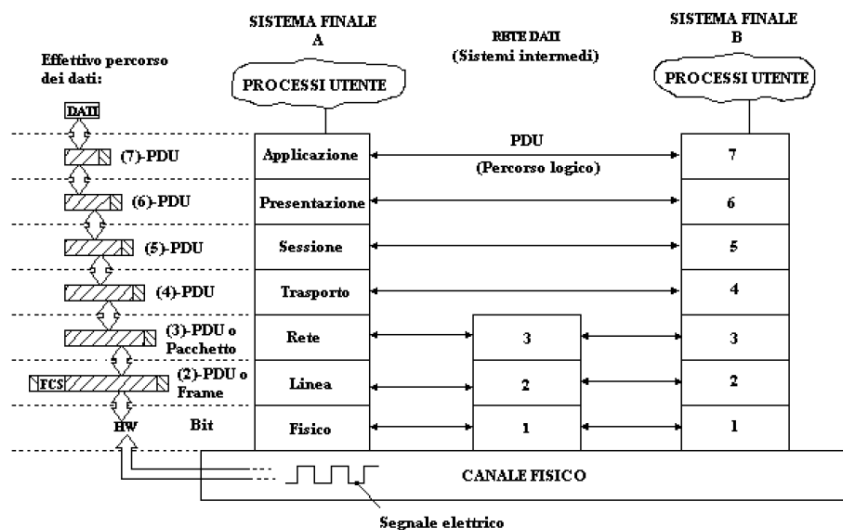
Onelio Bertazioli
Telecomunicazioni voll. A e B (2ª edizione)
Zanichelli

Architettura dei protocolli

Per la comunicazione su Internet si utilizza la suite di protocolli TCP/IP, che comprende protocolli che vanno dallo strato 3 allo strato 7 OSI. La trattazione dell'architettura dei protocolli può comprendere la descrizione del modello OSI (Unità 9 par. 9.2), per la definizione dei concetti generali relativi ai protocolli, seguita dalla descrizione dei principali protocolli della suite¹ TCP/IP (Unità 9 par. 9.4):

- IP, protocollo dello strato 3 che ha la funzione di inoltrare i pacchetti IP operando in modalità datagram;
- TCP, protocollo dello strato 4 che va impiegato quando si desidera avere una comunicazione end-to-end affidabile; il TCP opera in modalità connection oriented e svolge funzioni quali la correzione d'errore end-to-end (per ritrasmissione), il controllo di flusso, la segmentazione delle PDU generate dagli strati superiori, ecc.;
- UDP, protocollo dello strato 4 che va impiegato quando si desidera avere una comunicazione end-to-end veloce a discapito dell'affidabilità; l'UDP opera in modalità connectionless e quindi non effettua la correzione d'errore né il controllo di flusso; svolge funzioni quali l'identificazione locale del protocollo dello strato superiore sorgente e destinazione, formazione dei datagrammi UDP, eventuale rivelazione d'errore;
- Protocolli dello strato di Applicazione; sono i protocolli che supportano i servizi usufruibili in rete, come l'http per il trasferimento di pagine WEB, l'FTP per il trasferimento di file, l'SMTP per la posta elettronica, ecc.

Il protocolli della suite TCP/IP vengono poi trasportati da opportuni protocolli dello strato 2, che possono variare a seconda del collegamento fisico su cui si opera.



☐ = (N)-PCI = Protocol Control Info, o Header, dello strato N (intestazione con info di servizio)

▨ = (N)-PDU = Protocol Data Unit dello strato N

FCS = Frame Check Sequence, campo per la rivelazione d'errore sul frame

Fig. 9.3 Comunicazione tra processi utente e tra entità.

¹ Per una descrizione più dettagliata della suite TCP/IP si vedano anche il par. 9.5 e l'Unità 10.

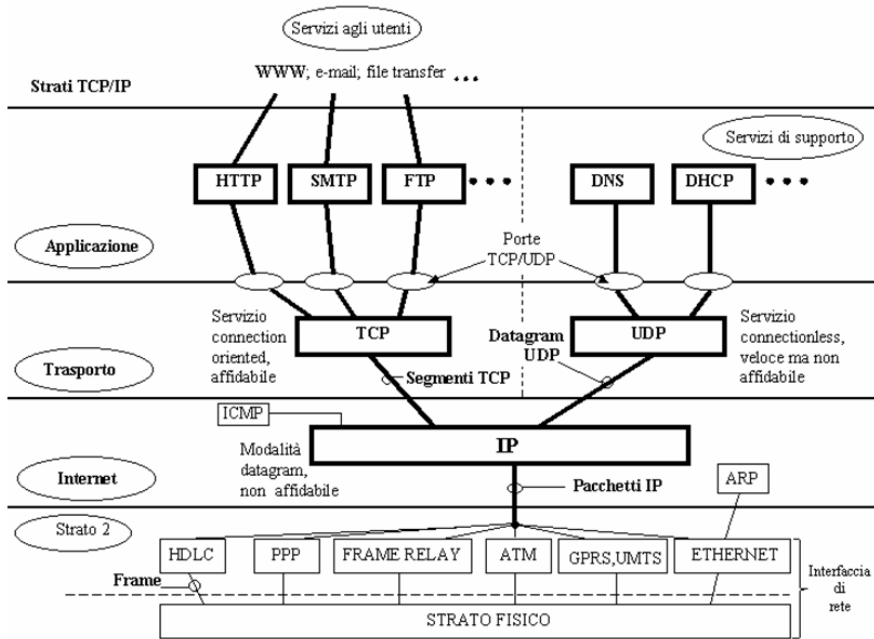
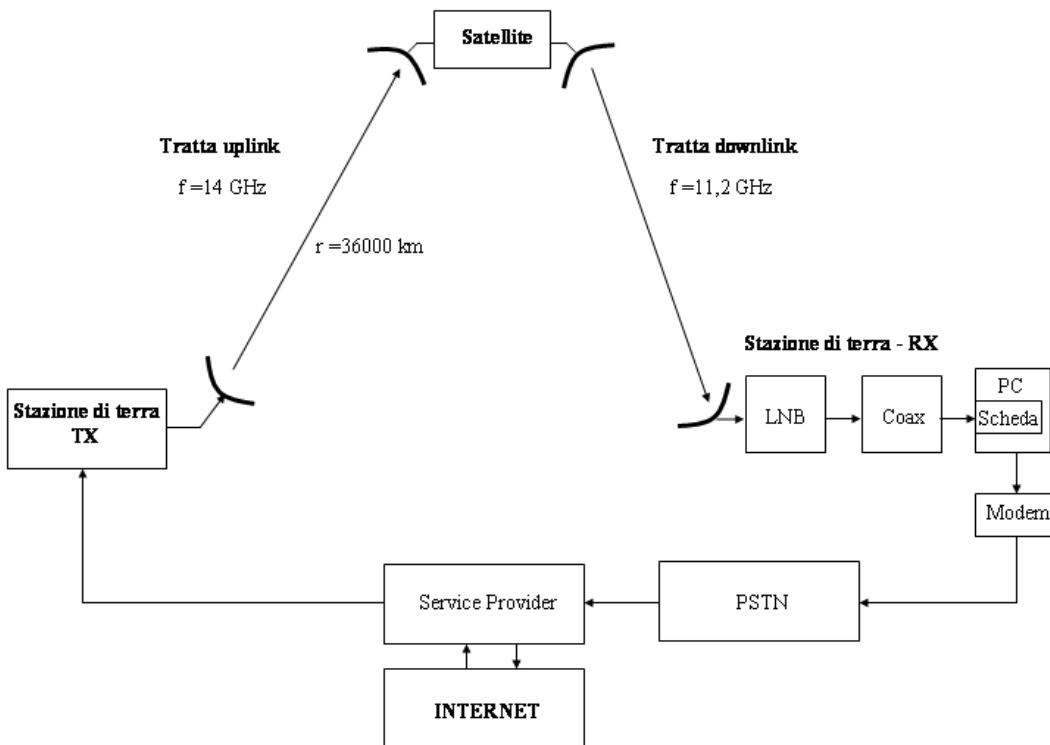


Fig. 9.5 Principali protocolli della suite TCP/IP

Uno **schema a blocchi** generico del sistema può essere il seguente (si vedano le Unità 3 e 8):



1. Collegamento via satellite

Punto a)

La modulazione QPSK, nota anche come 4-PSK o 4-QAM, è una modulazione digitale a 4 stati ottenibile con il metodo delle due portanti in quadratura (si veda l'Unità 8, par. 8.6 e 8.7). Il segnale modulato può assumere 4 fasi diverse e a ogni fase vengono associati 2 bit (per esempio 00 → +45°; 01 → +135°; 11 → -135°; 10 → -45°).

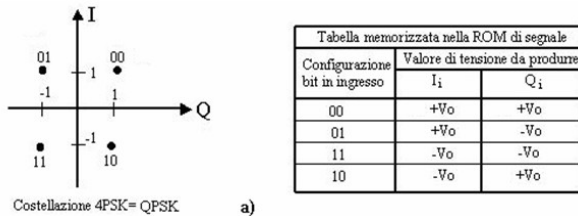
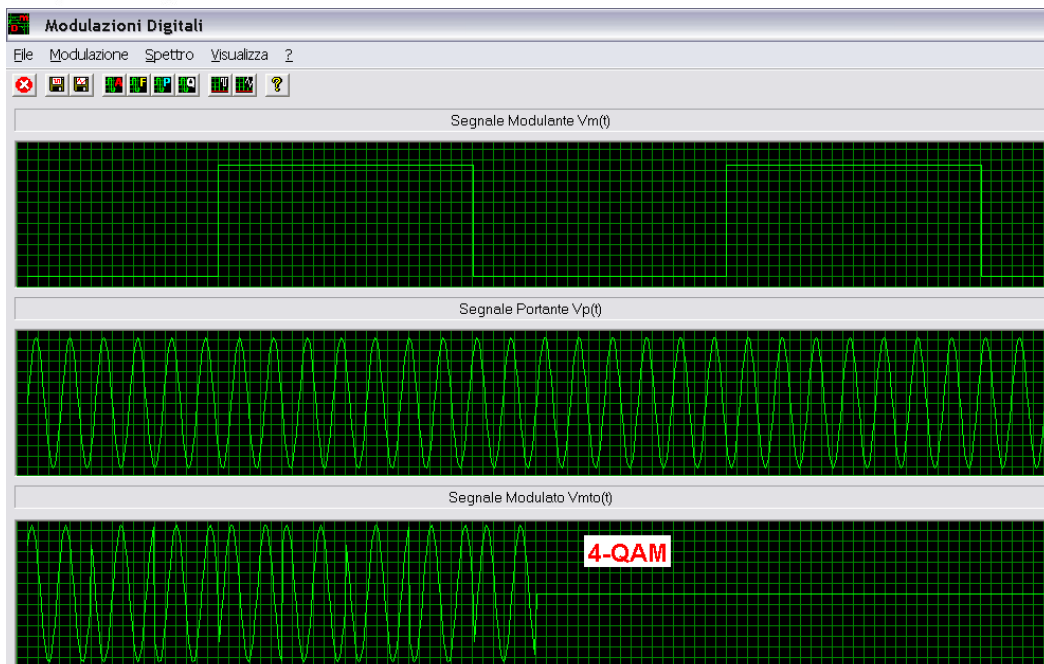


Figura 8.8 Esempi di costellazioni



Modulazione 4-QAM simulata con il programma MODIGIT contenuto nel CDROM per l'insegnante allegato al testo.

Poiché in prima approssimazione l'occupazione di banda di un segnale modulato multistato (QAM) è pari alla velocità di modulazione, per sfruttare completamente la banda disponibile si può assumere **una velocità di modulazione di 36 Msimboli/s (o Mbaud)**; di conseguenza il massimo bit rate (lordo) supportato risulta pari a:

$$R_c = V_m \log_2 M = 36 \cdot 10^6 \log_2 4 = 72 \text{ Mbit/s}$$

Punto b)

La tecnica di correzione d'errore **FEC (Forward Error Correction)** consiste nell'effettuare una codifica convoluzionale in trasmissione, tale da consentire in fase di decodifica una correzione diretta degli errori (cioè senza ritrasmissioni) da parte del ricevitore, applicando un algoritmo che in caso di errore restituisce la sequenza che ha la maggiore probabilità di essere quella corretta (MLSE - Maximum Likelihood Sequence Estimation); per una descrizione dettagliata della FEC si veda l'Unità 6 par. 6.3.3. In generale nelle trasmissioni digitali via satellite la FEC risulta molto utile in quanto, per via della notevole distanza, i valori di S/N che si hanno nei ricevitori a terra sono relativamente bassi, il che determina una probabilità d'errore relativamente elevata. Di conseguenza nel caso di ricezione di segnali video digitalizzati (TVSAT) si avrebbe un degrado della qualità, mentre nel caso di ricezione di segnali dati (Internet) si avrebbero delle frequenti ritrasmissioni end-to-end effettuate dal protocollo TCP.

Va tenuto conto che le distanze sono molto grandi per cui i ritardi sono consistenti e bisogna cercare di ridurre al minimo le ritrasmissioni per non perdere (almeno in parte) il vantaggio della elevata velocità di scaricamento. La tecnica FEC consente di correggere automaticamente gli errori (entro certi limiti) e quindi consente di evitare ritrasmissioni frequenti. Riassumendo, l'adozione della FEC migliora la qualità dei segnali video digitalizzati e riduce il numero di ritrasmissioni (fino ad annullarle se il numero di errori non è eccessivo) nel caso di segnali dati da Internet.

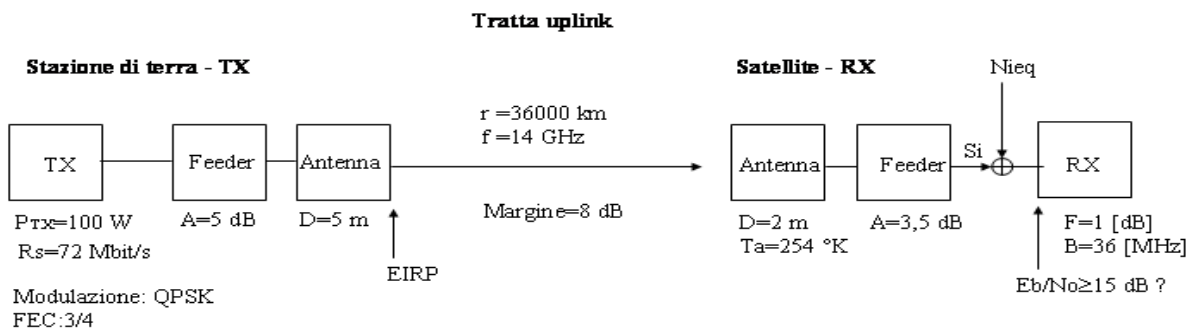
Nella FEC il **code rate (R)** viene definito come il rapporto tra il bit rate in ingresso (R_s) e quello in uscita (R_c) dal codificatore convoluzionale: $R = R_s/R_c$.

Nel caso in esame si ha che il bit rate effettivo (prima della codifica convoluzionale) è pari a:

$$R_s = (3/4)R_c = (3/4) \cdot 72 \cdot 10^6 = 54 \text{ Mbit/s}$$

Punto c) - Collegamento di uplink

Lo schema a blocchi del collegamento di uplink è il seguente:



Si determinano i dati necessari al calcolo di S_i [dB_w]. Per le antenne si suppone un'efficienza del 65%. Si rimanda alle Unità 3 e 8 per la spiegazione delle formule utilizzate.

- Stazione di terra:

$$L_{PTX} = 10 \log_{10} 100 = 20 \text{ dB}_w$$

$$G_{ant.TX} = 18,5 + 20 \log_{10} 14 + 20 \log_{10} 5 = 55,4 \text{ dB}$$

$$EIRP = 20 - 5 + 55,4 = 70,4 \text{ dB}_w$$

- Calcolo dell'attenuazione spazio libero e dell'attenuazione totale, comprensiva del margine:

$$A_{si} = 92,5 + 20 \log_{10} 14 + 20 \log_{10} 36000 = 206,5 \text{ dB} \rightarrow A_{tot} = A_{si} + \text{Margine} = 214,5 \text{ dB}$$

- Satellite:

$$G_{ant.RX} = 18,5 + 20 \log_{10} 14 + 20 \log_{10} 2 \rightarrow G_{ant.RX} = 47,4 \text{ dB}$$

- Calcolo del livello di potenza del segnale in ingresso al ricevitore, S_i [dB_w]:

$$S_{i \text{ dB}_w} = EIRP - A_{tot} + G_{ant.RX} - A_{fRX} \rightarrow S_{i \text{ dB}_w} = 70,4 - 214,5 + 47,4 - 3,5 = -100,2 \text{ dB}_w$$

- Calcolo della temperatura di sistema (T_{si}):

$$\text{Fattore di rumore non in dB: } F = 10^{1/10}$$

$$T_q = 290(F-1) = 290(10^{1/10} - 1) = 75 \text{ °K}$$

$$T_{si} = T_a + T_q = 254 + 75 \text{ °K} \rightarrow T_{si} = 329 \text{ °K}$$

- Calcolo del livello di rumore equivalente in ingresso al ricevitore, N_{ieq} [dB_w]:

$$N_{ieq \text{ [dB}_w]} = 10 \log_{10} k T_{si} B = 10 \log_{10} [1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 329 \cdot 3,6 \cdot 10^7] \rightarrow N_{ieq} = -127,8 \text{ dB}_w$$

- Calcolo di S/N ed E_b/N_o , espressi in dB:

$$(S/N)_{dB} = S_{i \text{ [dB}_w]} - N_{ieq \text{ [dB}_w]} \rightarrow (S/N)_{dB} = -100,2 - (-127,8) = 27,6 \text{ dB}$$

$$(E_b/N_o)_{dB} = (S/N)_{dB} - 10 \log_{10} (R_c/B) \rightarrow (E_b/N_o)_{dB} = 27,6 - 3 = 24,6 \text{ dB}$$

Si ricorda (Unità 8 par. 8.3) che il legame tra S/N ed E_b/N_o è il seguente:

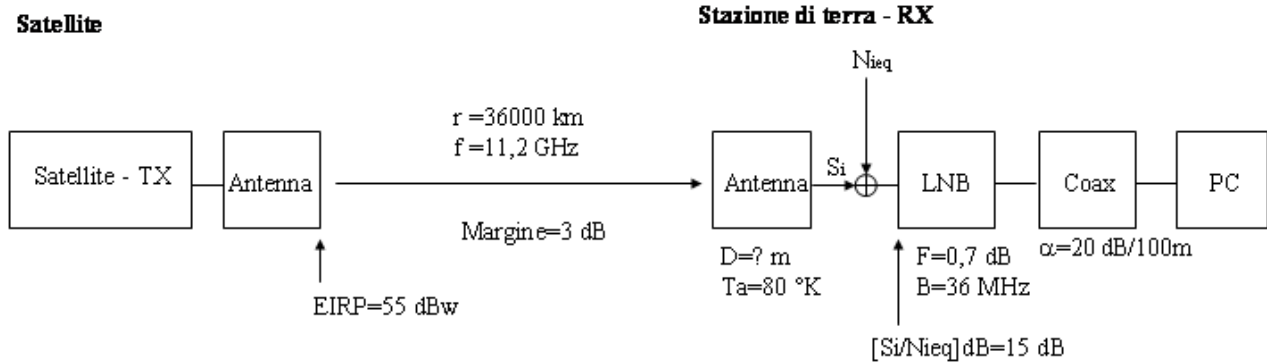
$$(S/N) = (E_b/N_o) \cdot (R_c/B) \rightarrow (S/N)_{dB} = (E_b/N_o)_{dB} + 10 \log_{10} (R_c/B)$$

E_b/N_o è superiore al valore minimo con un buon margine. Si potrebbe anche ridurre la potenza in trasmissione e/o il diametro dell'antenna trasmittente.

Punto c) - Collegamento di downlink

Lo schema a blocchi del collegamento di downlink è il seguente:

Tratta downlink



Si determinano dapprima i dati necessari al calcolo del **guadagno dell'antenna ricevente**.

- Satellite:

EIRP=55 dB_w

- Attenuazione spazio libero e attenuazione totale, comprensiva del margine M:

$$A_{si} = 92,5 + 20 \log_{10} 11,2 + 20 \log_{10} 36000 = 204,6 \text{ dB} \rightarrow A_{tot} = A_{si} + \text{Margine} = 207,6 \text{ dB}$$

Stazione di terra (abitazione):

- Calcolo della temperatura di sistema (T_{si}):

$$T_q = 290(F-1) = 290(10^{0,7/10} - 1) = 50,7 \text{ °K} ; T_{si} = T_a + T_q \rightarrow T_{si} = 80 + 50,7 = 130,7 \text{ °K}$$

- Calcolo del livello di rumore equivalente in ingresso al ricevitore, N_{ieq} [dB_w]:

$$N_{ieq} [\text{dB}_w] = 10 \log_{10} k T_{si} B = 10 \log_{10} [1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 130,7 \cdot 3,6 \cdot 10^7] \rightarrow N_{ieq} [\text{dB}_w] = -131,8 \text{ dB}_w$$

- Calcolo del livello di potenza del segnale in ingresso all'LNB, S_i [dB_w]:

$$[S/N]_{\text{dB}} = S_i [\text{dB}_w] - N_{ieq} [\text{dB}_w] = 15 \text{ dB} \rightarrow S_i [\text{dB}_w] = 15 - 131,8 = -116,8 \text{ dB}_w$$

- Calcolo del guadagno dell'antenna:

$$S_i [\text{dB}_w] = \text{EIRP} - A_{tot} + G_{ant.RX} \rightarrow -116,8 = 55 - 207,6 + G_{ant.RX} \text{ dB}_w$$

$$G_{ant.RX} = -116,8 - 55 + 207,6 = 35,8 \text{ dB}$$

- Calcolo del **diametro dell'antenna**:

$$G_{ant.RX} = 18,5 + 20 \log_{10} f_{[\text{GHz}]} + 20 \log_{10} D_{[m]} \rightarrow 35,8 = 18,5 + 20 \log_{10} 11,2 + 20 \log_{10} D_{[m]} \text{ [dB]}$$

$$20 \log_{10} D_{[m]} = -3,68 \rightarrow D = 10^{-3,68/20} = 0,65 \text{ m}$$

2. Collegamento via rete telefonica.

Punto a) Collegamento su PSTN

Per il collegamento via rete telefonica PSTN, poiché ha solo il compito di trasmettere le richieste e quindi non necessita di velocità elevate, è possibile adottare un **modem fonico a standard V.34+ o V.90**, il cui schema a blocchi generale è riportato nell'Unità 13 par. 13.5.3. Come si evince dalla tabella 13.1 (Unità 13) entrambi i modem operano a 33600 bit/s in trasmissione e adottano la **modulazione TCM (Trellis Coded Modulation)**. La TCM è una modulazione derivata dalla **QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** aggiungendo la correzione d'errore **FEC (Forward Error Correction)** sui simboli, come illustrato nell'Unità 8 par. 8.8 e 8.9 in cui si riportano anche gli schemi di principio dei modulatori e demodulatori QAM e TCM.

Tabella 13.1 Raccomandazioni ITU-T della Serie V relative ai modem fonici.

Racc. ITU-T	Velocità Lato DTE [bit/s]	Tipo di trasmissione in linea.	Modo di trasm.	Tecnica FD	Vel. di modulaz. [Baud]	Tipo di modulaz.
V.21	300	Asincrona	FD	Suddiv. di banda	300	FSK
V.23	1200 (600)	Asincrona	HD	-	1200 (600)	FSK
V.22	1200 (600)	Sincrona	FD	Suddiv. di banda	600	DPSK
V.22-bis	2400 (1200)	Sincrona	FD	Suddiv. di banda	600	16-QAM
V.26	2400 (1200)	Sincrona	HD	-	1200	DPSK
V.27	4800 (2400)	Sincrona	HD	-	1600 (1200)	DPSK
V.29	9600 (7200) (4800)	Sincrona	HD	-	2400	16-QAM
V.32	9600 (4800)	Sincrona	FD	Cancellaz. d'eco	2400	16-QAM (TCM)
V.32-bis	14.400 (9.600)	Sincrona	FD	Cancellaz. d'eco	2400	TCM
V.33	14.400 (12.000)	Sincrona	HD	-	2400	TCM
V.34/ V.34+	28.800/ 33600	Sincrona	FD	Cancellaz. d'eco	3200/ 3500	TCM
V.90	33600 TX 56k RX	Sincrona	FD	Cancellaz. d'eco	3500 8000	TCM PCM
V.92	48k TX 56k RX	Sincrona	FD	Cancellaz. d'eco	8000 8000	PCM PCM

HD= Half Duplex; FD= Full Duplex.

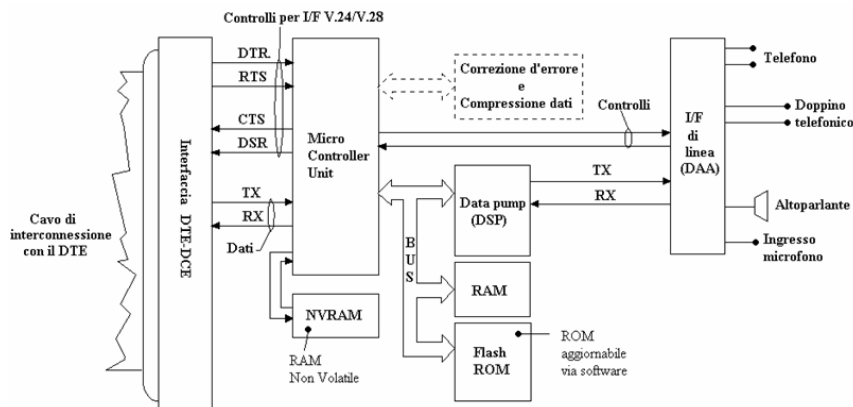


Fig. 13.6 Schema di principio di un modem fonico.

Punto b)

Negli accessi commutati a Internet via PSTN o ISDN si impiega come protocollo di livello 2 (strato 2 OSI) il **protocollo PPP (Point To Point Protocol)**. Come illustrato nell’Unità 12 par. 12.4, il PPP può essere considerato come un protocollo simile all’HDLC. E’ così possibile descrivere le caratteristiche generali del protocollo HDLC, illustrando il formato di un frame HDLC, e indicare le differenze sostanziali tra PPP e HDLC che sono essenzialmente le seguenti:

- nel PPP si aggiunge al formato del frame HDLC un campo Protocol, posto tra i campi Control e Info, in modo da poter individuare i protocolli di livello superiore trasportati; infatti il PPP trasporta in tempi diversi protocolli di livello superiore diversi, che svolgono funzioni legate all’autenticazione degli utenti (tramite password e username), alla configurazione dinamica degli indirizzi IP, al trasporto di pacchetti IP nel corso di una navigazione su Internet;
- il PPP effettua la rivelazione d’errore, ma a differenza dell’HDLC, non effettua la correzione d’errore; i frame contenenti errori sono scartati ed è compito del protocollo TCP provvedere alle eventuali ritrasmissioni; il contenuto del campo Control è così fisso;
- il PPP opera su un collegamento punto-punto, per cui il campo Address del frame è presente ma ha contenuto fisso (tutti “1”, FF in esadecimale) in quanto non viene utilizzato per indirizzare le stazioni.

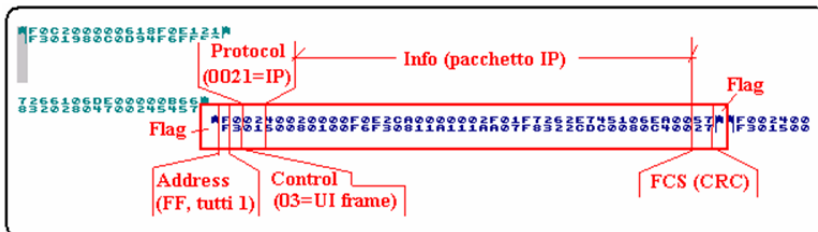


Fig. 12.5 Decodifica in esadecimale di un frame PPP visualizzata da un analizzatore di protocollo e sua corrispondenza con la struttura teorica del frame.

Punto c)

Per calcolare la capacità di canale è necessario come prima cosa porre l’S/N non in dB: $S/N = 10^{38/10} = 6309,5$. Come indicato nell’Unità 6 par. 6.2.4, formula (6.15), la capacità di canale risulta pari a:

$$C = B \log_2(1 + S/N) = B \frac{\log_{10}(1 + S/N)}{\log_{10} 2} \rightarrow C = 3500 \frac{\log_{10}(1 + 6309,5)}{0,3} \rightarrow C = 44334 \text{ bit/s}$$

Poiché risulta $C > R_s$, il canale ha capacità sufficiente.

Punto d)

Dalla relazione $C = R_{s_{\max}} = V_m \log_2 M$ (Unità 6 par. 6.2.4) è possibile determinare il numero di stati M che dovrebbe poter assumere il segnale modulato:

$$\log_2 M = R_{s_{\max}} / V_m \rightarrow M = 2^{R_{s_{\max}} / V_m} = 2^{44334 / 3500} \approx 6503$$

Se si volesse operare sfruttando interamente la capacità di canale sarebbe quindi necessario adottare un numero elevatissimo di stati.