

## Esercizi

1) Due segnali analogici  $s(t)$  e  $g(t)$ , con pari banda base  $f_2$  e potenza media ( $P_s=P_g$ ), modulano in ampiezza, doppia banda laterale, due portanti (soppresse) in quadratura. I due segnali modulati sono sommati e trasmessi in un mezzo trasmissivo ideale. In ricezione, le oscillazioni locali dei due demodulatori coerenti sono affette da un errore di fase deterministico pari a  $\phi$  radianti. Si calcoli:

- il segnale uscente in banda base dal canale diretto (coseno),  $s_u(t)$ , e il disturbo in banda base proveniente dal canale in quadratura (dovuto al segnale  $g(t)$ );
- la densità spettrale di potenza unilatera  $N_u$  del rumore totale uscente dal canale diretto quando all'ingresso del ricevitore entra un rumore additivo bianco con densità spettrale di potenza unilatera  $N_o$ ;
- il rapporto tra la potenza media del disturbo complessivo (rumore e interferenza) e la potenza media del segnale all'uscita del ricevitore.

2) Un ricevitore per segnali modulati FM riceve due portanti (modulate da uno stesso segnale con frequenze comprese tra 0 e  $f_2$  Hz e caratterizzato dalla sua potenza media) di pari ampiezza alle quali è sommato un rumore bianco ( $N_n$ ). Le apparecchiature riceventi sono costituite da due catene distinte fino all'uscita a frequenza intermedia. Dopo è possibile sommare i segnali in due modi: (a) ciascuna portante è demodulata separatamente con un demodulatore ideale di frequenza e i segnali in banda base sono sommati in fase; (b) le portanti sono sommate in fase e il segnale somma è demodulato da un solo demodulatore di frequenza ideale. Si calcoli  $R_u$  nei due casi e si confrontino i risultati. Qual è lo schema più vantaggioso e perché?

3) Un segnale televisivo in bianco e nero ha un rapporto d'aspetto 16/9 invece di 4/3 dello standard PAL attuale, e un dettaglio spaziale metà (il doppio di punti per ciascuna dimensione). Se con rapporto d'aspetto 4/3 la banda è di 5 MHz, quanto vale con rapporto d'aspetto 16/9, se tutti gli altri parametri non cambiano rispetto all'attuale standard PAL? (Nota: non si richiede di dimostrare la formula, ma soltanto di applicarla)

4) Un ricevitore, costituito soltanto da un convertitore di frequenza in discesa e da un successivo demodulatore, ha una temperatura equivalente di rumore  $T_R=1000\text{K}$ . Si desidera migliorare la temperatura di questo semplice ricevitore inserendo, come primo stadio del nuovo ricevitore, un amplificatore a radio frequenza. A tale scopo si può scegliere tra due amplificatori con temperatura di rumore  $T_{R1}=250\text{K}$  e guadagno  $A_{d1}=10\text{ dB}$  il primo, e  $T_{R2}=300\text{K}$ ,  $A_{d2}=40\text{ dB}$  il secondo. Si scelga l'amplificatore da inserire e si calcoli il fattore di rumore del ricevitore così formato.

5) Un ricevitore, costituito soltanto da un convertitore di frequenza in discesa e da un successivo demodulatore, ha una temperatura equivalente di rumore  $T_R$ . Si desidera migliorare la temperatura di questo semplice ricevitore inserendo, come primo stadio del nuovo ricevitore, un amplificatore a radio frequenza. A tale scopo si può scegliere tra due amplificatori con temperatura di rumore  $T_{R1}$  e guadagno  $A_{d1}$  il primo, e  $T_{R2}$ ,  $A_{d2}$  il secondo. Si scriva l'espressione matematica che permette di scegliere tra i due ricevitori così completati quello con temperatura equivalente di rumore totale minima.

6) Un segnale TV in bianco e nero con frequenza di quadro 10 Hz, occupa la banda 0–230 kHz. Se tutti gli altri parametri del segnale televisivo sono identici a quelli di un segnale standard PAL, di quante linee totali è costituito un quadro televisivo?

7) Un segnale analogico di escursione  $V_{pp}$ , con frequenza massima  $f_2 = 10$  kHz, è campionato alla frequenza minima teorica, quantizzato in modo uniforme con 8 bit/campione, e trasmesso in un canale ideale che garantisce  $P(\epsilon) \leq 10^{-6}$ . Si calcoli, all'uscita del filtro ideale di ricostruzione, il rapporto (in dB) tra la potenza media del rumore *totale* e la potenza picco-picco del segnale analogico ricostruito.

8) In una trasmissione PCM, con bit equiprobabili, si modula in fase una portante producendo il segnale modulato  $m(t) = A \cos(2\pi f_0 t \pm \phi_0)$ , con  $\phi_0 = 60^\circ$ . Si disegni, nel piano dei fasori, i fasori corrispondenti ai bit 0 e 1, e si determini l'espressione dell'oscillazione locale che il demodulatore coerente deve generare affinché si rivelino in uscita i due impulsi antipodali. Si mostri che esiste una portante ortogonale non modulata e se ne determini l'ampiezza. [3]

9) Un segnale di frequenza massima  $f_2$  Hz, simmetrico rispetto allo zero, e con fattore di picco pari a 3 (rapporto tra il valore di picco,  $V_p$ , e il valore efficace,  $V_e$ ) è campionato alla frequenza minima teorica, i campioni sono quantizzati in modo uniforme, codificati con  $n$  bit. Il segnale numerico binario è trasmesso in un canale che garantisce che la probabilità d'errore sul bit non supera  $10^{-9}$ . Si determini il valore di  $n$  affinché il rapporto tra la potenza media del rumore totale all'uscita del filtro di ricostruzione del segnale e la potenza media del segnale ricostruito non superi, in pratica, –30 dB, giustificando la risposta. [3]

10) All'ingresso di un ricevitore si presenta  $s(t)$ , di trasformata  $S(f)$ , e due sue eco:  $0,5 \times s(t - \tau)$  e  $0,5 \times s(t + \tau)$  il segnale si elabora in tempo non reale). Si calcoli la trasformata di Fourier del segnale somma e si stabilisca se è una replica distorta di  $s(t)$ . In tal caso, si determini la funzione di trasferimento equivalente del sistema di trasmissione. [3]

11) Uno strumento misura una grandezza fisica con frequenza massima pari a 10 kHz, fornendo in uscita un segnale con escursione picco-picco 1 V. Il segnale è poi campionato e quantizzato in modo uniforme. Sapendo che l'errore di quantizzazione massimo non deve superare 1 mV, si determini il numero minimo di bit  $n$ , e la frequenza di cifra minima necessaria per una trasmissione in PCM. [4]

12) Un ponte radio è costituito da una prima tratta (I) formata da due collegamenti in parallelo (1 e 2), seguita da una seconda tratta (II) formata da un collegamento singolo (3). Definite le probabilità di fuori servizio (non funzionamento) dei collegamenti singoli, si calcoli la probabilità di fuori servizio del ponte radio nei seguenti casi: (a) i tre collegamenti sono fuori servizio in modo indipendente; (b) i tre collegamenti sono fuori servizio in modo disgiunto (gli eventi si escludono a vicenda).

**13.** In una trasmissione PCM con ritmo di  $f_s$  bit/s, con bit equiprobabili, si modula in fase una portante con impulsi rettangolari di durata  $T = 1/f_s$  producendo il segnale modulato

$$m(t) = A \sin(2\pi f_0 t \pm 45^\circ)$$

12.1 Si disegni, nel piano dei fasori, i fasori corrispondenti ai bit 0 e 1, e si determini l'espressione dell'oscillazione sinusoidale che l'oscillatore locale del demodulatore deve generare perché l'ampiezza uscente dal campionatore di ricezione sia massima. **[4]**

12.2. Si mostri che esiste una portante trasmessa ortogonale e se ne determini l'ampiezza. **[2]**

## PROGETTO

Dalla superficie della Luna si trasmette verso la Terra (distante circa 400.000 km) un segnale TV in bianco e nero standard ( $f_2 = 5$  MHz) modulando in frequenza una portante a 9 GHz, con un'antenna parabolica di diametro 1,37 m, efficienza 0,6. Sulla Terra è disponibile un ricevitore con temperatura di rumore,  $T_R$ , di 20 K, un demodulatore ideale FM che funziona sopra soglia se la potenza media di rumore nella banda di Carson, pari a 24 MHz, non supera 1/10 della potenza media ricevuta. L'antenna parabolica del ricevitore guadagna 60 dB e capta una temperatura di rumore,  $T_g$  non superiore a 20 K.

- 1) Si calcoli la potenza media minima da trasmettere affinché il rapporto tra la potenza media del rumore non pesato dal filtro videometrico e la potenza picco-picco (bianco-nero) del segnale all'uscita del demodulatore FM non superi -36 dB. **[7]**
- 2) Si calcoli la frequenza di cifra (bit/s) che si può trasmettere verso la Terra, con probabilità d'errore sul bit  $P(\epsilon) \leq 10^{-6}$ , nella banda di 24 MHz con uno schema QAM (di cui si deve stabilire il numero di punti, o stati), supponendo di ottenere all'ingresso del ricevitore il medesimo rapporto tra la potenza media di rumore pesato in 24 MHz e la potenza media ricevuta del caso (1). Dove sono necessari, sono disponibili filtri adattati ( $\delta=0,5$ ). **[4]**
- 3) Il canale numerico di (2) è usato per trasmettere in forma numerica compressa il segnale TV di (1) (8 bit/campione alla frequenza di Nyquist, quantizzazione uniforme; applicazione di un codice di riduzione della ridondanza). Si calcoli il fattore di compressione del segnale numerico da applicare perché la trasmissione avvenga in tempo reale. **[2]**
- 4) Nel caso della trasmissione numerica, si disegni lo schema a blocchi delle apparecchiature riceventi fino alla ricostruzione del segnale analogico, indicando le larghezze di banda nelle sezioni più significative. **[4]**

## PROGETTO

In un canale passa banda ideale di larghezza 3000 Hz, si trasmettono pagine di testi e grafici in *bianco o nero*, in forma numerica. Sapendo che:

- a) una pagina è descritta da 640.000 campioni;
- b) la probabilità d'errore sul bit non deve superare  $10^{-7}$ ;
- c) il ricevitore usa filtri adattati e al campionario si inviano impulsi di Nyquist con  $\delta = 0,5$ ;
- d) la potenza media trasmessa nel canale è pari a 20 mW, il mezzo trasmissivo attenua 108 dB,  $T_g = T_o$ ,  $F = 4$  dB.

- 1) Si scelga il numero di bit necessari per descrivere i campioni, giustificando la scelta, e si calcoli il numero di bit necessario per codificare una pagina;
- 2) Si calcoli il rapporto rumore/segnale ottenibile.
- 3) Si calcoli il numero massimo di pagine/minuto che si possono trasmettere mediante uno schema di modulazione QAM, ipotizzando di applicare una codifica di sorgente che riduca il numero di bit per pagina di 10 volte;
- 4) Si disegni lo schema a blocchi delle apparecchiature di ricezione fino alla ricostruzione di una pagina, e di ciascuna se ne spieghi succintamente lo scopo.

8) Un ponte radio è costituito da una prima tratta (I) formata da due collegamenti in parallelo (1 e 2), seguita da una seconda tratta (II) formata da un collegamento singolo (3). Definite le probabilità di fuori servizio (non funzionamento)  $p_1, p_2, p_3$  dei collegamenti singoli, si calcoli la probabilità di fuori servizio del ponte radio nei seguenti casi: (a) i tre collegamenti sono fuori servizio in modo indipendente; (b) i tre collegamenti sono fuori servizio in modo disgiunto (gli eventi si escludono a vicenda).

## Progetto

Da una sonda lontana 200 milioni di km si trasmettono verso la Terra fotografie a colori modulando una portante in QPSK a 32 GHz in un canale passa banda ideale. Ogni fotografia è formata da 800000 campioni codificati con 16 bit (8+4+4), compressi con un fattore di compressione pari a 10. L'antenna trasmittente ha un diametro di 3 m ed efficienza 0,6. Il trasmettitore è in grado di erogare una potenza media di 5 W e una potenza di picco di 25 W. Sulla Terra si usano  $n$  ricevitori posti in parallelo, con antenne di guadagno 60 dB. Le  $n$  uscite in banda base di ogni canale diretto (coseno) sono sommate in fase tra loro, così come le uscite dal canale in quadratura (seno). I segnali somma sono poi inviati ai rispettivi campionatori e decisor. Ogni antenna capta una temperatura equivalente di rumore pari a 30 K e ogni apparecchiatura di ricezione ha una temperatura di rumore pari a 30 K (tutte le sorgenti di rumore sono tra loro scorrelate). La probabilità d'errore sul bit massima tollerata è pari a  $10^{-6}$ . La propagazione avviene come in spazio libero e tutte le antenne sono puntate per il massimo guadagno.

- 1) Si calcoli il valore minimo di  $n$  e la banda occupata a radiofrequenza affinché la sonda possa inviare una fotografia ogni 10 minuti, supponendo filtri adattati in ricezione (impulsi di Nyquist con  $\delta=0,5$ ) e si codifica la trasmissione con un codice convoluzionale con distanza libera  $d_f = 10$  e tasso di codifica  $R_c = 0,5$  (si consideri il guadagno asintotico).

2) Si calcoli  $n$  quando, in (1), oltre al codice convoluzionale, si trasmettono impulsi rettangolari alla potenza di picco e si inviano al campionatore impulsi di Nyquist con  $\delta=0,5$  ( $\alpha_F = 0,7$  dB).

3) Si tracci dettagliatamente lo schema a blocchi del sistema ricevente fino alla ricostruzione di una fotografia nel caso (2).

### Progetto

Da un satellite geostazionario distante 40.000 km si trasmettono direttamente all'utente, situato casualmente in un'area, circa circolare, di 1000 km di diametro, in QPSK, a 12 GHz, in una banda a radiofrequenza pari a 24 MHz, 40 segnali musicali monofonici (ossia 20 canali musicali stereofonici) a divisione di tempo. Ogni segnale musicale è stato, all'origine, campionato a 44,1 kHz e codificato con 16 bit/campione con una legge di quantizzazione uniforme. A bordo del satellite l'amplificatore finale può erogare, in condizioni di linearità, una potenza media di 25 W, con un arretramento (*back-off*) di 4 dB dal valore di saturazione.

I ricevitori sono costituiti da un'antenna di efficienza  $\eta=0,6$  e diametro 0,8 m, un amplificatore con  $F=1$  dB e guadagno 40 dB, seguito da un convertitore ideale in discesa (non rumoroso e non attenuativo), alla frequenza intermedia di 1,4 GHz. L'uscita convertita è inviata in un cavo coassiale lungo 40 m, che attenua 0,3 dB/m (il segnale modulato può considerarsi monofrequenziale), seguito da un amplificatore a frequenza intermedia con  $F=5$  dB, demodulatore coerente dotato di filtri adattati, e circuiti per separare e ricostruire i segnali analogici. Oltre ad una propagazione come in spazio libero, si consideri un'attenuazione supplementare di 3 dB dovuta alla pioggia. Per valutare  $T_g$  si ipotizzi che questa attenuazione sia infinita (*progetto cautelativo*).

1) Si calcoli la temperatura di rumore delle apparecchiature riceventi.

2) Si verifichi se la probabilità d'errore sul bit ottenibile dalla trasmissione è minore o maggiore di quella tollerata, quest'ultima pari a  $10^{-10}$ .

3) Se il requisito sulla probabilità in (2) non è soddisfatto, è possibile modificare il progetto in due modi (alternativi), tenendo presente, in entrambi i casi, che l'area di servizio, le antenne riceventi, le apparecchiature a radiofrequenza del trasmettitore e dei ricevitori non devono cambiare:

- a) applicare una codifica di canale con un codice a blocco di  $(n, k, d) = (31, 26, 3)$ , del quale si può considerare il guadagno asintotico, verificando la possibilità di trasmettere il ritmo necessario;
- b) trasmettere dal satellite la potenza di saturazione (impulsi rettangolari antipodali), inviando ai campionatori di ricezione gli stessi impulsi di Nyquist di (2) e ipotizzando una perdita di circa 1 dB del filtro non adattato rispetto al filtro adattato di (2).

4) Si tracci, per il caso (3b) lo schema a blocchi particolareggiato del ricevitore, fino alla ricostruzione di un segnale audio stereofonico, indicando le larghezze di banda e quanto utile per comprendere lo schema.