

CISAS-UPD



**Scuola di Dottorato in Scienze Tecnologie e Misure Spaziali (STMS)
dell'Università di Padova**

XXIV Ciclo

Tesina del corso
Il GPS e le sue applicazioni
Prof. Alessandro Caporali

TITOLO
Galileo: il programma europeo di navigazione satellitare

DOTTORANDO
Maurizio PETRARCA

Indice

Indice	2
Introduzione.....	3
1 Il GPS (Global Positioning System).....	3
1.1 Storia.....	3
1.2 Descrizione	3
1.3 Trilaterazione.....	5
1.4 Fonti di errore	5
1.5 Correzione dell'errore.....	6
2 Il sistema di posizionamento Galileo.....	7
2.1 Introduzione.....	7
2.2 Programmazione delle attività di progetto.....	7
2.2.1 Galileo In orbit Validation Elements (GIOVE).....	8
2.3 Struttura	9
2.3.1 Il segmento spaziale.....	10
2.3.2 Il segmento di terra	11
2.3.3 Il segmento utente.....	12
2.4 Il Sistema di Posizionamento	12
2.5 SIS (Signal In Space).....	13
2.6 Servizi.....	14
2.6.1 Servizio Base (OS)	14
2.6.2 Servizio Commerciale (CS).....	14
2.6.3 Servizio Governativo (PRS) e Servizio Vitale (SoL)	15
2.6.4 Servizio di ricerca e salvataggio (SAR).....	15
2.6.5 Riepilogo tecnico dei servizi offerti da Galileo	15
3 Bibliografia.....	15

Introduzione

La navigazione più comune è condotta a vista a patto di avere a disposizione delle mappe e delle tecniche o strumenti di rilevamento della propria posizione. La mappa più elementare da sempre utilizzata è quella mentale e nasce dalla esperienza che si ha dei luoghi visitati. Si tratta di una mappa aberrante dal punto di vista topografico. Le relazioni tra i luoghi, le distanze, i luoghi stessi che intercorrono tra una meta e l'altra non rispondono alla realtà, ma ad una capacità del cervello di creare un percorso di relazioni tra passaggi chiave che conducono da un luogo ad un altro. Questo è il motivo per il quale quando ci viene presentata una mappa topografica di luoghi che conosciamo solo per averli 'navigati' spesso facciamo fatica ad orientarci. Le mappe disegnate prima che la cartografia si potesse servire di un metodo scientifico e della moderna tecnologia presentavano sempre queste aberrazioni e la più comune era quella di rappresentare in maniera più estesa i luoghi noti rispetto a quelli meno conosciuti o meno visitati. Le nuove generazioni hanno sempre meno bisogno di esercitare questa capacità della mente in quanto gli attuali sistemi di navigazione cartografica satellitare risolvono egregiamente qualsiasi problema di pianificazione del percorso. Spesso non utilizziamo neanche la cartografia, ma raggiungiamo la meta semplicemente ascoltando una voce che ci guida ad ogni svolta, mentre noi siamo occupati a fare altro. La vista, il nostro più potente tele recettore, viene sistematicamente soppiantato da nuovi tele recettori che ampliano i nostri orizzonti percettivi come 'estensioni sensoriali' del nostro corpo. Dobbiamo aspettarci per le nuove generazioni, rispetto a quanto fin ora studiato della funzionalità delle rappresentazioni spaziali, una riorganizzazione funzionale nell'uomo? Non è assolutamente improbabile in quanto le rappresentazioni spaziali non sono innate, ma frutto di una esercitazione quotidiana. Il GPS rappresenta oramai una vera e propria estensione sensoriale che ci permette di navigare nel mondo senza doverci curare delle relazioni tra i luoghi e forse in un futuro non troppo lontano non sarà necessario neanche occuparci della guida. Ovviamente se, come e quando le esigenze militari lo permetteranno, perché le esigenze di guida della navigazione sono da sempre una priorità per la strategia militare. Il GPS per usi civili nasce nei tempi e nelle modalità tali da non creare intralcio all'attività militare. Infatti, Il Global Positioning System (abbreviato in GPS, a sua volta abbreviazione di NAVSTAR GPS, acronimo di NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System), è un sistema di posizionamento su base satellitare, a copertura globale e continua, gestito dal dipartimento della difesa statunitense.

Il GPS (Global Positioning System)

1.1 Storia

Nel 1991 gli USA aprirono al mondo il servizio di navigazione satellitare con il nome SPS (Standard Positioning System), con specifiche differenziate da quello militare denominato PPS (Precision Positioning System). In pratica veniva introdotta la cosiddetta Selective Availability (SA) che introduceva errori intenzionali nei segnali satellitari allo scopo di ridurre l'accuratezza della rilevazione, consentendo precisioni solo nell'ordine di 100-150 m. Tale degradazione del segnale è stata disabilitata dal mese di maggio 2000, grazie a un decreto del Presidente degli Stati Uniti Bill Clinton, mettendo così a disposizione degli usi civili la precisione attuale di circa 10-20 m. Nei modelli per uso civile devono essere presenti delle limitazioni: massimo 18 km per l'altitudine e 515 m/s per velocità, per impedirne il montaggio su missili. Infatti, tali limiti possono essere superati, ma non contemporaneamente.

1.2 Descrizione

Originariamente il sistema di navigazione si articolava nelle seguenti componenti:

1. un complesso di minimo 24 satelliti, divisi in gruppi di quattro su ognuno dei sei piani orbitali (distanti 60° fra loro e inclinati di 55° sul piano equatoriale);

2. 2 cicli al giorno;
3. una rete di stazioni di tracciamento (tracking station);
4. un centro di calcolo (computing station);
5. due stazioni di soccorrimento (injection stations);
6. un ricevitore GPS.

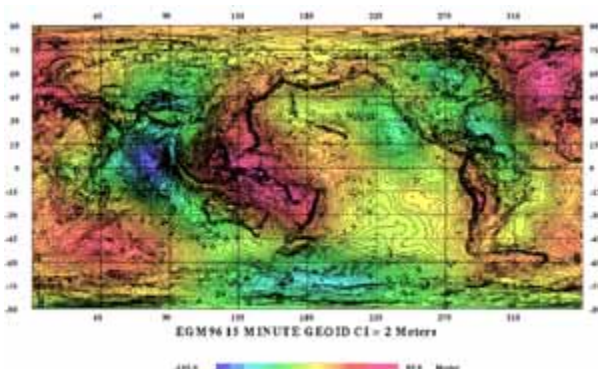


Nel Marzo 2008 i satelliti attivi nella costellazione GPS erano saliti a 31. I satelliti supplementari hanno permesso di migliorare la precisione del sistema permettendo misurazioni ridondanti. Al crescere del numero di satelliti, la costellazione è stata modificata secondo uno schema non uniforme che si è dimostrato maggiormente affidabile in caso di guasti contemporanei a più satelliti. I satelliti sono disposti su 6 piani orbitali inclinati di 55° rispetto al piano equatoriale (quindi non coprono le zone polari) a forma di ellissi a bassa eccentricità. Ogni piano orbitale ha 4 satelliti, e i piani sono disposti in modo tale che ogni utilizzatore sulla terra possa ricevere i segnali di almeno 5 satelliti. La loro quota è di 20 200 km e compiono due orbite complete in un giorno siderale. Ciascun

satellite emette sulle frequenze di 1,5 e 1,2 GHz (portanti) derivate da un unico oscillatore ad alta stabilità di clock pari a 10,23 MHz che viene moltiplicato per 154 e 120 per ottenere la frequenza delle due portanti. Lo scopo della doppia frequenza è quello di eliminare l'errore dovuto alla rifrazione atmosferica. Su queste frequenze portanti, modulate in fase, viene modulato il messaggio di navigazione che ha un bit-rate pari a 50 bps, contenente effemeride, almanacco e stato della costellazione, tempo GPS e parametri di correzione ionosferica. Il GPS utilizza una modulazione numerica di tipo binaria (0;1). La funzione che ha il ricevitore di bordo è prima quella di identificare il satellite attraverso la banca dati di codici che quest'ultimo ha in suo possesso, infatti ogni satellite ha un codice e il ricevitore lo identifica grazie a quest'ultimo. L'altra funzione importante del ricevitore è quella di calcolare il delta t, ovvero il tempo impiegato dal segnale per arrivare dal satellite al ricevitore. Esso viene ricavato dalla misura dello slittamento necessario ad adattare la sequenza dei bit ricevuta dal satellite a quella identica replicata dal ricevitore di bordo. Ogni satellite non trasmette l'almanacco (parametri orbitali approssimati) dell'intera costellazione, ma esclusivamente le effemeridi relative a se stesso. La parte relativa alle effemeridi dura 18 secondi e viene ripetuta ogni 30 secondi. Per scaricare completamente l'almanacco dell'intera costellazione sono necessari invece 12,5 minuti. In tal modo il ricevitore GPS, mentre effettua il conteggio doppler, riceve i parametri dell'orbita da cui deriva la posizione del satellite: viene così a disporre di tutti gli elementi necessari a definire nello spazio la superficie di posizione. In orbita vi sono un minimo di 24 satelliti per la trasmissione di dati GPS, più 3 di scorta. Da questo si evince che da un punto del globo terrestre il ricevitore riesce a vedere solo la metà di essi, quindi 12. Ma non li vedrà mai tutti e 12 per via della loro inclinazione rispetto all'equatore. In più il ricevitore GPS stesso fa una discriminazione dei satelliti in base alla loro geometria e alla stima degli errori su ciascuno privilegiando quelli che forniscono maggior precisione. Ogni satellite è comunemente dotato di 4 oscillatori ad altissima precisione (4 perché così garantiscono il funzionamento di almeno uno), di cui 2 al cesio e 2 al rubidio; ha dei razzi per effettuare le correzioni di orbita e due pannelli solari di area pari a $7,25 \text{ m}^2$ per la produzione di energia. Ha infine batterie di emergenza per garantire l'apporto energetico nei periodi in cui il sole è eclissato. Pesa circa 845 kg ed ha una vita di progetto di 7,5 anni.

Il tracciamento dei satelliti comprende tutte quelle operazioni atte a determinare i parametri dell'orbita. A ciò provvedono 5 stazioni principali, site nei pressi dell'equatore, dette appunto di tracciamento (main tracking stations) e un centro di calcolo (computing center), ed in particolare a Colorado Springs , Diego Garcia ,

Hawaii , Ascensione e Kwajalein. Colorado Springs è anche sede del centro di calcolo. Ogni volta che ciascun satellite nel suo moto orbitale sorvola il territorio americano le stazioni di tracciamento ne registrano i dati doppler che vengono avviati al centro di calcolo e qui valorizzati per la determinazione dei parametri orbitali. Per risolvere questo problema è stato necessario venire in possesso di un fedele modello matematico del campo gravitazionale terrestre. L'EGM96 (Earth Geopotential Model 1996) è un modello geopotenziale della superficie terrestre costituito da una somma di armoniche sferiche fino al

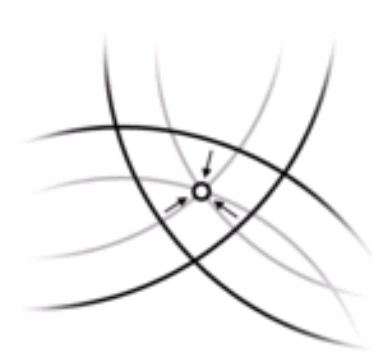


360° ordine e grado. È una soluzione composta di un insieme di equazioni differenziali, formata da:

1. una soluzione combinata del 70° ordine e grado;
2. una soluzione diagonale a blocchi dal grado 71° fino al 359°;
3. la soluzione di quadratura per il grado 360°.

Questo modello è il risultato di una collaborazione tra la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), il Goddard Space Flight Center della NASA e l'Ohio State University. La costruzione di questo modello è stato uno dei problemi di più ardua soluzione nello sviluppo del progetto Transit da cui è derivato l'attuale Navstar. I risultati di questa indagine sul campo gravitazionale terrestre, che sono di vasta portata dal punto di vista geodetico, possono riassumersi in un'immagine del globo nella quale vengono riportate le linee di eguale scostamento del geoide (LMM) dall'ellissoide di riferimento APL. I parametri orbitali di ciascun satellite, appena determinati presso il centro di calcolo, sono riuniti in un messaggio che viene inoltrato al satellite interessato mediante una delle stazioni di soccorrimento. Il satellite registra i parametri ricevuti nella sua memoria e li reirradia agli utenti.

1.3 Trilaterazione



Intersecando tre circonferenze il cui raggio è la distanza dal satellite (che conosciamo) con la superficie terrestre si può individuare un punto su di essa. Il principio di funzionamento si basa su un metodo di posizionamento sferico, che consiste nel misurare il tempo impiegato da un segnale radio a percorrere la distanza satellite-ricevitore. Poiché il ricevitore non sa quando è partito il segnale dal satellite per il calcolo della differenza dei tempi il segnale inviato dal satellite è di tipo orario grazie all'orologio presente sul satellite, quindi il ricevitore calcola l'esatta distanza di propagazione dal satellite a partire dalla differenza (dell'ordine dei microsecondi) dell'orario pervenuto con quello del proprio orologio perfettamente sincronizzato. Conoscendo il tempo impiegato dal segnale per giungere al ricevitore e l'esatta posizione di almeno 3 satelliti per

avere una posizione 2D (bidimensionale), e 4 per avere una posizione 3D (tridimensionale), è possibile determinare la posizione nello spazio del ricevitore stesso. Tale procedimento, chiamato trilaterazione, utilizza solo informazioni di distanza ed è simile alla triangolazione, dal quale tuttavia si differenzia per il fatto di fare a meno di informazioni riguardanti gli angoli. La precisione può essere ulteriormente incrementata grazie all'uso di sistemi come il WAAS (statunitense) o l'EGNOS (europeo), perfettamente compatibili tra di loro. Consistono in uno o due satelliti geostazionari che inviano dei segnali di correzione. La modalità Differential-GPS (DGPS) utilizza un collegamento radio per ricevere dati DGPS da una stazione di terra e ottenere un errore sulla posizione di un paio di metri. La modalità DGPS-IP sfrutta, anziché onde radio, la rete Internet per l'invio di informazioni di correzione.

1.4 Fonti di errore

Gli orologi satellitari sono affetti dalle conseguenze della curvatura dello spazio-tempo. Infatti, a causa degli effetti combinati della velocità relativa, che rallenta il tempo sul satellite di circa 7 microsecondi al giorno, e della minore curvatura dello spazio-tempo a livello dell'orbita del satellite, che lo accelera di 45 microsecondi, il tempo sul satellite scorre ad un ritmo leggermente più veloce che a terra, causando un anticipo di circa 38 microsecondi al giorno, e rendendo necessaria una correzione automatica da parte dell'elettronica di bordo. Questa osservazione fornisce un'ulteriore prova dell'esattezza della teoria di Einstein. L'effetto relativistico rilevato è infatti esattamente corrispondente a quello calcolabile teoricamente, almeno nei limiti di accuratezza forniti dagli strumenti di misura attualmente disponibili. Possono inoltre esistere altri tipi di errori GPS ad esempio di tipo atmosferico ed elettronico.

1.5 Correzione dell'errore

Con il termine di stazioni permanenti GPS si intendono dei ricevitori GPS fissi, sempre attivi, che registrano in continuo il segnale GPS e possono garantire correzioni differenziali ai singoli utenti. L'unione di più stazioni permanenti (solitamente almeno 4) crea l'entità solitamente definita RETE GPS. Una rete GPS (o GNSS se consideriamo anche le costellazioni GLONASS, GALILEO e COMPASS) è un insieme di stazioni di riferimento, omogeneo per caratteristiche di precisione e qualità dei sensori utilizzati, costantemente connesse tramite linee ad alta velocità ed affidabilità, ad una infrastruttura informatica costituita da hardware e software dedicati. L'infrastruttura dovrà essere in grado di gestire il flusso dati proveniente dalle stazioni di riferimento e di erogare servizi all'utenza sotto forma di correzioni real time.

Il sistema di posizionamento Galileo

2.1 Introduzione

Il sistema di posizionamento Galileo è un progetto europeo pensato per un utilizzo sia civile che militare e concepito al fine di superare la dipendenza Europea da sistemi di altre nazioni come il GPS americano prima illustrato. L'entrata in servizio è prevista per il 2013 e conterà 30 satelliti orbitanti su 3 piani inclinati rispetto al piano equatoriale terrestre a una quota di circa 24.000 km. Le principali novità rispetto al sistema GPS sono rappresentate:

1. dalla maggiore continuità del servizio erogato, in quanto non sarà disattivato senza preavviso come accaduto per il GPS;
2. dall'aumento della copertura globale soprattutto alle alte latitudini;
3. da una maggiore disponibilità di segnale nelle zone urbane;
4. da una maggiore affidabilità legata all'invio di messaggi di integrità del segnale;
5. da una maggiore precisione;
6. dalla possibilità di trattare i dati grezzi per sviluppare applicazioni.

Inoltre la funzionalità di Galileo è tale da poter agire autonomamente ovvero in compatibilità con i sistemi esistenti e congiuntamente con il GPS ovvero in regime di interoperabilità.

2.2 Programmazione delle attività di progetto

Il programma si articola in tre fasi:

1. fase di progetto e sviluppo, comprendente la definizione, lo sviluppo e la validazione in orbita di 2-4 satelliti e di alcune delle principali basi di controllo a terra;
2. fase di validazione in orbita, che prevede il completamento della costellazione e del segmento di terra;
3. fase commerciale, con la piena operatività del sistema.

La fase di definizione completata nel 2003, ha prodotto le specifiche base del sistema. La fase di validazione verrà portata a termine con lo sviluppo ed il testing di quattro satelliti e del segmento di terra (ground stations e control center).

Galileo è rivolto principalmente al settore civile-commerciale mondiale. Il sistema europeo sarà sempre disponibile sia ai civili che ai militari e con la massima accuratezza. Un ritorno economico per le industrie europee si avrà anche con la produzione dei ricevitori Galileo di fabbricazione europea. La Commissione europea ha avuto problemi ad assicurare la copertura economica al proseguimento del progetto e ci sono state divisioni tra le nazioni coinvolte. Italia e Francia sono state inizialmente ampiamente favorevoli, mentre altri stati tra cui Germania, Paesi Bassi e Inghilterra preferirebbero continuare ad usare gratuitamente il sistema americano piuttosto che finanziarne uno nuovo. In seguito all'attacco terroristico dell'11 settembre 2001, tutti i paesi europei si schierarono in favore del progetto Galileo e i finanziamenti divennero più che sufficienti. Rimangono però alcune divisioni su argomenti più prettamente politici. I trenta satelliti previsti dovrebbero essere messi in orbita a partire dal 2011 con un costo totale stimato in 3 miliardi di euro, comprese le infrastrutture di terra. Almeno due terzi del costo saranno coperti da aziende private ed investitori, mentre la rimanente spesa è suddivisa tra Agenzia Spaziale Europea e Unione Europea. Nel settembre 2003 la Cina si è unita al progetto apportando un investimento di 230 milioni di euro nei due anni seguenti. Israele è entrato come partner del progetto nel luglio 2004. Il 3 giugno 2005 l'Unione europea e l'Ucraina hanno iniziato delle trattative per l'adesione di quest'ultima al progetto. Ci sono diverse voci sull'adesione di altre nazioni come India, Brasile, Messico, Cile, Giappone, Corea del Sud, Australia, Marocco e Canada, mentre molto probabilmente la Russia potrebbe pensare ad un'integrazione con il suo sistema GLONASS. Un servizio criptato commerciale a larga banda e alta accuratezza sarà fornito ad un costo aggiuntivo, mentre il servizio di base di Galileo sarà liberamente disponibile a chiunque sia dotato di un ricevitore compatibile. L'Unione Europea si è accordata nel giugno 2004 con gli U.S.A per adottare uno schema di modulazione noto con il nome di Binary Offset Carrier 1.1 che permette la trasmissione dei servizi Galileo sulle stesse frequenze adottate dal GPS americano senza procurare o subire da esso interferenze.

2.2.1 Galileo In orbit Validation Elements (GIOVE)

Il 28 dicembre 2005 alle 06:19 (ora centrale europea) dalla base di Baikonur (Kazakistan) è avvenuto il lancio del primo satellite del programma: GSTB-V2/A, ribattezzato poi come "GIOVE-A" dal nome attribuito al programma di prova del sistema Galileo, "GIOVE" (Galileo In-Orbit Validation Element). È previsto il lancio di due satelliti di prova, GSTB-V2/A e GSTB-V2/B (acronimo di Galileo Satellite Test Bed - Version 2, A e B), per effettuare prove sulle frequenze radio e sulla stabilità in orbita degli orologi e verranno successivamente affiancati da altri due satelliti che completeranno il sistema di verifica e convalida in orbita di Galileo. Rispetto a GSTB-V2/A, GSTB-V2/B trasporta in più un ulteriore orologio atomico all'idrogeno e degli amplificatori di potenza del segnale. Il GSTB-V2/B è stato lanciato il 26 aprile 2008 alle 22:16 UTC. Al momento quindi, sono utilizzati due satelliti, GIOVE-A e GIOVE-B, e il relativo segmento di terra. Questo progetto ha portato ad un grande progresso nella tecnologia spaziale europea, ottenendo obiettivi mai raggiunti prima quali l'utilizzo di un'orbita MEO (Medium Earth Orbit)



Figura 1: i vari tipi di orbita satellitare

MEO (Medium Earth Orbit) è un'orbita compresa tra LEO (Low Earth Orbit) e un'Orbita Geostazionaria (GEO)

per satelliti di navigazione, la messa a punto di orologi mai così precisi e la sperimentazione di nuovi sistemi di trasmissione e trattamento di segnali e di navigazione. I primi quattro (dei trenta) satelliti operativi della costellazione saranno lanciati in orbita nel 2011 per verificare il sistema Galileo nelle sue strutture di terra e spaziali (fase In-Orbit Validation).



GIOVE-A

Il satellite è stabilizzato su tre assi. Ha un corpo di forma cubica di dimensioni 1,3 x 1,8 x 1,65 m, con una massa al lancio di 600 kg. Due ali di pannelli solari, lunghe 4,54 m ciascuna, soddisfano la richiesta di 700

W di potenza. La propulsione utilizza due bombole di butano da 25 kg. Il carico utile è tre volte ridondante e comprende un'antenna phased array in banda L; due orologi atomici al rubidio con una precisione di 10^{-8} s al giorno; dei rilevatori per la misura delle radiazioni in orbita; il ricevitore di navigazione e, infine, l'unità di generazione del segnale di navigazione (NSGU).



GIOVE-B



Orologio all'idrogeno
Precisione 10^{-9} s x die

Stabilizzato su tre assi, il satellite ha un corpo di dimensioni 0,95 x 0,95 x 2,4 m e una massa al lancio di 530 kg. I pannelli solari, la cui lunghezza d'ala è di 4,34 m, forniscono 1100 W di potenza. La propulsione avviene tramite un motore ad idrazina alimentato da una bombola di 28 kg.

Il carico utile è doppiamente ridondante e comprende un'antenna phased array in banda L, come il suo predecessore; due orologi atomici al rubidio e uno all'idrogeno, al momento il più affidabile mai installato su un satellite, con una precisione di 10^{-9} s al giorno, un monitor per la misura delle radiazioni in orbita e, infine, l'unità di generazione del segnale di navigazione (NSGU).

2.3 Struttura

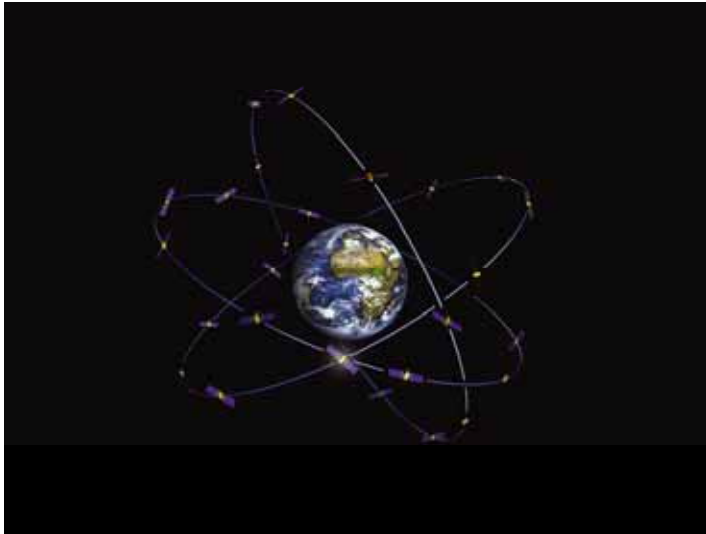
Galileo è composto da tre segmenti:

1. Il segmento spaziale (GSS)
2. Il segmento terrestre (GGS)
3. Il segmento utente (GUS)

Le stazioni di monitoraggio ricevono continuamente i segnali emessi da tutti i satelliti della costellazione. I dati raccolti da ciascuna stazione comprendono il segnale di clock del satellite, la sue correzioni rispetto al tempo universale UTC (Universal Time Coordinate), le effemeridi del singolo satellite e vari altri segnali di stato. Le effemeridi informano il ricevitore sull'esatta posizione del satellite nello spazio, così che il ricevitore possa conoscere esattamente dove si trova l'origine del segnale che ha ricevuto. Ogni satellite trasmette le proprie effemeridi ed in aggiunta un almanacco, che è un'informazione più generale rispetto a quella contenuta nelle effemeridi, e che riguarda la posizione di tutti i satelliti della costellazione Galileo. In tal modo, il ricevitore sa sempre dove e quando ricercare i satelliti nel momento dell'individuazione della posizione. Una volta raccolti, i dati vengono inviati alla stazione di elaborazione centrale che ha il compito di eseguire tutte le misure necessarie per correggere le informazioni inviate dai satelliti Galileo. Il centro di controllo effettua una stima dell'orbita e dell'offset d'orologio previsti per ciascun satellite nelle ore successive; quindi le orbite previste vengono parametrizzate ed i dati re-inviati ai satelliti, i quali, a loro volta, inserendoli nei dati di comunicazione che diffondono continuamente (che pertanto sono indicati con effemeridi trasmesse) li comunicheranno agli utenti durante le ore successive. Gli utilizzatori finali saranno sia civili che militari. Ogni utente sarà dotato di un ricevitore Galileo capace di acquisire i segnali emessi dai satelliti Galileo per stimare il suo posizionamento tridimensionale in tempo reale.

2.3.1 Il segmento spaziale

Il segmento spaziale è costituito da 30 satelliti su tre diverse orbite MEO ad un'altezza di 23222 km.



Walker Constellation

Caratteristiche dei satelliti

massa al lancio: circa 700 kg
consumo di potenza: < 1,6 kW
dimensioni del corpo: stima in $2,7 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$
vita media: 12 anni
TT&C (Tracking, Telemetry & Command): banda S
ricezione dei dati di missione: banda C
trasmissione del segnale Galileo di navigazione: banda L.

Ognuna delle 3 orbite è inclinata di 56° rispetto al piano dell'equatore, il periodo orbitale sarà di circa 14 ore e 4 minuti con periodo di ripetizione della traccia al suolo di 10 giorni. Di questi 30 satelliti, 27 sono operativi e distribuiti in 9 per ogni piano orbitale, 3 sono poi disponibili per la sostituzione di un satellite mal funzionante in caso di necessità. La scelta di questo tipo di disposizione è stata effettuata per raggiungere il massimo livello di efficienza: infatti, in caso di malfunzionamento di un singolo satellite, si potrà procedere rapidamente al suo rimpiazzo, senza che tale operazione venga fatta lanciandone uno nuovo da Terra, il che avverrebbe plausibilmente in tempi abbastanza lunghi. I collegamenti per la TT&C avvengono attraverso un trasponder trasmissione/ricezione che opera in banda S, con una singola portante in uplink modulata BPSK/PM (2034,747 MHz) e una singola portante downlink modulata BPSK/PM (2209,68 MHz). I dati di missione (mission data) sono inviati dalle stazioni di uplink di terra al satellite in banda C. I satelliti sono stati studiati per supportare la trasmissione del segnale Galileo verso l'utenza finale fino a quattro portanti poste in banda L. Le portanti sono modulate mediante la combinazione di un codice a spettro espanso (spread spectrum) ottenuta dalla modulazione digitale di una sequenza di codice Pseudo-Random Noise (PRN) unica per ogni satellite con i dati di navigazione. Grazie all'utilizzo del codice PRN i segnali trasmessi dai vari satelliti non interferiscono significativamente tra loro. Tutti i satelliti operativi trasmetteranno sulle stesse bande di frequenza e, per selezionare i segnali in ricezione, sarà utilizzata la tecnica del Code Division Multiple Access (CDMA). In ricezione, dato che le sequenze PRN sono quasi incorrelate tra di loro, i segnali possono essere separati utilizzando una tecnica CDMA; il ricevitore deve quindi essere in grado di replicare le varie sequenze PRN oltre alle frequenze portanti. I satelliti, oltre a fornire un servizio di timing, devono trasmettere il segnale Galileo di navigazione in banda L; questi segnali vengono generati a bordo in banda base nell'unità elettronica designata Navigation Signal Generation Unit (NSGU), e che rappresenta il cervello di elaborazione del segnale Galileo su ogni satellite della costellazione. L'NSGU riceve in ingresso i dati di navigazione trasmessi da terra dal Galileo Control System (GCS) (tipicamente attraverso degli uplink diretti in banda C o in caso di degradazione del sistema, indirettamente attraverso la banda S usata per TT&C), e li combina opportunamente con i codici PRN (anch'essi generati a bordo dalla NSGU) secondo il riferimento temporale derivato dal clock atomico attivo sul singolo satellite. Il sistema avrà anche la possibilità di diffondere, secondo un determinato ordine di priorità, i cosiddetti messaggi d'integrità, ricevuti sotto forma di pacchetti ricevuti sia dal canale Galileo (globale) o da canali esterni (regionali) (fino a 5, detti ERIS da External Region Integrity Service). I pacchetti di integrità ricevuti a bordo del satellite sono incorporati dalla NSGU dentro le trame del segnale di navigazione senza subire alcuna manipolazione, e di conseguenza sono trasmessi agli utenti del sistema Galileo in tempo reale. Il sistema è capace di funzionare gestendo una vasta gamma di velocità di trasmissione dati (trasmettendo data messages), da un minimo di 50 sps fino a 1000 sps (sps = symbol per

seconds). Per quanto riguarda l'accuratezza del sistema esistono differenti fonti di incertezza che possono essere raggruppate in tre principali categorie:

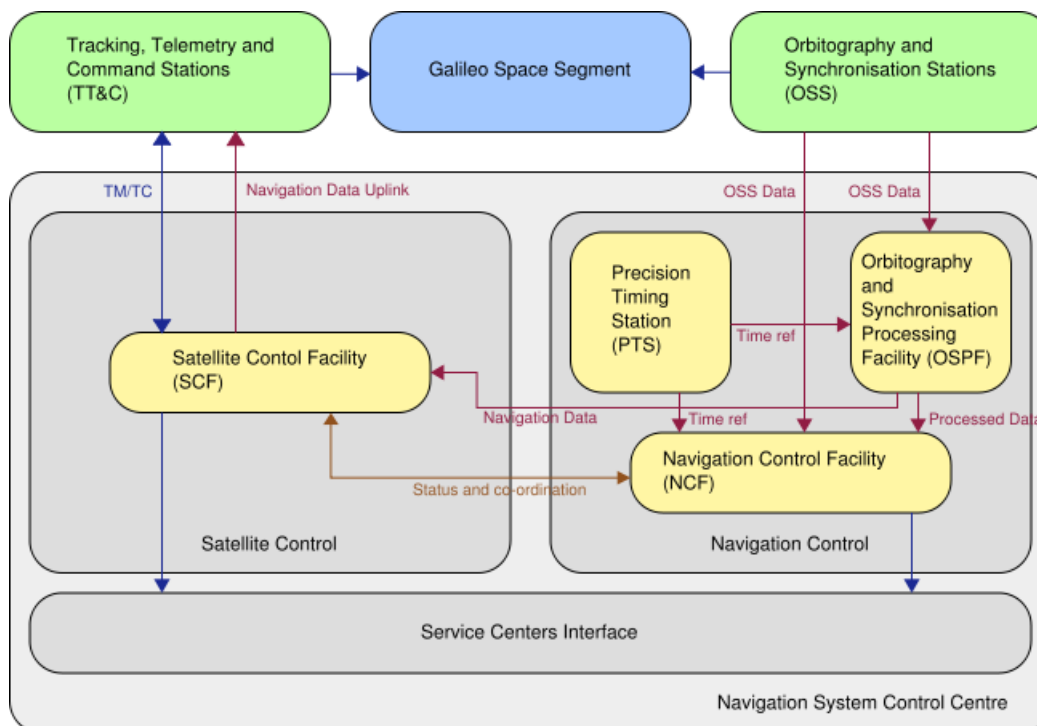
1. Dilution of Precision (DOP);
2. Effetti del segnale;
3. User Equivalent Range Error (UERE).

Per DOP si intende la misura di quanto l'orbita dei satelliti segua quella ideale, mantenendo valido il modello geometrico di riferimento. L'effetto di segnali altera la capacità di valutare con precisione il timing degli stessi. L'UERE deriva da una predizione imprecisa nel determinare l'orbita del satellite e la sincronizzazione temporale (ODTS), inoltre da una previsione non precisa dell'effetto multipath, il quale introduce ritardi e distorsione nei segnali trasmessi. Questi ultimi, grazie ad un sistema di controllo terrestre, possono essere ridotti ad un errore inferiore ai 65 centimetri.

Informazioni aggiuntive per Applicazioni di Sicurezza	Informazioni aggiuntive per Applicazioni Commerciali
Informazioni sulla disponibilità del servizio	Aggiornamenti alle mappe
Messaggi di ricerca e soccorso	Aggiornamenti temporanei alle mappe (traffico, deviazioni...)
Informazioni meteorologiche	Punti d'interesse (distributori, alberghi...)
Avvisi d'incidente	

2.3.2 Il segmento di terra

Esso è diviso in due unità: il segmento di Controllo (GCS) e il segmento di Missione (GMS). Il primo dovrà provvedere al controllo ed il monitoraggio dei satelliti, che avverrà attraverso una serie di stazioni di controllo, telemetria e comando (Telemetry, Tracking & Control, TT&C); mentre il secondo al controllo di missione, che prevederà tutta quella serie di operazioni necessarie per determinare l'orbita dei satelliti, per il monitoraggio del timing, e per la determinazione e diffusione attraverso i satelliti delle informazioni d'integrità.



Gli elementi costitutivi sono quindi: un centro direzionale, Navigation System Control Center (NSCC) o più comunemente Galileo Control Centre (GCC); un sistema supervisore dei servizi di integrità e navigazione, indicato con Mission Control Facility (MCF); un controllore di mescolamento in un singolo flusso dei dati generati nell'GCC (multiplexing), detto Message Generation Facility (MGF); una rete globale di stazioni di controllo dell'orbita e di sincronizzazione, Orbitography & Synchronisation Processing Facility (OSPF); una serie di stazioni di controllo, telemetria e comando dei satelliti (Telemetry, Tracking & Control, TT&C) che vanno sotto il nome di Satellite Control Facility (SCF); una rete di stazioni per le trasmissioni verso i satelliti, dette Up-Link Station (ULS). un riferimento temporale stabile ed affidabile, realizzato nella Precision Timing Facility (PTF); un controllore in tempo reale di tutti gli elementi del segmento terrestre, detto Ground Assets Control Facility (GACF); un centro che si occupa della gestione e della distribuzione delle chiavi di sicurezza per i servizi ad accesso controllato, detto Key Management Facility (KMF); un'interfaccia che gestisce la comunicazione con le entità esterne che scambiano traffico con il GCC, detto Service Product Facility (SPF). Ogni OSS effettua delle misurazioni che vengono inviate al NSCC assieme alle informazioni di navigazione provenienti dai satelliti, a informazioni meteorologiche ed altri dati. All'interno dell'NSCC, il centro di controllo dei satelliti (SCF) effettua la manutenzione dei satelliti, controlla le orbite, oltre ad inviare le informazioni di telemetria e controllo tramite le stazioni TT&C. L'NSCC comprende anche un centro per l'elaborazione delle informazioni di orbita e sincronizzazione (OSPF); un centro (PTS) deputato alla fornitura di un riferimento temporale per l'intero sistema (Galileo System Time); un centro di controllo globale della navigazione (NCF). L'OSPF si occupa di calcolare le effemeridi per ogni satellite e lo scarto temporale degli orologi a bordo, effettuando poi una predizione di questi parametri per generare il cosiddetto SISA (signal in-space accuracy), una stima dell'accuratezza raggiunta dagli strumenti in orbita. L'NCF, infine, si occupa di controllare, monitorare e gestire OSPF, OSS e PTS. Esiste inoltre un'interfaccia esterna al sistema che si occupa di gestire la comunicazione con entità esterne detta Service Centres Interface. Il segmento spaziale e quello di terra costituiscono il cosiddetto Galileo Global Component in quanto sono previste anche delle regioni locali dette External Region Component.

2.3.3 Il segmento utente

Gli utenti finali del sistema Galileo disporranno di una vasta gamma di terminali riceventi in funzione dei segnali diffusi dai satelliti e relativi ai diversi servizi di base offerti (vedi classificazione dei servizi). Sono previsti anche ricevitori in grado di lavorare contemporaneamente con i segnali di Galileo e GPS, capaci quindi di sfruttare in pieno l'inter-operabilità dei due sistemi conseguendo delle prestazioni migliori rispetto a quelle ottenibili tramite l'uso di un solo sistema. Un ulteriore tipologia di ricevitore sarà richiesta per il servizio SAR (Search and Rescue Support Service).

2.4 Il Sistema di Posizionamento

Il sistema di posizionamento è, come già descritto, un sistema basato su una costellazione di satelliti artificiali in grado di fornire con estrema precisione le coordinate geografiche (longitudine, latitudine, quota) e la velocità di qualsiasi mezzo fisso o mobile in ogni punto in prossimità della superficie Terra e nell'atmosfera, con continuità temporale. Ciascun satellite trasmette continuamente dei segnali codificati contenenti varie informazioni come i dati orbitali, che servono ad un ricevitore satellitare per il calcolo della posizione del satellite stesso (le cosiddette effemeridi), ed un riferimento temporale per la determinazione degli istanti esatti di trasmissione dei segnali stessi. Nel caso in cui il ricevitore satellitare disponesse di un orologio locale perfettamente sincronizzato con quello del satellite in volo che gli irradia il segnale, sarebbe possibile conoscere con esattezza il ritardo di propagazione del segnale, ottenendolo dalla misura dell'intervallo di tempo tra il segnale orario (ricevuto nel messaggio inviato e rappresentante il tempo di invio del segnale), e il tempo segnato dall'orologio locale del ricevitore. Supponendo di misurare tale ritardo di propagazione e indicarlo con τ , se indichiamo poi con R la distanza satellite-ricevitore (reale) essa risulta pari a

$$R = c\tau$$

dove c è la velocità della luce.

Il luogo geometrico dei punti nello spazio tridimensionale che soddisfano questa relazione è definito sfera di posizione rispetto al satellite, in quanto corrisponde ad una sfera avente come centro la posizione istantanea occupata dal satellite proprio nell'istante di invio del segnale e raggio pari alla distanza misurata R . Il ricevitore può quindi occupare un generico punto sulla superficie della sfera di posizione. Avendo a disposizione due satelliti si possono effettuare due misure di distanza dallo stesso ricevitore, individuando così due sfere di posizione che si intersecano in una circonferenza nello spazio tridimensionale; in questo caso il ricevitore si troverà a occupare un generico punto della circonferenza. Aggiungendo una terza misura si trova un'altra sfera di posizione che, intersecandosi con le due precedenti (o equivalentemente con la circonferenza loro intersezione) fornirà due possibili punti nello spazio tridimensionale per la posizione del ricevitore. L'ambiguità residua tra le due posizioni è facilmente risolvibile notando che uno dei due punti si troverà ad una quota non compatibile l'effettiva presenza del ricevitore e che è possibile scartare con sicurezza, almeno in molte applicazioni. Geometricamente, disponendo di un quarto satellite, il punto occupato dal ricevitore sarebbe univocamente determinato dall'intersezione delle quattro sfere di posizione.

Quanto detto è vero supponendo che l'utente-ricevitore abbia a disposizione un orologio locale sincronizzato con quello a bordo del satellite; nella realtà, l'orologio del ricevitore è relativamente impreciso. Questo implica un scostamento temporale dt (time-bias) tra il tempo segnato dall'orologio del ricevitore e il riferimento temporale a bordo del satellite. Questo scarto temporale crea inevitabilmente un errore di stima della posizione pari a cdt che rappresenta un'ulteriore incognita insieme alle tre coordinate spaziali del ricevitore e implica necessariamente l'utilizzo di un quarto satellite con un'altra misura della distanza per risolvere il problema. In effetti, quello che si misura in questo modo con il ricevitore sono quattro stime delle quattro distanze reali dai satelliti e chiamate, coerentemente, pseudo-distanze (Ru) poiché esse differiscono di ' cdt ' dalla rispettiva misura reale. Analiticamente questa procedura equivale alla risoluzione di un sistema di equazioni non lineari di quattro equazioni in quattro incognite:

$$\sqrt{(x_k - x_u)^2 + (y_k - y_u)^2 + (z_k - z_u)^2} = (Ru_k - cdt)$$

con $k = 1, 2, 3, 4$ e dove

$Ru_k = c\tau_k$ sono le pseudo-distanze misurate dal ricevitore dai quattro satelliti senza correzione dell'orologio,

(x_u, y_u, z_u) sono le coordinate del ricevitore-utente che insieme a cdt rappresentano le quattro incognite del sistema,

(x_k, y_k, z_k) sono le coordinate del k -simo satellite, ricavabili dalle effemeridi trasmesse in ogni singolo segnale captato dal ricevitore.

2.5 SIS (Signal In Space)

I satelliti del sistema Galileo trasmettono tutti un segnale strutturato che si propaga verso l'utente finale attraverso lo spazio e l'atmosfera, il Signal In Space, (SIS); i segnali sono trasmessi mediante 3 diverse portanti, cui corrispondono 3 bande diverse che corrispondono alle omonime portanti:

1. E5 - 1164-1215 MHz, cioè ad una frequenza portante di 1191.795 MHz e larghezza di banda trasmessa di 92.07 MHz;
2. E6 - 1260-1300 MHz, cioè ad una frequenza portante di 1278.750 MHz e larghezza di banda trasmessa di 40.92 MHz;
3. L1 (indicata anche E2-L1-E1) - 1559-1591 MHz, cioè ad una frequenza portante di 1575.420 MHz e larghezza di banda trasmessa di 40.92 MHz.

Da notare la sovrapposizione della banda L1 di Galileo con la stessa del GPS e ancora quella tra E5-A ed L5 del GPS; queste bande sono parzialmente sovrapposte per garantire l'inter-operabilità tra i due sistemi. Infatti, i tipi di modulazione usati rendono i due sistemi a tutti gli effetti compatibili e il fatto che la frequenza centrale della banda sia la stessa garantisce all'utente finale l'accesso a entrambi i sistemi con un minimo incremento della complessità/costo del ricevitore.

2.6 Servizi

Il sistema Galileo è stato concepito come una applicazione nucleo sopra alla quale ogni altra applicazione può essere implementata. L'Autorità europea di supervisione (GSA) ha rilasciato la nuova versione del documento Open Service Signal-In-Space Interface Control, indirizzato agli sviluppatori per favorire la creazione di prodotti ed applicazioni. L'impiego di Galileo riguarda una serie di servizi integrati: può spaziare dall'utilizzo nel campo dei trasporti (aerei, su rotaia, marittimi, stradali, pedonali), al sincronismo, alla sorveglianza, come supporto alla legge, per applicazioni ingegneristiche, scientifiche, ambientali ed anche ricreative. Il suo influsso condiziona anche aziende nel settore bancario, energetico, assicurativo, delle telecomunicazioni, del turismo e agricolo.

Galileo nasce per essere un sistema di navigazione da applicare nel campo dei trasporti ed è stato progettato per soddisfare le molteplici necessità dei vari segmenti di utenza presenti nel mercato; in campo avionico l'avvento del GNSS (Global Navigation Satellite System) porterà alla possibilità di effettuare senza nessun rischio manovre critiche quali atterraggi e decolli anche in condizioni di scarsissima visibilità, portando ad una progressiva riduzione dei sistemi di controllo terrestri.

In campo marittimo porterà allo sviluppo dell'AIS (Automated Identification System) il quale aumenterà la sicurezza nella navigazione. Le applicazioni per quanto riguarda il traffico su strada sono tantissime ma la più interessante riguarda gli Advanced Driver Assistance Systems, sistemi ad alta automazione integrati in autoveicoli per permettere il controllo delle collisioni, aumentare la visibilità e consentire delle manovre automatizzate a basse velocità.

Grazie alle sue caratteristiche certificate, ed ai servizi garantiti (dalla sua natura per usi civili) è adatto a tutte le applicazioni safety-of-life, dedicate cioè a servizi che devono assicurare un'elevata affidabilità per evitare possibili danni a cose o persone.

Per quanto riguarda il settore energetico, l'uso di orologi atomici può facilitare la sincronizzazione delle linee elettriche facilitando la trasmissione di energia elettrica, può inoltre monitorare le linee e quindi velocizzare il processo di manutenzione delle stesse. Esistono dei benefici anche per il settore del petrolio e del gas.

Sempre grazie agli orologi atomici i satelliti possono rilasciare dei data-stamps in modo tale da autenticare transazioni finanziarie effettuate via web. Per le agenzie di assicurazioni Galileo diventa un modo per monitorare e controllare lo stato di beni introducendo un prezzo dinamico basato sul rischio associato per ogni singola polizza. Le banche invece possono monitorare il trasporto di oro, banconote e preziosi in genere, aumentando i propri standard di sicurezza.

Gli agricoltori non potranno più utilizzare indiscriminatamente fertilizzanti e pesticidi se monitorati dal sistema.

Per quanto riguarda la sicurezza dei cittadini, è in atto un progetto per la realizzazione di un numero di emergenza europeo l' E-112, questo potrà contare su Galileo per tracciare la posizione di persone in difficoltà. Durante situazioni di crisi, dove la velocità di azione è fondamentale, avere la possibilità di conoscere esattamente la posizione precisa del luogo in cui intervenire è di vitale importanza, basti pensare ad incendi, inondazioni, terremoti.

Galileo sarà un valido alleato della comunità scientifica dato che la precisa definizione delle coordinate permetterà anche di creare accurate mappe oceaniche e dei territori ghiacciati, fornire dettagliati valori dei livelli delle maree e dei livelli dei fiumi, effettuare il tracking di iceberg e molti altri compiti di grandissima importanza.

2.6.1 Servizio Base (OS)

È il servizio base, fornirà servizi di posizionamento, temporizzazione e navigazione accessibili gratuitamente a chiunque, quindi rivolto al mercato di navigazione di massa, non offrirà però alcun servizio di integrità.

2.6.2 Servizio Commerciale (CS)

Il servizio commerciale, sarà un servizio criptato e consentirà, dietro pagamento, di avere un'accuratezza inferiore al metro; ciò si configurerà come un valore aggiunto all'OS. Il CS potrà essere completato da stazioni a terra per portare l'accuratezza ad un valore inferiore ai 10 cm. Esso offrirà anche servizio garantito di ranging e timing per usi professionali. L'accesso sarà controllato a livello del ricevitore mediante l'uso di chiavi.

2.6.3 Servizio Governativo (PRS) e Servizio Vitale (SoL)

La loro funzione principale è la robustezza rispetto ai disturbi e il rilevamento affidabile dei problemi entro 10 secondi. Sono specificatamente progettati, rispettivamente, per operatori di sicurezza (polizia, militari, ecc) dell'Unione Europea e degli stati membri e applicazioni strategiche per la sicurezza nei trasporti aerei, marittimi e ferroviari (controllo del traffico aereo, atterraggio automatizzato di velivoli, guida dei treni, navigazione di navi, ecc). Il SOL garantirà anche l' integrità e l' autenticazione, ma solo su richiesta dell'utente. Questi servizi richiedono l'uso di ricevitori più sofisticati rispetto all'OS.

2.6.4 Servizio di ricerca e salvataggio (SAR)

Esso fornirà assistenza al sistema COSPAS-SARSAT per la gestione di allarmi e la localizzazione di utenti in pericolo al fine di assistere le operazioni di soccorso. Il SAR verrà usato rilevando radiofari di emergenza e rispondendo ad essi con degli opportuni messaggi di risposta nel contesto del messaggio del SoL.

2.6.5 Riepilogo tecnico dei servizi offerti da Galileo

	OS	CS	SOL	PRS
Copertura	Globale	Globale	Globale	Globale
Precisione di posizionamento [orizzontale (H) e verticale (V)]	15m (H) – 35m (V) (single frequency) 4m (H) – 8m (V) (dual frequency)	15m (H) – 35m (V) (single frequency) 4m (H) – 8m (V) (dual frequency)	4m (H) – 8m (V) (dual frequency)	15m (H) – 35m (V) (single frequency) 6,5m (H) – 12m (V) (dual frequency)
Precisione di timing	30 ns	30 ns	30 ns	30 ns
Disponibilità	99,5 %	99,5 %	99,5 %	99,5 %
Integrità	NO	NO	Sì	Sì
Tipologia di accesso	Libero	Controllato (Ranging Code, Nav. Data Mess.)	Controllato (Nav. Data Mess.)	Controllato (Ranging Code, Nav. Data Mess.)
Certificazione e garanzia del servizio	NO	Possibile	Sì	Sì

Bibliografia

1. European GNSS (Galileo) Open Service. Signal In Space Interface Control Document. © European Union 2010, OS SIS ICD, Issue 1.1
2. Sito dell' European Space Agency. www.esa.int
3. Sito dell'enciclopedia Wikipedia. en.wikipedia.org.