

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria aerospaziale

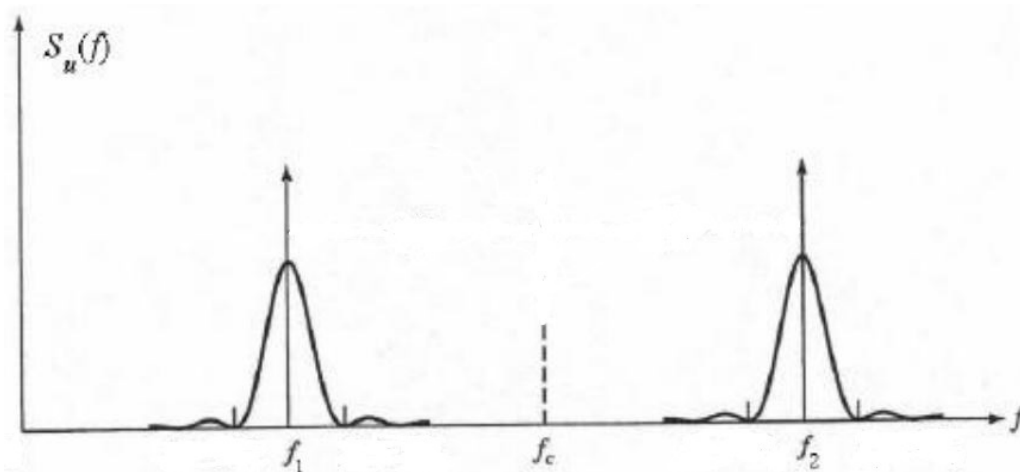
Modulazione GMSK nelle Comunicazioni Satellitari

Tutor universitario: Prof. Corvaja Roberto

Laureando: Gaspari Francesco

Padova, 16/07/2024

Il presente documento riguarda l'analisi della modulazione GMSK nelle comunicazioni satellitari, con un particolare focus sull'applicazione di questa tecnica per satelliti in orbita LEO (Low Earth Orbit). La modulazione GMSK è una tecnica di modulazione digitale di frequenza, caratterizzata dall'uso di un filtro gaussiano, e viene ampiamente utilizzata nelle tecnologie di comunicazione wireless di seconda generazione, come il GSM.



Tecniche di modulazione digitale:

- Principi della modulazione;
- Basi teoriche delle modulazioni digitali.

Analizzare la modulazione GMSK:

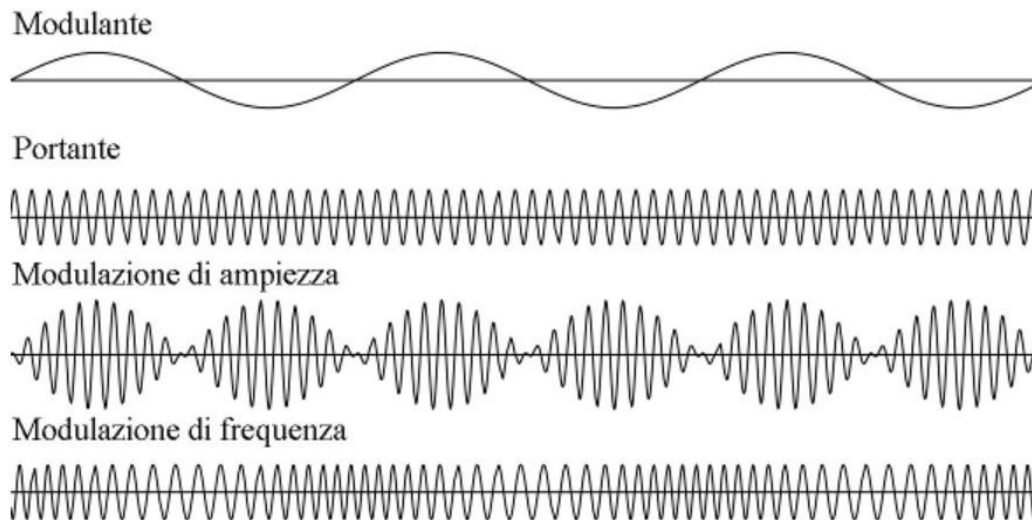
- Modulazioni FSK e MSK;
- Modulazione GMSK;
- Configurazioni per l'implementazione della modulazione GMSK;
- Metodi per il calcolo dei coefficienti del filtro.

Analizzare le alterazioni del segnale durante la trasmissione satellitare:

- Definire i sistemi di riferimento;
- Attenuazione di spazio libero;
- Effetto Doppler.

Simulazione di un link satellitare tramite il software GnuRadio

La modulazione è un processo mediante il quale un segnale di informazione viene adattato in modo essere trasmesso attraverso un canale. Questa tecnica consente di incorporare dati o informazioni, contenuti in un segnale modulante, in un segnale portante, il quale viene poi trasmesso attraverso un mezzo di comunicazione.



AM

$$s(t) = A_c [1 + h_a m(t)] \sin(2\pi f_c t)$$

PM

$$s(t) = A_c \sin(2\pi f_c t + h_p \cdot m(t))$$

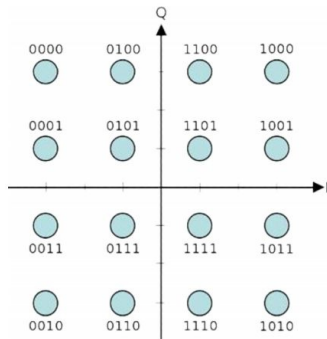
FM

$$s(t) = A_c \sin \left(2\pi f_c t + 2\pi h_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right)$$

Per trasmettere dati di tipo digitale, vengono utilizzate tecniche di modulazione digitale, le quali risultano più efficienti ed affidabili rispetto a quelle analogiche.

QAM

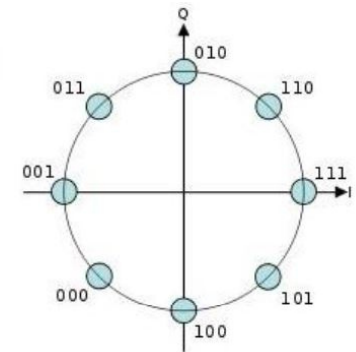
$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_{k,I} \cos(2\pi f_c t) h_{Tx}(t - kT) - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_{k,Q} \sin(2\pi f_c t) h_{Tx}(t - kT)$$



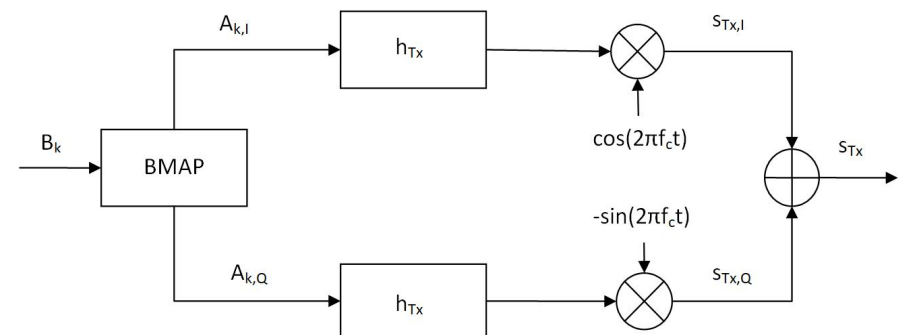
PSK

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_k) h_{Tx}(t - kT)$$

$$\phi_k = \frac{\pi}{M} (2n - 1), \quad n = 1, \dots, M$$



Modulatore I-Q

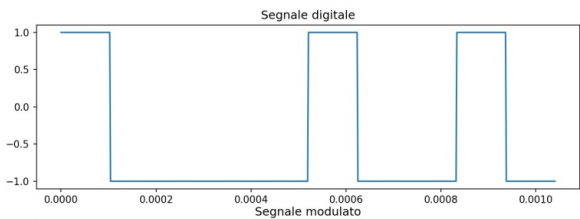


La modulazione Minimum Shifting Keying è un tipo di modulazione a fase continua, in cui le frequenze rappresentanti i simboli adiacenti distano metà della frequenza di bit rate, $h=0,5$.

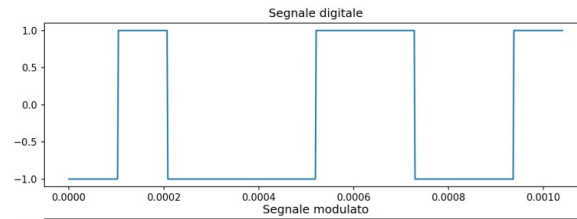
$$s(t) = A \cos \left(2\pi f_c t + \pi h \int_0^t x_f(\tau) d\tau \right)$$

$$x_f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k g_I(t - kT)$$

$$g_I(t) = \text{rect} \left(\frac{t}{T} \right)$$

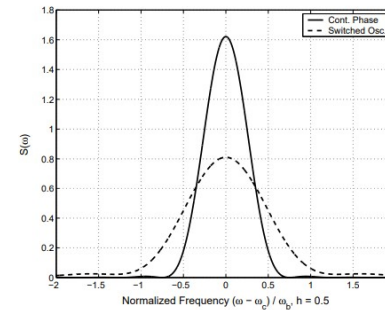


$h=0,5$

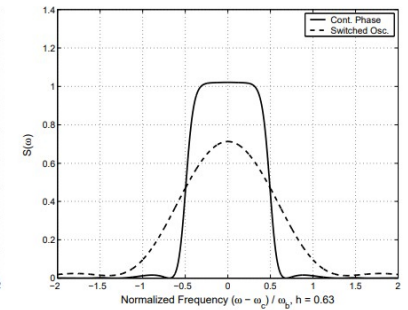


$h=1,0$

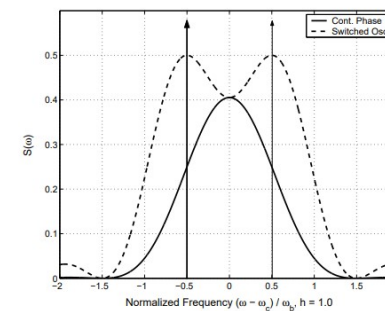
Spettro in banda base di modulazioni FSK a fase continua e non



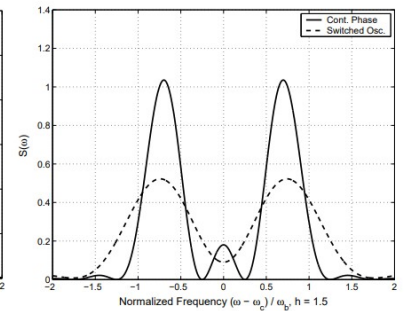
(a) $M = 2, h = 0.5$



(b) $M = 2, h = 0.63$



(c) $M = 2, h = 1$



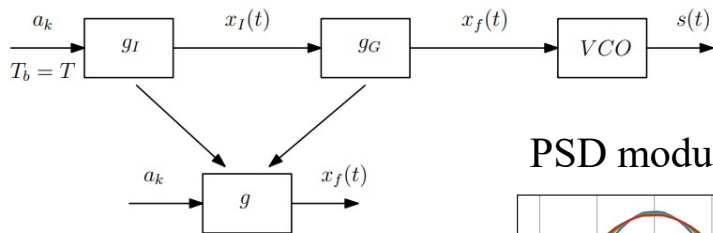
(d) $M = 2, h = 1.5$

La modulazione Gaussian Minimum Shifting Keying è una variazione della modulazione MSK in cui il segnale $x_f(t)$ viene filtrato attraverso un filtro gaussiano prima di essere trasmesso al VCO.

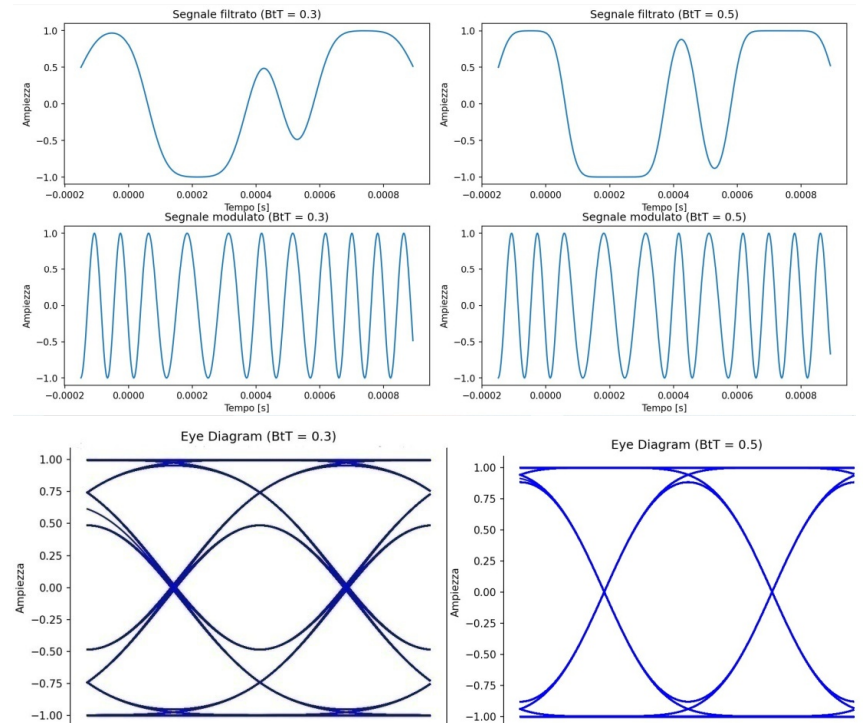
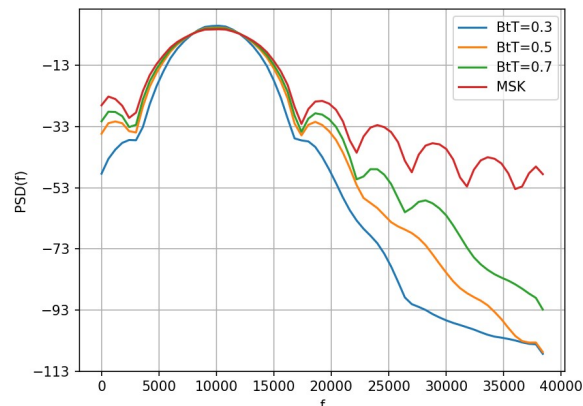
Il filtro così ottenuto viene descritto dalle equazioni:

$$g_G(t) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{K^2 t^2}{2}}, \quad K = \frac{\sqrt{2\pi B_t}}{\sqrt{\ln 2}}$$

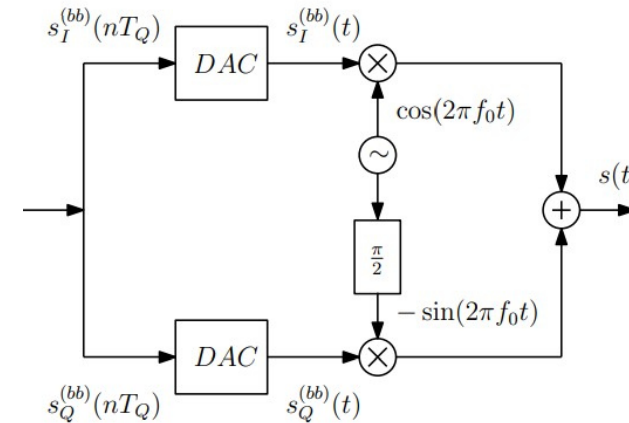
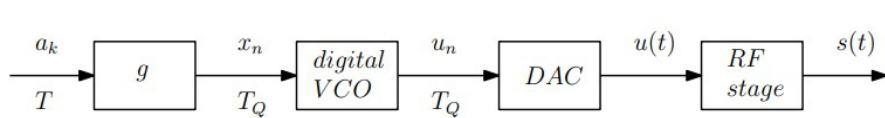
$$g(t) = g_I * g_G(t)$$



PSD modulazione GMSK



Configurazione del modulatore GMSK digitale in banda base con stadio a radiofrequenza.



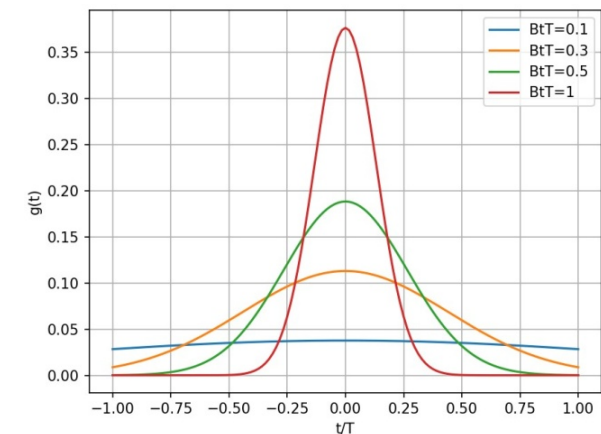
Criteri per il calcolo dei coefficienti del filtro g:

$$\int_{-f^*}^{f^*} S_{xx}(f)df \geq (1 - \epsilon) \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f)df = (1 - \epsilon)P_s$$

$$E_g(t^*) = 2 \int_0^{t^*} |g(t)|^2 dt \quad 1 - \frac{E_g(t)}{E_g} \leq \epsilon$$

$$E_g = 2 \int_0^{+\infty} |g(t)|^2 dt$$

$g(nT_Q)$	$BtT = 0.3$	$BtT = 0.5$
$g(0T_Q)$	0.11252	0.18644
$g(1T_Q)$	0.10814	0.16716
$g(2T_Q)$	0.09597	0.12046
$g(3T_Q)$	0.07866	0.06978
$g(4T_Q)$	0.05954	0.03249
$g(5T_Q)$	0.04162	0.01216
$g(6T_Q)$	0.02687	0.00366
$g(7T_Q)$	0.01602	0.00088
$g(8T_Q)$	0.00882	0.00017
$g(9T_Q)$	0.00449	2.6737e-05
$g(10T_Q)$	0.00211	3.349e-06
$g(11T_Q)$	0.00091	3.370e-07



Distanza ed effetto Doppler sono funzioni della posizione e della velocità dell'osservatore a terra e del satellite, per calcolarle è necessario definire vari sistemi di riferimento e le matrici di roto-traslazione che permettono di eseguire il cambio di coordinate.

$$\mathbf{S}(\theta) = \begin{bmatrix} r \cos(\theta) \\ r \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_S(\theta) = \begin{bmatrix} -\frac{\mu}{h} \sin(\theta) \\ \frac{\mu}{h}(e + \cos(\theta)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

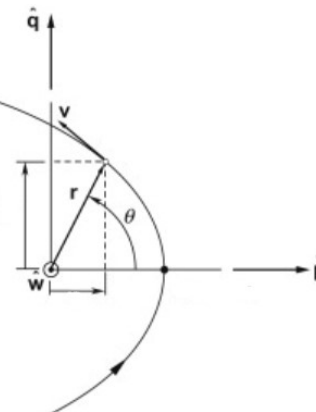
$$r(\theta) = \frac{h^2}{\mu} \frac{1}{1 + e \cos(\theta)}, \quad \mu = Gm_T, \quad h = \sqrt{r_p \mu (1 + e)}$$

$$T_{ECI \rightarrow PER} = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & \sin(\omega) & 0 \\ -\sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & \sin(i) \\ 0 & -\sin(i) & \cos(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & \sin(\Omega) & 0 \\ -\sin(\Omega) & \cos(\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

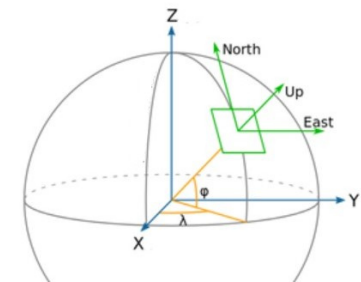
$$\mathbf{P}_{ECI} = \begin{bmatrix} r_T \cos(\phi_0) \cos(\lambda) \\ r_T \cos(\phi_0) \sin(\lambda) \\ r_T \sin(\phi_0) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{P,ECI} = \begin{bmatrix} -r_T \omega_T \cos(\phi_0) \sin(\lambda) \\ r_T \omega_T \cos(\phi_0) \cos(\lambda) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \lambda_0 + \omega_T t$$

$$T_{L \rightarrow ECI} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_0) & 0 & \sin(\phi_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi_0) & 0 & \cos(\phi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & \sin(\lambda) & 0 \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{S}_L = \begin{bmatrix} d \sin(\beta) \\ d \cos(\beta) \cos(\alpha) \\ d \cos(\beta) \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

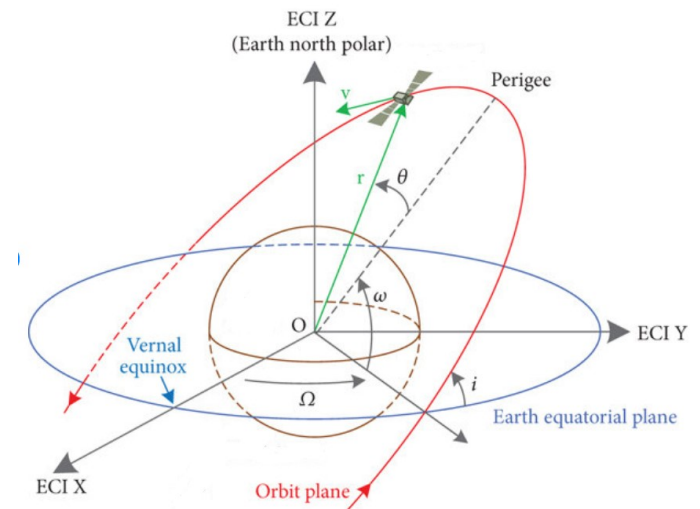
Sistema perifocale



Sistema locale



Sistema Earth Centered Inertial

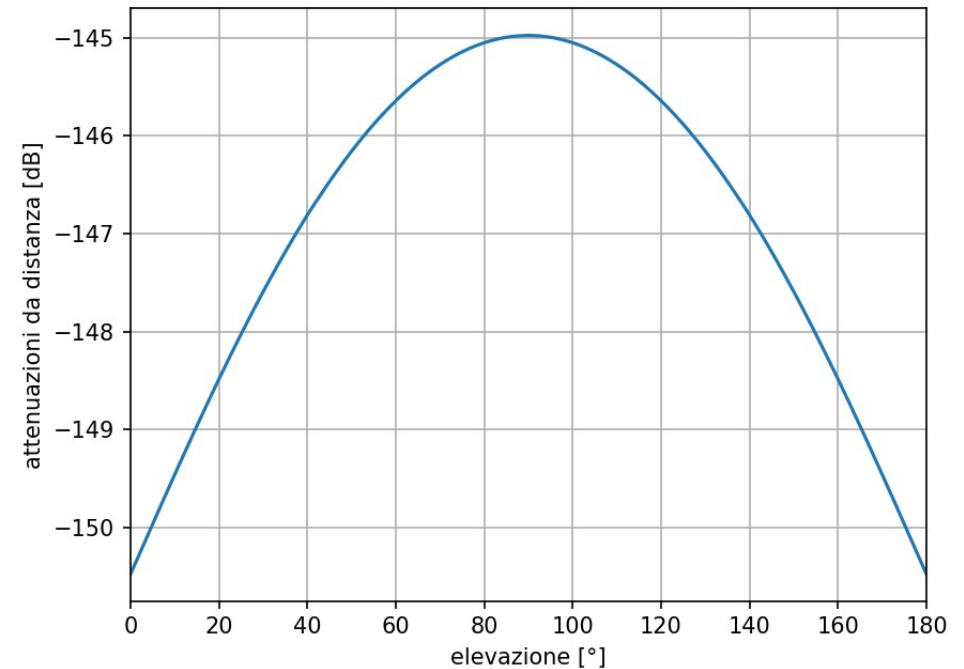


L'attenuazione di spazio libero è la riduzione di intensità quando le onde elettromagnetiche si diffondono nello spazio.

Modello a onda sferica:

$$\Phi_0 = P_{Tx} \frac{1}{4\pi d^2}$$

Attenuazione di spazio libero per orbita LEO,
h = 500 km

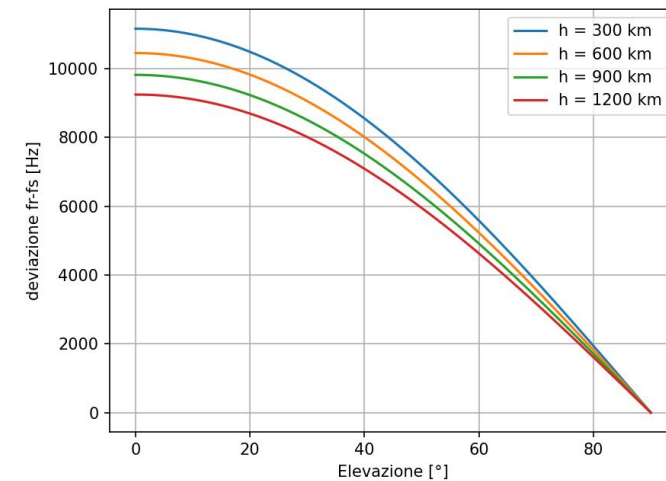
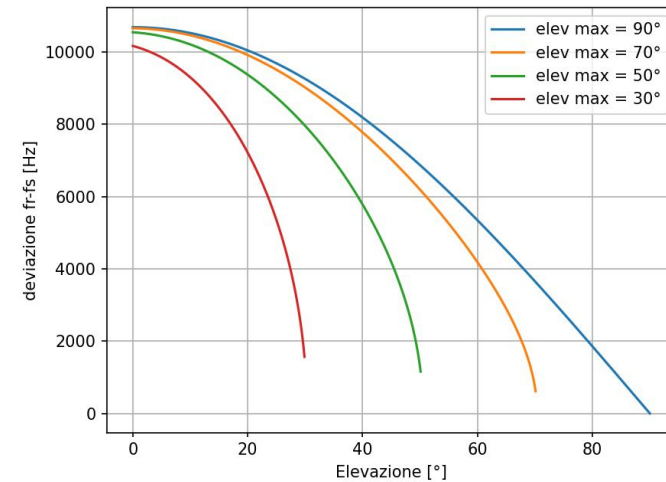


L'effetto Doppler è un fenomeno osservato quando c'è un movimento relativo tra la sorgente e l'osservatore, in cui la frequenza percepita è diversa rispetto a quella generata dalla sorgente.

Il fenomeno è descritto dalla formula:

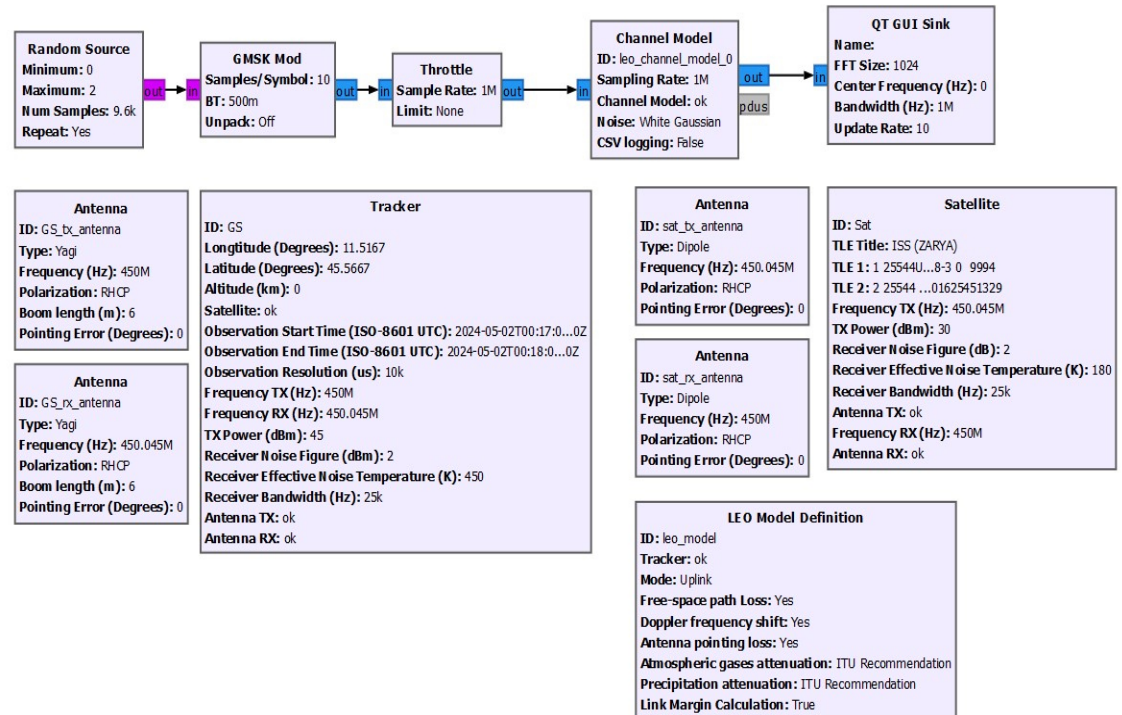
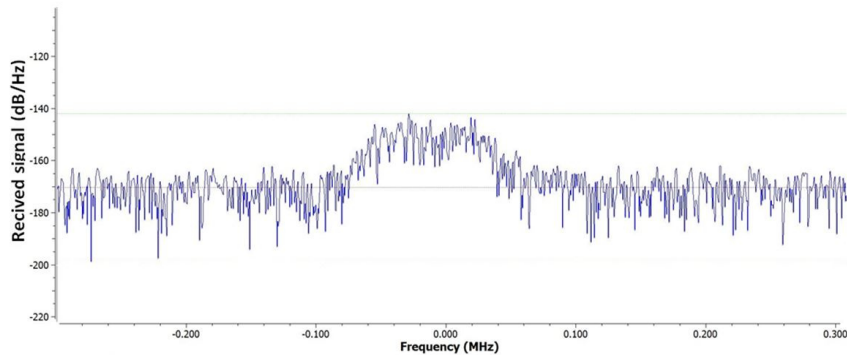
$$f_r = f_s \left(\frac{c}{c + v_r} \right) \quad v_r = \frac{(\mathbf{S} - \mathbf{P}) \cdot (\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_P)}{\|\mathbf{S} - \mathbf{P}\|}$$

- orbita LEO h=500km, i=98°
- Frequenza portante f=450MHz
- Osservatore in coordinate 0°N, 0°E



Utilizzando il LEO pack integrato in GnuRadio è possibile simulare una comunicazione in uplink o downlink tra satellite e ground segment.

GnuRadio permette di simulare in maniera accurata il link satellitare, tenendo in considerazione **perdite di spazio libero** e di **disallineamento tra le antenne**, **rumore** ed **attenuazione da gas atmosferici e precipitazioni**, in funzione di luogo, data e ora del giorno.



- La modulazione Gaussian Minimum Shift Keying è stata esaminata in dettaglio in questo documento, con un'analisi del segnale e delle configurazioni efficaci per la sua implementazione.
- La larghezza di banda limitata, combinata con una maggiore semplicità di modulazione e demodulazione rispetto ad altri sistemi, e una buona robustezza al rumore e alle alterazioni dovute alla non idealità del mezzo di trasmissione, rendono la GMSK una scelta attraente per le comunicazioni satellite-Terra con CubeSat dotati di payload moderati.