

Fondamenti di Comunicazioni Elettriche / Telecomunicazioni

Mezzo radio

Luca De Nardis luca.denardis@uniroma1.it

Sapienza Università di Roma — 27 Novembre 2024

Esercizio 1

Un satellite per comunicazioni opera a una distanza d dalla superficie terrestre. La frequenza portante è pari a $f_p = 1.62 \text{ GHz}$ e i guadagni dell'antenna trasmittente e ricevente sono entrambi pari a $G = 20 \text{ dB}$. Supponendo che l'attenuazione complessivamente introdotta dal collegamento valga $A_{dB} = 114.5 \text{ dB}$, calcolare a che distanza si trova il satellite dalla terra.

Soluzione

Ricordando che vale la relazione

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_{T_{dB}} - G_{R_{dB}},$$

sostituendo i valori forniti si ottiene:

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(1620) - 40 \Rightarrow 20 \log_{10}(d_{km}) = 114.5 - 32.4 - 64.2 + 40 = 57.9. \quad (1)$$

Risolviendo rispetto a d_{km} , si ricava:

$$d_{km} \cong 780 \text{ km}.$$

Si noti che tale distanza è quella effettivamente utilizzata dai satelliti costituenti il sistema di comunicazione Iridium.

Esercizio 2

Un sistema di trasmissione radio è caratterizzato da una potenza trasmessa pari a $W_T = 30 \text{ dBm}$. La catena di ricezione è caratterizzata da un fattore di rumore $F_{TOT} = 4 \text{ dB}$. Dopo l'operazione di demodulazione il segnale occupa le frequenze da -10 MHz a 10 MHz . Il collegamento è caratterizzato da un'antenna in trasmissione con guadagno $G_T = 18 \text{ dB}$ e da un'antenna in ricezione con guadagno $G_R = 24 \text{ dB}$. Il sistema lavora a una frequenza portante $f_p = 20 \text{ GHz}$. Si chiede di:

1. Calcolare la potenza utile ricevuta e il rapporto segnale-rumore dopo demodulazione supponendo che la distanza tra le antenne sia $d_{km} = 85 \text{ km}$.
2. Dovendo utilizzare una nuova architettura di ricezione caratterizzata da un fattore di rumore $F'_{TOT} = 6 \text{ dB}$, si calcoli la massima frequenza portante utilizzabile, a parità di tutti gli altri parametri di sistema, se si desidera garantire un rapporto segnale-rumore almeno pari a quello valutato al punto precedente.

Soluzione

1. La potenza utile ricevuta è valutabile sottraendo (in unità logaritmiche) alla potenza trasmessa il valore dell'attenuazione. Supponendo di voler esprimere la potenza cercata in dBm , la relazione di riferimento diviene:

$$W_{R_{dBm}} = W_{T_{dBm}} - A_{dB}.$$

Il valore dell'attenuazione caratterizzante il collegamento si ottiene tramite la seguente equazione:

$$A_{dB} = 32,4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_{TdB} - G_{RdB}.$$

Inserendo i dati forniti dal testo si trova

$$A_{dB} = 32,4 + 20 \log_{10}(85) + 20 \log_{10}(20000) - 18 - 24 = 115 \text{ dB}.$$

La potenza in ricezione vale dunque:

$$W_{RdBm} = 30 - 115 = -85 \text{ dBm}.$$

Per il calcolo del rapporto segnale-rumore richiesto, è necessario valutare la potenza di rumore termico in ricezione a valle dell'operazione di demodulazione. La relazione di riferimento è:

$$W_N = \frac{1}{2} k \cdot T_s \cdot B_{Rum}$$

in cui B_{Rum} coincide con l'occupazione frequenziale del segnale dopo demodulazione ed è pari dunque a 20 MHz . Supponendo, in assenza di indicazioni in proposito, che l'antenna ricevente sia caratterizzata da una temperatura pari a T_0 (temperatura standard), la precedente espressione equivale a:

$$W_N = \frac{1}{2} k \cdot T_0 \cdot F_{TOT} \cdot B_{Rum},$$

che, convertita in unità logaritmiche, diviene:

$$\begin{aligned} W_{NdBm} &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \right) + (k T_0)_{dBm/Hz} + F_{TOTdB} + 10 \log_{10}(20 \cdot 10^6) \\ &= -3 - 174 + 4 + 73 = -100 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Il rapporto segnale-rumore dopo demodulazione vale dunque:

$$SNR_{demdB} = W_{RdBm} - W_{NdBm} = 15 \text{ dB}.$$

2. La seconda architettura di ricezione è caratterizzata da un fattore di rumore complessivo superiore di $\Delta F = 2 \text{ dB}$ rispetto al precedente. Ciò equivale a dire che la potenza di rumore termico assume, in questo secondo caso, un valore pari a:

$$W'_N = W_N + 2 = -98 \text{ dBm}.$$

A parità di potenza utile ricevuta il nuovo rapporto segnale-rumore dopo demodulazione

$$SNR'_{demdB} = -85 - (-98) = 13 \text{ dB}$$

risulta inferiore al precedente. Per ottenere le stesse prestazioni valutate in presenza del primo ricevitore, è necessario disporre di una potenza utile ricevuta pari a:

$$W'_R = W_R + 2 = -83 \text{ dBm}.$$

A parità degli altri parametri caratterizzanti il sistema, ciò può essere ottenuto decrementando la frequenza portante a cui lavora il collegamento, riducendo l'attenuazione dei 2 dB necessari a garantire le prestazioni desiderate. Indicando con f'_p la nuova frequenza portante da valutare, la condizione da soddisfare è che la differenza tra la prima attenuazione calcolata (A_{dB}) e quella ottenuta nel caso si utilizzi il ricevitore a fattore di rumore più elevato (A'_{dB}) valga:

$$\Delta A = A_{dB} - A'_{dB} = 2 \text{ dB}.$$

Agendo solo sulla frequenza portante ΔA si riduce a:

$$\Delta A = 20 \log_{10}(f_p) - 20 \log_{10}(f'_p) = 2 \text{ dB},$$

da cui si ricava la condizione

$$\frac{f_p}{f'_p} = 10^{0,1} \cong 1,26.$$

La massima frequenza utilizzabile nel rispetto delle specifiche è dunque:

$$f'_p = \frac{f_p}{1,26} = 1,587 \text{ GHz}.$$

Esercizio 3

Si consideri un sistema di trasmissione radio utilizzando una frequenza portante $f_p = 10 \text{ GHz}$. I guadagni d'antenna valgono rispettivamente $G_{T_{dB}} = 25 \text{ dB}$ e $G_{R_{dB}} = 15 \text{ dB}$. Si chiede di:

1. Calcolare la distanza massima accettabile d_{max} tra le antenne trasmittente e ricevente qualora si desideri un'attenuazione non superiore a $A_{max} = 110 \text{ dB}$.
2. Calcolare la nuova distanza massima d'_{max} nel caso in cui l'antenna ricevente iniziale sia sostituita con una nuova antenna di guadagno G'_R di valore doppio rispetto a G_R .

Soluzione

1. L'attenuazione introdotta dal collegamento è valutabile tramite la seguente relazione:

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_{T_{dB}} - G_{R_{dB}}.$$

Risolvendo rispetto al termine dipendente dalla distanza caratterizzante il collegamento, si ha:

$$20 \log_{10}(d_{km}) = A_{dB} - 32.4 - 20 \log_{10}(f_{MHz}) + G_{T_{dB}} + G_{R_{dB}}.$$

Sostituendo i valori dei parametri caratterizzanti il collegamento in esame e inserendo il massimo valore tollerabile per l'attenuazione, si ottiene:

$$20 \log_{10}(d_{km}) = 110 - 32.4 - 20 \log_{10}(10000) + 40,$$

da cui si ricava

$$20 \log_{10}(d_{km}) = 37.6$$

e infine

$$d_{km} = d_{max} = 10^{\frac{37.6}{20}} = 75.85 \text{ km}.$$

2. Quando l'antenna in ricezione viene sostituita da un'antenna più prestazionale è lecito supporre che la massima distanza accettabile tra le antenne risulti maggiore. Il nuovo guadagno caratterizzante l'antenna in ricezione è doppio rispetto a quello iniziale: in decibel ciò equivale a un guadagno di 3 dB superiore al precedente, essendo $10 \log_{10}(2) = 3$. Si ha dunque

$$G'_{R_{dB}} = G_{R_{dB}} + 3 = 18 \text{ dB}.$$

La nuova distanza diviene dunque:

$$20 \log_{10}(d'_{km}) = A_{dB} - 32.4 - 20 \log_{10}(f_{MHz}) + G_{T_{dB}} + G'_{R_{dB}}.$$

Si ottiene infine:

$$d'_{km} = d'_{max} \cong 107 \text{ km}.$$

Esercizio 4

Un collegamento per segnali radio è caratterizzato da una distanza tra le antenne trasmittente e ricevente pari a $d_{km} = 75 \text{ km}$, da una frequenza portante pari a $f_p = 4 \text{ GHz}$ e da un guadagno d'antenna in trasmissione $G_T = 4 \text{ dB}$. Il segnale trasmesso è ottenuto a partire da un segnale di banda base di tipo televisivo con banda $B = 5 \text{ MHz}$ (in altri termini il segnale occupa in banda base le frequenze comprese tra -5 MHz e 5 MHz), posto in ingresso a un modulatore in Banda Laterale Doppia Portante Soppressa. La potenza trasmessa è pari a $W_T = 5 \text{ dBW}$. Il ricevitore utilizzato dal sistema presenta un fattore di rumore complessivo pari a $F_{TOT} = 4 \text{ dB}$.

Volendo garantire un rapporto segnale-rumore all'ingresso del ricevitore pari a $SNR_{RF} = 18 \text{ dB}$, calcolare il valore che deve assumere il guadagno dell'antenna in ricezione G_R se si vuole rispettare la specifica richiesta dotando il sistema di un margine $M = 3 \text{ dB}$.

Soluzione

Per valutare il necessario valore di G_R è necessario conoscere il valore dell'attenuazione introdotta dal collegamento. Conoscendo la potenza in trasmissione W_T , il valore dell'attenuazione può essere calcolato una volta nota la potenza ricevuta W_R . Il valore richiesto per SNR_{RF} e quello del margine di sistema desiderato indicano che deve essere garantito, all'ingresso del ricevitore, un rapporto segnale-rumore pari a

$$SNR_{MdB} = SNR_{RFdB} + M_{dB} = 18 + 3 = 21 \text{ dB}.$$

La potenza ricevuta necessaria al rispetto di tale specifica può essere calcolata come segue:

$$W_{RdBm} = SNR_{MdB} + W_{NdBm}.$$

Il valore della potenza di rumore termico W_N è dato, in lineare, dalla seguente espressione:

$$W_N = \frac{1}{2} k \cdot T_s \cdot B_{Rum},$$

in cui la temperatura di sistema T_s , per quanto esposto nel Capitolo 3, assume, supponendo l'antenna in ricezione alla temperatura standard T_0 , il valore $T_s = F_{TOT} \cdot T_0$, mentre B_{Rum} è pari all'occupazione frequenziale del segnale prima dell'operazione di demodulazione, ovvero 20 MHz . Volendo esprimere W_N in dBm , si ottiene:

$$\begin{aligned} W_{NdBm} &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \right) + (k T_0)_{dBm/Hz} + F_{TOTdB} + 10 \log_{10}(20 \cdot 10^6) \\ &= -3 - 174 + 4 + 73 = -100 \text{ dBm}. \end{aligned}$$

La potenza in ricezione vale dunque:

$$W_{RdBm} = SNR_{MdB} + W_{NdBm} = 21 - 100 = -79 \text{ dBm}.$$

La potenza trasmessa, espressa in dBm , assume il valore seguente:

$$W_{TdBm} = 5 + 30 = 35 \text{ dBm}.$$

L'attenuazione introdotta dal collegamento è adesso valutabile come differenza tra la potenza trasmessa e quella ricevuta:

$$A_{dB} = W_{TdBm} - W_{RdBm} = 35 - (-79) = 114 \text{ dB}.$$

Ricordando l'espressione dell'attenuazione nello spazio libero, di seguito riportata,

$$A_{dB} = 32,4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_{TdB} - G_{RdB},$$

è possibile ricavare il valore che deve assumere G_R nelle condizioni descritte:

$$G_R = -A_{dB} + 32,4 + 20 \log_{10}(75) + 20 \log_{10}(4000) - 4 \cong 24 \text{ dB}.$$

Esercizio 5

Si consideri un sistema di trasmissione radio caratterizzato da una distanza tra le antenne in trasmissione e in ricezione pari a $d = 51,3 \text{ km}$. Perché il sistema offra prestazioni soddisfacenti si richiede un rapporto segnale-rumore minimo all'ingresso del ricevitore pari ad almeno $SNR_{min_{dB}} = 15 \text{ dB}$.

Si chiede di calcolare, a parità degli altri parametri di sistema, quanto devono essere avvicinate le antenne trasmettente e ricevente per ottenere un margine $M = 10 \text{ dB}$ rispetto alle specifiche minime richieste.

Soluzione

L'introduzione di un margine pari a $M = 10 \text{ dB}$ equivale ad avere, in ricezione, un rapporto segnale-rumore di valore

$$SNR_{MdB} = SNR_{min_{dB}} + M_{dB} = 25 \text{ dB}.$$

A parità di potenza di rumore termico introdotta dal ricevitore e a parità di tutti i parametri di sistema tranne la distanza fra le antenne, ciò significa anche che la potenza utile ricevuta è aumentata di 10 dB rispetto al minimo valore in grado di garantire la specifica richiesta. Risulta infatti valida la relazione seguente:

$$SNR_{dB} = W_{R_{dBm}} - W_{N_{dBm}},$$

in cui si è scelto di esprimere la potenza ricevuta e quella di rumore in dBm , corrispettivo logaritmico del mW . Quindi la nuova potenza ricevuta in presenza del margine M può essere scritta come:

$$W_{R_M} = W_{R_{min}} + 10\text{ (dBm)}.$$

A parità di potenza trasmessa si ha dunque, in presenza di margine, un'attenuazione dovuta al canale radio inferiore di 10 dB rispetto al caso iniziale, essendo valida la relazione seguente:

$$W_{R_{M_{dBm}}} = W_{T_{dBm}} - A_{M_{dB}},$$

in cui $W_{T_{dBm}}$ rappresenta la potenza trasmessa, di valore non noto, ma fissato. Indicando con A_{dB} l'attenuazione iniziale e con $A_{M_{dB}}$ l'attenuazione in presenza di margine si ha dunque:

$$\Delta A = A_{dB} - A_{M_{dB}} = 10\text{ dB}.$$

Ricordando che il valore dell'attenuazione nello spazio libero può essere espressa come

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_{T_{dB}} - G_{R_{dB}},$$

è possibile esprimere ΔA come

$$\Delta A = 20 \log_{10}(d_1) - 20 \log_{10}(d_1 - x) = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1}{d_1 - x} \right),$$

in cui x rappresenta la riduzione di distanza necessaria tra le antenne perchè il sistema presenti un margine M . Si ottiene quindi:

$$\left(\frac{d_1}{d_1 - x} \right) = 10^{\frac{10}{20}} = 10^{\frac{1}{2}} = 3,16.$$

Risolvendo l'equazione rispetto a x è possibile pervenire alla relazione seguente:

$$3,16 x = 2,16 d_1$$

da cui si ottiene

$$x = \frac{2,16}{3,16} d_1 = 35\text{ km}.$$

Le due antenne devono dunque essere avvicinate di 35 km perchè il sistema in esame presenti un margine pari a $M = 10\text{ dB}$. La distanza tra le antenne in presenza di margine sarà dunque data da

$$d_2 = d_1 - 35 \cong 16\text{ km}.$$

Esercizio 6

Si supponga di dover dimensionare un collegamento radio tra un satellite geostazionario e una stazione terrestre, in cui un segnale binario, rappresentato da due livelli di tensione, viene filtrato (tramite un filtro a coseno rialzato), modulato di frequenza a $f_p = 4\text{ GHz}$ con indice di modulazione $I_f = 9$, e infine trasmesso verso terra.

Si desidera garantire un rapporto segnale-rumore dopo demodulazione pari a $SNR_{dem} = 12\text{ dB}$. Si chiede di:

1. Sapendo che la temperatura di sistema è pari a $T_s = T_0$ e che la potenza di rumore nella banda del segnale modulante è pari a $W_N = -113\text{ dBm}$ determinare la banda B del segnale modulante.
2. Determinare l'occupazione totale di banda del segnale prima della demodulazione.

3. Calcolare la minima potenza in ricezione necessaria a soddisfare le specifiche, nel caso in cui la condizione di Massimo Trasferimento di Potenza sia verificata in ricezione.
4. Calcolare la velocità di trasmissione del trasmettitore, supponendo di aver utilizzato un filtro a coseno rialzato con fattore di roll-off massimo.
5. Calcolare il valore dell'attenuazione di spazio libero introdotta dal collegamento nell'ipotesi che le antenne di trasmissione e ricezione abbiano guadagni rispettivamente pari a $G_T = 20 \text{ dB}$ e $G_R = 38 \text{ dB}$.

Soluzione

1. Dai valori forniti per la potenza di rumore W_N e per la temperatura di sistema T_s è possibile ricavare l'occupazione frequenziale del segnale modulante. Si ha:

$$-113 = -3 - 174 + 10 \log_{10}(B_{Rum}),$$

in cui B_{Rum} è pari a $2B$. Svolgendo i calcoli si trova:

$$10 \log_{10}(2B) = 64 \Rightarrow B = 10^{\frac{61}{10}} = 1.25 \text{ MHz}. \quad (2)$$

2. L'occupazione frequenziale complessiva per un segnale modulato di frequenza è pari a quattro volte il valore della Banda di Carson:

$$B_{TOT} = 4 B_c = 4 B (I_F + 1) = 4 \cdot 1.25 \cdot 10^6 (9 + 1) = 50 \text{ MHz}.$$

3. Dopo l'operazione di demodulazione, il rapporto segnale-rumore, nel caso di modulazione di frequenza, assume, in lineare, l'espressione:

$$SNR_{dem} = 3 I_F^2 SNR_{rif},$$

in cui SNR_{rif} rappresenta il rapporto segnale-rumore convenzionale, senza, cioè, l'effetto della modulazione. La potenza di rumore nella banda del segnale modulante vale:

$$W_N = -3 - 174 + 10 \log_{10}(2B) = -177 + 64 = -113 \text{ dBm}.$$

Avendo utilizzato uno schema di modulazione di frequenza si ha, in unità logaritmiche:

$$SNR_{dem} = 10 \log_{10}(3 I_F^2) + W_R - W_N = 12 \text{ dB}$$

da cui si ricava

$$W_R = SNR_{dem} + W_N - 10 \log_{10}(3 I_F^2) = 12 - 113 - 23.85 = -124.85 \text{ dBm}.$$

Si noti che l'alto valore dell'indice di modulazione di frequenza I_F provoca un considerevole effetto positivo sulle prestazioni del sistema in ricezione. Se si utilizzasse uno schema BLD-PS, in cui dunque si dovrebbe garantire per avere stesse prestazioni $SNR_{dem} = SNR_{rif} = 12 \text{ dB}$, la potenza necessaria in ricezione risulterebbe essere

$$W_R = -101 \text{ dBm}.$$

4. Il numero di livelli impiegato è $L = 2$. Il valore del fattore di roll-off, dovendo essere il valore massimo possibile, è $\gamma = 1$. Si ottiene dunque:

$$f_b = \frac{2B}{2} = 1.25 \text{ Mb/s}.$$

5. Essendo il satellite geostazionario, la distanza dalla superficie terrestre vale $d = 36000 \text{ km}$. Si ottiene:

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10} 36000 + 20 \log_{10} 4000 - 58 \cong 137.5 \text{ dB}.$$

Esercizio 7

Si consideri un sistema di trasmissione radio operante su una tratta lunga $d = 100 \text{ km}$. La frequenza portante utilizzata è pari a $f_p = 15 \text{ GHz}$, mentre i guadagni delle antenne trasmittente e ricevente valgono rispettivamente $G_T = 20 \text{ dB}$ e $G_R = 25 \text{ dB}$. La potenza di rumore termico all'ingresso del ricevitore ha valore $W_N = -107 \text{ dBm}$. La potenza trasmessa è pari a $W_T = -10 \text{ dBW}$. Calcolare il valore del rapporto segnale-rumore all'ingresso del ricevitore e il margine introdotto nel sistema se il valore della frequenza portante passa da f_p a $f'_p = 7.5 \text{ GHz}$.

Dato il margine precedentemente calcolato, si valuti la probabilità di fuori servizio P_{fs} nel caso in cui il sistema sia affetto da un'attenuazione supplementare A_s caratterizzata dalla funzione di distribuzione seguente:

$$D_{A_{s_{dB}}}(M_{dB}) = Pr[A_{s_{dB}} \leq M_{dB}] = 1 - \frac{1}{10} 10^{-\frac{M_{dB}}{20}}.$$

Soluzione

Per calcolare il valore del rapporto segnale-rumore richiesto è necessario valutare l'attenuazione introdotta dal collegamento radio. Tale valore si ottiene applicando la relazione seguente:

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_{T_{dB}} - G_{R_{dB}},$$

inserendo le grandezze coinvolte con l'opportuna unità di misura. Si ha dunque:

$$A_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10}(100) + 20 \log_{10}(15000) - 45$$

da cui si ottiene:

$$A_{dB} = 110.9 \text{ dB}.$$

Essendo la potenza trasmessa pari a $W_T = -10 \text{ dBW} = 20 \text{ dBm}$, si ottiene il valore seguente per la potenza utile in ricezione:

$$W_{R_{dBm}} = W_{T_{dBm}} - A_{dB} = 20 - 110.9 \cong -91 \text{ dBm}.$$

Essendo noto il valore della potenza di rumore termico W_N , si ottiene per il rapporto segnale-rumore cercato:

$$SNR_{dB} = W_{R_{dBm}} - W_{N_{dBm}} = -91 - (-107) = 16 \text{ dB}.$$

Utilizzando una frequenza portante inferiore a quella iniziale, l'attenuazione complessiva introdotta dal collegamento radio diminuisce, la potenza utile ricevuta aumenta e di conseguenza diventa maggiore anche il rapporto segnale-rumore in ricezione (a parità di tutti gli altri parametri caratterizzanti il sistema). Il nuovo valore di attenuazione è dunque quello inizialmente calcolato una volta sottratta la seguente quantità:

$$\Delta A = 20 \log_{10}(f_p) - 20 \log_{10}(f'_p) = 20 \log_{10}\left(\frac{f_p}{f'_p}\right) = 20 \log_{10}(2) = 6 \text{ dB}.$$

Il margine introdotto decrementando la frequenza portante è proprio pari alla differenza tra le attenuazioni ora calcolata. Si ha dunque:

$$M_{dB} = \Delta A = 6 \text{ dB}.$$

Il margine di sistema si oppone con successo all'effetto dell'attenuazione supplementare A_s introdotta nel collegamento nei casi in cui l'entità di tale attenuazione risulta minore del margine stesso. La probabilità di fuori servizio cercata è la probabilità con cui A_s assume valore superiore a quello di M facendo sì che il sistema non riesca più a rispettare le specifiche prestazionali richieste, coincidenti, nel caso in esame, con il valore di rapporto segnale-rumore calcolato inizialmente e pari a 16 dB . Formalizzando quanto detto si ottiene:

$$P_{fs} = 1 - D_{A_{s_{dB}}}(M_{dB}) = Pr[A_{s_{dB}} \geq M_{dB}] = \frac{1}{5} 10^{-\frac{M_{dB}}{20}}.$$

Sostituendo il valore del margine M calcolato si ottiene:

$$P_{fs} = Pr[A_{s_{dB}} \geq 6 \text{ dB}] = \frac{1}{10} 10^{-\frac{6_{dB}}{20}} = 0.05.$$

Se ne deduce che il sistema non rispetta le specifiche per il 5% del tempo.