



**GPS**



## Parte 1 - Principio di funzionamento del GPS

GPS è l'acronimo di Global Positioning System (Sistema Globale di Posizionamento). Si tratta di un sistema realizzato dal Ministero delle Difesa Statunitense, mediante cui qualunque utente che disponga di un idoneo apparato ricevente è in grado di rilevare le proprie coordinate planimetriche ed altimetriche in qualunque punto della terra esso si trovi.

Il sistema GPS nasce da un progetto top-secret americano realizzato durante gli ultimi anni della guerra fredda, quindi inizialmente per scopi esclusivamente militari. Il principale obiettivo era quello di fornire un supporto attivo ai missili balistici Cruise e Tomahawk e di coordinare al meglio le truppe sul territorio.

Nel 1980, pochi anni dopo l'effettiva messa in funzione della prima versione del GPS, il governo USA decide di rendere pubblici i parametri indispensabili per l'accesso al sistema. La guerra fredda è alle spalle, è l'epoca della distensione, la potenza della macchina bellica USA è ai vertici mondiali, mentre quella russa è in rapido declino. E' uno dei pochi periodi del secolo scorso in cui il pianeta non risulta interessato da guerre su vasta scala o rilevanti tensioni sul piano internazionale. È l'inizio della grande esperienza del GPS, uno dei più sofisticati e avveniristici sistemi tecnologici mai creati dal genere umano. Dal 1980 il GPS ha segnato un punto di svolta epocale nella navigazione aerea e marittima, nonché nelle attività umane in genere.

Il sistema GPS si rivelò addirittura molto più preciso di quello che gli Stati Uniti avrebbero voluto: già con il completamento del II blocco di satelliti la posizione risultò essere accurata in un ordine di grandezza di 30 metri: decisamente troppo se si pensa alle possibili conseguenze sulla sicurezza nazionale. Questa inattesa situazione indusse il governo USA a rivedere le proprie posizioni: il risultato fu che venne sviluppato ed implementato un nuovo programma, denominato Selective Availability (SA) da introdurre nel II blocco di satelliti per gli utenti non autorizzati e ciò al fine di degradare le prestazioni del sistema, fornendo un posizionamento con un grado di accuratezza pari a  $\pm 100\text{m}$ .

Per un periodo di circa 20 anni quindi il segnale GPS è stato soggetto a tale degradazione (Selective Availability). Un ricevitore GPS in grado di lavorare con un simile margine di errore era ahimè utilizzabile solo per poche applicazioni amatoriali, come per esempio la nautica da diporto (ambiente nel quale il GPS ha avuto i suoi primi riscontri civili). Solo nel maggio 2000 l'amministrazione Clinton ha finalmente rimosso i parametri di degradazione del segnale rendendo così possibile la diffusione del GPS in altri settori, primo tra tutti quello del car-navigation.

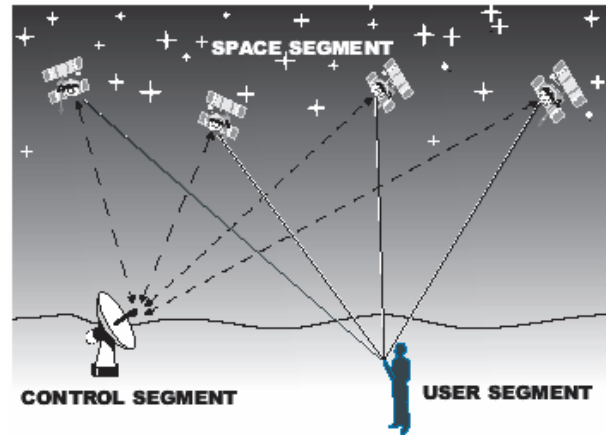
### Come funziona il GPS:

Il sistema NAVSTAR-GPS si basa sulla misurazione delle distanze dai satelliti GPS. Questo significa che calcoliamo la nostra posizione sulla terra misurando la nostra distanza da un gruppo di satelliti nello spazio che vengono utilizzati come punti di riferimento.

Il GPS è un sistema satellitare basato su una costellazione nominale di 24 satelliti orbitanti ad una quota di 20.200 Km e con un periodo orbitale di circa 12 ore. La distribuzione dei satelliti nello spazio è tale che in qualsiasi punto della Terra si possono ricevere contemporaneamente i segnali da non meno di 5 satelliti.

Ciascun satellite trasmette con continuità degli opportuni segnali codificati che consentono ai ricevitori terrestri di calcolare con estrema precisione (20-30 m) la loro distanza da ogni satellite. Il grado di precisione è notevole, considerato che la distanza di un satellite oscilla fra i 20.200 ed i 25.800 Km.

Oltre al "segmento spaziale" (satelliti) e al "segmento utente" (il ricevitore GPS) il sistema si completa con un "segmento terrestre", composto da cinque stazioni di controllo a terra delle orbite dei satelliti (dislocate alle Hawaii, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein e Colorado Springs).



In estrema sintesi possiamo dire che ogni satellite GPS conosce e trasmette in ogni istante la sua precisa posizione (tecnicamente "Almanacco") mentre qualsiasi ricevitore GPS è in grado di calcolare la distanza che lo separa da almeno tre diversi satelliti, di sapere di quali satelliti si tratta e di conoscere la loro esatta posizione nel cielo; ne consegue che, essendo noti il punto di partenza delle tre rette e la loro lunghezza, è possibile per il ricevitore GPS unire tridimensionalmente le rette generando in maniera dinamica una sorta di vertice di un triangolo sempre rivolto verso la terra, in pratica un "punto di convergenza" che corrisponde alla posizione.

Gli esperti di geometria e di sistemi GPS preferiscono parlare più propriamente di "trilaterazione" anziché "triangolazione", ma per fornire un'idea di come funziona il GPS possiamo benissimo parlare di triangolazione certi di non discostarci sostanzialmente dal concetto.

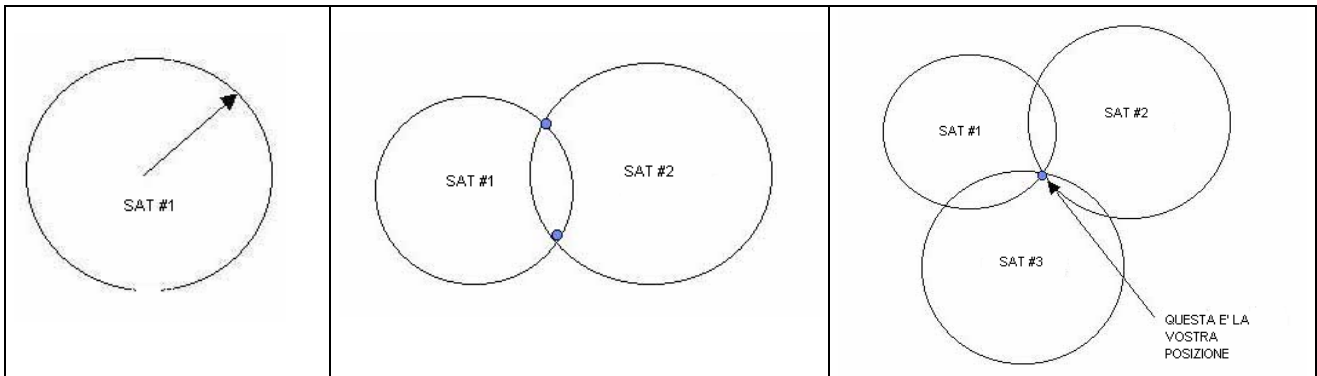
Com'è possibile calcolare la distanza dai satelliti ? A cosa può servire conoscere la distanza dai satelliti quando il problema è "conoscere la nostra posizione" ?

Il concetto è quello di misurare il tempo impiegato dai segnali radio per viaggiare dal satellite trasmittente al nostro dispositivo progettato per riceverli.

Infatti la distanza del ricevitore da ciascun satellite viene rilevata misurando il tempo che occorre perché un segnale radio trasmesso da quel satellite raggiunga il ricevitore stesso. Infatti, moltiplicando il tempo di transito del segnale per la velocità del segnale stesso si ottiene la distanza tra la trasmittente ed il ricevitore (ricordiamo che la velocità del segnale nello spazio è uguale alla velocità della luce, cioè circa 300.000 km/sec. )

La misura precisa del tempo di transito del segnale è importante. Considerate che alla velocità della luce un errore di un solo milionesimo di secondo corrisponde ad un errore di posizionamento di 300 metri.

Osserviamo le figure alla pagina seguente. Per semplicità immaginiamo di riferirci ad un piano bidimensionale. Se il nostro ricevitore misura la distanza da un singolo trasmettitore, l'informazione che ricaviamo è che la nostra posizione si trova in uno degli infiniti punti lungo una circonferenza. Se il nostro ricevitore misura la distanza da due trasmettitori contemporaneamente, l'incertezza della nostra posizione si riduce a due soli punti. Misurando la distanza da un terzo trasmettitore risolviamo l'incertezza.



Naturalmente la descrizione suddetta è la semplificazione nelle due dimensioni di una realtà in tre dimensioni. Quindi dobbiamo modificare tale descrizione partendo da una sfera anziché da una circonferenza.

Essendo nota, istante per istante, la posizione dei vari satelliti, con ciascuna misura di distanza si individua una sfera che ha per centro il satellite e raggio pari alla distanza misurata: il ricevitore si trova in uno qualsiasi degli infiniti punti della superficie della sfera.

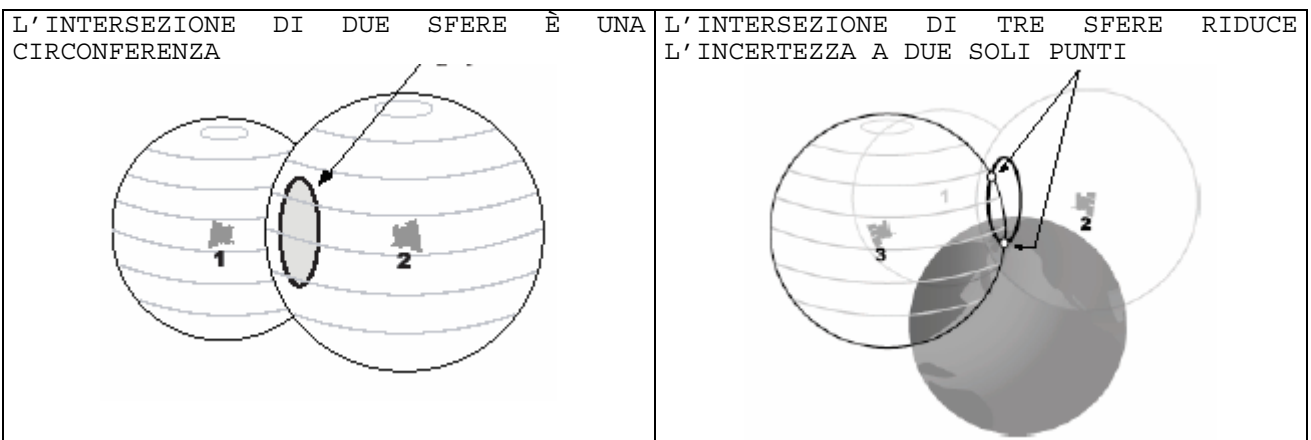
Una sola sfera è tuttavia insufficiente per individuare la posizione nello spazio del ricevitore, infatti essa è nota se sono note le tre coordinate X, Y e Z in un sistema di assi cartesiani con origine posto normalmente nel centro della Terra.

È intuitivo che per determinare le suddette coordinate sono necessarie tre misure di distanza e quindi la ricezione dei segnali di almeno tre satelliti.

Infatti, come possiamo vedere dalle figure che seguono, la misura della distanza da due satelliti contemporaneamente riduce l'incertezza della nostra posizione ad una circonferenza.

La misura della distanza da tre satelliti contemporaneamente riduce l'incertezza della nostra posizione a soli due punti nello spazio.

Serve quindi un quarto satellite ???? Non necessariamente. Non dimentichiamo che il nostro pianeta è esso stesso una sfera (più o meno) e come tale possiamo farlo rientrare nell'equazione. È ovvio che dei due possibili punti rimasti, uno solo si trova sulla superficie della Terra. L'altra soluzione è quindi automaticamente scartata.



Da un punto di vista matematico, il software interno al nostro ricevitore GPS deve risolvere un sistema di tre equazioni nelle tre incognite X, Y e Z. Dopo aver calcolato le proprie coordinate cartesiane il ricevitore provvede a convertirle nelle coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e nella quota rispetto alla superficie terrestre.

Nella determinazione della distanza basata sulla misura del tempo di percorrenza del segnale (che si propaga come detto alla velocità della luce), un piccolo sfasamento tra gli orologi dei satelliti e gli orologi dei ricevitori porterebbe ad errori di misura inaccettabili.

Gli orologi installati sui satelliti sono orologi al Cesio estremamente precisi che costano oltre 200.000 dollari l'uno (ogni satellite per sicurezza ne monta almeno quattro).

Ovviamente, se il vostro ricevitore GPS commerciale dovesse montare un orologio al cesio, verrebbe a costare circa 200.000 dollari ed avrebbe le dimensioni di un computer da tavolo. La soluzione al problema è stata quella di utilizzare un economico orologio al quarzo da pochi dollari che assicuri l'accuratezza necessaria limitatamente a brevi periodi, pertanto devono essere corretti molto di frequente.

Abbiamo quindi la necessità di sincronizzare con l'orologio del satellite un economico orologio al quarzo da 20 dollari.

Come detto, un milionesimo di secondo si traduce in un errore di 300 metri. Nella pratica sono quindi necessarie almeno quattro misure (quattro satelliti) in quanto è fondamentale determinare l'errore dell'orologio interno al ricevitore, utilizzato nel calcolo delle distanze. Se l'intersezione della quarta sfera non corrisponde a quella delle altre tre, il ricevitore percepisce che c'è un errore. Non è geometricamente possibile che le quattro sfere si intersechino nello stesso punto se l'orologio non è più che preciso. Quando questo non accade, il ricevitore capisce che l'orologio non è sincronizzato.

Il ricevitore esegue quindi una piccola e semplice routine per correggere l'orologio, finché tutte e quattro le linee di posizione si intersecheranno nello stesso punto. Dopodiché sarà finalmente possibile comparare la differenza di tempo tra il momento di emissione del segnale e il momento di ricezione a terra.

P.S.: Dal punto di vista matematico, naturalmente le cose sono molto più complesse. I satelliti, come detto, non sono geostazionari: esso completano un'intera orbita attorno alla Terra in poco meno di 12 ore: Di fatto quindi il nostro ricevitore deve considerare come incognite anche le velocità relative tra se stesso e ciascun satellite: quindi il calcolo diventa un set di 7 equazioni con 7 incognite (X,Y,Z,dX,dY,dZ,t)

Come detto, il sistema GPS è nato come sistema militare del dipartimento di Difesa degli USA. Il segnale GPS contiene una parte destinata agli utenti civili mentre Loro (i militari) si riservano un segnale differente, superiore. Ma in cosa è migliore quel segnale, e con quali apparati lo si riceve? Quali vantaggi assicura? Prima di tutto analizziamo le caratteristiche dei segnali.

Vengono erogati due servizi agli utenti. Il primo si chiama SPS (Standard Positioning Service), destinato ad usi civili. Il secondo è PPS (Precise Positioning Service) destinato ad utenti militari. Ogni satellite trasmette segnali su due frequenze separate in banda L: una portante detta L1 (1575.42 MHz) destinata ad erogare il servizio SPS e l'altra chiamata L2 (1227.6 MHz) che trasporta il servizio PPS.

Ogni satellite trasmette esattamente sulla medesima frequenza; tuttavia, il segnale di ciascun satellite, in ricezione dall'utente stazionario, è affetto da uno scostamento per effetto Doppler (Doppler-shift) a causa della sua velocità orbitale, mitigando la sovrapposizione dei segnali. Entrambe le portanti sono modulate dai medesimi dati di navigazione e di sistema: un segnale a 50 Hz fatto di una sequenza di bit di dati che descrivono le orbite dei satelliti GPS, le

correzioni dei clock dei satelliti ed altri parametri di sistema. Entrambe le portanti sono anche modulate dal codice P: "codice preciso" (P) a 10.23 MHz. Solo la portante L1 è modulata anche da un codice "grezzo/acquisizione" (coarse/acquisition) (C/A) a 1.023 MHz. Il codice P, del sistema militare è quindi anche sul segnale che riceviamo con i ricevitori civili, ma viene normalmente codificato detto P(Y), col risultato che solo il codice C/A è ricevibile dagli utenti civili; tuttavia è possibile carpire alcune informazioni valide anche dal segnale P(Y).

Vista, quindi, la natura dei segnali, vediamo cosa c'è in più per gli usi militari. Innanzitutto il "chip rate", ovvero la quantità di dati inviata nel codice P, se decodificato, è 10 volte quella civile del C/A. Con questo segnale i ricevitori sono in grado di aggiornare la propria posizione con frequenza maggiore, capacità estremamente utile per l'utilizzo su caccia supersonici o missili. La maggiore complessità del codice P(Y) consente anche di evitare lo spoofing, ovvero di determinare la veridicità del segnale ricevuto, evitando che un nemico possa inviare segnali pseudo-GPS erronei traendo in inganno il ricevitore.

Perché due frequenze? Innanzitutto i ricevitori militari ricevono entrambe le frequenze (L1 e L2). Per calcolare la propria distanza da un satellite tutti i ricevitori calcolano il lasso di tempo che impiega il segnale per propagarsi dal satellite al ricevitore. Ma il ritardo di propagazione dovuto all'attraversamento della ionosfera non è costante, perché le caratteristiche dielettriche della ionosfera mutano in continuazione per fattori cosmici, temperatura, vento solare ecc. e non è in pratica possibile crearne un modello matematico affidabile. Ma diverse frequenze radio subiscono in maniera diversa il ritardo di propagazione.

Il ricevitore militare, dunque, analizza il ritardo di due segnali che si originano nello stesso istante dal medesimo satellite e riescono ad eliminare in pratica il disturbo dovuto alla ionosfera. L'analisi comparata e la ridondanza del codice P sulle due portanti riduce anche la possibilità di "jamming", ovvero che un nemico possa creare disturbo sul segnale GPS.

## **Parte 2 - Errori del sistema GPS**

Le potenzialità del sistema GPS sono enormi, in parte ancora oggi da scoprire e affinare, dalla sicurezza agli utilizzi militari, dalla protezione civile alla navigazione aerea e marittima. Il margine di errore reale assoluto del sistema GPS è stimato nell'ordine di un metro, ma fonti officiose parlano addirittura di 50 centimetri; tuttavia per sfruttare questo margine di errore necessitano appositi ricevitori GPS militari in grado di decodificare sia le trasmissioni GPS sulla gamma L1 (1,57Ghz coarse acquisition) sia quelle sulla gamma L2 (1,22Ghz precise acquisition), il cui utilizzo è precluso all'utenza civile. Per l'utilizzo civile il GPS si appoggia unicamente alle portanti radio del canale L1 mediante la decodifica del solo codice random C.A. (coarse acquisition), quindi tale margine è amplificato mediamente fino a circa 15 metri.

Qui di seguito descriviamo i differenti tipi di errori che influiscono sulla distanza misurata (da cui deriva la precisione del posizionamento).

Fondamentalmente tali errori sono:

1. errori dipendenti dai satelliti
2. errori dipendenti dal ricevitore
3. errori prodotti dalle riflessioni multiple e dalla propagazione dei segnali nella ionosfera e nella troposfera
4. errori introdotti dal Sistema di Controllo terrestre nella determinazione delle orbite, nella correzione degli orologi e così via

Gli errori dovuti alla deriva degli orologi (instabilità dell'oscillatore) e dell'orbita dei satelliti (effemeridi) sono generalmente molto piccoli e principalmente corretti dal Sistema di Controllo terrestre.

Analizziamo quindi di seguito solo alcune delle fonti di errore (tralasciamo quelle che non sono di particolare interesse per il nostro scopo).

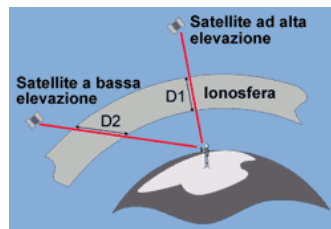
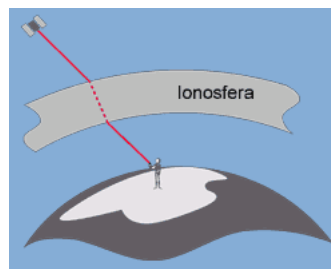
**Errori dovuti alla propagazione dei segnali nella troposfera e nella ionosfera.**

Viene comunemente chiamata "troposfera" la porzione di atmosfera che va da 0km a 70km e "ionosfera" quella che va da 70km a 100km di altitudine.

Nell'attraversamento di tali strati, le onde elettromagnetiche subiscono sia variazioni nella velocità sia rifrazioni (con un effetto simile alla luce che si rifrange attraverso un blocco di vetro), che producono un allungamento dei percorsi rispetto a quelli rettilinei previsti tra il satellite e il ricevitore. Poiché l'estensione della ionosfera è variabile nel tempo e nello spazio, il segnale subirà analogamente un ritardo in funzione del tempo e dello spazio.

La situazione si complica se il segnale viene trasmesso da un satellite con bassa elevazione: in questo caso lo strato di ionosfera da attraversare risulta maggiore rispetto al segnale proveniente dai satelliti con maggiore elevazione.

La loro completa eliminazione richiede l'uso di due frequenze (L1 e L2) e quindi l'uso del codice P che non è previsto nei normali ricevitori GPS commerciali.



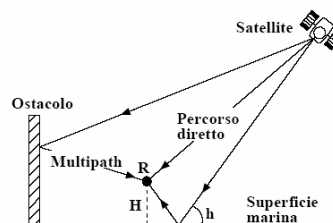
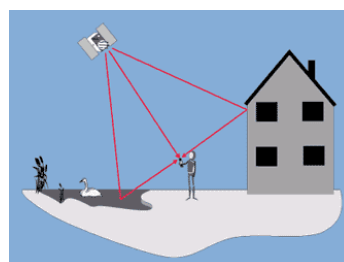
### Errori dovuti all'imprecisione delle effemeridi

Ciascun satellite modula i segnali trasmessi con il messaggio contenente informazioni sulla propria posizione istantanea e sull'istante di emissione del segnale. I satelliti ruotano attorno alla terra, secondo le leggi di Keplero ed è quindi possibile calcolare le posizioni che assumeranno in futuro. Questo in teoria. In pratica il moto viene alterato da fenomeni come l'attrito non uniforme del pulviscolo meteoritico. Le stazioni di terra intervengono per correggere tali errori di posizione: la correzione viene effettuata determinando la posizione del satellite per mezzo di almeno altri 4 satelliti e introducendo nel calcolo le posizioni note delle Monitor Stations. I dati calcolati vengono integrati con le leggi di Keplero e le nuove effemeridi vengono inviate a tutti i satelliti.

### Errori prodotti da percorsi multipli (Multipath)

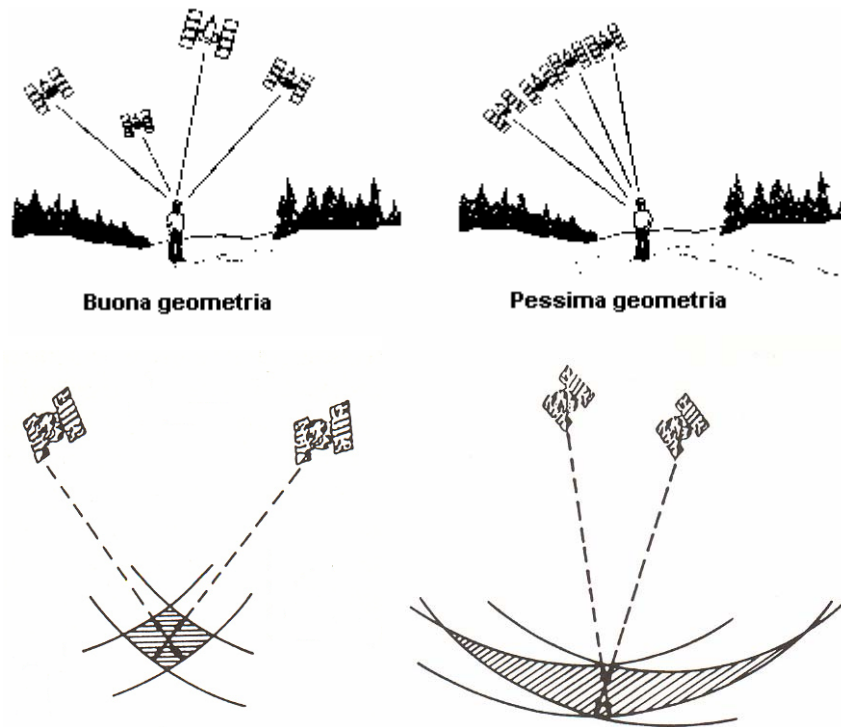
Tra tutti gli errori di posizionamento, una particolare rilevanza assume il cosiddetto "Multipath". Questo termine individua il fenomeno di riflessione delle onde elettromagnetiche del segnale satellitare determinato da oggetti circostanti l'antenna del ricevitore GPS (fabbricati, rocce). Il segnale del satellite non si dirige direttamente sull'antenna, bensì colpisce l'oggetto vicino e viene riflesso sull'antenna, dando luogo quindi ad una falsa misurazione (i segnali riflessi giungono all'antenna seguendo un percorso più lungo rispetto al segnale diretto e la circostanza introduce un certo errore nel calcolo delle distanza satelliti-ricevitore e quindi nel calcolo della posizione).  
la ricezione di segnali provenienti dal basso.

Le antenne GPS dell'ultima generazione sono in grado di filtrare il segnale che ha subito un Multipath anche se la massima accuratezza è ottenibile utilizzando una antenna particolare denominata "choke ring". Questo tipo di antenna è infatti dotata di una serie di anelli concentrici che "intrappolano" i segnali indiretti.



## Errore di posizione nello spazio (geometria dei satelliti)

La Diluizione della Precisione (DOP) è il parametro di valutazione della disposizione dei satelliti e si riferisce alla distanza e alla posizione dei satelliti nel cielo. Il parametro DOP può amplificare l'effetto degli errori di rilevamento dei satelliti. I diagrammi riportati di seguito illustrano più chiaramente questo principio.



Quando i satelliti sono correttamente distanziati la posizione è individuabile nell'ambito dell'area tratteggiata del diagramma.

Quando i satelliti sono eccessivamente ravvicinati (oppure quando sono posizionati con un angolo di 180 gradi) la dimensione dell'area tratteggiata aumenta e di conseguenza aumenta anche l'incertezza della posizione.

I diversi tipi di diluizione della precisione sono calcolabili in base alle dimensioni.

VDOP - Diluizione della precisione in verticale: indice della degradazione dell'accuratezza nella direzione verticale.

HDOP - Diluizione della precisione in orizzontale: indice della degradazione dell'accuratezza nella direzione orizzontale.

PDOP - Diluizione della precisione della posizione: indice della degradazione della posizione in senso tridimensionale.

GDOP - Diluizione della precisione geometrica: indice della degradazione della posizione in senso tridimensionale e del tempo.

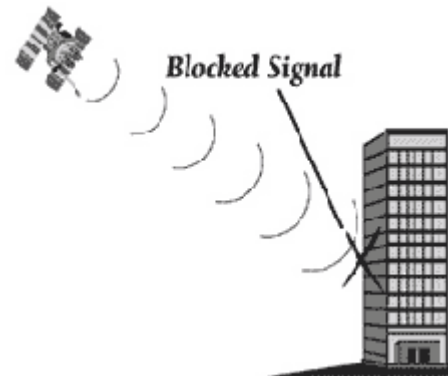
Il dato DOP più utile è il GDOP, trattandosi di una combinazione di tutti i fattori. I ricevitori comunque calcolano PDOP, HDOP e VDOP che non includono la componente temporale.

Il miglior modo per ridurre al minimo gli effetti del GDOP consiste nell'osservare il maggior numero possibile di satelliti.

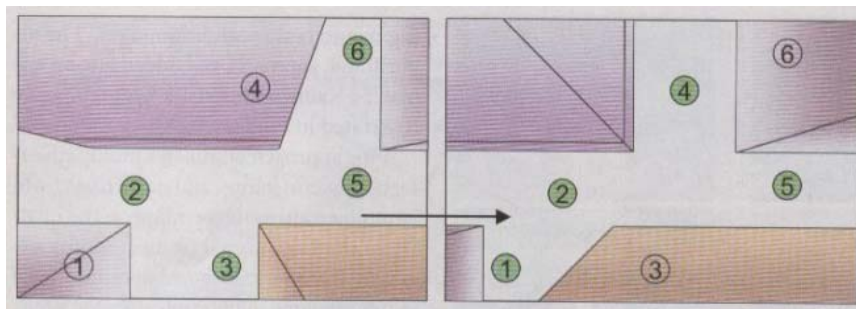
È opportuno tuttavia rammentare che i segnali emessi dai satelliti a bassa elevazione sono in genere più soggetti all'influenza di gran parte delle fonti di errore.

### Errore di posizione nello spazio (ostacoli ambientali)

Innanzitutto gli ostacoli ambientali circostanti, sia nelle immediate vicinanze sia relativamente più distanti. Plastica, gomma, vetro, stoffa, ecc. non schermano in maniera importante le onde radio, mentre metallo, cemento e terreno costituiscono un forte ostacolo, spesso insormontabile. Una via di mezzo è rappresentata dalla vegetazione, che solitamente non costituisce un grosso ostacolo purchè non sia troppo fitta e purchè non sia presente un alto tasso di umidità sul fogliame. Una strada di città molto stretta e circondata da alte abitazioni può costituire un forte ostacolo per il GPS (questa ipotesi è relativamente frequente nei centri storici di molte grandi città italiane).



A tale proposito osserviamo cosa succede muovendosi in città con una vettura dotata di ricevitore GPS. Gli ostacoli lungo il percorso impediscono la ricezione di alcuni satelliti e, procedendo anche solo di pochi metri, la geometria dei satelliti utilizzati potrebbe cambiare improvvisamente. L'immagine sottostante mostra un esempio dei satelliti (numerati da 1 a 6) utilizzati in due istanti immediatamente successivi.



È quindi intuitivo che la precisione del posizionamento ha come principale causa diretta il numero di satelliti in uso e la loro posizione nello spazio.

***Synergy***