

Corso di Fondamenti di Telecomunicazioni

Architettura dei Sistemi di Telelocalizzazione GPS/GALILEO

*Prof. Francesco Benedetto, fbenedet@uniroma3.it
Dipartimento di Elettronica Applicata*

Gennaio 2009

Cenni Storici

I sistemi di posizionamento satellitare non sono un'invenzione recentissima, seppur nati all'origine per soddisfare solo esigenze di tipo bellico e di ricerca.

- E' il 1964 quando diventa operativo negli USA il primo sistema satellitare, denominato TRANSIT.
- Ad esso seguono, nel 1978, il sistema ARGOS, nato a seguito di una collaborazione franco-statunitense.
- Il COSPAS-SARSAT, utilizzato principalmente per il soccorso in mare.
- Il sistema tattico-militare russo GLONASS che rimane a tutt'oggi uno dei sistemi più conosciuti, assieme al più noto GPS (Global Positioning System) americano che è anche il più utilizzato.

Cenni Storici

Entrambi questi sistemi (GPS e GLONASS), disegnati inizialmente per applicazioni militari, sono stati estesi ed utilizzati anche in campo civile.

Pur essendo equivalenti dal punto di vista dell'affidabilità e dell'efficacia, è stato fatto un uso maggiore del GPS, poiché è più agevole trovare sul mercato ricevitori di questo tipo piuttosto che dell'altro.

Per migliorare le prestazioni in ambito civile, dagli anni '90 in poi sono stati proposti e sviluppati tanti altri progetti, in diverse parti del mondo, da imprese pubbliche e private.

Il Futuro

Il progetto futuro più promettente, e che più ci riguarda da vicino, è GALILEO, sistema satellitare di posizionamento globale europeo, che dovrebbe entrare in funzione nei prossimi anni, pensato principalmente per applicazioni civili.

Grazie alle nuove tecnologie in materia, GALILEO offrirà prestazioni migliori, in fatto di precisione e affidabilità, rispetto al GPS e al GLONASS.

GALILEO, interagendo con i sistemi satellitari esistenti, e con quelli *in fieri*, sarà in grado di apportare notevoli vantaggi ai trasporti per aria, terra, mare.

Funzionamento GPS: Determinazione Posizione

La determinazione della posizione richiede la risoluzione di un sistema non lineare di 4 equazioni indipendenti in 4 incognite. Tali incognite sono:

- + latitudine;
- + longitudine;
- + altitudine;
- + tempo.

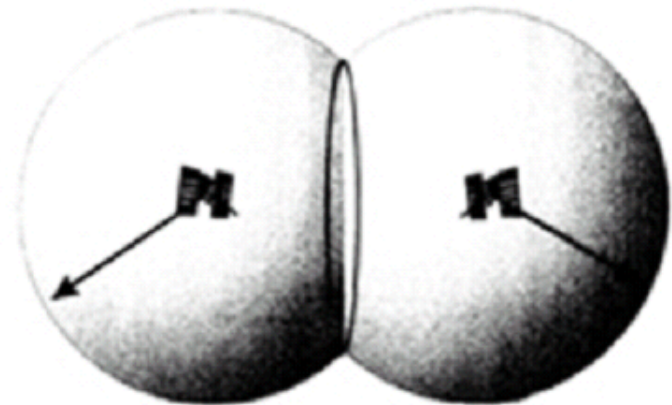
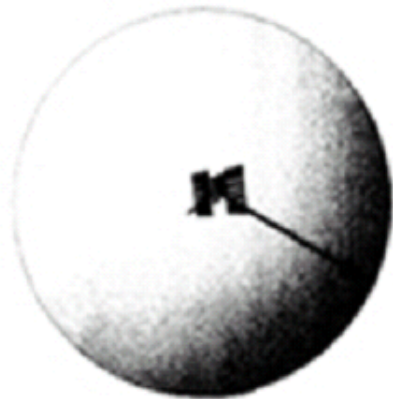
Funzionamento GPS: Determinazione Posizione

Bisogna sottolineare che per determinare la posizione non è possibile utilizzare segnali riflessi, ma solo quelli diretti LOS (Light Of Sight).

La misura della distanza è affetta da diversi errori, dovuti agli effetti atmosferici sulla velocità di propagazione del segnale, alle imprecisioni dei segnali di clock dei satelliti e ad altri effetti secondari. La distanza misurata viene chiamata nel gergo GPS *pseudodistanza* o *pseudorange*.

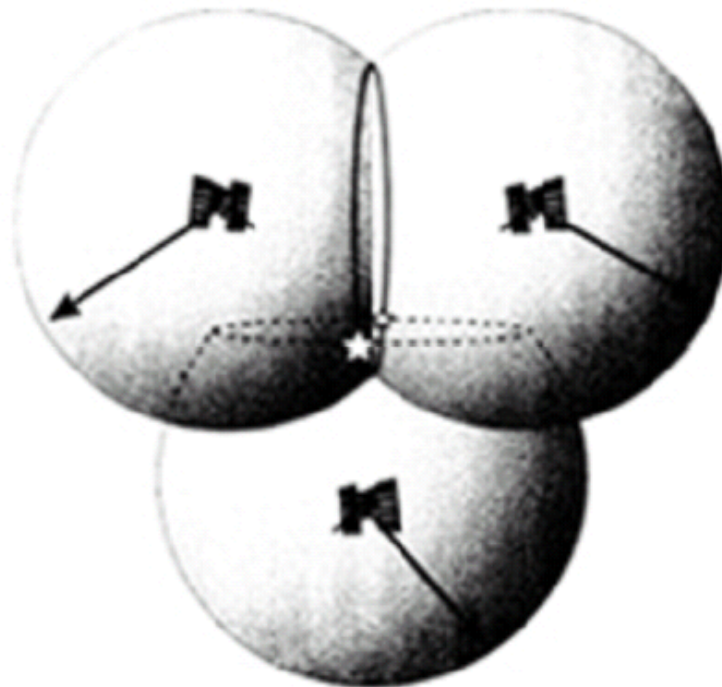
Funzionamento GPS: Determinazione Posizione

Tale pseudodistanza sarà il raggio di una sfera immaginaria con centro il satellite stesso. Ogni punto della superficie della sfera è una delle possibili posizioni occupate.



Determinazione Posizione: Triangolazione

Qualora prendessimo in considerazione tre diversi satelliti, avremmo tre diverse sfere. Uno dei due punti in comune è in genere manifestamente errato e può essere facilmente scartato.



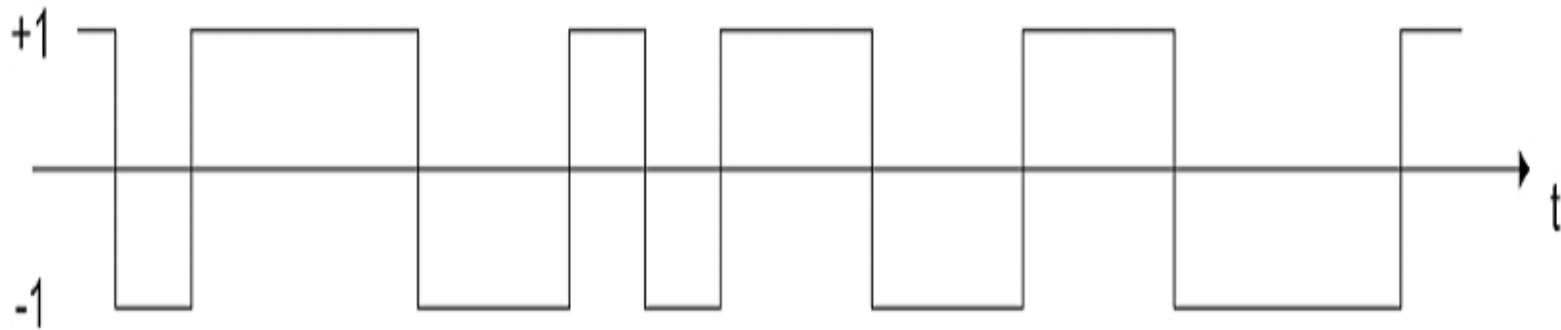
Determinazione Posizione

Tre segnali sono quindi necessari per determinare in modo univoco il punto in cui ci troviamo, mentre il quarto segnale serve perché il ricevitore, in realtà, non dispone di un orologio atomico sincronizzato con quello che si trova sui satelliti.

Ogni satellite imbarca quattro orologi atomici, che sfruttano le oscillazioni degli atomi di cesio e rubidio per mantenere la massima precisione. Il sistema GPS deve possedere uno standard di precisione di più o meno un secondo ogni 30000 anni.

Codici PRN

I segnali di ranging utilizzati nei sistemi satellitari sono costituiti da codici *Pseudo Random Noise* (PRN): sequenze binarie che assomigliano e hanno proprietà spettrali simili alle sequenze binarie casuali, ma in realtà sono deterministiche.



Per permettere al ricevitore di distinguere i segnali provenienti dai diversi satelliti, è associato ad ognuno di essi in maniera univoca un codice PRN diverso da tutti gli altri (CDMA).

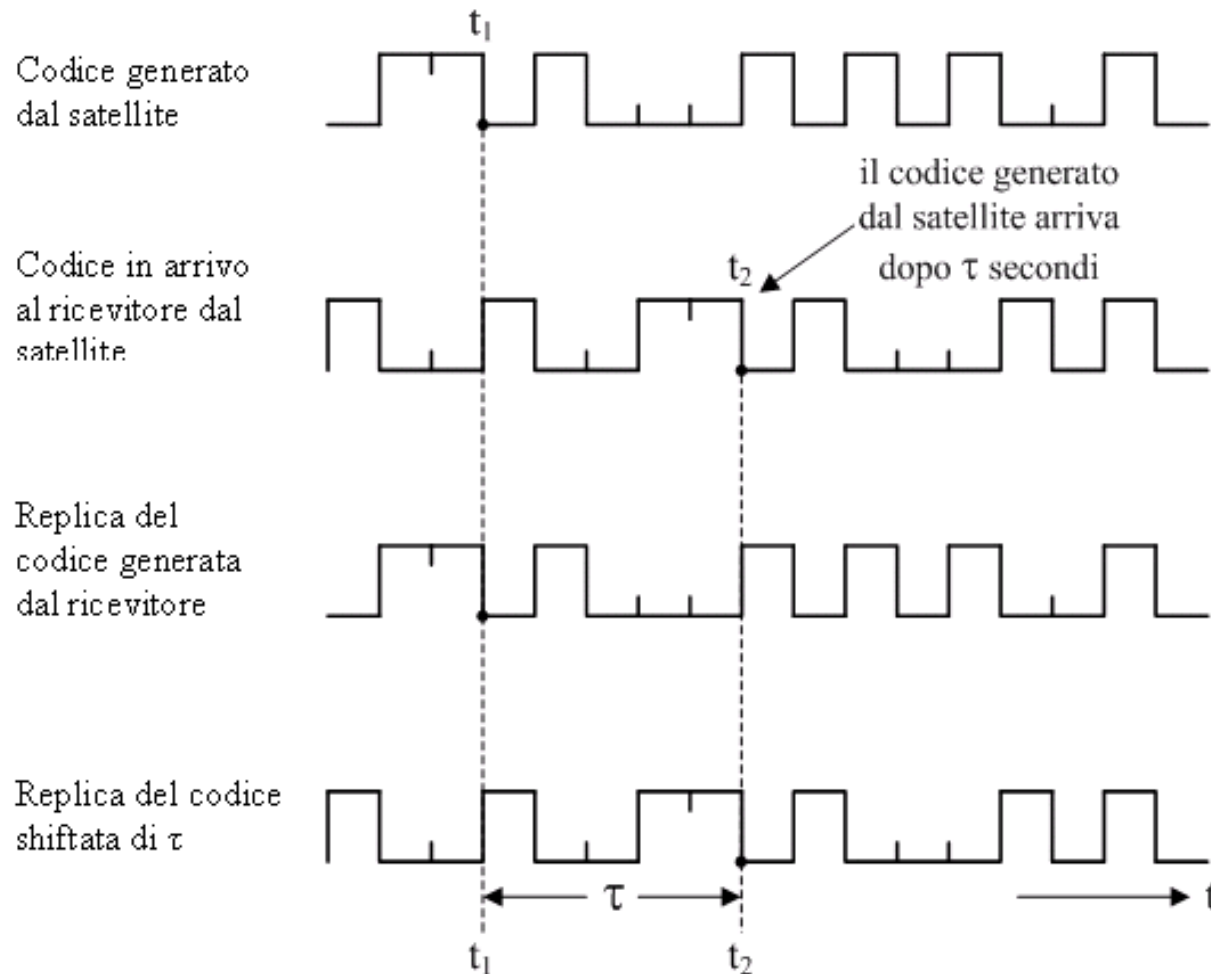
Misura Tempo di Transito

Un particolare codice trasmesso dal satellite all'istante t_1 giunge al ricevitore all'istante t_2 . Il tempo di transito è rappresentato da τ .

Il ricevitore ricostruisce una replica del codice PRN associato al satellite, ne varia la fase (cioè la trasla nel tempo) e la moltiplica con il segnale ricevuto allo scopo di misurare la correlazione tra i due segnali.

Nell'istante in cui questi risultano allineati si ha l'aggancio di fase e si ottiene il massimo della funzione di correlazione.

Misura Tempo di Transito



Misura Pseudorange

Poiché l'orologio del ricevitore presenta una forte instabilità residua si richiede che quattro osservazioni siano contemporanee ed è per questo motivo che il sistema GPS deve sempre garantire, in ogni punto della terra, la visibilità contemporanea di almeno 4 satelliti.



Errori

- errori dovuti all'hardware presente nel ricevitore e nel satellite;
- errori dovuti all'effetto di multipath;
- biases dei satelliti;
- biases di osservazione.

Il primo tipo dipende dall'errore con cui si realizza l'allineamento del codice generato dal ricevitore con quello proveniente dal satellite; tale errore può essere definito come un rumore elettronico di misura. Nei ricevitori di ultima generazione, grazie al progresso dell'elettronica, l'errore è inferiore al metro per entrambi i codici utilizzati dal GPS.

Errori

- errori dovuti all'hardware presente nel ricevitore e nel satellite;
- errori dovuti all'effetto di multipath;
- biases dei satelliti;
- biases di osservazione.

Multipath: fenomeni di riflessione del segnale provocati dalla presenza di superfici riflettenti in prossimità del ricevitore. La traiettoria del segnale osservato subisce riflessioni multiple e quindi il tragitto percorso non coincide con quello geometrico fra satellite e ricevitore. Ciò causa una sovrastima della distanza che si riflette in un errore nella stima della posizione.

Errori

- errori dovuti all'hardware presente nel ricevitore e nel satellite;
- errori dovuti all'effetto di multipath;
- biases dei satelliti;
- biases di osservazione.

I biases sono errori di modello che possono danneggiare le misure in maniera significativa se non vengono eliminati o ridotti.

I biases di osservazione sono dovuti agli effetti dell'atmosfera. Il segnale emesso dal satellite, quando attraversa l'atmosfera terrestre, subisce una deviazione e viaggia ad una velocità diversa da quella nel vuoto.

Il Sistema GPS

Il progetto GPS, noto anche con il nome di NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Timing And Ranging Global Positioning System), risale al 1973.

Questo sistema di posizionamento satellitare, concepito e promosso dal Ministero della Difesa statunitense, nasce per scopi esclusivamente militari e diventa operativo per la prima volta nel 1994

Nonostante sia nato come sistema militare, dopo poco tempo, viene reso disponibile anche per uso civile, ma, per ragioni di sicurezza nazionale, la precisione per tale utilizzo è stata volutamente degradata.

Sistema GPS

Space Segment

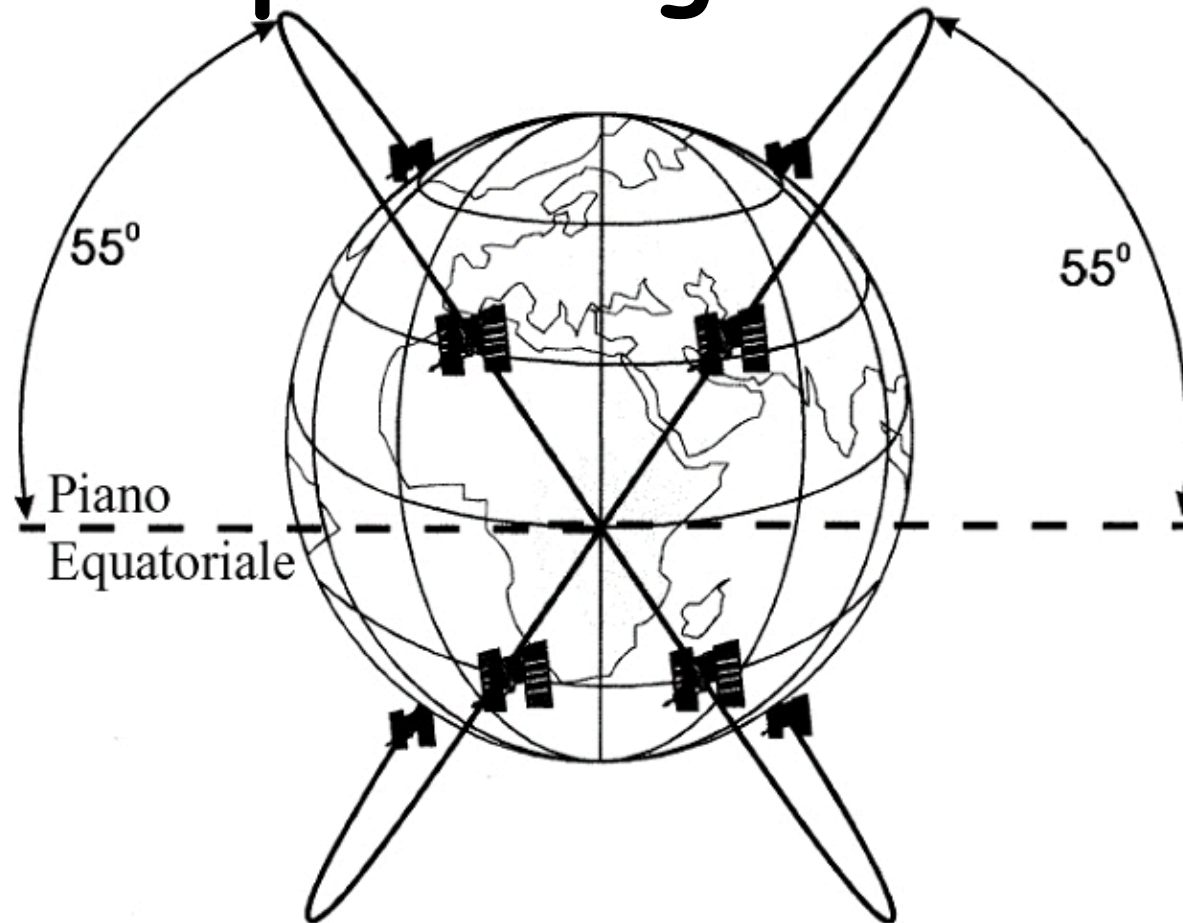
Il segmento spaziale è composto da una costellazione di 28 satelliti artificiali - dei quali 24 operativi - distribuiti su 6 piani orbitali, distanziati fra loro di un angolo di 60° e formanti un angolo di 55° rispetto al piano equatoriale.

Tale scelta è stata dettata dall'esigenza di poter coprire tutta la superficie del globo terrestre con il vincolo che da ogni punto siano visibili contemporaneamente almeno 4 satelliti.

Le orbite dei satelliti, non geostazionarie, sono quasi circolari con un raggio orbitale di circa 26600 Km.

Sistema GPS

Space Segment



Sistema GPS

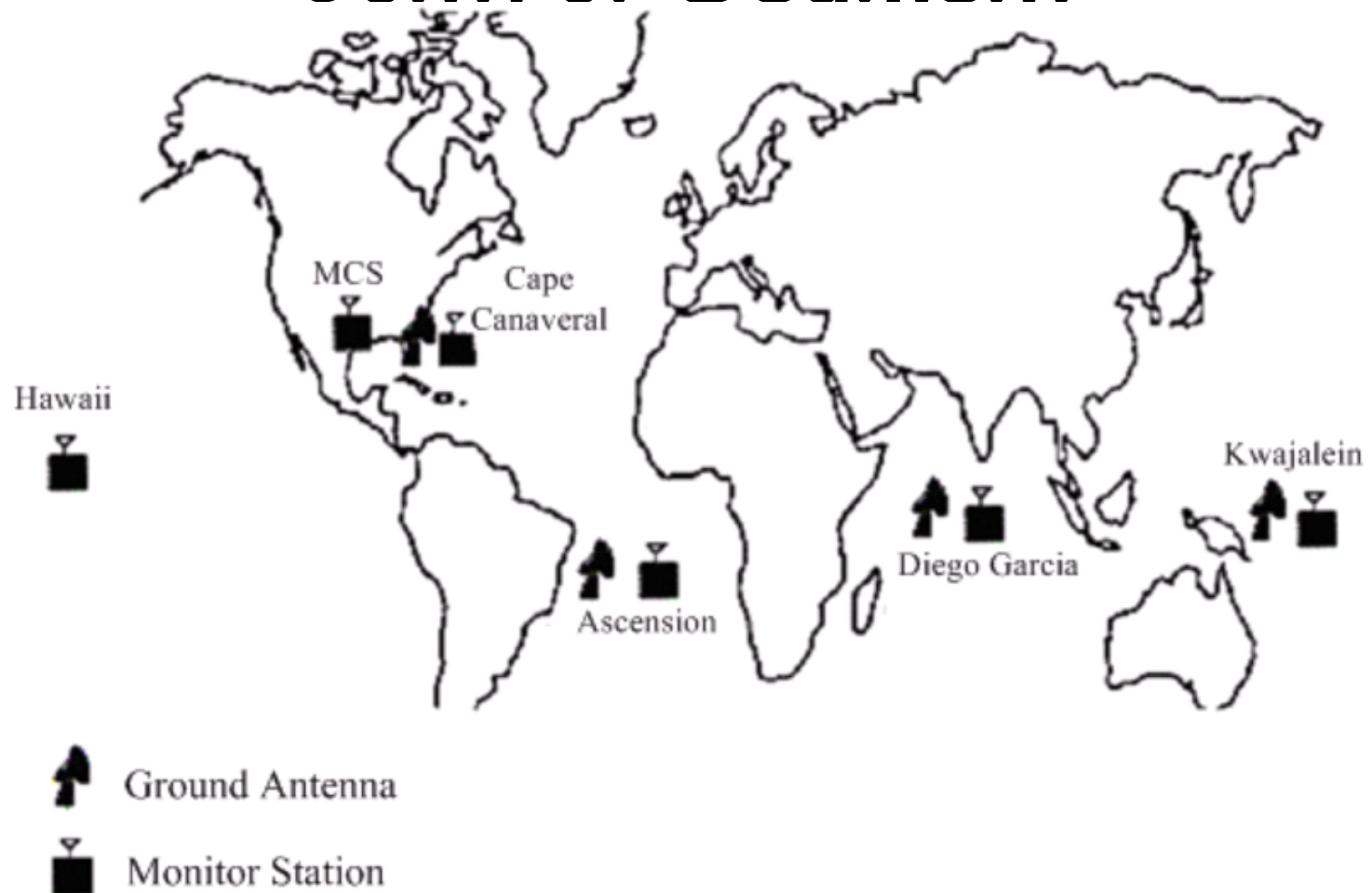
Control Segment

Il segmento di controllo, indicato anche con l'acronimo OCS (Operational Control System), è costituito dall'insieme di stazioni, equispaziate lungo l'equatore, coinvolte nel monitoraggio e nel controllo del sistema GPS:

- una stazione di comando MCS (Master Control Station) situata nella Falcon Air Force Base nei pressi di Colorado Spring;
- 6 stazioni di monitoraggio MS (Monitor Station);
- 4 stazioni trasmettenti GA (Ground Antenna).

Sistema GPS

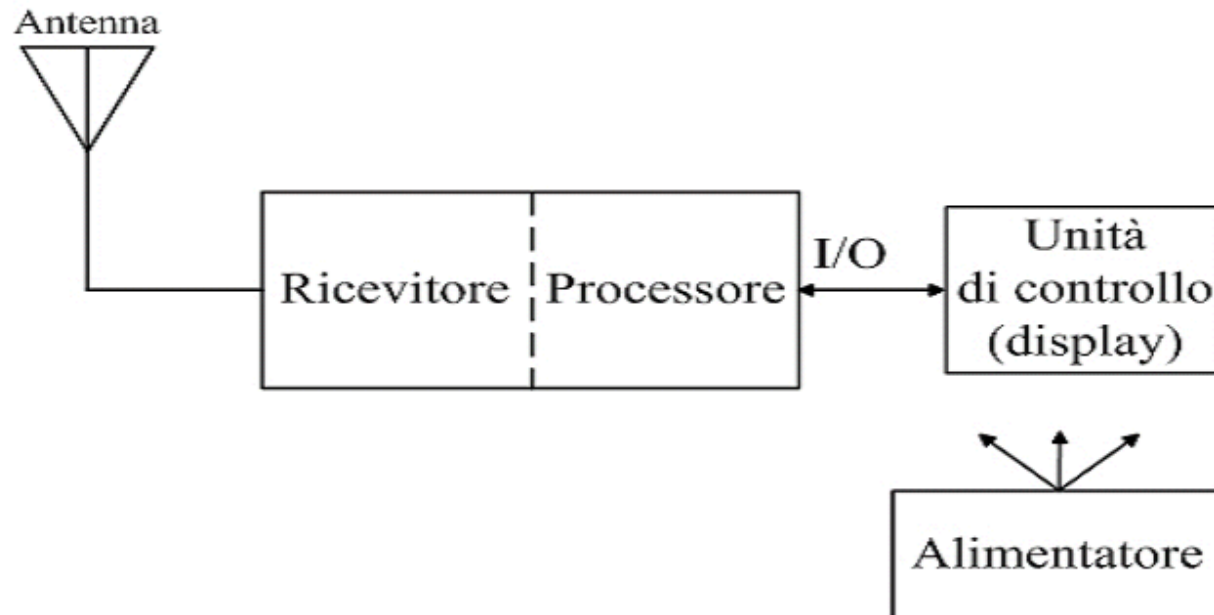
Control Segment



Sistema GPS

User Segment

Questo segmento non è altro che l'insieme degli utilizzatori finali. Ogni utente è dotato di un ricevitore, più o meno sofisticato, capace di acquisire i segnali emessi dai satelliti GPS per stimare il posizionamento tridimensionale in tempo reale.



Sistema GPS

User Segment

Il ricevitore deve eseguire una serie di operazioni, tra le quali la prima è quella di testare la presenza dei 4 segnali provenienti dai 4 diversi satelliti eseguendo una misura di correlazione tra i codici PRN associati ai vari satelliti (costruiti all'interno dello stesso ricevitore) e l'informazione ricevuta.

Il dispositivo di I/O non è altro che l'interfaccia tra il ricevitore GPS e l'utente. Il più delle volte si tratta di un display di controllo tramite il quale si possono inserire i dati e sul quale si possono leggere le informazioni di interesse.

Segnali GPS

I satelliti GPS trasmettono due portanti a radiofrequenza: L_1 ed L_2 .
Le portanti sono modulate mediante la combinazione di un codice a spettro espanso (una sequenza PRN unica per ogni satellite) con i dati di navigazione.

In ricezione, dato che le sequenze PRN sono quasi incorrelate tra di loro, i segnali possono essere separati tramite tecnica CDMA.

Frequenze GPS

Frequenza centrale degli oscillatori: $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$

Portante L_1 : $f_1 = 1575.42 \text{ MHz}$ ($154 \cdot f_0$)

Portante L_2 : $f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$ ($120 \cdot f_0$)

Tali frequenze corrispondono alle seguenti lunghezze d'onda:

$$\lambda_1 = 0.19 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.24 \text{ m}$$

Modulazioni GPS

Le due portanti sono modulate in fase utilizzando tre diversi codici:

- il Coarse/Acquisition code (*C/A-code*), detto anche clear/acquisition code;
- il Precision code (*P-code*);
- i dati di navigazione (*D*).

Il codice C/A è unico per ciascun satellite, dura 1 ms e si compone di 1023 bit. Il chipping rate (la velocità di emissione dei chip) è di 1.023 Mbps; dunque in un secondo vengono emessi 1023000 bit del codice C/A e, di conseguenza, l'intero codice viene ripetuto ogni millisecondo (*repetition time*).

Disponibilità Selettiva

Entrambi i codici P e C/A, così come le portanti L_1 ed L_2 , sono soggette ad essere criptate per attivare ciò che è definita come "disponibilità selettiva" o SA (Selective Availability).

La SA consiste in una perturbazione intenzionale dell'accuratezza dell'orologio ed una contaminazione dei dati delle effemeridi dei satelliti. Gli effetti sono degli errori sulle misure di pseudorange.

Disponibilità Selettiva

Tale restrizione concede solo precisioni orizzontali entro 100 metri reali per il 95% del tempo. Gli utenti che hanno a disposizione algoritmi e cifrari per rimuovere gli errori inseriti godono della precisione intrinseca del sistema che è pari a circa 20 metri.

Dal 2 Maggio 2000, il disturbo SA, che rendeva volutamente inaccurato il segnale di posizionamento trasmesso in chiaro, è stato rimosso; come conseguenza si è avuto un incremento dell'utilizzo del GPS per applicazioni civili (es.: sistemi di guida satellitari per auto).

Parametri della Funzione di Autocorrelazione

PARAMETRI	C/A	P(Y)
Ampiezza massima di autocorrelazione	1	1
Autocorrelazione tipica al di fuori dell'intervallo di correlazione	$-\frac{1}{1023}$	$-\frac{1}{6.1871 \times 10^{12}}$
Autocorrelazione tipica in dB rispetto alla correlazione massima (al di fuori dell'intervallo di correlazione)	-30.1	-127.9
Periodo di autocorrelazione	1 ms	1 settimana
Intervallo di autocorrelazione (in chip)	2	2
Intervallo temporale di autocorrelazione (ns)	1955.0	195.5
Intervallo spaziale di autocorrelazione (m)	586.1	58.6
Rate del codice (chips/s)	1.023×10^6	10.23×10^6
Periodo del codice (ns)	977.5	97.8
Range di un chip (m)	293.0	29.3

Possibilità di falsa acquisizione



Il Sistema Galileo

Galileo è un sistema di posizionamento satellitare che nasce e si sviluppa per gli utenti civili, garantendo notevole flessibilità e sfruttabilità commerciale, ma che può anche essere utilizzato militarmente, facendo cessare la dipendenza dagli Usa.

Il suo principio di funzionamento è analogo a quello del sistema GPS: un utente, attraverso la ricezione di almeno quattro segnali radio trasmessi dai satelliti, riuscirà a stabilire con correttezza la propria posizione.

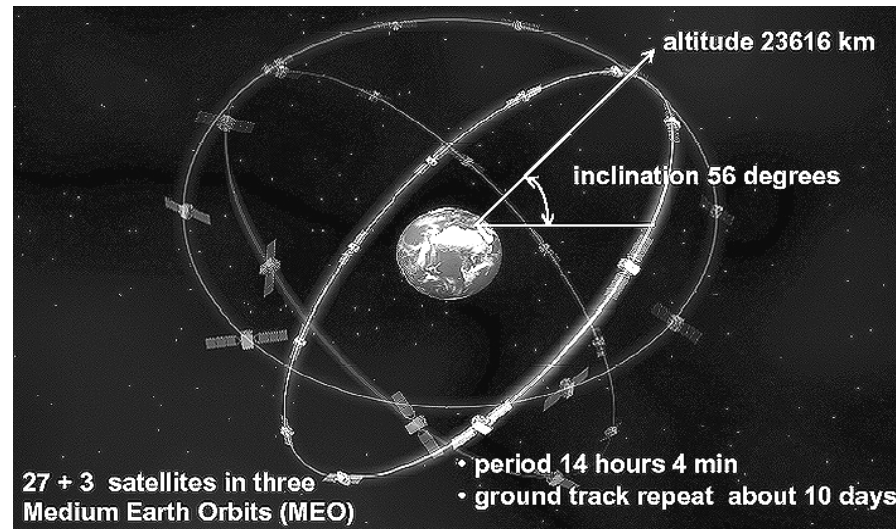
Il sistema sarà compatibile e ridondante rispetto al GPS



Segmento Spaziale

La sezione spaziale (*GSS*) prevede 30 satelliti *MEO* (Medium Earth Orbit), di cui 27 operativi e 3 di riserva.

I satelliti orbiteranno attorno alla Terra ad un'altezza di 23616 Km dalla superficie e saranno distribuiti su tre orbite, ognuna delle quali è inclinata di 56° rispetto al piano dell'equatore.

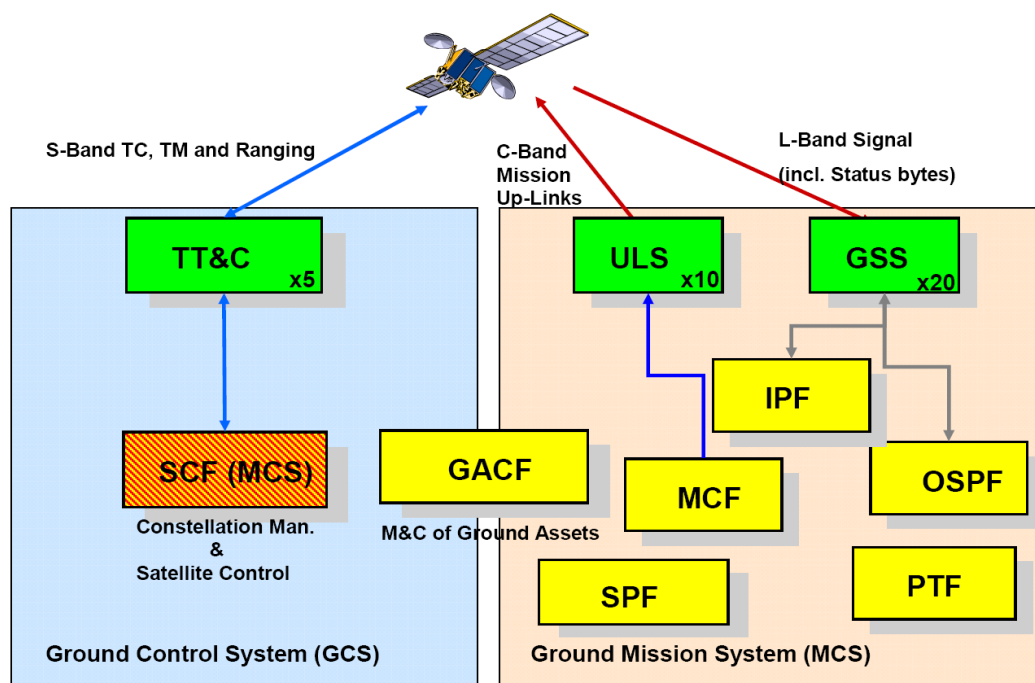




Segmento Terrestre

La sezione terrestre può essere divisa in tre parti principali:

- centro di controllo Galileo;
- stazioni remote;
- rete di comunicazioni.





Segmento Terrestre

Il centro di controllo, *GCC* (Galileo Control Centre), sarà il cuore del sistema *GCS* (Ground Control System) ed includerà tutte le funzioni di controllo ed elaborazione.

Le stazioni remote raccoglieranno le informazioni inviate dai satelliti *GALILEO* così come altre informazioni riguardanti le condizioni metereologiche ed ambientali.

Tutte le informazioni ricevute saranno poi inviate al *GCC* per essere elaborate. Gli elementi che fanno parte del *GCC* saranno connessi attraverso una LAN.



Segnali Galileo

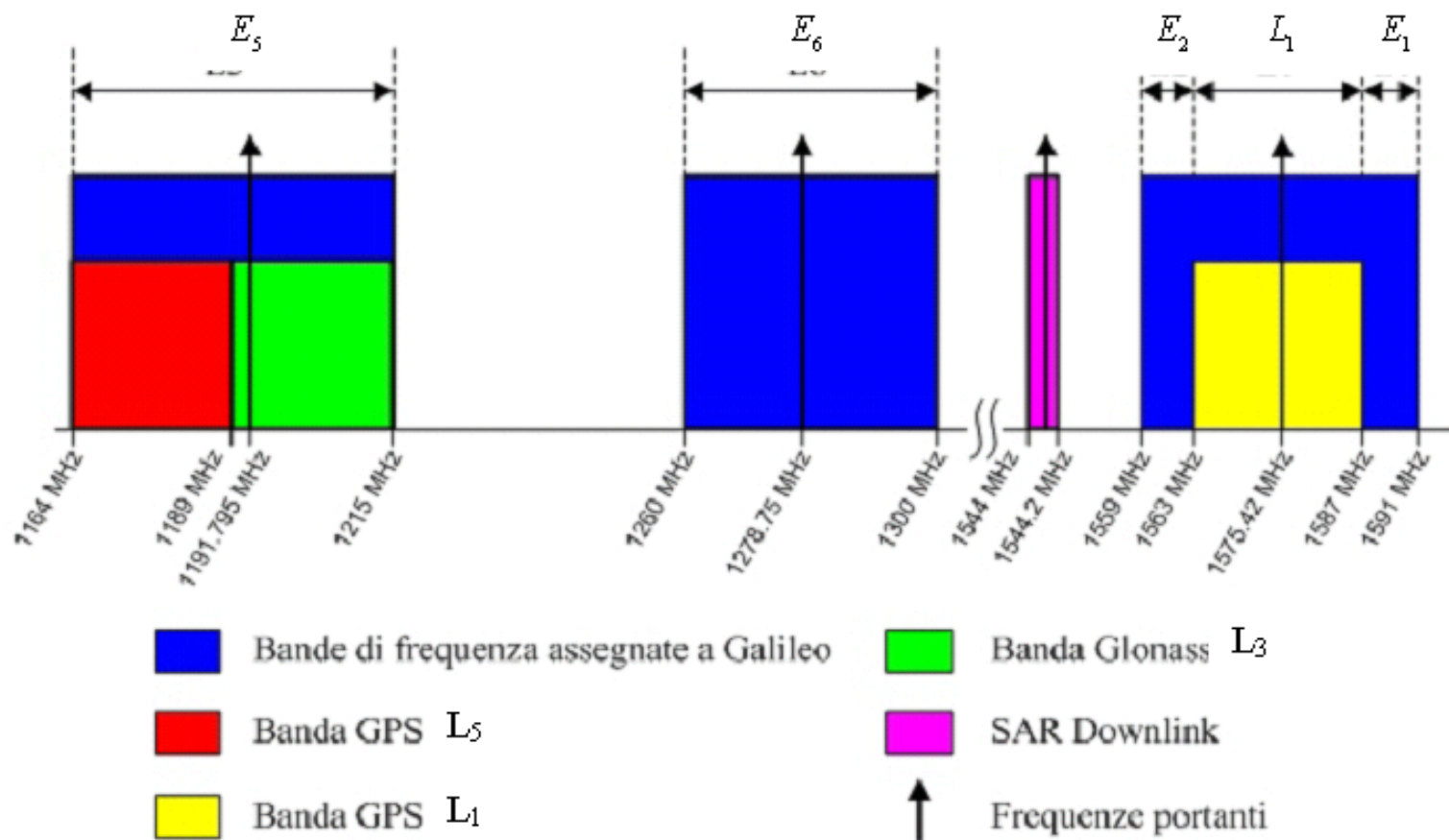
I satelliti GALILEO trasmettono 3 diverse portanti cui corrispondono 3 bande diverse denominate rispettivamente con E_5 , E_6 , $E_2-L_1-E_1$ (indicata anche come L_1).

Inoltre, sarà prevista anche una quarta banda (una banda stretta), L_6 , dedicata esclusivamente alla ricezione del segnale per il servizio di emergenza SAR.

Alcune di queste bande sono parzialmente sovrapposte a quelle del GPS e ciò per garantire l'interoperabilità tra i due sistemi.



Bande Galileo





Compatibilità con GPS

Il sistema GALILEO è stato progettato scegliendo segnali che garantiscano la compatibilità e l'interoperabilità con il sistema GPS e con sue future estensioni.

La *compatibilità* deve assicurare che non ci siano reciproche degradazioni di servizio.

L'*interoperabilità* deve far sì che l'uso congiunto dei sistemi aumenti la precisione, l'integrità, l'affidabilità e la disponibilità del servizio.



Interoperabilità con GPS

L'interoperabilità è realizzata mediante la sovrapposizione parziale in frequenza utilizzando segnali differenti e sequenze di codice diverse.

Pro

Possibilità di progettare un ricevitore semplice, e quindi di basso costo, in grado di utilizzare congiuntamente le informazioni ricevute da entrambi i sistemi.

Contro

- Interferenza di un sistema sull'altro (inter-system interference)
- Interferenza che si genera internamente (intra-system interference).

La somma dei due tipi di interferenza determina le prestazioni del ricevitore.



Interferenza con GPS

La degradazione del rapporto segnale-rumore sul segnale GPS non sarà mai maggiore di 0,2 dB in qualsiasi luogo e ad ogni istante. Il valore massimo di tale degradazione è una funzione della posizione geografica sulla superficie terrestre.

La massima intra-system interference per un segnale GPS C/A risulta essere inferiore ai 2,7 dB, quindi sempre più grande della inter-system interference.

I valori massimi relativi alle due interferenze non potranno essere registrati nello stesso momento; anzi, con buona approssimazione, quando una interferenza sarà massima, l'altra sarà attorno al proprio valore minimo.

Modulazioni a confronto

