

sezione **14B** Il canale digitale



PAROLE CHIAVE ►

1. Il canale digitale

Nei sistemi di comunicazioni digitali, il dato inviato è un segnale che assume un numero finito di valori. Nei casi più comuni il dato digitale è il bit, un segnale che può avere due informazioni logiche: alto o basso, vero o falso, “1” o “0”.

A differenza dei sistemi analogici, *il ricevitore per comprendere correttamente l'informazione inviata non necessita di avere un segnale con forma e ampiezza identiche a quelle trasmesse, ma deve solo riconoscere quale livello digitale è stato inviato.* Nel caso del segnale binario occorre semplicemente distinguere i due livelli per ricevere il bit “0” o il bit “1” coerentemente con quanto inviato.

I requisiti del canale possono essere meno stringenti di quelli richiesti per il canale analogico, in quanto potranno essere accettate distorsioni e rumori purché il loro effetto di modifica del segnale digitale consenta ancora di riconoscere i livelli inviati. Quindi le condizioni relative al canale analogico ideale (teoria sezione 14A relazione **7**) sono ancora valide, ma non più necessarie. Le caratteristiche del canale necessarie per la corretta ricezione vengono valutate sulla base della corretta decodifica dei livelli ricevuti, non della forma del segnale ricevuto.

Come mostrato in **figura 1**, il canale digitale può essere schematizzato in 3 blocchi.

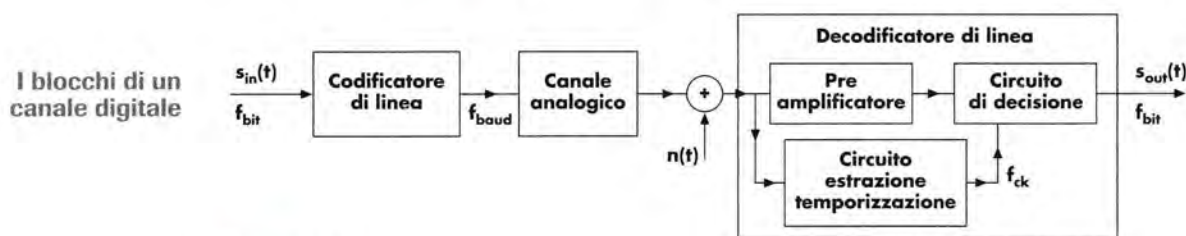


Figura 1

Schema a blocchi di un canale digitale.

- 1) **Codificatore di linea:** è il blocco del trasmettitore che riceve il segnale digitale in bit con un frequenza pari a f_{bit} e lo adatta al canale trasmissivo emettendo simboli digitali (**i baud**) ad una frequenza f_{baud} che può essere identica a f_{bit} oppure nel caso di trasmissione multilivello o per particolari codifiche assume un valore diverso da quella dei bit.

- 2) **Canale analogico:** è il mezzo trasmissivo che collega trasmettitore e ricevitore; ai fini della trasmissione digitale *può essere considerato simile a un filtro passa-basso* in quanto ha attenuazioni che crescono al crescere della frequenza, quindi limitano la trasmissione delle armoniche del segnale digitale ad alta frequenza.
- 3) **Decodificatore di linea:** ha lo scopo di riconoscere l'informazione digitale ricevuta, è formato principalmente da un **preamplificatore** per aumentare i livelli del segnale ricevuto, da un blocco di **estrazione della temporizzazione** dei segnali digitali, e di un **circuito di decisione** che in sincronia con il tempo di trasmissione determina il livello digitale ricevuto. Eventualmente se il segnale inviato non è direttamente formato dai bit di informazione ma è un segnale multilivello, un apparato digitale decodifica il segnale rigenerato dal circuito di decisione nella sequenza di bit informativi. Si noti la presenza del **rumore** in ingresso al ricevitore che disturba la decisione corretta del segnale ricevuto.

In questa sezione si tratterà solo il caso di trasmissione binaria, rimandando a quanto già esposto nella sezione 13B sulle ulteriori caratteristiche della trasmissione multilivello digitale.

2. I codici di linea

Il dato binario viene inviato sul canale analogico mediante un segnale opportuno che adatta l'informazione digitale sia al canale sia alla migliore ricezione del valore inviato anche in presenza delle limitazioni del canale. I codici di linea sono le forme d'onda nel tempo che assumono i valori binari "1" e "0" per essere inviati nel canale analogico. Gli apparati che generano questi segnali (elettrici o ottici) sono i codificatori di linea.

Numerosi codici vengono utilizzati nei sistemi digitali, qui vengono presentati quelli più diffusi. Le caratteristiche principali che deve avere un codice per rendere efficiente la trasmissione digitale nel canale reale sono di seguito esposte.

- ▀ *Lo spettro del codice deve occupare una banda minima* per poter essere inviato senza distorsioni nel canale oppure per potere aumentare la frequenza di trasmissione (la bit-rate).
- ▀ *Il codice non deve avere componente continua* perché gli apparati di trasmissione, di ricezione e i collegamenti con i cavi sono spesso accoppiati in alternata per esigenze di progetto e per permettere la tele-alimentazione (come nel caso di trasmissione su rete telefonica fissa).
- ▀ *Il segnale di temporizzazione dei bit inviati (chiamato **segnale di clock**) viene ricavato dai segnali binari inviati*, che essendo trasmessi con frequenza fissa possono contenere nel proprio spettro la riga di clock. Affinché l'estrazione del sincronismo sia possibile, *lo spettro del codice deve avere un armonica non nulla in corrispondenza della frequenza di clock*.
- ▀ *Il segnale di temporizzazione viene ricavato in contemporanea con l'arrivo dei bit*, per cui è necessario che la riga alla frequenza di clock compaia nello spettro in tutte le possibili sequenze di bit inviati. I casi più critici sono le lunghe sequenze di bit "1" o di bit "0", anche in questo caso il codice deve avere un armonica non nulla in corrispondenza della frequenza di clock.
- ▀ *Il codice deve possedere una certa immunità all'errore* anche in presenza di disturbi quale il rumore e il jitter (l'approfondimento di questi effetti verrà trattato nei paragrafi successivi).

■ Codice NRZ (Not Return to Zero)

È il codice più utilizzato nei circuiti digitali. Come mostrato in figura 2a, i bit "1" hanno una forma rettangolare di ampiezza A_p , di durata uguale al tempo di clock

Le caratteristiche principali dei codici di linea

T_{ck} e i bit "0" hanno ampiezza nulla. Se si invia una serie di "1" il segnale rimane sempre alto senza ritornare al livello "0". Lo spettro medio (fig. 2b) è quello dato dalla forma d'onda rettangolare, ha la forma della funzione *sinc* (che si annulla per tutti i multipli interi della frequenza di clock f_{ck}).

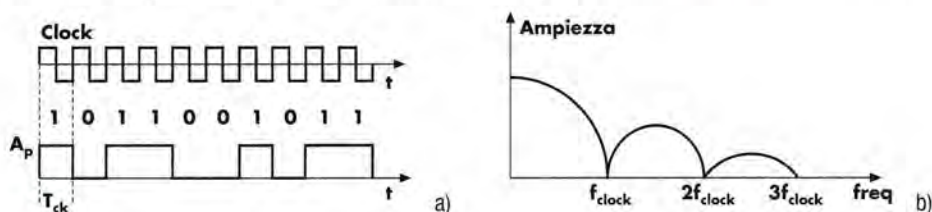


Figura 2

Codice NRZ: segnale nel tempo (a) e spettro medio (b).

Codice NRZ: è semplice ma presenta componente continua, armoniche elevate alle basse frequenze e manca la frequenza del clock.

I vantaggi di questo codice risiedono nella sua semplicità e compatibilità con tutti i dispositivi integrati digitali. Un limite è dato dalla presenza della componente continua e dalle ampiezze maggiori nelle armoniche a bassa frequenza che potrebbero essere eliminate dai circuiti di disaccoppiamento della componente continua. Per questo motivo, a volte si utilizza un codice **NRZ bipolare** dove al valore "0" si fa corrispondere un impulso rettangolare di ampiezza $-A_p$ e in questo modo si annulla il valore medio e quindi la componente continua.

Il limite maggiore è dato dalla mancanza della riga di clock, in quanto per tale frequenza lo spettro assume un valore nullo: ciò impedisce l'estrazione del segnale di temporizzazione e quindi blocca il processo di ricezione.

Codice NRZI (Not return to Zero Inverted)

Un leggero miglioramento delle prestazioni si ha con il codice **NRZI** dove in corrispondenze dei bit "1" il segnale cambia il livello di ampiezza (da A_p a 0 o viceversa) mentre per il bit "0" il segnale rimane al livello precedente. In tal modo si riescono ad avere transizioni anche per lunghe sequenze di "1" ma non per sequenze di "0" consecutivi.

Codice RZ (Return to Zero)

Questo codice ha un andamento simile all'NRZ ma l'impulso del bit "1" ha una durata pari a metà del tempo di clock T_{ck} . Come mostrato in figura 3 gli andamenti nel tempo e in frequenza sono simili, ma per la durata ridotta nel tempo del livello alto, nello spettro si ha un raddoppio della banda e compare la riga alla frequenza di clock, permettendo così l'estrazione della temporizzazione.

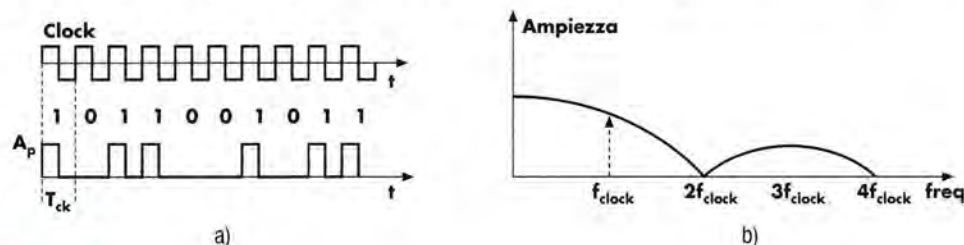


Figura 3

Codice RZ: segnale nel tempo (a) e spettro medio (b).

Codice RZ: lo spettro contiene la frequenza di clock (se non c'è una lunga sequenza di zeri) ma presenta componente continua e componenti spettrali grosse alle basse frequenze.

Il problema però rimane nel caso si riceva una lunga sequenza di bit "0", il segnale mantiene un valore nullo quindi senza nessuna possibilità di estrarre il sincronismo. Rimane poi il problema della presenza della componente continua e delle componenti ampie a bassa frequenza.

Codice AMI (Alternate Mark Inversion)

Un'ulteriore evoluzione si ha con il codice **AMI** mostrato in figura 4. Il bit "1" (in telegrafia denominato *mark*) assume la forma rettangolare del codice RZ (durata pari a $T_{ck}/2$) ma alterna la polarità tra il valore positivo $+A_p$ ed il valore negativo $-A_p$. In questo modo si annulla la componente continua e diminuiscono i valori delle armoniche a bassa frequenza. Come si vede in figura 4b, lo spettro si annulla alla frequenza di clock per cui non compare la riga di clock.

Codice AMI: lo spettro non contiene la frequenza di clock comunque recuperabile con un raddrizzamento (se non c'è una lunga sequenza di zeri). È privo di componente continua e lo spettro a basse frequenze è limitato in ampiezza.

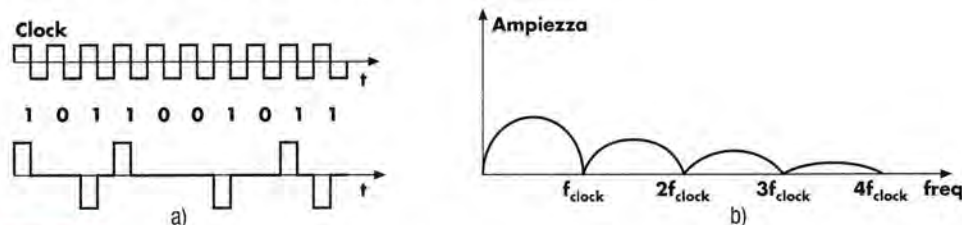


Figura 4

Codice AMI: segnale nel tempo (a) e spettro medio (b).

Il problema può essere superato se il segnale dati ricevuto viene inviato in un raddrizzatore a onda intera nel collegamento verso il circuito di estrazione del clock, in modo da assumere una forma e uno spettro simile a quello del codice RZ, con la presenza della riga di clock. Rimane il problema se si riceve una lunga sequenza di bit "0", perché il segnale mantiene un valore nullo quindi senza nessuna possibilità di estrarre il sincronismo.

Codice HDB3 (High Density Bipolar 3-zeroes)

Per ovviare al problema dell'estrazione del clock per lunghe sequenze di bit "0", si può utilizzare il codice **HDB3**.

Il codice presenta le stesse caratteristiche del codice AMI, per cui ha le stesse caratteristiche temporali e spettrali, ma prevede che, nel caso si debbano inviare più di 3 bit "0" consecutivi, al quarto bit "0" si trasmetta un impulso rettangolare, chiamato **bit di violazione**, con polarità identica all'ultimo impulso inviato.

La violazione dell'alternanza di polarità permette al circuito di ricezione di non confonderlo con un bit "1" e decodificarlo come bit "0".

Nel caso tra due sequenze di almeno quattro bit "0" (cioè tra due bit di violazione) vi siano un numero pari di bit "1", i due bit di violazione avrebbero la stessa polarità e genererebbero un componente continua; per eliminare questo limite, in questo (e solo in questo) caso il primo bit "0", chiamato **bit aggiuntivo** o di bipolarità, assume la stessa forma di un bit "1" (con l'alternanza di polarità).

Per la decodifica corretta il ricevitore avrà un registro di memoria ed in seguito alla ricezione di un bit di violazione, a ritroso riconoscerà che il quarto bit precedente corrisponde ad un bit "0". Un esempio di una codifica HDB3 con l'indicazione dei bit di violazione ed aggiuntivo è mostrata in figura 5.

Codice HDB3: ha le stesse caratteristiche del codice AMI ma supera il problema della sequenza di zeri con il bit di violazione e il bit aggiuntivo.

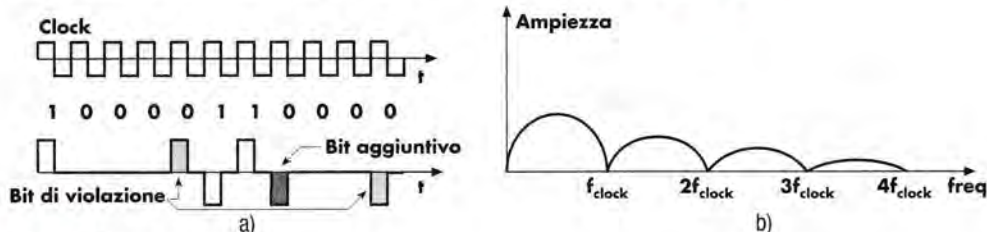


Figura 5

Codice HDB3: segnale nel tempo (a) e spettro medio (b).

Codice CMI: non presenta componente continua. Lo spettro contiene il clock e ha componenti a bassa frequenza limitate. Ha banda superiore a quella dei codici precedenti.

Codice CMI (Coded Mark Inversion)

Il codice **CMI** è un codice bipolare utilizzato nelle linee telefoniche a 140 Mbit/s. Il bit "1" ha una forma rettangolare di durata pari a T_{ck} , con polarità alternata dal valore positivo $+A_p$ al valore negativo $-A_p$. Il bit "0" invece assume la forma di onda rettangolare di periodo T_{ck} con la prima metà di ampiezza $-A_p$ e la seconda di ampiezza $+A_p$ indipendentemente dai bit precedenti. L'andamento temporale e lo spettro sono illustrati in figura 6.

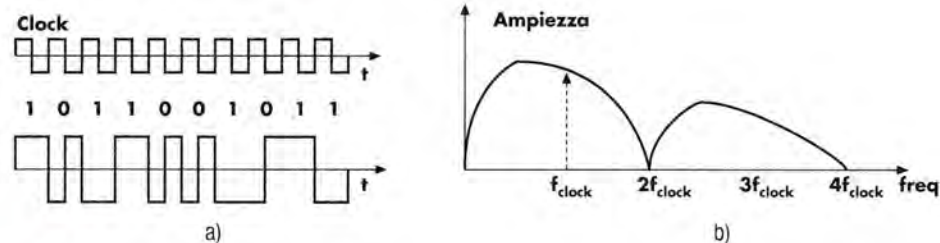


Figura 6

Codice CMI: segnale nel tempo (a) e spettro medio (b).

Come si vede nello spettro non compare la componente continua ed è presente la riga di clock. La riga si mantiene anche per lunghe sequenze sia di bit "0" che "1" grazie alle continue transizioni che vi sono nelle forme d'onda. L'unico limite di questo codice è l'occupazione di banda superiore ai codici precedenti.

Codice Manchester (o bifase)

È utilizzato nelle reti locali Ethernet 10BASE-T.

Come si vede in figura 7, per ogni bit si trasmette un periodo di onda quadra simile al segnale di clock, in fase per il bit "0" e sfasata di 180° per il bit "1". In tal modo il codice non ha componente continua, presenta la riga di clock anche per lunghe sequenze sia di bit "0" che di bit "1". Inoltre tramite porte ex-or è semplice effettuare la conversione di tale codice con i segnali NRZ emessi dai dispositivi digitali.

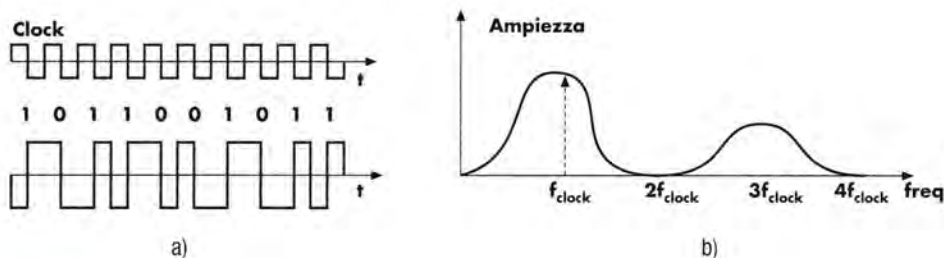


Figura 7

Codice Manchester: segnale nel tempo (a) e spettro medio (b).

Codice bifase: ha un comportamento spettrale simile a quello del CMI.

La definizione qui presentata per questo codice è quella in uso negli standard 802.4 e 802.3 della reti locali. In effetti, poiché non esiste uno standard ufficiale per il codice Manchester, su numerosi testi viene presentata una versione che utilizza una codifica inversa: il codice ha sempre forma simile all'onda quadra di clock, ma per il bit "1" il segnale ha una transizione da alto a basso e per il bit "0" da basso ad alto.

3. L'interferenza di intersimbolo

Scelto il codice di linea, la forma d'onda trasmessa ideale presenta istantanee variazioni di livello che richiederebbero banda infinite. La limitazione di banda del canale aumenta i tempi di salita e discesa della forma d'onda con la conseguenza che ogni impulso ha una durata maggiore del tempo di clock T_{ck} . L'effetto è di avere una sovrapposizione tra i vari bit inviati in sequenza con la possibilità di disturbare la corretta ricezione, come mostrato in **figura 8**.

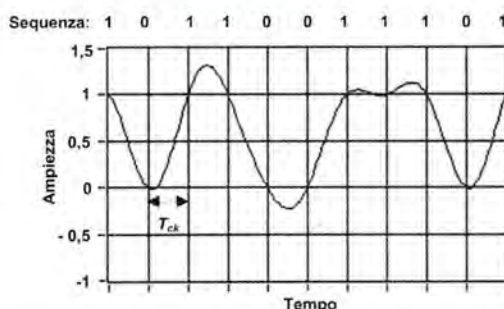


Figura 8

Sequenza di bit ricevuti con interferenza di intersimbolo.

Tale disturbo prende il nome di **interferenza di intersimbolo** (*InterSymbol Interference*, **ISI**). Affinché non si abbia ISI, la forma d'onda di ogni impulso binario deve soddisfare alcune **condizioni** dette di **Nyquist**.

Condizioni di Nyquist

I due risultati più importanti dell'analisi di Nyquist sono:

- 1) la banda minima B_{min} richiesta per la trasmissione di impulsi digitali ad una bit-rate f_{bit} è:

$$B_{min} = \frac{f_{bit}}{2}$$

1

- 2) tra le forme d'onda che soddisfano le condizioni di Nyquist, è conveniente utilizzare gli **impulsi a coseno rialzato** (il nome deriva dalla transizione dello spettro che segue la curva del coseno): come si vede in **figura 9** la famiglia di curve si differenzia per il **fattore di roll-off** definito come:

Fattore di roll-off

$$\beta = \frac{\Delta}{B_{min}}$$

2

Dove Δ è la distanza tra l'inizio della transizione cosinusoidale e la banda minima B_{min} .

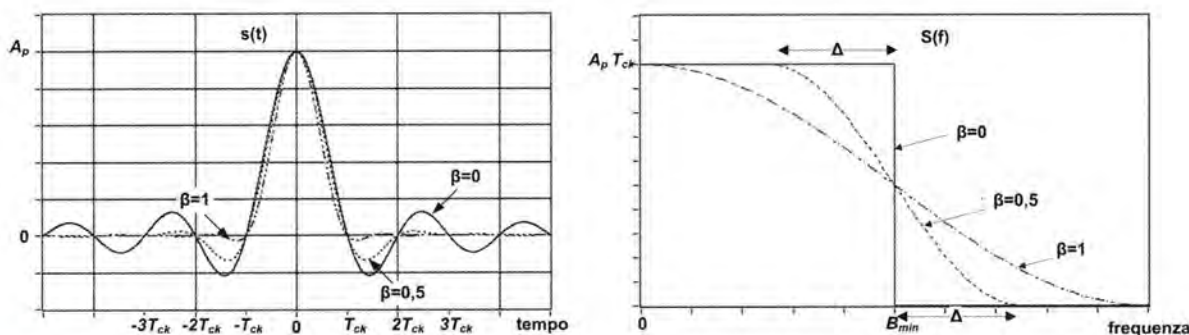


Figura 9

Impulsi a coseno rialzato: andamento nel tempo ed in frequenza.

Come si nota, tutti gli impulsi si annullano ogni T_{ck} , maggiore è il fattore di roll-off β maggiore è lo smorzamento delle code dell'impulso con conseguente minore disturbo di intersimbolo.

Per contro l'aumento del fattore di roll-off comporta un aumento della banda B richiesta per la trasmissione:

$$B = B_{min}(1 + \beta) = \frac{f_{bit}}{2}(1 + \beta)$$

3
AULADIGITALE

 Scheda integrativa 14B.1
 ISI: condizioni di Nyquist

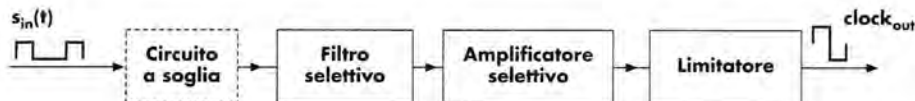
Per questi motivi si utilizzano valori di compromesso tra limite di banda ed ISI: nei sistemi attuali si utilizzano fattori di roll-off pari 0,5 o 0,75.

Per un maggiore approfondimento sulle condizioni di Nyquist si rimanda all'apposita scheda integrativa.

4. Il jitter

Come visto in figura 1, nei sistemi digitali il segnale di clock non viene inviato ma è ricostruito in ricezione attraverso appositi circuiti che estraggono l'armonica dal segnale dati e lo inviano al circuito di decisione che ridefinisce i livelli digitali. Nel caso in cui il codice di linea non contenga la riga di clock, il segnale ricevuto viene distorto mediante un circuito raddrizzatore o un circuito a soglia per allargare lo spettro e far comparire l'armonica voluta.

Successivamente nella catena di estrazione, dopo un filtro selettivo, viene posto un amplificatore e un limitatore per trasformare la sinusoide in un'onda quadra digitale adatta per il circuito di decisione (fig. 10).

 Catena di
 estrazione del
 clock

Figura 10

Schema a blocchi della catena di estrazione del clock.

Il segnale di sincronismo estratto dipende dalla sequenza del segnale dati, infatti può accadere che arrivino lunghe sequenze di soli "0" o di soli "1" che comportano poche transizioni e quindi danno un livello basso della riga estratta oppure al contrario sequenze di bit "0" e "1" alternati generano un segnale di clock alto e che deve essere maggiormente limitato.

Tutti questi effetti si traducono in distorsioni sul segnale di sincronismo. Mentre variazioni di ampiezza sono influenti, le distorsioni di fase comportano un ritardo o un anticipo sul sincronismo e quindi sugli istanti di comando del circuito di decisione, nei quali il segnale ricevuto viene ricostruito.

Questa variazione casuale dei tempi del clock ricostruito è chiamata **jitter**. Se il suo valore è alto si possono commettere errori nella decisione del segnale digitale in quanto si potrebbe leggere il valore prima o dopo che la forma d'onda abbia raggiunto il livello corretto e conseguentemente commettere errore.

Un'ulteriore problema del jitter è che se nella catena di trasmissione vi sono più rigeneratori, il disturbo di ognuno di essi si somma con conseguenze irreparabili al termine del sistema. Per queste ragioni il jitter rappresenta uno dei limiti maggiori nella progettazione di sistemi digitali a lunga distanza.

5. Il Bit Error Rate (BER)

La qualità di una trasmissione digitale è misurata da quanto i dati ricevuti hanno gli stessi valori di quelli inviati. Se il sistema fosse ideale, cioè con banda infinita e senza rumori o altri disturbi sovrapposti, il segnale ricevuto sarebbe identico a quello inviato e quindi senza errori in ricezione.

I limiti reali dei sistemi, descritti nei paragrafi precedenti, comportano che, in ricezione, alcuni dati siano letti con valori diversi da quelli trasmessi. Nel caso di trasmissione binaria, ciò significa leggere un bit "0" quando è stato trasmesso un bit "1" e viceversa. Il parametro utilizzato per misurare la qualità di un sistema digitale è la probabilità di errore, definita come *rapporto tra il numero di bit errati e il numero di bit totali ricevuti (Bit Error Rate, BER)*:

BER

$$BER = \frac{\text{Bit errati}}{\text{Bit ricevuti}}$$

4

Il valore di tale parametro dovrà essere molto piccolo ed è definito dagli standard di qualità stabiliti dall'ITU-T. Ad esempio per la telefonia digitale il BER richiesto è dell'ordine di 10^{-6} , mentre per sistemi in fibra ottica ad alta frequenza il valore del BER deve essere inferiore a 10^{-9} .

Naturalmente vi è un legame tra il rapporto segnale-rumore e il BER, in quanto maggiore è il peso dei disturbi, maggiore è la probabilità che la lettura in ricezione sia errata.

In un'apposita scheda integrativa è esposta la trattazione matematica che lega i due parametri per trasmissione binaria e con rumore additivo di tipo gaussiano. Qui si riporta il risultato finale che permette di calcolare il valore del BER:

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{S}{N} \right)_{RX}} \right) \right]$$

5

Dove $(S/N)_{RX}$ è il rapporto segnale-rumore in ingresso al ricevitore e la funzione matematica $\operatorname{erf}(x)$ è la **funzione errore** (*error function*) i cui valori si trovano tabulati su testi o sono ricavabili da programmi di calcolo. La funzione è definita solo per valori di x positivi e agli estremi assume i seguenti valori:

$$\operatorname{erf}(0) = 0 \quad \operatorname{erf}(\infty) = 1$$

6

Applicando quindi le condizioni estreme **6** alla **5** si ottiene che per un rumore molto superiore al segnale il BER tende al valore $1/2$, cioè si ha il 50% di probabilità di sbagliare il bit inviato, invece nel caso di segnale molto superiore al rumore il BER tende al valore 0, cioè non si ha probabilità di sbagliare.

Nei casi intermedi, dalla **5** è possibile ricavare i valori del BER, in **tabella 1** ne sono riportati alcuni in funzione del rapporto S/N espresso in decibel.

Tabella 1

Relazione tra rapporto segnale-rumore e BER.

$(S/N)_{RX}$ dB	BER	$(S/N)_{RX}$ dB	BER
0	$2,40 \cdot 10^{-1}$	12	$2,34 \cdot 10^{-3}$
1	$2,14 \cdot 10^{-1}$	15	$3,39 \cdot 10^{-5}$
2	$1,86 \cdot 10^{-1}$	16	$3,87 \cdot 10^{-6}$
3	$1,59 \cdot 10^{-1}$	17	$2,77 \cdot 10^{-7}$
4	$1,31 \cdot 10^{-1}$	18	$7,70 \cdot 10^{-9}$
6	$7,87 \cdot 10^{-2}$	19	$1,46 \cdot 10^{-10}$
8	$3,78 \cdot 10^{-2}$	20	$7,69 \cdot 10^{-13}$
10	$1,27 \cdot 10^{-2}$	21	$1,05 \cdot 10^{-15}$

Nei sistemi però i valori del BER sono maggiori di quanto sopra calcolato in quanto oltre al rumore occorre tenere conto degli altri disturbi presenti sul canale come l'ISI, il jitter o la limitazione di banda.

In ogni caso la relazione **5** dà indicazioni al progettista se occorre aumentare la potenza ricevuta o ridurre il rumore affinché il sistema rientri nei valori standard previsti dagli enti di certificazione.

6. Il diagramma a occhio

Nella valutazione delle prestazioni dei sistemi digitali accanto alle misure del BER viene effettuata una misura qualitativa delle forme d'onda digitali che giungono al circuito di decisione per comprendere l'effetto dei disturbi sul segnale digitale ricevuto. Da tale misura si ricavano importanti indicazioni su come migliorare le prestazioni del sistema.

La misura viene effettuata mediante un oscilloscopio, dove vengono visualizzate una serie di forme d'onda che prendono il nome di **diagramma ad occhio** (*eye pattern*) in quanto, se si riceve un buon segnale, la figura che si ha sullo schermo dell'oscilloscopio ha una forma simile ad un "occhio aperto" mentre la presenza di disturbi tende a far chiudere l'apertura centrale del diagramma.

In **figura 11** è mostrato un diagramma ad occhio per un segnale digitale codificato in NRZ.

Diagramma ad occhio

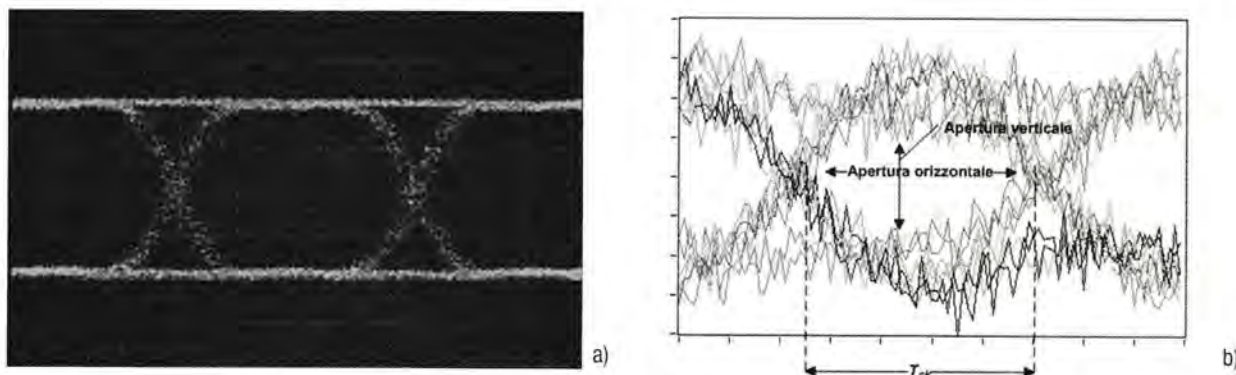


Figura 11

Misura su oscilloscopio di un diagramma ad occhio (codice NRZ) (a) ed esempio di diagramma ad occhio (codice NRZ) in presenza di rumore e di banda limitata (b).

La misura viene effettuata ponendo l'oscilloscopio in sincronizzazione con il segnale di clock e memorizzando sullo schermo tutti i segnali acquisiti. Dopo una lunga serie di segnali casuali si visualizzano tutte le sequenze possibili.

La forma ottenuta è data dalla sovrapposizione di tutti i segnali ricevuti, modificati per la presenza di disturbi quali rumore, ISI, jitter o per limitazione di banda del canale.

Analizzando la figura ottenuta, è possibile valutare l'apertura verticale dell'occhio in corrispondenza dell'istante migliore per sincronizzare il circuito di decisione, per comprendere se i livelli digitali alto e basso siano distinguibili anche in presenza di rumore aggiuntivo.

L'apertura orizzontale dell'occhio evidenzia se, in presenza di jitter che anticipi o ritardi il tempo in cui il circuito definisce i livelli "1" e "0", sia possibile ricostruire il livello corretto del dato trasmesso. Ad esempio, se un sistema di comunicazioni presenta un diagramma a occhio come quello mostrato in **figura 11b**, si nota come il rumore abbia ridotto notevolmente l'apertura verticale dell'occhio, mentre l'effetto della limitazione di banda ha reso meno ripidi i fronti di passaggio da un livello all'altro.

I due livelli appaiono ancora distinguibili perché l'apertura orizzontale è ampia, per tale motivo il sistema può tollerare un ulteriore disturbo dovuto al jitter mentre per migliorare i valori del BER (e quindi le prestazioni del sistema di comunicazioni) occorre ridurre il rumore o amplificare l'ampiezza del segnale così da riaprire verticalmente l'occhio.

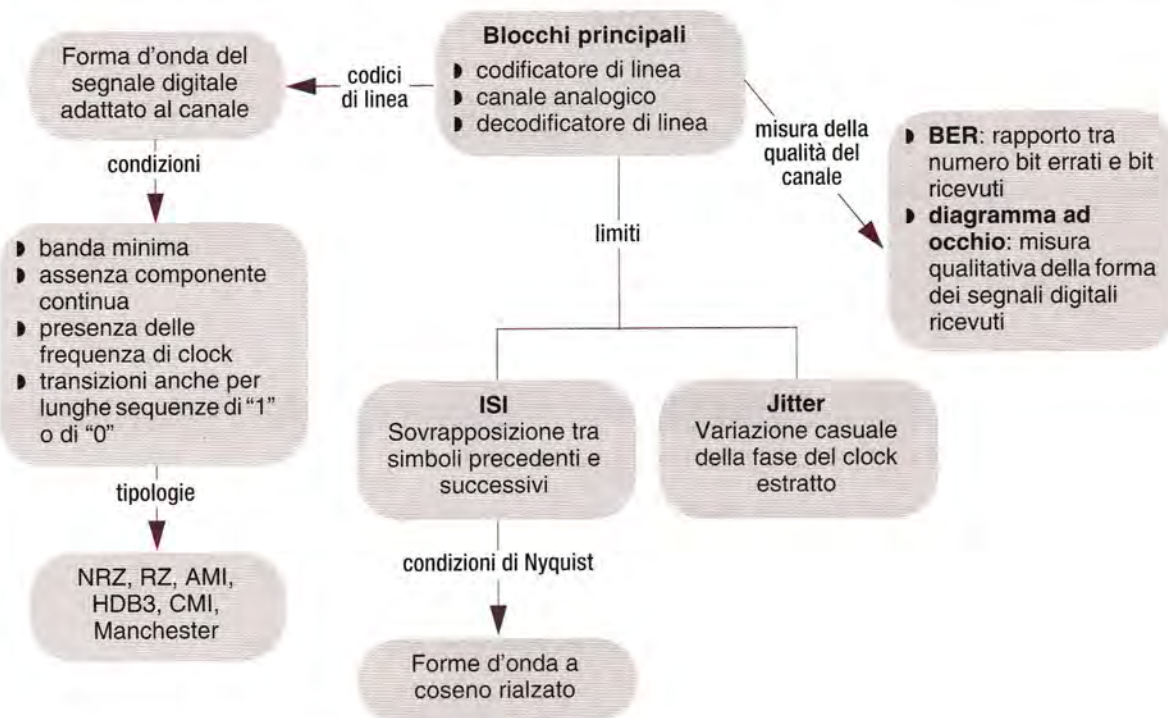
Numericamente le chiusure orizzontali e verticali dell'occhio possono essere espresse come la differenza tra i valori estremi che chiudono l'occhio e l'apertura che si avrebbe in un sistema ideale. Il rapporto percentuale tra la chiusura e l'apertura ideale esprime un valore numerico per il confronto delle prestazioni di sistemi diversi.

Analoghe considerazioni possono essere svolte per codici di linea diversi o per segnale multilivello (vedi i problemi di verifica).



facciamo il punto

Il canale digitale



Test

- Par. 2 **1** Il codice RZ presenta il seguente vantaggio rispetto al codice NRZ:
- a ☐ ha una banda inferiore;
 - b ☐ non presenta componente continua;
 - c ☐ ha la riga di clock nello spettro;
 - d ☐ ha transizioni anche per lunghe sequenze di "0".
- Par. 2 **2** Lo spettro del codice AMI ha la seguente caratteristica:
- a ☐ non ha la componente a frequenza zero;
 - b ☐ ha una banda più piccola del codice NRZ;
 - c ☐ ha la componente al valore della frequenza di clock;
 - d ☐ non ha componenti ad alta frequenza.
- Par. 3 **3** La forma d'onda a coseno rialzato permette di:
- a ☐ eliminare l'ISI;
 - b ☐ ridurre l'ISI;
 - c ☐ ridurre il jitter;
 - d ☐ estrarre il clock.
- Par. 5 **4** Che legame vi è tra *BER* e (S/N) :
- a ☐ il *BER* non dipende da (S/N) ;
 - b ☐ il *BER* è nullo per $(S/N) = 0$;
 - c ☐ il *BER* aumenta all'aumentare di (S/N) ;
 - d ☐ il *BER* diminuisce all'aumentare di (S/N) .
- Par. 6 **5** Il diagramma ad occhio permette di:
- a ☐ ridurre l'ISI;
 - b ☐ misurare il *BER*;
 - c ☐ ridurre il jitter;
 - d ☐ valutare quali fattori incidono sul *BER*.

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

- Par. 2 **1** Data la seguente sequenza di bit la si codifichi in NRZ, HDB3, Manchester:

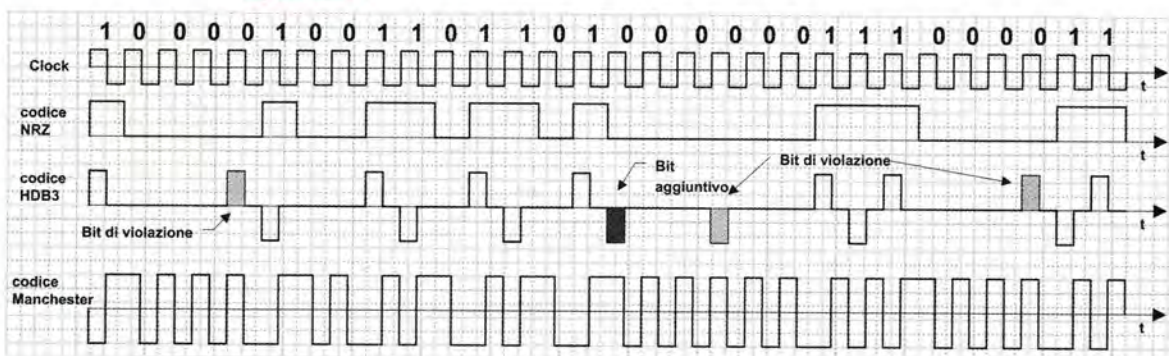
○○●

100001001101101000000111000011

Soluzione

Si riporta, in figura P1, il grafico del clock e dei segnali codificati.

Figura P1



- Par. 2 **2** Data la seguente sequenza di bit la si codifichi in NRZ, HDB3, CMI:

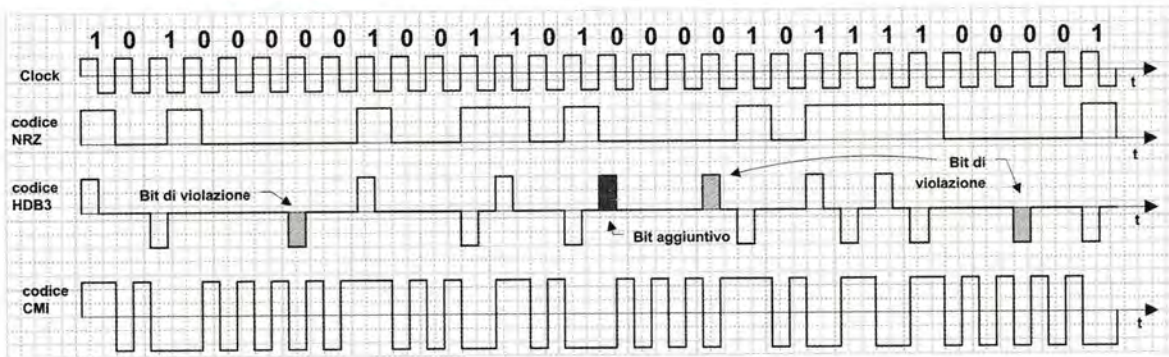
○○●

101000001001101000010111100001

Soluzione

Si riporta, in figura P2, il grafico del clock e dei segnali codificati.

Figura P2

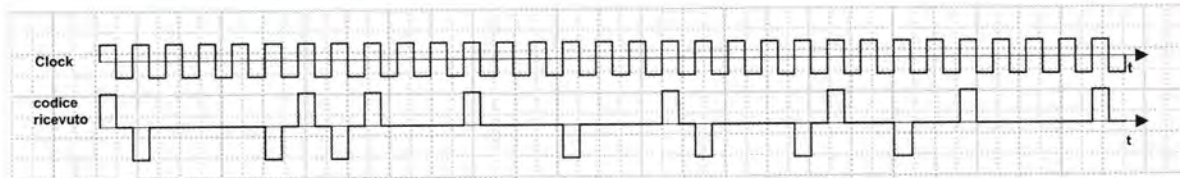


Par. 2

3

Dato il segnale di figura P3 lo si decodifichi in AMI e in HDB3, segnalando eventuali errori (nel caso di bit errati, li si segnino e li si ignori).

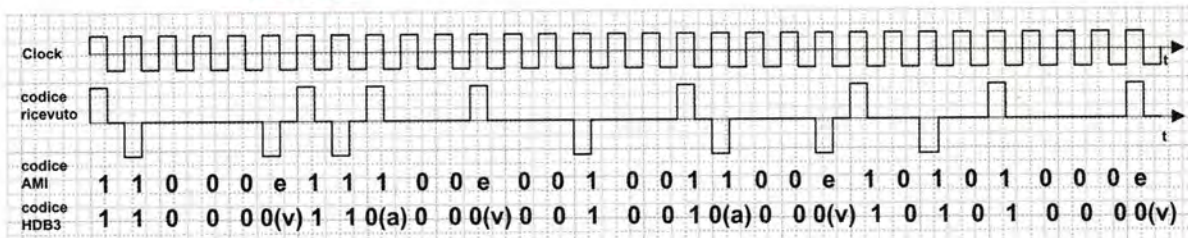
Figura P3



Soluzione

Si riporta, in figura P4, la sequenza decodificata, i bit errati (e) nella decodifica AMI lo sono perché non rispettano l'alternanza di polarità. Nel codice HDB3 sono indicati i bit di violazione (v) e aggiuntivo (a).

Figura P4

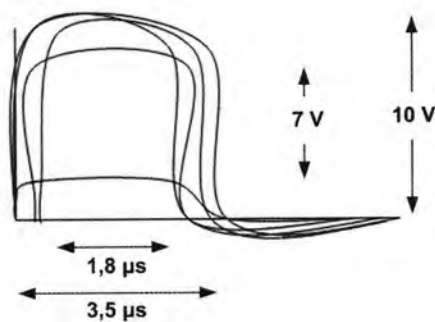


Par. 6

4

Si esamini il diagramma ad occhio di figura P5, si determinino i valori di chiusura dell'occhio verticale e orizzontale ricavabili (in percentuale). Sapendo che la frequenza di clock è di 250 kHz, quali altre considerazioni si possono trarre? È possibile capire il tipo di codice usato in trasmissione?

Figura P5



Infine la forma d'onda del segnale ripete la forma del codice RZ.