

# SISTEMI DI POSIZIONAMENTO GLOBALE SATELLITARE



# *Il sistema GPS*

## *(Global Positioning System)*





## Introduzione

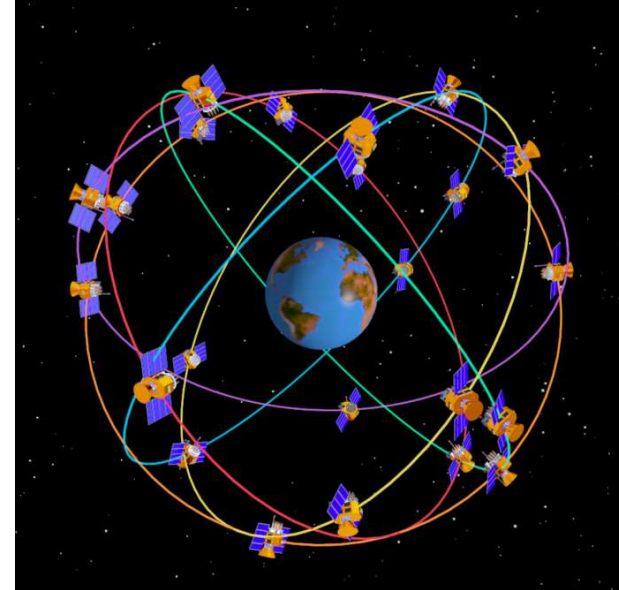
- Il **NAVSTAR-GPS** (*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*) è un sistema satellitare atto a fornire informazioni di **tempo**, **distanza** e **posizione** ovunque nel mondo, in ogni istante e con qualsiasi condizione climatica.
- Sviluppato a partire dal 1973 dal Dipartimento della Difesa statunitense (DoD), il **17 Luglio 1995** è stato dichiarato completamente operativo.
- Creato inizialmente per scopi militari, grazie alla capacità di determinare con elevata precisione la posizione di oggetti fissi e mobili (aereo, auto, nave), il GPS è stato successivamente impiegato anche in campo civile, in particolare nei rilievi topografici e geodetici.
- Il sistema si compone di tre sezioni principali:

***space segment, control segment e user segment.***

## Segmento Spaziale

### *Specifiche di progetto:*

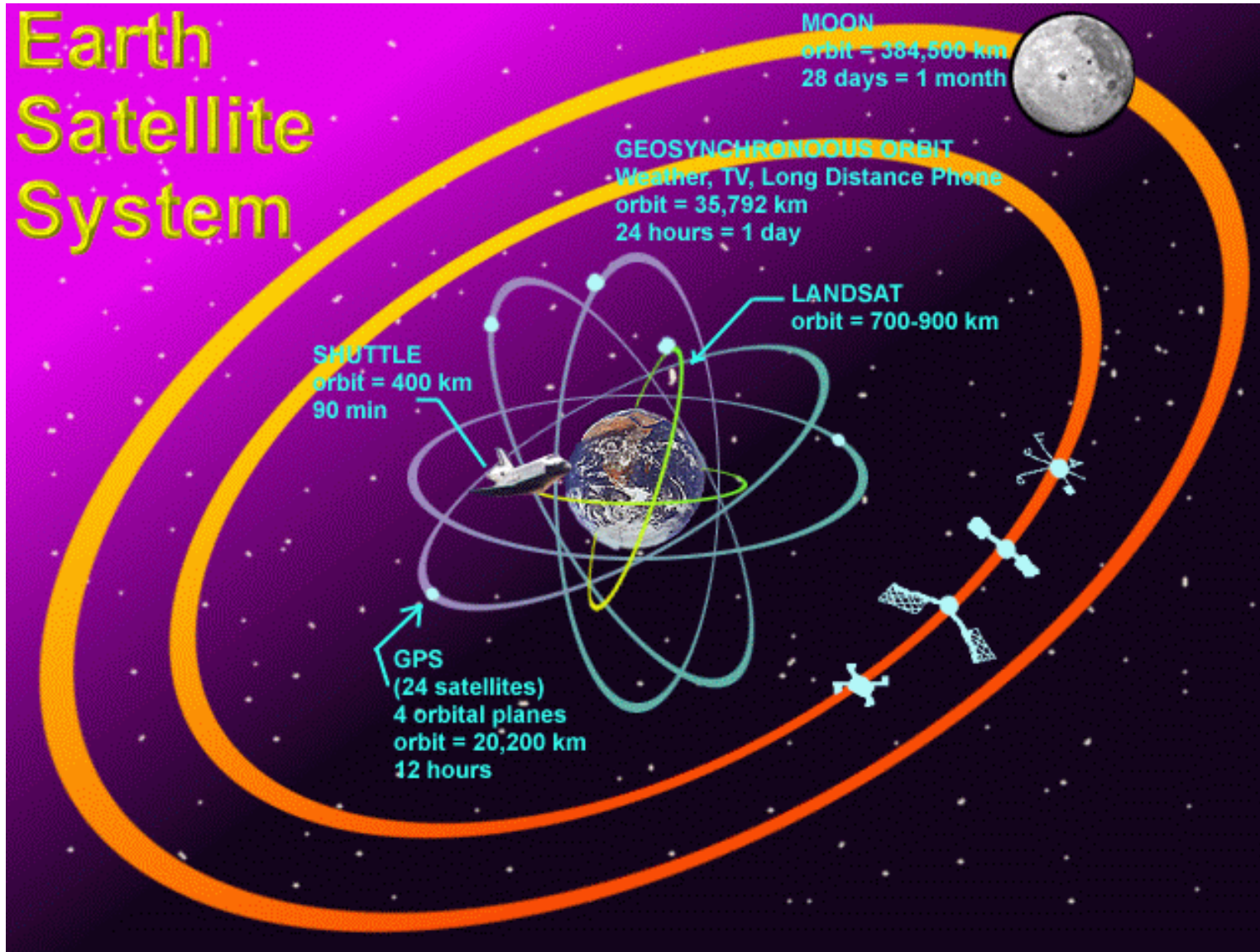
- **24** satelliti, 21 costantemente operativi e 3 di riserva
- 6 piani orbitali
- $55^\circ$  di inclinazione rispetto all'equatore
- 4 satelliti per piano orbitale
- altezza da terra di **20200 km**
- periodo di rivoluzione orbitale di circa 12 ore



Questa configurazione consente di disporre di almeno **4** satelliti in qualunque parte del globo 24 ore al giorno.

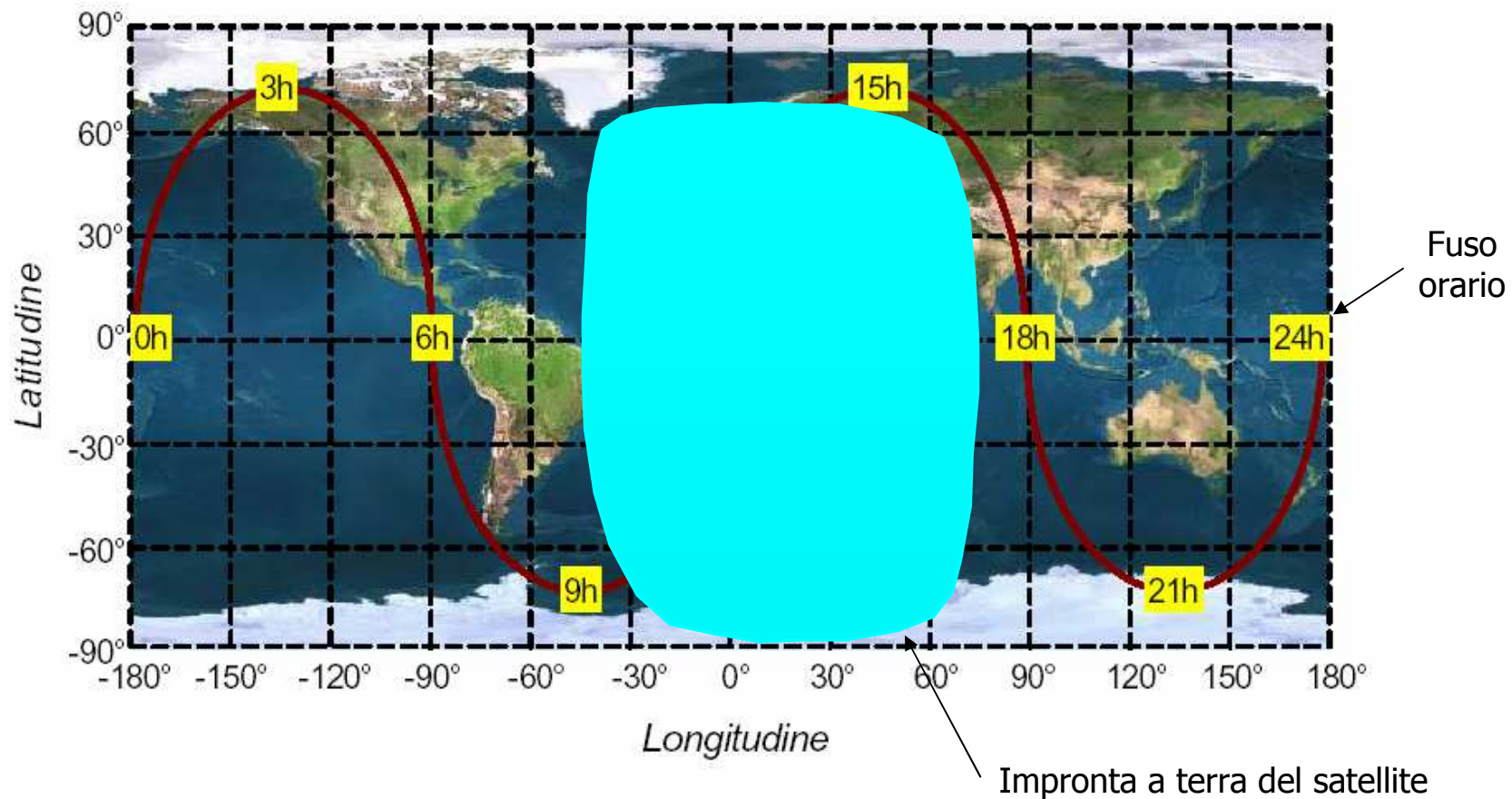
Attualmente si possono osservare, in media, 6-8 satelliti; indicativamente ciascun satellite rimane in vista per **1- 4** ore.

*Maggiore è il numero di satelliti agganciati, tanto più precise sono le misure ottenute.*



La copertura satellitare GPS è limitata tra le latitudini di circa  $\pm 60^\circ$ , ciò comporta:

- maggiori difficoltà di ricezione avvicinandosi ai poli,
- nell'emisfero Nord la visibilità dei satelliti è maggiore guardando verso Sud e viceversa.





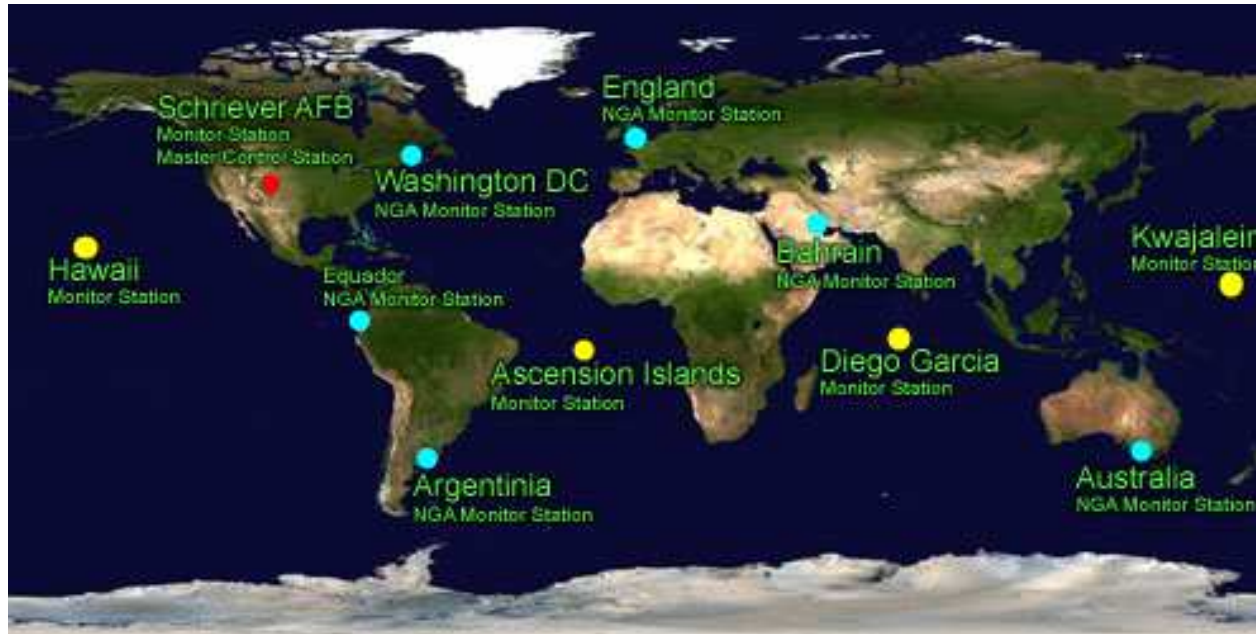
## Costellazione satellitare

- I satelliti che funzionano correttamente vengono mantenuti in servizio, anche se hanno superato la loro aspettativa di vita ( $\sim 7.5$  anni).
- Attualmente **32** satelliti (SV, Space Vehicles) in orbita

## Dispositivi di temporizzazione

Ciascun satellite ha a bordo 4 orologi atomici che garantiscono un segnale di tempo accuratissimo: da  **$10^{-12}$ - $10^{-14}$**  (errore di  $\sim 1$ ns ogni 3h ) a  **$10^{-14}$ - $10^{-15}$**  a seconda della tipologia di orologio (cesio-rubidio o maser).

## Segmento di Controllo



Il centro di controllo che presiede al governo del sistema (***Master Control Station, MCS***) è situato presso la Falcon Air Base a Colorado Springs, ed è gestito dallo USAF Space Command.

Altre quattro stazioni di controllo (***Monitor Stations, MS***) sono installate, rispettivamente, presso le isole Hawaii, la base di Diego Garcia, l'isola di Ascensione e l'atollo di Kwajalein .



Nel 2005 sono state aggiunte sei nuove MS dell'**NGA** (*National Geospatial-Intelligence Agency*). Ogni SV può essere così osservato da almeno due MS.

### ***Funzioni delle stazioni:***

- aggiornare l'almanacco
- determinare la posizione dei satelliti nello spazio
- controllare lo stato operativo della costellazione (*health status*)
- calcolare la correzione del tempo GPS ed effettuare l'elaborazione dei modelli di propagazione ionosferica e troposferica
- correggere le orbite dei satelliti grazie ad alcuni razzi direzionali pilotabili da terra

Le stazioni secondarie controllano continuamente i satelliti in orbita inviando poi i dati alla MCS in Colorado che provvede ad elaborarli.

I dati così processati vengono ritrasmessi alle *Monitor Stations* e da queste ai satelliti, rendendoli disponibili agli utenti tramite le **Effemeridi**.



## Segmento Utente

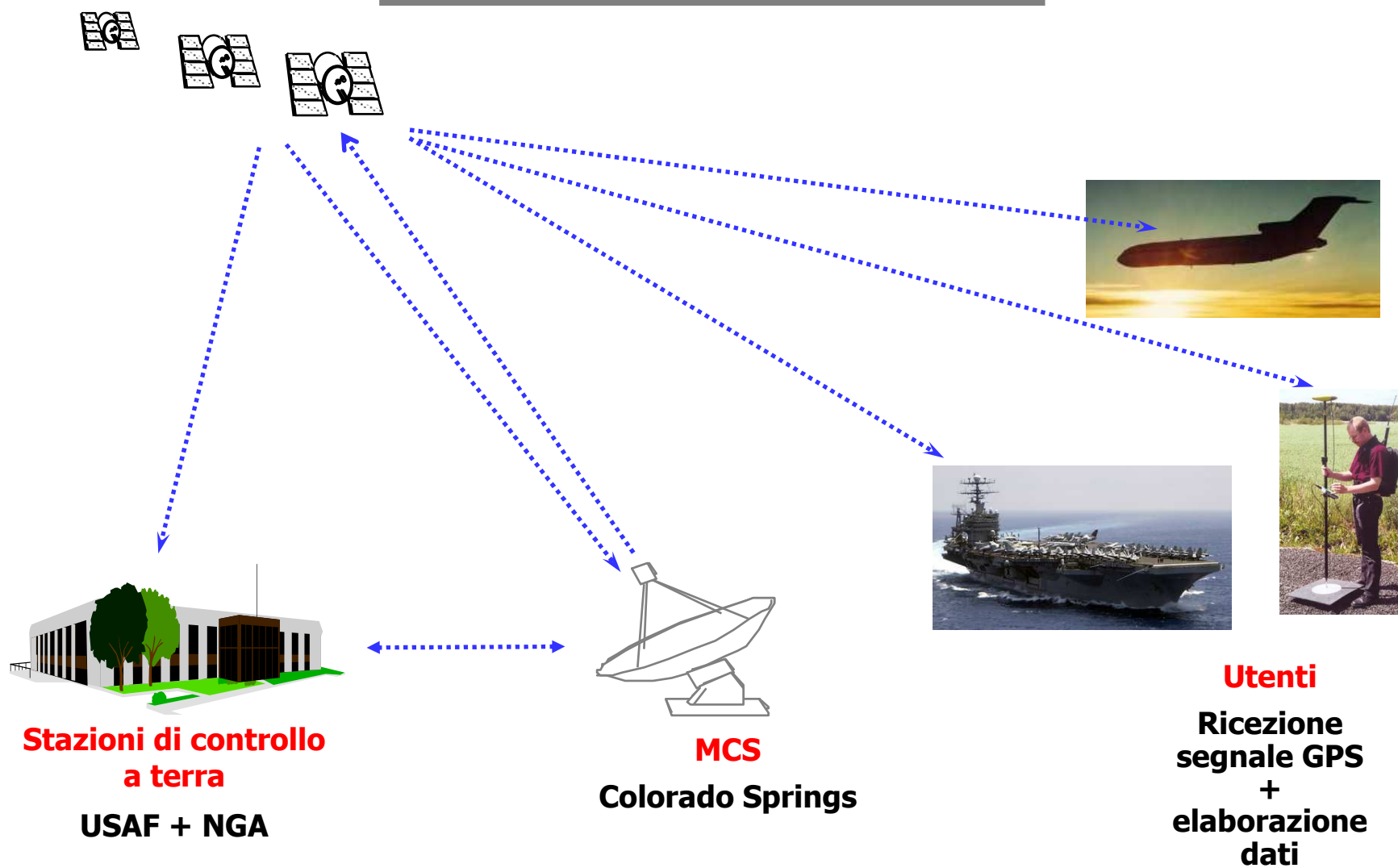
Questa sezione del sistema GPS è costituita dagli utenti civili e militari dotati di:

- **antenne**, capaci di captare i segnali inviati dai satelliti,
- **ricevitori** aventi lo scopo di analizzare i segnali, di effettuare calcoli e misure (di correlazione e sfasamento, per esempio) e di memorizzare dati;
- **software** e **computer** adeguati per elaborare i dati raccolti e pervenire alla determinazione delle coordinate dei punti incogniti.

In particolare, le funzioni principali svolte dal ricevitore GPS sono le seguenti:

- selezionare uno o più satelliti “visibili”
- acquisire i segnali GPS (*locking*)
- mantenere l’aggancio con i satelliti selezionati (*tracking*)
- estrarre i dati di navigazione dal segnale
- fornire i valori calcolati di posizione e/o velocità

## Interazione tra i tre segmenti



## Caratteristiche riassuntive del sistema

- Sistema multi-satellitare operante a grande distanza dalla superficie terrestre e distribuito su orbite **non geostazionarie**.
- Apparato di controllo responsabile del tracciamento dei satelliti e calcolo delle loro orbite
- I satelliti trasmettono i parametri delle proprie orbite agli utenti.
- Impiego di oscillatori sia sui satelliti (orologi atomici) che sui ricevitori (orologi al quarzo) sincronizzati tra loro con grande precisione.
- Comunicazione **monodirezionale** (*one-way*) tra satellite e ricevitore: l'utente può solamente ricevere il segnale GPS ma non può trasmettere nulla al Sv.

### Vantaggi:

- consente di gestire una grande moltitudine di utenti in modo più semplice rispetto ad un sistema bidirezionale (*two-way*);
- all'utente è inibita la possibilità di segnalare la propria posizione mandando segnali ai satelliti.

## Struttura del segnale GPS

I 4 oscillatori a bordo di ogni satellite forniscono un segnale elettromagnetico continuo con frequenza fondamentale  $f_0 = 10.23$  MHz.

A partire dalla  $f_0$  si ottengono le frequenze delle 2 onde portanti costituenti il segnale:

L1	→	$f_{L1} = 154 \times f_0 = 1575.42$ MHz	$\lambda_{L1} \approx$ <b>19 cm</b>
L2	→	$f_{L2} = 120 \times f_0 = 1227.60$ MHz	$\lambda_{L2} \approx$ <b>24 cm</b>

Tre tipi di codici binari vengono inviati all'utente tramite le due portanti:

- codice **C/A**
- codice **P**
- codice **D** (Messaggio di Navigazione)

## Codice C/A (*Coarse Acquisition Code*)

- Sequenza pseudocasuale di bit (0,1) generata con frequenza di 1.023 MHz. (1023 bits ripetuti ogni ms in modo da favorire un rapido aggancio sul ricevitore)

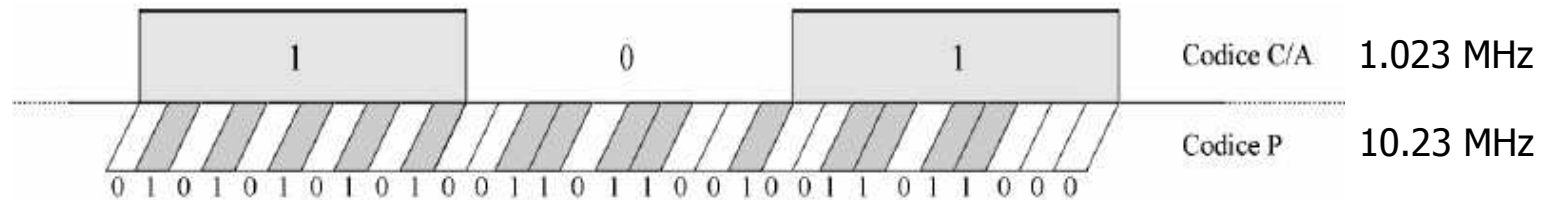


- Lunghezza d'onda (***Chip Length***)\*: **300 m**
- E' trasmesso soltanto sulla portante L1.
- Realizza il servizio di posizionamento ***SPS*** (*Standard Positioning Service*) con precisione di  **$\pm 10$  m**.

\* *Distanza percorsa dal segnale nel tempo che intercorre fra la generazione di due bit (chip) del codice.*

## Codice P (*Precision Code*)

- Sequenza di bit generata con una velocità 10 volte maggiore del codice C/A. (10.23 MHz)



- **Chip Length: 30 m**
- E' trasmesso su entrambe le portanti L1 e L2.
- Si ripete ogni settimana.
- Realizza il servizio di posizionamento **PPS** (*Precise Positioning Service*) con precisione di **± 5 m**.

- Poiché consente di ottenere precisioni di posizionamento migliori rispetto al codice C/A, generalmente il codice P è criptato (codice **Y**, **EncrYpted**) e risulta utilizzabile solamente da enti autorizzati (es. militari).
- Ogni satellite trasmette un **proprio** codice C/A ed un **proprio** codice P.
- Il codice C/A ed il codice P trasmessi dallo **stesso** satellite sono **diversi** tra loro.
- Il codice C/A ed il codice P trasmessi da **differenti** satelliti sono **diversi** tra loro.



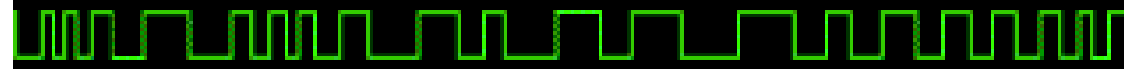
Ogni satellite può essere univocamente identificato tramite il codice C/A o P emesso.

**PRN**  
**Number**

Sv 13



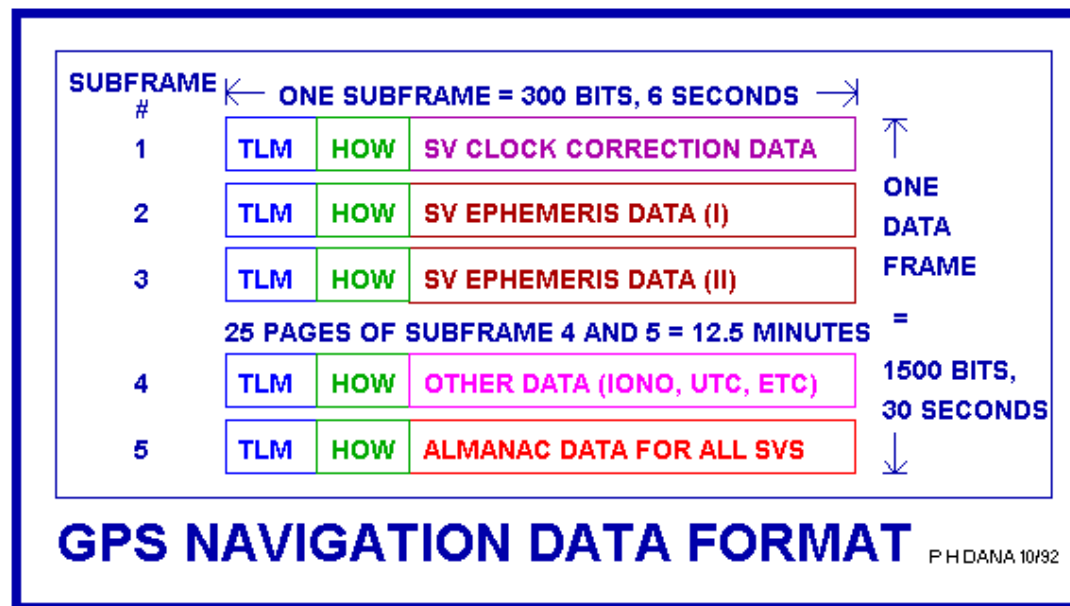
Sv 22





## Messaggio di navigazione (*Codice D*)

- Ha lo scopo di fornire ai ricevitori una lunga serie di informazioni necessarie per portare a termine il posizionamento GPS.
- Tempo necessario al ricevitore per acquisire il messaggio completo: **12,5 minuti**.



Il messaggio di navigazione contiene due tipologie di informazioni:

1) relative al *satellite che sta inviando il segnale*

- indicazione dell'attivazione dell'*Antispoofing* (criptazione codice P);
- correzioni (offset) per mantenere sincronizzati gli orologi a bordo dei satelliti;
- posizione presunta lungo l'orbita (**effemeridi trasmesse**);

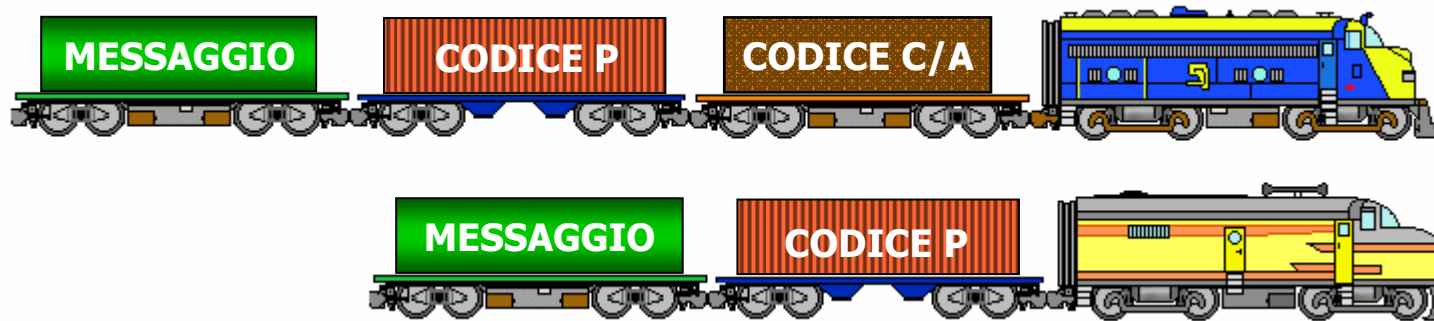
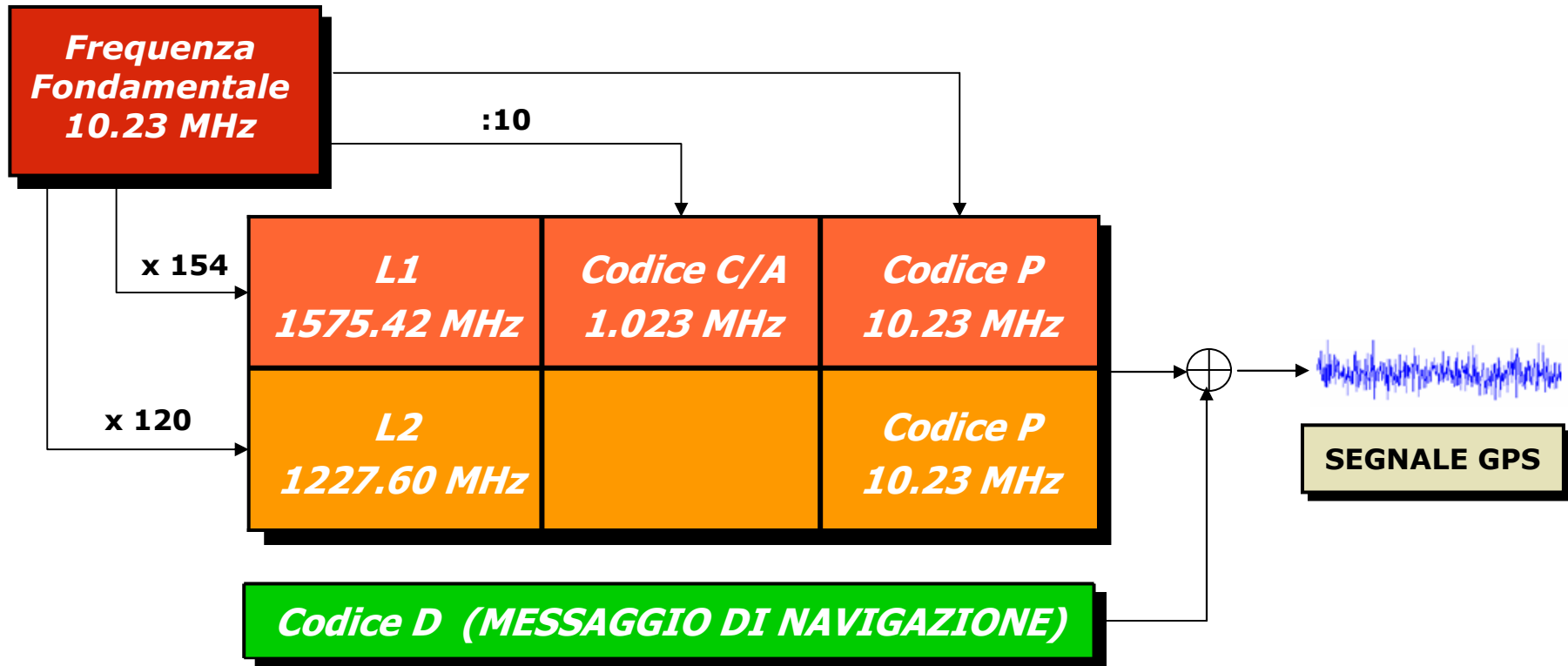
2) relative alla *costellazione satellitare*

- informazioni sullo stato di salute di tutti i satelliti della costellazione;
- parametri del modello di Klobuchar per la riduzione del disturbo ionosferico
- l'**almanacco** dei satelliti, contiene informazioni grossolane su tutte le orbite dei Sv (precisione di **alcuni km**, validità di alcuni mesi).



Tramite l'almanacco è possibile **pianificare** la sessione di osservazione in quanto esso consente di conoscere in anticipo **l'evoluzione della visibilità** dei satelliti nell'arco della giornata, in un dato luogo.

# Generazione del segnale GPS



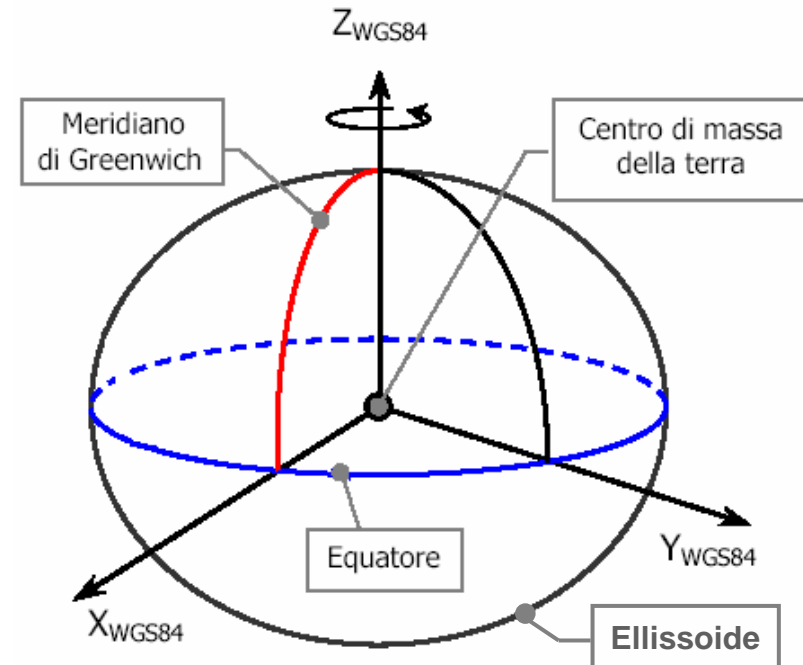
## Tempo GPS

- E' il risultato della composizione delle misure di tempo effettuate dagli orologi atomici a bordo dei satelliti corrette tramite le misurazioni effettuate presso le stazioni di controllo a terra.
- E' misurato in settimane e secondi a partire dalla mezzanotte del **5 Gennaio 1980** ed è sincronizzato con il tempo UTC entro il microsecondo.
- L'unità di misura è l' **epoca**, definita come intervallo di tempo tra due istanti GPS consecutivi.
- Il tempo **UTC (Coordinated Universal Time)**, introdotto nel 1961, è un tempo legato alla rotazione terrestre. L'unità di misura è il **secondo** del Sistema Internazionale (SI), definito in base al tempo di decadimento tra due livelli atomici del Cesio 133.
- Attualmente il tempo GPS è in **anticipo** (16 sec) rispetto all'UTC.
- Appositi parametri di correzione per ricavare l'UTC dal tempo GPS sono inseriti nel messaggio di navigazione.

## Sistema di riferimento

Le coordinate dei punti rilevati mediante GPS sono espresse in un sistema di riferimento (SdR) denominato **WGS-84** (*World Geodetic System 1984*), così definito:

- origine  $\equiv$  centro di massa della terra;
- asse Z diretto verso il Polo Nord terrestre convenzionale medio alla data del 1984;
- asse X = intersezione tra il piano per il meridiano zero (Greenwich) ed il piano equatoriale;
- asse Y completa la terna destrorsa e giace  $90^\circ$  a est dell'asse X sul piano equatoriale.

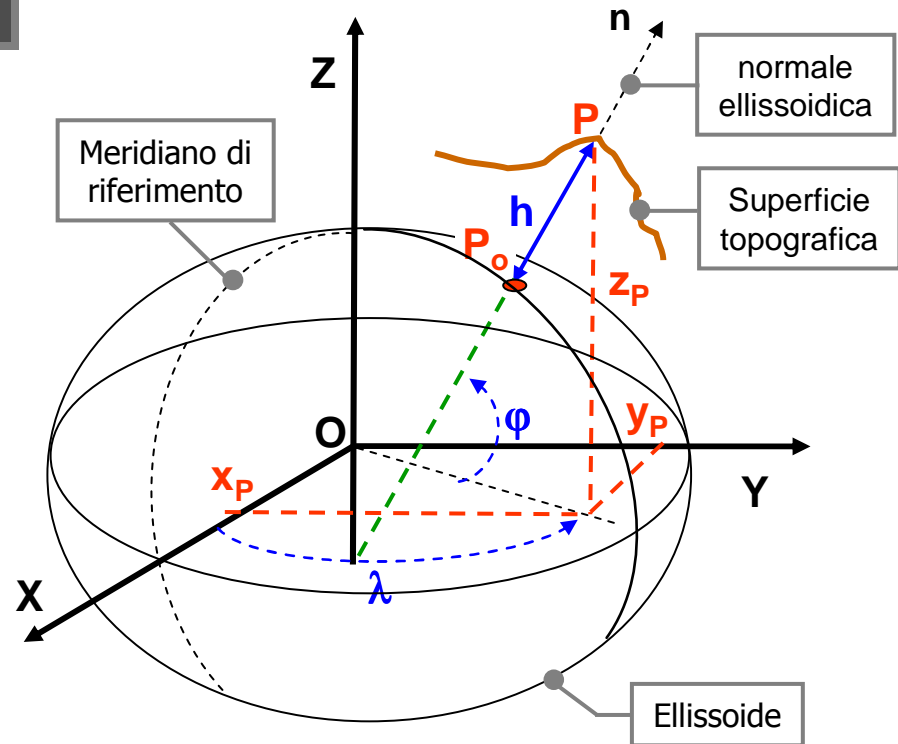


La superficie terrestre viene approssimata mediante un ellissoide avente origine e assi coincidenti con quelli del sistema di riferimento WGS-84.

## Sistemi di coordinate ellissoidiche

La posizione di un qualsiasi punto P viene

- *calcolata* in termini di **coordinate cartesiane geocentriche** ( $X, Y, Z$ );
- *visualizzata* sul Rc come **coordinate geografiche ellissoidiche** ( $\lambda, \varphi, h$ ).



### Definizioni:

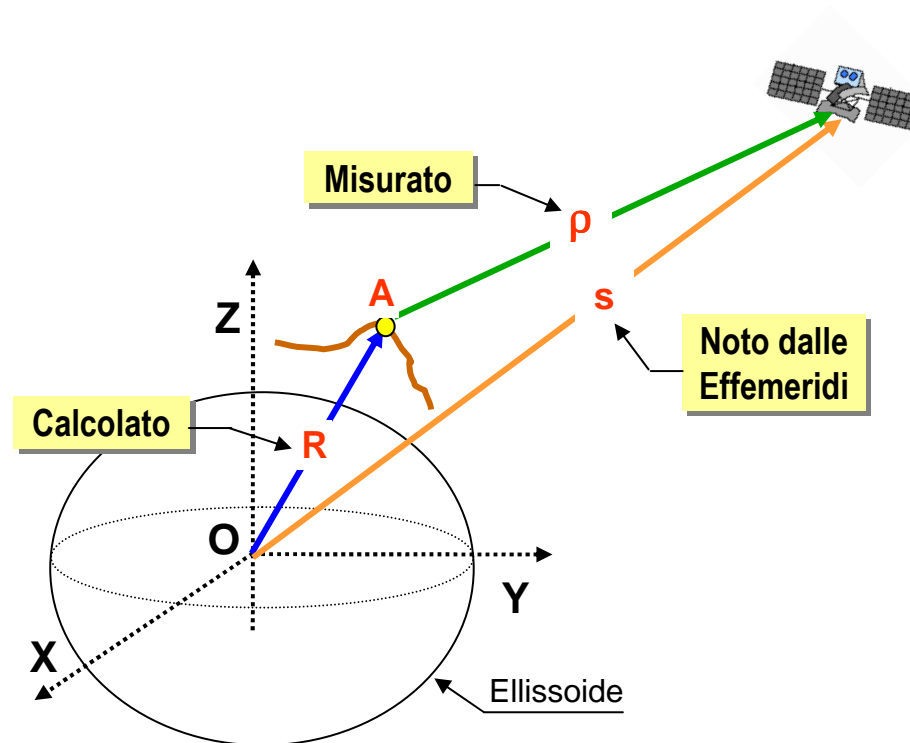
- **Latitudine ellissoidica** ( $\varphi$ ): angolo complementare dell'angolo formato dalla normale  $n$  all'ellissoide in un punto P e la direzione dell'asse polare.
- **Longitudine ellissoidica** ( $\lambda$ ): angolo formato dal meridiano di riferimento e dal meridiano per P.
- **Quota ellissoidica** ( $h$ ): distanza del punto P dalla superficie ellissoidica misurata lungo la normale all'ellissoide.

# *Principi di posizionamento*

## Le misure GPS

La posizione geocentrica  $R$  del ricevitore viene calcolata mediante **trilaterazione**, conoscendo:

- la posizione geocentrica  $s$  del satellite (nota dalle effemeridi);
- la distanza  $\rho$  tra ricevitore e satellite (misurata).



$$R = s - \rho$$

$$R = (X_A, Y_A, Z_A)$$

$$s = (X^S, Y^S, Z^S)$$

$$\rho = (\rho_x, \rho_y, \rho_z)$$



$$\rho = \sqrt{(X^S - X_A)^2 + (Y^S - Y_A)^2 + (Z^S - Z_A)^2}$$

$\rho$  = distanza ricevitore – satellite (misurata)

$(X^S, Y^S, Z^S)$  = posizione geocentrica del satellite (nota dalle effemeridi)

$(X_A, Y_A, Z_A)$  = posizione geocentrica del ricevitore (incognita)

La relazione che lega tra loro posizione del ricevitore, posizione del satellite e distanza Satellite-Ricevitore contiene tre incognite  $(X_A, Y_A, Z_A)$ .

La determinazione della posizione del ricevitore richiede pertanto l'osservazione di **almeno tre satelliti**.

La distanza  $\rho$  può essere misurata utilizzando

- i **codici** binari (C/A o P);
- oppure la **fase** delle portanti.

## Misure di codice

La distanza Satellite-Ricevitore è misurata calcolando il **tempo** impiegato dal segnale GPS per percorrere tale distanza.

Distanza Sv-Rc

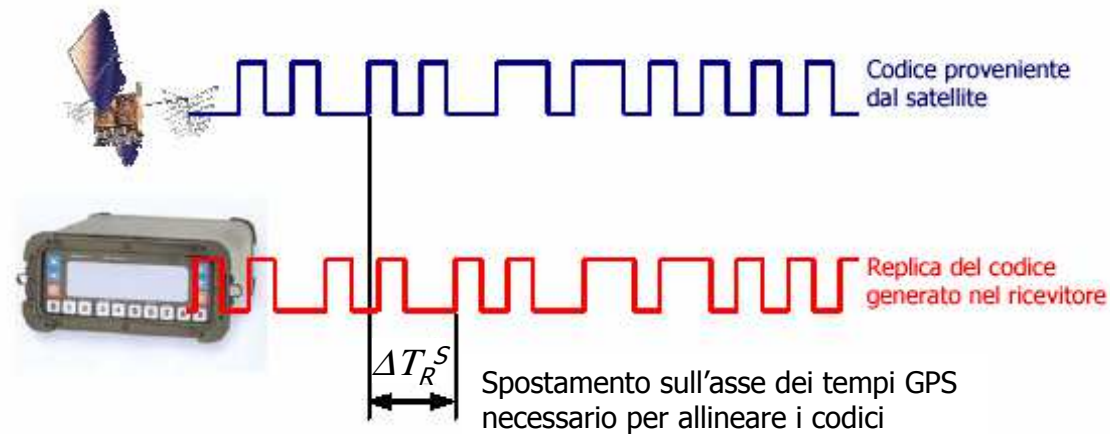
$$\rho = c \cdot \Delta T_R^S$$

La misura di un intervallo di tempo richiede la conoscenza dell'istante iniziale (emissione dal Satellite) e finale (ricezione sul Ricevitore).

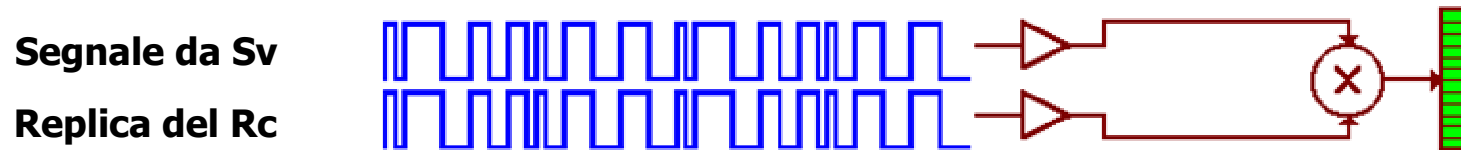
Di questi due dati, solo il secondo è noto all'utente (ricevitore).

L'intervallo di tempo viene quindi misurato **correlando** il **codice** (C/A o P) emesso dal Satellite con uno identico (replica) generato all'interno del ricevitore.

- Supponiamo che gli orologi del Sv e del Rc siano perfettamente sincronizzati tra loro (ovvero rispetto al sistema di tempo GPS).
- A causa del tempo impiegato per giungere fino a terra, il segnale GPS subisce, rispetto alla replica locale, un **ritardo**  $\Delta T_R^S$ .



- Questo ritardo può essere calcolato misurando l'intervallo di tempo necessario per portare i due codici in **completa coincidenza** (**correlazione**).



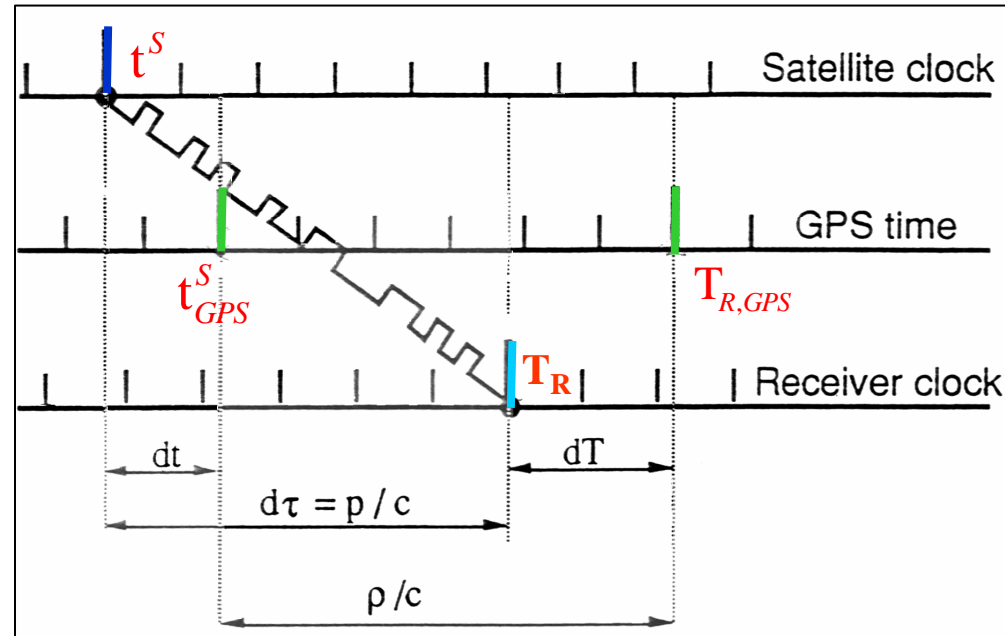
- Moltiplicando quindi tale ritardo per la velocità della luce si ottiene la distanza  $\rho$ .

Purtroppo gli orologi a bordo del Satellite e quello (al quarzo) all'interno del Ricevitore **NON** sono perfettamente sincronizzati tra loro.



la distanza misurata contiene un **errore**.

Per misurare correttamente la distanza Satellite-Ricevitore sfruttando lo sfasamento del codice è necessario riportare gli orologi di entrambi ad una **comune base dei tempi**.



$$\Delta T_R^S = T_R - t^S = [T_{R,GPS} - dT_R] - [t_{GPS}^S - dt^S] = (T_{R,GPS} - t_{GPS}^S) + (dt^S - dT_R) = \Delta T_{R,GPS}^S + \delta t_R^S$$

- $t^S$  = istante di emissione codice PRN da Sv **S**, riferito alla base dei tempi del Sv.
- $T_R$  = istante di ricezione del codice, riferito alla base dei tempi del ricevitore **R**.
- $dt^S$  = offset dell'orologio del Sv **S**, noto dalle effemeridi trasmesse nel messaggio di navigazione.
- $dT_R$  = offset orologio del Rc **R**, variabile da istante a istante e da Rc a Rc.

Poiché le misure di distanza Satellite-Ricevitore contengono un errore dovuto all'asincronismo degli orologi, si parla di **pseudodistanza** (*pseudorange*).

Considerando quindi le misure riferite allo stesso asse temporale GPS, l'espressione della *pseudodistanza di codice* misurata tra satellite **S** e ricevitore **A** diventa:

$$PC_R^S(t) = c \cdot \Delta T_R^S = c \cdot \Delta T_{R,GPS}^S + c \delta_R^S(t) = \rho_R^S(t) + c(dt^S - dT_R)$$

dove

- $\rho_R^S(t)$ : distanza "vera" SV-Rc
- $\delta_R^S(t) = (dt^S - dT_R)$ : errore di sincronismo orologi Sv e Rc

$dt^S$  è nota dalle osservazioni delle stazioni di controllo a terra con un errore di  $\cong 10^{-9}$  sec  
→  $\text{Err}[\rho_R^S(t)] \cong 30$  cm (errore accettabile → Sv possono essere considerati sincronizzati tra loro).

$dT_R$  è variabile da  $R_c$  ad  $R_c$  ed è noto solo approssimativamente ( $\cong 10^{-3}$  sec)

→  $\text{Err}[\rho_A^j(t)] \cong 300$  km !

Considerare noto l'errore di sincronismo dell'orologio del Ricevitore porta a mantenere un errore inaccettabile nella distanza Satellite-Ricevitore.

Pertanto nella misura di pseudorange di codice si considera lo sfasamento (**offset**)  $dT_R$  come termine **incognito** per ogni epoca di misura.

$$\underbrace{PC_R^S(t) - c dt^S}_{\text{Termini noti}} = \underbrace{22610620.940}_{\text{Termini incogniti}}$$

Ogni equazione di misura della distanza Sv-Rc contiene 4 incognite:  $X_R, Y_R, Z_R, dT_R$

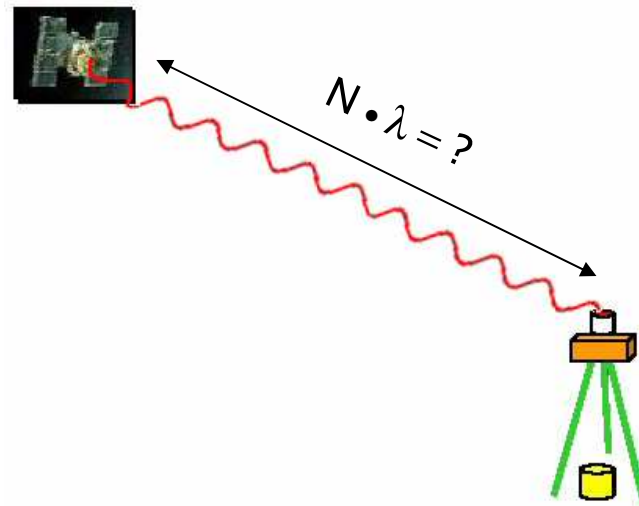
Conseguenza :

Per determinare la propria posizione il Rc deve osservare **almeno 4 satelliti**.

## Misure di fase

**Concetto:** misurare la distanza Sv-Rc contando il numero di lunghezza d'onda della portante comprese nel percorso Sv-Rc.

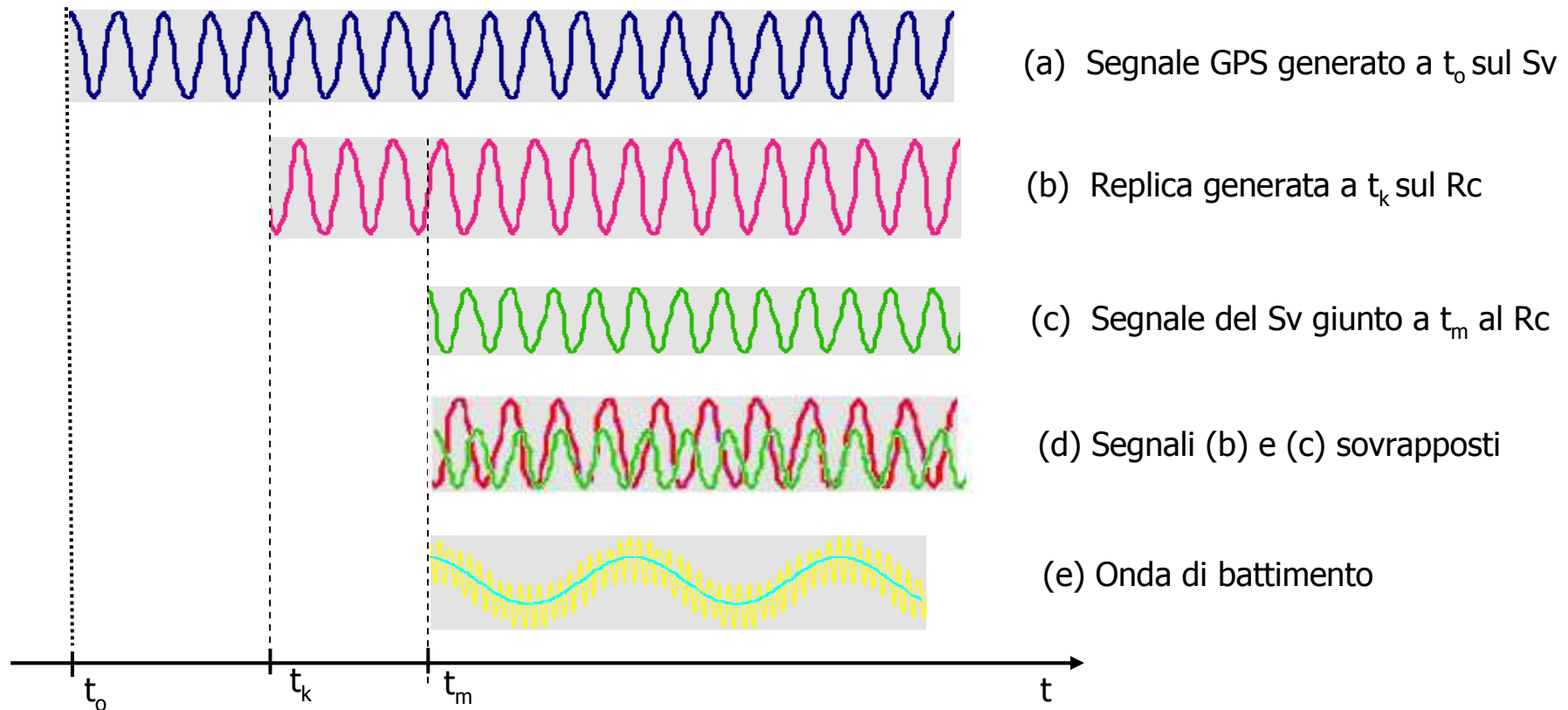
Essendo  $\lambda \cong \text{cm}$  si possono raggiungere precisioni maggiori rispetto alla misura basata sul codice PRN ( $\lambda_{CA} \cong 30\text{m}$ ;  $\lambda_p \cong 3\text{m}$ ).



La distanza Sv-Rc viene misurata mediante **confronto** tra la fase della portante emessa dal satellite e quella generata localmente nel ricevitore.



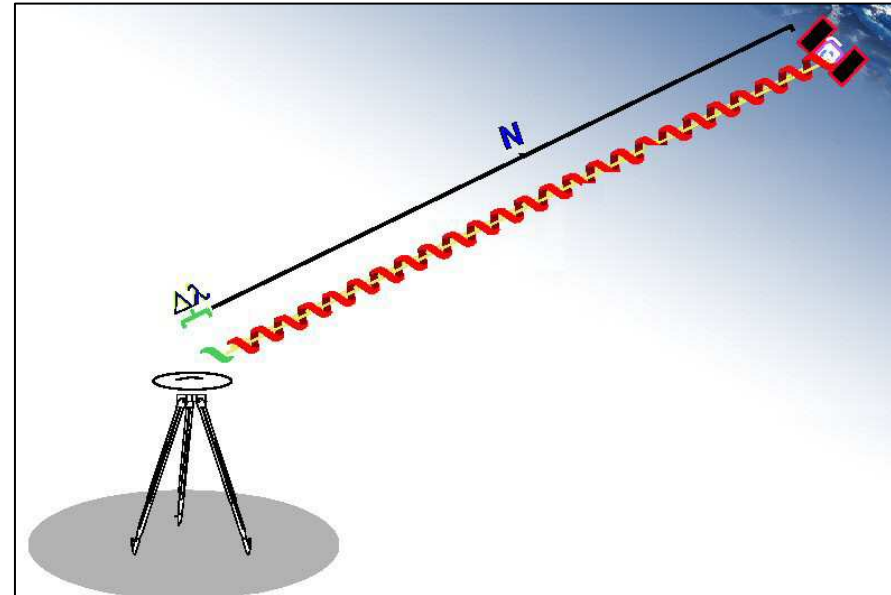
1. A causa della distanza percorsa, l'onda emessa dal Sv arriva al ricevitore **sfasata** rispetto a quella generata localmente.
2. La distanza percorsa è proporzionale alla differenza di fase  $\Rightarrow \rho = \lambda \cdot \Delta\varphi$
3. L'entità dello sfasamento viene determinata misurando la fase del segnale ottenuto dalla combinazione (**battimento**) delle due onde suddette.



## Ambiguità intera

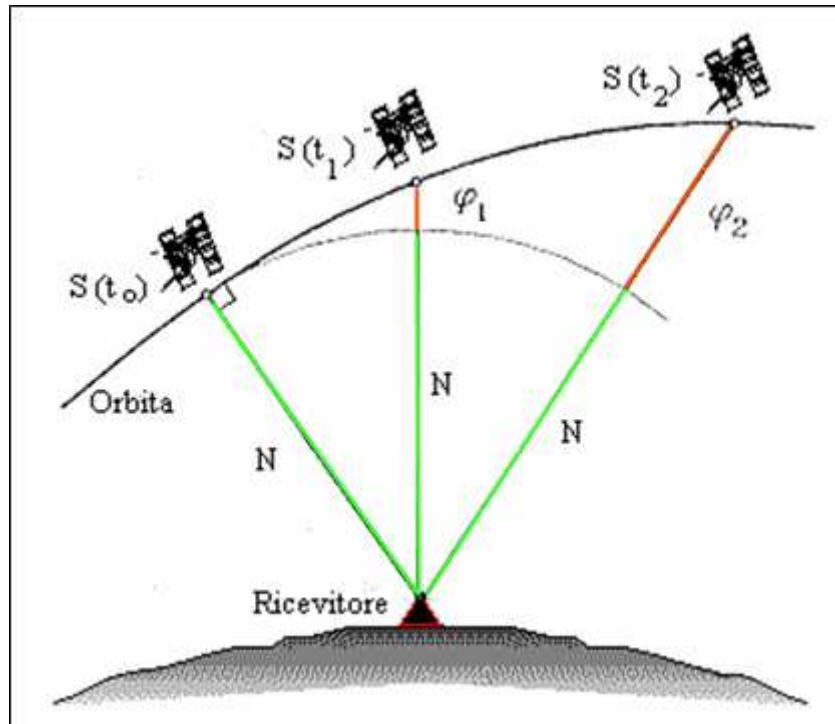
Il ricevitore può misurare ad ogni istante solo la differenza di fase **all'interno di un ciclo** fra la portante emessa dal satellite e quella replicata al suo interno.

**Non può dirci** il numero intero di cicli (o numero intero di lunghezze d'onda) compreso tra l'istante di emissione del segnale dal Sv e l'istante di ricezione nel Rc.



Tale numero prende il nome di **ambiguità intera N** (*Integer Ambiguity*) e costituisce un'**incognita** della misura.

L'ambiguità della misura è dovuta al fatto che dopo un ciclo la portante si ripete **uguale a se stessa** e quindi non è possibile individuare in quale istante è stata emessa.



$$\varphi_{totale}(t) = \varphi_{misurata}(t_0, t) + N(t_0)$$

L'ambiguità  $N$  può essere stimata osservando un Sv per più epoche purchè sia mantenuto il contatto tra epoche di misura consecutive e quindi resti **costante** il conteggio del numero intero di cicli iniziali dovuti al moto relativo Sv-Rc.

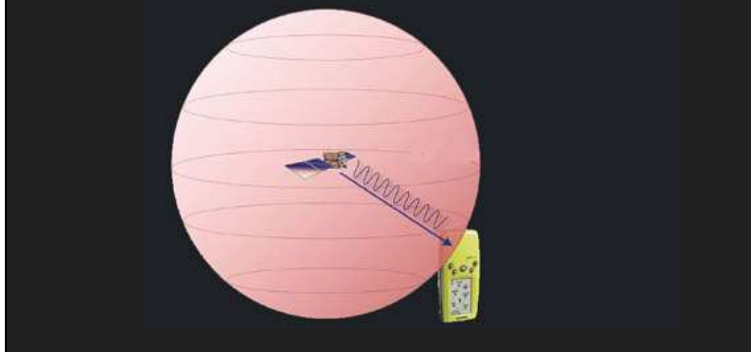
La possibilità di fissare o meno il valore di  $N$  ad **intero** influenza le successive misure della distanza Sv – Rc e quindi la precisione del posizionamento.

## Numero minimo di Satelliti

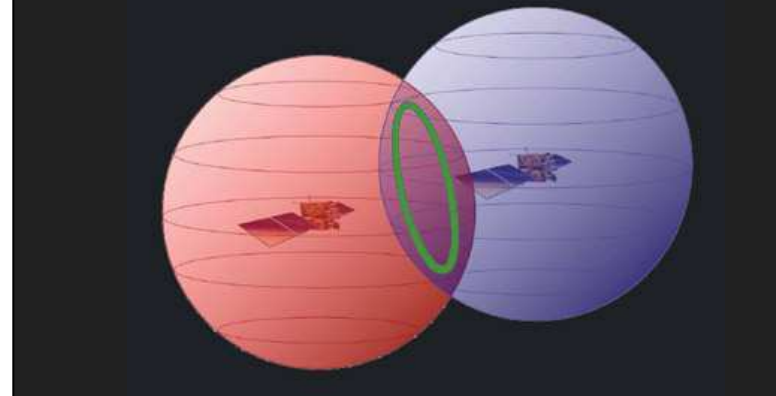
Domanda: **quanti satelliti** bisogna osservare per calcolare la propria posizione con un ricevitore GPS ?

La risposta a questo quesito può essere formulata da un punto di vista **Geometrico**, in cui si prendono in considerazione la posizione dei satelliti e le distanze dal ricevitore.

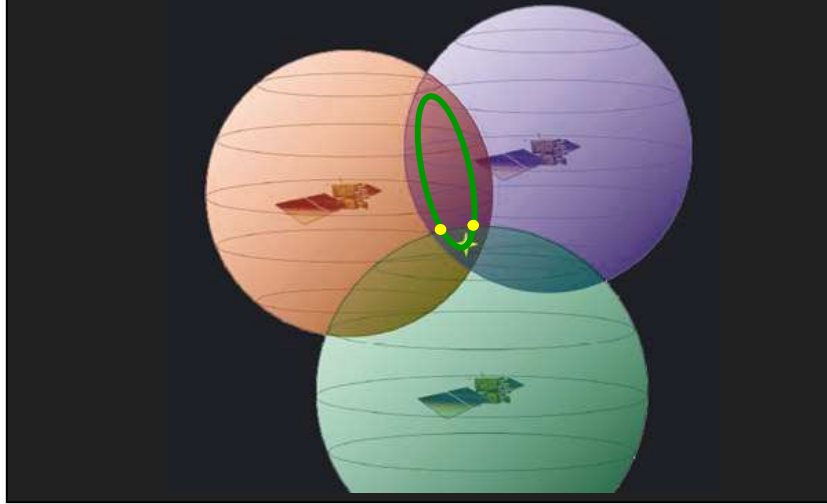
Noi siamo da qualche parte su questa sfera



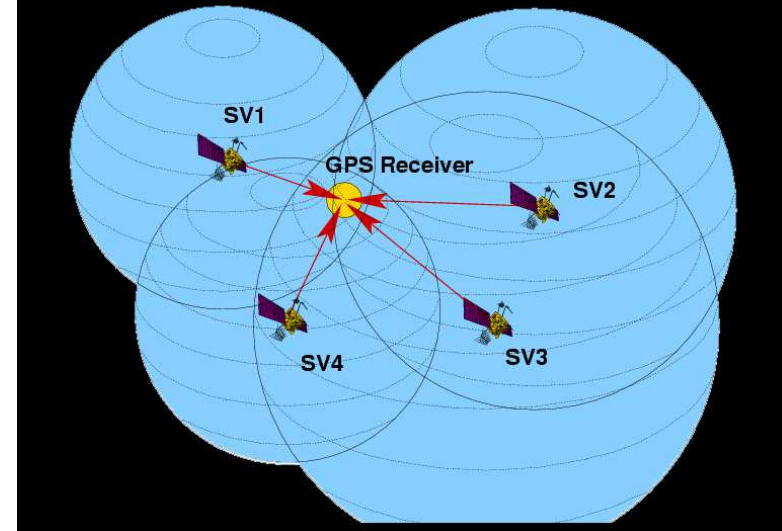
Un secondo SV restringe la nostra posizione ad un cerchio



Un terzo SV riduce l'ambiguità a due punti



La misura da un quarto Sv risolve l'ambiguità



### Numero minimo di Satelliti

Misure di codice  $\Rightarrow$  almeno **4** Sv

Misure di fase  $\Rightarrow$  almeno **5** Sv

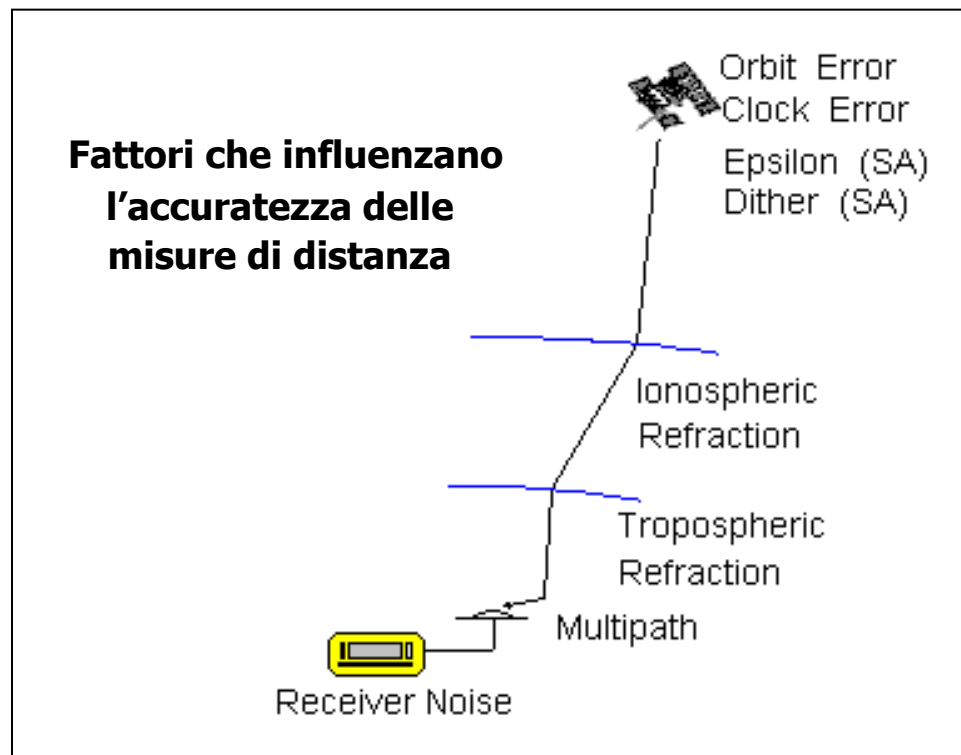
# *Errori nelle misure*

## *GPS*

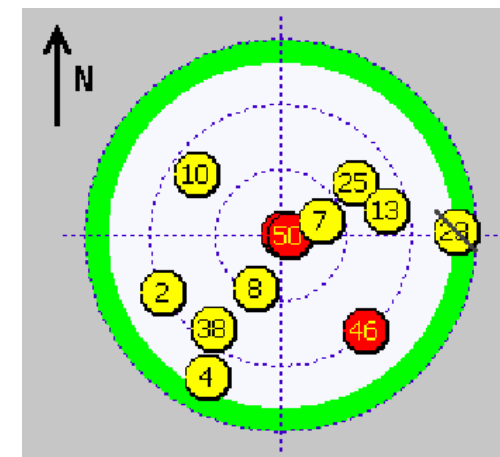
## Sorgenti di errore

La precisione del posizionamento GPS dipende principalmente da due fattori:

- ➔ **accuratezza delle misure di distanza Satellite-Ricevitore**
- ➔ **geometria della configurazione satellitare**



## Geometria satellitare



Gli errori che influenzano l'accuratezza delle misure delle distanze satellite-ricevitore possono essere classificati in base alla **sorgente** dell'errore, nel modo seguente:

Sorgente di errore	Tipologia di errore
<b>Satellite</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>errori delle orbite (effemeridi)</i></li> <li>• <i>errori di sincronismo tra orologi Sv</i></li> <li>• <i>effetti S/A</i></li> </ul>
<b>Satellite-Ricevitore</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>ritardo ionosferico e troposferico</i></li> <li>• <i>ambiguità intera (oss. di fase)</i></li> <li>• <i>multipath, cycle slips, interferenze em.</i></li> </ul>
<b>Ricevitore</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>errori sincronismo orologi Rc</i></li> <li>• <i>errori coordinate stazione</i></li> </ul>
<b>Utente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>errore misura altezza antenna</i></li> <li>• <i>osservazioni brevi, non contemporanee</i></li> <li>• <i>posizione stazione non ottimale</i></li> </ul>



## Errori delle orbite

A causa di disturbi legati a vari fenomeni fisici (ad es. il campo gravitazionale terrestre, attrazione di corpi celesti, pressione solare, ecc.), l'orbita effettivamente seguita dal satellite risulta **diversa** da quella prevista in base ai calcoli delle stazioni controllo a terra.

Si produce quindi un **errore nella posizione del satellite** rispetto all'orbita prevista.

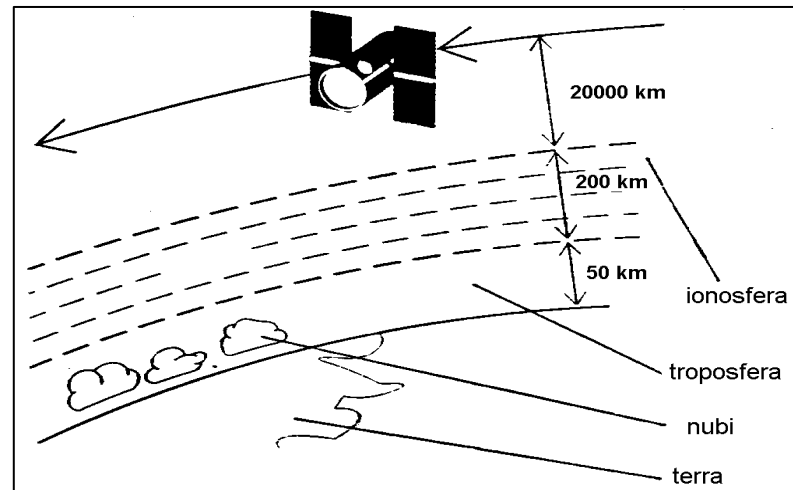
Poiché quest'ultima informazione è inviata ai ricevitori a terra tramite le effemeridi, ne deriva un errore nella misura della distanza Satellite-Ricevitore.

Questi errori sono presenti sia nelle effemeridi "*broadcast*" che nelle effemeridi "*precise*".

## Errori di sincronismo degli orologi dei Sv

Lo sfasamento degli orologi di bordo rispetto al tempo GPS (stabilità di 10-10-10-15 sec) si traduce in un ulteriore errore nella misura della distanza tra ricevitore e satellite.

## Effetti della Ionosfera



- Regione dell'atmosfera che si estende tra 70 e 1000 Km dalla superficie terrestre.
- Induce un **ritardo** nella propagazione del segnale GPS trasmesso dal Sv e quindi un errore nella misura della distanza Sv-Rc.

La ionosfera si comporta come un mezzo dispersivo nei confronti del segnale GPS ed influenza in modo differente i codici e le portanti:

- **ritardo** per codice (distanza misurata + **lunga**)
- **anticipo di fase** per le portanti (distanza misurata + **corta**)

Il contenuto di elettroni nella ionosfera (e quindi il disturbo ionosferico) varia significativamente in funzione:

- ➔ della latitudine;
- ➔ dell'attività solare;
- ➔ del periodo del giorno;
- ➔ della stagione.

Elevazione (°)	Basso (m)	Medio (m)	Alto (m)
15	3.9	18.0	180
30	2.0	10.0	100
45	1.4	7.0	70
90	1.0	5.0	50

Basso: notte

Medio: giorno, normale attività solare

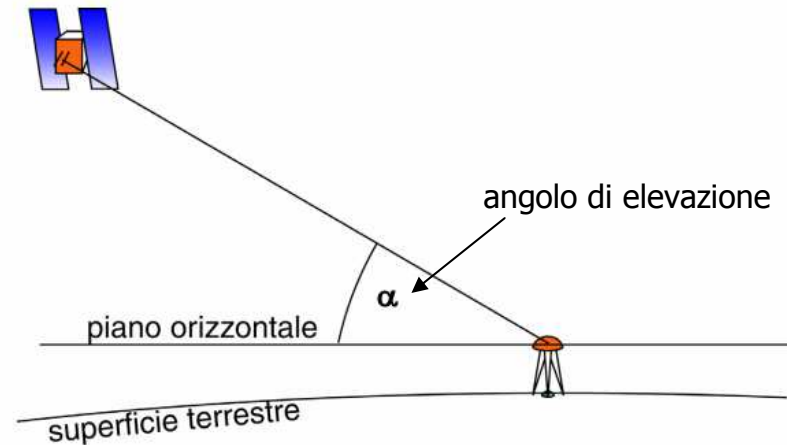
Alto: giorno, intensa attività solare

## Strategie di riduzione effetto ionosferico

1. Effettuare **osservazioni di notte**, durante il minimo di attività ionosferica;
2. Utilizzare **modelli ionosferici** disponibili tramite il messaggio di navigazione (strategia impiegata soprattutto quando si dispone solo di Rc monofrequenza);
3. Utilizzare ricevitori **doppia frequenza** che consentono di stimare il ritardo sfruttando la diversa influenza della ionosfera sulle frequenze delle due portanti L1 ed L2;
4. Applicare una **correzione differenziale** ai dati acquisiti tra due siti: l'effetto del disturbo può essere minimizzato sfruttando l'elevata **correlazione spaziale** esistente tra le osservazioni acquisite da due ricevitori posti a brevi o medie distanze tra loro.

## Effetti della Troposfera

- La troposfera si estende fino a 100 Km dalla superficie terrestre e **ritarda** anch'essa la propagazione del segnale GPS.
- Il ritardo non dipende dalla frequenza bensì dalle variazioni di **pressione**, **temperatura**, **umidità** e dall'**angolo di elevazione** del Sv rispetto a Rc.
- Gli errori introdotti sono  $\cong$  **metro** e possono essere corretti utilizzando algoritmi (**modelli troposferici**) basati sull'angolo di elevazione del Sv sull'orizzonte:
  - ⇒ Hopfield Model
  - ⇒ Modified Hopfield Model
  - ⇒ Saastamoinen Model
  - ⇒ Lanyi Model
  - ⇒ NMF (Niell)
  - ⇒ ecc...



## Errore troposferico

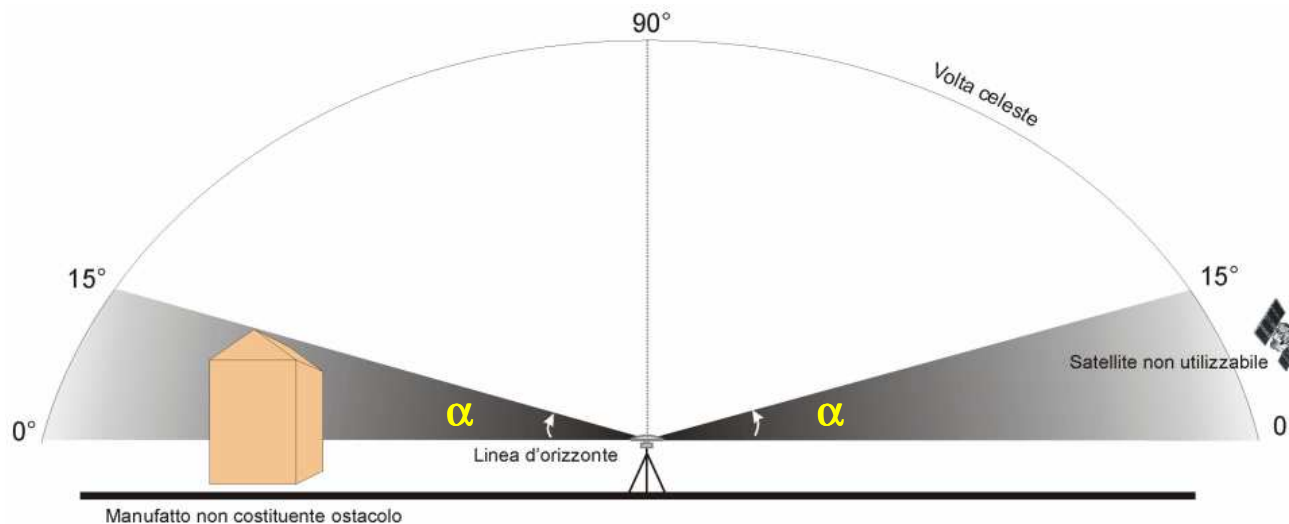
Elevazione (°)	Basso (m)	Medio (m)	Alto (m)
5	22.8	23.6	26.6
10	12.9	13.3	15.1
15	8.9	9.2	10.4
30	4.6	4.8	5.4
45	3.3	3.4	3.8
90	2.3	2.4	2.7

### Condizioni climatiche

- Basso: clima freddo e secco
- Medio: clima normale
- Alto: clima caldo e umido

### Angolo di *cut-off*

Per angoli di elevazione  $\alpha < 15^\circ$  l'errore tende ad aumentare esponenzialmente.

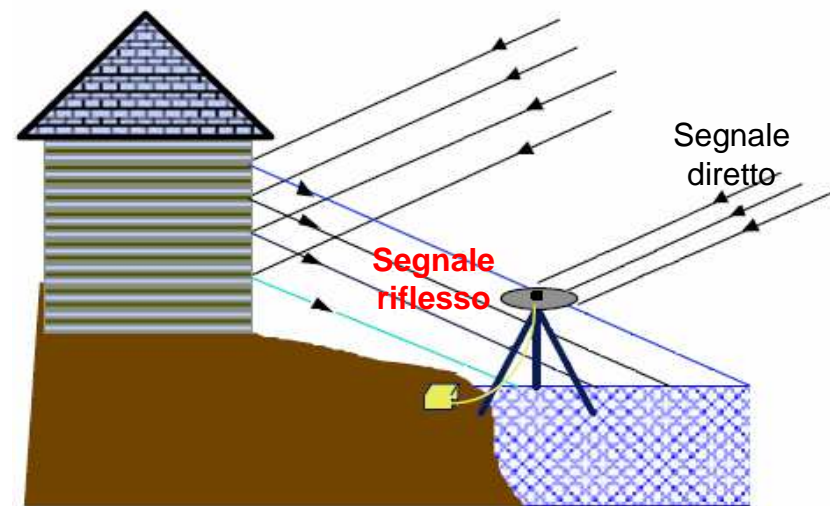
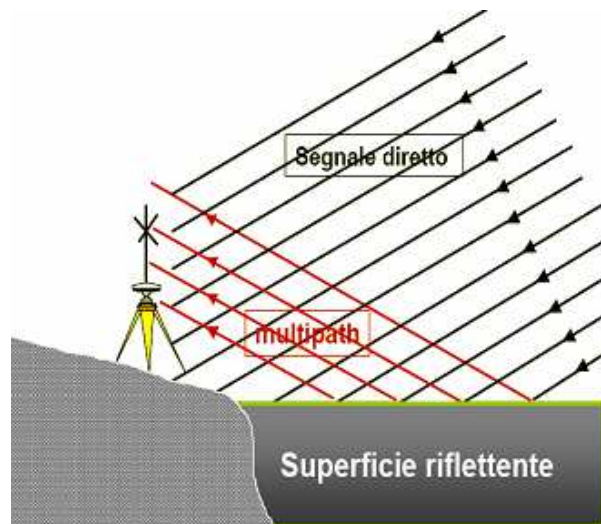


## Strategie di riduzione effetto troposferico

1. Osservare i satelliti con **angolo di elevazione** superiore a  $10^\circ - 15^\circ$ ;
2. Correggere i dati mediante un **modello troposferico** standard (Saastamoinen, Hopfield, ecc.);
3. Applicare una **correzione differenziale** ai dati acquisiti tra due siti, l'effetto del disturbo viene minimizzato a causa dell'alta correlazione per brevi e medie distanze interstazione (baselines).

## Multipath

- Il segnale GPS giunge all'antenna del ricevitore seguendo vari percorsi, lungo alcuni dei quali può subire molteplici riflessioni per effetto delle superfici circostanti (ad es. edifici, alberi, ecc.).
- Il segnale GPS ricevuto si compone di 2 parti: **diretta** e **riflessa**. La parte riflessa giunge al ricevitore in ritardo rispetto a quella diretta creando un'ambiguità sull'istante di arrivo del segnale e falsando così la misura della distanza dal satellite.





## Strategie di mitigazione del multipath

### 1. Selezione del luogo

Se possibile, scegliere la posizione dell'antenna in modo che essa sia libera da ostruzioni verso il cielo.

### 2. Utilizzo di antenne *Choke-Ring* o *Groundplane*

Questa tecnica utilizza antenne progettate in modo da eliminare le riflessioni dovute ad oggetti posti **sotto** l'antenna stessa.



### 3. Utilizzo di particolari ricevitori

Esistono ricevitori nel cui firmware sono stati inseriti algoritmi per la reiezione del multipath.

### 4. Lunghe sessioni di misura

Nel caso di osservazioni di codice la media temporale delle misure acquisite riduce il contributo del multipath, mentre si riduce l'impatto sulla precisione delle baseline per le osservazioni di fase.

## Interferenze elettromagnetiche

La presenza di eventuali segnali elettromagnetici di altra natura possono interferire con il segnale GPS aumentando il rumore.

E' opportuno posizionare l'antenna del ricevitore lontano da tralicci dell'alta tensione, centrali di distribuzione dell'energia elettrica, ripetitori per la telefonia cellulare.



## Errori del ricevitore

Dipendono principalmente dai seguenti fattori:

- sfasamento dell'orologio interno rispetto al tempo GPS;
- tipo di antenna utilizzata;
- rumore di fondo (*noise*) dei dispositivi elettronici impiegati.

Considerando solamente l'effetto del rumore elettronico del  $R_c$ , la massima precisione **teorica** ottenibile nella misura della distanza Sv-Rc è dell'ordine di **1%-2%** della lunghezza d'onda della componente del segnale usata.

Segnale GPS	Lunghezza d'onda (Chip length)	Precisione teorica
C/A code	300 m	3 - 6 m
P code	30 m	30 - 60 cm
Carrier phase	20 cm	20 mm

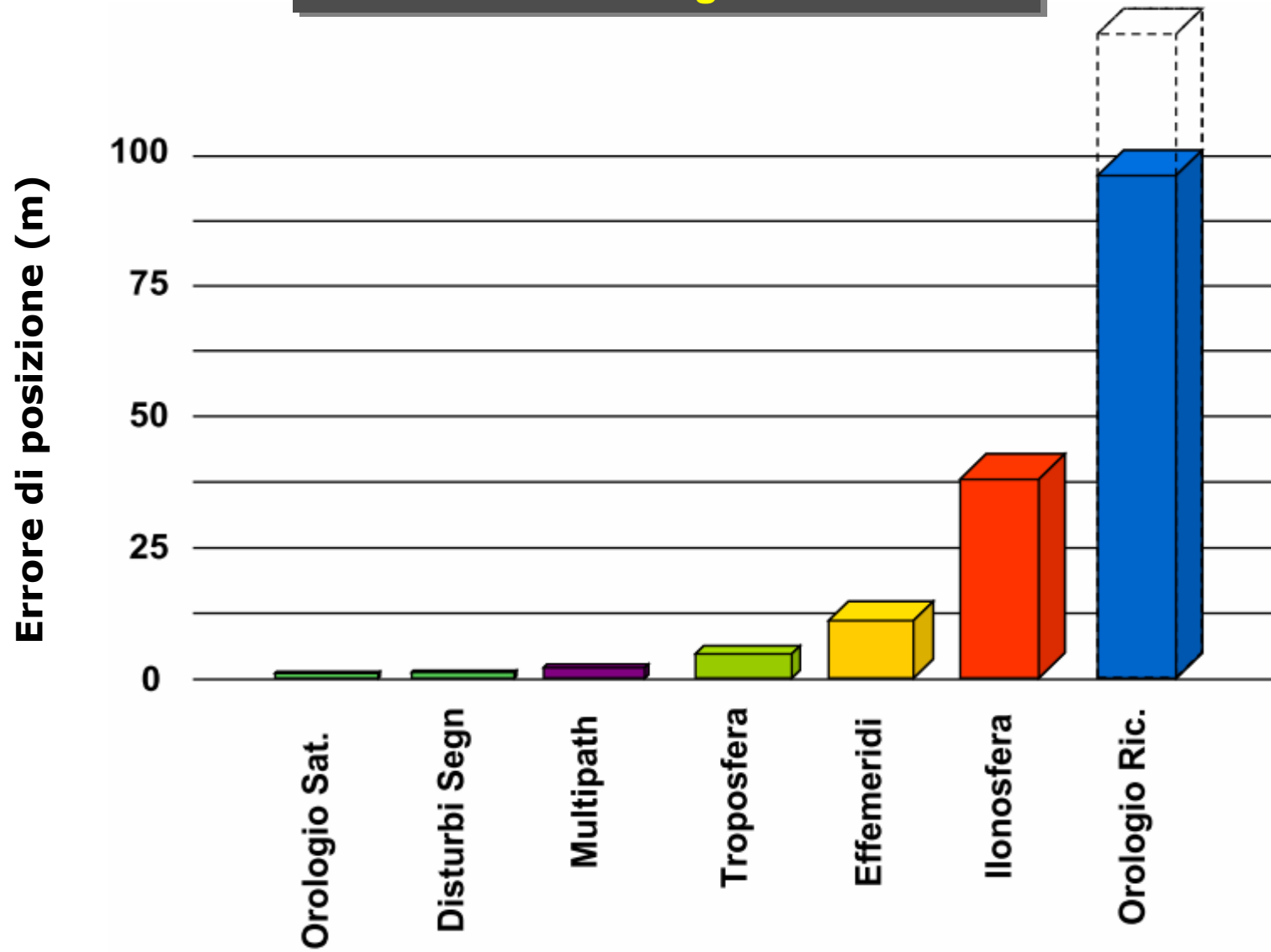
## Errori dell'utente

L'errore umano è quello che fornisce numericamente il contributo maggiore all'errore globale presente nelle misure GPS.

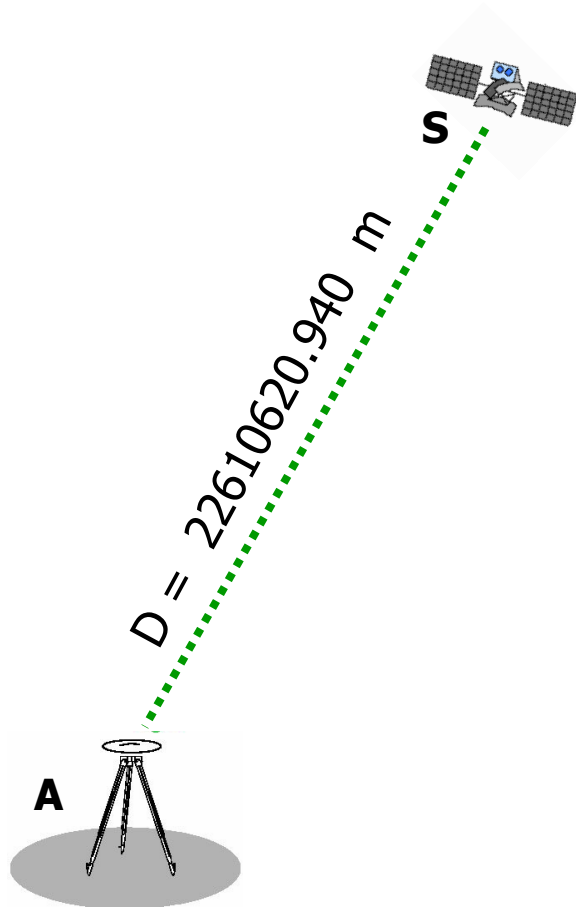
Tra le più frequenti cause di errore si ricordano:

- ➔ Errori nella misura dell'altezza dell'antenna;
- ➔ Trascrizione errata delle misure e del nome della stazione;
- ➔ Tempi di osservazione troppo brevi, misure eseguite in modo affrettato;
- ➔ Scarsa precisione nel centramento del punto e nel livellamento dell'antenna;
- ➔ Osservazioni NON contemporanee (errore nella sincronizzazione dei tempi di acquisizione operando con più ricevitori);
- ➔ Stazionamenti in prossimità di sorgenti di multipath o capaci potenzialmente di interferire con il segnale GPS.

## Contributo delle sorgenti di errore - 2



## Errori e distanza misurata



Distanza **misurata**  $D$  = distanza **vera**  $\rho$  +

D1	+	D2	+
<b>Errore orbita del satellite</b>		<b>Asincronia orologi del satellite</b>	
D3	+	D4	+
<b>Ritardo ionosferico</b>		<b>Ritardo troposferico</b>	
D5	+	D6	+
<b>Multipath</b>		<b>Asincronia orologio del ricevitore</b>	

$$\rho_{\text{vera}} = D_{\text{misurata}} - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6$$

## Equazioni di osservazione complete

### Osservabile di codice

$$PC_R^S(t) = \rho_R^S(t) + c(dt^S - dT_R) + d_{ion} + d_{trop} + d\rho^S + \varepsilon_R$$

### Osservabile di fase

$$PF_R^S(t) = \rho_R^S(t) + c(dt^S - dT_R) - d_{ion} + d_{trop} + \lambda N_R^S + d\rho^S + \varepsilon'_R$$

- ▶  $d_{ion}$  = esprime il contributo del disturbo ionosferico
- ▶  $d_{trop}$  = contributo disturbo troposferico
- ▶  $d\rho^S$  = errori orbita Sv
- ▶  $\varepsilon_R, \varepsilon'_R$  = multipath e rumore elettronico del ricevitore
- ▶  $dt^S$  = offset dell'orologio del satellite
- ▶  $dT_R$  = offset orologio del ricevitore

## Dilution of Precision (DOP)

- Anche la **configurazione geometrica** assunta dai satelliti rispetto al ricevitore influenza la precisione delle misure.
- L'entità della degradazione è espressa tramite un fattore *adimensionale* noto come **DOP** (*Dilution of Precision*) che indica in pratica il decremento atteso nella precisione del posizionamento geometrico.
- Tale fattore tende infatti ad **amplificare** l'errore di pseudorange secondo la relazione seguente:

$$\sigma = DOP \cdot \sigma_{UERE}$$

dove

$\sigma_{UERE}$  = accuratezza della singola misura di pseudorange (tiene conto delle varie forme d'errore viste precedentemente).

**UERE** = User Estimated Range Error.



Il DOP viene espresso attraverso differenti indicatori di degradazione a seconda della caratteristica che si vuole evidenziare:

- **HDOP (Horizontal DOP):** qualità della precisione nella componente planimetrica (n,e)

$$\sigma_{Hor} = HDOP \cdot \sigma_{URE}$$

- **VDOP (Vertical DOP):** precisione attesa sulla componente altimetrica (up)

$$\sigma_{Ver} = VDOP \cdot \sigma_{URE}$$

- **PDOP (Position DOP):** combina la precisione planimetrica con quella altimetrica

$$(PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2)$$

$$\sigma_P = PDOP \cdot \sigma_{URE}$$

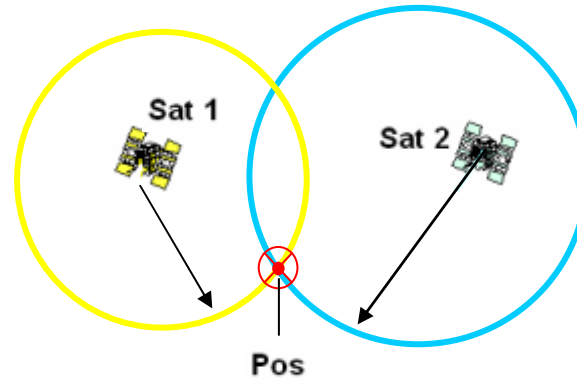
- **TDOP (Time DOP):** precisione raggiunta nella sincronizzazione degli orologi SV e RC

- **GDOP (Geometric DOP):** precisione nelle 4 dimensioni (X, Y, Z, T)

$$(GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2)$$

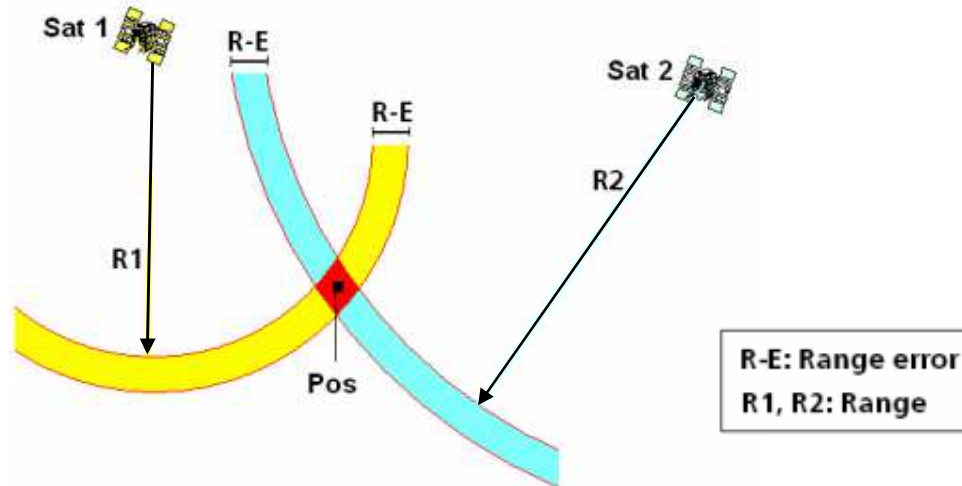
## Interpretazione geometrica

Idealmente, in assenza di errori di distanza, la posizione è data dall'intersezione tra i due cerchi



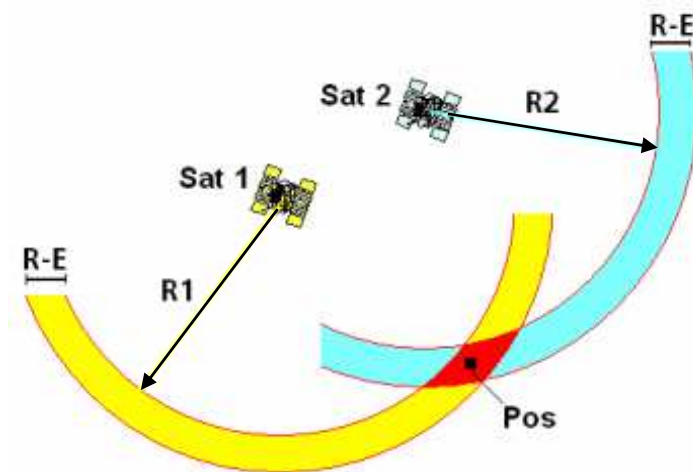
### PDOP buono

(errore posizione piccolo)



### PDOP scarso

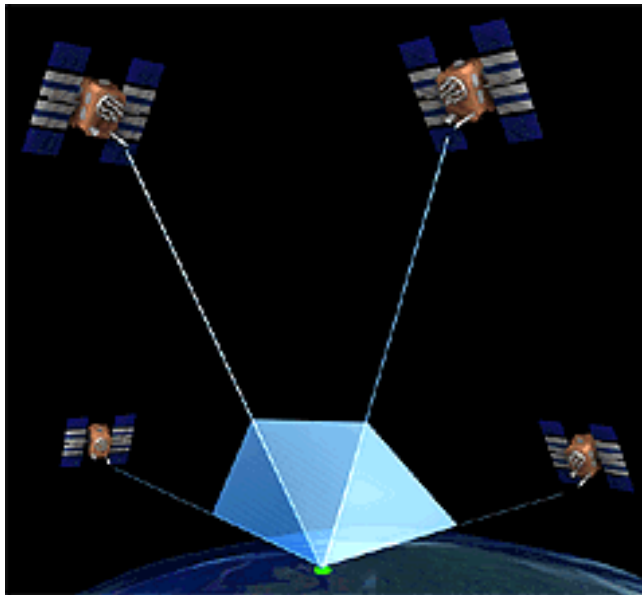
(errore posizione grande)



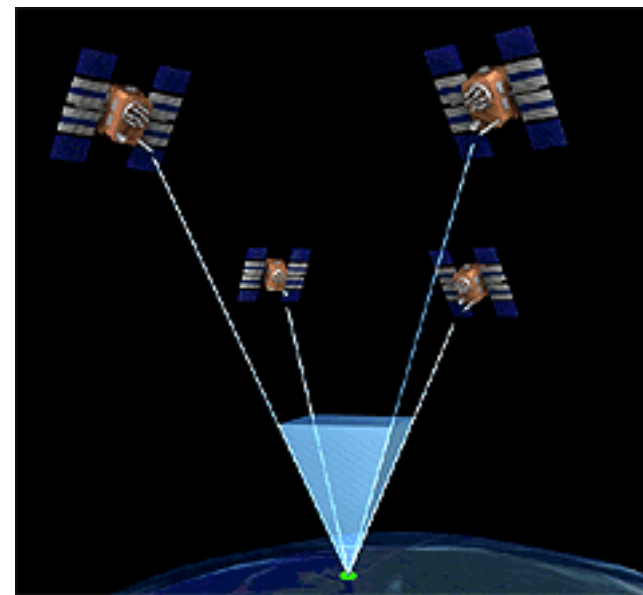
Alternativamente si può considerare il rapporto di proporzionalità inversa tra l'accuratezza del posizionamento tridimensionale ed il volume del poliedro avente per spigoli i satelliti visibili e per vertice il punto di stazione del ricevitore.

➡ Maggiore è il volume del poliedro e minore è il DOP, quindi l'errore sulla posizione.

**PDOP buono**

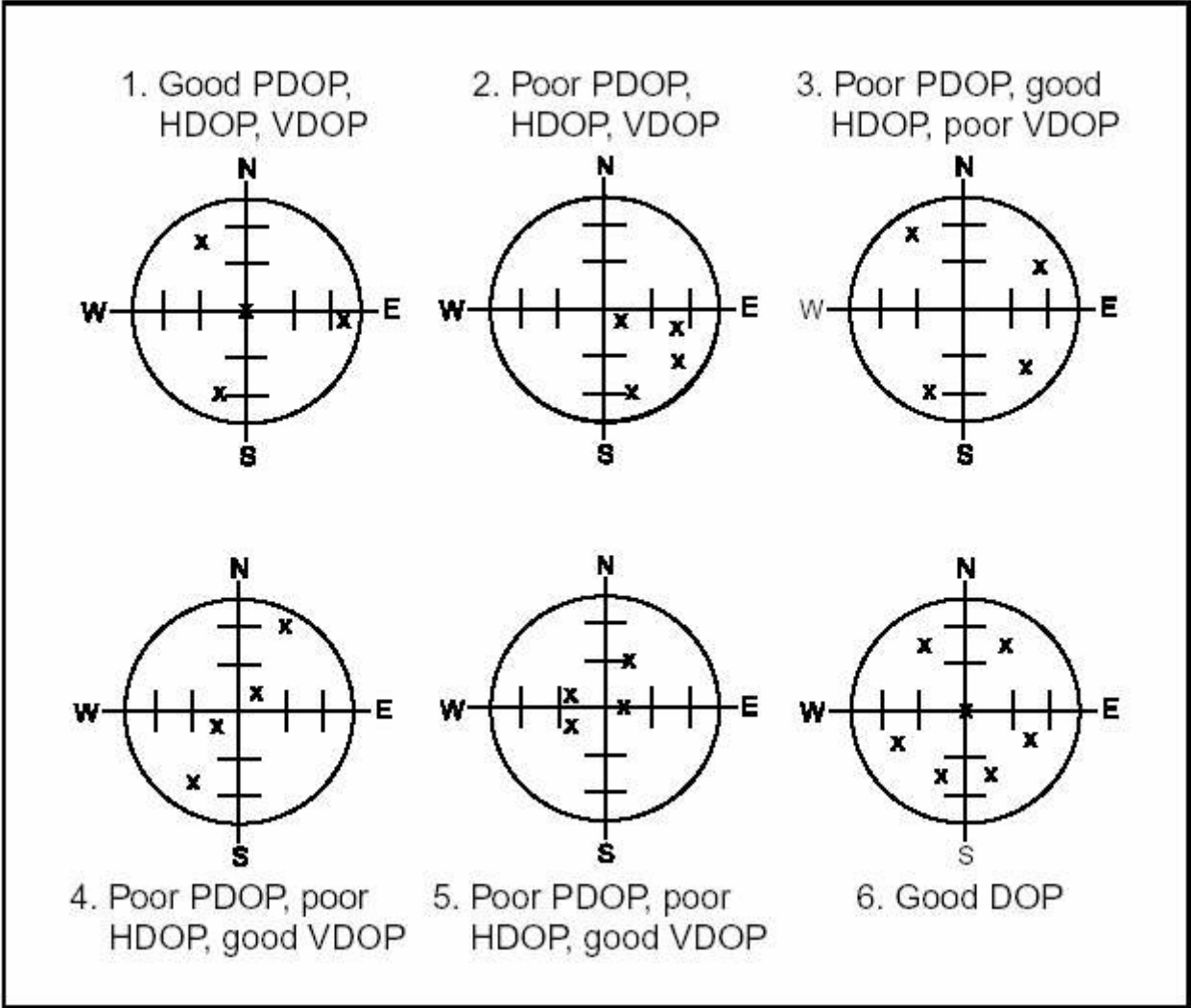


**PDOP scarso**



***Minore*** è il tempo di osservazione, ***maggiore*** è l'influenza della geometria satellitare.

## Configurazioni satellitari ed effetti sul DOP



# *Il sistema satellitare russo*

## *GLONASS*



## Introduzione

- Sviluppato a partire dal 1982 dal Ministero della Difesa sovietico (ex URSS), il **Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLObal NAVigation Satellite System)** costituisce il sistema di posizionamento satellitare russo, strutturalmente analogo a quello americano.

- Attualmente la costellazione GLONASS dispone di 18 satelliti in grado di garantire la minima capacità operativa (vita media stimata pari a 7 anni).

Si prevede che entro il 2009 saranno in orbita 24 satelliti (vita media di 10 anni), raggiungendo così la condizione di piena operatività della costellazione.

- Informazioni sullo stato del sistema: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>

- Anche questo sistema è costituito da tre sezioni principali:

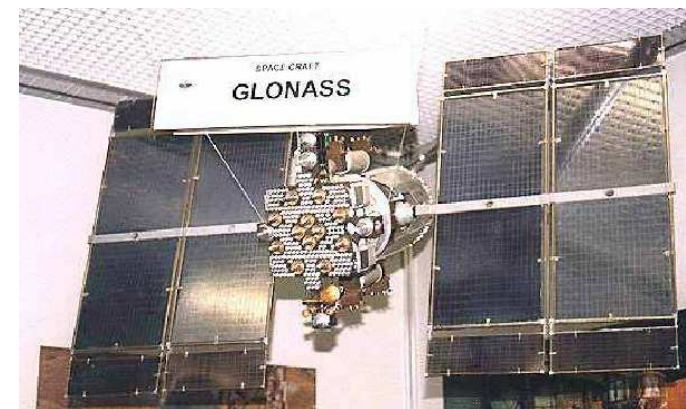
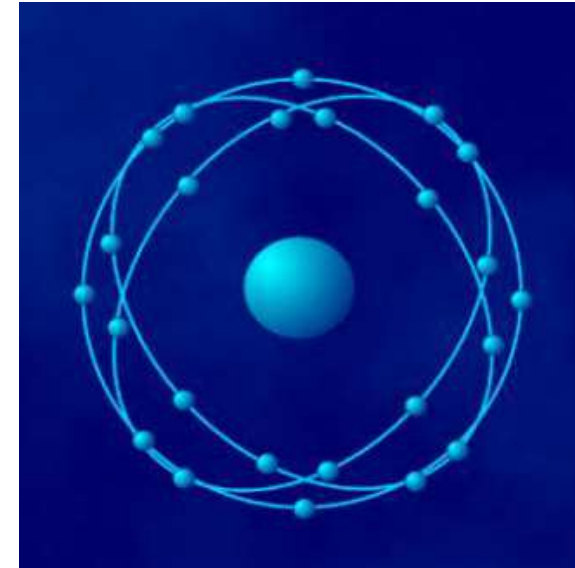
***space segment**, **control segment** e **user segment**.*

## Segmento spaziale

### *Caratteristiche della costellazione:*

- **24** satelliti distribuiti su 3 piani orbitali
- ~ 64.8° di inclinazione rispetto all'equatore
- 8 satelliti per piano orbitale
- distanza da terra di **19130 Km**  
(leggermente più bassi del GPS)
- periodo di rivoluzione orbitale di 11h 15m 44s

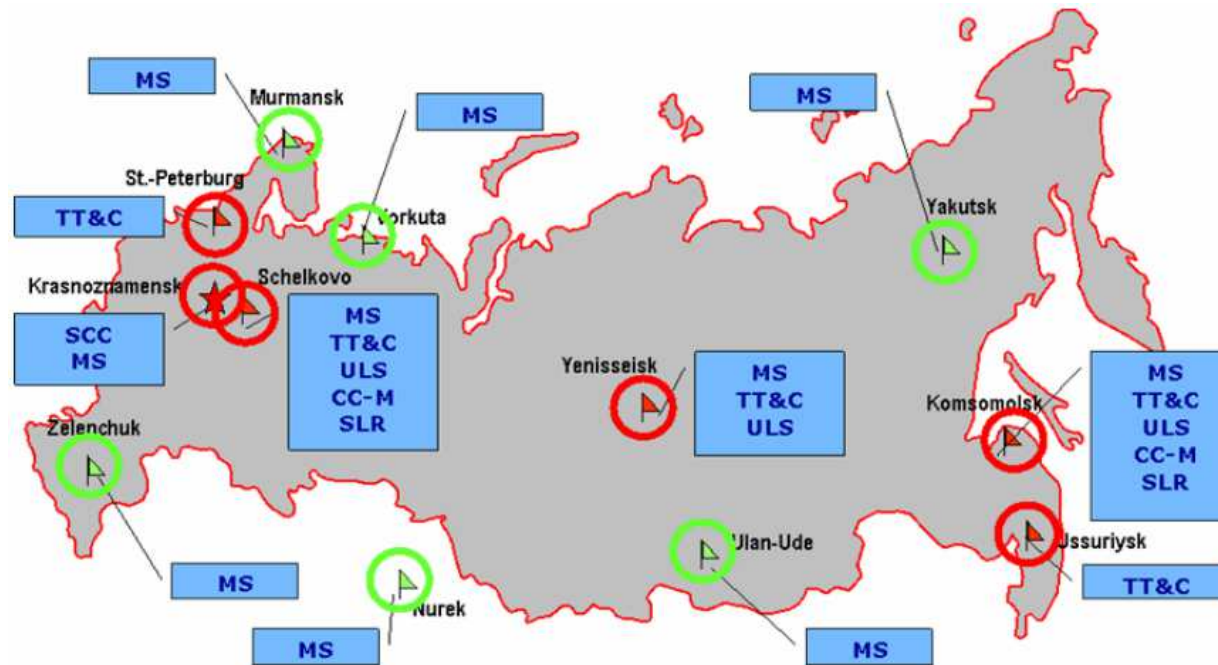
Ogni Sv è identificato da uno **slot number** che definisce il piano orbitale e la posizione all'interno del piano stesso (1-8, 9-16,17-24).



## Segmento di controllo

E' interamente localizzato all'interno del territorio dell'ex URSS.

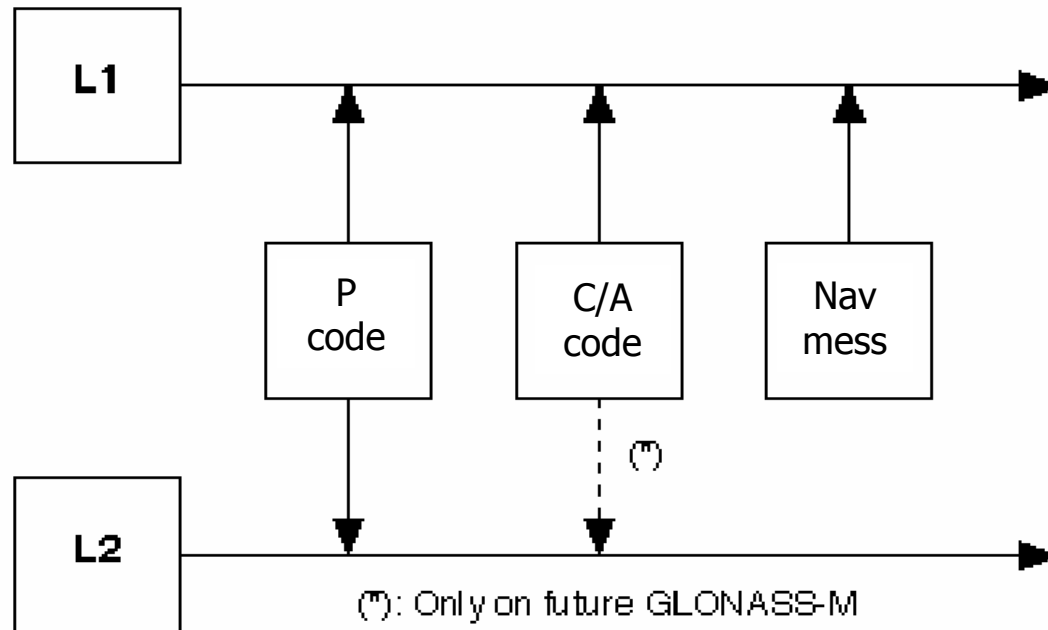
Le stazioni di monitoraggio (Monitor Stations, **MS**) svolgono sostanzialmente le stesse funzioni delle corrispondenti; il Centro di Controllo a terra (System Control Center, **SCC**) si trova a Mosca.



- TT&C – Telemetry, tracking, commanding station
- ULS – Upload station
- CC – Central clock
- SLR – Laser tracking station



## Struttura del segnale GLONASS



Ciascun satellite GLONASS trasmette 2 tipi di segnale, cui corrispondono diverse prestazioni nel posizionamento:

- precisione standard (**SP**), portante L1
- alta precisione (**HP**), portanti L1 + L2

### ***Vantaggi del GLONASS rispetto al GPS:***

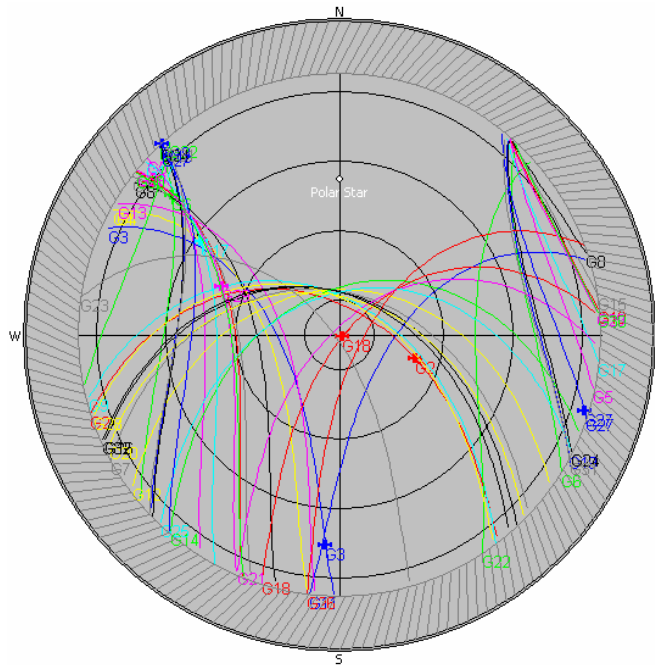
- 1) Sul segnale per uso civile non è inserita alcuna forma di degradazione intenzionale simile alla S/A.
- 2) La configurazione orbitale consente una visibilità dei satelliti russi migliore di quella del sistema americano per latitudini settentrionali  $>50^\circ$ .
- 3) I codici ad uso militare non sono criptati come nel GPS (codice Y), ma le autorità russe sconsigliano l'uso di tali codici per scopi civili.

### ***Vantaggi della ricezione combinata GPS + GLONASS***

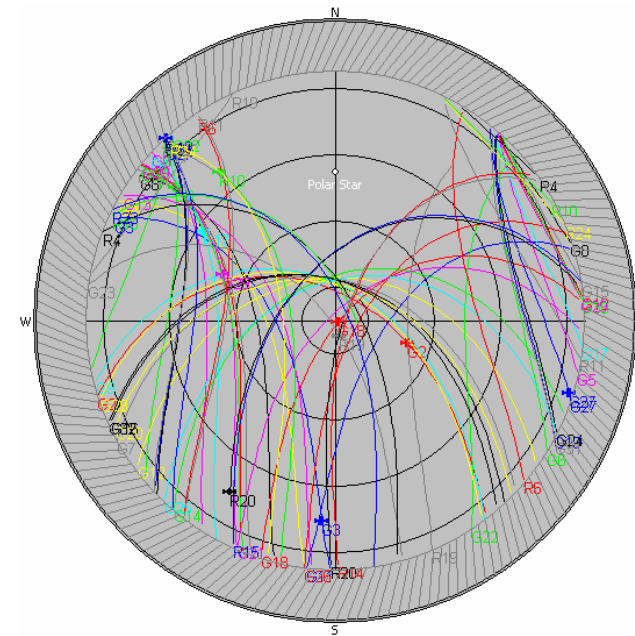
- aumenta il numero di satelliti osservati incrementando così la ridondanza dei dati e rendendo possibile l'esecuzione rilievi anche in zone prima "difficili" con il solo GPS;
- migliora la geometria satellitare con conseguente diminuzione dei valori di DOP soprattutto in aree urbane.

## Benefici della combinazione GPS + GLONASS

- 1) La configurazione orbitale consente una visibilità dei satelliti russi migliore di quella del sistema americano per latitudini  $>50^\circ$ .



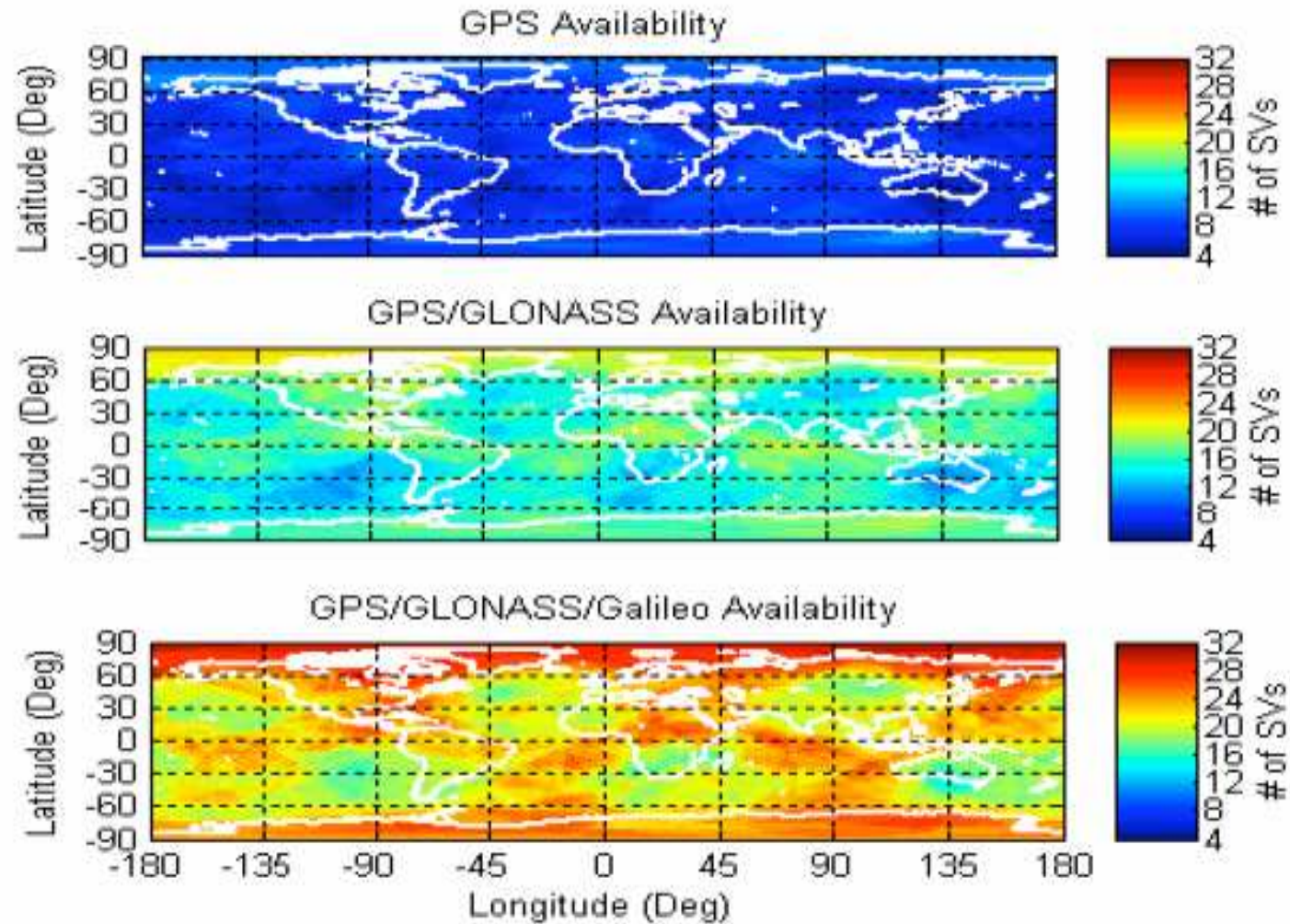
**GPS**



**GPS + GLONASS**

Copertura satellitare vista da AGRIPOLIS (Luglio 2008)

- 2) Maggior numero di satelliti osservabili aumenta la ridondanza dei dati e la possibilità di eseguire rilievi anche in zone prima "difficili" con il solo GPS;



## Confronto tra i due sistemi satellitari

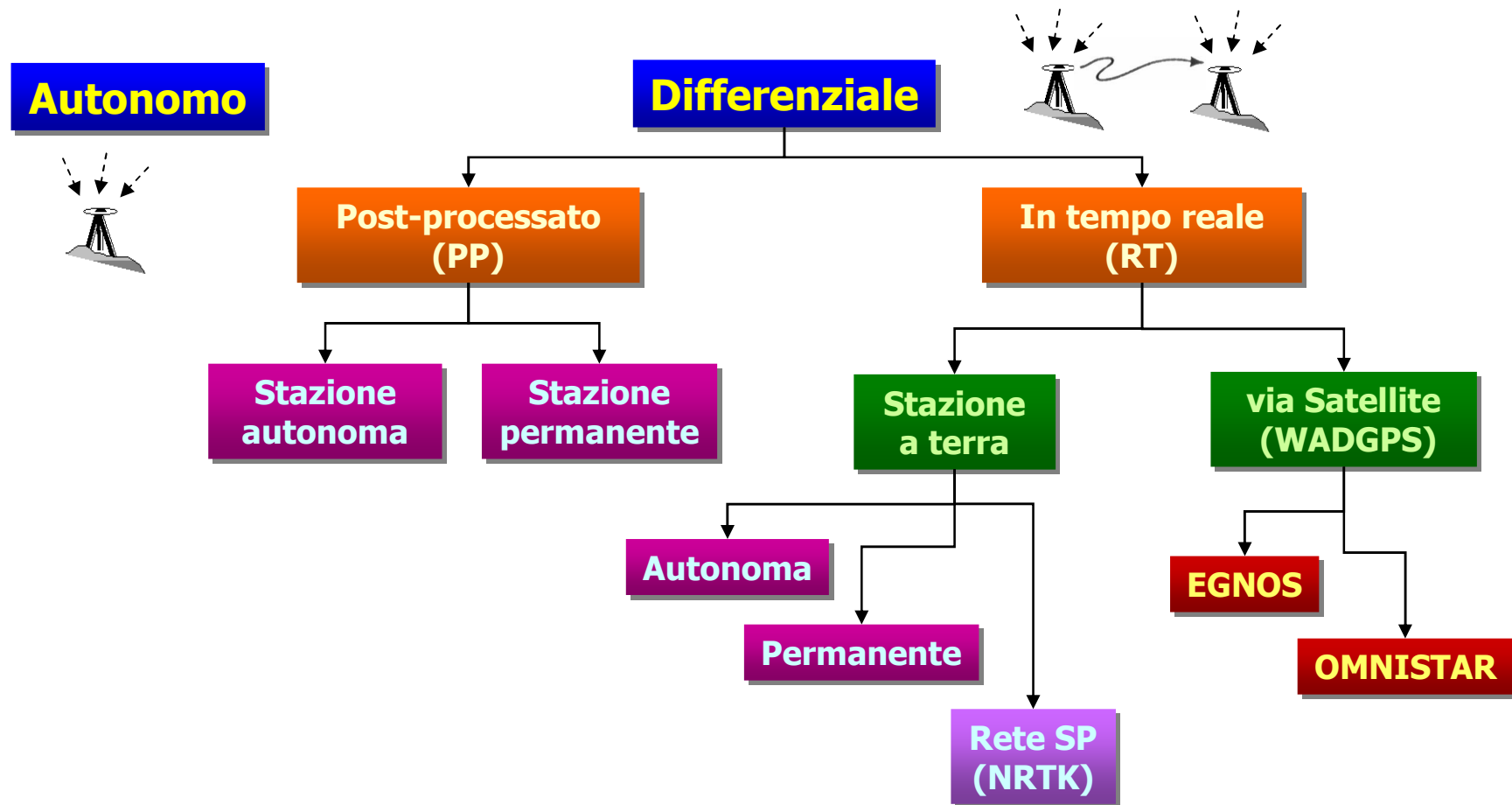
Nel sistema GLONASS ciascun Sv trasmette gli **stessi codici** su **frequenze diverse** (tecnica **FDMA**, *frequency division multiple access*)

	<b>GLONASS</b>	<b>GPS</b>
No of satellites	<b>24</b>	<b>32</b>
No of orbital planes	3	6
Orbital inclination	64.8°	55°
Orbit altitude	19,130 km	20,180 km
Period of revolution	11h15m40s	11h58m00s
Geodetic datum	PZ-90	WGS-84
Geodetic time reference	UTC(Russia)	UTC(USNO)
Signalling	FDMA	CDMA
L1 carrier frequency	1602 - 1609 MHz	1575 MHz
L2 carrier frequency	1246 - 1251 MHz	1227 MHz
# of code elements (C/A)	511	1023
# of code elements (P)	$5.11 \times 10^6$	$2.35 \times 10^{14}$
Code rate (C/A)	511 kbps	1023 kbps
Code rate (P)	5.11 Mbps	10.23 Mbps
Chip length (C/A)	586.7 m	300 m
Chip length (P)	58.67 m	30 m

# *Metodi di posizionamento*

# Introduzione

Il GPS è un sistema molto flessibile che consente di determinare la propria posizione attraverso un insieme di metodologie riassumibili secondo lo schema seguente:



## Posizionamento autonomo

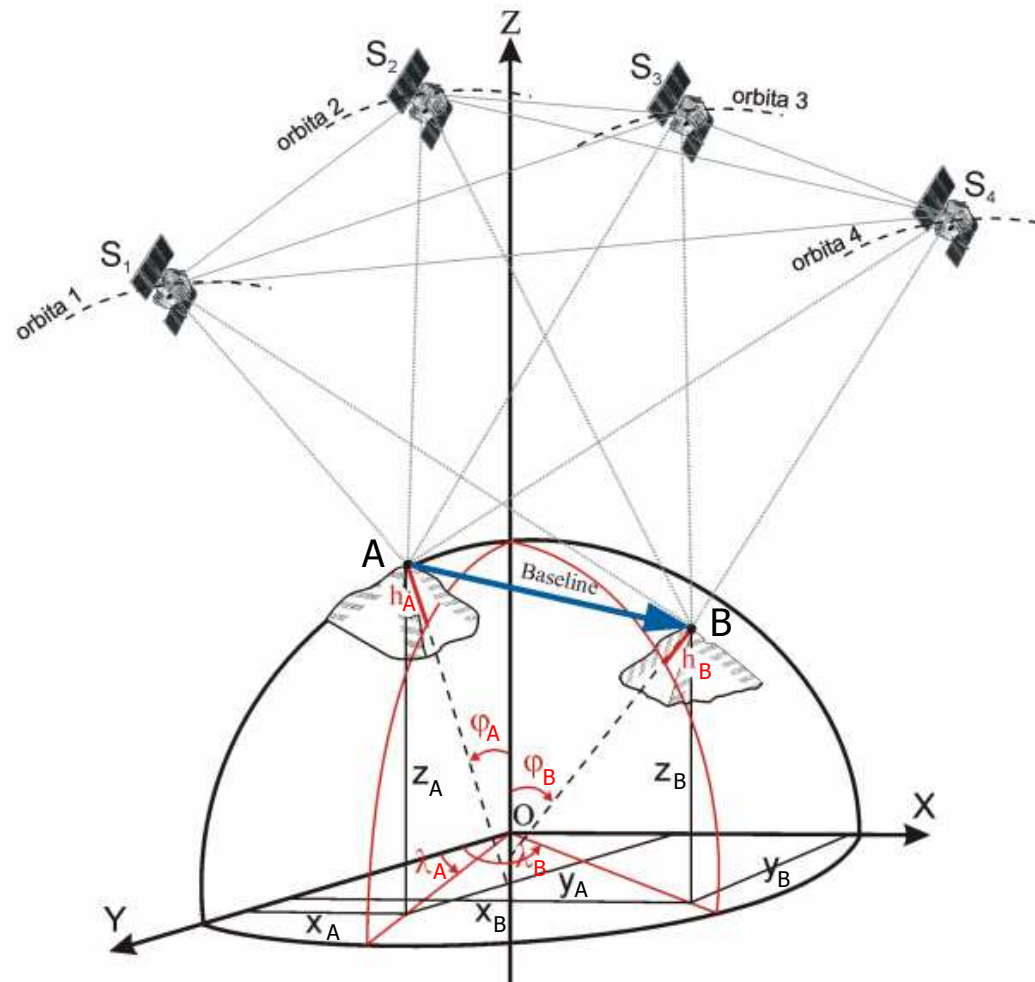
- La posizione del ricevitore (coordinate  $\varphi, \lambda, h$ ) viene determinata
  - in tempo reale, direttamente in campagna;
  - sia esso fisso in un luogo (pos. **statico**) oppure in movimento (pos. **cinematico**)
  - utilizzando **un solo** ricevitore, monofrequenza (L1) o doppia frequenza (L1+L2),
  - sia con misure di **codice** che di **fase**.
- Il posizionamento assoluto fornisce precisioni scarse (**1÷10 m**) per applicazioni topografiche in quanto il segnale ricevuto è fortemente influenzato da tutte le possibili sorgenti di errore.
- Nel caso **statico** la precisione delle coordinate del punto può essere migliorata effettuando una media temporale dei dati acquisiti nel corso dell'intera sessione di osservazione. Tale strategia richiede però software e ricevitori opportuni.



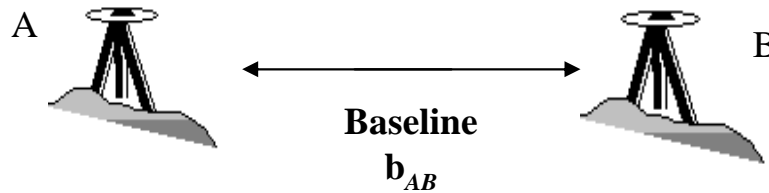
## Posizionamento differenziale Post-Processato

- Procedura che consente di migliorare la precisione delle misure GPS
  - mediante **correlazione delle misure** (combinazione delle osservazioni)
  - acquisite **in contemporanea** da **almeno due stazioni**
  - in modo da ridurre o addirittura eliminare alcune cause di errore **comuni**.
- Procedura che garantisce la **massima precisione**, ed è pertanto di norma utilizzata per la determinazione di punti di appoggio o la costituzione di reti di inquadramento.
- Il trattamento dei dati è sempre fatto in **post-elaborazione**.

Obiettivo è la determinazione del vettore "baseline" ovvero delle componenti del vettore che unisce due vertici su cui stazionano contemporaneamente due ricevitori.



Si parla anche di posizionamento **RELATIVO** perché, tramite il vettore di base, si determinano le coordinate di B **rispetto** ad A.



$$\mathbf{b}_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}$$

Conoscendo quindi le coordinate assolute di una stazione (es. A) è allora possibile calcolare le coordinate **assolute** dell'altra (B):

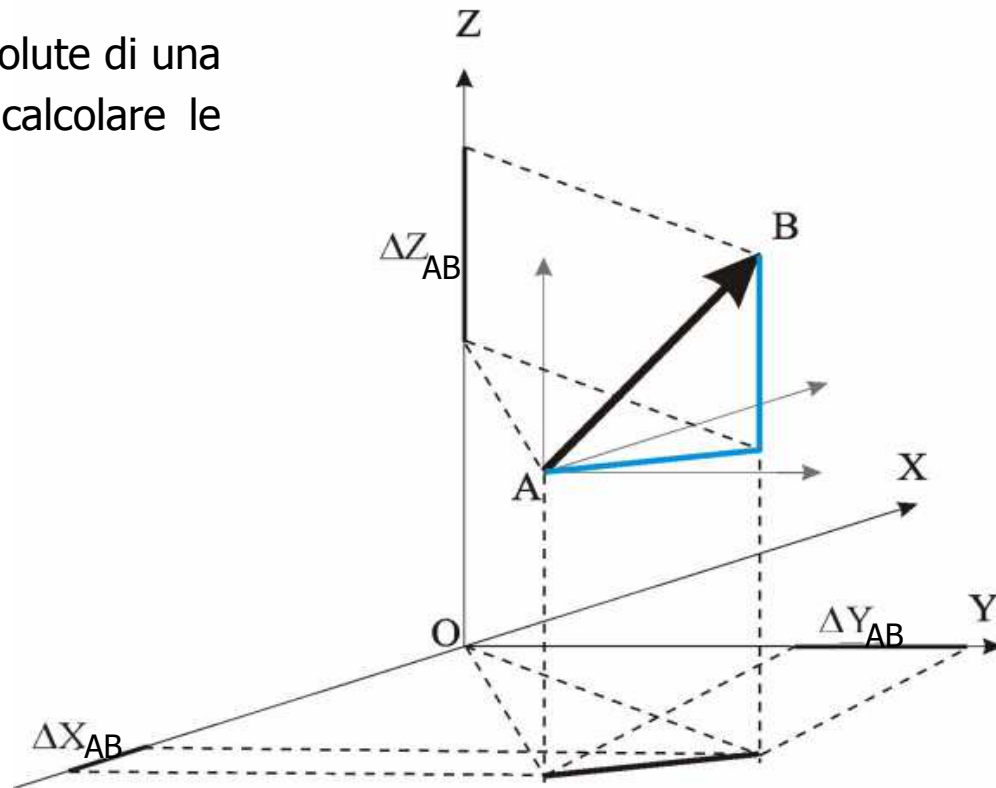
$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + \mathbf{b}_{AB}$$



$$X_B = X_A + \Delta X_{AB}$$

$$Y_B = Y_A + \Delta Y_{AB}$$

$$Z_B = Z_A + \Delta Z_{AB}$$



- Il posizionamento PP si applica alle misure di codice ma soprattutto a quelle di **fase** per sfruttarne la maggior precisione conseguibile.
- E' necessario fare misure **simultanee** e **sincrone** con almeno due ricevitori.
- Si costruiscono delle combinazioni lineari delle osservazioni di fase effettuate sulla **stessa frequenza** (L1 o L2) ottenendo le cosiddette **differenze multiple** che permettono di
  - ridurre drasticamente, o addirittura eliminare, le diverse sorgenti di errore,
  - raggiungere accuratze dell'ordine del **cm** o perfino del **mm** (con lunghi periodi di osservazione).

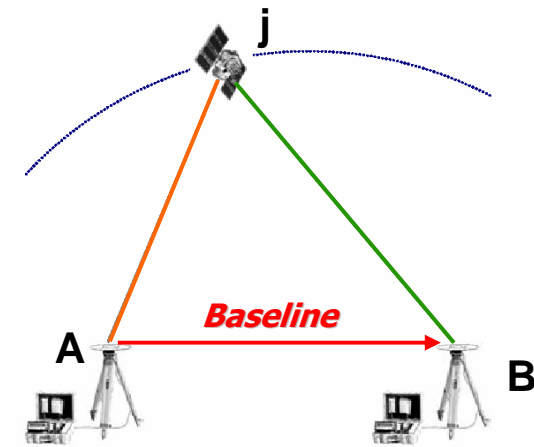
In particolare, si distinguono tre tipi di tali combinazioni:

- **differenza singola**
- **differenza doppia**
- **differenza tripla**

## Differenza singola

Due ricevitori osservano il **medesimo** satellite nello stesso istante (tempo GPS).

### Osservazioni di fase:



$$PF_A^j(t) = \rho_A^j(t) + c(dt^j - dT_A) + \lambda N_A^j - d_{ion} + d_{trop} + d\rho^j + \varepsilon'_A$$

$$PF_B^j(t) = \rho_B^j(t) + c(dt^j - dT_B) + \lambda N_B^j - d_{ion} + d_{trop} + d\rho^j + \varepsilon'_B$$



$$PF_{AB}^j(t) = \rho_{AB}^j(t) + \lambda N_{AB}^j + c\delta_{AB}(t) + \Delta_{ion} + \Delta_{trop} + \varepsilon'_{AB}$$

Questa procedura consente di eliminare **tutti gli errori dipendenti dai satelliti**:

- ▶ errore nel calcolo della posizione dei Sv
- ▶ errori dovuti agli offset degli orologi di bordo
- ▶ se la distanza tra i ricevitori è sufficientemente corta possono essere eliminati gli errori dovuti all'attraversamento dell'atmosfera (se distanza tra i Rc < **50 km**)

## Effetti della correzione differenziale

- Errori delle orbite → rimosso mediante correzione differenziale
  - Errori orologio dei satelliti → rimosso mediante correzione differenziale
  - Ritardo ionosferico → ridotto mediante correzione differenziale
  - Ritardo troposferico → ridotto mediante correzione differenziale
  - Errori orologio dei ricevitori → rimosso mediante correzione differenziale
  - Multipath → attenuato quanto più tempo si staziona sul punto.
  - Dilution of Precision (DOP) → attenuato quanto più tempo si staziona sul punto.
  - Rumore elettronica del ricevitore
- diff. singola
- diff. doppia

## Posizionamento differenziale in tempo reale

Tale tecnica richiede l'utilizzo di:

- una stazione **master**, su posizione nota a priori,
- una (o più) unità **rover** che si muove occupando i punti di nuova determinazione,
- una comunicazione continua tra master e rover.

La stazione base calcola le **correzioni** di *pseudorange* che vengono trasmesse **in tempo reale** al rover il quale applica tali correzioni alle proprie misure migliorandone la precisione. L'elaborazione dei dati avviene quindi **direttamente in campagna**.

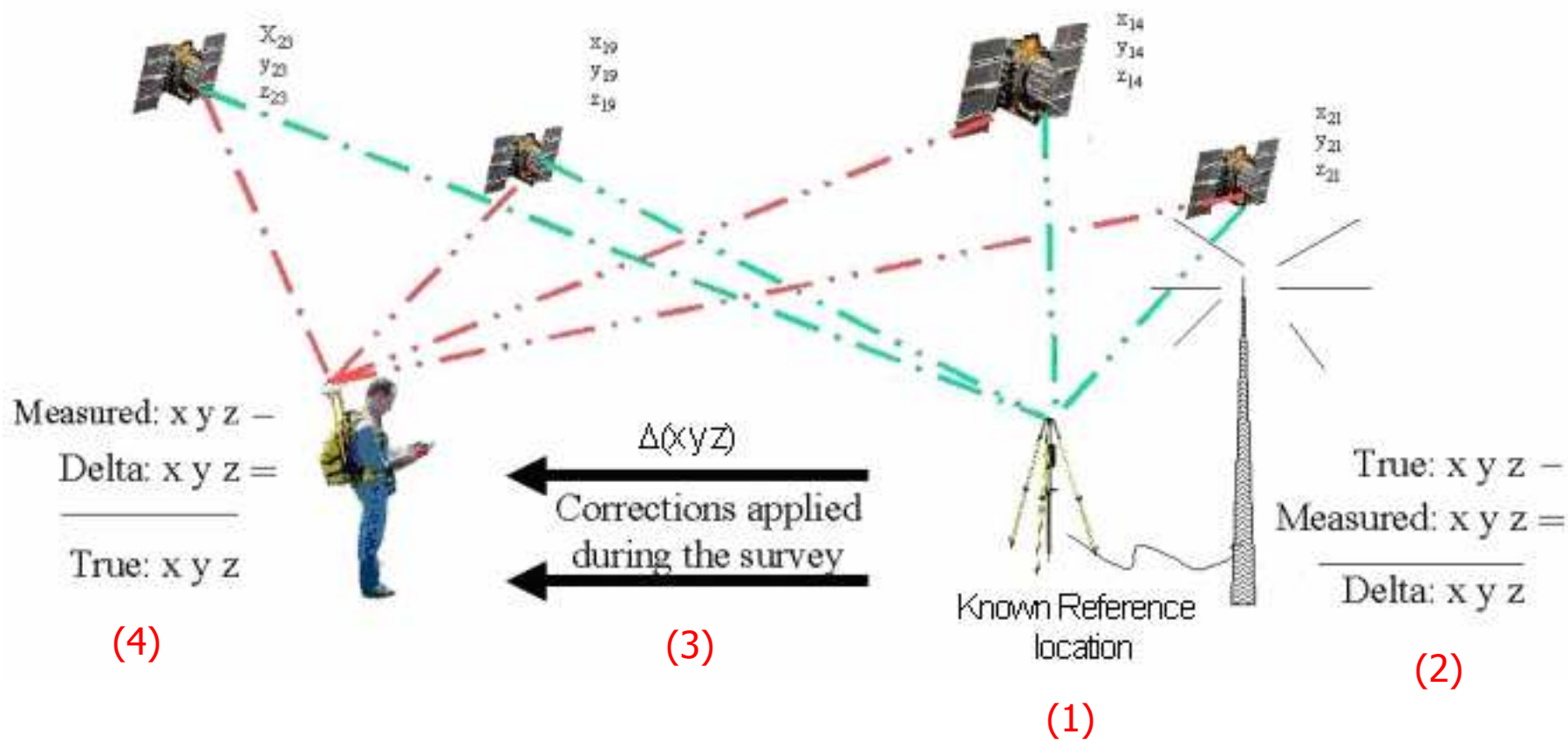
### Vantaggio:

L'utente può controllare in tempo reale l'operatività della stazione master ed interrompere il rilievo in caso di malfunzionamento.

### Svantaggio:

La precisione del rilievo decade all'aumentare della distanza master-rover.

# Procedura Real Time (RT)





## Procedura operativa

Il posizionamento in tempo reale si svolge con le seguenti modalità:

1. Si colloca un ricevitore GPS su una stazione di posizione nota (**master**) e si iniziano le osservazioni;
2. per ogni epoca di osservazione la stazione master calcola la propria posizione e la confronta con quella nota a priori;
3. la differenza tra la posizione nota e quella calcolata viene attribuita agli errori di misura;
4. la stima di tali errori viene quindi comunicata (via radio, modem GSM o Internet) al ricevitore rover che sta osservando gli **stessi** satelliti, in una posizione incognita;
5. l'unità **rover** utilizza le proprie misure di distanza SV-Rc per effettuare un primo calcolo prossimato della propria posizione; quindi corregge tale calcolo con i termini di errore comunicatigli dal ricevitore master.

## Modalità operative

A seconda dell'osservabile GPS utilizzata, questa tecnica viene indicata con il termine:

- **DGPS** (Differential GPS) se si trasmettono correzioni alle misure di **codice**.
- **RTK** (Real Time Kinematic) se si trasmettono osservazioni/correzioni di **fase**.

L'unità rover può tracciare anche satelliti diversi dal master, ma le correzioni differenziali vengono applicate soltanto ai satelliti **comuni**.

La modalità RTK richiede l'inizializzazione del rilievo per stimare le ambiguità intere. Allo scopo viene utilizzata la tecnica **OTF** in quanto consente di risolvere l'ambiguità anche durante il movimento del Ricevitore.

*Per tale motivo la modalità RTK può essere eseguita solo disponendo di ricevitori a doppia frequenza, gli unici dotati dell'opzione OTF.*

## Errori nel posizionamento in RT

Benchè il posizionamento differenziale in tempo reale consenta di ottenere già in campagna, per le posizioni via via occupate, coordinate corrette dagli errori di orologio, orbita e atmosfera, permane l'effetto di altri fattori di errore, tra cui:

- **Visibilità e Multipath:** per ottenere buoni risultati devono essere visibili almeno 5 Sv. Ostruzioni del segnale GPS dovute ad alberi, edifici o altro possono degradare le precisioni ottenibili.
- **Lunghezza della base** master-rover: quanto più essa aumenta tanto meno correlate spazialmente risultano le osservazioni fatte sui medesimi Sv dai due Rc. Risulta sempre più difficile ridurre il disturbo ionosferico con brevi tempi di osservazione su grandi distanze.

(Indicativamente: **15 ÷ 20 km** per la fase, **20 ÷ 30 km** per codice)

- **Interferenze nella trasmissione radio:** master e rover devono mantenere costantemente il collegamento radio per raggiungere buone precisioni.

- **DOP:** configurazione della geometria dei satelliti osservati dal rover.
- **Durata della latenza:** quanto più essa aumenta tanto più separati nel tempo risultano gli istanti di calcolo (sul master) e di applicazione (sul rover) del dato di correzione di pseudorange, provocando un decremento nell'accuratezza del posizionamento rispetto al post-processing.

**Latenza** = differenza di tempo tra l'istante di calcolo della correzione nella stazione base e l'istante in cui viene applicata alle misure acquisite dal ricevitore remoto. Tale intervallo tiene conto dei tempi di trasmissione, calcolo, ecc.

- **Precisione relativa:**  
(baseline master-rover)

**3 ÷ 5 cm (RTK)    30 ÷ 50 cm (DGPS)**

- **Precisione assoluta:** l'accuratezza finale delle coordinate assolute delle posizioni occupate dall'unità rover dipende da quella assoluta delle coordinate (note a priori) della stazione master.

## Post-Processamento vs. Tempo Reale

### POST-PROCESSAMENTO

- **PRO :**

- Ridondanza osservazioni  $\Rightarrow$  verifica qualità risultati
- Accuratezza elevata  $\Rightarrow$  applicazioni "esigenti" come monitoraggio, ...
- I ricevitori non devono comunicare tra loro  $\Rightarrow$  assenza di costi e problemi di comunicazione

- **CONTRO :**

- Tempi di esecuzione lunghi
- Elaborazione in ufficio
- Soluzione NON immediata  $\Rightarrow$  esito delle misure noto **DOPO** l'elaborazione

## TEMPO REALE

### ▪ **PRO :**

- Tempi di esecuzione brevi
- No elaborazione in ufficio
- Immediatezza delle soluzioni  $\Rightarrow$  esito misure noto direttamente in campagna
- Accuratezza soddisfacente, adeguata per molte applicazioni

### ▪ **CONTRO :**

- Possibilità di problemi nelle comunicazioni base-rover o rete-rover
- Costi per il collegamento telefonico se si utilizza GSM-GPRS
- Costi per i servizi delle reti dinamiche (stazioni permanenti)

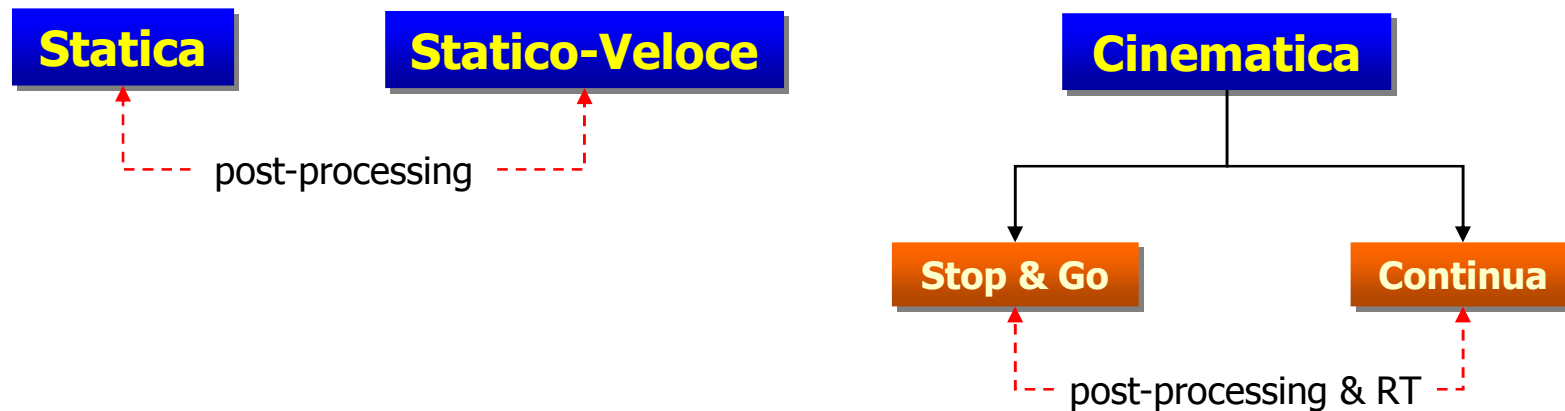
# *Procedure di rilevamento*

## Introduzione

Un rilievo GPS viene caratterizzato dalla combinazione di due elementi:

- modalità secondo cui vengono determinate le coordinate di posizione (**PP** o **RT**);
- procedura operativa di acquisizione dei dati sul campo.

In particolare un rilievo GPS può essere eseguito secondo le seguenti 3 procedure operative principali:





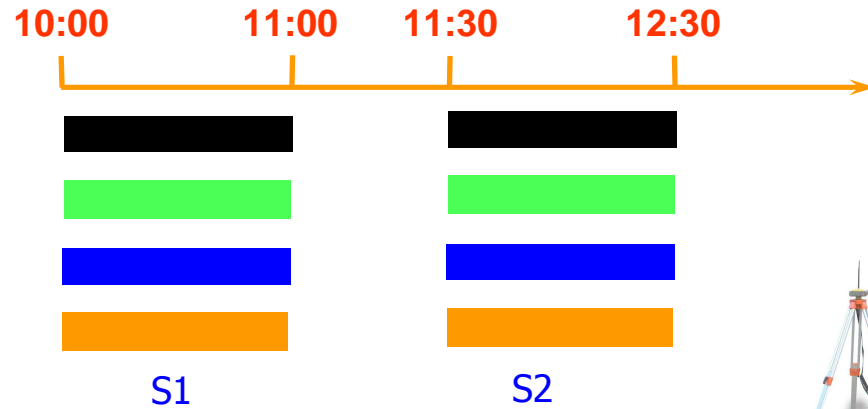
## Modalità STATICA

Fornisce la **massima precisione** (subcentimetrica), ma anche la **più lenta**, a causa dei lunghi periodi in cui i ricevitori vengono lasciati in acquisizione.

- Esecuzione **contemporanea** delle osservazioni su due o più stazioni su cui i ricevitori restano fissi per tutta la durata della sessione;
- Le misure acquisite consentono di determinare la **baseline** tra le due stazioni;
- Procedura eseguibile sia con Rc monofrequenza che doppia frequenza;
  - Rateo di acquisizione: **5 ÷ 30 sec**
  - Lunghezza delle basi: **10 ÷ 30 km**
  - Precisione (planimetrica): **5 ÷ 10mm + 1 ppm** (se L1 o L1 + L2)

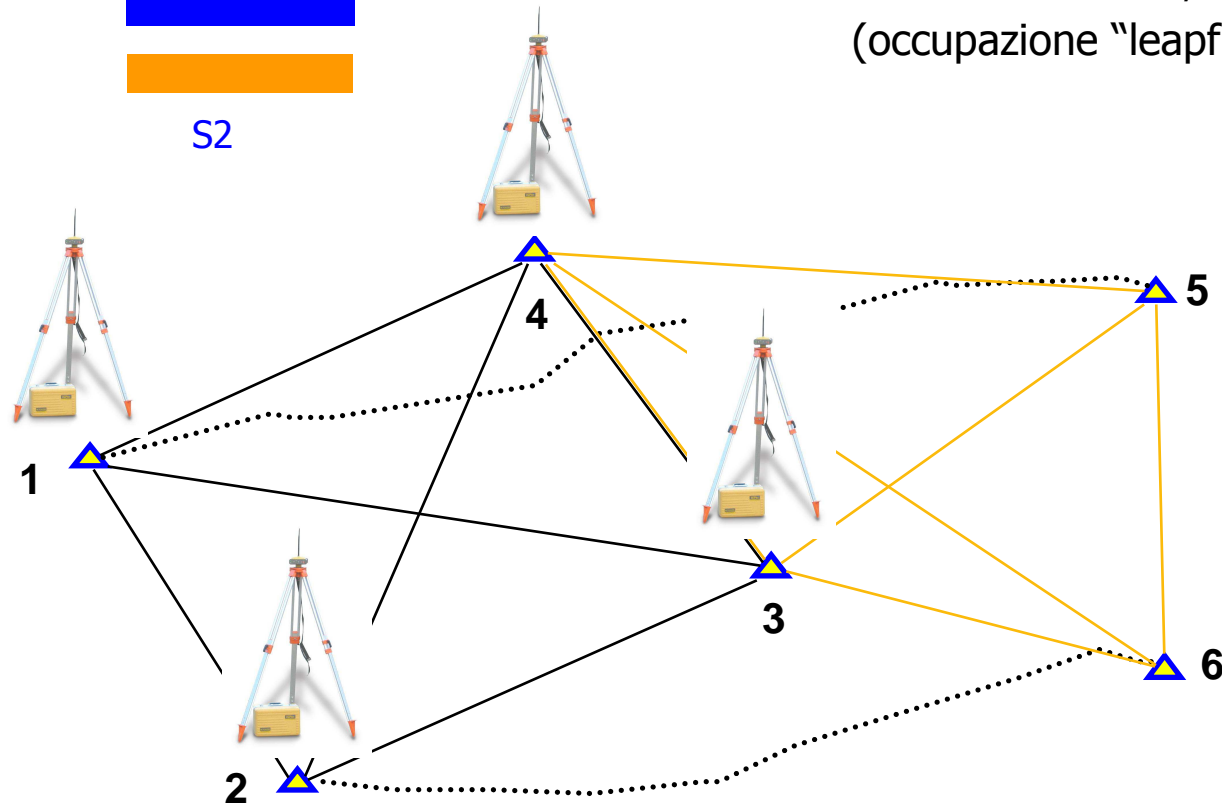


## Esempio di rilievo Statico



### Schema "Classico"

- 4 Ricevitori, 6 vertici, 2 sessioni
- Sessione 2: 1 va su 5, 2 va su 6 (occupazione "leapfrog")



Parametri di progetto indicativi per sessioni di misura **statiche**  
(ricevitori a doppia frequenza)

L (km)	durata sessione (min.)	intervallo di campionamento (s)	accuratezza	
			a (mm)	b (p.p.m.)
0-1	10	5	3	1
	30	10	2	1
1-5	20	5	3	1
	60	10	2	1
5-10	30	5	3	1
	60	20	2	0.5
10-30	40	10	3	1
	90	30	2	0.5
30-50	120	30	2	0.5
50-100	180	30	2	0.3
> 100	> 240	30	2	0.2

Accuratezza baseline:  $a + b \cdot L$

## Modalità STATICO - VELOCE (*Fast static*)

Utilizzata per il posizionamento differenziale PP, rispetto alla modalità statica richiede tempi di stazionamento **più brevi**.

Il tempo di occupazione varia tra **5** e **20 min.** e dipende dai seguenti fattori:

- lunghezza della base,
- configurazione satellitare (PDOP)
- tipo di ricevitore usato (L1 o L1+L2);

Come termini di riferimento, si possono considerare i valori della seguente tabella:

(PDOP < 7)

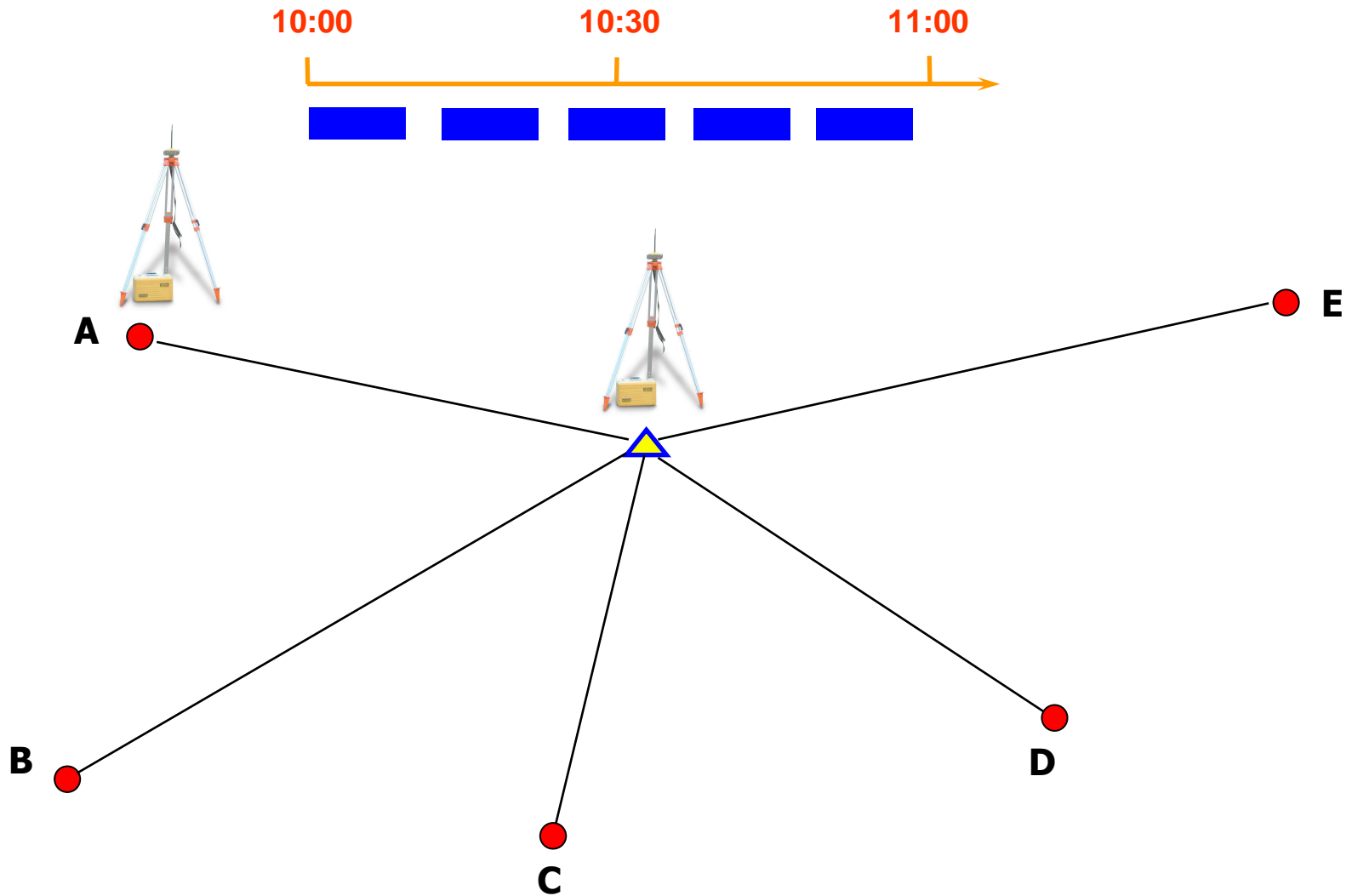
Numero di satelliti	Tempo di osservazione (minuti)	
	L1	L1 + L2
4	30 min	15 - 25 min
5	25 min	10 -15 min
> 6	20 min	5 - 10 min

- Richiede l'impiego di **due** ricevitori: uno in posizione fissa (**stazione master**) ed uno che si sposta sui vari punti da battere (**rover**);
- Durante gli spostamenti **non** è necessario mantenere l'aggancio con i satelliti;
- Procedura caratterizzata da **minore accuratezza**, ma **maggiore produttività** (numero di punti battuti) rispetto alla procedura statica (relativa);
- Modalità impiegata prevalentemente per il rilievo di punti di sottorete o di raffittimento, per i quali è richiesta una precisione inferiore rispetto a quella propria della modalità statica.



- Rateo di acquisizione: **10 ÷ 15 sec**
- Lunghezza delle basi: **< 10 ÷ 15 km**
- Precisione (planimetrica): **10 mm + 1 ppm**

## Schema di rilievo fast -static



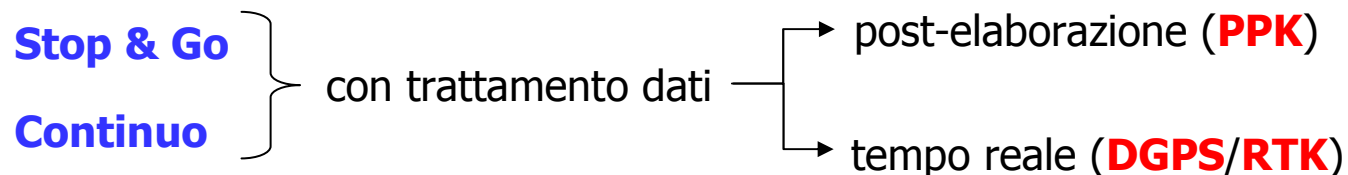
## Procedura CINEMATICA

Similmente alla modalità fast-static, presuppone l'impiego di **almeno due ricevitori**: uno fisso su un punto di coordinate note a priori con elevata accuratezza (**stazione master**) ed un secondo che si muove da un punto all'altro effettuando osservazioni per brevi periodi di tempo (**rover**).

Le principali differenze rispetto alla modalità fast-static sono le seguenti:

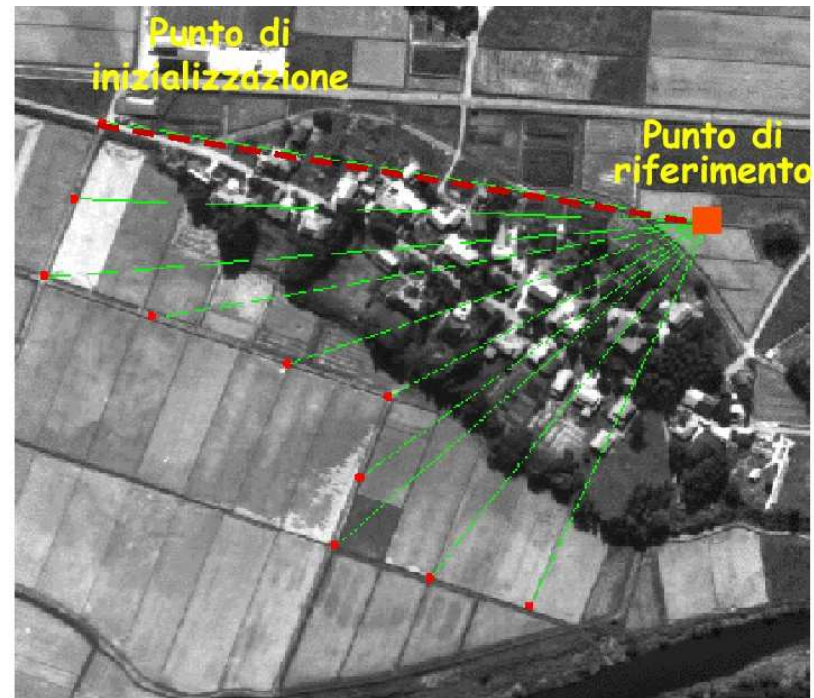
- **minore tempo** di stazionamento sul punto
- **minore precisione** di posizionamento ottenibile.
- **maggiore produttività**, i dati possono essere raccolti dai vari ricevitori anche mentre l'unità rover si sposta da un punto all'altro.

Un rilievo cinematico può essere eseguito in due modi distinti:



## Stop & Go

- Il ricevitore rover, una volta giunto sul punto incognito vi resta fermo per un breve tempo (< **60 sec**), dopodichè si sposta sul punto successivo.
- Durante gli spostamenti tra un punto e l'altro è necessario osservare con continuità **almeno 4 Sv.**
- Questa modalità è utilizzata tipicamente per applicazioni GIS o rilievi di dettaglio.





## Continuo

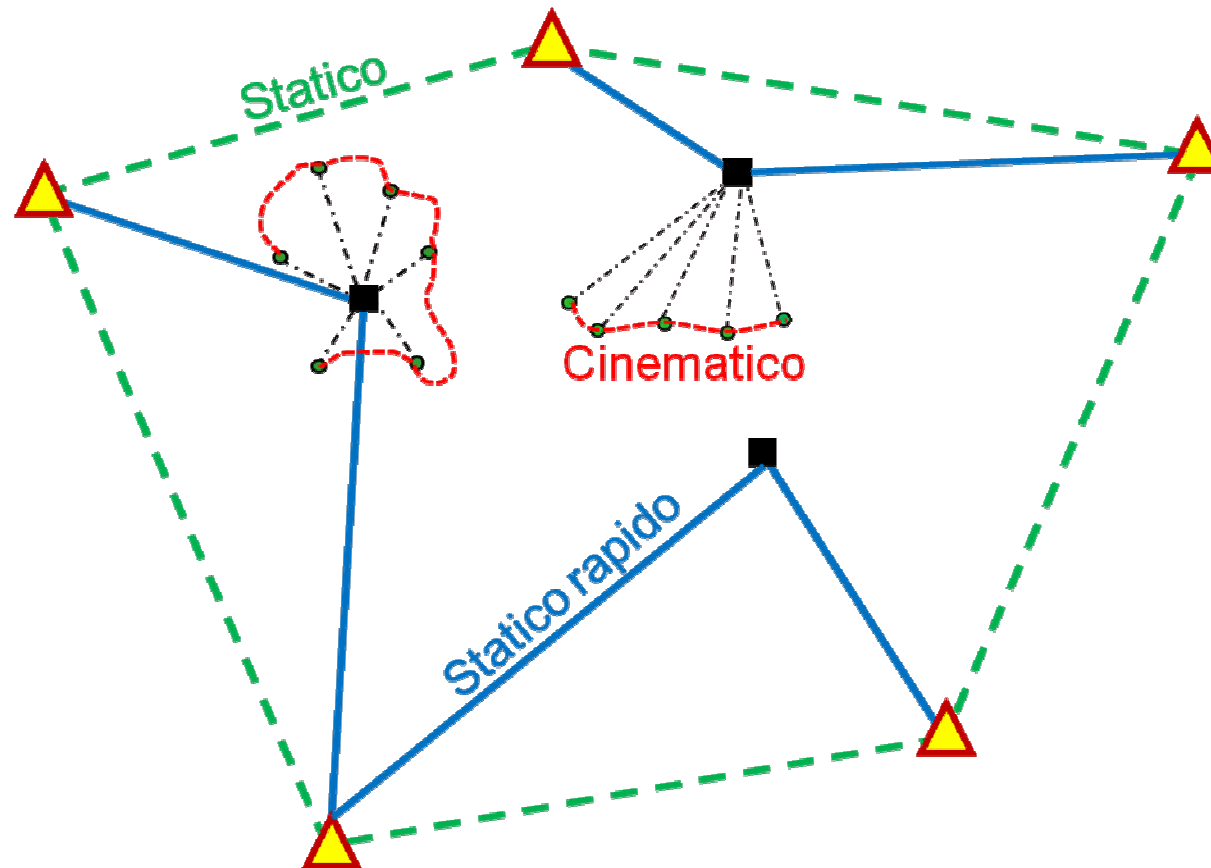
- La posizione del R<sub>c</sub> rover viene determinata **continuamente** mentre esso si muove.
- Poiché ad ogni epoca il rover occupa un punto diverso dal precedente, sia con osservazioni di fase che di codice è indispensabile mantenere l'aggancio con **almeno 4 Sv** per tutta la durata della sessione.
- Tale procedura può essere utilizzata per il rilevamento di profili, sezioni, modelli digitali del terreno ed anche per determinare la posizione di un veicolo in moto (4 Sv e altezza antenna costante).



## **Considerazioni:**

1. Per poter applicare la correzione differenziale (in *PP* e *RT*) è necessario che master e rover osservino almeno 4/5 satelliti comuni **per tutta la durata del rilievo.**
  
2. Dato il breve tempo di stazionamento sul punto (da 1 sec ad alcuni sec.), i fattori che maggiormente influenzano la precisione dei rilievi cinematici sono i seguenti:
  - numero di Sv disponibili al momento della misura
  - geometria satellitare (GDOP, PDOP)
  - lunghezza della base tra rover e master
  - ricevitore usato (L1 o L1 + L2)
  - presenza di multipath

Le tre modalità operative descritte possono essere usate in combinazione in modo da definire una prima rete di **inquadramento** di alta precisione da cui derivare poi vertici di sottoreti da utilizzare per successivi rilievi di **dettaglio**.



## Confronto tra le procedure di rilevamento

Metodo	Durata	Lungh. basi	Precisione	Rateo (s)
STATICO	30 min – 1 h	10 km	$10^{-6} - 10^{-8}$	5 - 10
	3 – 4 h	20 – 30 km	$10^{-6} - 10^{-8}$	15 – 60
FAST-STATIC	20 – 30 min (L1)	10 – 15 km	$10^{-6}$	5 – 15
	6 – 8 min (L1+L2)	10 – 15 km	$10^{-6}$	5 – 15
STOP AND GO	< 1 min	< 10 km	cm (L1+L2)	1 – 5
	< 1 min	< 10 km	dm (L1)	1 – 5
CONTINUO	Continuo	< 10 km	cm (L1+L2)	1 – 5
	Continuo	< 10 km	dm (L1)	1 – 5

# *Tipologie di ricevitori GNSS*

Una classificazione dei ricevitori GPS può essere fatta in base alle misure che sono in grado di acquisire.

E' così possibile distinguere **4 categorie**:

- Ricevitori a misura di solo codice (C/A);
- Ricevitori singola frequenza (C/A, L1);
- Ricevitori doppia frequenza – codice P (C/A, L1, L2, P);
- Ricevitori doppia frequenza – codice Y

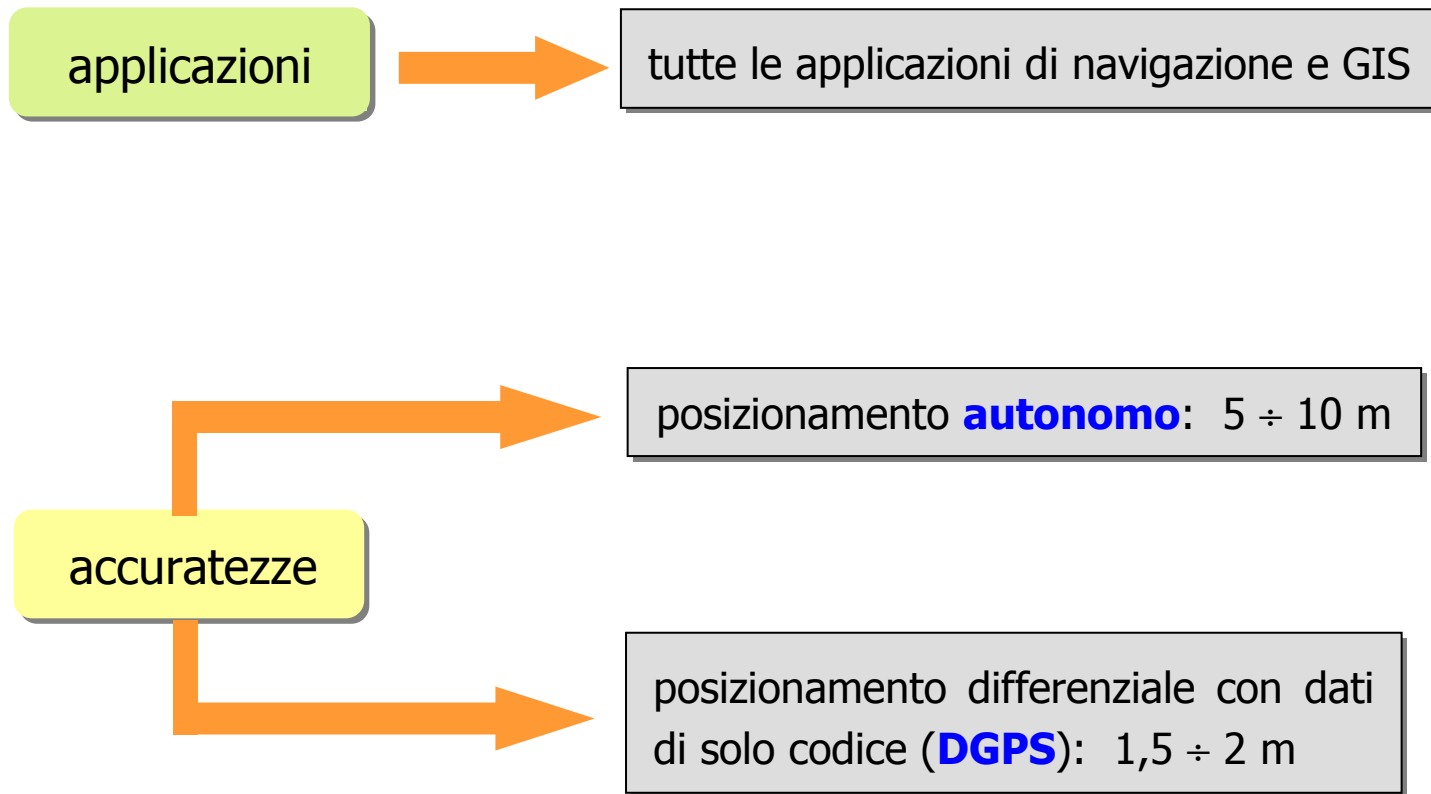
Vanno considerate anche altre caratteristiche accessorie, quali:

- possibilità di eseguire misure cinematiche in tempo reale (**RTK, DGPS**);
- possibilità di memorizzare i dati grezzi delle osservazioni di codice e fase;
- possibilità di collegamento con altri sensori (**PPS, Event marker**);
- fornire dati in uscita in formati standardizzati (**NMEA, RINEX**);
- caratteristiche del firmware (es. reiezione multipath);
- possibilità di acquisire i satelliti del sistema russo **GLONASS**.

## Singola o doppia frequenza ?

- Ricevitori a doppia frequenza consentono di eliminare i ritardi ionosferici (errore di misura) ottenendo precisioni di misura maggiori.
- Il ritardo ionosferico costituisce un problema per baseline  $> 20 \div 30$ km.
- Osservazioni in singola frequenza sono più adeguate per baseline corte.
- Strumenti in doppia frequenza sono molto più costosi dei ricevitori monofrequenza.
- Strumenti in doppia frequenza sono essenziali per l'elevata produttività fornita nei rilievi di tipo rapido statico, "stop & go" e cinematico (PP e RT) per le migliori capacità di risolvere l'ambiguità intera (es. opzione OTF).

## Ricevitori solo codice







**Garmin Nuvi 260w**



**Garmin Oregon 550T**



**Garmin GPSmap 60**



**Tom Tom 260 XL**



**Apple iPhone**

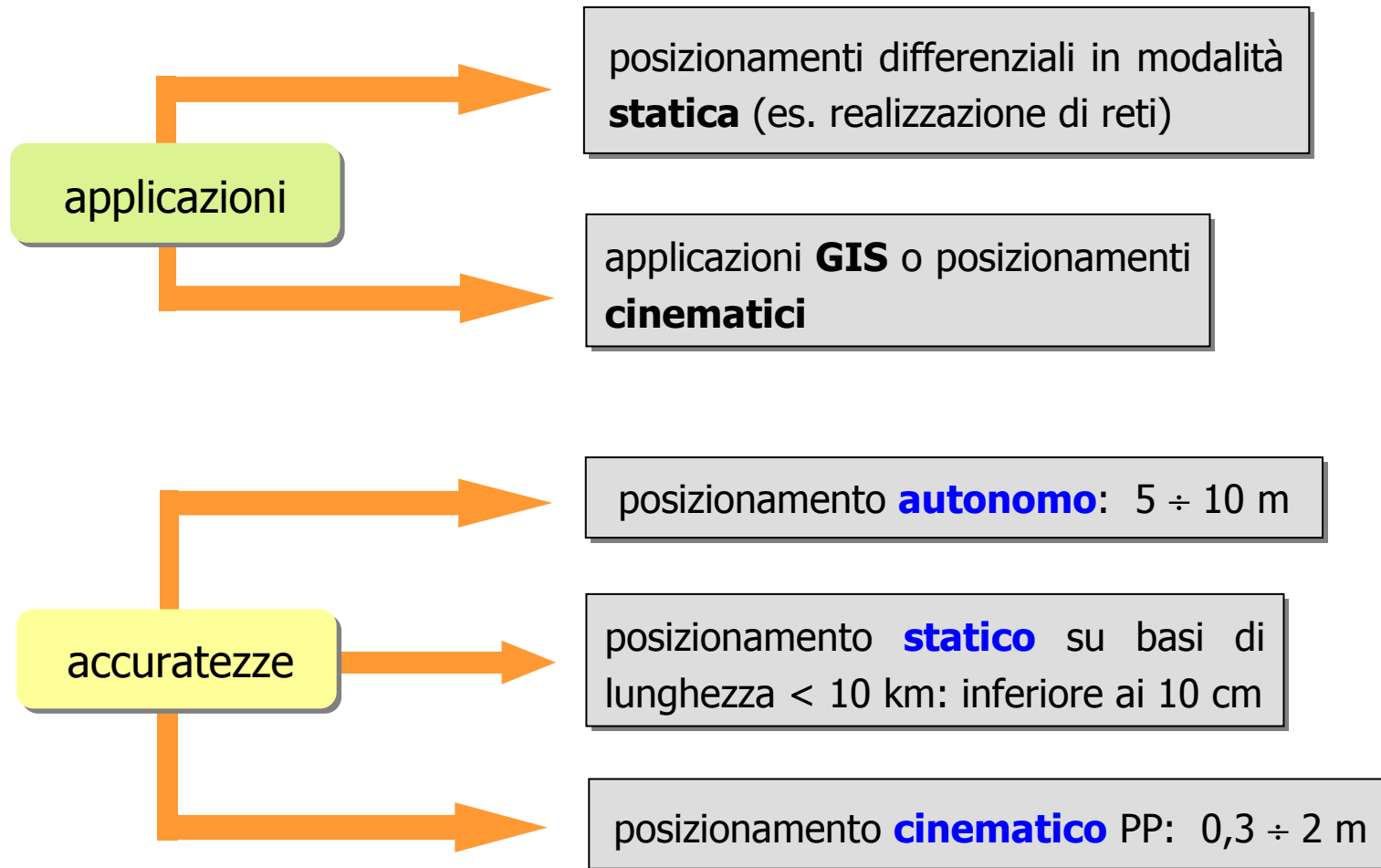


**Nokia 6110**



**Magellan Explorist 500 LE**

## Ricevitori singola frequenza (L1)





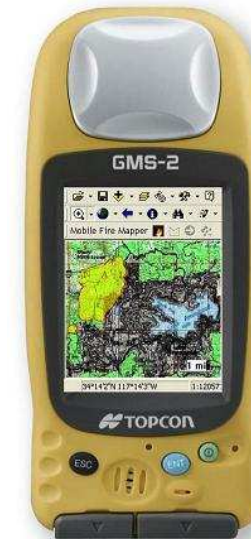
**Ashtech**  
Mobile Mapper CX



**Javad**  
GISmore



**Leica**  
Zeno 15



**Topcon**  
GMS2



**Spectra**  
Epoch 10

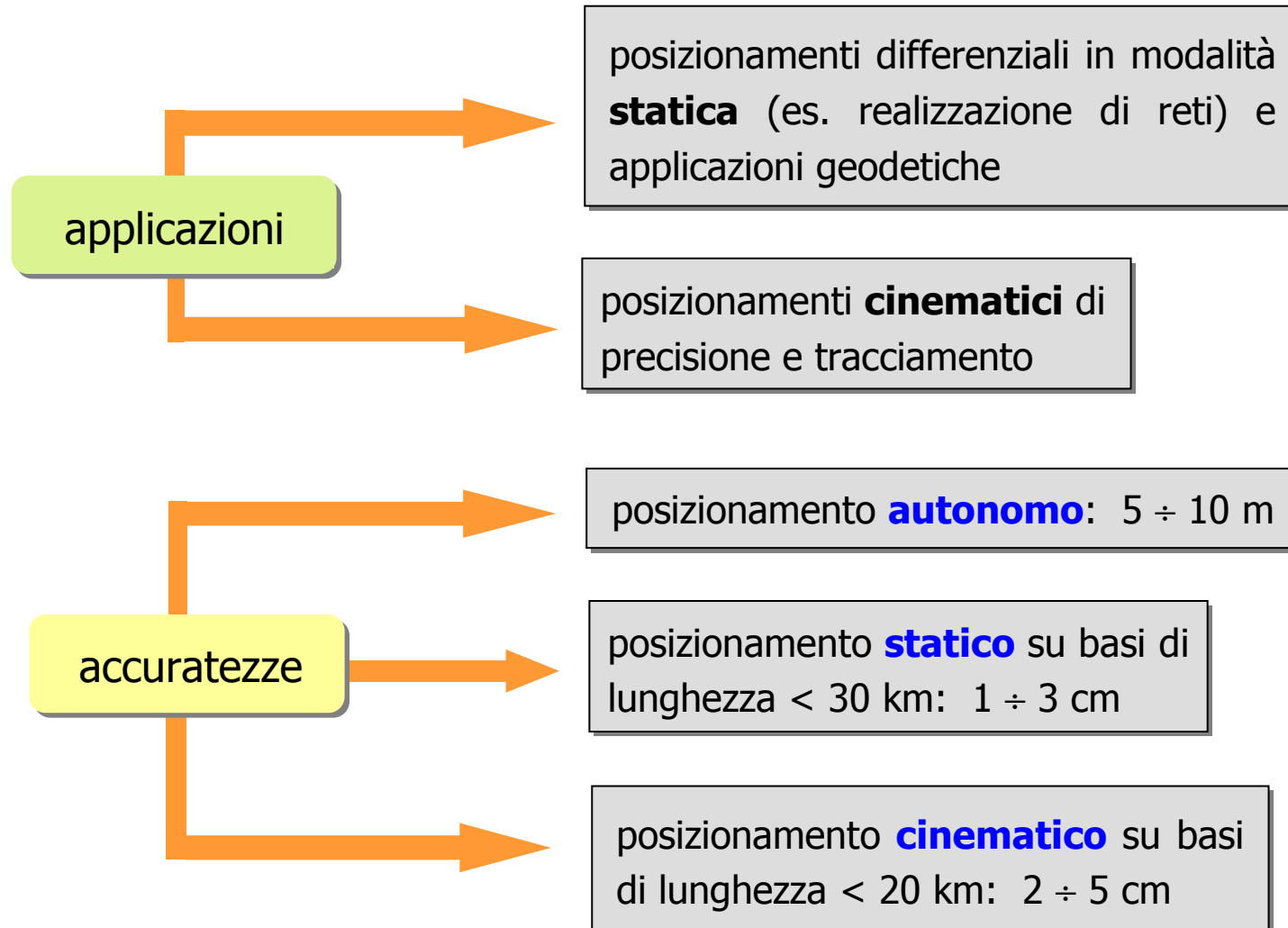


**Trimble**  
Geo XM

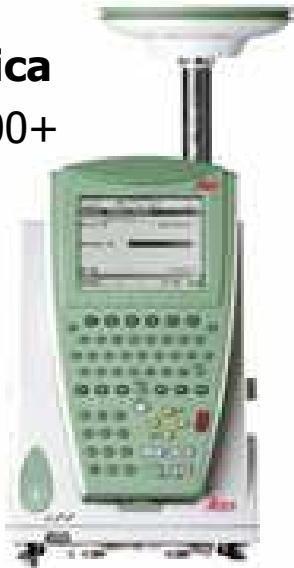


**Sokkia**  
GRS 1600

## Ricevitori doppia frequenza (L1+L2)



**Leica**  
1200+



**Trimble**  
R8



**Topcon**  
Hiper II



**Topcon**  
GRS-1



**Ashtech**  
ProMark 500



**Sokkia**  
GRS 2700IS



**Novatel**  
FlexPack G2



**Novatel** DL3

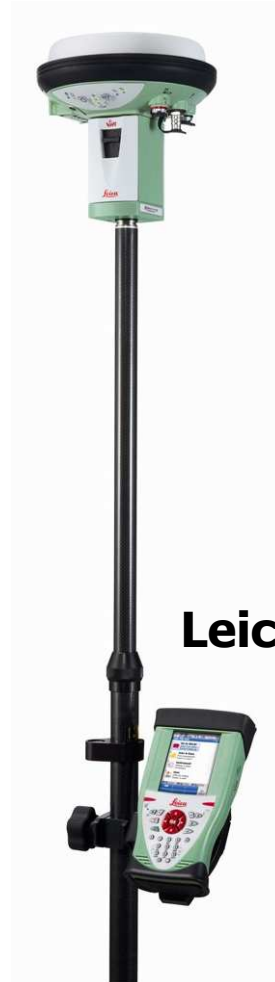


**Javad**  
Triumph 1

## Strumentazione per rilievi cinematici PP & RTK



**Topcon**



**Leica**



**Ashtech**



**Trimble**