

GPS

nuove tecnologie di
posizionamento



Sistemi GNSS

Esistono attualmente due sistemi di posizionamento via satellite:

- il sistema USA **Navstar GPS** (sistema rif. WGS84)
- il sistema Russo **Glonass** (sistema rif. PZ90)
- il sistema Europeo **Galileo** è in fase di attuazione (sistema rif. GTRF).

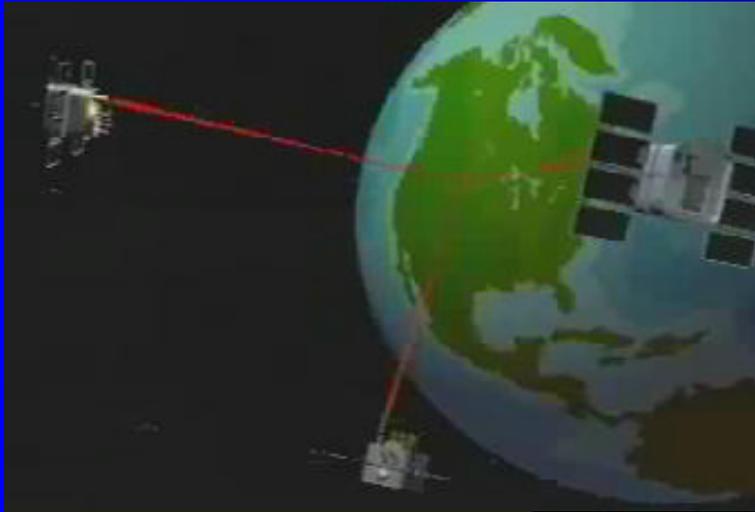
In generale si parla quindi di posizionamento **GNSS**:
Global Navigational Satellite System (75 satelliti nel 2012 con 20 in vista).

Attualmente l'unico sistema completo ed operativo è il **Navstar GPS**:
è basato sull'emissione di segnali elettromagnetici emessi dalla
costellazione di satelliti artificiali.

I segnali acquisiti dai ricevitori GPS, servono a calcolare la posizione dell'
antenna ricevente.

Il sistema GPS è costituito da 3 parti

Segmento SPAZIALE



Segmento di CONTROLLO

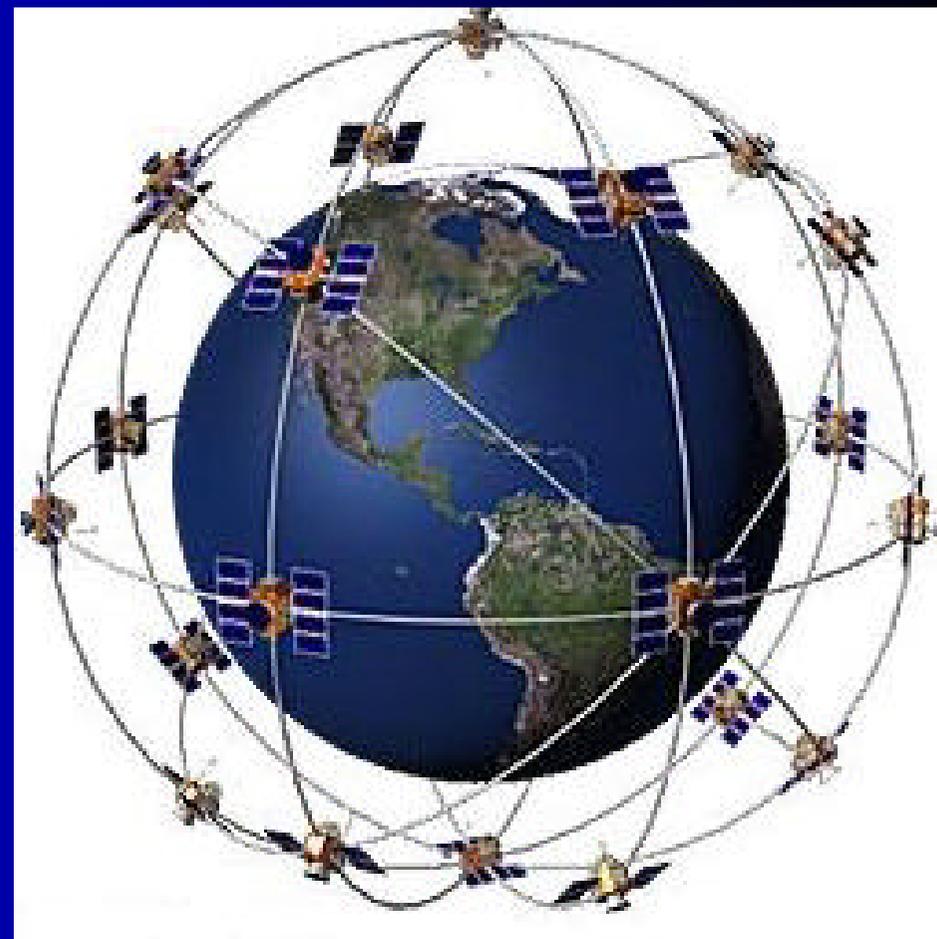


Segmento UTENZA

SOKKIA

Il segmento spaziale

- 24 satelliti orbitanti + 3 di riserva (attualmente 29)
- Orbite circolari su 6 piani orbitali inclinati di 55° sul piano equatoriale
- 4 satelliti equidistanti su ogni orbita
- Altezza orbitale 20.200 Km
- Periodo di rivoluzione 11 ore 58 minuti



Il segmento di controllo

- Costituito 4 stazioni di monitoraggio a terra + 1 stazione master



- Le stazioni trasmettono le effemeridi, la correzione degli orologi, ecc.

Il segmento utenza

- Utenza per la navigazione area, marittima e terrestre



- Utenza per applicazioni geodetiche e topografiche

Segnali trasmessi dai satelliti

- ✍ I segnali trasmessi contengono varie informazioni tra le quali la posizione spaziale dei satelliti "effemeridi"
- ✍ L'altezza orbitale di 20.200 Km:
 - rende il moto dei satelliti stabile
 - in assenza di attrito atmosferico
 - garantisce la copertura terrestre
- ✍ Il controllo del tutto è effettuato dal DoD (Department of Defense):
 - ogni satellite passa sul territorio americano una volta al giorno
 - il DoD trasmette le correzioni d' orbita

Struttura del segnale

- Due frequenze portanti su banda L (frequenza generata dagli orologi a 10.23MHz):

L1	1575.42 Mhz, lungh. 19cm	($l = c/f$)
L2	1227.60 Mhz, lungh. 24cm	

- Sulle frequenze L1 e L2 sono modulati tre codici:

Due codici per la determinazione approssimata della distanza

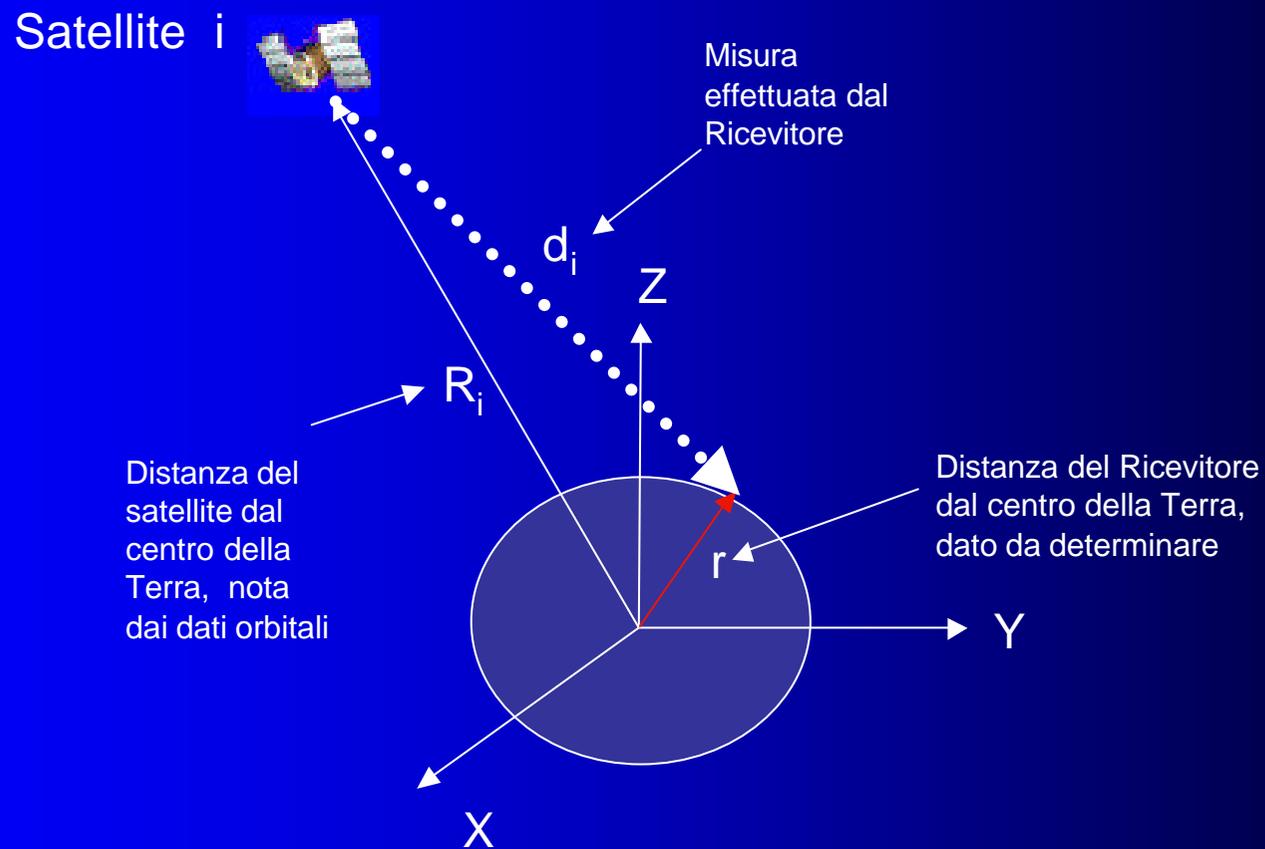
C/A	solo su L1, freq. 1023 Mhz, lungh. (293m)
P	su L1 e L2, freq. 10.23 Mhz lungh. (29.3m)

il 31/01/1994 il codice P è stato criptato in codice Y (Anti-Spoofing),
prossimamente saranno trasmessi altri due codici su L2

- Un messaggio "NAVDATA" su L1 e L2: dati di correzione orbite e orologi, ecc.

La misura con il GPS

- I ricevitori GPS misurano le pseudo distanze antenna-satellite



Tipi di misura GPS

Le misure possono essere di 2 tipi:

pseudorange : distanza ottenuta misurando il tempo trascorso tra la partenza del **codice** dal satellite e la ricezione da parte del ricevitore

fase : distanza calcolata misurando il ritardo tra la fase portante trasmessa dal satellite e la sua ricezione a terra. In questo caso è necessario conoscere il numero intero di lunghezze d'onda comprese fra il satellite ed il ricevitore al momento iniziale della misura (ambiguità di fase).



Misura di pseudorange

- si misura il tempo di propagazione del segnale, necessario per coprire lo spazio esistente tra il ricevitore e il satellite
- si moltiplica il tempo di propagazione per la velocità della luce:
Tempo (sec) x 300.000.000 = Pseudorange (m)
- la misura del tempo richiede una buona precisione, inoltre si deve conoscere l'istante in cui il segnale è stato trasmesso
- occorre quindi un ottimo orologio (un errore di un nanosecondo nella misura del tempo comporta un errore di posizione di 300m)

Misura di fase

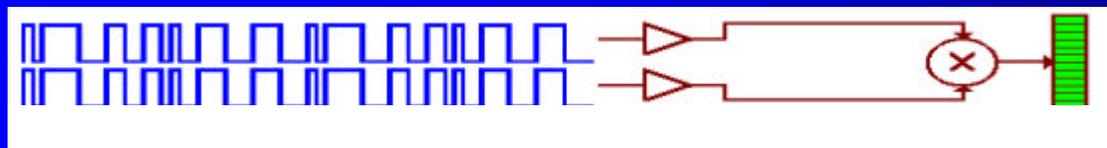
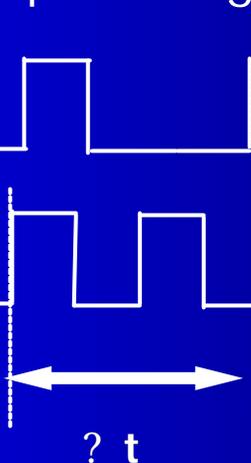
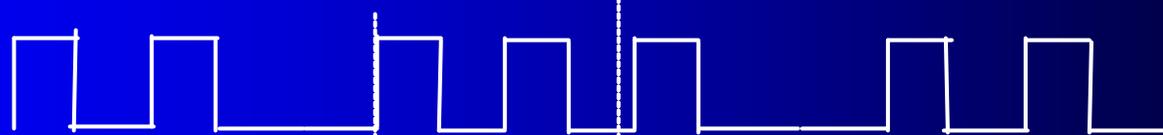
Determinazione dell'istante di emissione del segnale:

- si genera sul ricevitore lo stesso codice generato dai satelliti
- si sincronizza l'orologio del ricevitore con quello dei satelliti
- satelliti e ricevitori generano lo stesso codice nello stesso istante
- si compara il codice ricevuto con quello generato, lo sfasamento determina il ritardo (tempo di viaggio dal segnale)

Dal satellite



Sul ricevitore



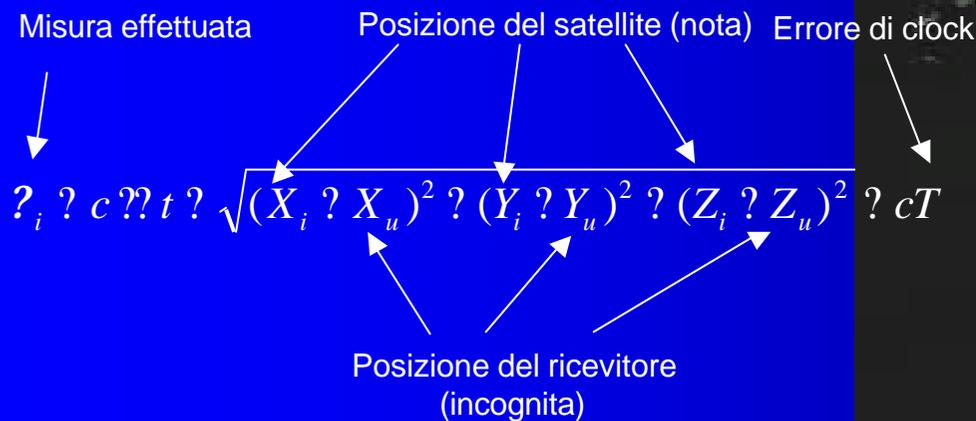
Differenza di tempo tra la stessa porzione di codice

Misura del tempo

- Per la misura del tempo con elevata precisione si utilizzano orologi atomici, gli orologi dei satelliti e del ricevitore devono essere sincronizzati
- I satelliti hanno quattro orologi atomici a bordo, precisi ma costosi
- I ricevitori utilizzano un orologio al quarzo:
grazie all'informazione data dal quarto satellite, si sincronizza l'orologio del ricevitore e si risolve l'incognita TEMPO

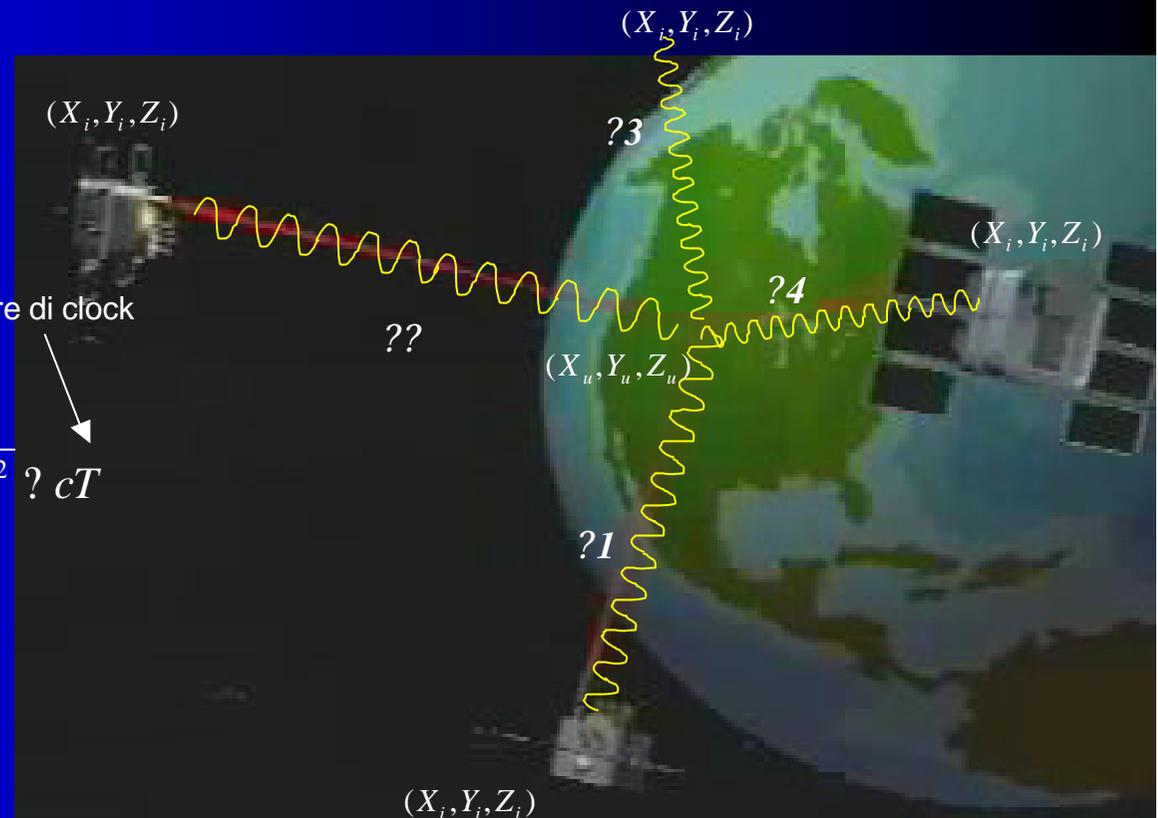
Determinazione della posizione con il GPS

- La posizione a terra è determinata per trilaterazione, derivata dalla posizione nota dei satelliti
- Occorre apportare delle correzioni per ridurre le imprecisioni di misura



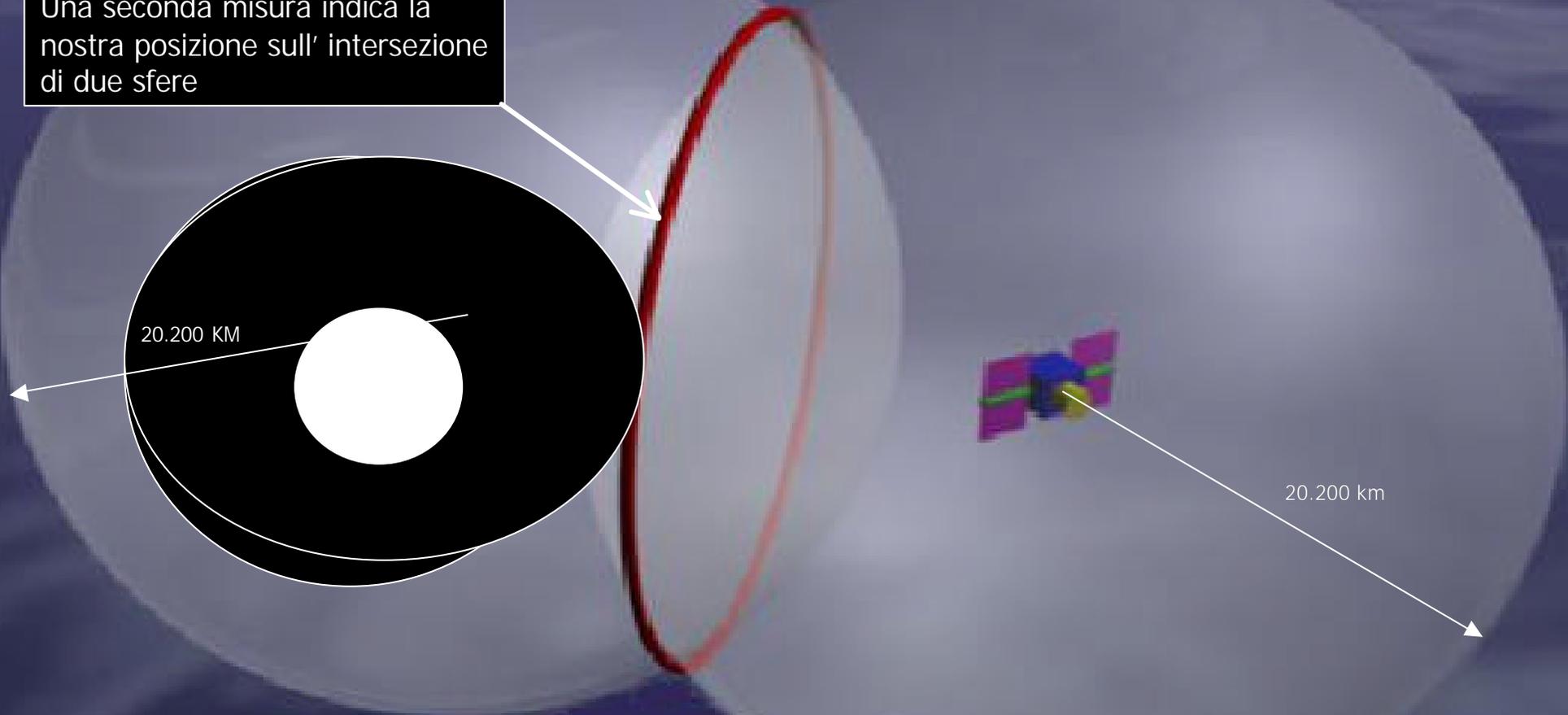
C = velocità di propagazione delle onde

t = tempo di percorrenza del segnale dal satellite al ricevitore (misure di codice o di fase)



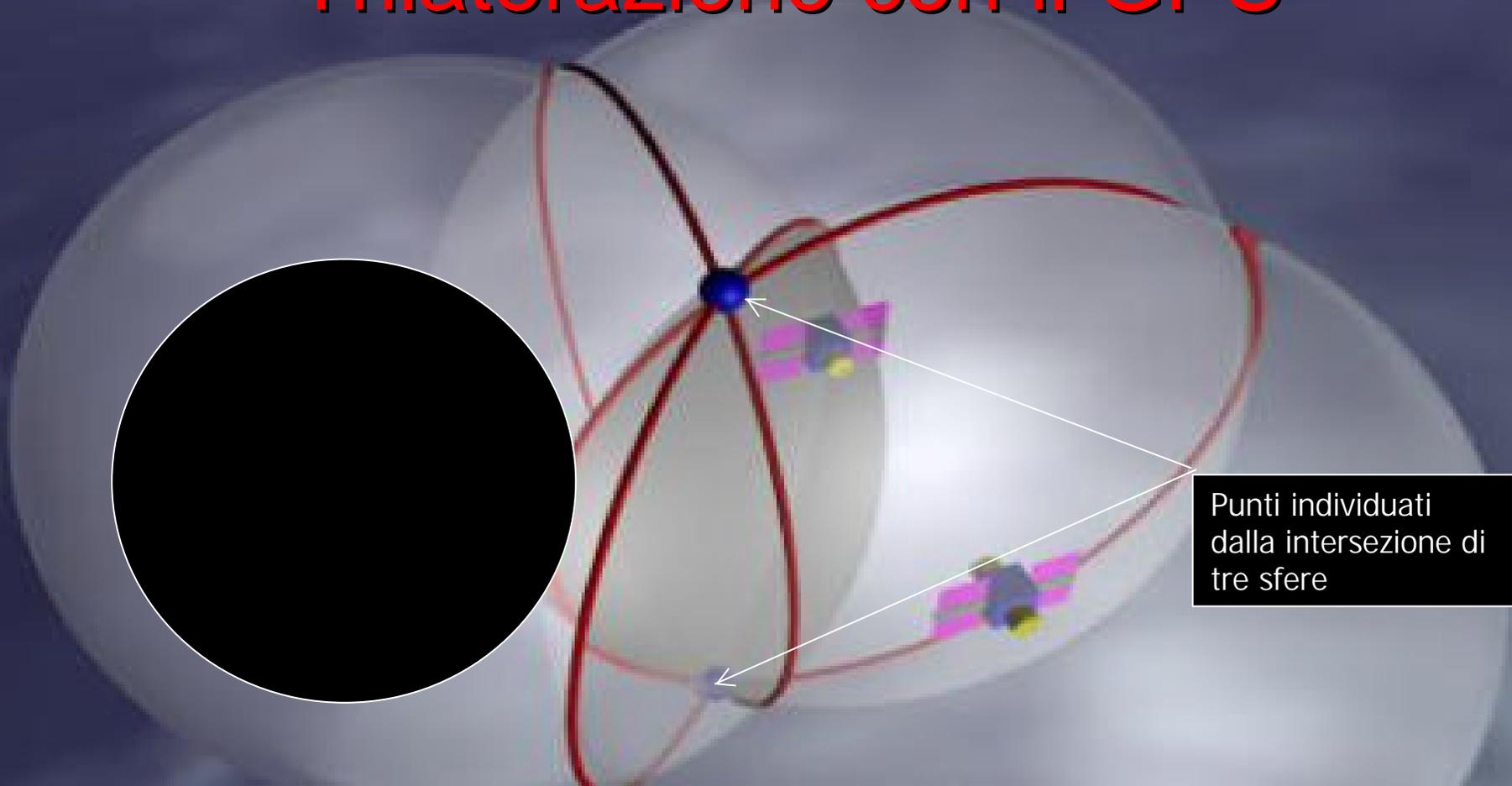
Trilaterazione con il GPS

Una seconda misura indica la nostra posizione sull' intersezione di due sfere



Una sola misura di distanza da 1 satellite, individua la nostra posizione ovunque sulla superficie di una sfera.

Trilaterazione con il GPS



Una terza misura individua solo due punti

Una quarta misura toglie ogni dubbio, quattro misure identificano un solo punto

Trilaterazione con il GPS

- 📶 In teoria tre misure sono sufficienti
- 📶 Uno dei due punti viene eliminato perché assurdo (si trova nello spazio)
- 📶 Serve un quarto satellite perché i parametri da determinare sono 4:
la posizione del ricevitore (X) e i suoi orologi (T), per cui sono necessarie 4 misure per risolvere l'equazione:

$$\begin{aligned} \sqrt{(X - X_{i1})^2 + (Y - Y_{i1})^2 + (Z - Z_{i1})^2} &= cT \\ \sqrt{(X - X_{i2})^2 + (Y - Y_{i2})^2 + (Z - Z_{i2})^2} &= cT \\ \sqrt{(X - X_{i3})^2 + (Y - Y_{i3})^2 + (Z - Z_{i3})^2} &= cT \\ \sqrt{(X - X_{i4})^2 + (Y - Y_{i4})^2 + (Z - Z_{i4})^2} &= cT \end{aligned}$$

Latitudine



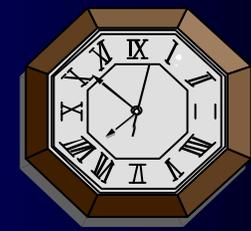
Longitudine



Quota



TEMPO !

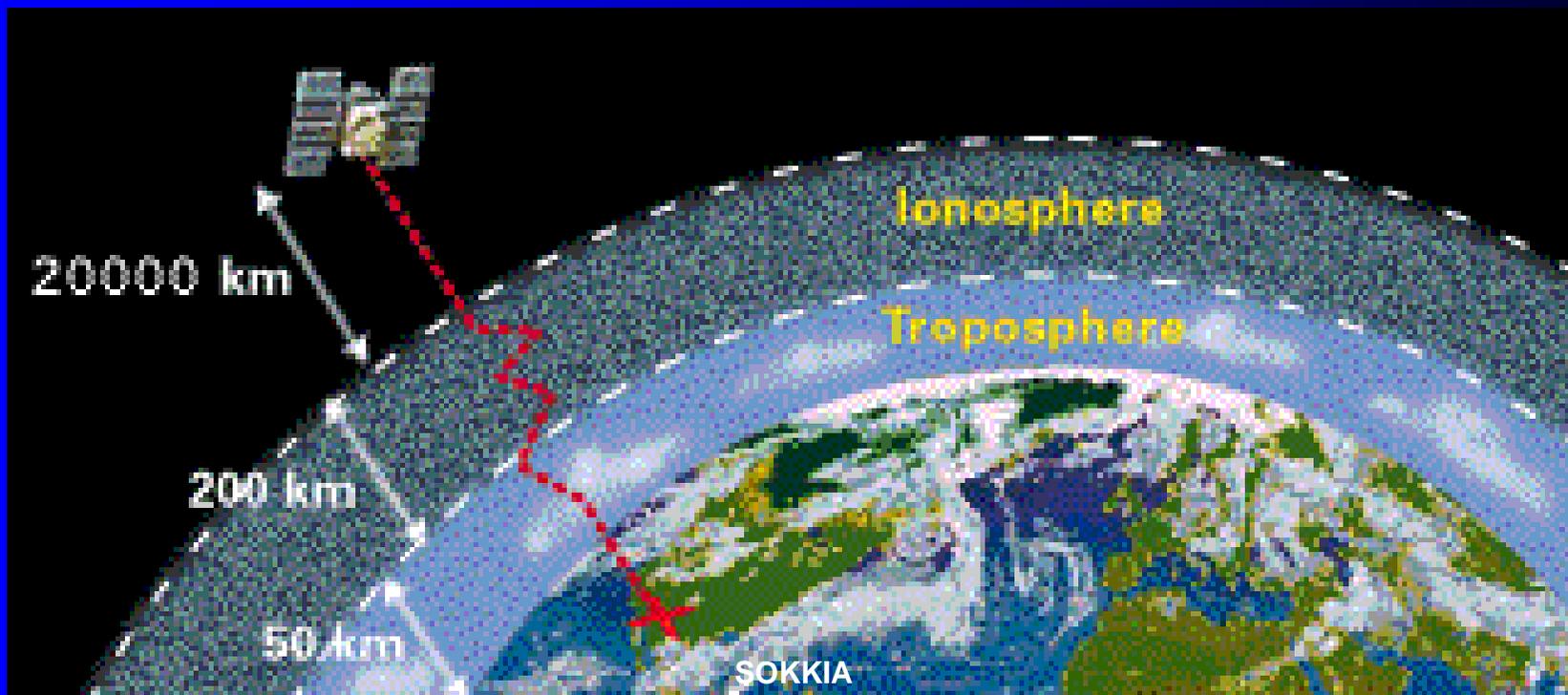


In realtà i ricevitori adottano metodi di processamento più sofisticati per stimare e correggere meglio gli errori di misura (es. Filtri di Kalman), utilizzando tutti i satelliti visibili

Disturbi di propagazione del segnale

Il segnale GPS si propaga nell' atmosfera e subisce dei disturbi:

- ✦ ionosfera (tra 80-500 Km): zona densa di particelle ionizzate, in grado di deviare le onde radio
- ✦ troposfera (tra 0-10 Km): zona dove si creano i principali fenomeni meteorologici: presenza d' acqua, variabile da zona a zona

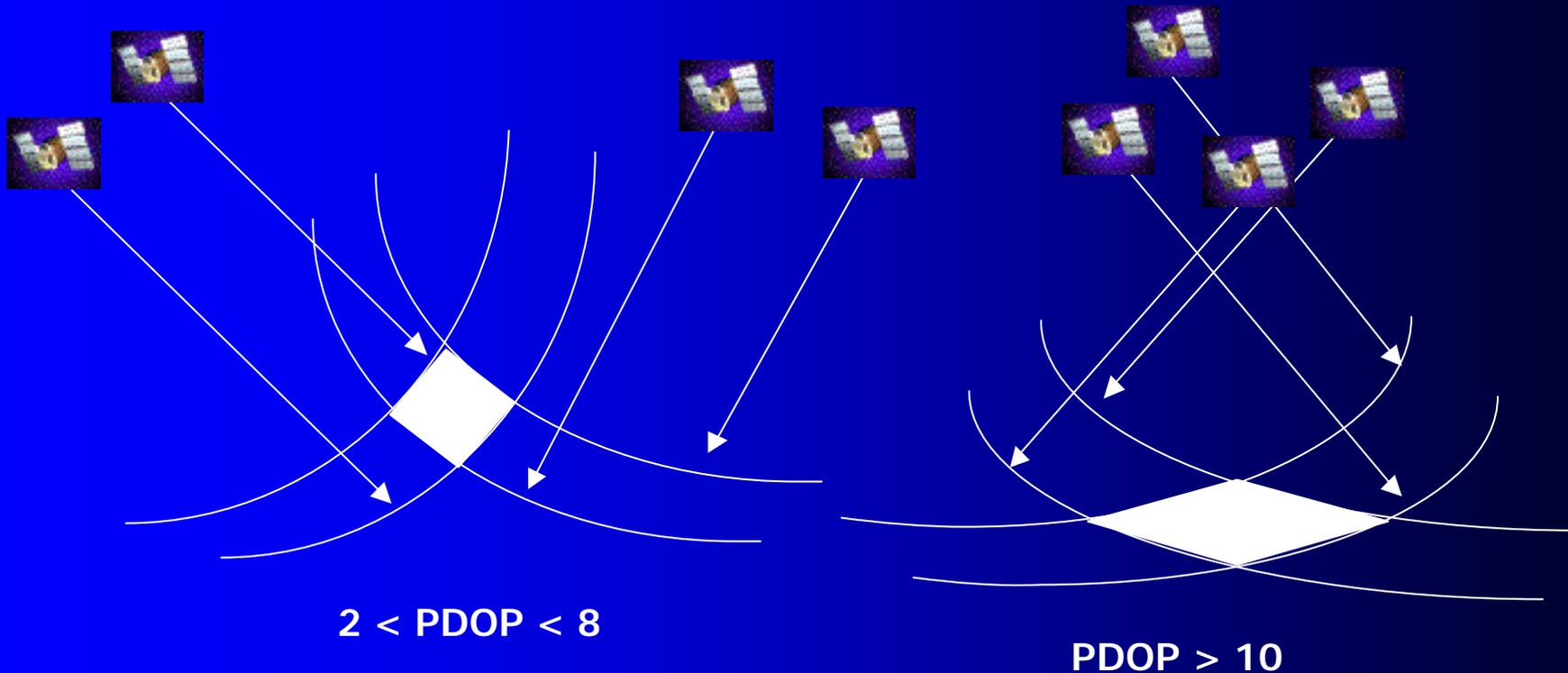


Altri fattori d'errore

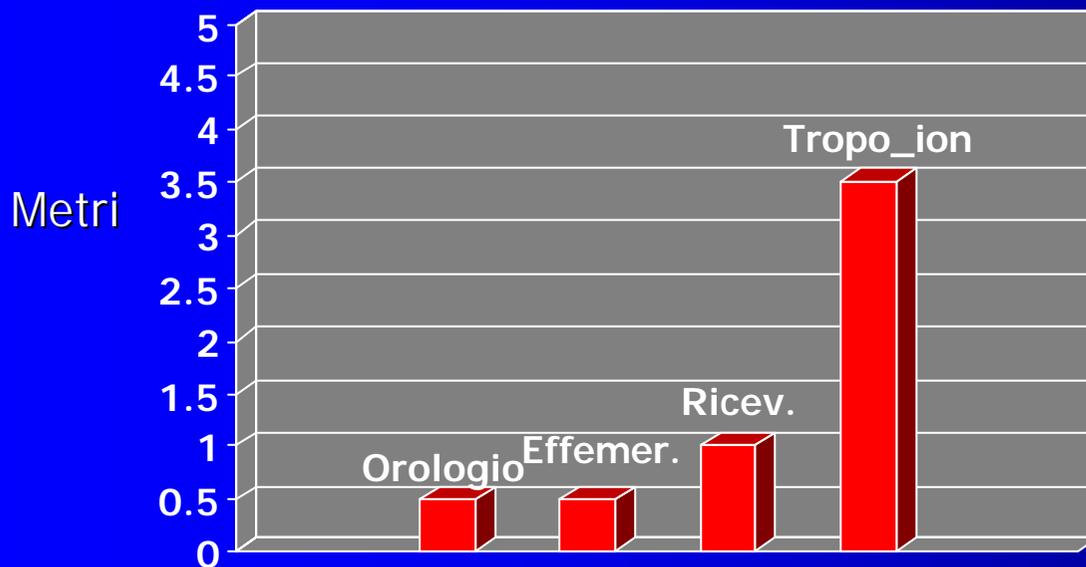
- ✦ Errori d' orologio e d' orbita dei satelliti
 - ✦ Molto piccoli e principalmente corretti dal DoD
- ✦ Errori del ricevitore
 - ✦ Problemi dovuti all' instabilità dell' oscillatore (orologio)
 - ✦ Rumorosità nelle misure introdotta dal ricevitore stesso
- ✦ Multipath (percorsi multipli)
 - ✦ Il segnale di rimbalzo da superfici riflettenti interferisce con quello diretto:
 - ricevitori ed antenne sofisticate sono in grado di attenuarlo
- ✦ DOP: la geometria (posizione relativa) dei satelliti influenza la precisione

La geometria dei satelliti (PDOP) influenza la precisione di calcolo della posizione

L' errore aumenta se i satelliti formano tra loro angoli acuti



Influenza dei singoli fattori d'errore



Errori non correlati nello spazio:

- Orologio satellite 0.5 m
- Ricevitore 1.0 m
- Multipath

Spazialmente correlati:

- Effemeridi 0.5 m
- Iono/troposfera 3.5 m

Totale (rms) 5-10 m

L'influenza della geometria PDOP porta l' errore a valori tra 5 e 15 m.

Modelli di misura

Misure di Codice

$$p \pm \lambda (d \pm c(dt \pm dT) \pm d_{ion} \pm d_{trop} \pm e_p \pm e_{mp} \pm \lambda N)$$

Misure di Fase

$$F \pm \lambda (d \pm c(dt \pm dT) \pm d_{ion} \pm d_{trop} \pm e_F \pm e_{MF} \pm \lambda N)$$

p= misura di pseudorange

F = misura di fase

λ = distanza vera tra satellite e ricevitore

d = errore di posizione orbitale

C = velocità della luce

dt = errore dell'orologio del satellite

dT = errore dell'orologio del ricevitore

d_{ion} = ritardo per attraversamento della ionosfera

d_{trop} = ritardo per attraversamento della troposfera

e_p ed e_F = errore di misura del ricevitore

e_{MP} ed e_{MF} = errore introdotto dai percorsi multipli del segnale (multipath)

N = numero di lunghezze d'onda intere ad inizio misura

λ = lunghezza d'onda della portante (circa 20 cm)

Precisione di misura della posizione

Dipende fundamentalmente da:

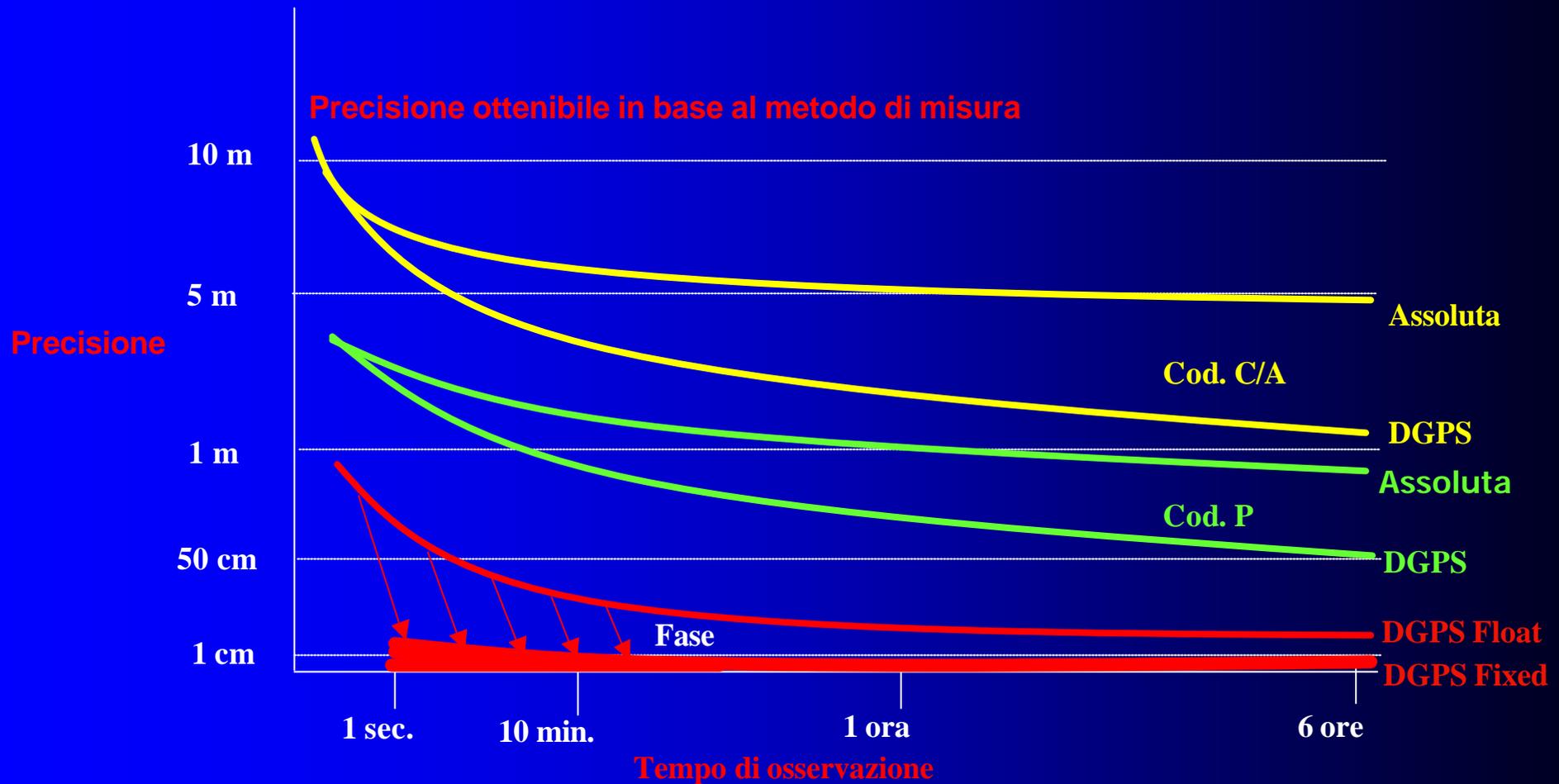
- tipo di ricevitori utilizzati
- tempo di misura
- tecnica di misura: posizione **assoluta** o **relativa**
- algoritmo di correzione applicato alle misure

➤ Da **5 a 15** metri : con qualunque ricevitore utilizzato in modo autonomo

➤ Da **0.5 a 5** metri : con ricevitori in misura relativa (DGPS) **di pseudorange**
(solo codice)

➤ Precisione **< 1cm** : con ricevitori in misura relativa (DGPS) **di fase**

La precisione aumenta con il tempo di misura



La misura differenziale DGPS

- Gli errori sono legati all'ora universale UTC del GPS
- Nello stesso istante lo stesso errore agisce su ricevitori operanti nelle vicinanze
- L'errore di misura determinato sulla stazione base viene utilizzato per correggere le misure sul ricevitore mobile:
 - con misure di **codice** (Differential GPS), il ricevitore di riferimento, note le proprie coordinate, calcola le correzioni da apportare alle misure di codice e le comunica tramite un apparato telemetrico al ricevitore mobile (rover) che corregge le proprie misure.
 - con misure di **fase**, le misure effettuate dal ricevitore di riferimento sono utilizzate per risolvere l' *ambiguità di fase*.

La misura differenziale DGPS

- ✈ Il metodo effettua il posizionamento relativo del ricevitore mobile rispetto a quello di riferimento e fornisce la misura del vettore congiungente i due ricevitori
- ✈ Il calcolo differenziale può essere effettuato:
 - a fine rilievo nelle misure in "Post-processing"
 - durante la misura con le tecniche "Real time"
- ✈ La tecnica differenziale elimina gran parte degli errori sistematici comuni a due o più ricevitori operanti in aree limitrofe

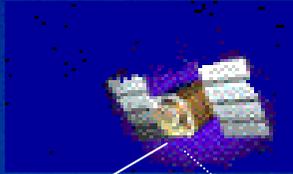
La misura DGPS riduce gli errori sistemati

✘ Effemeridi	----->	Rimosso dal DGPS
✘ Orologio satelliti	----->	Rimosso dal DGPS
✘ Ritardo ionosferico	----->	Rimosso dal DGPS
✘ Ritardo troposferico	----->	Rimosso dal DGPS
✘ Satelliti guasti	----->	Non utilizzati

Rimangono le imprecisioni dovute alla:

- ✘ Geometria dei satelliti (PDOP)
- ✘ Deriva dell' orologio del ricevitore
- ✘ Rumore ricevitore
- ✘ Multipath -----> ridotto con antenne speciali

Errore di multipath: segnale riflesso



SOKKIA

La misura GPS in topografia

- I rilievi GPS in topografia sono effettuati con misure relative o differenziali **DGPS** utilizzando almeno due ricevitori
- La posizione relativa **DGPS** di due o più ricevitori in misura di fase ha un' elevata precisione: **5mm + 1ppm**
- Il GPS mantiene la precisione su vettori di notevole lunghezza
- Funziona 24 ore al giorno, con qualsiasi condizione atmosferica
- La misura GPS non richiede l'intervisibilità dei punti

Metodi di misura differenziale in topografia

- ✍ **Statico** : per punti di appoggio e reti d'inquadramento
misure di vettori fino a 10/15 Km in singola frequenza
misure di vettori anche oltre 15 Km in doppia frequenza
- ✍ **Statico rapido** : per punti d' appoggio e inquadramento
misure di vettori non superiori ai 5 Km
Nei rilievi statici il calcolo differenziale è effettuato in "post-processing"
- ✍ **Cinematico** :
 - in "post-processing" per rilievi di dettaglio
 - in "Real time" per rilievi di dettaglio e tracciamenti

Ricevitori **singola frequenza** consentono misure cinematiche entro pochi Km dalla base

Ricevitori **doppia frequenza** consentono misure fino a 20 /30 Km dalla base

Statico & statico rapido

Satellite GPS



Ritardo di tempo
(differenza di fase)

➤ Statico: preciso ed affidabile
(5mm + 1 ppm) ma poco
produttivo



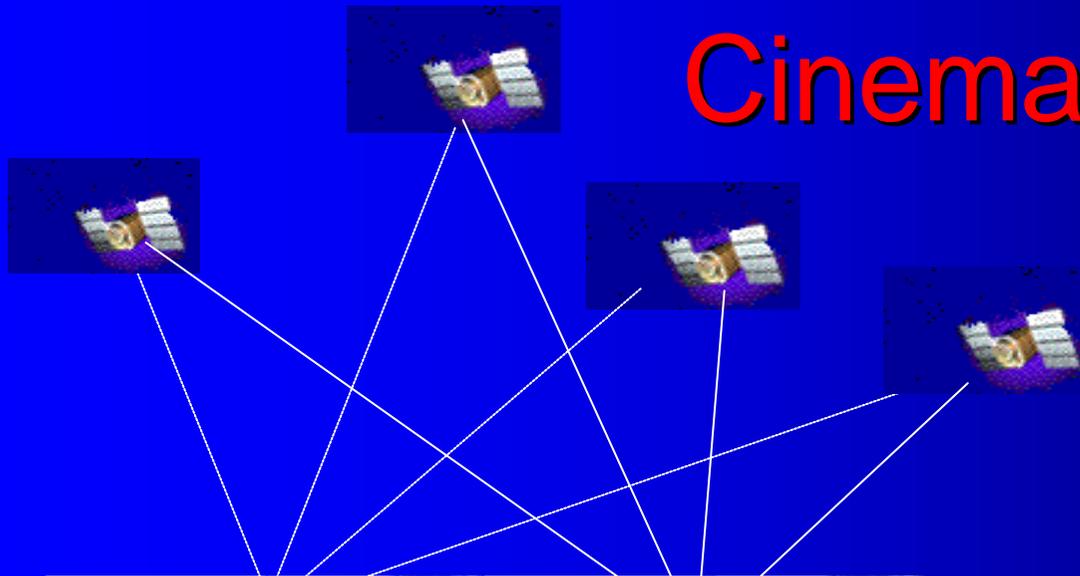
Distanza da determinare

➤ Statico rapido: si effettua con tempi di misura ridotti: (5-20 min.) ma richiede almeno 5 satelliti visibili e si effettua in prevalenza con ricevitori doppia frequenza (combinazioni L1+L2 e L1-L2)

➤ Lo Statico rapido in singola frequenza è dovuto esclusivamente al Software

SOKKIA

Cinematico



(Posizione incognita)



Stazione base

Stazione mobile



(Posizione incognita)



Cinematico

- E' il più produttivo, si può misurare un punto al secondo
- Occorre disporre di almeno 5 satelliti e valutare i percorsi per ridurre le interruzioni del segnale
- Precisione teorica come lo statico ma molto più influenzata dal DOP: da 1 a 10 cm
- I dati possono essere acquisiti in movimento continuo (*cinematico*) o fermandosi qualche istante sul punto (*Stop & Go*)
- Richiede l' *inizializzazione* in avvio della misura e ogni qualvolta si tracciano meno di 4 satelliti

Inizializzazione in Cinematico

E' il periodo di tempo necessario ai ricevitori per acquisire una quantità di misure sufficienti per il calcolo della posizione centimetrica

Inizializzazione in singola frequenza L1

- ✦ Statico o Statico veloce: minimo 10-15 minuti con 5 satelliti
- ✦ Inizializzazione tramite vettore o punti noti in pochi secondi
- ✦ Inizializzazione effettuata sempre da fermi

Inizializzazione in doppia frequenza L1 e L2

- ✦ Statico rapido: 1/5 minuti con almeno 5 satelliti
- ✦ O.T.F. (al volo): da 30 sec. a 1 minuto in movimento

Misura differenziale in Real Time

- La correzione differenziale in “ **post- processing**”, si effettua elaborando su PC con opportuni software di calcolo i dati misurati in campagna
- Questa metodologia non è applicabile per operazioni di tracciamento e non consente la verifica dei risultati in campagna
- La correzione **DGPS in tempo reale** avviene tramite l’invio dei dati del ricevitore fisso al ricevitore mobile tramite dei messaggi in formato proprietario o standardizzato: protocollo **RTCM**
- La trasmissione dei dati si effettua con vari apparati telemetrici:
 - radiomodem** in banda U e V
 - telefoni **GSM**
 - connessione “**internet**” **DGPS.IP**
 - trasmissioni da **satelliti geostazionari** Racal, Omnistar, WAAS, Egnos
 - trasmissioni su portanti **FM**

Misura differenziale in Real Time

- La correzione differenziale DGPS può essere effettuata:
 - con misura di **codice** (pseudorange)
 - con di misura **di fase**
- La misura **DGPS di codice** fornisce precisioni metriche
- Utilizza un sistema telemetrico o dei decodificatori (servizi di correzione via satellite), non richiede inizializzazione
- La misura **DGPS di fase** si usa nella tecnica "**RTK**" Real Time Kinematic
- Si effettua con ricevitori doppia frequenza dotati di sistema telemetrico
- La precisione è da 1 a 10 cm
- Richiede l' **inizializzazione** tramite Statico rapido o O.T.F.

Misura differenziale in Real Time

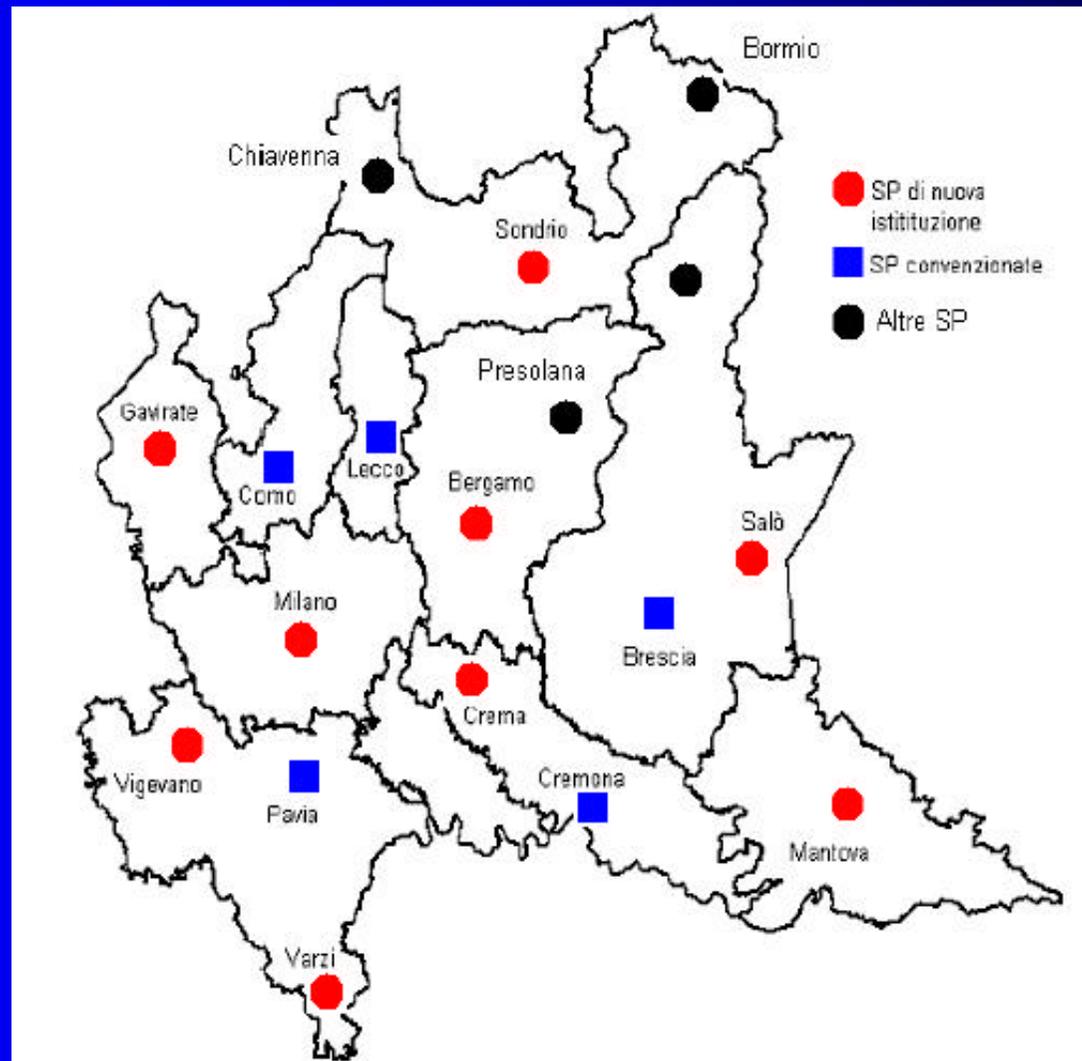
- La misura **DGPS di fase** con la tecnica "**RTK**" è subordinata al campo di trasmissione radio dell'apparato telemetrico:
alcuni chilometri utilizzando radiomodem
senza limiti se si utilizzano GSM (zone di copertura telefonica).
- In ogni caso per ottenere dati centimetrici in RTK, occorre operare nei dintorni della stazione base (errori spazialmente correlati) fino ad una distanza massima di **10/30 Km**.
A distanze superiori la correzione differenziale **perde consistenza**.
- Si stanno sperimentando nuove tecnologie per superare il limite di massimo di 30 Km a cui è soggetto l' RTK: **le reti di stazioni di riferimento**.

Reti di stazioni permanenti



Reti di stazioni permanenti

Rete IREALP



SOKKIA

Reti di stazioni permanenti

- Le prospettive di utilizzo di queste reti sono interessanti specialmente nelle applicazioni **Real Time** tramite i messaggi **RTCM**.
- In una rete GPS per misure Real Time, un “**centro di controllo**” riceve i dati da tutte le stazioni ed elabora un modello di correzioni.
- La diffusione dei dati avviene:
 - tra *Centro di controllo* e le varie *stazioni permanenti GPS*
 - tra Centro di controllo ed i singoli utenti
- L'implementazione della rete *può essere di tipo*:
 - Virtual Reference Station (VRS)**: stazioni base virtuali
 - Multi Reference Station (MRS)**: trasmissione di correzioni
 - Network RTK**: trasmissione di osservazioni (*raw data*)

Misura Real Time con la tecnica “VRS”

Un rete **VRS** è costituito da stazioni permanenti GPS e un centro di controllo:
Il centro di controllo “**interpola**” le correzioni differenziali della rete GPS in una posizione prossima a quella **rover** creando una stazione (**virtuale**) vicina al rover

- Il *rover* chiama il server dando la sua posizione approssimata (NMEA)
- Il server genera la *VRS* e invia i dati di correzione in continuo

Occorre una comunicazione bidirezionale tra ricevitore rover e il centro di controllo:
il formato di trasmissione dei dati è l’ RTCM 2.2 (messaggi *Tipo 20 e 21*).

IN ALTERNATIVA:

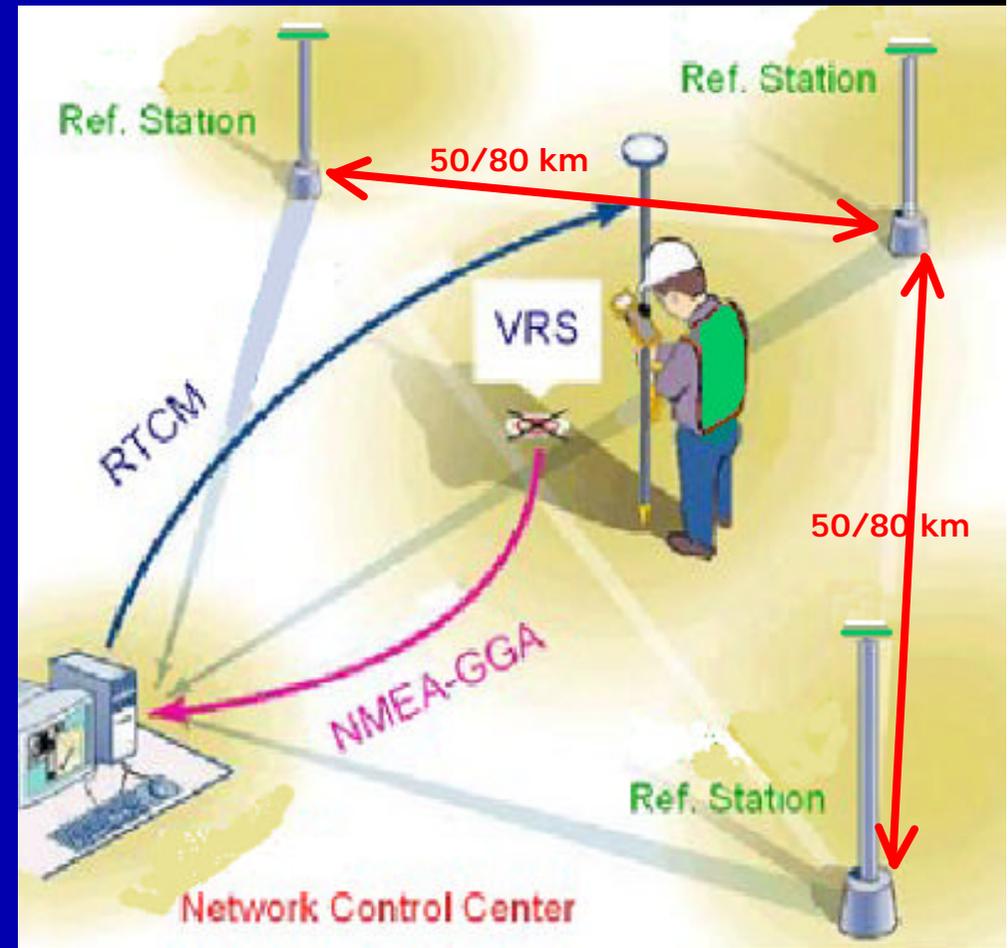
Il centro di controllo “**interpola**” le correzioni creando un numero limitato di stazioni virtuali di “**raffittimento**”

Il *rover* applica le correzioni della stazione più vicina (reale o virtuale)

Non è più necessario conoscere la posizione del rover ma si hanno precisioni inferiori

Misura Real Time con la tecnica "VRS"

- La tecnica VRS risolve i problemi di decadimento della precisione di misura RTK, propria delle reti con eccessiva distanza tra le stazioni base.
- Tramite la rete internet, il sistema può servire una teorica illimitata quantità di utenti.



Multi Reference Station (MRS)

In un sistema *MRS* vengono generate le correzioni delle misure di fase per ogni satellite su ogni stazione della rete utilizzando tutti i dati del *network*.

Le correzioni servono a generare un **modello interpolativo**, applicato localmente dal *rover*.

- Non necessita la posizione del *rover*: comunicazione monodirezionale (il calcolo della correzione è fatto dal *rover*).
- Non ci sono, in teoria, limiti al numero di accessi.

Richiede un formato di dati adeguato a contenere i parametri della rete.

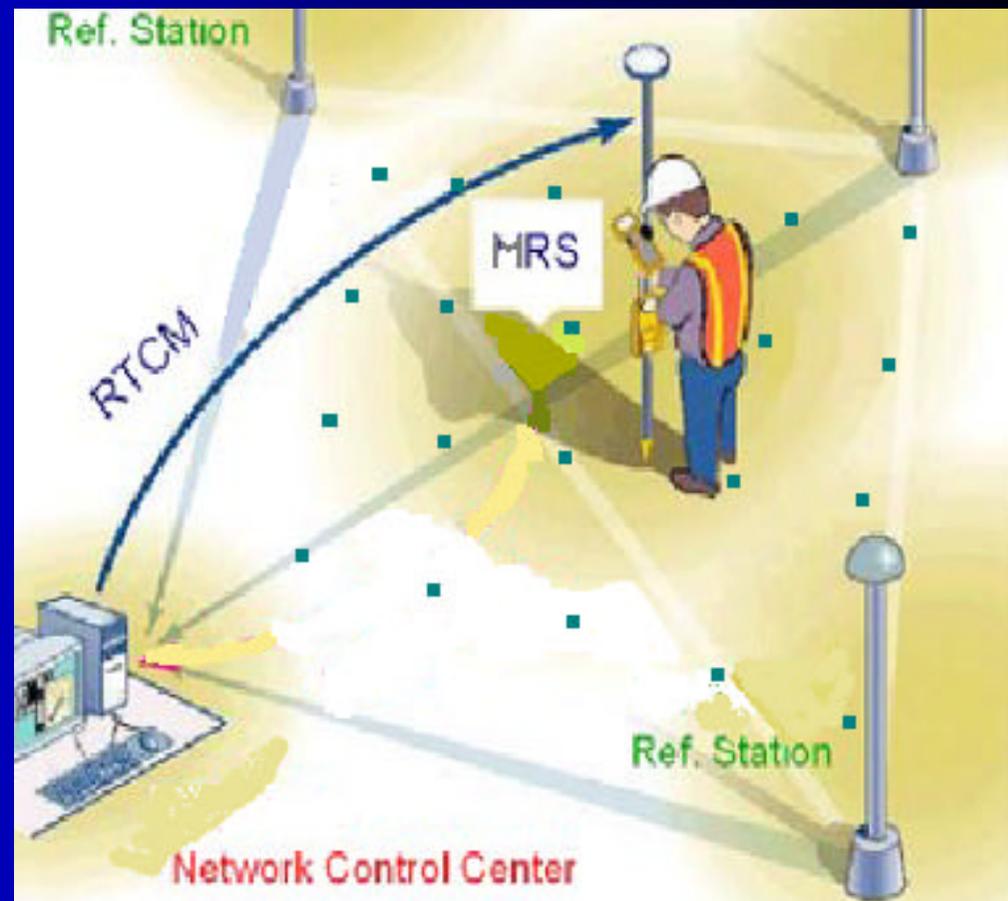
Possibilità di compattare questi in formati proprietari come l'RTCM Type 59 (formato FKP).

Si utilizzerà in futuro il formato RTCM 3.0

Multi Reference Station (MRS)

trasmissione delle correzioni

- Si utilizzano i parametri di correzione FKP *parametri di correzione superficiali*.
- Si rappresenta la posizione degli errori sull'area, descrivibili con un polinomio lineare.
- L'area è una superficie definita parallelamente all'ellissoide WGS84, all'altezza della stazione di riferimento.
- Le coordinate (x, y, z) del rover, riferite a questa superficie per osservazioni di fase, definiscono gli errori sui *ranges*.

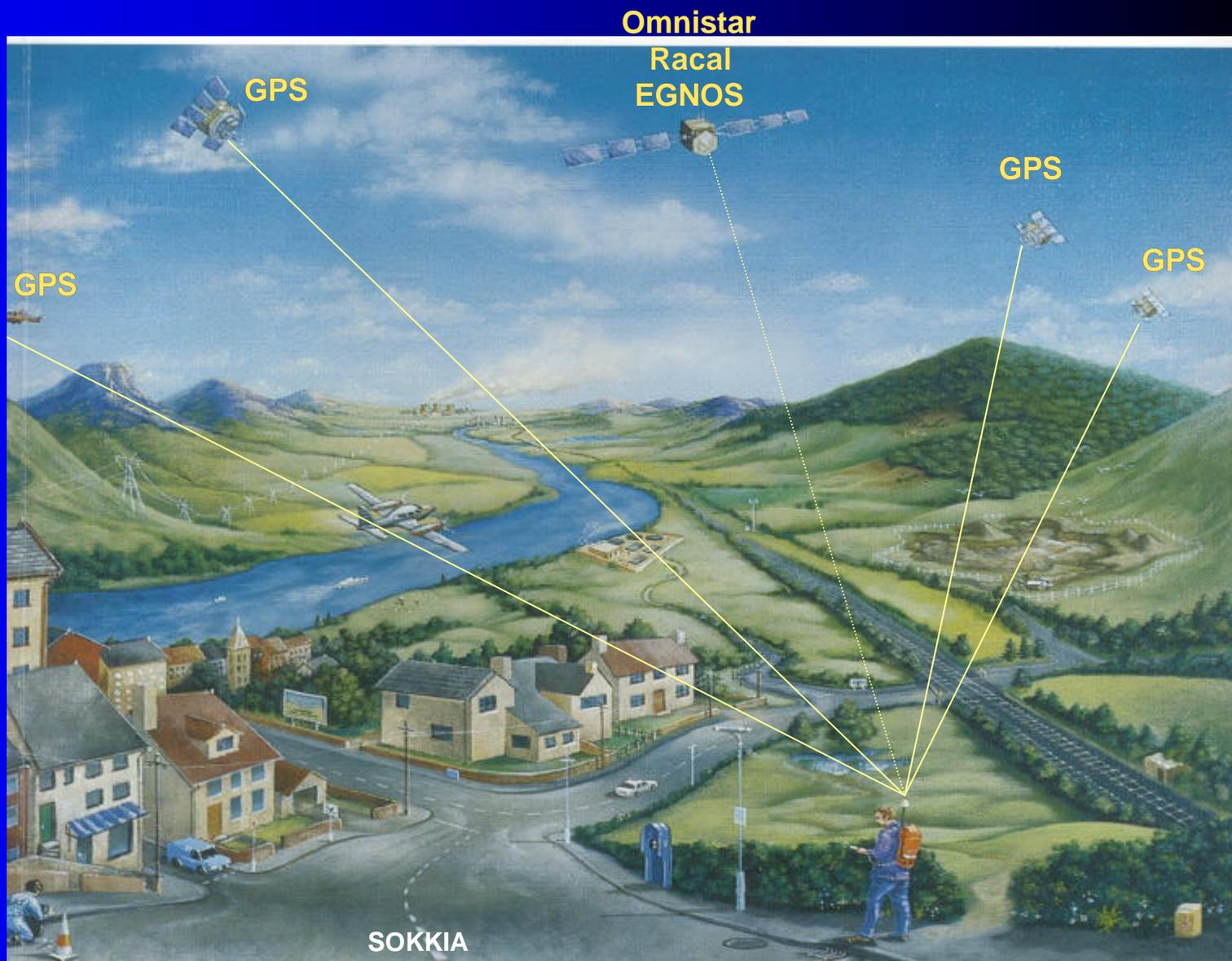


Servizi di correzione Real time via satellite

Esistono anche servizi **DGPS real time** via satellite per rilievi speditivi e GIS

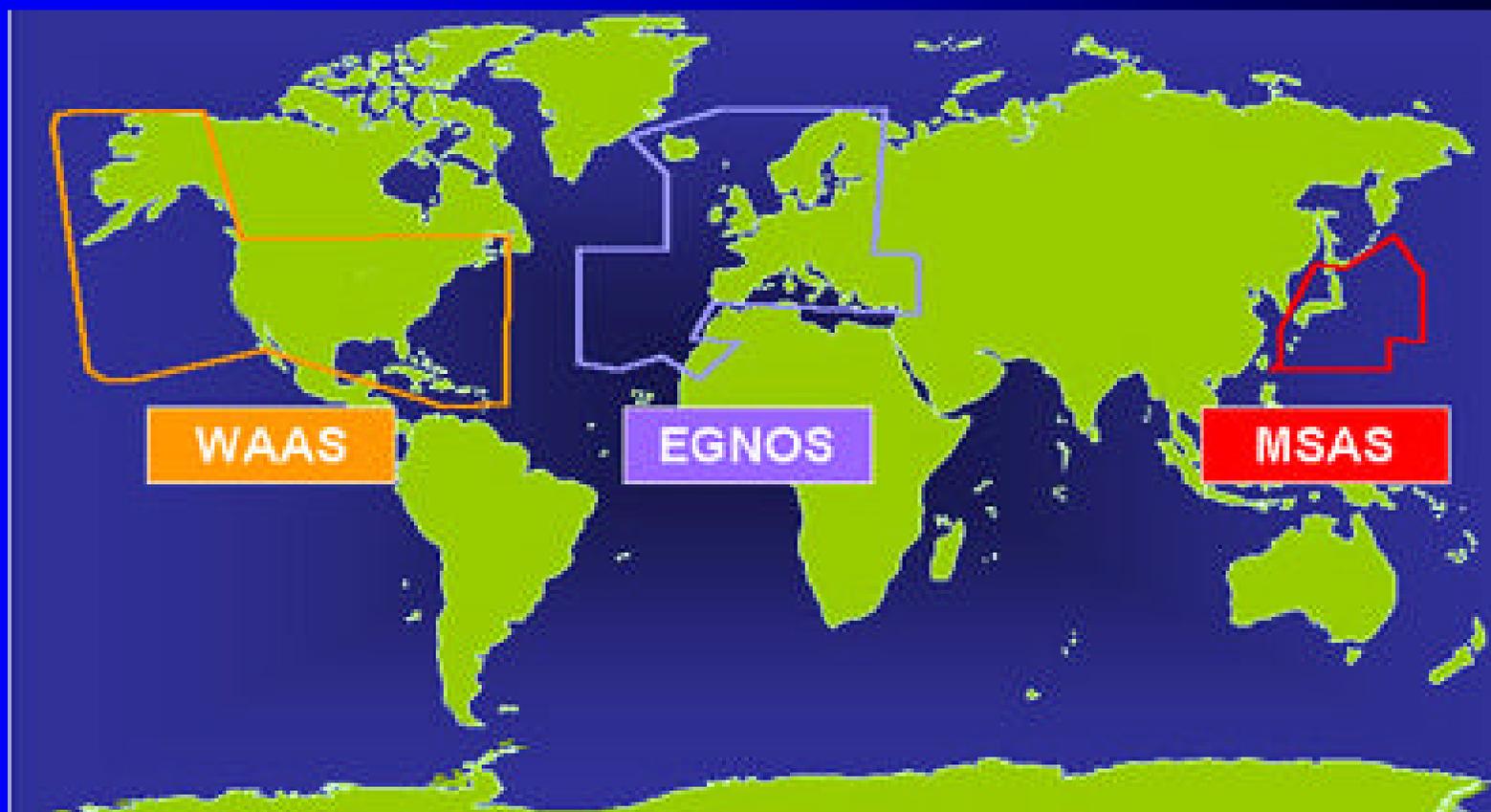
Quelli a pagamento tipo **Omnistar**, possono fornire precisioni fino a 10 - 20 cm

Quelli gratuiti tipo **WAAS EGNOS** e **MSAS** consentono precisioni di 1-3 m



Aree di copertura dei sistema Egnos

- EGNOS è un progetto dell' ESA, pienamente operativo entro il 2004
Scopo di EGNOS è l' integrazione dei sistemi GPS e GLONASS, per scopi "di sicurezza" come la navigazione aerea o navale e fluviale su canali.
- Trasmette un segnale contenente informazioni sull' affidabilità ed accuratezza dei segnali GPS, GLONASS ed in futuro Galileo.



Come opera il sistema Egnos

- EGNOS fornisce le informazioni necessarie per utilizzare al meglio i segnali di navigazione dei satelliti GPS e GLONASS.
La precisione di posizionamento si incrementa da 20 m a meno di 5 m, per via delle informazioni sull'errore di misura della posizione e sul decadimento del segnale trasmesso, i dati hanno una latenza massima di 6 secondi.
- Il compito viene assolto da 3 satelliti geostazionari e una complessa rete di stazioni a terra. I 3 satelliti inviano un segnale simile a quello generato dai satelliti GPS e GLONASS.
- Le informazioni trasmesse sull'integrità dei dati, servono ai ricevitori abilitati al segnale Egnos, per apportare le opportune correzioni sul calcolo della posizione e migliorarne la precisione.

Future innovazioni sui sistemi GNSS

Sono previste quattro innovazioni:

- 1. Il sistema **GPS** sta per subire una modernizzazione legata all'introduzione nel 2005 di due nuovi codici per la frequenza L2 per usi civili e nel 2007 di una terza frequenza L5 con i relativi codici oltre che un nuovo codice su L1
- 2. Si sta operando per un ripristino della costellazione **Glonass** con 18 satelliti nel 2007 e 24 nel 2010
- 3. Entro il decennio sarà operativa la costellazione di 27 satelliti **Galileo**
- 4. **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) sarà completamente operativa entro il 2004 e migliorerà l'accuratezza planimetrica del posizionamento singolo da 20 m a meno di 5 m.

Distribuzione delle bande dei segnali GPS - Galileo - Glonass

