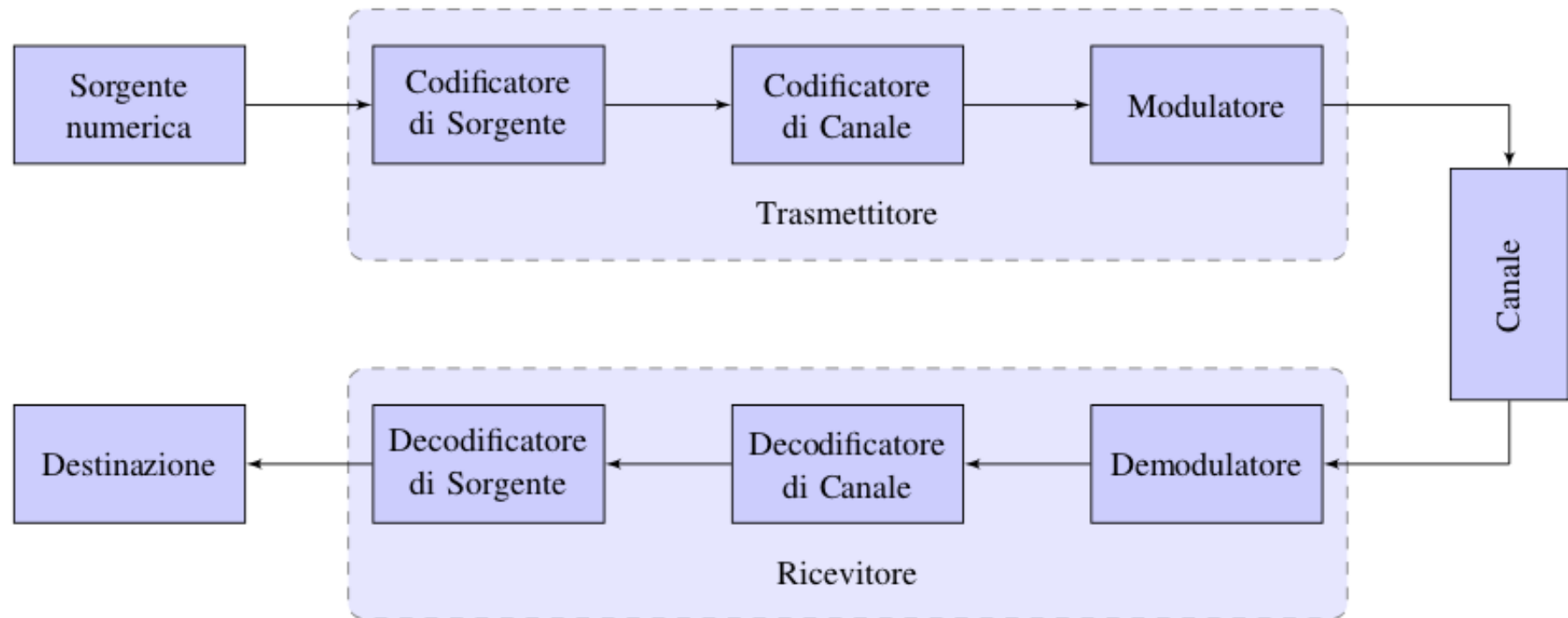
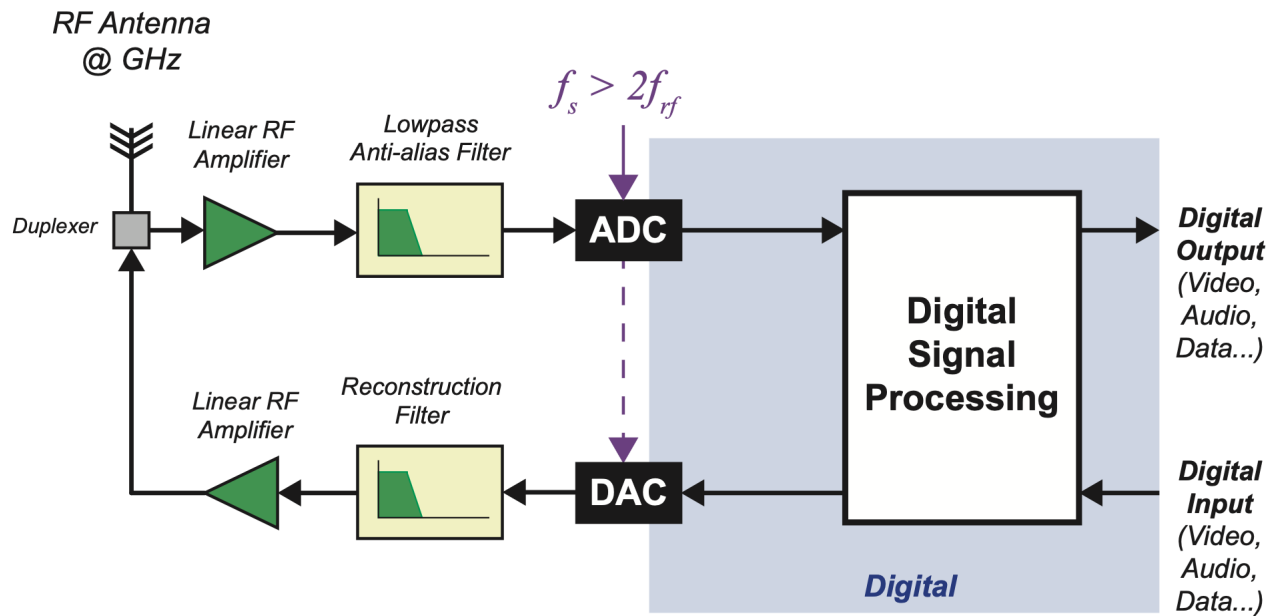


## Sistema di comunicazione numerica

*Schema generale*





**Figura:** Sistema di comunicazione realizzato con tecnologia Software Defined Radio. Si noti che, dopo la conversione A/D e fino alla riconversione D/A, l'elaborazione avviene con tecniche di signal processing.

## Sistema di comunicazione numerica

### *Segnali analogici e numerici*

► In un segnale analogico l'informazione è associata ad uno o più parametri del segnale che assumono valori in un insieme continuo: ad esempio, il segnale in uscita da un microfono è analogico in quanto esso può assumere tutti i valori appartenenti ad un determinato intervallo di ampiezze.

► L'informazione è numerica quando è associata a parametri che possono assumere solo un numero finito di valori. Ad esempio, se si considera l'informazione contenuta in una sequenza di 4 bit e si associano alle possibili configurazioni  $\{00-01-10-11\}$  le ampiezze  $\{-3A, -A, A, *3A\}$  di una forma d'onda sinusoidale si ottiene un insieme di segnali numerici. Gli ultimi 20 anni hanno visto una progressiva transizione da sistemi di trasmissione analogica a sistemi di trasmissione numerica. Le motivazioni di ciò posso essere riassunte nei seguenti punti.

1. L'informazione analogica può essere convertita in forma numerica mediante operazioni di campionamento e quantizzazione. Il processo di conversione analogico-numerica introduce una perdita di informazione che può essere resa arbitrariamente piccola o comunque determinata attraverso specifiche di progetto.
2. Sorgenti analogiche di natura diverse possono essere convertite in sequenze di bit e trasmesse simultaneamente (accesso multiplo a divisione di tempo, frequenza, codice).
3. Le operazioni realizzate in una catena di trasmissione e ricezione di un sistema di trasmissione numerica possano essere effettuate ricorrendo a sistemi di elaborazione di numerica. Questi ultimi, inoltre, sono sempre più spesso realizzati mediante hardware programmabile e riconfigurabile (DSP e FPGA) di largo consumo.
4. In presenza di rumore, i sistemi di trasmissione numerica possono essere resi di gran lunga più affidabili dei sistemi di comunicazione analogica.

### **Sorgente numerica**

*Rappresenta la fonte dell'informazione che si vuole trasmettere.*

I simboli emessi dalla sorgente possono rappresentare già da sé l'informazione in forma numerica (ad esempio, un file di dati), o provenire da una sorgente analogica che è stata convertita in forma numerica. I simboli emessi dalla sorgente appartengono, in genere, ad un alfabeto binario.

### **Codificatore di sorgente**

*Ha il compito di rappresentare la sequenza di simboli emessi della sorgente mediante una nuova sequenza di simboli avente la minima lunghezza possibile.*

Il codificatore di sorgente ha il compito di rimuovere la ridondanza presente nella sorgente di informazione, in maniera tale che questa possa essere trasmessa con la massima efficienza e senza perdita di informazione. Per chiarire le idee, supponiamo che la sorgente emetta quattro possibili simboli con probabilità di emissione differenti: i simboli (00 01 10 11) vengono emessi, rispettivamente, con probabilità ( $1/2$   $1/4$   $1/8$   $1/8$ ). Evidentemente conviene associare ai simboli 00 e 01 sequenze più brevi (0 e 10 per esempio) e ai simboli 10 e 11 sequenze più lunghe (110 e 111). Questo consente di ridurre la lunghezza media della parola codice, data dalla somma delle lunghezze delle parole codice pesate per la propria probabilità di essere emesse, che nel primo caso è pari a  $2 \times 0.5 + 2 \times 0.25 + 2 \times 0.125 + 2 \times 0.125 = 2$  e nel secondo caso a  $1 \times 0.5 + 2 \times 0.25 + 3 \times 0.125 + 3 \times 0.125 = 1.75$  (*compressione lossless*).

Quando è possibile tollerare una perdita di informazione si parla di compressione con distorsione o *lossy*. Questo tipo di compressione consente di ottenere un livello di compattazione più elevato nel caso in cui l'utente finale non può distinguere o può accettare un certo livello di degrado dell'informazione. Ciò avviene comunemente nel caso di sorgenti musicali oppure di sorgenti video.

## Codificatore di canale

*Aggiunge alla sequenza di bit in uscita al codificatore di sorgente dei bit di ridondanza al fine di rendere l'informazione meno vulnerabile agli errori che possono verificarsi durante la fase di ricezione dell'informazione effettuata alla destinazione.*

Un esempio di codifica di canale si ottiene con la semplice aggiunta di un bit di parità . Ciò aiuta ad individuare le sequenze di bit che sono affette da errori dovuti alla trasmissione del segnale sul canale. Va notato che il codificatore aggiunge una ridondanza *strutturata* e nota al ricevitore, che può quindi avvalersi di tale conoscenza per rivelare gli errori e in molti casi correggerli.

## Modulatore

*Genera una sequenza di forme d'onda con cadenza  $T$ , associando ad ognuna tra le possibili  $M = 2^k$  sequenze di  $k$  simboli binari una tra  $M$  possibili forme d'onda di durata  $T$ .*

Il modulatore è caratterizzato da alcuni parametri:

- L'intervallo di simbolo  $T$  e la frequenza di simbolo  $R$  (symbol rate), che misura il numero di simboli emessi nell'unità di tempo. Per  $k = 1$  si ha emissione di simboli binari.
- Il bit rate  $R_b$  il numero di bit al secondo emessi dalla sorgente.
- La cardinalità del modulatore  $M$ . È una potenza di 2,  $M = 2^k$ . Se  $M = 2$  il modulatore si dice binario.
- Un insieme di  $M$  forme d'onda  $\mathcal{S} = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)\}$ . Si assumerà che tali forme d'onda abbiano durata limitata  $T$ . Indicheremo con

$$\mathcal{E}_i = \int_{-\infty}^{\infty} s_i^2(t) dt = \int_0^T s_i^2(t) dt$$

l'energia associata all' $i$ -esima forma d'onda  $s_i(t)$  del modulatore.

► Una funzione biunivoca che associa a sequenze binarie di lunghezza  $k = \log_2 M$  una tra le  $M$  forme d'onda a disposizione del modulatore.

*Esempio 1*

$M = 4$ , il modulatore ha 4 forme d'onda  $s_1(t), \dots, s_4(t)$ . Si ha la seguente corrispondenza

$$00 \rightarrow s_1(t), \quad 01 \rightarrow s_2(t), \quad 10 \rightarrow s_3(t), \quad 11 \rightarrow s_4(t). \quad (1)$$

Supponendo che il codificatore di canale produca la sequenza di bit 011100, il modulatore trasmette il segnale

$$s_2(t) + s_4(t - T) + s_1(t - 2T) \quad (2)$$

N.B. Tra modulatore e canale sono presenti usualmente degli elementi aggiuntivi, quali amplificatori, convertitori a radio frequenza e, nel caso di trasmissione sul canale radio, un'antenna trasmittente.

## Up e downconversion

*Traslazione di frequenza intorno ad una frequenza centrale detta frequenza portante e viceversa.*

Per irradiare il segnale in modo efficiente è necessario che le antenne abbiano dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione da trasmettere; quindi per segnali di tipo passa-basso (ad esempio il segnale vocale la cui banda va dai 300 Hz ai 3400 Hz), occorrerebbero antenne di 100 km.

La banda passante dei dispositivi utilizzati in un sistema di comunicazione (amplificatori, filtri, canale di comunicazione, etc.) deve contenere la banda del segnale e la banda del segnale deve essere molto più piccola della frequenza portante.

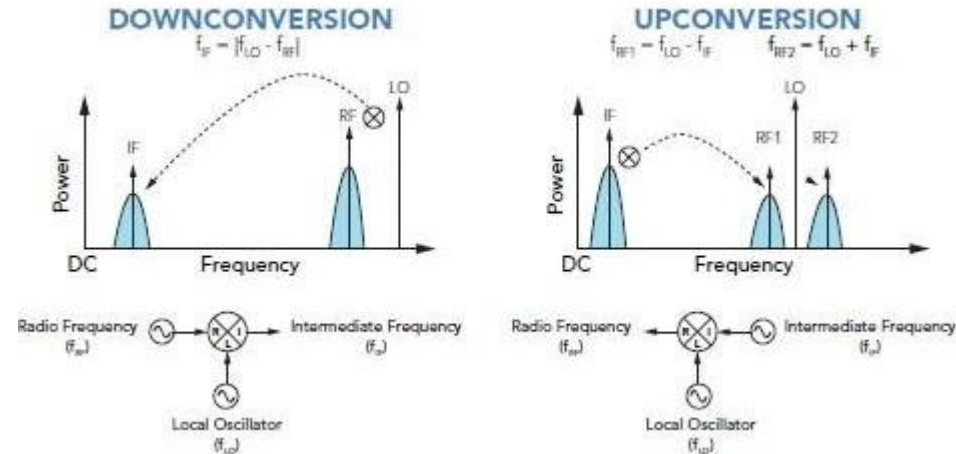


Figura 1: Down e Up conversion

## Canale di trasmissione

*Mezzo fisico che realizza il collegamento tra sorgente e destinazione*

Possiamo distinguere tra canali di tipo wireline (come la linea bifilare o intrecciata, il cavo coassiale, la guida d'onda la fibra ottica) e canali di tipo wireless (atmosfera o spazio libero).

Mezzo trasmissivo	Vantaggi	Svantaggi
Twisted pair	Poco costoso Ampiamente disponibile. Facile da installare	Lento (larghezza di banda ridotta) Soggetto a interferenze
Cavo coassiale	Maggiore larghezza di banda Poco soggetto a interferenze	Relativamente costoso e poco flessibile
Cavo in fibra ottica	Larghezza di banda molto elevata. Relativamente economico	Difficile da installare e collegare



## Canale di trasmissione wireline

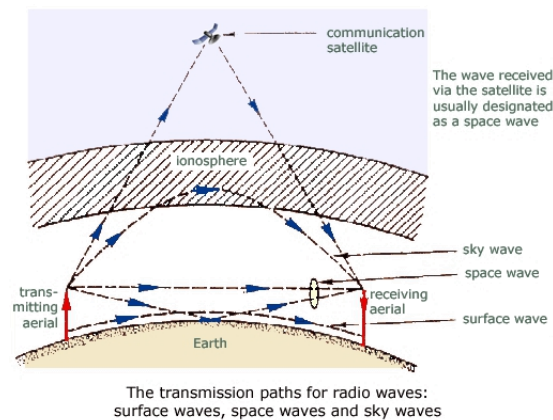
*Frequenza operativa e attenuazione*

Mezzo trasmissivo	Frequenza	attenuazione (dB/km)
Linea bifilare ( $\varnothing$ 0.3 cm)	1 kHz	0.05
Linea bifilare intrecciata	10 kHz	2
Linea bifilare intrecciata	100 kHz	3
Linea bifilare intrecciata	300 kHz	6
Cavo coassiale ( $\varnothing$ 1 cm)	100 kHz	1
Cavo coassiale ( $\varnothing$ 1 cm)	1 MHz	2
Cavo coassiale ( $\varnothing$ 1 cm)	3 MHz	4
Cavo coassiale ( $\varnothing$ 15 cm)	100 MHz	1.5
Guida d'onda	10 GHz	5
Fibra ottica	0.82 $\mu\text{m}$	3.5

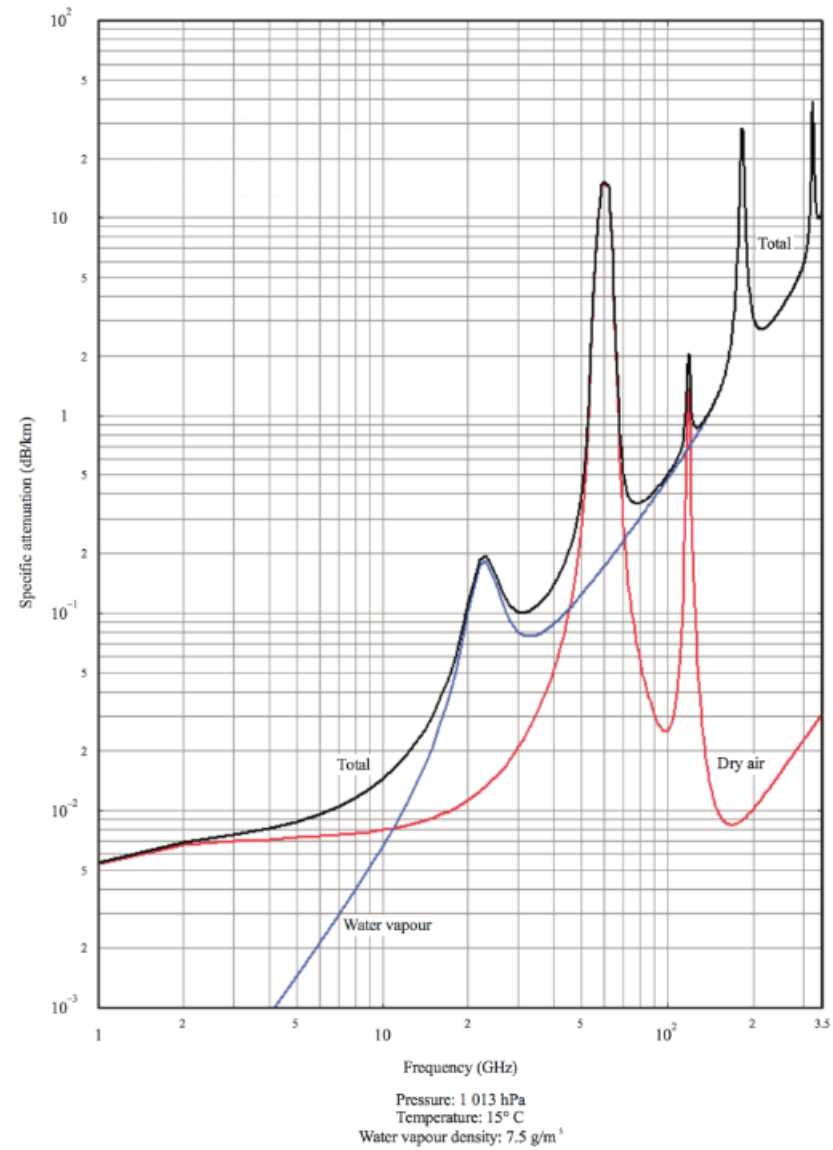
## Canale di trasmissione wireless

### *Meccanismi di propagazione*

- ▶ Propagazione ionosferica: assorbimento da parte del plasma ionizzato con collisioni e senza collisioni. Variazione dell'indice di rifrazione. Scintillazione dovuta a variazione locale della densità elettronica.
- ▶ Propagazione troposferica: scattering.
- ▶ Propagazione nel vuoto: Divergenza sferica con attenuazione quadratica con la distanza.
- ▶ Propagazione in visibilità (line of sight). Riflessione da parte del terreno.
- ▶ Propagazione indoor. Multipath.



Specific attenuation due to atmospheric gases



## Propagazione in spazio libero

### *Definizioni*

- Lunghezza d'onda nel vuoto

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m]$$

- Densità di potenza a distanza  $R$ . Il campo elettromagnetico nello spazio libero si propaga per onde sferiche. A distanza  $R$  da un punto in cui viene irradiata una potenza  $P_T$  la densità di potenza è uguale alla potenza irradiata diviso la superficie della sfera di raggio  $R$ .

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi R^2} \quad [W/m^2]$$

## Antenne

### *Definizioni*

► Guadagno di antenna. Le antenne non irradiano potenza in modo isotropico. Il guadagno di antenna è definito come

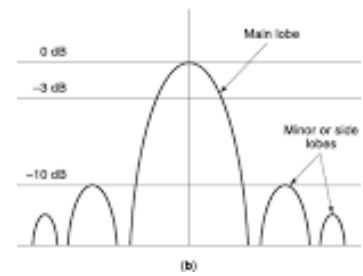
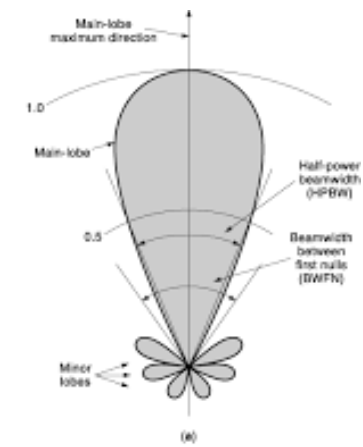
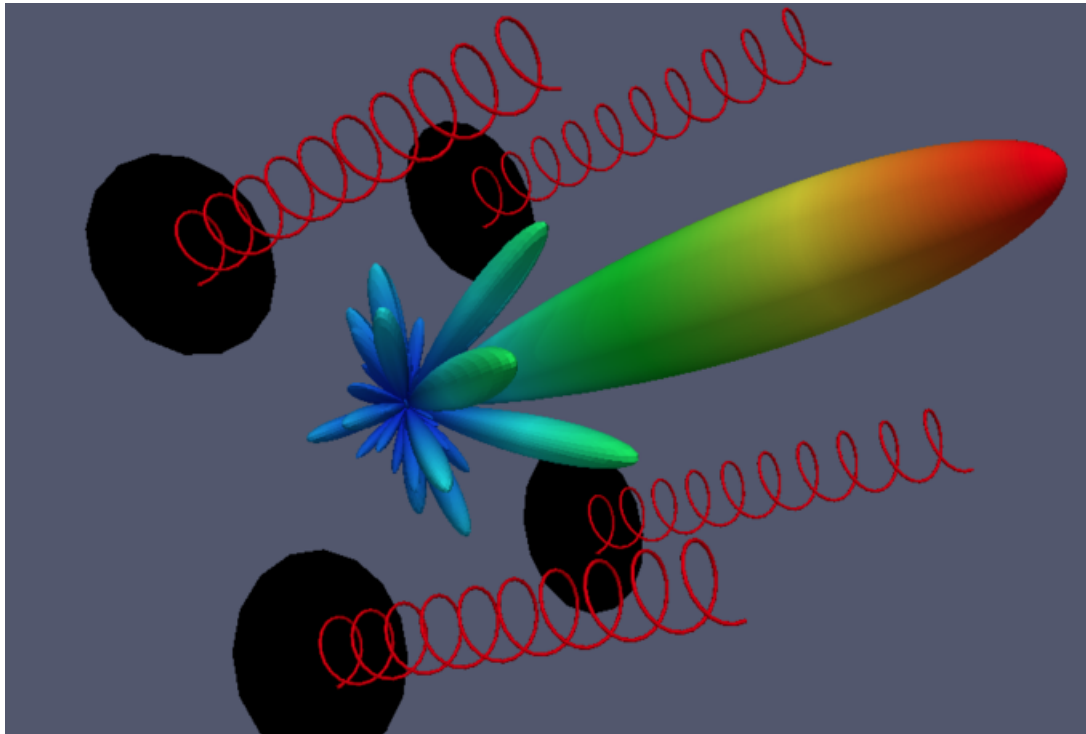
$$G = \frac{\text{Potenza irradiata per unità di angolo solido}}{\text{Potenza in ingresso per unità di angolo solido}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e(\theta, \phi)$$

dove  $A_e$  è l'area efficace dell'antenna, funzione delle coordinate polari  $\theta, \phi$ . L'area efficace indica l'area equivalente dell'antenna esposta alla densità di potenza incidente.

► Ampiezza del pattern di antenna. È l'ampiezza angolare del mainlobe dell'antenna calcolata tra i due punti simmetrici in cui la potenza irradiata è pari al 50% di quella nella direzione di massima radiazione.

► EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power). È definito come prodotto tra il guadagno dell'antenna trasmettente nella direzione di massima radiazione  $G_T$  e la potenza trasmessa.

$$\text{EIRP} = P_T G_T$$



## Link Budget

### *Definizioni e calcolo*

► La potenza ricevuta a distanza  $R$  si ottiene dal prodotto della densità di potenza e dell'area efficace dell'antenna ricevente.

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} A_e = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{4\pi R^2 4\pi} = \frac{P_T G_T G_R}{(4\pi R/\lambda)^2}$$

Esempio 2:

Il guadagno di un'antenna a parabola è dato dalla relazione

$$G = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

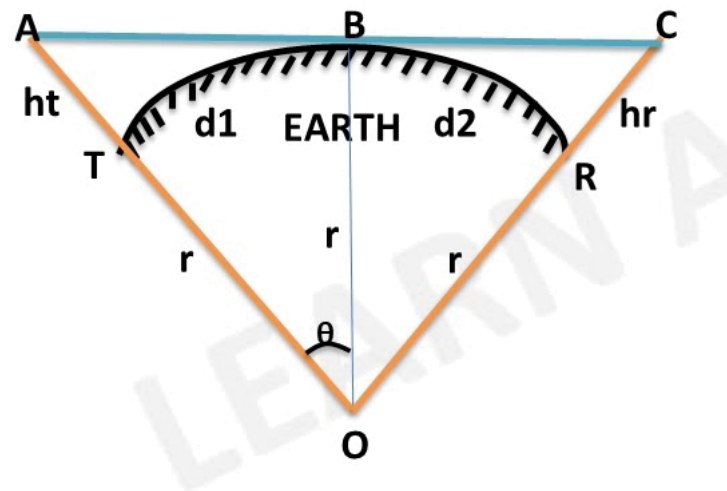
Supponiamo che  $D=1.2\text{m}$ ,  $f=7.5\text{ GHz}$ ,  $\eta=0.6$ ,  $P_T = 10\text{ W}$ . Calcoliamo la potenza ricevuta ad una distanza di  $250\text{ km}$ , supponendo una identica antenna in ricezione. Si ha

$$\lambda = c/f = 0.04\text{m}; \quad G_T = G_R = 5330; \quad P_R = \frac{10 \cdot 5330^2}{4\pi 250 \cdot 10^3 / 0.04} = 4.6 \cdot 10^{-8}\text{W}$$

Lo stesso calcolo con  $F = 7.5\text{ MHz}$  produce

$$\lambda = c/f = 40\text{m}; \quad G_T = G_R = 0.0053; \quad P_R = \frac{10 \cdot 0.0053^2}{4\pi 250 \cdot 10^3 / 40} = 4.6 \cdot 10^{-14}\text{W}$$

## Propagazione in vista (LOS) *Calcolo della distanza massima*



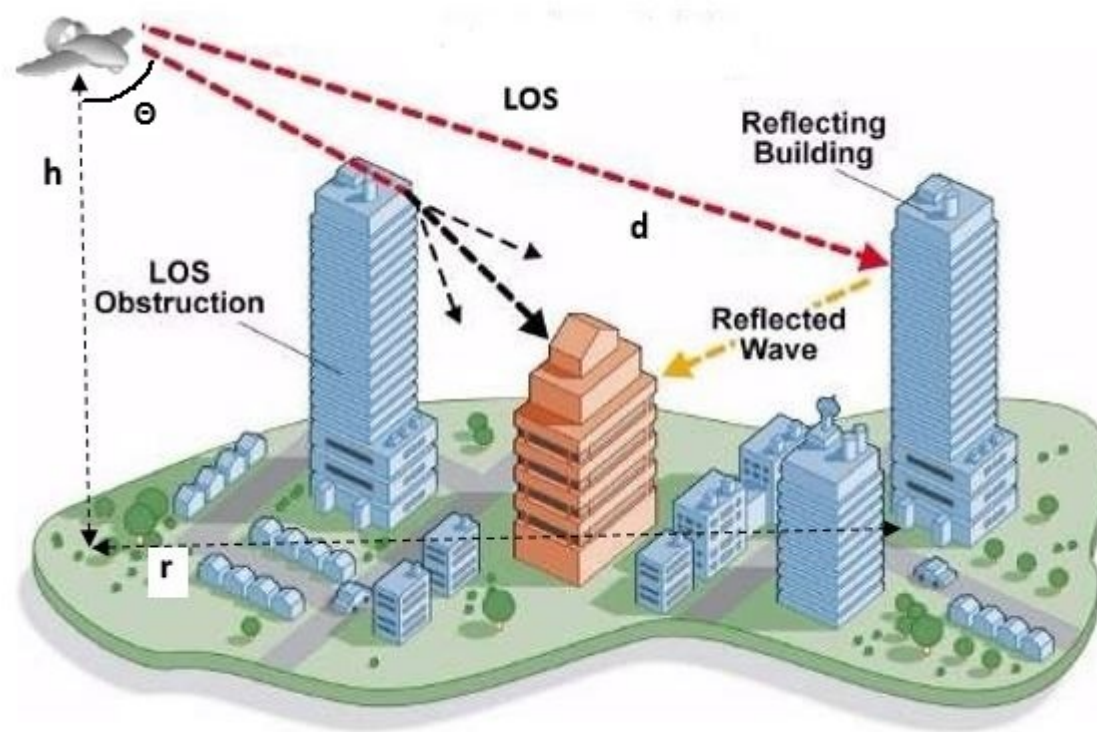
► Si ha  $d = d_1 + d_2$

$$d_1 = [(h_t + r)^2 - r^2]^{1/2} = [h_t^2 + r^2 + 2rh_t - r^2]^{1/2} = [h_t(h_t + 2r)]^{1/2} \simeq \sqrt{2rh_t}$$



## Propagazione in ambiente urbano

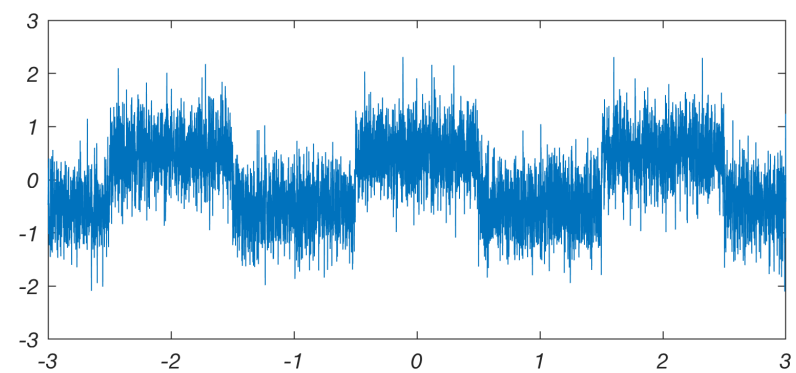
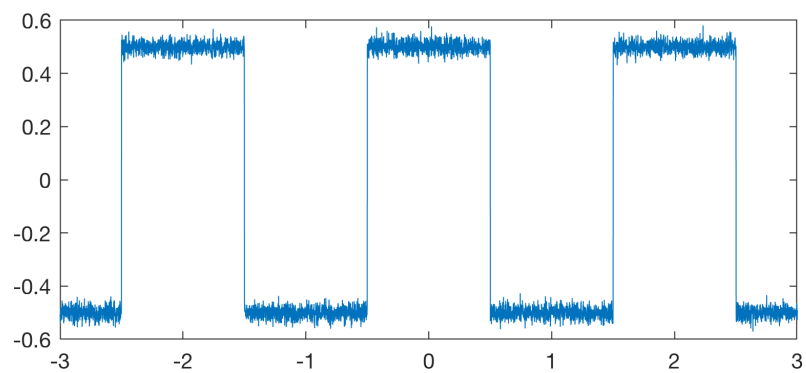
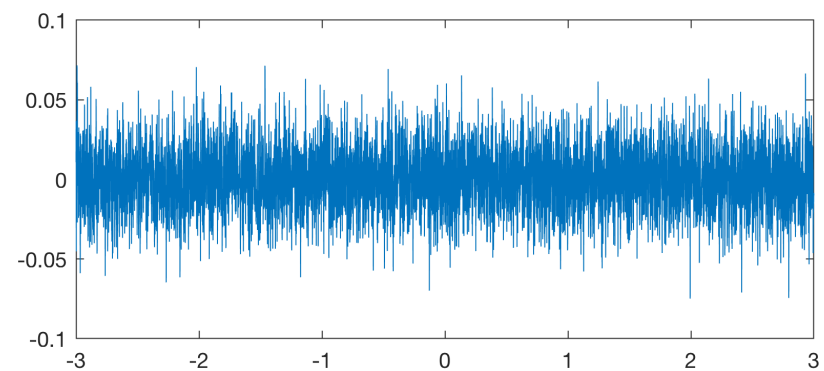
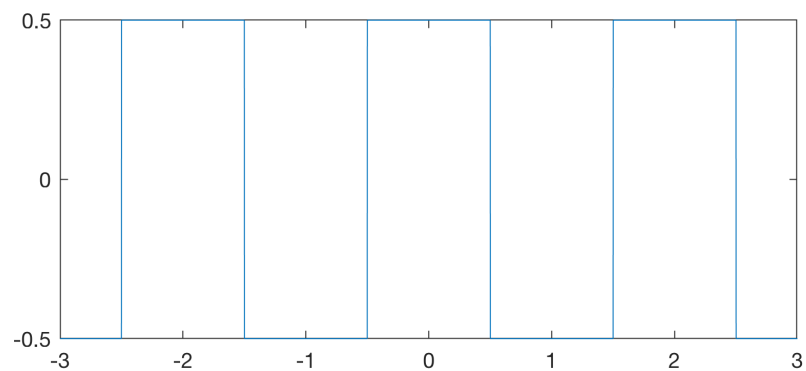
### *Multipath*



## Rumore termico

### *Definizioni*

- Il rumore termico elettrico (thermal noise) o rumore Johnson, rappresenta l'effetto, a livello macroscopico, del moto casuale dei portatori di carica in un dispositivo e interviene in qualsiasi sistema elettrico passivo che si trovi a temperatura diversa dallo zero assoluto.
- Il modello più adeguato per il rumore termico è quello di una funzione aleatoria (processo aleatorio o stocastico) la cui funzione di densità di probabilità è di tipo gaussiano (teorema centrale del limite che si applica poichè il rumore proviene dalla somma di un gran numero di contributi elementari).
- Ai terminali di un resistore di valore  $R$  a circuito aperto, si osserva una tensione  $V_n(t)$  con andamento aleatorio. Similmente, cortocircuitando i terminali del resistore, in assenza di una tensione esterna, si osserva una corrente di intensità  $I_n(t) = V_n(t)/R$ . Questo effetto fu messo in evidenza sperimentalmente da Johnson e spiegato teoricamente da Nyquist nel 1928

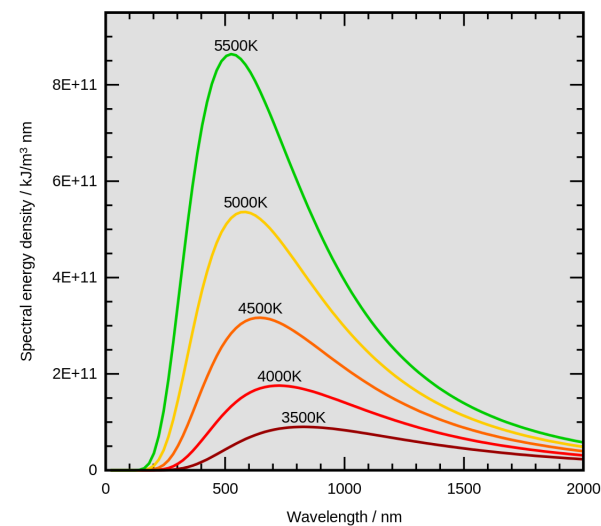
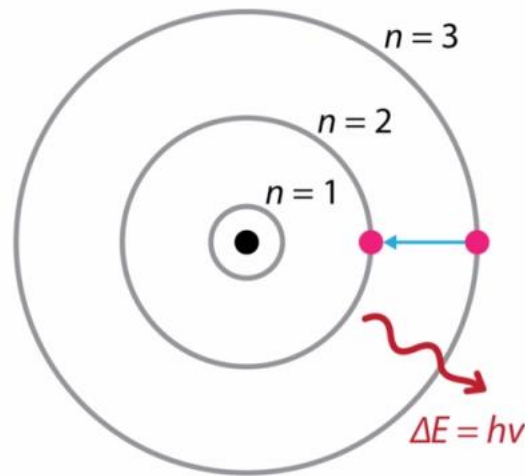


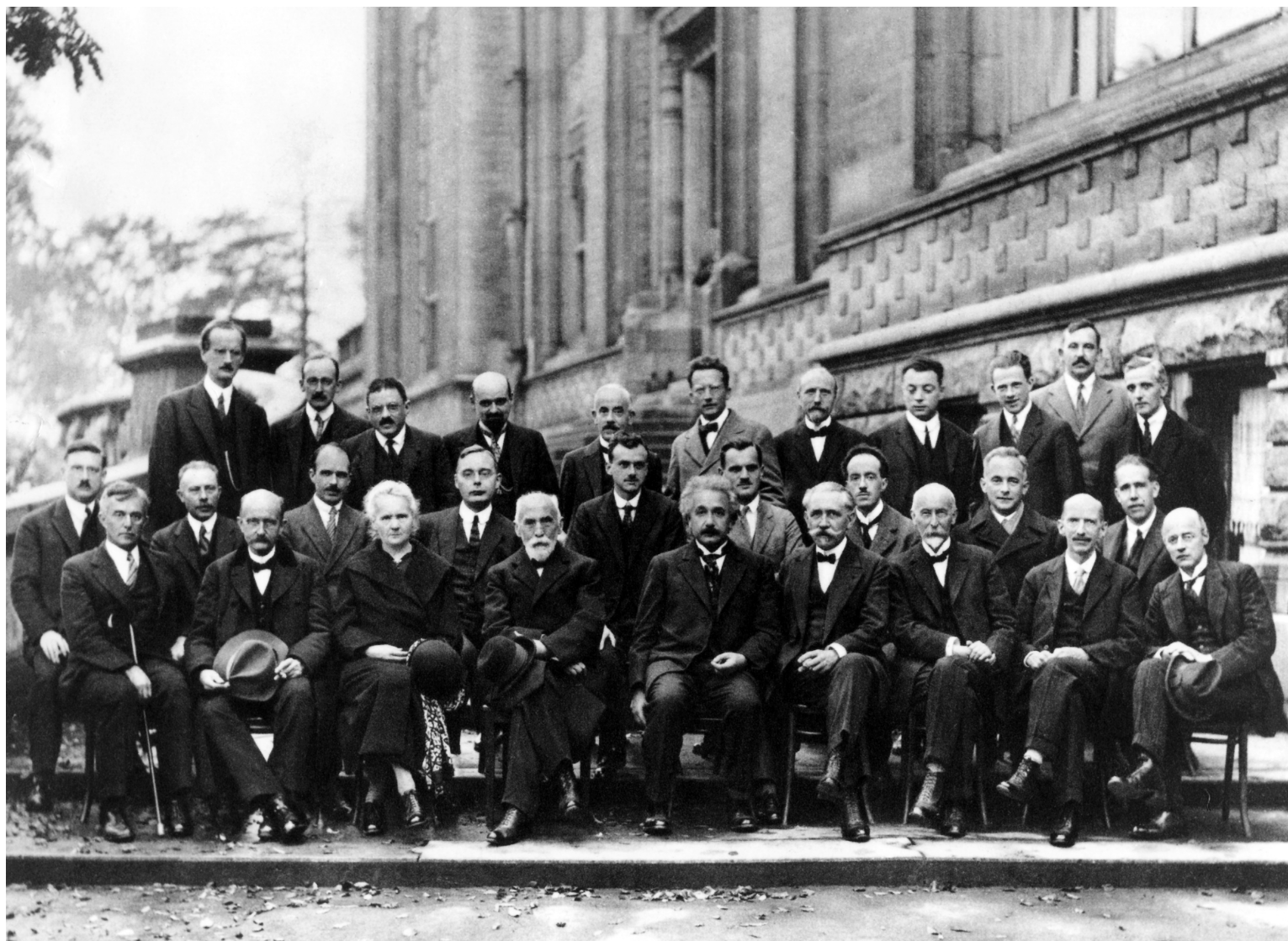
*Segnale binario bipolare (UL), rumore gaussiano (UR), segnale + rumore (DL), segnale + rumore con potenza incrementata (DR)*

► La densità spettrale di potenza del rumore termico fu ricavata da Max Planck nel 1900 attraverso la legge di radiazione (blackbody radiation). Planck ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1918 con la motivazione

*“In recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta”*

► Nell'introdurre le basi della meccanica quantistica Planck assunse che le sorgenti radianti sono atomi in stato di oscillazione e che l'energia di ogni oscillatore può assumere una serie di valori discreti ma non valori intermedi. Inoltre, nel passare da uno stato quantizzato di energia  $E_1$  ad uno stato di energia minore  $E_2$ , l'oscillatore emette una quantità di energia  $\Delta E = E_1 - E_2$  sotto forma di fotone, la cui energia è uguale al prodotto della costante  $h$  detta costante di Planck, per la frequenza della radiazione.





*Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrodinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr, Irving Langmuir, Max Planck,*

## Densità Spettrale di Potenza (PSD) del rumore termico

► In condizioni di adattamento per il massimo trasferimento di potenza (che si verificano se l'impedenza di uscita è uguale a quella del carico) la densità spettrale di potenza del rumore termico risulta (funzione di radiazione di Planck),

$$\mathcal{S}_x(f) = \frac{\hbar f}{2(e^{\hbar f/KT} - 1)}$$

dove

$\hbar = 6.6 \cdot 10^{-34}$  Joules  $\times$  s è la costante di Planck,

$K = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Joules/Kelvin è la costante di Boltzmann,

$T$  è la temperatura assoluta in gradi Kelvin.

Se  $\hbar f/KT \ll 1$  (per  $T = 300K$  ciò si verifica se  $f$  è sufficientemente più piccola di  $6.26 \cdot 10^{12}$ ) si ha

$$e^{\hbar f/KT} - 1 \simeq \hbar f/KT$$

per cui, sostituendo nella funzione di Planck risulta

$$\mathcal{S}_x(f) \sim \frac{KT}{2} = \text{cost}$$

Quindi, per frequenze minori del terahertz la PSD del rumore termico può ritenersi con buona approssimazione costante e pari a  $KT/2 = N_0/2$  con  $N_0 = KT$ .

## Rapporto Segnale Rumore (SNR)

► È definito come rapporto fra il valore quadratico medio del segnale e quello del rumore

$$SNR = \frac{\mathbb{E}[s(t)^2]}{\mathbb{E}[n(t)^2]} = \frac{2\mathbb{E}[s(t)^2]}{N_0}$$

► Decibel (dB)

È una unità di misura logaritmica del rapporto fra due grandezze omogenee. Il livello di  $P$  rispetto a  $P_o$  in dB è dato dalla relazione

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P}{P_o}$$

A seconda che  $P$  sia maggiore oppure minore di  $P_o$ , il valore risulta positivo oppure negativo. Se è noto il livello relativo di  $P_{dB}$ , il valore di  $P$  si ricava invertendo la relazione precedente, per cui risulta

$$P = P_o 10^{P_{dB}/10}$$

## Calcolo del Link Budget

*Sistema di localizzazione GNSS*

Mezzo trasmissivo	Attenuazione/Guadagno
EIRP	26.8 dBW
R	20200 km
$\lambda$	0.1905 m
Guadagno di antenna (Tx)	18.95 dB
Guadagno di antenna (Rx)	3 dB (Isotropica emisferica)
Attenuazione in spazio libero	$20 \log_{10}(4\pi R/\lambda) = 182.5$ dB
Attenuazione atmosferica	0.5dB
Calcolo della potenza ricevuta	$26.8 - 182.5 - 0.5 = -156.2$ dBW
Potenza al ricevitore	$-156.2 + 3 = -153.2$ dBW
Larghezza di banda	2.5 MHz
Rumore termico	$300 \cdot 1.38 \cdot 10^{23} \cdot 2.5 \cdot 10^6 = 1.035 \cdot 10^{-14}$ W = -139.85 dBW
SNR	$-153.2 - (-139.85) = -13.35$ dB