

Zeitschrift: Rivista militare della Svizzera italiana
Herausgeber: Lugano : Amministrazione RMSI
Band: 76 (2004)
Heft: 1

Artikel: Il sistema GPS : una guide dall'alto
Autor: De Marchi, Fausto
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-283695>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Il sistema GPS

Una guida dall'alto

ING. FAUSTO DE MARCHI

Forse qualche lettore o lettrice si è trovato una volta in montagna in una situazione difficile, ad esempio dover cercare il sentiero o la capanna nella nebbia o di notte senza sapere con precisione la propria posizione. O forse si è trovato su una barca al largo di una costa con il mare in burrasca e dover cercare il porto più vicino cercando ovviamente di evitare le possibili secche. In casi d'emergenza come questi l'aver con sé un ricevitore GPS risulterebbe estremamente utile. Infatti il sistema di navigazione satellitare permette a chiunque di poter conoscere con precisione, in qualsiasi momento e con qualsiasi condizione meteorologica la propria posizione sulla terra espressa nel sistema di coordinate geografiche locale. Questa tecnologia è destinata a essere adoperata in futuro sempre più frequentemente. Una potenzialità di mercato enorme, sia nel campo delle applicazioni civili come in quelle militari. Ciò è dovuto soprattutto allo sviluppo di ricevitori a basso costo, alla miniaturizzazione dei suoi chips (oggi hanno dimensioni paragonabili a un francobollo), alla possibilità d'utilizzare il sistema di navigazione satellitare illimitatamente nel tempo e (finora) gratuitamente e non da ultimo grazie alla affidabilità dei suoi satelliti e alla precisione dei suoi dati.

Questo articolo sulla RMSI vuol essere un contributo divulgativo e nello stesso tempo permettere al lettore e alla lettrice di trovare qua e là qualche spunto di particolare interesse. Senza entrare nei dettagli scientifici si è voluto descrivere le componenti più importanti del sistema di navigazione, esporre i principi di base del suo funzionamento, confrontare le caratteristiche più importanti tra il sistema americano GPS con quelle russe del sistema GLONASS e con quelle del progetto europeo GALILEO. Ed infine descrivere brevemente alcune delle applicazioni più conosciute o più promettenti nel campo civile e militare.

Cosa è il GPS ?

Il GPS (Global Positioning System), a cui si aggiunge sovente l'acronimo di NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging), è un sistema di posizionamento americano basato su una costellazione di 24 satelliti artificiali orbitanti tutti alla quota media-alta di 20'200 km sopra la terra e con un periodo di rivoluzione di 12 ore sideree (Fig. 1). Per garantire la copertura richiesta basterebbero 21 satelliti, ma vengono mantenuti altri 3 satelliti in riserva, pronti ad essere spostati di orbita con piccoli motori a razzo di cui dispongono, in modo da sostituire quei satelliti che entrassero improvvisamente in avaria, oppure per garantire una migliore copertura in alcune zone terrestri, soprattutto in occasioni di conflitti armati.

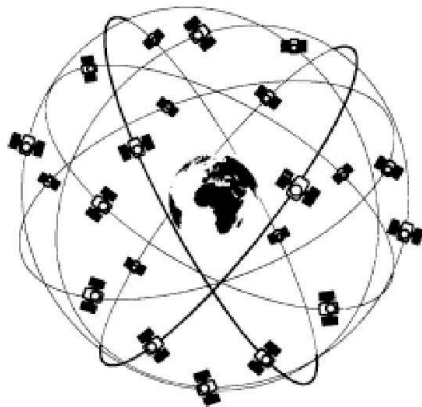


Fig. 1: costellazione dei satelliti

Esso rappresenta un sistema di navigazione globale e tridimensionale, continuo nel tempo e che funziona con qualsiasi condizione meteorologica. È in grado quindi di fornire, se muniti dell'apposito ricevitore, in ogni punto del globo terrestre, ad ogni istante e con grande precisione le coordinate del punto dove si trova l'utente, la sua altimetria, la direzione di marcia e la velocità se l'utente si trova su un mezzo mobile e il l'ora esatta della misurazione.

Il sistema di navigazione satellitare americano GPS non è l'unico oggi esistente. La Russia ne ha sviluppato uno proprio (il programma iniziò nel 1982) dalle caratteristiche simile a quello americano e conosciuto con l'acronimo di GLONASS (Global Navigation Satellites System). Tuttavia difficoltà tecniche, una affidabilità dei satelliti assai limitata e pochi mezzi finanziari per ovviare a guasti e difetti rendono GLONASS poco utilizzato e poco attrattivo. L'Europa ha in cantiere un ambizioso progetto per i prossimi anni: sviluppare e rendere operativo il sistema GALILEO, che romperà il monopolio americano in questo settore, e che usando tecnologie più moderne sarà più efficiente ed affidabile del GPS. Alcune considerazioni di complemento sul sistema GLONASS e soprattutto su GALILEO sono proposte più avanti.

GPS non è un sistema recente: esso ha conosciuto i suoi albori circa 30 anni orsono e non fu neppure il primo sistema di navigazione satellitare in assoluto. La Marina statunitense utilizzava già nel 1964 un sistema satellitare di posizionamento chiamato TRANSIT per localizzare i propri sottomarini atomici Polaris. TRANSIT mostrò tuttavia subi-

Il GPS (Global Positioning System), a cui si aggiunge sovente l'acronimo di NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging), è un sistema di posizionamento americano basato su una costellazione di 24 satelliti artificiali orbitanti tutti alla quota media-alta di 20'200 km sopra la terra

Un satellite GPS pesa pressapoco 1.5 tonnellate e possiede come attrezzatura di base un ricevitore, un trasmettitore, antenne di collegamento, un orologio atomico, 5 oscillatori, un microprocessore per il controllo di tutte le funzioni essenziali a cui si aggiungono ovviamente i pannelli solari per caricare le batterie di bordo e un'adeguata quantità di carburante per consentire manovre mediante razzi al fine di mantenere la posizione e l'orientamento orbitale prefissate. Tali manovre vengono eseguite almeno una volta all'anno e durano generalmente 12 ore, durante le quali il satellite non è utilizzabile.

to grossi limiti che il sistema GPS, 20 anni più tardi, eliminò o attenuò di molto: con TRANSIT un posizionamento continuo non era possibile, la precisione era oltre i 200 metri per un utente fisso e ben peggiore per quelli mobili, dati sulla velocità di spostamento non erano ottenibili.

La data di nascita del programma GPS – NAVSTAR risale al 17 aprile 1973 quando il Segretario di Stato per la Difesa firmò un Memorandum per lo sviluppo del sistema di navigazione satellitare sotto la responsabilità della US Air Force. Pur essendo stato concepito per scopi militari, i progettisti fecero in modo che anche i civili potessero usarlo anche se con una precisione minore. Il 27 giugno 1977 fu messo in orbita il primo satellite di prova. Con una serie di misurazioni e di tests si vollero verificare tutti i principi teorici e le componenti di base del futuro sistema; si cercò pure di stimare i costi complessivi del programma. La fase dello sviluppo vero e proprio iniziò tuttavia nel 1978 e si concluse nel 1985. In questo periodo furono messi in orbita i primi 11 satelliti sperimentali che furono sostituiti successivamente da quelli operativi a partire dal 1989. La costellazione prevista dei satelliti fu completata nel 1993. L'8 dicembre di quell'anno fu fatta una prima dichiarazione di "inizio operatività" (Initial Operational Capability). Al completamento di tutte le verifiche, in particolare delle specifiche militari del sistema, esso fu dichiarato definitivamente operativo dal Segretario di Stato per la Difesa il 27 aprile 1995 (Full Operational Capability). Erano trascorsi quindi 22 anni dalla firma del Memorandum che sanciva l'inizio del programma.

Un satellite GPS pesa pressapoco 1.5 tonnellate e possiede come attrezzatura di base un ricevitore, un trasmettitore, antenne di collegamento, un orologio atomico, 5 oscillatori, un microprocessore per il controllo di tutte le funzioni essenziali a cui si aggiungono ovviamente i pannelli solari per caricare le batterie di bordo e un'adeguata quantità di carburante per consentire manovre mediante razzi al fine di mantenere la posizione e l'orientamento orbitale prefissate. Tali manovre vengono eseguite almeno una volta all'anno e durano generalmente 12 ore, durante le quali il satellite non è utilizzabile.

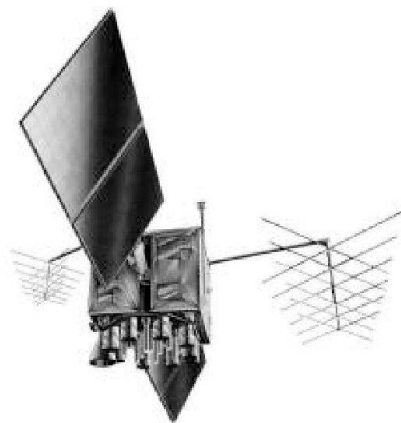


Fig. 2: satellite GPS Block IIR

La "vita" media dei primi satelliti GPS è stata calcolata in 5 anni, per la nuova generazione in 7 anni e mezzo. Trascorso questi periodi sono da attendersi avarie e disfunzioni più o meno gravi. Risulta perciò indispensabile sostituire i "vecchi" satelliti con dei nuovi, possibilmente più performanti dei precedenti. È ciò che fu fatto periodicamente negli ultimi anni. A partire ad esempio dal 1987 vengono messi in orbita una nuova serie di satelliti sviluppata dalla General Electric denominati GPS Block IIR (Fig. 2) che, rispetto ai vecchi satelliti, sono in grado di misurare con precisione le distanze tra i diversi satelliti della costellazione e calcolarne autonomamente le singole orbite per i successivi 180 giorni, senza quindi l'ausilio di dati e correzioni da parte di stazioni al suolo.

La più recente generazione di satelliti porta il nome di GPS Block IIR. Rispetto ai precedenti satelliti possiede un orologio atomico al cesio più preciso ed è capace inoltre di autodiagnosticarsi e correggere eventuali imprecisioni dovuti a cambiamenti ambientali, in primo luogo a variazione della temperatura interna del satellite e del campo magnetico terrestre.

Un sistema di navigazione satellitare è composto nel suo insieme di tre anelli di una stessa catena che gli americani chiamano "segmenti". La costellazione dei satelliti forma il primo e forse più importante segmento della catena. Il secondo è rappresentato dalle stazioni di controllo terrestri e il terzo dall'utente (Fig. 3).

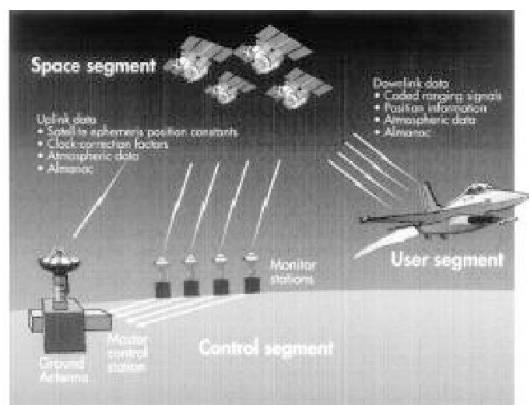


Fig. 3: rappresentazione schematica dei tre "segmenti" (da: Aerospace Corporation, 1996)

Segmento spaziale: è costituito dalla costellazione nominale dei 24 satelliti sopra indicati che trasmettono dei codici di distanza a radio frequenza e dei dati di navigazione.

Segmento di controllo terrestre: consiste in una rete di monitoraggio e di mezzi di controllo per il mantenimento della costellazione e per l'aggiornamento continuo dei dati conservati nelle memorie di bordo. A queste stazioni compete inoltre il compito di modificare la posizione dei satelliti quando si allontanano troppo dalla posizione assegnata oppure di disattivarli nel caso di malfunzionamento e di sostituirli con quelli di riserva.

Il segmento di controllo terrestre è composto da 5 stazioni. La principale è si trova a Colorado Springs negli Stati

Uniti, le altre 4 si situano attorno al globo in maniera quasi uniforme non distante dall'equatore (Fig. 4).

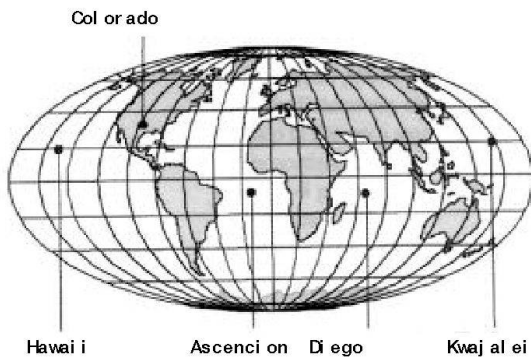


Fig. 4: le stazioni di controllo terrestre

Le ultime 4 stazioni sulle isole di Hawai (Nord Pacifico), Ascencion (Sud Atlantico), Diego Garcia (Oceano indiano) e Kwajalein (Sud Pacifico) sono stazioni di monitoraggio i cui dati rilevati sono inviati alla stazione principale di Colorado Springs su sua richiesta. Quest'ultima provvede a calcolare i dati dell'orbita, le correzioni di posizionamento e le correzioni agli orologi atomici di bordo. Le tre stazioni di Ascencion, Diego Garcia e Kwajalein sono pure stazioni di aggiornamento dotate cioè di grandi antenne paraboliche dal diametro di 10 metri ciascuna per la trasmissione dei dati correttivi calcolati dalla stazione principale. Il caricamento dei dati avviene, in condizione normali, ogni 8 ore su una particolare frequenza di servizio.

Segmento dell'utente: consiste in una varietà di ricevitori, di decodificatori e di elaboratori dei segnali GPS.

Un ricevitore GPS comprende essenzialmente 4 elementi: l'antenna, il ricevitore dei segnali, il computer e il dispositivo per la visualizzazione dei dati con tastiera. Le funzioni del ricevitore sono di selezionare i satelliti, decodificare i segnali, calcolare prima le distanze con i satelliti selezionati e poi la posizione e l'ora del sistema. La realizzazione di queste funzioni dipende dall'uso che se ne vuol fare e dalla precisione che si desidera ottenere. Per guidare un missile è necessario un ricevitore ad alta dinamica (grande precisione e frequente aggiornamento dei dati) mentre per una nave mercantile è sufficiente una bassa dinamica (precisione inferiore e aggiornamento dei dati molto meno frequente).

Sul mercato si trovano tre tipi di ricevitori:

- Ricevitore sequenziale: Possiedono un solo canale per la determinazione della distanza e impiegano un periodo abbastanza lungo (circa 2 secondi) per calcolare la posizione e altri 5 - 8 secondi per l'osservazione dei satelliti. Sono i ricevitori più economici a bassa dinamica.
- Ricevitore multicanali: Sono dotati da 10 a 12 canali che seguono contemporaneamente altrettanti satelliti. Un microprocessore provvede a combinare tutte le osservazioni simultanee e fornire la posizione e altri dati istantanei come la velocità e la direzione. Sono ricevitori costosi, usati nei casi dove è richiesta un'alta dinamica.

- Ricevitori multiplexed: Possiedono un solo canale ma seguono sequenzialmente i satelliti selezionati effettuando una loro scansione ogni 20 millisecondi. Le caratteristiche sono intermedie a quelle dei due tipi precedenti con costi abbastanza contenuti.

Come funziona il GPS?

Il principio di funzionamento del GPS è assai semplice: è per contro complicato e laboriosa la sua realizzazione pratica.

Il sistema GPS si basa sulla determinazione di distanze tra vari satelliti e l'utente, un calcolo semplice che ricorda molto da vicino quello per determinare la distanza tra un fulmine e un osservatore durante il temporale. Come tutti sanno è infatti sufficiente misurare il lasso di tempo intercorso tra la vista del fulmine (praticamente istantanea) e l'arrivo del tuono e moltiplicare questo valore per la velocità di propagazione del suono nell'atmosfera (che notoriamente è di 330 metri al secondo) per ottenere la distanza cercata. Se ad esempio si misurano 6 secondi tra l'apparizione del fulmine e l'arrivo del tuono vuol dire che la distanza tra voi e il fulmine è di circa 2 km.

Nel GPS la distanza tra l'osservatore (con il suo ricevitore) e un satellite viene calcolata in modo analogo. Un satellite, la cui posizione momentanea è perfettamente conosciuta, emette un segnale elettromagnetico con informazioni codificate: una di questi dati è l'ora esatta di emissione del segnale, stabilita da un orologio atomico di bordo estremamente preciso. Il ricevitore è munito di un secondo orologio (al quarzo), molto meno preciso di quello nel satellite ma sincronizzato con esso, il quale registra l'ora di arrivo del segnale. Un microprocessore all'interno del ricevitore calcola anzitutto la differenza di tempo tra la partenza e l'arrivo del segnale e quindi la distanza moltiplicando questo valore con la velocità di propagazione del segnale che notoriamente corrisponde a quella della luce ovvero circa 300'000'000 metri al secondo (più esattamente 299'792'458 m/s).

Va notato che i ritardi di tempo calcolati sono sovente molto piccoli: da qui la necessità di misurazioni molto precise. Un errore di appena 1 milionesimo di secondo nella misura degli intervalli di tempo equivale a un errore di 300 m nella misura delle posizioni. Il tempo necessario per raggiungere un ricevitore da un satellite che si trova sulla verticale dell'osservatore è di 0.06738 secondi. In questo lasso di tempo lo stesso satellite si sarà spostato sulla sua orbita di 260 metri e un utente che si trovasse alla latitudine di Lugano si sarà spostato verso occidente di circa 22 metri a causa della rotazione terrestre. Ogni ricevitore, rilevata la sua latitudine, deve quindi tener conto della rotazione della terra per calcolare con precisione la sua posizione. Determinare la distanza tra un satellite e il ricevitore non è sufficiente: da un lato bisogna conoscere contemporaneamente le distanze di più satelliti e dall'altra la posizione dei satelliti rispetto alla terra. Poiché il sistema, per preciso che sia, non è esente da errori e da imprecisioni è pure necessario prevedere tutta una serie di correzioni.

Per semplificare la spiegazione supponiamo che l'utente si trovi su un piano e non sulla terra. Teoricamente se il

Il sistema GPS si basa sulla determinazione di distanze tra vari satelliti e l'utente, un calcolo semplice che ricorda molto da vicino quello per determinare la distanza tra un fulmine e un osservatore durante il temporale. Come tutti sanno è infatti sufficiente misurare il lasso di tempo intercorso tra la vista del fulmine (praticamente istantanea) e l'arrivo del tuono e moltiplicare questo valore per la velocità di propagazione del suono nell'atmosfera (che notoriamente è di 330 metri al secondo) per ottenere la distanza cercata. Se ad esempio si misurano 6 secondi tra l'apparizione del fulmine e l'arrivo del tuono vuol dire che la distanza tra voi e il fulmine è di circa 2 km. Nel GPS la distanza tra l'osservatore (con il suo ricevitore) e un satellite viene calcolata in modo analogo.

Il calcolo della posizione non è possibile se si ricevono i segnali unicamente da 1 o 2 satelliti. Se sono 3 il ricevitore calcola una posizione, ma dovendo stimare una grandezza mancante il valore della stessa risulterà impreciso. Se il ricevitore ha a disposizione segnali utili da più di 4 satelliti farà una scelta ottimale, nel senso che cercherà, tra tutte le combinazioni possibile, quella costellazione di 4 satelliti che garantirà il minor errore di posizione.

sistema fosse privo di qualsiasi errore per rilevare la posizione dell'utente (due dimensioni) sarebbero necessari soltanto due satelliti: il punto cercato sarebbe uno delle due intersezione tra i due cerchi aventi per raggio le rispettive distanze dai rispettivi satelliti. Tuttavia il sistema (soprattutto la misurazione delle differenze del tempo) non è perfetto. Per tener conto di queste imperfezioni è necessario utilizzare i dati di un terzo satellite come mostra la figura 5. Si creano così diversi punti d'intersezione: vi è quindi una ambiguità di risultati da risolvere. Il ricevitore si rende conto di questo fatto e intraprende automaticamente un'azione correttiva consistente nell'aggiungere o sottrarre a tutti i segnali ricevuti un'uguale correzione di tempo fino a quando tutti i risultati dei punti d'intersezione corrispondono ad un unico punto e cioè a quello corretto. Tale serie di calcoli correttivi viene effettuata con uno specifico algoritmo matematico che permette al ricevitore di eliminare le ambiguità rapidamente.

L'utente trovandosi sulla terra, e non su un piano, è in uno spazio tridimensionale: le coordinate da determinare sono cioè tre. Poiché oltre alle tre coordinate bisogna determinare anche l'errore, tre satelliti non sono più sufficienti, è necessario poter osservare 4 di essi contemporaneamente. L'algoritmo per la correzione degli errori e per l'eliminazione di ambiguità rimane invariato nella sostanza, risulta un po' più complicato per la presenza di una variabile supplementare: dal punto di vista geometrico i cerchi della Fig. 5 sono sostituiti da sfere. Tutti questi algoritmi sono oggi molto perfezionati e permettono di trovare la posizione corretta dell'utente dopo soltanto 4 o al massimo 5 tentativi.

Per i lettori con una certa dimestichezza in matematica si fa presente che il problema per determinare la posizione dell'utilizzatore viene risolto numericamente dal ricevitore trovando la soluzione di un sistema di 4 equazioni nonlineari (Fig. 6).

Il sistema di riferimento ad assi cartesiani (x, y, z) ha l'origine nel centro della terra, il piano (x,y) coincide con il piano dell'equatore, l'asse z coincide con l'asse polare, l'asse x è nella direzione del meridiano di Greenwich e y è in direzione 90° .

Le distanze ricevitore – satelliti misurate e calcolate dal sistema sono chiamate pseudo-distanze (pseudorange).

Con le 4 equazioni si determinano le seguenti 4 incognite del sistema:

(x, y, z) = le 3 coordinate dell'utente

Δt_r = l'errore temporaneo della misura

Le restanti grandezze sono da considerate come note, in particolare:

$(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}) / (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) / (x_{s3}, y_{s3}, z_{s3}) / (x_{s4}, y_{s4}, z_{s4})$ = coordinate del 1° / 2° / 3° rispettivamente dei 4° satellite: dati trasmessi dai singoli satelliti.

c = velocità della luce: costante

$(\Delta t_{s1}, \Delta t_{s2}, \Delta t_{s3}, \Delta t_{s4})$ = differenze di tempo dei satelliti calcolati dal ricevitore

Le probabilità che un ricevitore sia collegato con almeno 4

satelliti è in generale alta, a condizione che l'utente si trovi all'aperto in una zona priva di grossi ostacoli che impediscono la ricezione dei segnali (boschi, vicinanza a pareti rocciose o facciate di case, sotterranei, gallerie ecc.). Tipicamente sono visibili all'aperto da 5 a 9 satelliti contemporaneamente. Misurazioni fatte in diverse città d'Europa e negli Stati Uniti sull'arco di 24 ore hanno evidenziato la seguente distribuzione del numero dei satelliti visibili contemporaneamente in funzione della loro durata media sopra l'orizzonte:

5 satelliti visibili:
3 % (di 24 ore), cioè circa: 43 minuti

6 satelliti visibili:
28 % (di 24 ore), cioè circa: 6 ore e 43 minuti

7 satelliti visibili:
52 % (di 24 ore), cioè circa: 12 ore e 29 minuti

8 satelliti visibili:
16 % (di 24 ore), cioè circa: 3 ore e 50 minuti

9 satelliti visibili:
1 % (di 24 ore), cioè circa: 15 minuti

Il calcolo della posizione non è possibile se si ricevono i segnali unicamente da 1 o 2 satelliti. Se sono 3 il ricevitore calcola una posizione, ma dovendo stimare una grandezza mancante il valore della stessa risulterà impreciso. Se il ricevitore ha a disposizione segnali utili da più di 4 satelliti farà una scelta ottimale, nel senso che cercherà, tra tutte le combinazioni possibile, quella costellazione di 4 satelliti che garantirà il minor errore di posizione.

Esistono infatti delle distribuzioni dei satelliti nello spazio che risultano migliori (nel senso di un calcolo preciso e rapido) rispetto ad altre, come mostra la Fig. 7.

Se tre dei 4 satelliti si trovano bassi sull'orizzonte (in pratica tuttavia non sotto i 5°) e il rimanente sulla verticale (zenit) in modo da presentare una disposizione assai uniforme con angoli di separazione uno dall'altro di circa 120° si avrà una costellazione particolarmente favorevole per il calcolo della posizione. Per contro la peggiore situazione si ha quando le direzioni d'osservazione dei 4 satelliti sono sulla superficie di un cono con il vertice nel ricevitore, oppure quando tutti e 4 i satelliti sono concentrati dalla stessa parte dell'orizzonte. Gli americani hanno introdotto un concetto e un calcolo (assai complicato) per quantificare questi effetti di geometria spaziale dei satelliti. Il concetto è denominato DOP che è un acronimo di "Dilution of Precision", tradotto liberamente in "espansione della precisione". Al concetto di DOP sono associate diverse grandezze numeriche o fattori d'espansione. Il fattore più usato per esempio nella navigazione aerea è conosciuto con il nome di PDOP (Position DOP), il quale assume dei valori tra il 8.0 (pessima disposizione) e il 2.0 (disposizione molto favorevole): valori medi variano tra 2.5 e il 4.0.

Il PDOP è calcolato regolarmente dal ricevitore e utilizzato appunto nella scelta ottimale dei satelliti e per valutare la precisione finale sulla posizione.

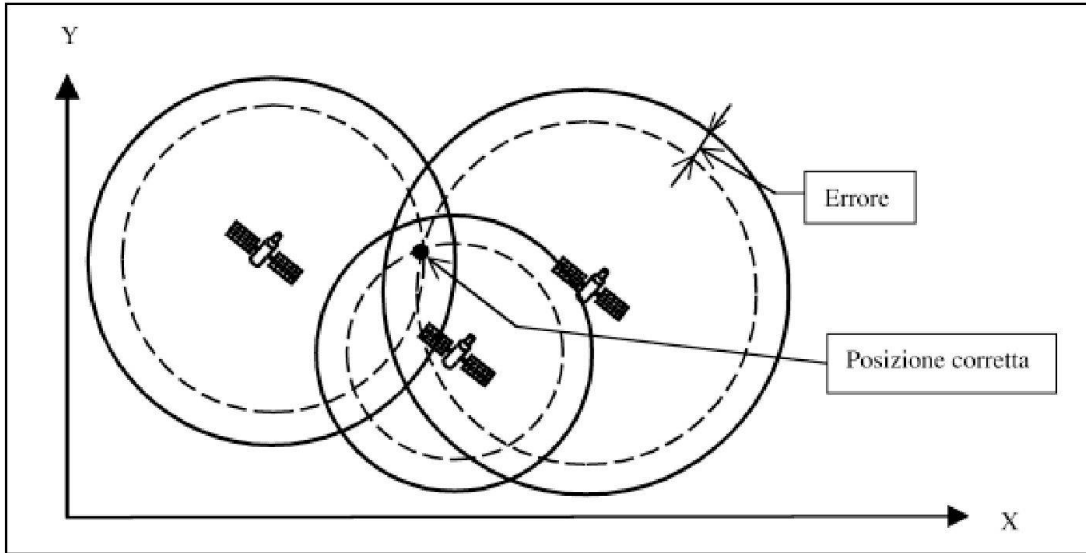


Fig. 5: Determinazione della posizione su un piano con 3 satelliti

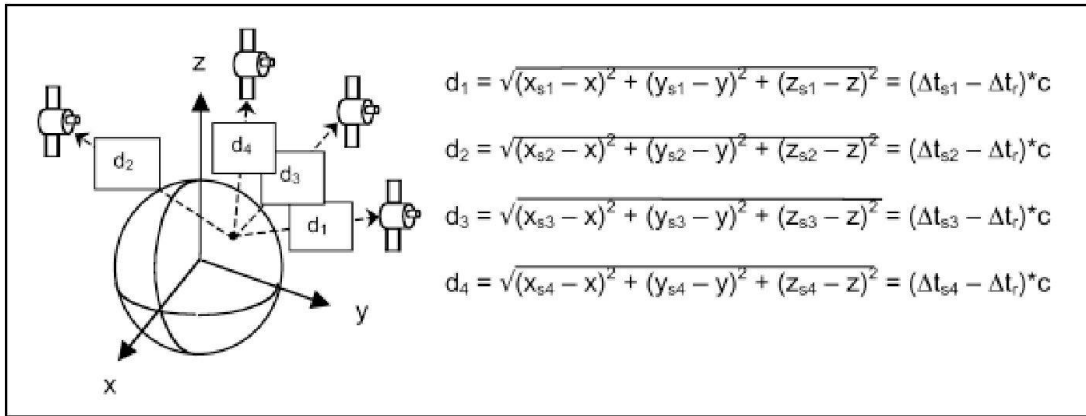


Fig. 6: Le 4 equazioni di base per un sistema di navigazione satellitare

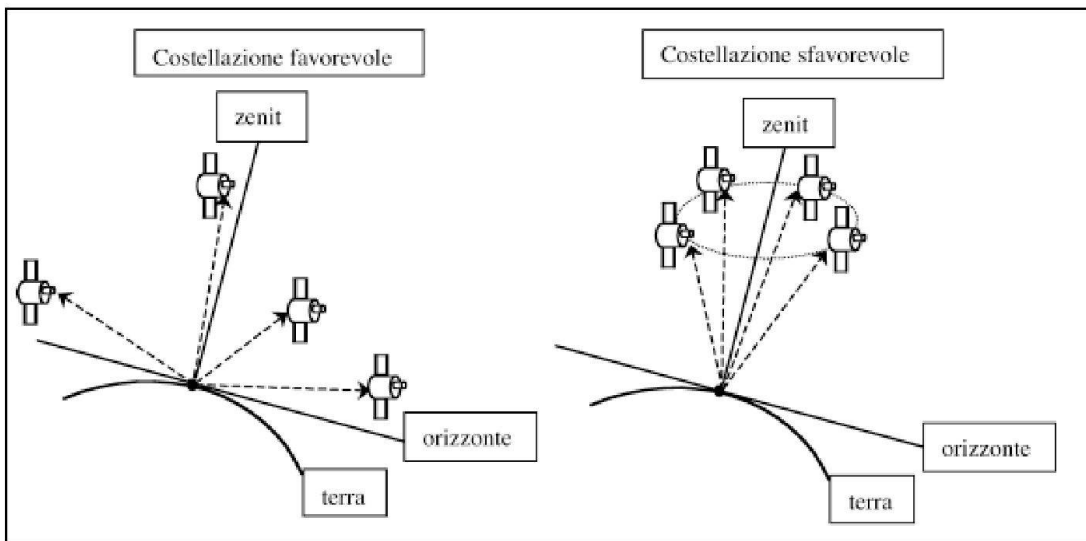


Fig. 7: le costellazioni favorevoli e sfavorevoli con i 4 satelliti

Il grande interesse per la navigazione satellitare è legato in primo luogo alla precisione del sistema. Tre fattori concorrono in maniera determinata a far la fortuna del GPS: la precisione nella misura del tempo eseguita da orologi atomici, i dati esatti sulle orbite dei satelliti e la possibilità di correggere (almeno in parte) alcuni effetti di disturbi.

Il grande interesse per la navigazione satellitare è legato in primo luogo alla precisione del sistema. Tre fattori concorrono in maniera determinata a far la fortuna del GPS: la precisione nella misura del tempo eseguita da orologi atomici, i dati esatti sulle orbite dei satelliti e la possibilità di correggere (almeno in parte) alcuni effetti di disturbi.

- L'informazione dell'istante di partenza di un segnale è stabilita da orologi atomici a bordo dei satelliti, i quali battono il tempo all'unisono, cioè sono perfettamente sincronizzati tra di loro. Il controllo della precisione, della sincronizzazione e la loro eventuali (piccole) correzione avviene al suolo, in particolare dalla stazione principale di Colorado Springs dove sono in funzione orologi atomici di riferimento. Il funzionamento di un orologio atomico si basa su principi di fisica quantistica scoperti quasi 50 anni fa (il primo orologio atomico fu realizzato nel 1955). Materiali speciali come il cesio o il rubidio immessi in un forte campo magnetico generano fasci di atomi che oscillano regolarmente. Queste oscillazioni vengono facilmente contate permettendo così la determinazione esatta del tempo; ad esempio 1 secondo corrisponde al tempo necessario perché gli atomi di cesio 133 eseguano 9'192'631'770 oscillazioni. L'orologio atomico al cesio è un po' più preciso di quello al rubidio; un nuovo tipo di orologio atomico basato sul Maser all'idrogeno (vedi glossario) sembra sia circa 10 volte più preciso di quello al cesio.

Il grande vantaggio dell'orologio atomico risiede nella sua stabilità. L'errore massimo di un orologio atomico è dell'ordine di ± 0.003 secondi ogni 1000 anni! Per inciso si potrà notare che la grande precisione degli orologi atomici hanno consentito ai fisici nel 1967 di rivedere la definizione dell'unità di tempo. Precedentemente si usava la durata di 1 giorno = 24 ore (con i suoi sottomultipli di minuto, secondo ecc.) quale unità di base per misurare il tempo. Questo "orologio astronomico" si basava quindi sul tempo di rotazione della terra attorno al suo asse polare: questo periodo non è tuttavia molto preciso poiché la velocità di rotazione della terra non è costante. Misure accurate hanno evidenziato che dal 1958 ad oggi l'orologio astronomico ha subito un

"ritardo" di 35 secondi dovuto alle variazioni del periodo di rotazione della terra. Molto più precisa e sicura risulta la definizione della durata del secondo basandosi sulle tecniche dell'orologio atomico al cesio come precedentemente indicato.

È interessante far notare un fatto di fisica relativistica. Siccome l'orologio atomico si trova su un satellite ruotante attorno alla terra, ad alta velocità (circa 3.8 km/sec) e a molti chilometri d'altezza, è necessario tenere in considerazione due effetti riconducibili alla teoria della relatività di Einstein. Non considerarli equivarrebbe a generare imprecisioni sulla misurazione del tempo e di conseguenza sulla posizione dell'utilizzatore. I due effetti sono di "segno opposto", cioè tendono a compensarsi l'uno con l'altro senza tuttavia annullarsi completamente. Il primo riguarda l'influsso di due corpi in movimento sulla misurazione del tempo: in conformità alla teoria della relatività i due orologi, trovandosi su due corpi (satellite e terra) in rapido movimento tra di loro, non indicano lo stesso tempo. Il secondo effetto riguarda l'influsso del campo gravitazionale della terra: il satellite, ruotando attorno alla terra a oltre 20'000 km di quota, è "immerso" in un campo gravitazionale leggermente più debole di quello al suolo. In altre parole: l'orologio atomico del satellite "ritarda" rispetto all'orologio al suolo a causa dell'alta velocità relativa tra i due corpi e "avanza" rispetto a quest'ultimo a causa del campo gravitazionale più debole. La conseguenza della somma di questi due effetti sulla precisione della posizione è secondaria: l'errore finale è quantificabile in pochi millimetri.

- Come già ricordato, la determinazione della posizione dell'utente è possibile soltanto se si conoscono con precisione e in tempo reale le posizioni dei 4 satelliti nello spazio. È perciò un compito essenziale del "segmento al suolo" eseguire tutte le operazioni che permettono di misurare per un dato istante la posizione di ogni satellite sulla sua orbita (le effemeridi), di predire l'evoluzione di questi parametri nelle prossime ore, di comunicare i dati al satellite stesso, il quale a sua volta li ritrasmetterà con continuità e in codice al ricevitore al suolo.

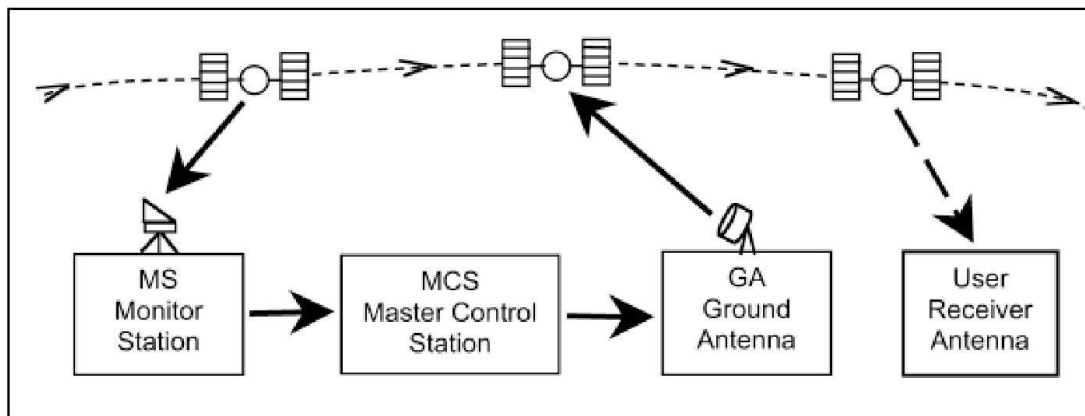


Fig. 8: procedura per la determinazione della posizione del satellite

La figura 8 mostra schematicamente il flusso dei dati tra i vari segmenti del sistema. Le stazioni riceventi (MS) eseguono il monitoraggio dei satelliti, determinano le effemeridi, eseguono misurazioni sullo stato momentaneo dell'atmosfera e della troposfera e trasmettono questi dati alla stazione principale di controllo (MCS) a Colorado Springs. Quest'ultima riunisce le informazioni di tutte le MS e calcola le deviazioni dei diversi orologio atomici di bordo. L'insieme dei dati e delle correzioni fanno parte di un Messaggio di Navigazione che viene inviato alle singole stazioni di aggiornamento (GA) e da qui ai rispettivi satelliti.

Le effemeridi di un satellite vengono aggiornate ogni ora. Il Messaggio di Navigazione ("Navigation Data") tra la stazione GA e il satellite contiene pure l'almanacco, cioè le effemeridi approssimative di tutti gli altri satelliti. L'almanacco consente al ricevitore di determinare velocemente la posizione di tutti i satelliti e quindi di sapere quali sono visibili e utilizzabili; consente inoltre di selezionare, fra tutti i satelliti utili, i 4 satelliti meglio disposti da un punto di vista geometrico, ovvero con il migliore PDOP.

L'orbita di un satellite GPS attorno alla terra è un'ellisse ma con una eccentricità molto piccola, quindi in pratica quasi circolare. Essa viene descritta da 6 parametri: i tre angoli (ω , ν , i), la lunghezza dell'asse maggiore (a), l'eccentricità dell'ellisse (e), l'anomalia mediana (M): vedi Fig. 9.

I 6 parametri servono per determinare un'orbita ellittica ideale, cioè priva di qualsiasi disturbo. In realtà l'orbita di un satellite GPS devia leggermente da quella ideale a causa di 4 effetti principali:

a) La terra non è una sfera perfetta e la sua massa non è uniformemente distribuita.

b) Gli influssi gravitazionali della luna e del sole sono secondari ma non possono essere trascurati.

c) Le particelle del "vento solare" generano una (debole) pressione sul satellite che ne rallenta il moto. Va notato che questo effetto è nullo quando il satellite si trova all'ombra della terra ed è invece particolarmente importante in caso di eruzioni solari.

d) Anche se a una quota di oltre 20'000 km l'atmosfera terrestre risulta estremamente rarefatta essa influisce, pur debolmente, sul moto del satellite. Contrariamente a quanto si potrebbe supporre l'effetto dell'atmosfera residua sul satellite non tende a frenare ma al contrario ad accelerare il suo moto attorno alla terra.

Quasi 50 anni di attività spaziale e la raccolta di molti dati nel campo della geodesia spaziale hanno permesso di conoscere gli effetti a) e b) sulle orbite di satelliti nei minimi particolari: le loro correzioni sono oggi quindi sicure e precise. Il calcolo invece degli effetti c) e d) quale causa di disturbo dell'orbita è molto più complesso, anche per il fatto che questi fenomeni in parte non si possono prevedere.

- Un terzo fattore determinante per la precisione complessiva del sistema GPS è da ricondurre alla possibilità di correggere i disturbi del segnale elettromagnetico causati dall'attraversamento dei diversi strati dell'atmosfera. Più precisamente si possono tenere in considerazione particolari effetti di rifrazione del segnale nella ionosfera e nella troposfera. È per contro molto difficile il calcolo della diminuzione della velocità di propagazione del segnale elettromagnetico negli strati più bassi dell'atmosfera poiché essi variano notevolmente con l'umidità e la temperatura dell'aria: quindi dipendono essenzialmente dalla posizione dell'utente sulla terra.e dalla situazione meteorologica del momento.

Anche se a una quota di oltre 20'000 km l'atmosfera terrestre risulta estremamente rarefatta essa influisce, pur debolmente, sul moto del satellite. Contrariamente a quanto si potrebbe supporre l'effetto dell'atmosfera residua sul satellite non tende a frenare ma al contrario ad accelerare il suo moto attorno alla terra.

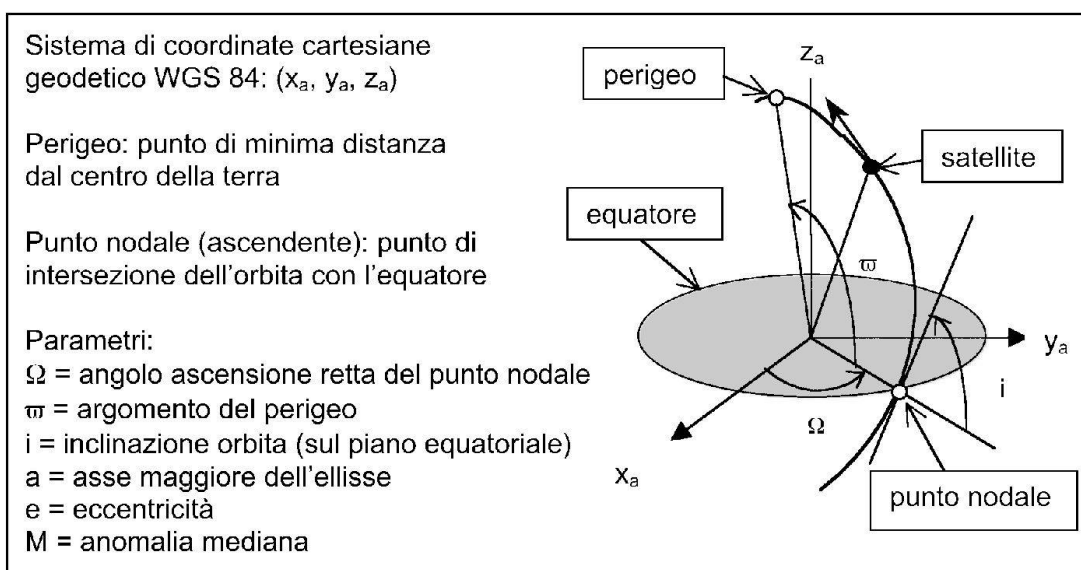


Fig. 9: Definizioni delle effemeridi dell'orbita

Il Codice P era inizialmente segreto in quanto fu introdotto per soli scopi militari e messo a disposizione unicamente a utenti autorizzati. Tale protezione si dimostrò tuttavia poco efficace poiché vari ricercatori riuscirono negli anni 80 ad aggirarla. Fu allora introdotto, a bordo dei satelliti operativi degli anni 90, la possibilità su comando, di generare un nuovo codice criptato, denominato Codice Y o anche Codice P(Y), utilizzabile soltanto dagli apparecchi che dispongono di un apposito decodificatore. Fu anche introdotta una particolare protezione elettronica contro gli effetti di possibili "intrusi" chiamate misure "Anti-Spoofing" (abbreviate con A/S).

Tutti i satelliti GPS trasmettono segnali utilizzando due diverse frequenze portanti nella banda L che sono entrambe multiple di una frequenza fondamentale:

$$f_0 = 10.23 \text{ MHz}$$

generata dagli orologi atomici di bordo.

Le due frequenze portanti indicate con L1 e L2 sono:

$$L_1 = 154 * f_0 = 1575.42 \text{ MHz, corrisponde a una lunghezza d'onda di } 19 \text{ cm}$$

$$L_2 = 120 * f_0 = 1227.60 \text{ MHz, corrisponde a una lunghezza d'onda di } 24 \text{ cm}$$

Le due frequenze sono modulate in fase con appositi segnali denominati:

Codice P (P sta per "Precision")

Codice C/A (C/A sta per "Clear Access" oppure per "Coarse Acquisition")

Codice D (D sta per "Data")

Tali codici consistono in sequenze di cifre binarie o BIT (valori 0 e 1, vedi glossario) generate in modo quasi aleatorio, cioè senza una logica particolare. Le sequenze sono però perfettamente conosciute e si ripetono ad intervalli regolari e cioè di 7 giorni per il codice P e di 0.001 secondi per il Codice C/A.

Il Codice P modula entrambe le portanti e permette di ottenere la massima precisione possibile nella determinazione della posizione. La velocità di trasmissione delle informazioni è elevata e corrisponde a 10.23 MBps (vedi glossario). Il Codice P era inizialmente segreto in quanto fu introdotto per soli scopi militari e messo a disposizione unicamente a utenti autorizzati. Tale protezione si dimostrò tuttavia poco efficace poiché vari ricercatori riuscirono negli anni 80 ad aggirarla. Fu allora introdotto, a bordo dei satelliti operativi degli anni 90, la possibilità su comando, di generare un nuovo codice criptato, denominato Codice Y o anche Codice P(Y), utilizzabile soltanto dagli apparecchi che dispongono di un apposito decodificatore. Fu anche introdotta una particolare protezione elettronica contro gli effetti di possibili "intrusi" chiamate misure "Anti-Spoofing" (abbreviate con A/S). L'intrusione consisterebbe nel falsare elettronicamente il messaggio

del satellite facendo credere al ricevitore di essere in presenza di dati originali del satellite. In realtà la posizione dell'utente sarà errata poiché basata su false misure di distanze.

Il Codice C/A modula soltanto la portante L1, risulta di facile accesso e permette di raggiungere buone precisioni, ma inferiore a quella ottenibile con il Codice P. La velocità di trasmissione delle informazioni è 10 volte più bassa di quella del Codice P. Esso è libero a tutti gli utenti civili e militari che non sono autorizzati a operare con il codice criptato.

Il Codice D contiene il Messaggio di Navigazione, cioè tutti i dati sulle effemeridi del satellite, l'istante di trasmissione del messaggio, le correzioni dell'orologio e degli effetti atmosferici, lo stato dei satelliti, l'almacco ecc. Esso viene trasmesso a bassa velocità (50 bps) ed è presente su entrambe le frequenze portanti L1 e L2. La struttura dell'intero messaggio (o "frame") è semplice, come mostra la figura 10. Esso è lungo 1500 BIT, suddiviso in 5 blocchi di 300 BIT ciascuno ("subframe"). Ogni blocco è trasmesso in 6 secondi, quindi l'intero messaggio viene trasmesso in 30 secondi. Il blocco è preceduto da due dati speciali generati dal satellite stesso. Il TLM (sta per "Telemetry-Word") ha una lunghezza di 8 BIT, ed è utilizzato per verificare se il caricamento dei dati dalle stazioni al suolo è avvenuto correttamente e se le effemeridi sono state aggiornate di recente. Lo HOW (sta per "Hand-Over-Word"), ha una lunghezza di 14 BIT, ed è un numero che fornisce i secondi trascorsi dall'inizio della sequenza ovvero il tempo del sistema GPS.

I blocchi 4 e 5 contengono i dati degli almanacchi di tutti i satelliti e le correzioni atmosferiche. Una quantità di informazioni che non trova posto in un unico blocco, ma in 25 blocchi successivi che formano una pagina. La trasmissione dell'intero almanacco richiede quindi $25 * 30 = 750$ secondi ossia 12.5 minuti.

Normalmente i ricevitori GPS in commercio memorizza-

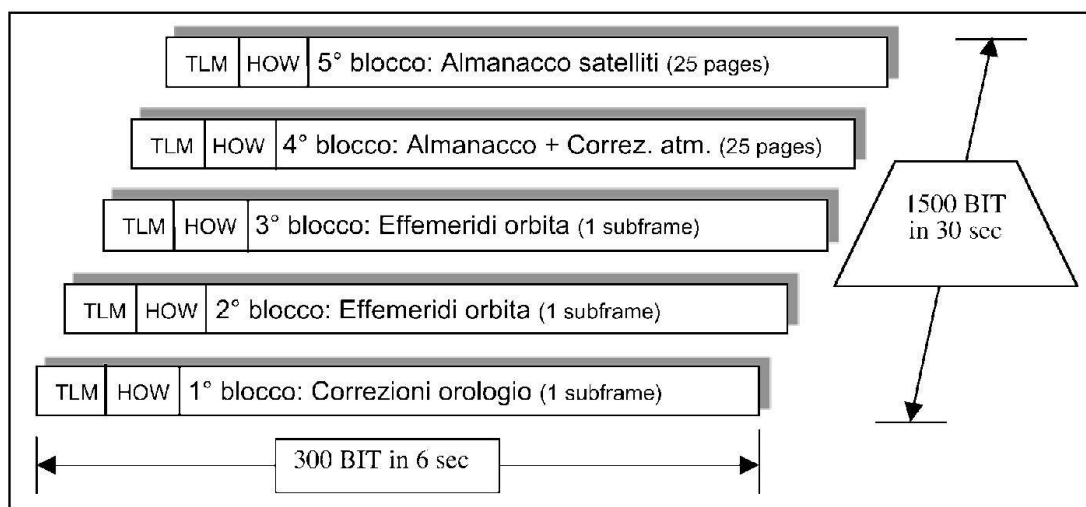


Fig. 10: Struttura del Messaggio di Navigazione

no l'ultimo almanacco ricevuto durante l'uso. Questi dati restano quindi in memoria anche quando il ricevitore è spento e verranno utilizzati quando il ricevitore sarà riacceso, accelerando in tal modo la procedura d'inizializzazione con i nuovi satelliti.

Precisione del sistema

Nonostante sofisticati sistemi impiegati sia al suolo che nei satelliti non si è potuto ovviamente eliminare completamente tutti gli errori e le imprecisioni possibili. Molte cause di imprecisioni furono ridotte durante la fase sperimentale, altre vengono corrette periodicamente durante l'utilizzazione del sistema. Quel che rimane sono errori di misura residui che si distinguono in due categorie: errori comuni a tutti gli utenti (che possono essere ulteriormente eliminati utilizzando ad esempio le tecniche del GPS differenziale) e altri tipi di errori dipendenti dal singolo utente (e che non possono essere eliminati con particolari accorgimenti). Inoltre sussistono sostanziali differenze se si utilizza il GPS con il Codice C/A (civile) oppure con il Codice P (militare).

Le cause più importanti di errori sulle misure sono le seguenti:

- **Satellite**
Orologi atomici: errori sull'orologio di bordo
Effemeridi: conoscenza imperfetta dei parametri dell'orbita
- **Propagazione del segnale**
Troposfera: variazione di velocità ed effetti di rifrazione tra 0 e 70 km di quota
Ionosfera: variazione di velocità ed effetti di rifrazione tra 70 e 100 km di quota
Multipath: errori prodotti da percorsi multipli del segnale (riflessioni su ostacoli artificiali come facciate di case o ostacoli naturali come pareti rocciose, superficie del mare ecc.)
- **Ricevitore**
Ricevitore: rumore interno dei circuiti elettronici e ritardi nei dispositivi.

Errore quadratico medio (s) sulle singole misure e complessivo

Tipo di errore	Codice C/A	Codice P
Orologio atomico	3.5 m	3.5 m
Effemeridi	4.0 m	4.0 m
Ionosfera	10.0 m	2.0 m
Troposfera	2.0 m	2.0 m
Percorsi multipli (Multipath)	1.5 m	1.5 m
Rumore ricevitore	7.5 m	1.0 m
Altro	0.5 m	0.5 m

Errore quadratico medio complessivo:
 $s = 13.8 \text{ m}$ $s = 6.3 \text{ m}$

L'errore finale sulla posizione dipende, oltre che dagli errori sulle misure, dalla disposizione geometrica momen-

anea dei 4 satelliti utilizzati, quindi dal fattore d'espansione d'errore PDOP. La relazione che porta al calcolo dell'errore di posizione finale è una semplice moltiplicazione:

Errore di posizione = Errore quadratico medio complessivo sulle misure * PDOP

Ammesso per esempio una buona disposizione spaziale dei satelliti con un PDOP = 2.5 si ottiene quale valore tipico di precisione finale sulla posizione:
 Errore medio sulla posizione = $13.8 * 2.5 = 34.5$ metri (per il Codice C/A)

Va notato che un ricevitore GPS da risultati un po' più precisi di notte che non di giorno. La ragione va ricercata nel fatto che l'errore di trasmissione nella ionosfera si riduce di notte, rispetto al giorno, di almeno un fattore due.

Il GPS differenziale

La tecnica del GPS differenziale sta conoscendo una notevole espansione in svariate discipline scientifiche. La ragione sta nel fatto che applicando questa tecnologia si ottengono risultati sulla precisione della posizione nettamente superiori rispetto alla normale modalità d'uso del GPS.

Il concetto di base è semplice: un ricevitore fisso GPS posto in una "stazione di riferimento" (o stazione di base) le cui coordinate geografiche e l'altezza sul livello del mare sono perfettamente conosciute, confronta in permanenza la sua posizione (esatta) con quella calcolata dal proprio ricevitore GPS (meno precisa). Dalla differenza delle due posizioni (da qui il nome di GPS differenziale, o Differential GPS = DGPS) si possono determinare gli errori momentanei a carattere sistematico del sistema di navigazione che saranno comuni a tutti i ricevitori operanti in una determinata area attorno alla stazione di riferimento e quindi le loro correzioni. Tali correzioni vengono digitalizzate e trasmesse via radio (data link) con continuità e in tutte le direzioni. Per poter farne uso il GPS di un utente deve tuttavia possedere apparecchiature supplementari: in particolare un ricevitore di dati (data link), un modem (converte segnali analogici in digitali) e un calcolatore. Pure la "stazione di riferimento" deve essere dotata, oltre che dal ricevitore GPS, di altre apparecchi supplementari, in particolare di un modem, di un trasmettitore a frequenze radio e un di calcolatore per determinare le correzioni. La figura 11 mostra schematicamente il principio di funzionamento di una configurazione GPS differenziale.

Alla configurazione di principio della figura 11 esistono alcune varianti: una di esse merita particolare attenzione perché molto utilizzata nella navigazione aerea. Il ricevitore GPS dell'utente si trova nel velivolo, le rimanenti apparecchiature delle stazioni si trovano al suolo. Tutti i dati con le rispettive correzioni vengono cioè calcolate al suolo e trasmesse al GPS del velivolo grazie a un collegamento radio. Esiste pure una variante dove la stazione di base non è fissa ma mobile. È una variante che si riscontra ad esempio nelle campagne di rilevamento del fondo marino o delle coste. La posizione esatta della stazione di riferimen-

La tecnica del GPS differenziale sta conoscendo una notevole espansione in svariate discipline scientifiche. La ragione sta nel fatto che applicando questa tecnologia si ottengono risultati sulla precisione della posizione nettamente superiori rispetto alla normale modalità d'uso del GPS.

Le tecniche del GPS differenziale permettono di annullare completamente gli errori di misura dovuti al satellite (effemeridi e orologi) e di ridurre sensibilmente gli errori dovuti alla propagazione nell'atmosfera (troposfera e ionosfera). Con un DGPS si ottengono in generale precisioni sulla posizione inferiori ai 6 metri, sovente tra 2 e 3 metri.

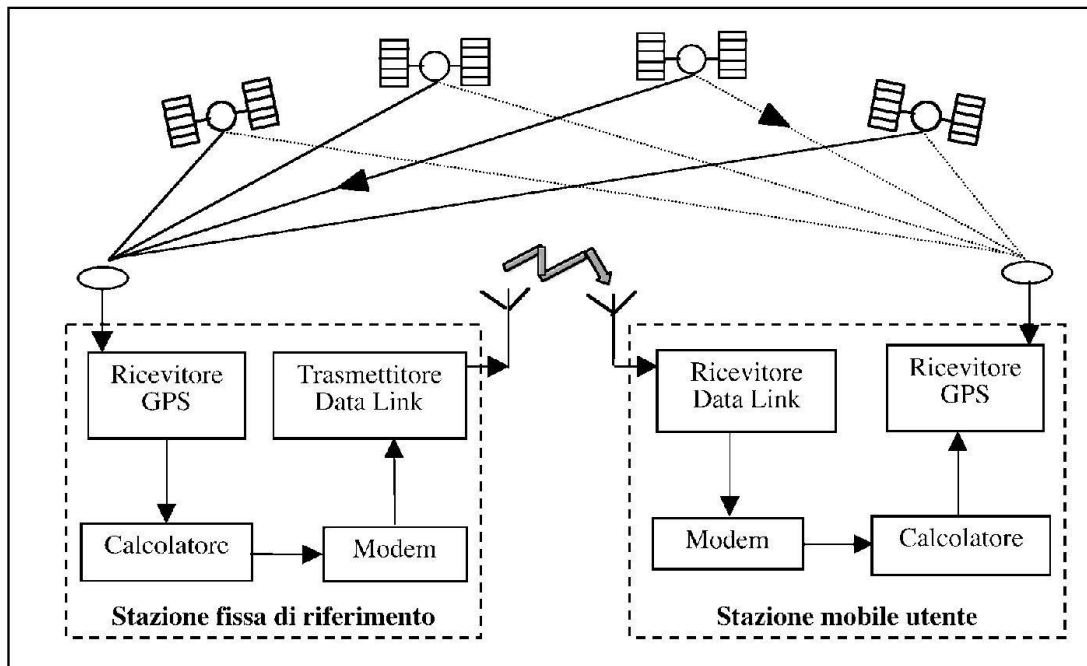


Fig. 11: Principio di funzionamento del DGPS

to viene introdotta manualmente nella fase d'inizializzazione oppure con particolari apparecchi autopoizionanti. Va notato che i messaggi trasmessi dalle stazioni di rilevamento a quelle degli utenti furono standardizzati nel 1987 in modo da evitare che ogni stazione facesse uso di un proprio criterio e di un proprio protocollo di trasmissione.

Le tecniche del GPS differenziale permettono di annullare completamente gli errori di misura dovuti al satellite (effemeridi e orologi) e di ridurre sensibilmente gli errori dovuti alla propagazione nell'atmosfera (troposfera e ionosfera). Con un DGPS si ottengono in generale precisioni sulla posizione inferiori ai 6 metri, sovente tra 2 e 3 metri. Tuttavia la precisione peggiora man mano che la distanza tra stazione di riferimento e l'utente aumenta. Distanze di 400 - 500 km rappresentano in pratica distanze limiti oltre alle quali gli errori generati dalla decorrelazione tra i segnali delle stazioni diventano sempre più importanti per cui i vantaggi della tecnica DGPS svaniscono di conseguenza. Per ovviare a questo problema, e per garantire ottime prestazioni in settori importanti quali la navigazione marittima o stradale, si stanno realizzando delle reti nazionali con molte stazioni di

riferimento uniformemente ripartite su un vasto territorio e coordinate da una stazione di controllo.

Tecniche avanzate nella elaborazione e nella analisi dei segnali satellitari (filtri sui dati della distanza, analisi delle fasi su L1 ecc.) permettono d'ottenere oggi precisioni estreme, dell'ordine di pochi millimetri, ciò che apre il campo ad applicazioni in molte discipline della scienza finora impensabili. Tuttavia grande precisione vuol dire anche maggiore complessità nelle apparecchiature, nei software e nelle conoscenze specifiche dei DGPS. La tabella della figura 12 mostra in sintesi vari livelli di precisione (ordine di grandezza) che si ottengono con le diverse tecnologie GPS e DGPS.

Ogni particolare applicazione è strettamente legata a un limite ragionevole di precisione e quindi indirettamente alle apparecchiature necessarie. Ad esempio conoscere la posizione di una nave in alto mare con una precisione millimetrica non è ovviamente una necessità: lo è invece il monitoraggio delle deformazioni di una diga idroelettrica sotto la pressione dell'acqua. Le due applicazioni presenteranno dunque due tipi di attrezzature molto diverse una dall'altra.

	Tipo	Precisione	
		da	a
GPS	Codice C/A (civile, senza AS*)	5.0 m	40.0 m
	Codice P (militare, con AS*)	2.0 m	15.0 m
DGPS	Correzioni pseudo-range	1.0 m	6.0 m
	DGPS moving survey	1.0 cm	5.0 cm
	DGPS static survey	2.0 mm	1.0 cm

* Anti-Spoofing

Fig. 12: Livelli di precisione con il GPS e il DGPS

GALILEO

Nel 1633 il fisico italiano Galileo Galilei, dopo aver scoperto che la terra non è al centro dell'universo ma ruota intorno al sole, dovette abbattere, con molta fatica e pagando di persona, una barriera difficilmente sormontabile: quella millenaria di credenze della Chiesa cattolica fondate su dottrine astronomiche di Tolomeo. Oggi con lo stesso nome di GALILEO un progetto europeo cerca di abbattere un'altra grossa barriera: quella della dipendenza pluridecennale dagli Stati Uniti nel settore della navigazione satellitare.

GALILEO è una sfida economica, commerciale, strategica e di competenze tecnologiche di enorme rilevanza per l'Europa, anche per il nostro paese.

Molti specialisti ritengono che, se le previsioni economiche, realizzative e di prestazioni saranno mantenute, GALILEO avrà in Europa, tra una decina d'anni, un impatto estremamente importante sul singolo cittadino paragonabile a quello della telefonia mobile.

La Commissione EU ha stimato a € 3,5 miliardi i costi di sviluppo del programma che saranno equamente ripartiti tra la stessa EU (50%) e l'Agenzia Spaziale Europea ESA (50%). Anche la Svizzera, quale membro della ESA, partecipa allo sviluppo di GALILEO con circa CHF 30 milioni. A questi costi iniziali vanno aggiunti costi di gestione e di manutenzione oggi difficilmente quantificabili: secondo alcune stime nei prossimi 20 anni GALILEO costerà all'incirca € 6 miliardi. Ma le ricadute economiche sono più che promettenti. Unicamente dotare automobili, treni, navi ed aerei in Europa con equipaggiamenti compatibili con GALILEO rappresenterà un mercato di oltre € 9 miliardi all'anno: senza dimenticare altri mercati molto promettenti perché in piena espansione, quali ad esempio quello cinese o quello giapponese. Oltre al valore di mercato si stima che il progetto creerà 140'000 nuovi posti di lavoro in Europa.

Ragioni strategiche e di competenza tecnologica evocate dalla EU sono oltremodo valide. Il GPS è nato negli anni 60, come progetto militare della US Navy (per conoscere ad ogni istante la posizione dei propri sottomarini atomici) ed è rimasto tale, anche se oggi è utilizzato anche da moltissimi utenti civili in ogni angolo della terra. Decisioni di peggiorare deliberatamente la precisione del GPS per gli utenti non militari oppure di "spegnere" la trasmissione dei dati satellitari in zone particolari fanno parte delle misure che vengono prese unilateralmente dagli Stati Uniti. Lo fu ad esempio nel 1999, durante la guerra del Kosovo, dove in vaste aree dell'Adriatico non fu più possibile utilizzare il GPS perché la trasmissione dei dati fu interrotta dalle autorità americane. Per salvaguardare le proprie conoscenze nel campo della ricerca spaziale fu introdotta negli Stati Uniti, pure nel 1999, una norma che sottoponeva al Ministero degli Esteri statunitense l'autorizzazione a rilasciare permessi per l'esportazione di propri satelliti o parti di esso: permessi che nella maggior parte delle volte vengono rifiutati. Si possono anche comprendere le parole del Direttore dei Programmi di Applicazione presso

l'Agenzia Spaziale Europea ESA Claudio Mastracci il quale, alcuni mesi fa, dichiarò "che noi europei non possiamo più permetterci di sviluppare satelliti costosi o una rete di satelliti per poi dipendere dal legislatore americano, il quale prescrive tra l'altro da quale base di lancio dovranno partire i satelliti, su quale orbita saranno messi e chi sarà autorizzato a ricevere i loro segnali e chi no lo sarà". Tuttavia non si deve credere che la concorrenzialità sia l'unica attitudine tra i responsabili dei programmi GALILEO e GPS. Al contrario, per l'Europa GALILEO sarà un programma improntato sulla collaborazione internazionale, per gli americani GALILEO rappresenta un progetto interessante e in parte complementare al GPS. Soprattutto gli aspetti della compatibilità e della interoperabilità di GALILEO con il GPS sono riconosciuti da ambedue le parti come molto promettenti. Ad esempio con un ricevitore GALILEO potrà ricevere e combinare i propri dati con quelli del GPS ottenendo una maggiore affidabilità e qualità del segnale satellitare superiore a quello ottenibile da un singolo sistema, beneficiando così di un effetto di sinergie.

GALILEO è stato concepito fin dall'inizio come un sistema di navigazione civile, commerciale e di pubblica utilità. Anche la gestione del futuro sistema sarà garantita da una organizzazione civile. Se un giorno GALILEO troverà applicazioni anche nel settore militare è una questione tuttora aperta, anche se ciò è molto probabile: è invece da escludere che venga realizzato un secondo sistema europeo di navigazione satellitare soltanto per scopi militari. GALILEO offrirà molti servizi, più o meno aperti a tutti, suddivisi in 5 categorie:

1. Servizio di base: gratuito, aperto a tutti, simile al GPS civile ma con un grado di qualità e di affidabilità superiori.
2. Servizio commerciale: riservato alle attività commerciali (ad esempio nel settore delle banche, trasporti, energia ecc.), simile al precedente ma con prestazioni leggermente superiori.
3. Servizio "Safe-of-Life": servizio con ottime prestazioni con garanzie di affidabilità, per applicazioni dove la sicurezza è un fattore essenziale come ad esempio la gestione del traffico aereo e marittimo.
4. Servizio "ricerca e salvataggio": sistema riservato ai casi di emergenze.
5. Servizio pubblico (denominato anche PRS = "Public Regulated Service"): servizio con segnali satellitari "robusti" quindi resistenti a disturbi e interferenze e criptati il cui accesso è limitato a persone autorizzate nelle amministrazioni statali, nella protezione civile, addetti alla sicurezza e al controllo della legalità, polizia e pompieri.

Per lo sviluppo di GALILEO è stata fondata un nuovo consorzio industriale dal nome "Galileo Industries", con sede a München-Ottobrunn (Germania), che è una Joint Venture di diverse ditte europee altamente specializzate nel settore spaziale, la Astrium GmbH (Germania), Astrium Ltd (Gran Bretagna), Alcatel Space (Francia), Alenia Spazio (Italia) e Galileo Systemas y Servicios (Spagna): una parte-

GALILEO è una sfida economica, commerciale, strategica e di competenze tecnologiche di enorme rilevanza per l'Europa, anche per il nostro paese.

Molti specialisti ritengono che, se le previsioni economiche, realizzative e di prestazioni saranno mantenute, GALILEO avrà in Europa, tra una decina d'anni, un impatto estremamente importante sul singolo cittadino paragonabile a quello della telefonia mobile.

Il progetto nacque all'inizio del 1998 quando il Consiglio Europeo invitò la propria Commissione a presentare uno studio di fattibilità per un possibile sistema di navigazione satellitare europeo, che coprisse tutta la terra quale alternativa al GPS americano. Nel novembre 2001 i Ministri per la ricerca spaziale della EU, riuniti ad Edinburgo, votarono un primo credito di € 547 milioni che permise il lancio del progetto.

cipazione della ditta Thales (Francia) è per ora oggetto di trattative.

Paragonando le prestazioni odierne dei due sistemi di navigazione satellitari americano e russo GALILEO presenterà un certo numero di vantaggi:

- GALILEO avrà il carattere di un servizio pubblico, avrà una base legale con una migliore garanzia di funzionalità.
- GALILEO sarà un sistema di navigazione più moderno (quelli odierni hanno già tra i 20 e i 25 anni di esistenza) con tecnologie d'avanguardia.
- GALILEO sarà più preciso. L'errore sulla posizione sarà sicuramente inferiore ai 10 metri, probabilmente vicino a 1 metro. Questo errore verrà ancora ridotto quando GALILEO sarà utilizzato in modalità differenziale.
- GALILEO sarà più affidabile.
- GALILEO garantirà un miglior funzionamento in zone urbane, all'interno di edifici, in gallerie ecc.
- GALILEO garantirà un miglior funzionamento a latitudini elevate (regioni del nord Europa e regioni polari).
- GALILEO sarà indipendente da organizzazioni con interessi particolari.

È evidente che queste prestazioni e i vantaggi rispetto al GPS dovranno un giorno essere verificati: GALILEO è per ora un progetto allo stato embrionale.

Come per il GPS anche GALILEO presenterà un "segmento spaziale" e un "segmento al suolo".

Il cuore del "segmento spaziale" è rappresentato da una costellazione di 30 satelliti distribuiti su 3 piani di orbite inclinati ognuno di 56° sull'equatore. Dei 10 satelliti per piano 9 saranno in servizio permanentemente e uno in riserva: quest'ultimo sarà in grado di sostituire ad ogni istante un satellite in avaria sullo stesso piano orbitale. I satelliti ruoteranno attorno alla terra da una altezza di 23'616 km con un'orbita quasi circolare avente un periodo di rivoluzione di 14 ore. La costellazione di satelliti garantirà una eccellente copertura mondiale. Un satellite ruoterà su se stesso durante il volo orbitale in modo da dirigere costantemente le sue antenne trasmettenti verso il centro della terra. I pannelli solari saranno invece costantemente diretti verso il sole. Essi produrranno corrente elettrica necessaria per alimentazione tutti i sistemi elettronici ed erogheranno una potenza massima valutata sui 1'500 Watt.

I messaggi in codice trasmessi da un satellite GALILEO saranno modulati in 3 diverse bande di frequenze a seconda dell'impiego prestabilito: la 1° banda di frequenze si colloca tra i 1'164 e i 1'215 MHz, la 2° tra 1'260 e 1'300 MHz e la terza tra 1'559 e 1'591 MHz. In quest'ultima banda si trovano pure le frequenze del GPS. Si dovranno quindi adottare misure per evitare interferenze tra i due tipi di satelliti e nello stesso tempo usufruire del segnale GPS per migliorare la precisione e l'affidabilità di GALILEO.

Un satellite peserà circa 700 kg. Grazie a questo peso assai contenuto si potranno mettere in orbita con un unico vettore più satelliti ad ogni lancio. È previsto infatti di utilizzare il



Fig. 14: Satellite Galileo

razzo Ariane-5 che metterà in orbita fino a 8 satelliti per volta. In una seconda fase saranno utilizzati vettori più piccoli per sostituire i singoli satelliti fuori uso.

Il "segmento al suolo" è simile nella sua configurazione a quello del GPS. Sono previsti due Centri principali di Controllo in Europa (denominate "Galileo Control Centres") a cui spetterà il compito della sincronizzazione degli orologi atomici di bordo, del calcolo delle correzioni e delle trasmissioni dei dati ad altre stazioni terrestri distribuite uniformemente sul globo. Tra quest'ultime vanno annoverate le stazioni di comunicazione (denominate "Galileo Uplink Stations") che assicureranno la telemetria, le telecomunicazioni, l'inseguimento radar dei satelliti. A quest'ultime vanno aggiunte diverse stazioni di monitoraggio (denominate "Galileo Sensor Stations") che controlleranno il corretto funzionamento delle trasmissioni dei messaggi satellitari. Le comunicazioni tra le varie stazioni del "segmento al suolo" sarà assicurata soprattutto da satelliti di comunicazione.

GALILEO ha mosso i primi passi concreti nell'estate del 2003.

Il progetto nacque all'inizio del 1998 quando il Consiglio Europeo invitò la propria Commissione a presentare uno studio di fattibilità per un possibile sistema di navigazione satellitare europeo, che coprisse tutta la terra quale alternativa al GPS americano. Nel novembre 2001 i Ministri per la ricerca spaziale della EU, riuniti ad Edinburgo, votarono un primo credito di € 547 milioni che permise il lancio del progetto. Seguì un periodo assai difficile caratterizzato da lunghe trattative da contrasti politici. Berlino e Roma si contesero la conduzione industriale del progetto: anche la ripartizione delle commesse fu motivo di accese discussioni. Dopo un anno di trattative e dopo due interventi risolutivi da parte della UE si trovò infine una soluzione di compromesso. La sede della "Galileo Industries" andò alla Germania (più precisamente a Ottobrunn presso Monaco di Baviera) come pure la costruzione della maggior parte dei satelliti. L'Italia assicurerà l'assemblaggio degli stessi, la Gran Bretagna la costruzione delle antenne e la Francia realizzerà le stazioni del "segmento al suolo". Anche la Svizzera avrà la sua fetta di torta, anche se modesta poiché proporzionata al contributo finanziario della Confederazione. Ad esempio la Società Temex di Neuchâtel ha ottenuto contratti per lo svi-

luppo di alcune componenti essenziali degli orologi atomici di bordo. Ma anche altre Società svizzere minori riceveranno sicuramente commesse industriali da parte dell'ESA.

L'11 luglio 2003 è stato stipulato tra l'ESA e la Società inglese Surrey Space Technology Ltd un primo contratto di € 27.9 milioni per la realizzazione di un satellite di prova di 400 kg con il quale si proveranno tecnologie cruciali come il generatore di messaggi e l'orologio atomico al rubidio. Con un secondo contratto al Consorzio "Galileo Industries", per un valore di € 72.3 milioni, si è commissionata la costruzione di un secondo satellite di prova di 525 kg di peso che servirà a ridurre al minimo i rischi di ritardi nella realizzazione del progetto e di eventuali fallimenti del lancio. A fine ottobre di quest'anno il Presidente della Commissione europea Romano Prodi e il Primo Ministro cinese Wen

Jiabao hanno firmato un accordo di cooperazione per il progetto GALILEO: la Cina ha assicurato una partecipazione finanziaria allo sviluppo del progetto per € 200 milioni, una somma molto vicina a quella di altri partner europei.

La pianificazione prevede una fase di sviluppo, di prove e di verifiche delle soluzioni adottate entro la fine del 2005. Tra il 2006 e il 2007 verranno messi in orbita successivamente tutti e 30 satelliti e verranno costruite contemporaneamente le stazioni del "segmento al suolo". GALILEO diverrà operativo (se non vi saranno ritardi importanti) nel 2008. Il tempo stringe anche perché la concorrenza non demorde. Il Pentagono prevede infatti d'iniziare la messa in orbita entro il 2009 del sistema di navigazione GPS-3, una nuova versione del GPS odierno, a cui gli specialisti attribuiscono ottime prestazioni.

Glonass

Simile al sistema americano GPS anche il sistema di navigazione russo GLONASS è stato voluto originariamente dal Ministero della Difesa dell'allora Unione Sovietica con l'obiettivo di mettere a disposizione delle proprie unità dislocate all'estero (soprattutto della Marina sovietica) i dati sulla posizione e sul tempo in modo preciso e con continuità. Come il GPS anche GLONASS conobbe un sistema di navigazione precedente denominato Tsikada. GLONASS fu sviluppato soprattutto in vari Istituti universitari in particolare in quelli di meccanica, d'ingegneria spaziale e di radionavigazione. Oggi GLONASS fa parte dei programmi intergovernativi russi di radionavigazione civile che collaborano strettamente con l'Organizzazione Internazionale per l'Aviazione Civile (ICAO) e con l'Organizzazione Internazionale per la Marina (IMO). Tra il 1982 e oggi furono sviluppati e messi in orbita 4 tipi diversi di satelliti. Ad ogni nuova serie corrispose un miglioramento delle prestazioni e soprattutto si cercò di migliorare l'affidabilità del satellite.

I dati tecnici di GLONASS qui riportati evidenziano le analogie con il sistema GPS americano (quest'ultimi sono nella parentesi quadra).

	GLONASS	GPS
<i>Numero dei satelliti in orbita</i>	21 + 3 (riserva)	21 + 3
<i>Peso di un satellite (approssimativo)</i>	1'400 kg	1'500 kg
<i>Numero dei piani delle orbite</i>	3	6
<i>Numero di satelliti per piano orbitale</i>	8	4
<i>Separazione angolare tra satelliti adiacenti</i>	120°	60°
<i>Inclinazione dei piani sull'equatore</i>	64.8°	55°
<i>Altezza media dell'orbita sulla terra</i>	19'150 km	20'200 km
<i>Periodo orbitale di un satellite</i>	11 h / 16 min	12 h
<i>Numero di frequenze per la portante L₁</i>	24	1
<i>Frequenza portante L₁</i>	da 1'602 a 1'615 MHz	1'575 MHz
<i>Separazione tra due frequenze L₁</i>	562 KHz	----
<i>Numero di frequenze per la portante L₂</i>	24	1
<i>Frequenza portante L₂</i>	da 1'246 a 1'256 MHz	1'227 MHz
<i>Separazione tra due frequenze L₂</i>	417 KHz	----
<i>Velocità di trasmissione dei dati</i>	50 Bit/s	50 Bit/s
<i>Lunghezza del messaggio (frame)</i>	7'500 Bit in 150 s	1'500 Bit in 30 s
<i>Numero dei subframes</i>	5 da 1'500 Bits	5 da 300 Bits

Oltre alle similitudini esistono anche delle differenze tra i due sistemi di navigazione, le più sostanziali delle quali sono le seguenti:

- GLONASS opera con 24 frequenze portanti differenti, una per ogni satellite (il GPS ne ha una sola). Ciò comporta una diversa e più complessa tecnologia del ricevitore. È infatti captando la frequenza nel ricevitore che si arriva ad identificare il satellite dal quale il segnale viene emesso.
- Il GPS utilizza come sistema di riferimento l'ellissoide universale WGS-84 mentre GLONASS si basa su un sistema di rife-

Simile al sistema americano GPS anche il sistema di navigazione russo GLONASS è stato voluto originariamente dal Ministero della Difesa dell'allora Unione Sovietica con l'obiettivo di mettere a disposizione delle proprie unità dislocate all'estero (soprattutto della Marina sovietica) i dati sulla posizione e sul tempo in modo preciso e con continuità.

Il vero tallone d'Achille di GLONASS è rappresentato dalla durata della "vita media" di un satellite, il lasso di tempo cioè tra la messa in orbita e il sopraggiungere di avarie così gravi da metterlo fuori uso. Al momento della definizione del programma fu indicato in 4 anni la "speranza di vita" di un satellite GLONASS.

rimento proprio, il SGS-85. Le differenze sulla posizione dovuta ai due diversi sistemi geodetici si aggirano attorno ai 20 metri. Una differenza per molte applicazioni civili senz'altro tollerabile. Non lo è invece nella modalità di uso differenziale.

- GLONASS va soggetta a variazioni d'errore sulla posizione più importanti del GPS poiché gli effetti della ionosfera e della troposfera non vengono corretti.
- Per contro in GLONASS le effemeridi vengono ricalcolate ogni 30 minuti mentre nel GPS questo aggiornamento viene eseguito normalmente ogni 8 ore circa.

La precisione sulla posizione che si ottiene con GLONASS è un po' peggiore di quella del GPS in Codice civile C/A a causa della mancata compensazione degli effetti atmosferici.

Pochi anni dopo la messa in funzione di GLONASS il mondo della ricerca scientifica, in particolare quello della radio-astronomia, fu sorpreso da un effetto, purtroppo negativo, da ricondurre al sistema di navigazione russo. La parte centrale della banda di frequenze portanti L1 di GLONASS coincide con la lunghezza d'onda delle emissioni naturali delle molecole d'idrossido extra-solare. In altre parole le trasmissioni dei messaggi dai satelliti GLONASS interferiscono pesantemente con la ricerca nella radio-astronomia: il disturbo aumentò con la crescita del numero di satelliti messi in orbita e con il fatto che essi rimangono visibili sopra l'orizzonte per lungo periodo di tempo. Preso coscienza del problema si sono cercate negli ultimi anni contromisure che riuscissero ad attenuare le conseguenze delle interferenze: si riuscì infatti a diminuire i disturbi, senza tuttavia poterli eliminare completamente.

Il vero tallone d'Achille di GLONASS è rappresentato dalla durata della "vita media" di un satellite, il lasso di tempo cioè tra la messa in orbita e il sopraggiungere di avarie così gravi da metterlo fuori uso. Al momento della definizione del programma fu indicato in 4 anni la "speranza di vita" di un satellite GLONASS. In realtà questo risultato non fu mai raggiunto: con la prima serie si arrivò a circa 1 anno, più tardi si migliorò questo valore portandolo a 22 mesi. La mancanza d'affidabilità tecnica del satellite rende problematico tutte le soluzioni tendenti a integrare o a combinare il sistema di navigazione russo con il GPS americano, e, nei prossimi anni, con il sistema europeo GALILEO. ■

Glossario (in ordina alfabetico)

Almanacco		Effemeridi approssimative di ogni satellite GPS
AS	Anti-Spoofing	Sistema "anti-imbroglio" che agisce sul Codice P generando un nuovo Codice criptato denominato Codice Y o P(Y)
Bit	Binary digIT	L'unità digitale (sistema binario) più semplice memorizzabile rappresentata con i caratteri 0 oppure 1.
Byte		Insieme di 8 BIT consecutivi
DGPS	Differential GPS	Tecniche differenziali del GPS
DOP	Dilution of Position	Degrado della precisione sulla posizione dovuto alla distribuzione geometrica dei satelliti
Effemeridi		Set di parametri (calcolati o pronosticati) per determinare la posizione di un satellite sull'orbita ideale
ESA	European Space Agency	Agenzia spaziale europea
Frame / subframe		Spazio di memoria digitale per la trasmissione di un intero messaggio o parte di esso
GA	Ground Antenna	Stazione di aggiornamento e trasmissione dati (segmento al suolo)
GDOP	Geodetic DOP	Valore numerico complessivo del DOP (valore tipico 2.5)
GLONASS	Global Navigation Satellite System	Sistema di navigazione satellitare russo
GPS	Global Position System	Sistema di navigazione satellitare USA
Maser	Microwave Amplification by stimulated emission of radiation	Amplificatore di radiazioni a microonde
MB / GB	Mega / Giga Bytes	1 milione risp. 1 miliardo di Bytes
MBips	Mega Bytes per Second	Velocità di trasmissione dati in milioni di Bytes al secondo
MCS	Master Control Station	Stazione principale di controllo (segmento al suolo)
MS	Monitor Station	Stazione di monitoraggio (segmento al suolo)
NAVSTAR	Navigation System using Time and Ranging	Denominazione aggiuntiva per il sistema GPS americano
PRS	Public Regulated Service	Servizio Pubblico di GALILEO
WGS-84	World Geodetic System 1984	Sistema di riferimento geografico universale utilizzato dal GPS (1984)