

Appunti di Comunicazioni Elettriche

Trasmissione su cavo coassiale

Introduzione	1
Mezzi trasmissivi ad onde guidate	2
Equalizzazione su un cavo coassiale.....	2
<i>Equalizzazione passiva</i>	6
Esempio numerico: trasmissione del segnale TV bianco-nero.....	7

INTRODUZIONE

I **mezzi trasmissivi** sono i mezzi lungo i quali i segnali si propagano da una località all'altra. Visto tra i morsetti di entrata e quelli di uscita, un mezzo trasmissivo non è altro che un doppio bipolo.

Un **mezzo trasmissivo ideale** è semplicemente caratterizzato da una attenuazione costante con la frequenza e da un ritardo di fase che cresce in maniera direttamente proporzionale con la frequenza: mentre l'attenuazione non arreca un gran danno, in quanto è compensabile (almeno teoricamente) con una amplificazione¹, il ritardo non è compensabile in alcun modo. *I mezzi trasmissivi reali presentano una attenuazione ed un ritardo di fase che, nella migliore delle ipotesi, non sono costanti con la frequenza* (mentre possono esserlo in prima approssimazione col tempo, per cui parliamo di mezzi trasmissivi con caratteristiche quasi-stazionarie), il che influisce notevolmente sul progetto dei sistemi di trasmissione.

I mezzi trasmissivi si possono suddividere in due grandi classi in base al tipo di propagazione delle onde:

- **mezzi trasmissivi con onde guidate** (tutti i mezzi in rame e le fibre ottiche): questi mezzi trasmissivi, utilizzando lungo tutto il percorso una struttura appositamente costruita, hanno il grande pregio di presentare caratteristiche di trasmissione ben controllabili; il difetto è invece relativo all'attenuazione, legata alla *dissipazione di potenza nei conduttori di guida*: in particolare, tale attenuazione (espressa in unità logaritmiche e cioè in dB) cresce proporzionalmente alla distanza;
- al contrario, i **mezzi trasmissivi con onde irradiate** (costituiti semplicemente dal mezzo in cui avviene la propagazione del segnale da una antenna trasmittente verso una antenna ricevente) sono molto meno sotto il controllo dell'uomo, ma presentano, oltre al vantaggio di un costo generalmente minore, quello di una attenuazione che cresce assai più lentamente con la distanza: nello *spazio libero* si trova infatti che il rapporto tra la potenza ricevuta e la potenza trasmessa varia in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Nonostante questi mezzi non siano mantenibili sotto controllo, essi hanno in alcuni casi caratteristiche di trasmissione molto favorevoli, almeno per ciò che riguarda la costanza

¹ Bisogna però sempre fare i conti col rumore, nel senso che l'attenuazione può essere tale da portare il segnale sotto la soglia del rumore, rendendolo così indistinguibile dal rumore stesso

dell'attenuazione e del ritardo rispetto alla frequenza: questo è dovuto al fatto che presentano una *banda passante* relativamente piccola. Inoltre, essi sono generalmente gli unici adottabili nel caso di comunicazioni con veicoli o stazioni mobili.

MEZZI TRASMISSIVI AD ONDE GUIDATE

Consideriamo adesso un mezzo trasmissivo con onde guidate. Abbiamo detto prima che l'attenuazione (in dB) cresce linearmente con la distanza, per cui si ragiona in termini di **attenuazione specifica**, intesa come dB di attenuazione al Km: ad esempio, dire che un **cavo coassiale** ha una attenuazione specifica di 2 dB/Km significa che la potenza del segnale diminuisce di 2 dB per ogni km di lunghezza del cavo stesso; se il cavo è lungo 100 km, l'attenuazione complessiva è ovviamente di 200 dB.

In realtà, c'è da particolarizzare ulteriormente il concetto di attenuazione specifica, visto che essa dipende dalla frequenza: bisogna dire che un cavo coassiale ha una attenuazione specifica α_s [dB] ad una certa frequenza f_s . Nota questa informazione, è possibile calcolare l'attenuazione specifica del mezzo considerato in corrispondenza di un qualunque frequenza: infatti, si verifica che l'attenuazione specifica di un cavo coassiale dipende in modo direttamente proporzionale dalla radice quadrata della frequenza², da cui si deduce che vale la formula

$$\alpha(f) = \alpha_s \sqrt{\frac{f}{f_s}} \quad (\text{unità logaritmiche})$$

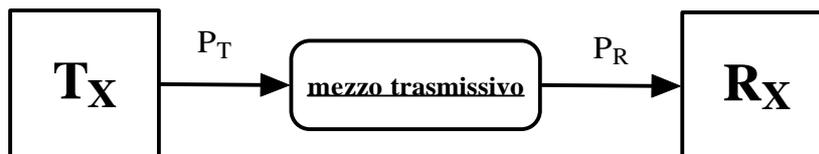
In base a questa formula, è possibile ricavare l'attenuazione specifica $\alpha(f)$ (espressa in dB) ad una qualsiasi frequenza f nota che sia l'attenuazione specifica α_s (sempre in dB) ad una qualsiasi altra frequenza f_s .

Ricordiamo infine che la dipendenza di α dalla radice quadrata della frequenza è dovuta al fatto che, all'aumentare della frequenza, risulta sempre maggiore l'*effetto Pelle*.

EQUALIZZAZIONE SU UN CAVO COASSIALE

Consideriamo un cavo coassiale di lunghezza L (in Km), avente una attenuazione specifica α a frequenza fissata: tanto per fissare le idee, supponiamo ad esempio una attenuazione specifica $\alpha = 2$ dB/Km alla frequenza di 1 MHz³.

Supponiamo che questo cavo venga utilizzato per collegare un **trasmettitore T_X** ad un **ricevitore R_X** :



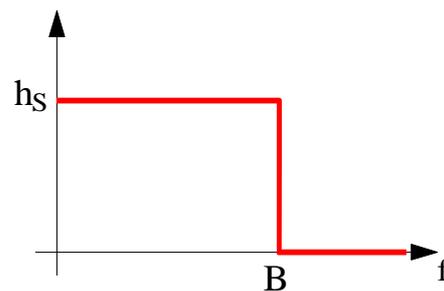
² il che significa che l'attenuazione cresce alle alte frequenze, ossia che il cavo coassiale è un tipico mezzo trasmissivo passa-basso

³ Solitamente, per indicare la frequenza cui è riferito il valore dell'attenuazione specifica, si usa il simbolo @ (chiocciolina) seguito appunto dalla frequenza: ad esempio $\alpha=2$ dB/Km @ 1MHz

Indichiamo con P_T la potenza trasmessa dal trasmettitore (cioè quella inviata al mezzo trasmissivo) e con P_R quella ricevuta dal ricevitore (ossia quella in uscita dal mezzo trasmissivo).

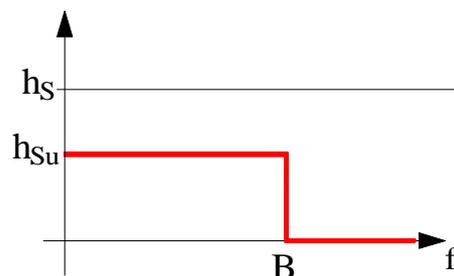
Una prima osservazione fondamentale è la seguente: se il mezzo trasmissivo è **passa-basso**, come il cavo coassiale che stiamo considerando, non è detto che la trasmissione debba avvenire mediante una qualche tecnica di *modulazione*; infatti, se il segnale da trasmettere è a sua volta passa-basso o presenta comunque la gran parte del proprio contenuto informativo alle basse frequenze, la modulazione non avrebbe senso, in quanto andremmo a traslare il segnale dalla **banda base**, nella quale il mezzo trasmissivo attenua poco, ad una banda nella quale il mezzo attenua invece molto di più. Un esempio semplice è quello di un singolo **segnale telefonico**, la cui banda va notoriamente da 300 Hz a 3400 Hz. Il discorso cambia, ovviamente, quando vogliamo trasmettere più segnali in contemporanea (ad esempio più conversazioni telefoniche): con tecniche di trasmissione analogica, il modo migliore è quello della tecnica **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*), in base al quale i vari segnali vengono allocati in frequenza su bande adiacenti (opportunamente distanziate); in questo caso, la modulazione è necessaria proprio per allocare i vari segnali in frequenza e quindi, nel progetto del sistema di trasmissione, si deve tenere presente l'attenuazione introdotta dal mezzo trasmissivo ad ogni frequenza, in modo da capire con quali distorsioni arrivi ciascun segnale al ricevitore.

Torniamo adesso allo schema a blocchi tracciato prima: vogliamo capire come il segnale trasmesso arriva il ricevitore dopo il passaggio attraverso il mezzo trasmissivo. Il modo più semplice di affrontare questo problema è quello di supporre che il segnale $s(t)$ trasmesso abbia una densità spettrale di potenza (che indichiamo con h_s) costante entro una certa banda B :

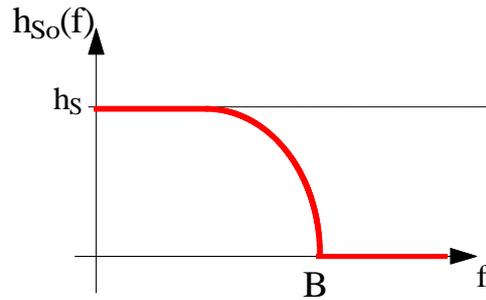


Questa ipotesi di partenza non lede assolutamente la generalità del discorso, ma lo semplifica.

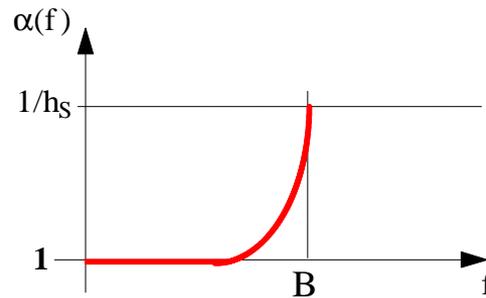
Se il mezzo trasmissivo fosse ideale, ossia con attenuazione costante in frequenza, il segnale in uscita da esso avrebbe ancora una densità spettrale di potenza costante nella banda B , ma ad un livello più basso di quello di aveva in ingresso:



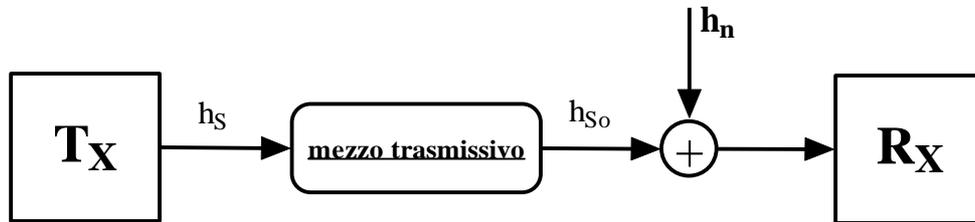
Questo, nella realtà, non avviene, perché il mezzo trasmissivo è passa-basso, per cui attenua maggiormente le alte frequenze. Ciò significa che la densità spettrale di potenza $h_{s_o}(f)$ del segnale in uscita dal mezzo trasmissivo è del tipo seguente:



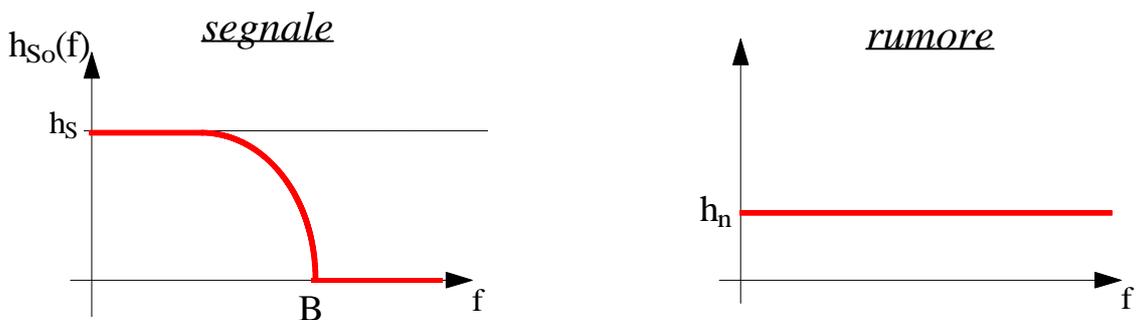
Questo diagramma è particolarmente utile in quanto, se ne facciamo il "rapporto" con il diagramma di h_s , otteniamo proprio l'andamento dell'attenuazione α (questa volta espressa in unità naturali e non più in dB) in funzione della frequenza:



Perfezioniamo adesso lo schema a blocchi del nostro sistema di trasmissione, introducendo, a valle del mezzo trasmissivo, il classico **rumore additivo gaussiano bianco** (con densità spettrale di potenza h_n) dovuto in parte alla rumorosità del mezzo stesso e in parte alla rumorosità dell'apparecchiatura:



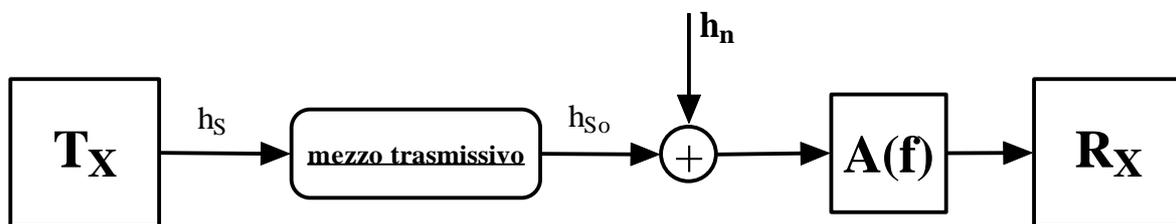
In definitiva, quindi, l'apparato ricevente riceve in ingresso un rumore con densità spettrale costante in frequenza ed un segnale la cui densità spettrale $h_{S_o}(f)$ non è più costante in frequenza, ma è stata distorta dall'attenuazione introdotta dal mezzo trasmissivo:



Il nostro obiettivo è adesso quello di riportare la densità spettrale di potenza del segnale sul valore costante h_s che aveva prima della trasmissione: solo in questo modo, infatti, il ricevitore otterrà proprio il segnale emesso dal trasmettitore, con in più, ovviamente, il rumore. L'operazione di riportare le componenti in frequenza del segnale nuovamente alla stessa potenza h_s iniziale prende il nome di **equalizzazione attiva** del mezzo trasmissivo.

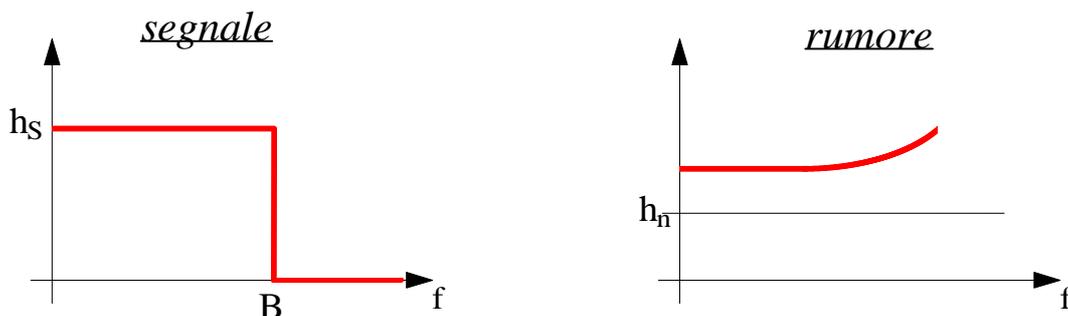
Il modo più semplice di procedere è quello di utilizzare, a monte di R_X , un amplificatore il cui **guadagno di potenza A** vari con la frequenza in modo tale da "spianare" la densità spettrale di potenza del segnale. In altre parole, **$A(f)$** dovrà essere uguale, a meno di un eventuale fattore di scala, al reciproco dell'attenuazione $\alpha(f)$ introdotta del mezzo trasmissivo: per esempio, se l'attenuazione del mezzo era del tipo $\alpha(f) = e^{-2f}$, l'amplificazione dovrà essere del tipo $A(f) = ke^{2f}$, in modo che il prodotto $A(f) \cdot \alpha(f)$ sia costante con la frequenza.

Questo procedimento è, rigorosamente, quello che si definisce di **equalizzazione attiva** del mezzo trasmissivo:



E' chiaro che dobbiamo studiare l'azione che l'amplificatore esercita sia sul segnale sia anche sul rumore. A tal fine, avendo stabilito che il guadagno dell'amplificatore è $A(f) = \frac{1}{\alpha(f)}$, è evidente che

l'azione di $A(f)$ sul rumore è quella di amplificare il rumore e in particolare le sue componenti ad alta frequenza. Il segnale che entra nel ricevitore è dunque la somma di un segnale utile e di un rumore aventi i seguenti spettri di potenza:



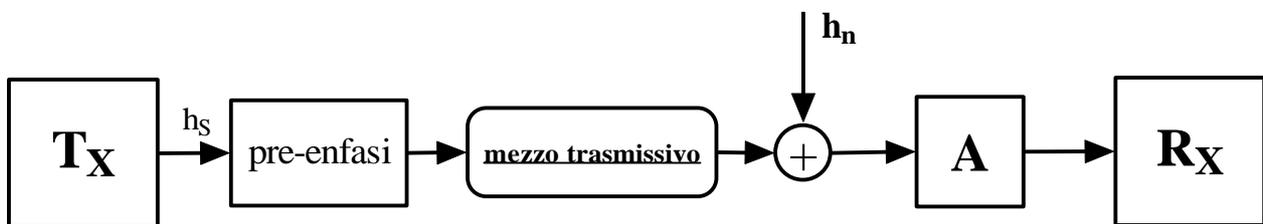
Una situazione di questo tipo, all'ingresso del ricevitore, può essere deleteria o meno a seconda del tipo di segnale che è stato trasmesso:

- nel caso di un **segnale televisivo**, per esempio, non ci sono grossi problemi, in quanto l'occhio è meno sensibile alle componenti in alta frequenza e quindi il rumore, pur essendo presente, è poco "visibile";
- al contrario, nel caso ad esempio di un **segnale telefonico multiplo**, il risultato è che i canali allocati in bassa frequenza risultano ancora abbastanza "puliti", mentre quelli allocati in alta frequenza risultano notevolmente degradati dal rumore, il che non è accettabile.

Detto in altre parole, *il rapporto segnale/rumore in ingresso al ricevitore non è costante con la frequenza*⁴.

Per ottenere un rapporto S/N costante con la frequenza, basta fare in modo che il segnale arrivi, nel punto in cui il rumore ha densità spettrale di potenza costante, con le componenti in frequenza tutte allo stesso livello. Il modo con cui realizzare questo consiste nell’elaborare in modo opportuno il segnale prima dell’invio sul mezzo trasmissivo: consideriamo una generica componente armonica, a frequenza f_k , del segnale in ingresso⁵, la quale componente, prima della trasmissione, ha un livello di potenza h_s pari a quello di tutte le altre componenti; se sappiamo che il canale attenua complessivamente questa componente di $\alpha(f_k)$ dB e vogliamo che, in uscita dal canale, la componente presenti ancora il livello h_s , ci basta elevare il livello di potenza di $\alpha(f_k)$ dB in modo da compensare l’attenuazione del canale.

In generale, quindi, basta elevare (in potenza) ciascuna componente, prima della trasmissione, della stessa quantità di cui poi sarà attenuata, in modo che, all’uscita, ciascuna componente arrivi ancora con lo stesso livello h_s di partenza. Va dunque effettuata una **preenfasi** del segnale, ossia una amplificazione delle componenti in alta frequenza prima della trasmissione:



Così facendo, sia il segnale sia il rumore in ingresso al ricevitore hanno densità spettrale di potenza piatta nella banda B e l’amplificatore da porre a valle del canale può avere dunque risposta piatta con la frequenza.

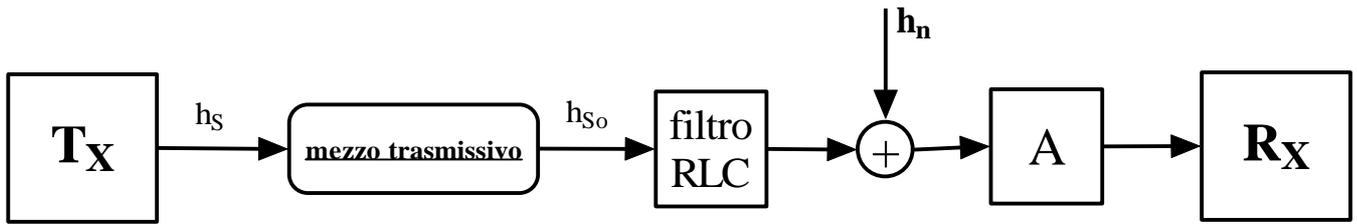
La differenza, dunque, con il caso precedente è che, mentre prima l’equalizzazione veniva compiuta dopo la trasmissione, in questo caso viene compiuta prima della trasmissione stessa. Spesso, conviene scegliere una via intermedia tra le due: pur utilizzando una pre-enfasi prima della trasmissione, si progetta un amplificatore, da porre a monte di R_X , con risposta in frequenza tale da equalizzare perfettamente il segnale.

Equalizzazione passiva

Un altro modo di procedere è quello della cosiddetta **equalizzazione passiva**, che consiste nel porre in cascata al mezzo trasmissivo un **filtro passivo** (formato cioè solo da resistenze, capacità e induttanze) passa-alto, che cioè attenui maggiormente le componenti in bassa frequenza (cioè quelle meno attenuate dal cavo) e in misura minore quelle componenti che sono già state attenuate dal cavo:

⁴ Questa “frase” potrebbe sembrare un po’ *impropria*, in quanto si è soliti considerare il rapporto segnale/rumore semplicemente come il rapporto tra la potenza totale di segnale e quella totale di rumore e nessuna di queste due quantità è, ovviamente funzione della frequenza. Tuttavia, nell’ambito del discorso che stiamo facendo, parlare di rapporto segnale/rumore variabile con la frequenza significa solo confrontare la potenza di segnale e quella di rumore non su tutta la banda di interesse, ma su vari intervalli, partendo dalla continua e salendo via via di frequenza.

⁵ Avendo a che fare con un sistema formato dalla cascata di sistemi lineari, possiamo scomporre il segnale in termini di armonica senza ledere la generalità del discorso

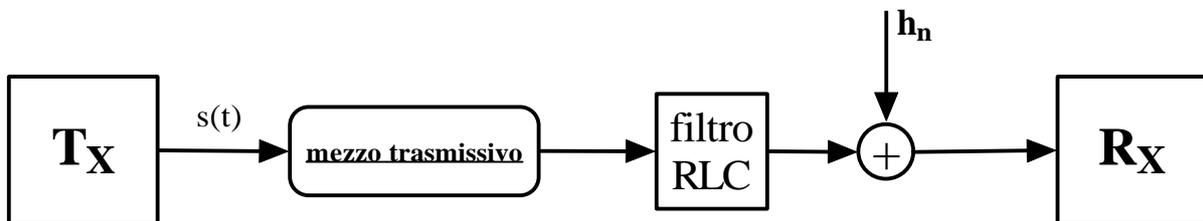


L'azione del filtro è dunque quella di abbassare la potenza delle componenti del segnale al livello posseduto dalla componente a frequenza massima: così facendo, si ottiene ancora una volta un segnale con spettro di potenza piatto, con la differenza che il livello di potenza è adesso quello (attenuato rispetto al valore iniziale h_s) della componente di massima frequenza. Al segnale così ottenuto si somma il rumore bianco e la composizione dei due segnali viene successivamente amplificata da un amplificatore con risposta armonica ancora una volta piatta.

Con un procedimento di questo tipo, la cascata tra il mezzo trasmissivo ed il filtro RLC diventa, in pratica, un unico mezzo trasmissivo, ma ideale (avente cioè una attenuazione costante con la frequenza e pari al valore corrispondente alla frequenza massima). Questo ovviamente, non avviene per tutte le frequenze, ma solo in una ristretta banda (individuata dalla composizione delle caratteristiche del mezzo trasmissivo reale e del filtro), nella quale bisognerà aver cura di “infilare” il segnale da trasmettere.

ESEMPIO NUMERICO: TRASMISSIONE DEL SEGNALE TV BIANCO-NERO

Facciamo un esempio numerico per chiarire i concetti esposti fino ad ora. Consideriamo un sistema, per la trasmissione del segnale televisivo, del tipo rappresentato in figura:



Le ipotesi di partenza sono le seguenti:

- il segnale da trasmettere è un segnale televisivo, avente perciò una banda da **5 MHz**;
- il mezzo trasmissivo è un **cavo coassiale** lungo $L=100$ Km e con una attenuazione specifica $\alpha = 2$ dB/Km @ **1 MHz**;
- le apparecchiature riceventi hanno un fattore di rumore **F=10**.

In base ai noti **requisiti di qualità** per il segnale televisivo, il nostro obiettivo è garantire in ricezione un rapporto segnale-rumore pari a **52 dBp** (52 dB pesati).

Cominciamo col ricordare che, nel caso del segnale televisivo, il rapporto segnale-rumore ha un significato abbastanza particolare: per quanto riguarda il rumore, la sua potenza è semplicemente quantificabile con il quadrato della tensione efficace di rumore; per quanto riguarda il segnale, invece, la situazione è più complessa: bisogna infatti ricordarsi che il segnale televisivo, avente una escursione picco-picco che indichiamo con V_{pp} (facendo cioè riferimento ad un segnale in tensione),

riserva solo il 70% di tale escursione alle informazioni di **luminanza**, mentre il restante 30% è riservato ai **segnali di sincronismo**. Possiamo cioè scrivere che

$$V_{PP} = (V_{PP})_{\text{sincr}} + (V_{PP})_{B/N} = 0.3V_{PP} + 0.7V_{PP} \longrightarrow (V_{PP})_{B/N} = 0.7V_{PP}$$

In base a ciò, la potenza di segnale (da usare come numeratore per il calcolo del rapporto S/N) è quella del segnale $(V_{PP})_{B/N}$ (che possiamo chiamare **tensione bianco-nero**), pari al 70% dell'escursione totale V_{PP} del segnale televisivo:

$$S = [(0.7V_{PP})^2] \cong \frac{1}{2} V_{PP}^2 = \frac{1}{2} S_{PP}$$

In base a questa relazione, la potenza di segnale da considerare è metà della **potenza di picco** S_{PP} . Nessuno ci impedisce, allora, di ragionare direttamente in termini di potenza picco: dalla relazione appena ricavata si deduce infatti che la potenza picco è $S_{PP}=2S$, per cui, volendo esprimere il rapporto S/N in termini di tale potenza, ci basterà incrementare il suddetto rapporto di 3dB: anziché richiedere un rapporto S/N di 52 dBp, dobbiamo richiedere **55 dB/p**.

Possiamo ulteriormente semplificare questo valore eliminando la **pesatura videometrica** del rumore: ricordiamo, infatti, che, per il calcolo della potenza di rumore sovrapposto al segnale televisivo, è necessario sottoporre il rumore ad un filtro (detto **filtro videometrico**) che tiene conto della diversa sensibilità dell'occhio alle varie componenti spettrali; l'effetto di tale filtro dipende dal tipo di rumore in ingresso: se tale rumore è bianco, il filtro produce su di esso una attenuazione di 8 dB, altrimenti l'attenuazione è di 16 dB. Nel nostro caso, il rumore in ingresso al ricevitore è bianco, per cui l'attenuazione da considerare è di 8 dB, il che significa, in conclusione, che il rapporto S/N da ottenere in ingresso al ricevitore è **47 dB** (cioè appunto i 55 dB pesati meno gli 8 dB di attenuazione del rumore).

Abbiamo a questo punto definito con precisione la specifica da rispettare nel nostro sistema di trasmissione. Il passo successivo è di valutare numericamente la potenza di rumore che compare nel rapporto S/N in ingresso al ricevitore: assumendo che il rumore additivo abbia la solita densità spettrale di potenza $h_n = FkT_0$ costante in frequenza e che tiene conto (tramite il fattore moltiplicativo F) anche della *rumorosità intrinseca del ricevitore*, dobbiamo semplicemente integrare sulla banda B del segnale, per cui

$$N = \int_0^B h_n df = \int_0^B FkT_n df = FkT_n B$$

Esprimendoci in dBm, abbiamo che

$$N[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \frac{FkT_n B}{1\text{mW}} = 10 \log_{10} F + 10 \log_{10} \frac{kT_n}{1\text{mW}} - 10 \log_{10} B = 10 - 174 + 67 = -97\text{dBm}$$

Avendo detto prima che si serve un rapporto S/N di 47 dB, dobbiamo garantire, in ricezione, una potenza (di picco) di segnale pari a

$$S_{PP} = -97\text{dBm} + 47\text{dBm} = -50\text{dBm}$$

Il passo successivo è dunque quello di calcolare la potenza P_T necessaria in trasmissione per ottenere, in ricezione, una potenza $S_{PP}=-50\text{dBm}$.

Andiamo allora a calcolare l'**attenuazione** introdotta dal cavo. Facciamo, in particolare, l'ipotesi di cavo sia equalizzato passivamente, per cui, in base alle considerazioni del paragrafo precedente, ci serve conoscere l'attenuazione introdotta alla frequenza massima del segnale, ossia a $B=5\text{MHz}$: applicando la formula $\alpha(f) = \alpha_s \sqrt{\frac{f}{f_s}}$, dobbiamo prendere $f=B=5\text{ MHz}$, $\alpha_s=2\text{dB/Km}$ e $f_s=1\text{MHz}$, per cui

$$\alpha(5\text{MHz}) = 2 \left(\frac{\text{dB}}{\text{Km}} \right) \cdot \sqrt{\frac{5(\text{MHz})}{1(\text{MHz})}} \cong 4.5 \left(\frac{\text{dB}}{\text{Km}} \right)$$

Abbiamo trovato che l'attenuazione specifica a 5 MHz è di 4.5 dB/Km, da cui deduciamo che l'attenuazione totale, prodotta cioè da $L=100\text{ Km}$ di cavo, è di **450 dB**.

Dato, allora, che ci servono in ricezione 50 dBm di potenza, deduciamo che la potenza da trasmettere è $P_T=400\text{dBm}$, equivalente a **10^{40}mW** . Si tratta di un valore enorme, impensabile da realizzare, ma l'esercizio svolto è comunque utile ai fini didattici. Nella pratica, al fine di ridurre la potenza da trasmettere, si ricorre ai cosiddetti **sistemi di trasmissione multitratta**.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**
 e-mail: sandry@iol.it
 sito personale: <http://users.iol.it/sandry>
 succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>