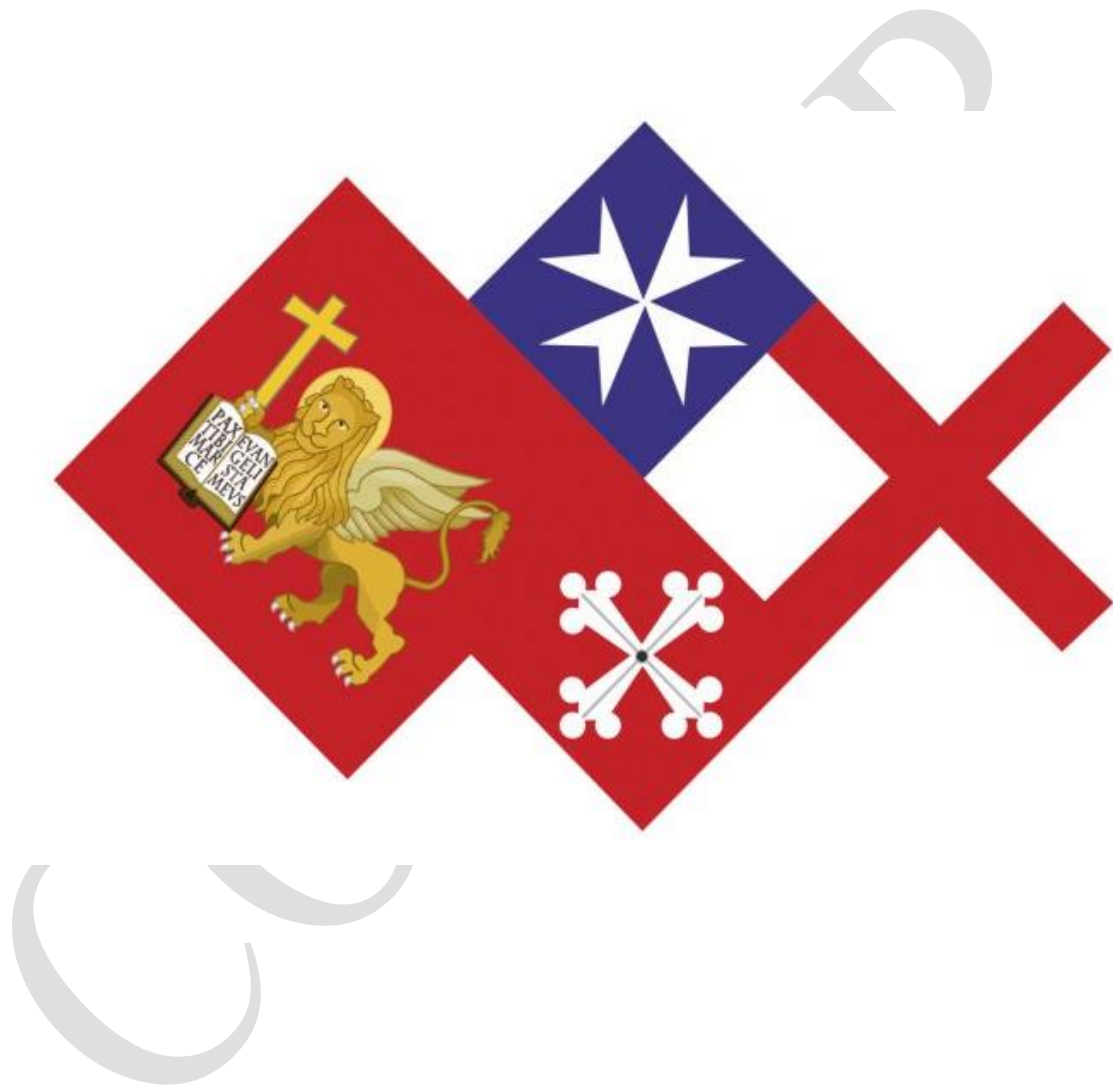


Global Positioning System

GPS



COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

Il sistema di posizionamento GPS (acronimo in inglese: Global Positioning System, a sua volta abbreviazione di NAVSTAR GPS, acronimo di NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System o di NAVigation Signal Timing And Ranging Global Position System) è un sistema di posizionamento satellitare globale, continuo e tridimensionale gestito da USA. E' operativo dal dicembre 1993 quando il DoD (Department of Defence statunitense) ne ha permesso gli usi civili.

Attraverso una rete dedicata di satelliti artificiali in orbita, fornisce con copertura mondiale: a un terminale mobile o ricevitore GPS informazioni sulle sue coordinate geografiche, sulla sua quota e velocità ove vi sia un contatto privo di ostacoli con almeno quattro satelliti del sistema, oltre la possibilità di sincronizzare le scale universali di tempo UTC (Universal Time Coordinate).

La localizzazione avviene tramite la trasmissione di un segnale radio da parte di ciascun satellite e l'elaborazione dei segnali ricevuti da parte del ricevitore.

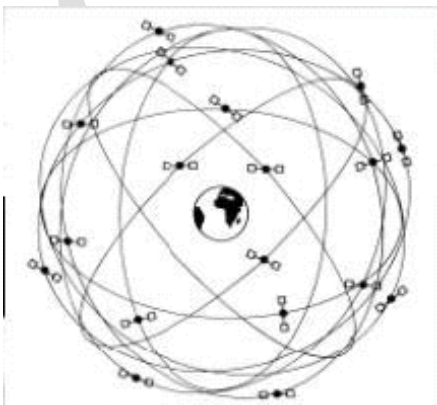
Il principio di funzionamento si basa su un metodo di posizionamento sferico (trilaterazione), che parte dalla misura del tempo T che un radiosegnale impiega a percorrere la distanza satellite-ricevitore.

Il sistema di posizionamento si compone di tre segmenti: il segmento spaziale (space segment), il segmento di controllo (control segment) e il segmento utente (user segment).

L'Aeronautica militare degli Stati Uniti sviluppa, gestisce e opera il segmento spaziale e il segmento di controllo.

Il segmento spaziale comprende 32 satelliti. Il segmento di controllo si compone di una stazione di controllo principale, una stazione di controllo alternativa, varie antenne dedicate e condivise e stazioni di monitoraggio. Il segmento utente infine è composto dai ricevitori GPS.

Attualmente la costellazione GPS è costituita da 31 satelliti attivi, più alcuni satelliti dismessi alcuni dei quali riattivabili in caso di necessità, sono equamente distribuiti in sei piani orbitali inclinati di 55° sull'equatore. I satelliti supplementari migliorano 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 di più satelliti.



L'orbita di ogni satellite è poco eccentrica, l'altitudine è prossima a 20200 Km (20183), altezza per la quale risulta nullo l'effetto frenante per attrito dell'atmosfera terrestre. A tale distanza il periodo di rivoluzione è di 12 ore sideree, pari a $11^h58^m02^s$ di tempo medio, è una orbita semi-sincrona con la rotazione terrestre. Il satellite rimane sopra l'orizzonte dell'osservatore per circa 5 ore da quando passa allo zenith. La distribuzione dei satelliti è tale da garantire la presenza di non meno di 4 di essi sopra l'orizzonte con una elevazione superiore a 5° . I satelliti GPS hanno una potenza di trasmissione di 50 watt. Quando il segnale arriva sulla terra, dopo avere percorso vari strati dell'atmosfera, ha una potenza bassissima pari a circa $1 \cdot 10^{-16}$ watt (pari a circa -130 dbm). I satelliti che hanno una potenza minore della soglia, non vengono considerati.

Un satellite si manterrà in orbita ad una altezza costante Z , quando vi sarà equilibrio tra la forza centrifuga, data dal prodotto della massa del satellite per l'accelerazione centrifuga ($F_f = m \frac{v^2}{R+Z}$) e

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

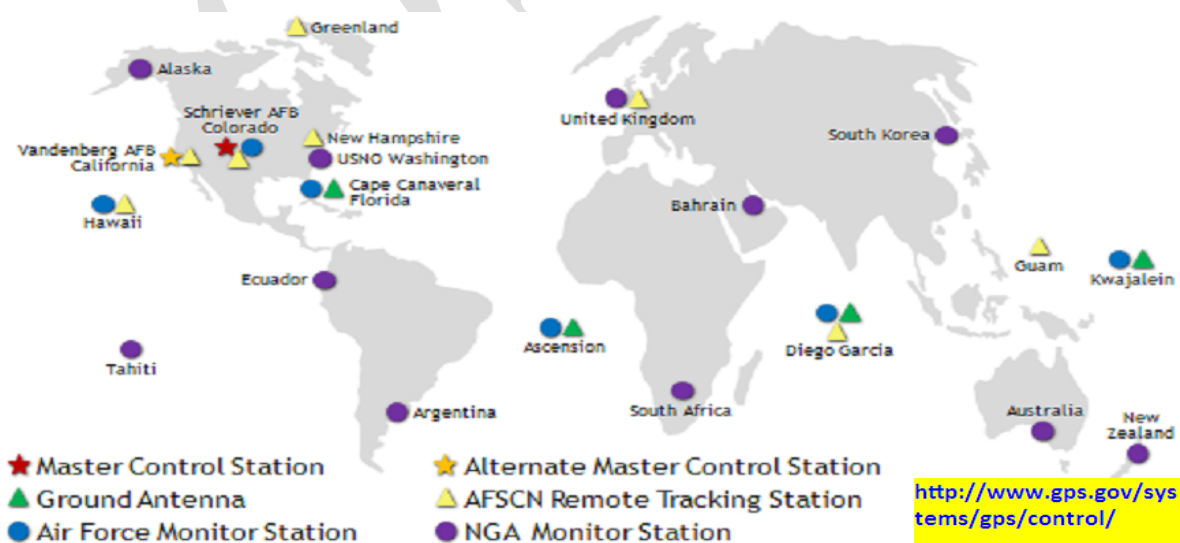
la forza centripeta ($F_{cp} = m * g_z$), ove la F_{cp} è la forza gravitazionale con cui il satellite è attratto dalla Terra, con $g_z = g_0 \left(\frac{R}{R+Z} \right)^2$; con $R = 6370$ Km per convenzione, $g_0 = 9,80665$ m/sec².

Pertanto si può scrivere la seguente uguaglianza: $g_0 \left(\frac{R}{R+Z} \right)^2 = \frac{v^2}{R+Z}$ da cui si può ricavare l'espressione della velocità astronautica $V = R \sqrt{\frac{g_0}{(R+Z)}}$ dalla quale si può comprendere che ad ogni quota Z corrisponde una velocità V di mantenimento su orbita circolare inversamente proporzionale alla quota, maggiore la quota, minore la velocità. $V = 14000$ Km/h circa e $T = 2\pi(R+Z)/V$. Ciascun satellite dispone di razzi a idrazina (N_2H_4 **idruo di azoto**) per effettuare le correzioni di orbita (comandati da Terra) e di pannelli solari fotovoltaici per la produzione di energia elettrica uniti a una batteria che garantisce l'energia necessaria con il sole eclissato.

Il segmento di controllo

Il segmento di controllo è composto da:

1. una stazione di controllo principale MCS (*Master Control Station*), situata nella base B.A.Schriever dell'USAF, a 25 km da Colorado Springs;
2. una stazione di controllo principale alternativa AMCS (*alternate master control station*) situata a Vandenberg (California), operativa entro 2 ore e nella quale tutto lo staff può essere trasferito da Colorado Springs entro 12 ore in caso di avarie;
3. quattro antenne terrestri dedicate MS, (Monitor Station), equidistanti ed ubicate sulla fascia equatoriale (Cape Canaveral,; Atollo di Kwajalein, Pacifico Occidentale; isola dell'Ascensione, nell'Atlantico e nell'isola di Diego Garcia, nell'Oceano Indiano), queste stazioni gestite dall'USAF rilevano le traiettorie dei satelliti (insieme alla MCS);
4. sei stazioni di controllo e monitoraggio USAF (Hawaii, Colorado Springs, Cape Canaveral, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein);



5. 10 Stazioni di monitoraggio della NGA (National Geospatial-Intelligence Agency), situate in Inghilterra, Argentina, Ecuador, Tahiti, Sud Africa, Bahrein, Sud Corea, Australia, nuova Zelanda e Washington DC.

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

6. Air Force Satellite Control Network (AFSCN) Monitor station nel numero di 8, dislocate in: (4 in USA: Vadenberg, Hawaii, Colorado Springs, New Hampshire), Groenlandia, U.K, Diego Garcia e Guam.

Tutti i dati raccolti dalle varie stazioni vengono fatti affluire alla MCS, che li elabora per determinare: la distanza dei satelliti, le loro effemeridi orbitali (prossime future estrapolate dalle posizioni passate rilevate), al fine di aggiornare i parametri orbitali dei satelliti e calcolare la correzione da apportare al tempo dei loro orologi, per il periodo futuro, orologi che subiscono un anticipo nella misurazione del tempo. Questi messaggi di aggiornamento rifluiscono a 3 delle MS (stazioni dotate di grandi antenne paraboliche dal Diametro di circa 10 m) che 3 volte al giorno trasmettono questi dati ai satelliti, il caricamento dei dati avviene su una radiofrequenza in banda S ($\lambda = 16$ cm). Questi dati forniranno la parte essenziale del messaggio di navigazione, che trasmesso con continuità da ogni satellite viene ricevuto dagli utilizzatori.

L'anticipo nella misurazione del tempo per gli orologi di bordo è conseguenza dell'effetto combinato di 2 fattori, la velocità relativa di spostamento rispetto alla terra (teoria della relatività di Einstein) che rallenta il tempo sul satellite di $7 \mu\text{s}$ (microsecondi) al giorno, mentre il potenziale gravitazionale, minore sul satellite lo accelera di $45 \mu\text{s}$ al giorno, pertanto in un giorno si ha una accelerazione di $38 \mu\text{s}$. Senza questa correzione, nota la velocità di propagazione delle o.e.m. che è circa 300m al μs , si avrebbe un errore di 11400m sulla determinazione della distanza del satellite. Per ovviare agli errori di approssimazione nella misura del tempo, gli orologi del sistema debbono essere molto precisi e vengono utilizzati orologi atomici al cesio ($Z = 55$) o al rubidio ($Z = 37$), che inducono ad un errore di 1 sec ogni 30 milioni di anni, oggi si stanno sperimentando orologi all'Iterbio ($Z = 70$) capaci di un errore di 1 sec. in 1500 milioni di anni.

Va precisato che per raggiungere i livelli di precisione indicati, occorre tenere in conto altri errori di tempo sui satelliti rispetto a terra, non solo quelli di origine relativistica. Ne esistono altri, legati alla propagazione del segnale in atmosfera o ai ritardi dell'elettronica di bordo. Mentre gli errori relativistici sono compensati, un'efficace compensazione di quelli atmosferici o elettronici risulta decisamente più complessa.

SEGMENTO UTILIZZAZIONE

E' costituito dai vari utenti (marittimi, aerei e terrestri) che dotati di un equipaggiamento più o meno sofisticato (antenna, ricevitore, calcolatore) permette di decodificare il segnale ricevuto e ottenere la precisione richiesta per determinare il luogo di posizione.

Il ricevitore è costituito da un'antenna e da un processore, solitamente multicanale, in grado di agganciare i segnali dei satelliti «in vista» ed inseguirli, tenendoli monitorati ricevendo da essi le relative informazioni; si tratta di apparati passivi molto semplici in cui un oscillatore ed un generatore di codice producono un segnale identico a quello del satellite, che un correlatore confronterà con il segnale effettivamente ricevuto dal cielo. L'apparato è completato da sistema di controllo dei dati e interfaccia utente con display.

Le *performance standard* dei ricevitori GPS sono stabiliti dall'IMO attraverso la risoluzione A.819(19) – *Recommendation on Performance Standards for Shipborne Global Positioning System (GPS) Receiver Equipment*, come modificata dalla MSC.112(73); viene sancito che il ricevitore GPS deve essere in grado di ricevere e processare un segnale SPS (*Standard Positioning System*) eventualmente affetto da SA e fornire le

coordinate su datum WGS84, sebbene possano essere previsti mezzi per trasformare l'informazione in altri datum.

Il ricevitore deve fornire la posizione entro 5 minuti dall'accensione se i dati dell'almanacco sono già disponibili (in caso contrario entro 30 minuti), e dal ripristino in caso di interruzione del segnale GPS per almeno 24h; in caso di interruzione dell'alimentazione elettrica di 60 secondi, la posizione deve essere riacquisita entro 2 minuti. A regime i dati devono essere forniti con cadenza di 1 secondo.

Le risoluzioni *MSC 74(69) Annex 1* e *MSC.115(73)* riguardano invece l'uso di ricevitori combinati GPS/GLONASS, che permettono di godere di maggiore disponibilità, integrità e accuratezza, oltre ad una migliore resistenza alle interferenze; ovviamente serve un'antenna in grado di ricevere entrambi i segnali, ma si hanno numerosi vantaggi, concretizzati infatti in *performance standard* più rigidi.

LUOGO DI POSIZIONE

Supponendo che il ricevitore abbia decodificato e demodulato il **messaggio di navigazione** del satellite e quindi in grado di conoscere l'esatto istante di partenza della trasmissione, tramite la misura dell'intervallo di tempo ΔT , fra l'istante di partenza e di arrivo del messaggio il ricevitore può determinare la distanza D dal satellite, $D = \Delta T * C$ (dove $C = 299790$ Km/sec è la velocità di propagazione delle onde e.m. nel vuoto, mentre nell'aria diminuisce di circa 1%, quindi nella Troposfera $C = 296792$ Km/sec circa).

Il luogo di posizione è una superficie sferica, il cui centro è la posizione del satellite nell'istante di trasmissione del segnale e il raggio D è la distanza calcolata con $D = \Delta T * C$, una sola misura

determinerebbe sulla superficie terrestre una circonferenza di raggio $r = R \sin \alpha = R \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+z}\right)^2}$ e

vista la quota del satellite avremmo una circonferenza di raggio $r = 6207$ Km circa, corrispondente ad un cerchio minore inclinato circa di 10° verso il satellite, rispetto al cerchio massimo che ha il satellite allo Zenith (circonferenza = 38900 Km = 21000 NM circa). (vedi fig. 1)

Per quanto esposto, si rendono necessarie le rilevazioni di più satelliti. Con 2 misure otteniamo l'intersezione delle 2 sfere, che sulla superficie terrestre individuano 2 circonferenze intersecantesi in 2 punti, di cui uno è la posizione del ricevitore. Ambiguità che potrebbe essere eliminata semplicemente con la posizione stimata dell'osservatore. Nella realtà, potendo disporre più di 2 misure, non serve introdurre nel ricevitore, le coordinate del punto stimato, questo è un concetto fondamentale del sistema GPS.

Avendo a disposizione 3 satelliti (oggi nella realtà se dispone di almeno 4), è possibile determinare anche la quota, visto che le tre superfici sferiche, in assenza di qualsiasi errore si intersecheranno in un punto, precisamente in presenza di un qualche errore di lieve entità, individueranno un triangolino di posizione praticamente piano, funzione degli errori di misura di distanza e azimuth dei satelliti. Un errore di $0,1 \mu s$ nella misura del ΔT comporterebbe un errore di 30 m nella misura della distanza dal satellite. E' fondamentale quindi che i satelliti e le stazioni di controllo dispongano di orologi di elevata precisione (ogni satellite dispone di 2 orologi atomici al Cesio e 2 al Rubidio).

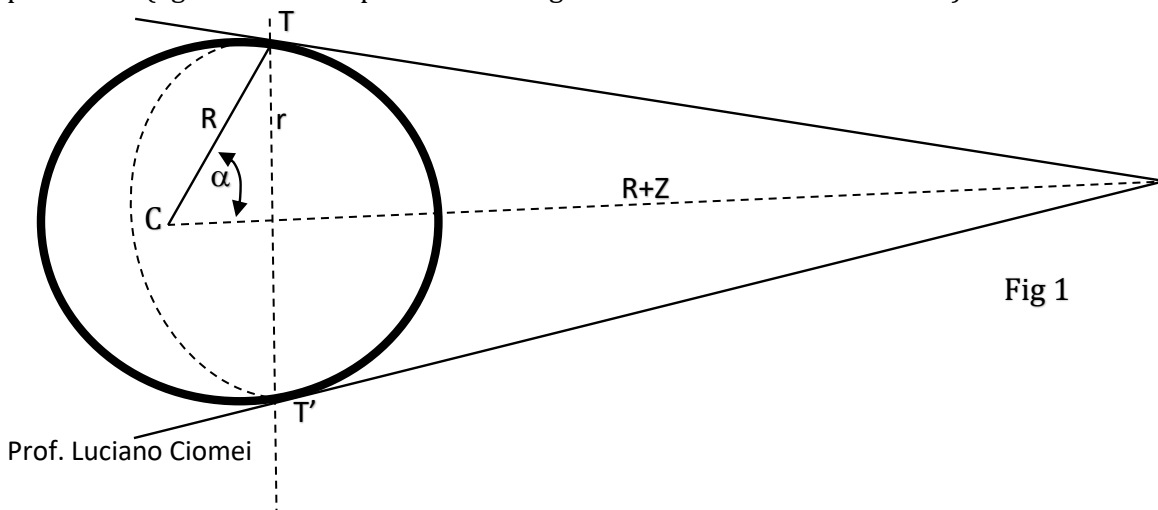


Fig 1

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

Il ricevitore non necessita di orologi di così elevata precisione è sufficiente un orologio di precisione al quarzo, in quanto è possibile determinare il suo errore e quindi la correzione rispetto al tempo (GPS Time) fornito dai satelliti; di tale tempo è noto lo scarto rispetto all'UTC.

L'orologio del ricevitore, all'atto dell'accensione del dispositivo ricevente, viene sincronizzato dalle informazioni che arrivano dal 4° satellite. Se anche il ricevitore avesse un orologio al cesio perfettamente sincronizzato con quello dei satelliti, sarebbero sufficienti le informazioni ricevute da 3 satelliti, ma nella realtà non essendo così, il ricevitore deve risolvere un sistema a 4 incognite (latitudine, longitudine, altezza e tempo) necessitando di risolvere 4 equazioni.

FREQUENZE E CODICI

Ciascun satellite emette i messaggi su 2 canali, L1 e L2. Il canale L1 è l'unico disponibile per il servizio civile SPS (Standard Positioning System), L2 invece è il servizio PPS (Precision Positioning System) è un servizio "militare".

Le frequenze portanti sono:

- L1 = 1574,42 MHz corrispondente a una lunghezza d'onda $l = 19,04$ cm;
- L2 = 1227,6 MHz corrispondente a una lunghezza d'onda $\lambda = 24,44$ cm;

Queste frequenze sul satellite vengono derivate da una batteria di oscillatori al quarzo ad alta stabilità di oscillazione, che generano un segnale ad onda quadra, utilizzato per sincronizzare il funzionamento del sistema.

L'onda quadra generata ha la frequenza fondamentale $f_0 = 10,23$ Mhz e le frequenze L1 e L2 sono multipli della f_0 . $L1 = 154 f_0$; $L2 = 120 f_0$.

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 pari a 50 bit per secondo (Binary Digit = minima quantità di informazione che risolve l'incertezza tra 2 eventi equiprobabili), con una modulazione numerica di tipo binari (0;1) e contenente il **Messaggio di Navigazione** trasmesso in codice e che contiene:

- 1) Tempo esatto dell'istante di inizio trasmissione;
- 2) Le effemeridi dell'orbita del satellite;
- 3) Grado di funzionalità del satellite;
- 4) Correzione relativistica dell'orologio satellitare;
- 5) Effetti del ritardo del segnale dovuto alla ionosfera (quella fascia dell'atmosfera nella quale le radiazioni del Sole, e in misura molto minore i raggi cosmici provenienti dallo spazio, provocano la ionizzazione dei gas componenti. La ionosfera si estende fra i 60 e i 1000 km di altitudine e dunque appartiene parzialmente sia alla mesosfera sia alla termosfera);
- 6) Correlazione con il tempo UTC come specificato dallo United States Naval Observatory;
- 7) Stato della costellazione.

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

Nuove frequenze: negli ultimi anni è in atto una forte modernizzazione del sistema GPS, tesa anche a renderlo competitivo con il Galileo europeo; tra le novità si ha l'introduzione di tre nuove frequenze L1C, L2C e L5: le prime hanno la stessa frequenza delle normali L1 e L2 e sono destinate a diventare le nuove frequenze per il servizio civile, per il quale si garantirà maggiore robustezza, accuratezza, affidabilità ed interoperabilità con gli altri sistemi GNSS, mentre la L5, avente frequenza 1176,45 MHz (ottenuta moltiplicando per 115 la frequenza base) è specificamente progettata per migliorare la sicurezza del trasporto aereo.

La funzione del ricevitore di bordo è prima di tutto quella di identificare il satellite attraverso la banca dati di codici che quest'ultimo ha in suo possesso; infatti ogni satellite ha un codice grazie al quale il ricevitore lo identifica. L'altra funzione importante del ricevitore è quella di calcolare il ΔT (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 trasmette l'almanacco (parametri orbitali approssimati) dell'intera costellazione, ed esclusivamente le effemeridi relative a se stesso. La trasmissione delle effemeridi dura 18 sec. E viene ripetuta ogni 30 sec.. La trasmissione dell'almanacco (dell'intera costellazione) dura 12,5 min.

In questo modo il ricevitore GPS, mentre effettua il conteggio Doppler, riceve i parametri dell'orbita da cui deriva la posizione del satellite, disponendo così di tutti gli elementi utili a definire la superficie di posizione nello spazio.

Il messaggio trasmesso in codice dal satellite viene:

- a) Ricevuto dall'antenna del ricevitore dell'utilizzatore;
- b) Acquisito attraverso varie fasi dal ricevitore per sincronizzare l'orologio sul tempo del satellite (GPS Time);
- c) Usato per decodificare l'istante di inizio trasmissione;
- d) Impiegato per calcolare il ΔT tra l'istante di trasmissione dal satellite e l'istante di ricezione.

Con il ΔT viene calcolata la distanza del ricevitore dal satellite ($D = \Delta T * C$), chiamata in gergo Pseudo Range (distanza apparente).

Calcolata la posizione del ricevitore con la pseudo range, si avrà una precisione comunque elevata, nel 95% dei punti, l'errore "e_n" del punto nave risulta nell'ordine di qualche decina di metri.

Le due portanti L1 = 1574,42 MHz e L2 = 1227,6 MHz sono modulate in fase con appositi segnali denominati codici. Tre sono i codici in argomento:

- 1) Codice P (Protected o Precision), modula le portanti L1 e L2;
- 2) Codice C/A (Clear Access "accesso libero" o Course acquisition "acquisizione grossolana"), che modula la portante L1;

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

- 3) Codice D, Navigation Data su entrambe le portanti L1 e L2, esso contiene le effemeridi del satellite, l'ora del sistema e tutte le informazioni di almanacco sulle future posizioni dei satelliti.

I codici P, C/A e D sono sequenze di cifre binarie (0:1) ripetute:

- Il codice P ogni 7 giorni;
- Il codice C/A ogni msec (millisecondo);
- Il codice D trasmesso continuamente a bassa velocità di trasmissione, alla velocità di 50 bit al sec (50 bps).

Questa modulazione in fase dei codici è denominata modulazione con sequenza BPSK (Binary Phase Shift Keying) ed è una tecnica di modulazione numerica dove l'informazione viene codificata nella fase della portante. Essa consiste nell'associare alle 2 cifre binarie 1 e 0, due valori diversi di fase della portante come ad esempio 0° e 180° generando così uno scostamento della fase.

I codici P e C/A sono detti Pseudo Random Noise (PRN); ogni satellite utilizza una propria sequenza che è differenziata da quella degli altri satelliti grazie ad un numero variabile da 0 a 37 che viene indicato con la sigla PRN.

Il segnale di ogni satellite è modulato secondo la tecnica SSN (Spread Spectrum Modulation "modulazione a spettro espanso") che consiste nella trasmissione del segnale su una banda di frequenze che è considerevolmente più ampia di quella effettivamente necessaria alla trasmissione dell'informazione contenuta nel messaggio stesso è una trasmissione detta anche a banda larga.

Questa tecnica si rende necessaria affinché tutti i satelliti possano trasmettere simultaneamente nello stesso spettro di frequenze, senza disturbarsi tra loro e senza interferenze con i segnali di altra sorgente. Nella demodulazione il ricevitore è in grado di individuare il segnale di un satellite tra i segnali di tutti gli altri satelliti.

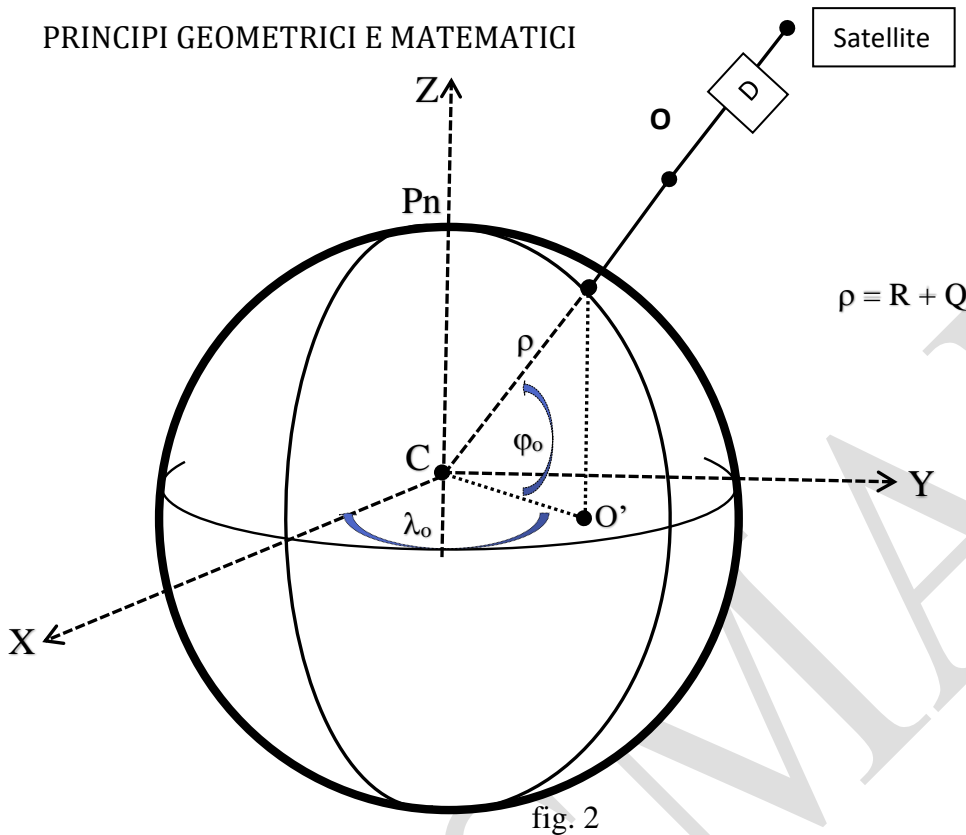
I livelli di precisione del sistema GPS sono 2, a seconda della modulazione delle 2 portanti L1 e L2 con i codici P e C/A.

- La presenza del codice C/A (a banda stretta $f = 1,023\text{MHz} = 1/10$ di f_0) sulla sola portante L1 è intenzionale al fine di dare una limitazione alla accuratezza nella determinazione della posizione da parte degli utenti civili. Questa degradazione del segnale SA (Selective Availability) è stata in parte disabilitata, nel maggio 2000 da parte del Presidente USA Bill Clinton, portando così la precisione dai circa 100m agli attuali 18/20m. Però al fine di impedirne l'utilizzo su missili sono previste delle limitazioni di quota (18 Km) e di velocità (515 m/sec), limiti che possono essere superati ma non contemporaneamente.
- Il codice P (protetto e preciso), a larga banda ($f_0 = 10,23\text{MHz}$) è presente su entrambe le portanti con lo scopo di ridurre gli effetti della propagazione ionosferica. Questo codice

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

che consente una determinazione della posizione notevolmente più precisa rispetto al codice C/A (precisione del punto centimetrica) è chiamato PPS (Precise Positioning Service) ed è un servizio non libero ma riservato agli utenti militari o altri autorizzati.

PRINCIPI GEOMETRICI E MATEMATICI



Il principio geometrico del sistema già è stato visto, il punto nave è il punto comune di tre superfici sferiche. Per seguire i relativi calcoli matematici, bisogna tener presente che operando con le figure dello spazio è opportuno tralasciare le coordinate geografiche (φ , λ) e utilizzare al loro posto le coordinate cartesiane x, y, z ; salvo poi alla fine dei calcoli trasformare le coordinate cartesiane in geografiche.

Il centro della Terra C è l'origine degli assi; l'asse x passa per il piede del meridiano di Greenwich, l'asse y sul piano dell'equatore a 90° dall'asse x , in senso antiorario (verso E), l'asse z è l'intersezione dei 2 piani che hanno determinato gli assi x e y , cioè la congiungente $C-P_n$.

Sia O (vedi fig. 2) la posizione incognita del ricevitore, indichiamo con φ_0 e λ_0 le sue coordinate geografiche e X, Y, Z le sue coordinate cartesiane. Il raggio ρ (da C ad O) è la somma del raggio terrestre R con la quota Q ($\rho = R + Q$).

Le formule di trasformazione sono:

$$X = \rho * \cos \varphi_0 * \cos \lambda_0; \quad Y = \rho * \cos \varphi_0 * \sin \lambda_0; \quad Z = \rho * \sin \varphi_0$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad Q = \rho - R; \quad \sin \varphi_0 = Z/\rho; \quad \tan \lambda_0 = \frac{Y}{X}$$

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

Al fine di poter assegnare alla longitudine (λ) i valori variabili da 0° a $\pm 180^\circ$ (E/W) è utile la formula: $\cos \lambda = \frac{x}{(|x|\sqrt{1+(\frac{y}{x})^2}}$; con λ che prende il segno di Y.

Se indichiamo con x_1, y_1, z_1 le coordinate del satellite, la sua distanza **D** dal punto **O** del ricevitore sarà $D_1 = C \cdot \Delta T_1$.

Se l'equazione della circonferenza nel piano è: $(x-x_1)^2+(y-y_1)^2 = D_1^2$; espressione che lega le coordinate correnti x e y con le coordinate del centro x_1, y_1 , lontano D_1 dai punti della circonferenza, analogamente si ha l'equazione della superficie sferica (detta equazione della sfera) nello spazio:

$$(X-x_1)^2+(Y-y_1)^2+(Z-z_1)^2 = D_1^2$$

Per determinare le coordinate incognite X,Y,Z, che fissano la posizione del ricevitore **O**, occorrono almeno tre equazioni; quindi tre misure di distanza (pseudo range) D_1, D_2, D_3 dei tre satelliti situati sopra l'orizzonte di O.

Il sistema risolutivo sarà:

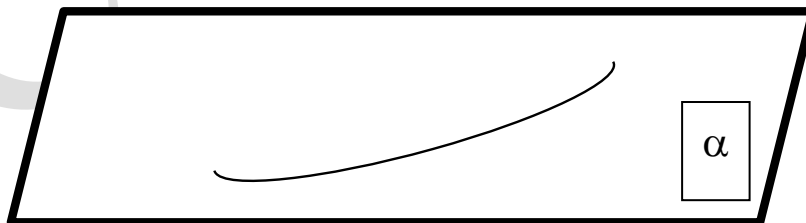
Sistema 1	{	$\begin{cases} (X-x_1)^2+(Y-y_1)^2+(Z-z_1)^2 = D_1^2 \\ (X-x_2)^2+(Y-y_2)^2+(Z-z_2)^2 = D_2^2 \\ (X-x_3)^2+(Y-y_3)^2+(Z-z_3)^2 = D_3^2 \end{cases}$
-----------	---	---

Un sistema con 3 incognite e 3 equazioni di 2° grado ha una soluzione piuttosto complessa ma linearizzando le equazioni è possibile giungere ad una soluzione più semplice ma comunque soddisfacente.

Supponiamo in un primo momento di determinare la posizione di **O** sulla superficie marina, $\rho = R$, e tale superficie avrà l'equazione:

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (\text{equazione 1})$$

che è l'equazione del luogo di posizione della nave. Ognuna delle superfici sferiche calcolate col sistema (1) interseca la superficie terrestre con una circonferenza, che è l'effettivo luogo di posizione della nave.



Consideriamo il piano α che contiene effettivamente il luogo di posizione, l'equazione di questo piano radicale (Il piano radicale è perpendicolare alla retta che congiunge i centri delle due sfere, ed è il piano su cui giace il cerchio intersezione delle due sfere), si ottiene sviluppando prima i quadrati di una delle tre equazioni componenti il sistema 1 (per esempio la prima):

$$(X-x_1)^2+(Y-y_1)^2+(Z-z_1)^2 = D_1^2$$

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

$X^2 - 2x_1 X + x_1^2 + Y^2 - 2y_1 Y + y_1^2 + Z^2 - 2z_1 Z + z_1^2 = D_1^2$ e poi operando la sottrazione, membro a membro con l'equazione ($R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$) si ottiene:

$$X^2 - 2x_1 X + x_1^2 + Y^2 - 2y_1 Y + y_1^2 + Z^2 - 2z_1 Z + z_1^2 - X^2 - Y^2 - Z^2 = D_1^2 - R^2$$

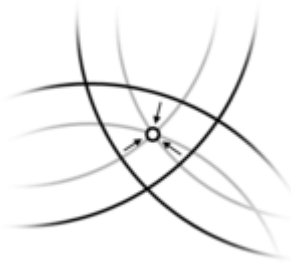
$2x_1 X + 2y_1 Y + 2z_1 Z = 0,5 (R^2 - D_1^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)$; indicando con A il secondo membro noto sopra ottenuto, ed inoltre con B e C i secondi membri ottenibili con le altre 2 equazioni del sistema (1) a cui si sottrae l'equazione (1), si può comporre il sistema risolutivo dei 3 piani radicali:

$$(\text{ sistema } 2) \quad \left\{ \begin{array}{l} x_1 X + y_1 Y + z_1 Z = A \\ x_2 X + y_2 Y + z_2 Z = B \\ x_3 X + y_3 Y + z_3 Z = C \end{array} \right.$$

Il punto di intersezione dei 3 piani radicali, è il punto nave **O** ricercato.

Dopo aver calcolato X, Y, Z si calcolano φ e λ con le formule di trasformazione riportate precedentemente ($\sin \varphi_0 = Z/\rho$; $\tan \lambda_0 = \frac{Y}{X}$).

Per la determinazione delle coordinate di un veivolo, non si considerano più i piani radicali ottenuti con l'intersezione di ogni sfera con la superficie terrestre, ma i piani ottenuti dalla intersezione di una qualsiasi delle superfici sferiche (ad esempio la prima di raggio D_1), con le altre 3, occorrono quindi quattro misure: $D_1 D_2 D_3 D_4$. La risoluzione del sistema composto di 3 equazioni lineari permette di determinare X, Y, Z da cui si calcolano φ e λ e Q (quota), con le formule di trasformazione riportate precedentemente ($\sin \varphi_0 = Z/\rho$; $\tan \lambda_0 = \frac{Y}{X}$; $Q = \rho - R$).



Analisi ed origine degli errori

L'analisi degli errori per il Global Positioning System è un processo complesso, che deve tenere in conto molte variabili. Innanzitutto occorre distinguere tra l'analisi del segmento di terra e quello spaziale. Un'altra importante distinzione è tra errori relativi all'orbitografia dei satelliti, di timing, errori legati alla propagazione dei segnali verso terra e quelli determinati dall'elettronica. Gli errori dovuti all'elettronica, come per esempio i ritardi di tempo, sono in genere gestiti tramite la taratura e i test diretti sull'hardware. Un limite a questa gestione deriva dall'eventuale degradazione dell'hardware nel tempo, che il lancio in orbita o l'esposizione a raggi cosmici e vento solare può causare.

Gli errori legati alla propagazione del segnale sono in prevalenza dovuti al ritardo di propagazione, che ha come variabile fondamentale il tasso di elettroni liberi in atmosfera. Questo parametro a sua

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

volta dipende nuovamente dal vento solare e dai raggi cosmici. Così, l'attività solare può influenzare direttamente la qualità del segnale e delle prestazioni del GPS. Gli errori di orbitografia (per esempio, causati dagli errori delle effemeridi) sono gestiti con un continuo monitor di tutta la costellazione satellitare dal segmento di terra.

Gli errori di timing, oltre a quelli cui si è accennato, sono in gran parte imputabili agli orologi di bordo, ai loro comportamenti stocastici, a eventuali anomalie. Per ridurli, nel corso dell'evoluzione del sistema sono state adottate contromisure diverse. Innanzitutto a bordo dei satelliti esiste una ridondanza di orologi, ovvero quattro orologi, in modo che, oltre a rispondere ai problemi di guasto totale di un orologio, l'insieme possa garantire un timing più accurato. In secondo luogo, il miglioramento delle tecniche di controllo da terra, e migliori performance degli orologi stessi, hanno costituito degli elementi importanti per il monitor degli errori.

Aumento della precisione

Le caratteristiche chiave del sistema GPS (accuratezza, integrità, disponibilità) possono essere incrementate grazie all'uso di sistemi di GNSS Augmentation. Tali sistemi possono basarsi su satelliti geostazionari (Satellite Based Augmentation Systems) come il WAAS (statunitense) o l'EGNOS (europeo), oppure su collegamenti radio terrestri per distribuire agli utenti le informazioni correttive da applicare durante il calcolo della posizione. Nel caso di collegamenti radio terrestri ci si riferisce a sistemi Ground-based augmentation_system (GBAS). La modalità DGPS-IP sfrutta invece la rete Internet per l'invio di informazioni di correzione.

Sistemi alternativi

Oltre al GPS, attualmente sono in uso o in fase di sviluppo altri sistemi. Il russo Global Navigation Satellite System (GLONASS) è stato impiegato solamente dai militari russi e sovietici, fino a quando è stato reso pienamente disponibile anche ai civili nel 2007. Alcuni moderni smartphone, come l'iPhone 4S, il Samsung Galaxy S3, il Samsung Galaxy Ace 2 ed il Samsung Galaxy Xcover 2, e tablet come il Nexus 7, presentano un'antenna in grado di ricevere sia i segnali GPS sia i segnali GLONASS. La Cina ha realizzato il sistema di posizionamento Beidou, per uso civile esteso a tutta l'Asia, ed il sistema di navigazione COMPASS (il cui completamento è previsto per il 2020).

L'India ha pianificato il sistema di navigazione regionale IRNSS, che coprirà India ed oceano Indiano.

L'Unione europea ha in progetto il completamento di una propria rete di satelliti, il "sistema di posizionamento Galileo" (completamente operativo dal 2020), per scopi civili e militari. Il sistema Galileo è un sistema duale, cioè nato per compiti sia civili che militari. Questo progetto ha un'evidente valenza strategica in quanto la rete statunitense è proprietà dei soli Stati Uniti d'America ed è gestita da autorità militari, che, in particolari condizioni, potrebbero decidere discrezionalmente e unilateralmente di ridurre la precisione o bloccare selettivamente l'accesso al sistema: la condivisione dell'investimento e della proprietà da parte degli stati utilizzatori garantisce continuità, accessibilità e interoperabilità del servizio europeo.

Il *GLONASS (Global'naja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema)* russo usa due servizi come il GPS, chiamati *Standard Precision Signal (SP)* e *High Precision Signal (HP)*, disponibile solo per usi militari, con la differenza che ad ogni satellite è assegnata una frequenza diversa ottenuta sommando alla frequenza base un multiplo di un certo fattore correttivo (si parla di tecnica *FDMA Frequency Division Multiple Access*).

COSMAR Comitato per la Salvaguardia della dignità dei Marittimi

Il segmento spaziale è costituito da 24 satelliti collocati su tre piani orbitali inclinati di $64,8^\circ$, ad una quota di 19100 Km; il loro periodo orbitale risulta di 11h15m e sono garantiti almeno cinque satelliti sempre in vista.

Il sistema europeo **Galileo** sarà il primo GNSS civile, lontano quindi dagli interessi militari (ma molto vicino agli interessi commerciali); è previsto in piena operatività entro il 2020, fornirà la posizione con grande accuratezza fino a latitudini di 75° e sarà pienamente interoperabile con GPS e GLONASS, inoltre offrirà servizi differenziati, anche a pagamento e costituirà una piattaforma per alcuni sistemi di comunicazione.

Il segmento spaziale di Galileo regime sarà formato da 30 satelliti disposti su tre orbite inclinate di 56° sul piano equatoriale, ad una quota media di 23222 Km (che comporta un periodo di rivoluzione di 14h04m42s).

Il sistema Galileo prevede quattro servizi differenti:

_ **OS (Open Service)**: utilizza due frequenze simili a quelle GPS (portante E1, a 1575,42 MHz, e portante E5 a sua volta suddivisa in E5a, a 1176,45MHz, ed E5b, a 1207,14 MHz), garantendo un'accuratezza analoga alla modalità *Precise* del GPS in quanto l'utilizzo di più frequenze consente la correzione dell'errore ionosferico.

_ **CS (Commercial Service)**: è un servizio criptato che utilizza una frequenza aggiuntiva (1278,75 MHz) e porta l'accuratezza posizionale fino a 1 m, ulteriormente limitabile a meno di 10 cm con tecniche di posizionamento differenziale, cioè avvalendosi di stazioni terrestri.

_ **PRS (Public Regulated Service)** e **SoL (Safety of Life Service)**: sono servizi speciali, con accuratezza simile al OS, ma con funzionalità aggiuntive che li rendono solidi e maggiormente affidabili in termini di protezione e garanzia di autenticità dei dati, caratteristiche particolarmente apprezzabili per settori afferenti all'ambito *safety&security*, dai controlli di polizia al controllo del traffico aereo.

EGNOS è costituito da tre satelliti geostazionari in grado di garantire maggiore accuratezza e integrità dei dati GPS, permettendo il posizionamento con scarto massimo di 1,5m

La stazione di controllo del GLONASS è collocata a Krasnoznamensk.

Mentre GPS e GLONASS sono gestiti dalle strutture statali per la difesa, quindi di fatto militari, il Galileo è gestito dall'ESA (European Space Agency) con il contributo di enti e imprese private come INMARSAT e, per l'Italia, Telespazio, controllata da Finmeccanica; si aggiungono importanti finanziamenti anche extraeuropei, soprattutto cinesi.

Anche Galileo ha un segmento di controllo con numerose stazioni sparse per il mondo aventi diversi compiti, ma i due centri di controllo GCC (Galileo Control Centres) sono collocati in Germania, a Oberpfaffenhofen, appena a SW di Monaco di Baviera e in Italia presso il Centro Spaziale del Fucino, in Abruzzo.

Il sistema GALILEO avrà un'integrità maggiore del GPS essendo previsti appositi messaggi in grado di informare l'utente di eventuali errori o mancato rispetto degli standard di qualità entro pochi secondi, in modo che il ricevitore possa automaticamente decidere se utilizzare o meno i dati calcolati; tuttavia il vantaggio più grande di Galileo sarà quello di consentire la trasmissione di comunicazioni come informazioni meteorologiche, avvisi d'incidente e, per l'utilizzo urbano, addirittura informazioni turistiche su esercizi commerciali e punti d'interesse. Si prevede che Galileo possa rappresentare con le sue molte funzioni un riferimento di base per il mondo dei trasporti, dell'agricoltura, delle banche, delle assicurazioni e della distribuzione delle risorse energetiche, per citarne solo alcuni. Galileo porterà anche molti vantaggi in ambito SAR in quanto sarà in grado di ricevere i segnali *EPIRB* integrando il sistema *Cospas-Sarsat* e colmandone le lacune, come la non continuità della ricezione, quindi l'impossibilità ad operare in *real-time*, e l'aumento dell'accuratezza posizionale da qualche chilometro a pochi metri, dando anche un *feedback* di ricezione del segnale di emergenza all'utente in difficoltà.

INDICE

- Pag. 1 – Generalità, il segmento Spaziale;
Pag. 2 – Il segmento di controllo;
Pag. 3– Il segmento Utilizzazione;
Pag. 4 – Il Luogo di Posizione;
Pag. 5 – Frequenze e Codici;
Pag. 8 – Principi Geometrici e Matematici;
Pag. 10 – Analisi ed origine degli errori;
Pag. 11 – Aumento della precisione;
Pag. 11 – Sistemi alternativi: GLONASS e GALILEO.

BIBLIOGRAFIA

- *Aldo Nicoli - Navigazione Moderna*
- *Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana, Manuale dell'Ufficiale di Rotta*

