

# M149 - Esame di stato di istituto tecnico industriale

## Sessione ordinaria 2007 - Seconda prova scritta

### CORSO DI ORDINAMENTO

**Indirizzo:** ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI

**Tema di:** TELECOMUNICAZIONI

**(Testo valevole per i corsi di ordinamento e per i corsi sperimentali del Progetto SIRIO – Elettronica e Telecomunicazioni)**

Si vuole campionare, digitalizzare e trasmettere su linea numerica seriale un segnale in tensione che passa ciclicamente da  $-2,5\text{ V}$  a  $+2,5\text{ V}$  con velocità non superiore a  $2,5\text{ mV/s}$ . È richiesto un rapporto segnale/rumore di quantizzazione non inferiore a  $45\text{ dB}$ ; si sa, inoltre, che al segnale è sovrapposto un rumore con andamento compreso tra le tensioni di  $-8\text{ mV}$  e  $+8\text{ mV}$ .

Il candidato, fatte le ipotesi aggiuntive che ritiene opportune:

1. proponga lo schema a blocchi del sistema di acquisizione, trasmissione e ricostruzione del segnale, illustrando la funzione e le caratteristiche principali di ciascun blocco;
2. analizzi le caratteristiche spettrali essenziali del segnale;
3. valuti la velocità, in bit al secondo, necessaria per la trasmissione sulla linea numerica;
4. esamini la possibilità di migliorare ulteriormente la fedeltà del segnale ricostruito se non è possibile aumentare la velocità di trasmissione rispetto a quanto valutato al punto precedente;
5. spieghi come sia possibile trasmettere diversi segnali distinti, con caratteristiche identiche a quelle sopra citate, usando una sola linea numerica seriale e valuti quanti se ne potrebbero inviare su un collegamento che operi alla velocità di  $256\text{ kbit/s}$ ;
6. illustri, infine, i vantaggi delle trasmissioni di segnali analogici per via numerica.

## Soluzione

### Quesito 1

Poiché il segnale da campionare è già in tensione e ha un'ampiezza sufficiente, il sistema nel suo complesso può essere composto dalle sezioni indicate in FIGURA 1.

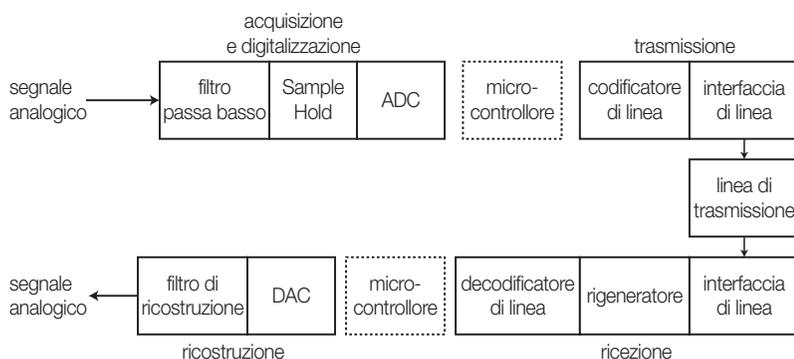


FIGURA 1 Schema a blocchi di principio del sistema completo.

La **sezione di acquisizione e digitalizzazione** può comprendere i seguenti blocchi.

- *Filtro passa basso anti-aliasing*: limita la frequenza massima del segnale di ingresso al valore desiderato, nel nostro caso 750 Hz (si veda il punto 2), in modo da evitare l'introduzione della distorsione da spettro adiacente (aliasing o foldover distortion) da parte del campionatore.
- *Sample and Hold*: campiona il segnale analogico e memorizza ciascun valore campionato per il tempo necessario alla sua conversione in digitale da parte dell'ADC.
- *ADC (Analog to Digital Converter)*: digitalizza ciascun campione rappresentandone l'ampiezza con una stringa di  $n$  bit ( $n = 8$  nel nostro caso, si veda il punto 3), introducendo un *errore di quantizzazione*. Segnali a variazione relativamente lenta possono essere campionati direttamente dall'ADC, se esso integra un circuito di *Tracking and Hold* (T/H, inseguimento e mantenimento); inoltre l'ADC può integrare un convertitore parallelo serie (P/S) e fornire i bit in uscita in modo seriale, attraverso un'opportuna interfaccia.

Può essere presente un *microcontrollore* per gestire sia l'acquisizione sia la trasmissione in linea.

Ipotizzando di effettuare la trasmissione in banda base, attraverso una linea dedicata, la **sezione di trasmissione** può comprendere i seguenti blocchi.

- *Codificatore di linea*: produce un segnale digitale avente il formato definito da un opportuno codice di linea, in modo da emettere un segnale in banda base adatto alla trasmissione sulla linea numerica; per esempio può effettuare la conversione da codice NRZ (*Non Return to Zero*, normale codice binario) a codice Manchester; il segnale trasmesso dovrebbe infatti essere a valor medio nullo e dovrebbe agevolare la sincronizzazione fra trasmettitore e ricevitore.
- *Interfaccia di linea*: interconnette il trasmettitore alla linea, per esempio impiegando un trasformatore di accoppiamento.
- *Linea di trasmissione*: può essere una coppia simmetrica twistata (doppino) o un cavo coassiale, nel caso si operi in ambienti particolarmente disturbati.

La **sezione di ricezione** può comprendere i seguenti blocchi.

- *Interfaccia di linea*.
- *Rigeneratore*: rigenera il segnale che giunge dalla linea squadrandolo e ripulendolo da rumore e distorsioni; a tale scopo, per esempio, si può impiegare un amplificatore operazionale comparatore ai cui ingressi viene inviato il segnale e il suo valor medio, estratto con un filtro passa basso RC; il comparatore produce in uscita un livello alto quando l'ampiezza del segnale supera il valor medio, mentre produce un livello basso quando il segnale ha ampiezza inferiore al valor medio, rigenerando così il segnale digitale che giunge dalla linea distorto e con rumore sovrapposto.

- *Decodificatore di linea*: converte il segnale giunto dalla linea e rigenerato nel formato originario; il clock di ricezione deve essere opportunamente agganciato (sincronizzato) con quello di trasmissione.

La **sezione di ricostruzione** comprende quanto segue.

- *Convertitore digitale analogico (DAC)*: converte ogni stringa di 8 ( $n$ ) bit nel valore di tensione da essa rappresentato, ottenendo così un segnale quantizzato.
- *Filtro passa basso di ricostruzione*: elimina le componenti di alta frequenza presenti nello spettro del segnale quantizzato in modo da riottenere un segnale analogico all'incirca proporzionale a quello originario (se l'errore di quantizzazione è trascurabile).

## Quesito 2

Poiché il testo indica che la velocità di variazione massima del segnale è  $(\Delta V/\Delta t) = 2,5 \text{ mV}/\mu\text{s}$  possiamo fare l'ipotesi di considerare un segnale che abbia velocità di variazione costante e pari a quella massima; in questo caso la forma d'onda è caratterizzata da una pendenza  $(\Delta V/\Delta t)$  costante nell'andare dal valore minimo a quello massimo e viceversa.

In altri termini possiamo ipotizzare che si abbia un segnale triangolare caratterizzato da una variazione di tensione di 2,5 mV ogni  $\mu\text{s}$ . Partendo da  $-2,5 \text{ V}$  si raggiungono così 0 V in 1 ms, intervallo di tempo che corrisponde a  $T/4$ . Il periodo del segnale preso in considerazione è quindi  $T = 4 \text{ ms}$ .

Le caratteristiche spettrali essenziali del segnale possono essere determinate tracciando il suo spettro di ampiezza, cioè il grafico che riporta l'ampiezza delle diverse componenti spettrali (armoniche) in funzione della frequenza. Lo spettro di ampiezza consente così di determinare qual è l'armonica significativa (cioè di ampiezza non trascurabile) che ha la frequenza più alta e quindi qual è la frequenza massima da prendere in considerazione (limite superiore della banda del segnale).

Lo spettro di ampiezza può essere determinato sapendo che un segnale triangolare si può esprimere matematicamente con il seguente sviluppo in serie di Fourier (riportato anche sul Manuale Cremonese):

$$s(t) = \frac{8 \cdot A_p}{\pi^2} \left[ \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) - \left\{ \frac{1}{3^2} \cos(2\pi \cdot 3f_0 \cdot t) \right\} + \left\{ \frac{1}{5^2} \cos(2\pi \cdot 5f_0 \cdot t) \right\} + \dots \right]$$

dove  $A_p$  è il valore di picco, pari ad  $A_p = 2,5 \text{ V}$  nel nostro caso, e  $f_0$  è la frequenza fondamentale.

Le ampiezze e le frequenze delle varie armoniche sono quindi le seguenti.

$$\text{Prima armonica: } A_1 = \frac{8 \cdot A_p}{\pi^2} = \frac{8 \cdot 2,5}{\pi^2} \cong 2 \text{ V}; f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-3}} = 250 \text{ Hz}$$

$$\text{Terza armonica: } A_3 = \frac{A_1}{9} = \frac{2}{9} \cong 0,222 \text{ V}; f_3 = 3f_0 = 750 \text{ Hz}$$

$$\text{Quinta armonica: } A_5 = \frac{A_1}{25} = \frac{2}{25} \cong 0,08 \text{ V}; f_5 = 5f_0 = 1250 \text{ Hz ecc.}$$

Perciò si può assumere come frequenza massima del segnale la frequenza della terza armonica, pari a  $f_{\max} = 750$  Hz, in quanto le armoniche superiori hanno ampiezza trascurabile (1/25 ecc.) rispetto all'ampiezza della prima armonica.

Il segnale triangolare in esame e il suo spettro di ampiezza sono riportati in FIGURA 2.

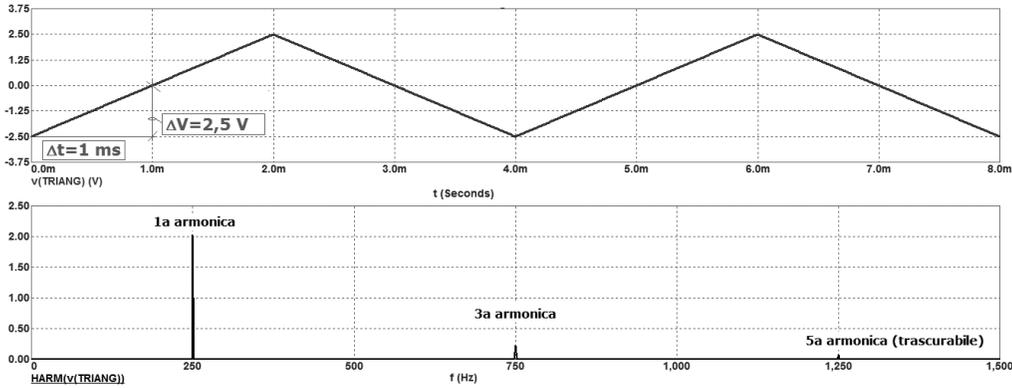


FIGURA 2 Segnale da campionare e suo spettro.

### Quesito 3

La velocità di trasmissione, o bit rate (BR), derivante dalla digitalizzazione del segnale si può calcolare con la seguente relazione:

$$BR = f_c \cdot n \text{ bit/s}$$

dove  $f_c$  è la frequenza di campionamento e  $n$  è il numero di bit impiegati per la codifica di ciascun campione.

La *frequenza di campionamento* viene scelta in modo da soddisfare la condizione posta dal teorema del campionamento (di Shannon):

$$f_c \geq 2f_{\max}$$

dove  $f_{\max}$  è la frequenza massima di segnale che si considera ( $f_{\max} = 750$  Hz).

Poiché il segnale ha una velocità di variazione contenuta ed è noto, scegliamo un valore della frequenza di campionamento più grande del valore minimo teorico (1500 Hz), ma che sia un compromesso fra velocità di trasmissione in linea (che non dovrebbe essere eccessiva) e semplicità di realizzazione del filtro di ricostruzione di ricezione. Possiamo quindi scegliere una frequenza di campionamento pari a  $f_c = 2$  kHz.

Calcoliamo ora il numero di bit,  $n$ , necessari alla codifica.

Fissato il valore del rapporto segnale/rumore di quantizzazione, il numero di bit,  $n$ , con cui si deve codificare ciascun campione è legato a  $(S/N_q)_{\text{dB}}$  dalla seguente relazione<sup>1</sup>:

$$(S/N_q)_{\text{dB}} = 1,76 + 6,02 \cdot n$$

Imponendo il valore minimo richiesto di  $S/N_q$ , pari a 45 dB, si ricava:

$$n = (45 - 1,76)/6,02 = 7,18$$

<sup>1</sup> A rigore la relazione indicata è relativa a segnali sinusoidali.

Assumiamo quindi di effettuare la conversione analogico-digitale (A/D) utilizzando  $n = 8$  bit/campione.

La velocità di trasmissione (bit rate) risulta quindi pari a:

$$BR = f_c \cdot n = 2000 \cdot 8 = 16 \text{ kbit/s}$$

Considerando un codificatore che abbia un range di ampiezza pari all'escursione del segnale analogico, si ha che con una codifica a 8 bit l'ampiezza di un quanto è pari a:

$$q = \frac{5}{256} \cong 19,5 \text{ mV}$$

Ne consegue che, essendo la minima variazione di ampiezza apprezzabile pari a  $\frac{q}{2} \cong 9,8 \cdot 10^{-3} > 8 \cdot 10^{-3}$ , l'effetto del rumore si può considerare nullo.

#### Quesito 4

L'aumento della fedeltà del segnale ricostruito può essere ottenuto impiegando un *compressore di dinamica* in trasmissione e un *espansore* in ricezione, analogamente a quanto avviene nei sistemi di codifica PCM (*Pulse Code Modulation*).

Tramite la compressione è possibile aumentare la qualità del segnale ricostruito poiché in trasmissione si esaltano i livelli bassi della dinamica, per i quali il rapporto  $S/N_q$  è in origine peggiore, a discapito di quelli alti, che vengono compressi ma che sono in grado di sopportare un maggiore rumore di quantizzazione.

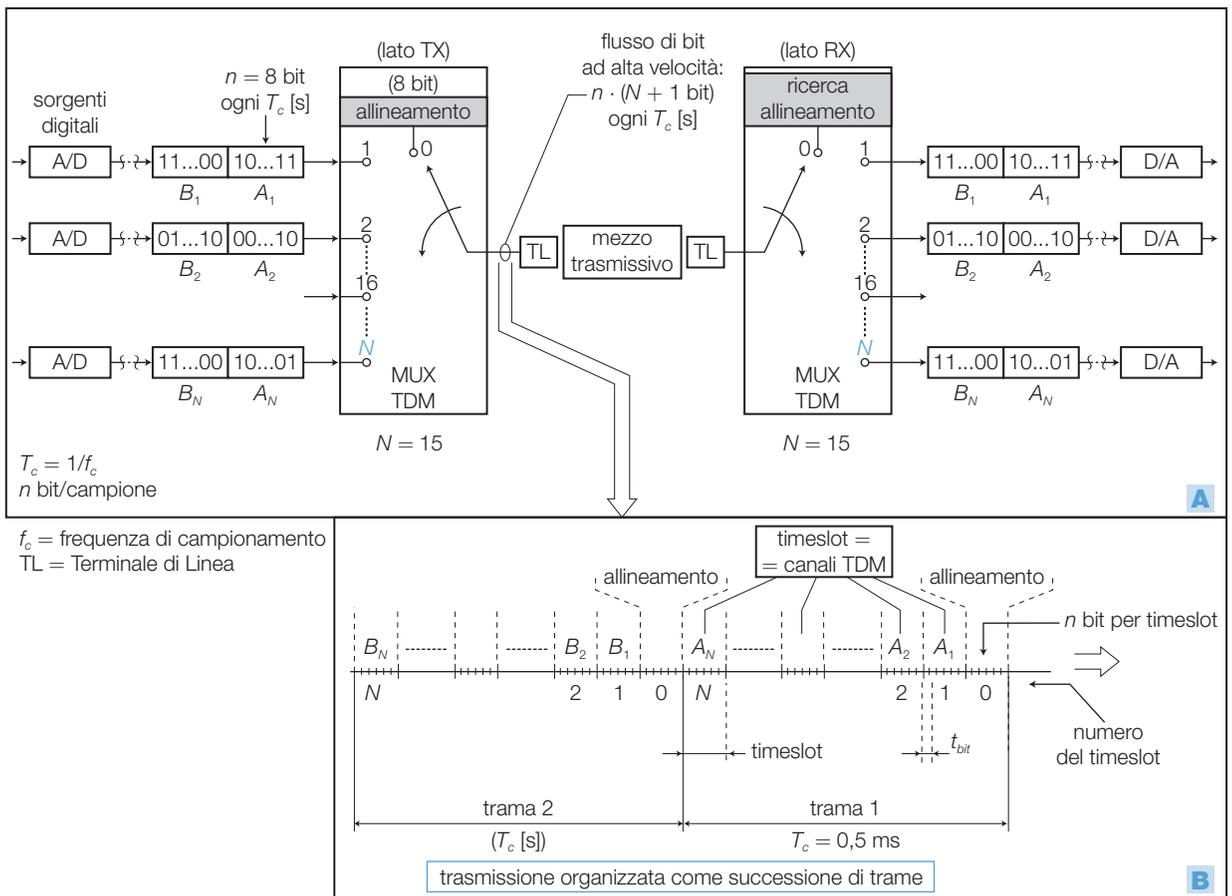
In altri termini, si opera in modo da mantenere all'incirca costante il rapporto  $S/N_q$  al variare dell'ampiezza dei campioni. Per esempio, operando in digitale si può impiegare un ADC a 12 bit/campione, con quantizzazione uniforme (migliorando così la qualità per i livelli bassi di segnale), e poi comprimere il segnale digitale impiegando una quantizzazione non uniforme che riporti a 8 i bit/campione.

Facoltativamente è possibile illustrare la compressione con Legge A impiegata nei sistemi PCM a standard europeo.

#### Quesito 5

La tecnica di moltiplicazione TDM (*Time Division Multiplexing*, moltiplicazione a divisione di tempo) consente di trasmettere più segnali digitali su una singola linea. In linea di principio il moltiplicatore TDM riceve in ingresso  $N$  segnali digitali a bassa velocità, li bufferizza e li trasmette sequenzialmente in linea prelevando in modo ciclico  $n$  bit alla volta, con velocità sufficientemente elevata in modo da non perdere informazioni (FIGURA 3, a pagina seguente).

Nell'ambito della modulazione TDM si definisce *trama* l'intervallo di tempo che comprende la trasmissione di  $n$  bit ( $n = 8$  nel caso in esame) di ciascuno degli  $N$  segnali digitali in ingresso, mentre si definisce *timeslot* l'intervallo di tempo riservato alla trasmissione degli 8 bit di un ingresso.



A

B

Poiché un singolo codificatore emette 8 bit ogni  $T_c = \frac{1}{f_c} = 0,5$  ms, per non perdere informazioni la durata della trama deve essere pari all'intervallo di campionamento  $\Delta T_{trama} = T_c = \frac{1}{f_c} = 0,5$  ms.

Poiché la velocità di trasmissione in linea è pari a 256 kbit/s, il numero massimo di segnali digitali che si possono trasmettere risulta pari a:

$$N_{segnali}^{ro} = \frac{256 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^3} = 16 \text{ (numerati da 0 a 15)}$$

Possiamo poi calcolare la durata di un timeslot ( $T_s$ ) e la durata di un bit ( $t_{bit}$ ) trasmesso in linea:

$$T_s = \frac{\Delta T_{trama}}{16} = 31,25 \text{ } \mu\text{s}; \quad t_{bit} = \frac{T_s}{8} = 3,90625 \text{ } \mu\text{s}$$

La velocità di trasmissione in linea si può anche calcolare come:

$$v_{TX} = \frac{1}{t_{bit}} = \frac{1}{3,90635 \cdot 10^{-6}} = 256 \text{ kbit/s}$$

Si può infine far notare che se si impiega il primo timeslot di ciascuna trama per inviare dei bit di servizio che consentono la sincronizzazione (allineamento) fra trasmettitore e ricevitore, come avviene nei sistemi di trasmissione PCM/TDM, il numero di segnali digitalizzati trasmissibili diventa pari a 15.

FIGURA 3 A) Principio della moltiplicazione TDM. B) Trama e timeslot.

## Quesito 6

Ampliando la trattazione ai vantaggi che offrono i sistemi di telecomunicazione che operano in digitale si possono elencare i seguenti vantaggi rispetto a un sistema analogico.

- *Maggiore immunità al rumore*: l'informazione viene trattata in termini di bit (1 e 0). In ricezione non è necessario che la forma del segnale sia uguale a quella che si aveva in trasmissione, ma è sufficiente poter distinguere senza ambiguità il livello di segnale corrispondente all'1 da quello corrispondente allo 0. Se il riconoscimento è corretto allora l'effetto del rumore e delle distorsioni è nullo. In un sistema analogico è invece necessario conservare la forma del segnale durante la trasmissione.
- Possibilità di *rigenerare* il segnale invece di amplificarlo: l'amplificazione agisce allo stesso modo sul segnale e sul rumore a esso sovrapposto per cui l'S/N in uscita da un amplificatore non migliora rispetto all'S/N in ingresso ma anzi peggiora, per via del rumore interno generato dall'amplificatore stesso; la rigenerazione invece consente di ripulire il segnale da rumore e distorsioni in quanto un rigeneratore «legge» il valore dei bit trasportati dal segnale al suo ingresso e fornisce in uscita un nuovo segnale digitale; se però il rumore e/o le distorsioni sono eccessivi il rigeneratore può interpretare in modo errato il valore dei bit e ritrasmettere dei bit errati.
- «*Intelligenza*»: grazie alla presenza di processori, le parti che compongono un sistema digitale possono essere dotate di «intelligenza» e colloquiano tra loro al fine di controllare l'andamento di una trasmissione. In particolare, si possono adottare tecniche di rivelazione e correzione degli errori che nel caso di trasmissione dati garantiscono l'assenza di errori dovuti a rumore o a distorsioni, mentre nel caso di trasmissione di segnali digitalizzati (voce, musica ecc.) consentono di ottenere una qualità molto elevata.
- *Flessibilità, efficienza, sicurezza*: i sistemi digitali operano sotto controllo software per cui è possibile ottenere un'elevata flessibilità ed efficienza sia in termini di servizi offerti agli utenti sia in termini di evoluzione delle prestazioni del sistema, ottenute spesso più che con modifiche hardware con miglioramenti (*upgrade*) del software. Inoltre il livello di sicurezza ottenibile sia per gli utenti sia per i gestori dei servizi di telecomunicazione può essere molto elevato, in quanto è possibile adottare forme di *crittografia* per rendere incomprensibili tali informazioni a persone non autorizzate.
- *Comunicazione multimediale*: poiché tutte le informazioni che vengono trattate sono digitali (dati) o digitalizzate (voce, musica, immagini, testi) per un sistema digitale non vi è alcuna differenza sostanziale tra esse e quindi è possibile integrare i servizi offerti agli utenti consentendo loro *durante uno stesso collegamento* di parlare, scambiare dati o testi, inviare immagini sia fisse sia in movimento ecc., che viene usualmente indicato con il termine *comunicazione multimediale*.
- *Comunicazione unificata*: con tecniche digitali, reti di nuova generazione e applicazioni software opportune, è anche possibile integrare in un unico terminale di utente tutte le funzioni di comunicazione, come comunicazioni audio/video, chat, posta elettronica ecc.; si realizza così ciò che va sotto il nome di *comunicazione unificata* (*unified communication*).