

PROBLEMA SU PONTE RADIO SATELLITARE

Si richiede il dimensionamento delle tratte di uplink e di downlink di un ponte radio numerico satellitare in banda Ku (da 11,7 GHz a 14,5 GHz), utilizzando la modulazione QPSK (4PSK), con le seguenti caratteristiche:

1) tratta di uplink:

- frequenza: $f_{up} = 14$ GHz ;
- larghezza di banda disponibile per ciascun canale: 36 MHz;
- codifica di canale con rapporto FEC (Forward Error Correction) = 3/4;
- frequenza di cifra dei bit di informazione: 54 Mbps;
- tasso di errore di bit (BER , Bit Error Rate) : 10^{-7} ;
- figura di rumore del primo stadio (LNA - Low Noise Amplifier) del ricevitore satellitare, $F_{dB\ RX} = 1,5$ dB.

2) tratta di downlink:

- frequenza $f_{down} = 12$ GHz;
- codifica di canale con rapporto FEC (Forward Error Correction) = 3/4;
- frequenza dei bit di informazione: 54 Mbps ;
- tasso di errore di bit (BER) : 10^{-7} ;
- figura di rumore del primo stadio (LNA) del ricevitore terrestre, $F_{dB} = 1$ dB.

L' allievo, tenendo presente:

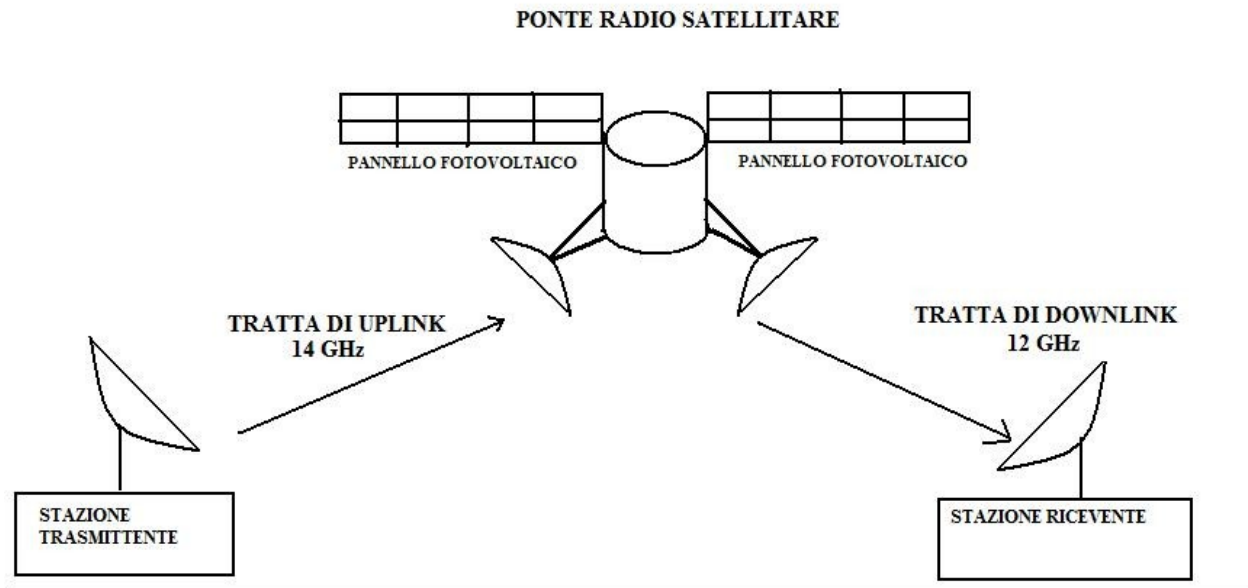
- che l'antenna parabolica ricevente a bordo del satellite ha il diametro di 2 m ed un'efficienza di 0,65;
- che l'antenna parabolica trasmittente della stazione terrestre ha il diametro di 1,5 m ed un' efficienza di 0,68;
- che l' EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) dei transponder è pari a 65 dBW ;

formulate le ipotesi aggiuntive ritenute necessarie per lo sviluppo del progetto, fornisca quanto segue:

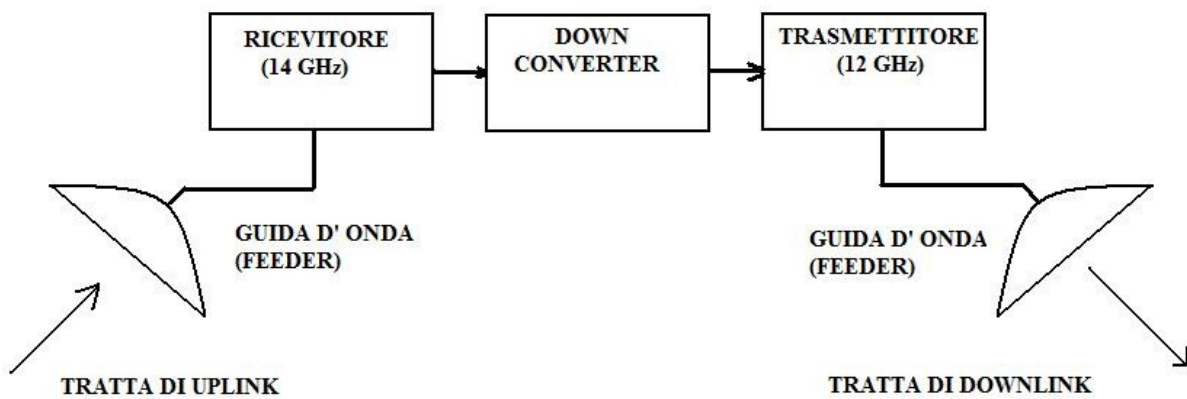
- 1) lo schema a blocchi generale del ponte radio satellitare;
- 2) il dimensionamento della tratta di uplink;
- 3) i valori dell' EIRP e della potenza del trasmettitore terrestre;
- 4) il guadagno ed il diametro dell' antenna parabolica della stazione ricevente terrestre.

SOLUZIONE

Punto 1)



**SCHEMA A BLOCCHI DEL RIPETITORE (TRANSPONDER)
INSTALLATO A BORDO DEL SATELLITE**



**SCHEMA A BLOCCHI DEL LOW NOISE BLOCK CONVERTER (LNB)
POSTO NEL FUOCO DELL' ANTENNA PARABOLICA RICEVENTE TERRESTRE**

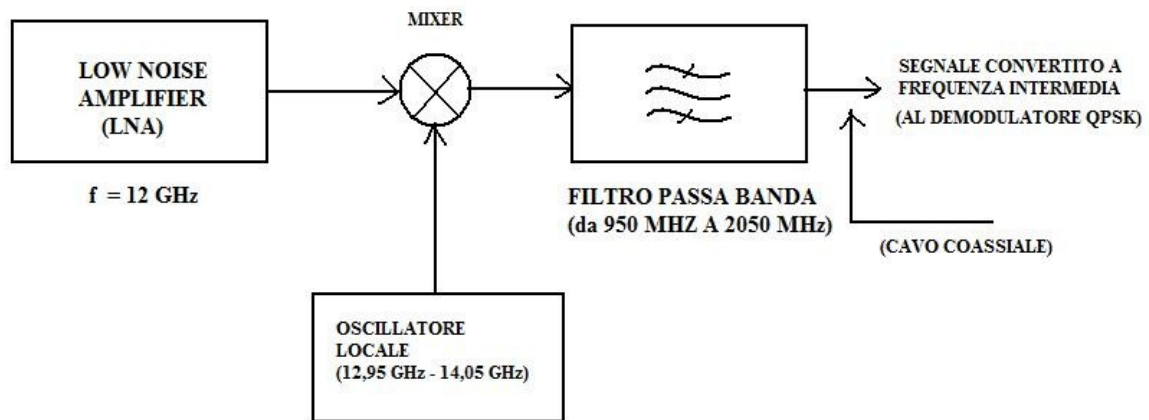


fig. 3

Struttura del ponte radio satellitare

Con riferimento alla fig. 1 notiamo che la tratta di uplink (per la trasmissione dalla stazione terrestre al transponder satellitare) utilizza una portante a 14 GHz, mentre la tratta di downlink (per la ricezione a terra dei dati ritrasmessi dal transponder satellitare) utilizza una portante a 12 GHz. Per comprendere l'esigenza di utilizzare per la tratta di uplink una frequenza maggiore di quella utilizzata per la tratta di downlink, bisogna considerare che l'attenuazione di potenza di un segnale irradiato cresce proporzionalmente al quadrato del rapporto tra la distanza trasmettitore-ricevitore (L) e la lunghezza d'onda ($\lambda = c/f$). Questa attenuazione prende il nome di attenuazione di spazio libero, e si calcola in dB con la formula: $A_{SPL} = 10 \log_{10} (4\pi L/\lambda)^2 = 10 \log_{10} (4\pi Lf/c)^2$. Per sfruttare la maggiore potenza dei trasmettitori terrestri rispetto a quella dei trasmettitori satellitari (da 50 W a 150 W) si preferisce assegnare alla tratta di uplink l'attenuazione di spazio libero maggiore, compensabile con una potenza maggiore, impiegando una lunghezza d'onda minore e quindi una frequenza più alta di quella impiegata per la tratta di downlink.

La fig. 2 mostra lo schema a blocchi del ripetitore satellitare.

L'antenna ricevente è collegata al ricevitore a 14 GHz mediante una guida d'onda (feeder), che introduce un'attenuazione di potenza compresa tra qualche frazione di dB e qualche decibel.

Il segnale QPSK con portante a 14 GHz viene convertito mediante

l'oscillatore locale del downconverter alla frequenza di 12 GHz. Viene quindi amplificato ed irradiato verso dall' antenna trasmittente, collegata al trasmettitore attraverso una guida d'onda.

Il ricevitore della stazione terrestre (LNB - Low Noise Block) (fig.3) è installato nel fuoco dell'antenna parabolica ed è costituito da un amplificatore a basso rumore (LNA - Low Noise Amplifier) , da un mixer, da un oscillatore locale e da un filtro passa banda. Il segnale QPSK a 12 GHz, dopo essere stato convertito dal mixer nella banda di frequenza intermedia (da 950 a 2050 MHz) , viene filtrato ed applicato al demodulatore QPSK, che ricostruisce i dati trasmessi.

Punto 2)

Dimensionamento della tratta di uplink

Il dimensionamento della tratta di uplink ($f = 14$ GHz) consiste nel calcolare la potenza del trasmettitore terrestre tenendo conto del tasso di errore di bit richiesto ($BER = 10^{-7} \Rightarrow$ 1 bit errato ogni dieci milioni di bit), del diametro e dell' efficienza (rendimento) delle antenne paraboliche terrestri e satellitare.

Si definiscono anzitutto i seguenti simboli, necessari per il calcolo del rapporto segnale/disturbo ($S/N = SNR$) all' ingresso del ricevitore del transponder satellitare:

E_b : energia (in Joule) associata alla ricezione di 1 bit;

S_{RX} : potenza del segnale ricevuto dall' antenna satellitare;

N_o : $N_o = kT^\circ$ (T° è la temperatura ambiente in gradi $^\circ K$ e

$k = 1,38 \times 10^{-23} J/^\circ K$ è la costante di Boltzmann) è la densità di potenza del rumore termico (o bianco, in quanto tutte le righe spettrali hanno la stessa ampiezza, indipendentemente dalla frequenza), espressa dal rapporto $N/B = kT^\circ$ tra la potenza $N = kT^\circ B$ del rumore e la larghezza di banda B del canale trasmissivo. Questo metodo facilita il dimensionamento del collegamento, in quanto il rapporto E_b/kT° non contiene la larghezza di banda B , dal cui aumento dipende la potenza del rumore termico, N ;

f_c : frequenza di cifra (bitrate o velocità di trasmissione, data dall' inverso del tempo di cifra T_c ; $f_c = 1/T_c$).

a) Calcolo del rapporto S/N in funzione del rapporto (E_b/N_o)

La relazione che lega il rapporto E_b/N_o a S/N è la seguente:

$S/N = (\text{energia/bit} \times \text{numero di bit/s}) / (\text{densità di potenza del rumore} \times$

larghezza di banda del canale) = $(E_b \times f_c) / (N_o \times B) = (E_b/N_o)(f_c/B)$.
 Consultando le tabelle che forniscono il tasso di errore di bit (BER), coincidente con la probabilità di errore, in funzione del rapporto E_b/N_o , si ricava per $(E_b/N_o)_{dB} = 10 \log_2(E_b/N_o)$ il valore di 12 dB (con la modulazione QPSK o 4PSK) per un BER di 10^{-7} , corrispondente ad un solo bit errato su 10 milioni di bit.

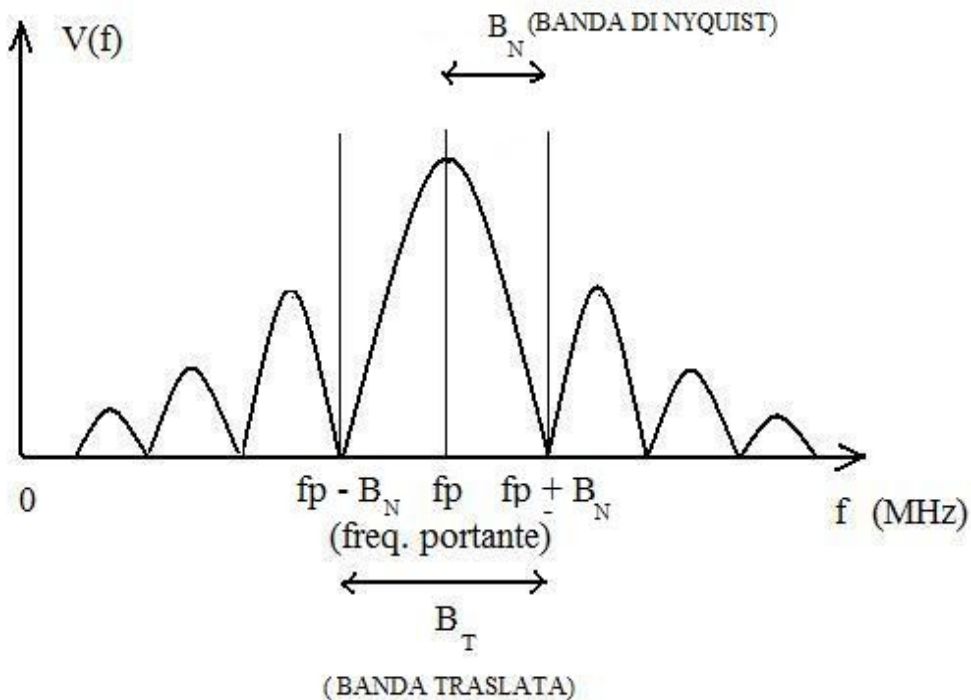
Per calcolare S/N bisogna calcolare il valore della frequenza di cifra f_c tenendo conto della **codifica di canale** con rapporto FEC (Forward Error Correction) = 3/4.

La codifica di canale consiste nell' inserire nel flusso dei bit di informazione a 54 Mbps di un certo numero di bit di controllo per consentire al ricevitore di rivelare e correggere eventuali errori di trasmissione (mediante un algoritmo di codifica e decodifica convoluzionale, che consente di correggere un bit errato tenendo conto dei bit ricevuti prima della rivelazione dell' errore) .

In questo caso viene inserito un bit di controllo ogni 3 bit di informazione; pertanto la frequenza di cifra è $f_c = 54/FEC = 54 \times 4/3 = 72$ Mbps.

Applicando al rapporto S/N la formula dei decibel di potenza, in base ai teoremi dei logaritmi e tenendo conto del valore di $B = B_T = 36$ MHz

SPETTRO DI AMPIEZZA DEL SEGNALE MODULATO



(fig. 4), si ottiene $(S/N)_{dB} = SNR$:

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= 10 \log_{10} (S/N) = 10 \log_{10} (E_b/N_o) + 10 \log_{10} (f_c/B) = \\ &= (E_b/N_o)\text{dB} + 10 \log_{10} (f_c/B) = 12 \text{ dB} + 10 \log_{10} (72 \times 10^6 / 36 \times 10^6) = \\ &= (12 + 10 \log_{10} 2) \text{ dB} = (12 + 0,301) = 12,301 \text{ dB}. \end{aligned}$$

Si sceglie di aumentare SNR di 18 dB, per garantire un sufficiente margine di affidabilità del collegamento.

Pertanto si sceglie il valore $\text{SNR} = (18 + 12,301) \text{ dB} = 30,301 \text{ dB}$.

$$S/N = 10^{30,301/10} = 1071,76.$$

Si verifica la bontà di questo valore, controllando che la capacità informativa teorica del canale sia sufficientemente maggiore del bitrate necessario (72 Mbps):

$$\begin{aligned} C \text{ (in Mbps)} &= 3,322 B \log_{10} (1 + S/N) = 3,322 \times 36 \times \log_{10} (1 + 1071,76) = \\ &= 119,592 \times 3,03 = 359,33 \text{ Mbps}. \end{aligned}$$

b) Calcolo della temperatura equivalente di rumore dell' antenna ricevente satellitare

L'antenna ricevente satellitare è caratterizzata da un' efficienza $\eta = 0,65$, che esprime il rapporto $R_R / (R_A + R_P)$ tra la resistenza R_A da cui dipende la potenza del segnale captato e che è pari alla resistenza di radiazione R_R della stessa antenna se fosse usata per irradiare potenza, e la resistenza R_P che tiene conto delle perdite resistive (ohmiche).

Entrambe le resistenze generano rumore termico (bianco, in quanto l'ampiezza delle righe dello spettro di potenza è indipendente dalla frequenza) per effetto Johnson, comportandosi come generatori di rumore con potenza $N = kBT = V_N^2 / (4R)$, dove $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ è la costante di Boltzmann, B è la larghezza di banda che si considera e V_N è il valore efficace (RMS - Root Mean Square) della tensione di rumore termico.

Poichè un generatore di segnale eroga ad un carico la potenza massima quando il resistore di carico ha un valore uguale alla resistenza interna del generatore, un generatore di rumore $V_N = \sqrt{4KTBR}$, con resistenza interna R , collegato ad un carico R , fornisce ai capi del carico una tensione $V_N / 2$ ed una potenza massima di rumore $N = [(V_N / 2)^2] / R = V_N^2 / (4R)$.

Mentre alla tensione di rumore generata dalla resistenza ohmica R_P si associano la temperatura ambiente T_o (in $^\circ\text{K}$) ed il generatore di rumore termico ambientale $V_{NRp} = \sqrt{4KT_o BR_P}$, alla resistenza R_A si associano la temperatura equivalente T_E ed il generatore di rumore $V_{NE} = \sqrt{4KT_E BR_A}$, che tiene conto del rumore termico degli oggetti posti davanti all' antenna. Bisogna precisare che la temperatura equivalente T_E non è una tempera-

tura effettiva, ma un parametro convenzionale che si considera per tenere conto del rumore termico proveniente dalla zona in cui è posta la stazione trasmittente. E' in sostanza la temperatura che dovrebbe avere un resistore per generare la potenza del rumore termico considerato.

Il parametro convenzionale che rappresenta entrambi i tipi di rumore è la temperatura d' antenna T_A , che viene fornita dalla formula:

$$T_A = (1 - \eta) T_o + \eta T_E .$$

Nel caso dell' antenna ricevente satellitare la temperatura ambiente T_o si assume pari a $(-20 + 273)^\circ\text{K} = 253 \text{ }^\circ\text{K}$ e la temperatura equivalente T_E si assume pari alla temperatura media della superficie terrestre il cui rumore termico è captato dall' antenna: $T_E = (15 + 273)^\circ\text{K} = 288 \text{ }^\circ\text{K}$.

Pertanto si ottiene $T_A = (1 - 0,65) 253 + 0,65 \times 288 = (88,55 + 187,2) \text{ }^\circ\text{K} = 275,75 \text{ }^\circ\text{K}$.

c) Calcolo della potenza del rumore e della potenza del segnale ricevuto dal trasponder satellitare

Per calcolare la potenza S_{RX} del segnale ricevuto tenendo conto del rapporto S/N scelto, bisogna calcolare la potenza del rumore termico all'ingresso del ricevitore , che è pari alla somma della potenza di rumore generata dall'antenna e della potenza di rumore generata dal ricevitore, la cui cifra di rumore è $F_{dB} = 1,5 \text{ dB}$.

La cifra di rumore del ricevitore tiene conto del rumore che si genera all' interno di esso e si può esprimere sommando all'unità il rapporto tra la temperatura equivalente di rumore T_{ERX} del ricevitore e la temperatura ambiente T_o : $F = 1 + T_{ERX}/T_o$. Viceversa, $T_{ERX} = (F - 1) T_o$.

Essendo $F_{dB} = 10 \log_{10} F = 1,5 \text{ dB}$, si ottiene $F = 10^{1,5/10} = 1,412$.

Pertanto $T_{ERX} = (F - 1) T_o = (1,412 - 1) \times 253 = 104,236 \text{ }^\circ\text{K}$. Questo significa che il ricevitore può essere considerato ideale, purchè si aggiunga al suo ingresso un generatore di rumore termico corrispondente alla temperatura di $104,236 \text{ }^\circ\text{K}$.

La temperatura di rumore del sistema antenna-ricevitore è

$$T_{A-RX} = T_A + T_{ERX} = (275,75 + 104,236) \text{ }^\circ\text{K} = 379,986 \text{ }^\circ\text{K}.$$

La potenza complessiva del rumore termico all' ingresso del ricevitore è

$$N_{RX} = kBT_{A-RX} = 1,38 \times 10^{-23} \times 36 \times 10^6 \times 379,86 = 1,887 \times 10^{-13} \text{ J}.$$

$$N_{RX} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} N_{RX} = 10 \log_{10} 1,887 \times 10^{-13} = -127,24 \text{ dBW}.$$

Calcolata la potenza $N = -127,24 \text{ dBW}$, poichè il rapporto $\text{SNR} = (S/N)$, pari a $30,301 \text{ dB}$, è dato dalla differenza $10 \log_{10} S_{RX} - 10 \log_{10} N$, si ottiene $S_{RX} \text{ (in dB)} = 10 \log_{10} S_{RX} = 10 \log_{10} N + 30,301 =$

= -127,24 dBW + 30,301 dB = - 96,939 dBW , che corrisponde a
 $S_{Rx} = 10^{-96,939/10} = 2,023 \times 10^{-10} \text{ W}$.

Punto 3)

Calcolo della potenza e dell' EIRP del trasmettitore terrestre

Per calcolare l' EIRP del trasmettitore bisogna applicare la formula dei collegamenti radio (formula di Friis) , che esprime la potenza S_{Rx} del segnale ricevuto in funzione dei seguenti parametri:

P_{Tx} potenza erogata dal trasmettitore terrestre;

G_{Tx} guadagno dell' antenna trasmittente terrestre;

A_{FTX} attenuazione del feeder (guida d'onda) dell' antenna trasmittente terrestre;

G_{Rx} guadagno dell' antenna ricevente satellitare;

A_{FRX} attenuazione del feeder (guida d'onda) dell' antenna ricevente satellitare;

$A_{SPL} = (4\pi L/\lambda)^2$ Attenuazione subita dal segnale nel percorso di lunghezza $L = 36000 \text{ km}$ (spazio libero) dal trasmettitore al ricevitore-

$$S_{Rx} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} / (A_{SPL} A_{FTX} A_{FRX})$$

Applicando i teoremi dei logaritmi si ottiene la formula di Friis in dB:

$$10 \log_{10} S_{Rx} = 10 \log_{10} P_{Tx} + 10 \log_{10} G_{Tx} + 10 \log_{10} G_{Rx} - 10 \log_{10} A_{SPL} - 10 \log_{10} A_{FTX} - 10 \log_{10} A_{FRX}$$

$$S_{Rx} \text{ (dBW)} = P_{Tx} \text{ (dBW)} + G_{Tx} \text{ (dB)} + G_{Rx} \text{ (dB)} - A_{SPL} \text{ (dB)} - A_{FTX} \text{ (dB)} - A_{FRX} \text{ (dB)}.$$

Il guadagno dell' antenna parabolica satellitare ricevente si calcola in base

al diametro $D = 2 \text{ m}$ ed, all' efficienza $\eta = 0,65$ ed alla lunghezza d'onda

relativa alla frequenza di 14 GHz: $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 14 \times 10^9 = 0,0214 \text{ m}$:

$$G_{Rx} = \eta (\pi D/\lambda)^2 = 0,65 \times (3,14 \times 2/0,0214)^2 = 0,65 \times (86117,56) = 55976,414.$$

$$G_{Rx} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} G_{Rx} = 10 \log_{10} 55976,414 = 47,48 \text{ dB}.$$

Il guadagno dell' antenna parabolica terrestre trasmittente si calcola in base

al diametro $D = 1,5 \text{ m}$, all' efficienza $\eta = 0,68$ ed alla lunghezza d'onda

relativa alla frequenza di 14 GHz: $\lambda = c/f = 0,0214 \text{ m}$:

$$G_{Tx} = \eta (\pi D/\lambda)^2 = 0,68 \times (3,14 \times 1,5/0,0214)^2 = 0,68 \times (48441,13) = 32939,968.$$

$$G_{Tx} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} G_{Tx} = 10 \log_{10} 32939,968 = 45,177 \text{ dB}.$$

L'attenuazione di spazio libero, per $L = 36000$ km, è:

$$A_{SPL} = (4\pi L/\lambda)^2 = (4 \times 3,14 \times 3,6 \times 10^7 / 0,0214)^2 = (2,113 \times 10^{10})^2 = 4,464 \times 10^{20} .$$

$$A_{SPL} (\text{dB}) = 10 \log_{10} A_{SPL} = 10 \log_{10} 4,464 \times 10^{20} = 206,497 \text{ dB}.$$

Per dimensionare correttamente il trasmettitore si suppone che le attenuazioni dei feeder di entrambe le antenne siano $A_{FTX} (\text{dB}) = A_{FTX} (\text{dB}) = 0,5$ dB; inoltre è consigliabile inserire un' ulteriore attenuazione (margine di affidabilità) $M = 5$ dB per tener conto di eventuali affievolimenti (fading) del segnale dovuti alla pioggia:

$$S_{Rx} (\text{dBW}) = P_{Tx} (\text{dBW}) + G_{Tx} (\text{dB}) + G_{Rx} (\text{dB}) - A_{SPL} (\text{dB}) - A_{FTX} (\text{dB}) - A_{FRX} (\text{dB}) - M(\text{dB}).$$

Pertanto la potenza erogata dal trasmettitore è

$$P_{Tx} (\text{dBW}) = S_{Rx} (\text{dBW}) - G_{Tx} (\text{dB}) - G_{Rx} (\text{dB}) + A_{SPL} (\text{dB}) + A_{FTX} (\text{dB}) + A_{FRX} (\text{dB}) + M(\text{dB}) =$$

$$= -96,939 \text{ dBW} - 45,177 \text{ dB} - 47,48 \text{ dB} + 206,497 \text{ dB} + 0,5 \text{ dB} + 0,5 \text{ dB} + 5 \text{ dB} = 22,901 \text{ dBW}.$$

$$P_{Tx} = 10^{22,901/10} = 195,029 \text{ W}.$$

L' EIRP in dBW si ottiene sommando a P_{Tx} (dBm) il guadagno G_{Tx} (dB):

$$EIRP (\text{dBW}) = P_{Tx} (\text{dBW}) + G_{Tx} (\text{dB}) = 22,901 \text{ dBW} + 45,177 \text{ dB} = 67,078 \text{ dBW}.$$

Punto 4)

Dimensionamento della tratta di downlink

a) Calcolo della temperatura equivalente di rumore dell' antenna ricevente terrestre

Il parametro convenzionale che rappresenta entrambi i tipi di rumore è la temperatura d' antenna T_A , che viene fornita dalla formula:

$$T_A = (1 - \eta) T_o + \eta T_E .$$

Nel caso dell' antenna ricevente terrestre la temperatura ambiente T_o si assume pari a $(17 + 273)^\circ\text{K} = 290$ °K , mentre la temperatura equivalente T_E si assume pari alla temperatura media dell' atmosfera, il cui rumore termico è captato dall' antenna: $T_E = 50$ °K.

Pertanto si ottiene

$$T_A = (1 - 0,68) 290 + 0,68 \times 50 = (92,8 + 34) ^\circ\text{K} = 126,8 ^\circ\text{K}.$$

b) Calcolo della potenza del rumore e della potenza del segnale captato dal ricevitore terrestre

Per calcolare la potenza S_{RX} del segnale ricevuto tenendo conto del rapporto S/N scelto, bisogna calcolare la potenza del rumore termico all'ingresso del ricevitore, che è pari alla somma della potenza di rumore generata dall'antenna e della potenza di rumore generata dal ricevitore, la cui cifra di rumore è $F_{dB} = 1 \text{ dB}$.

La cifra di rumore del ricevitore tiene conto del rumore che si genera all'interno di esso e si può esprimere sommando all'unità il rapporto tra la temperatura equivalente di rumore T_{ERX} del ricevitore e la temperatura ambiente T_0 : $F = 1 + T_E/T_0$. Viceversa, $T_E = (F - 1) T_0$.

Essendo $F_{dB} = 10 \log_{10} F = 1 \text{ dB}$, si ottiene $F = 10^{1/10} = 1,258$.

Pertanto $T_{ERX} = (F - 1) T_0 = (1,258 - 1) \times 290 = 74,82 \text{ °K}$. Questo significa che il ricevitore può essere considerato ideale, purchè si aggiunga al suo ingresso un generatore di rumore termico corrispondente alla temperatura di $74,82 \text{ °K}$.

La temperatura di rumore del sistema antenna-ricevitore è

$$T_{A-RX} = T_A + T_{ERX} = (126,8 + 74,82) \text{ °K} = 201,62 \text{ °K}.$$

La potenza complessiva del rumore termico all'ingresso del ricevitore è

$$N_{RX} = kBT_{A-RX} = 1,38 \times 10^{-23} \times 36 \times 10^6 \times 201,62 = 1,0016 \times 10^{-13} \text{ J}.$$

$$N_{RX} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} N_{RX} = 10 \log_{10} 1,0016 \times 10^{-13} = -129,99 \text{ dBW}.$$

Calcolata la potenza $N = -129,99 \text{ dBW}$, poichè il rapporto $SNR = (S/N)$, pari a $30,301 \text{ dB}$, è dato dalla differenza $10 \log_{10} S_{RX} - 10 \log_{10} N$, si

$$\text{ottiene } S_{RX} \text{ (in dBW)} = 10 \log_{10} S_{RX} = 10 \log_{10} N + 30,301 =$$

$$= -129,99 \text{ dBW} + 30,301 \text{ dB} = -96,689 \text{ dBW}, \text{ che corrisponde a}$$

$$S_{RX} = 10^{-96,689/10} = 2,143 \times 10^{-10} \text{ W}.$$

c) Calcolo del guadagno e del diametro dell' antenna ricevente terrestre

Essendo $f = 12 \text{ GHz}$ la frequenza relativa alla tratta di downlink, si calcola la lunghezza d'onda $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 12 \times 10^9 = 0,025 \text{ m}$.

L'attenuazione di spazio libero, per $L = 36000 \text{ km}$, è:

$$A_{SPL} = (4\pi L/\lambda)^2 = (4 \times 3,14 \times 3,6 \times 10^7 / 0,025)^2 = (1,808 \times 10^{10})^2 = 3,271 \times 10^{20}.$$

$$A_{SPL} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} A_{SPL} = 10 \log_{10} 3,271 \times 10^{20} = 205,146 \text{ dB}.$$

Considerando che l' EIRP del trasmettitore satellitare è 65 dBW ed applicando la formula del collegamento (di Friis), si ottiene:

$$S_{Rx} \text{ (dBW)} = P_{Tx} \text{ (dB)} + G_{Tx} \text{ (dB)} + G_{Rx} \text{ (dB)} - A_{SPL} \text{ (dB)} - A_{FTX} \text{ (dB)} - A_{FRX} \text{ (dB)} = EIRP + G_{Rx} \text{ (dB)} - A_{SPL} \text{ (dB)} - A_{FTX} \text{ (dB)} - A_{FRX} \text{ (dB)}.$$

Supponendo che le attenuazioni dei feeder delle antenne satellitare e terrestre siano $A_{FTX} \text{ (dB)} = A_{FTX} \text{ (dB)} = 0,5 \text{ dB}$, si ha:

$$S_{Rx} \text{ (dBW)} = EIRP + G_{Rx} \text{ (dB)} - A_{SPL} \text{ (dB)} - A_{FTX} \text{ (dB)} - A_{FRX} \text{ (dB)}.$$

$$G_{Rx} \text{ (dB)} = S_{Rx} \text{ (dBW)} - EIRP + A_{SPL} \text{ (dB)} + A_{FTX} \text{ (dB)} + A_{FRX} \text{ (dB)} = -96,689 \text{ dBW} - 65 \text{ dBW} + 205,146 \text{ dB} + 0,5 \text{ dB} + 0,5 \text{ dB} = 44,457 \text{ dB},$$

corrispondente a $G_{Rx} = 10^{44,457/10} = 27906,15$.

$$G_{Rx} = \eta ((\pi D/\lambda)^2); \quad G_{Rx} \lambda^2 = \eta \pi^2 D^2;$$

$$D = \sqrt{[G_{Rx} \lambda^2 / (\eta \pi^2)]} = (\lambda/\pi) \sqrt{(G_{Rx}/\eta)} = (0,025/3,14) \sqrt{(41038,46/0,68)} = 7,961 \times 10^{-3} \times \sqrt{60350,67} = 1,955 \text{ m}.$$