



*Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*  
*Dipartimento di Scienze e Tecnologie*

*Corso di Cartografia Numerica e GIS*  
*Corso di Sistemi Informativi Geografici + Laboratorio GIS*

*Lezione 12*

# **L'acquisizione della posizione per i GIS: GPS (Global Positioning System)**

*Claudio Parente*

## Cosa significa GNSS e a cosa serve

---

GNSS sta per:

- **Global Navigation Satellite System**
- sistemi di navigazione satellitare globale

Il GNSS più noto è GPS (Global Positioning System) ma non è l'unico.

I GNSS vengono utilizzati in svariati settori (GNSS (o GPS) non deve essere unicamente sinonimo di navigatore satellitare!) e hanno un enorme impatto su una molteplicità di attività.

## Campi di utilizzo

---

1. Misure di tempo
2. Posizionamento e navigazione di veicoli e persone
3. Misurazioni topografiche
4. Misurazioni geodetiche
5. Tracciamento di veicoli e persone
6. Usi vari
7. Gioco

## Posizionamento e navigazione di veicoli e persone

---

Scopo originario del sistema è il posizionamento e la navigazione di veicoli e persone per scopi militari tattici; successivamente il suo utilizzo è stato esteso al campo civile.

**Posizionamento:** determinare la posizione tridimensionale, ossia le coordinate plano-altimetriche, del punto occupato. Viene utilizzato ad esempio dalle persone per individuare la propria posizione in territori non segnalizzati (escursionismo), dalle imbarcazioni per determinare la propria posizione, dai topografi per calcolare posizione di un vertice topografico.

# Il sistema GPS

## La storia

---

Nel 1960 la NASA, il DoT (Department of Transportation) e il DoD (Department of Defence) cominciano a pensare ad un sistema di posizionamento globale.

Nascono negli anni Transit, Timation e 621B finché il GPS JPO (GPS Joint Program Office) giunge a sviluppare il NAVSTAR GPS.

## GPS

---

Il nome completo è NAVSTAR GPS:

- NAVSTAR: NAVigation Satellite Timing And Ranging
- GPS: Global Positioning System

Può essere tradotto come: sistema satellitare per la navigazione, la misura del tempo, la misura della distanza e il posizionamento globale.

Parole come tempo, navigazione e posizionamento erano già stata introdotte nella lezione precedente ... vedremo anche il concetto di distanza.

## In sintesi

---

Il GPS è un sistema di posizionamento satellitare globale. E' costituito da una costellazione di satelliti che emettono incessantemente dei segnali elettromagnetici. Essi sono captati e memorizzati da speciali ricevitori a terra e consentono di determinare con elevata precisione la posizione occupata.

Il termine globale sta ad indicare che è possibile determinare le coordinate di punti in modo omogeneo su tutta la Terra (senza porre attenzione allo Stato/Nazione in cui ci si trova!).

## Lo scopo

---

Lo scopo è pertanto quello di permettere in ogni istante, in ogni luogo e con ogni condizione climatica il posizionamento tridimensionale di oggetti sia fermi che in movimento.

Il GPS funziona su tutta la Terra, sia che sia giorno o notte, sia che ci sia il sole, la nebbia o la pioggia; il servizio è "sempre" disponibile.

## La rivoluzione del GPS - 2

---

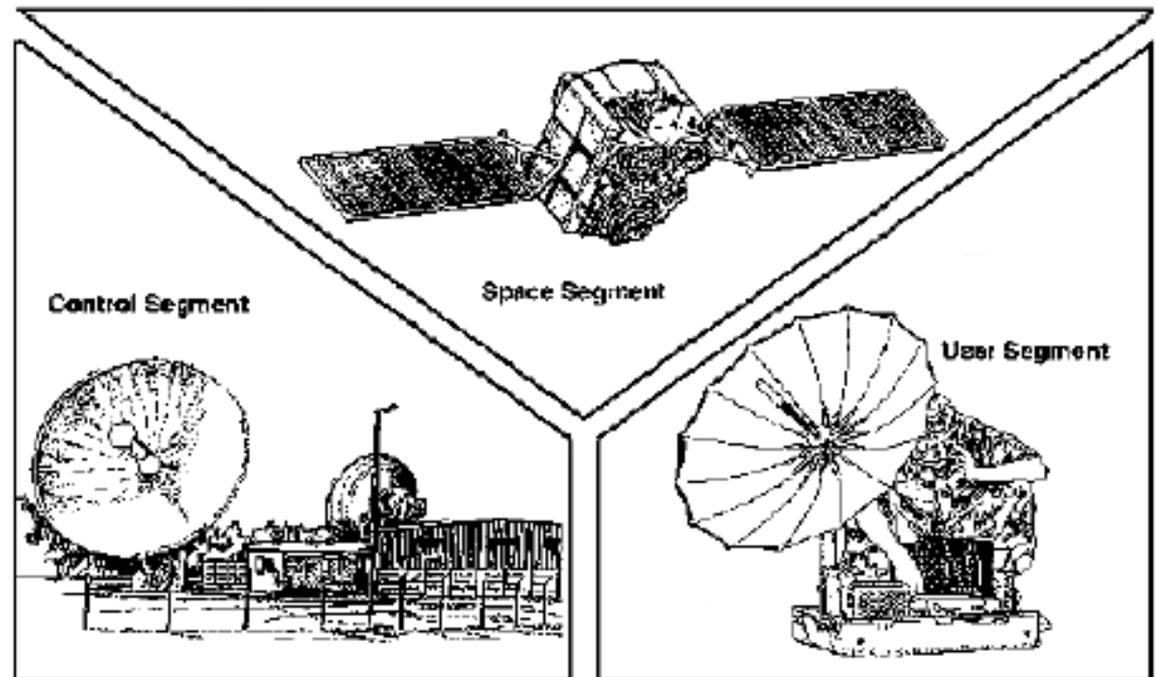
Un esempio ...

... per calcolare la posizione relativa di due punti distanti, poniamo, 20 Km, è sufficiente mettere in stazione due ricevitori sui due punti per circa un'ora ...  
... un lavoro analogo, se svolto con metodi topografici classici, richiederebbe probabilmente, su un territorio come quello italiano, molti giorni di lavoro.

## Il sistema GPS - la struttura

Il sistema è composto da tre segmenti:

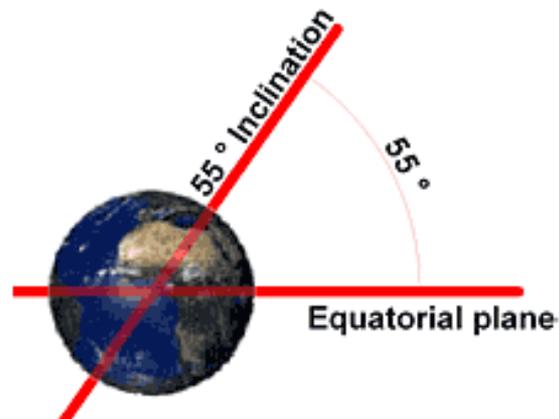
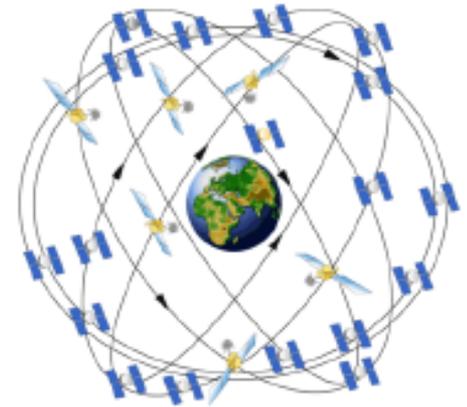
- il segmento spaziale (Space Segment)
- il segmento di controllo (Control Segment)
- il segmento di utilizzo (User Segment)



## Il segmento spaziale - 1

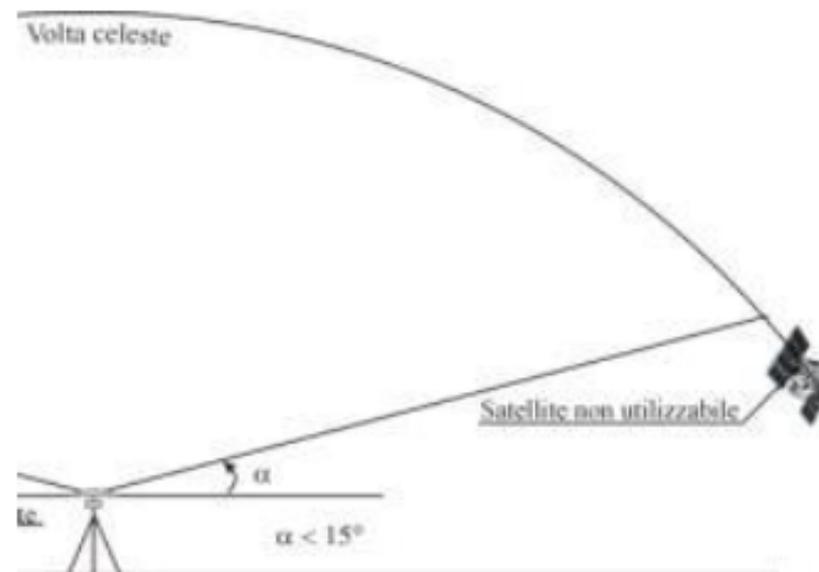
### Caratteristiche:

- 32 satelliti “attualmente” in orbita (6 marzo 2014)
- 6 piani orbitali (60° longitude)
- 55° inclinazione rispetto all'equatore
- 20200 km di altezza
- 11 ore e 58 minuti di periodo orbitale

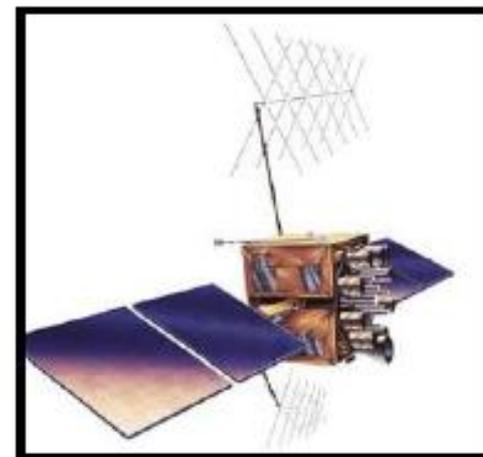
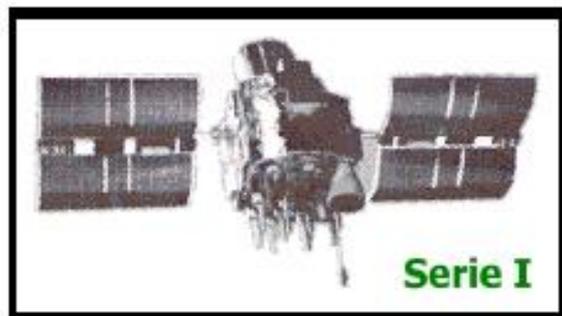


## Il segmento spaziale - 2

La peculiare distribuzione delle orbite e dei satelliti è stata scelta con il preciso obiettivo di far sì che in ogni punto del pianeta ed ad ogni ora, sia sempre possibile ricevere il segnale di un numero di satelliti compreso tra 5 e 8 a partire da un'elevazione di  $15^\circ$  sull'orizzonte (angolo di cut-off).



## Il segmento spaziale - 4



**Serie IIR**



## Il segmento spaziale - 5

---



**Serie IIR-M**



**Serie III**

## Satelliti IIR-M

---

I satelliti:

- hanno una dimensione di circa  $2m \times 2m \times 1.5 m$
- hanno una massa di circa  $2 \cdot 10^3 kg$
- sono forniti di pannelli solari per il proprio approvvigionamento
- sono forniti di retrorazzi per le periodiche manovre di correzione dell'orbita
- hanno una vita media prevista di circa 10 anni
- sono in grado, seppur con una degradazione di accuratezza, di calcolare e predire le proprie orbite senza dipendere dalla rete di controllo

## Il segmento spaziale - 6

| Data              | I        | II       | IIA      | IIR       | IIR-M    | IIF      | Totale    |
|-------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| Ottobre 1999      | 0        | 8        | 18       | 1         | 0        | 0        | 27        |
| Dicembre 2000     | 0        | 5        | 18       | 4         | 0        | 0        | 27        |
| Gennaio 2002      | 0        | 4        | 18       | 6         | 0        | 0        | 28        |
| Dicembre 2006     | 0        | 1        | 14       | 12        | 3        | 0        | 30        |
| Ottobre 2007      | 0        | 1        | 15       | 12        | 3        | 0        | 31        |
| Settembre 2008    | 0        | 0        | 13       | 12        | 6        | 0        | 31        |
| Settembre 2009    | 0        | 0        | 12       | 12        | 8        | 0        | 32        |
| Novembre 2010     | 0        | 0        | 11       | 12        | 8        | 1        | 32        |
| Febbraio 2013     | 0        | 0        | 12       | 12        | 7        | 3        | 34        |
| <b>Marzo 2014</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>7</b> | <b>12</b> | <b>8</b> | <b>5</b> | <b>32</b> |

Ultimo satellite lanciato il 21 febbraio 2014

## Il segmento spaziale - 7

---

Il numero di satelliti strettamente necessari è 21.

Il numero di satelliti inizialmente attivati è 24.

Il numero di satelliti attualmente attivi è 32.

Ci si è resi conto che avere “30” satelliti è utilissimo: tale numero probabilmente non scenderà ma, anzi, sarà destinato a salire. E’ oramai superato il concetto di 24 satelliti (+ 2 di scorta) che si legge ancora da qualche parte.

L'evoluzione dei satelliti va verso una vita media più lunga, una maggiore precisione degli orologi interni (atomici) ed una maggior autonomia (minor dipendenza dal segmento di controllo).

## Il segmento spaziale - 9

---

### Funzioni:

- trasmettere informazioni agli utilizzatori mediante segnali modulati
- mantenere un riferimento di tempo accurato
- ricevere e memorizzare informazioni dal segmento di controllo
- eseguire manovre di correzioni d'orbita

## Il segmento spaziale - 10

---

Una curiosità:

- Raggio orbitale satellitare: 26570 km
  - altezza satelliti 20200 km
  - raggio terrestre 6370 km
- Periodo orbitale ~ 12 h
- Velocità del satellite 13912 km/h  
~ 4 km/s
- Tempo di volo del segnale 0.067 s
- Spostamento del satellite 260 m

## Segmento di controllo - 1



Undici stazioni di controllo: dieci di monitoraggio e una stazione master (Schriever AFB - Air Force Base)

## Segmento di controllo - 2

---

### Funzioni:

- monitorare gli orologi a bordo dei satelliti
- monitorare le orbite seguite dai satelliti
- monitorare lo stato di salute della costellazione
- elaborare le informazioni sopraindicate
- inviare tali informazioni verso i satelliti (i quali le ritrasmettono verso gli utilizzatori)
- comandare eventuali manovre di correzioni d'orbita

## Sincronia degli orologi

---

L'intero sistema deve battere un unico tempo, che è scandito da un orologio atomico che si trova presso la Master Control Monitor Station di Schriever AFB (una volta la Master Station si trovava a Colorado Springs).

Le stazioni di controllo tengono costantemente sotto controllo il comportamento degli orologi di bordo di tutti i satelliti, stimando le loro deviazioni (che sono piccolissime) dal tempo GPS.

Tali informazioni vengono inviate periodicamente ai satelliti, che le ritrasmettono agli utenti.

## Posizione dei satelliti

---

L'orbita dei satelliti deve essere nota agli utenti, con la migliore precisione possibile.

A questo scopo le stazioni di terra seguono il loro movimento e periodicamente effettuano una predizione a breve termine (poche ore o pochissimi giorni) della rotta che essi terranno.

Tali informazioni vengono inviate dal segmento di controllo ai satelliti e da questi ritrasmesse agli utenti.

## Le effemeridi

---

Le effemeridi di un satellite sono l'insieme di parametri e algoritmi che permettono di calcolarne la posizione ad ogni epoca in un sistema di riferimento assegnato.

Nel caso dei satelliti GPS si hanno:

1. le effemeridi predette (broadcast ephemerides nel gergo GPS)
2. le effemeridi precise (precise ephemerides)

## Le effemeridi predette

---

In generale, il satellite non è in grado di predire quotidianamente la propria orbite e calcolare i parametri che la descrivono numericamente (dal blocco IIR-M hanno raggiunto questa capacità con limitazioni nella qualità del dato prodotto); tale compito è affidato alla rete di stazioni per il controllo del sistema.

Il calcolo delle orbite avviene con i seguenti passaggi:

1. le osservazioni di tutte le stazioni della rete a tutti i satelliti vengono inviate alla stazione Master che, per ciascun satellite: interpola le orbite dei sette giorni precedenti e, da queste, estrapola l'evoluzione nelle 24 ore immediatamente successive
2. le orbite estrapolate vengono inviate ai satelliti
3. i satelliti, durante la giornata successiva, inviano queste effemeridi agli utenti

## Le effemeridi precise

---

Esistono anche delle effemeridi calcolate a posteriori caratterizzate da una maggiore accuratezza rispetto a quelle predette e per questo motivo chiamate effemeridi precise.

Naturalmente le effemeridi precise non sono utilizzabili per la navigazione ma hanno ampia applicazione nella post-elaborazione di precisione dei dati.

Esse sono calcolate da alcuni enti e centri di ricerca che le diffondono gratuitamente con diversi tempi di ritardo (8 - 15 giorni):

- [http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html) - International GNSS Service
- <http://www.ngs.noaa.gov/orbits/> - National Geodetic Survey

Le effemeridi con il maggior ritardo sono le più precise; la loro determinazione è avvenuta con un numero maggiore di dati in quanto si è potuti osservare una traiettoria più lunga.

## Segmento di utilizzo - 1

---

Il segmento di utilizzo è costituito dagli utenti del servizio ossia i possessori di apparecchiature GPS.

Il segmento di utilizzo è costituito da:

- 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 per elaborare i dati raccolti e pervenire alla determinazione delle coordinate dei punti incogniti

## Ricevitori per tutti i gusti ma non per tutti gli usi

---

- smartphone
- schede per computer
- schede *nude*, da inserire in dispositivi vari (*mass market*)
- fotocamera con GPS
- scarpe ed orologi GPS
- ricevitori per escursionismo
- ricevitori per GIS
- ricevitori GNSS  
topografici/geodetici

... oltre ovviamente ai ricevitori satellitari per automobili!



## Smartphone - 1

---

Praticamente tutti i telefoni di fascia medio-alta hanno al loro interno un ricevitore GPS. I migliori hanno anche sensori di orientamento (bussola).



BlackBerry + SW Garmin



iPhone + SW TomTom

## Fotocamera con GPS

---



*LetsGoDigital*

## Che cosa sono i ricevitori per GIS

---

Strumenti agili, di costo medio, per acquisire dati da inserire in un GIS: equivale a dire, dati che devono essere precisi ma non al centimetro.

Hanno SW sofisticati e display abbastanza grandi.

Spesso sono dotati di camera fotografica.

## Ricevitori GIS - LEICA GS20 PDM e Trimble GEOXT 6000

---



## Ricevitori GIS - LEICA Zeno

---



Un controller con antenna interna o esterna (opzionale).

# II GPS

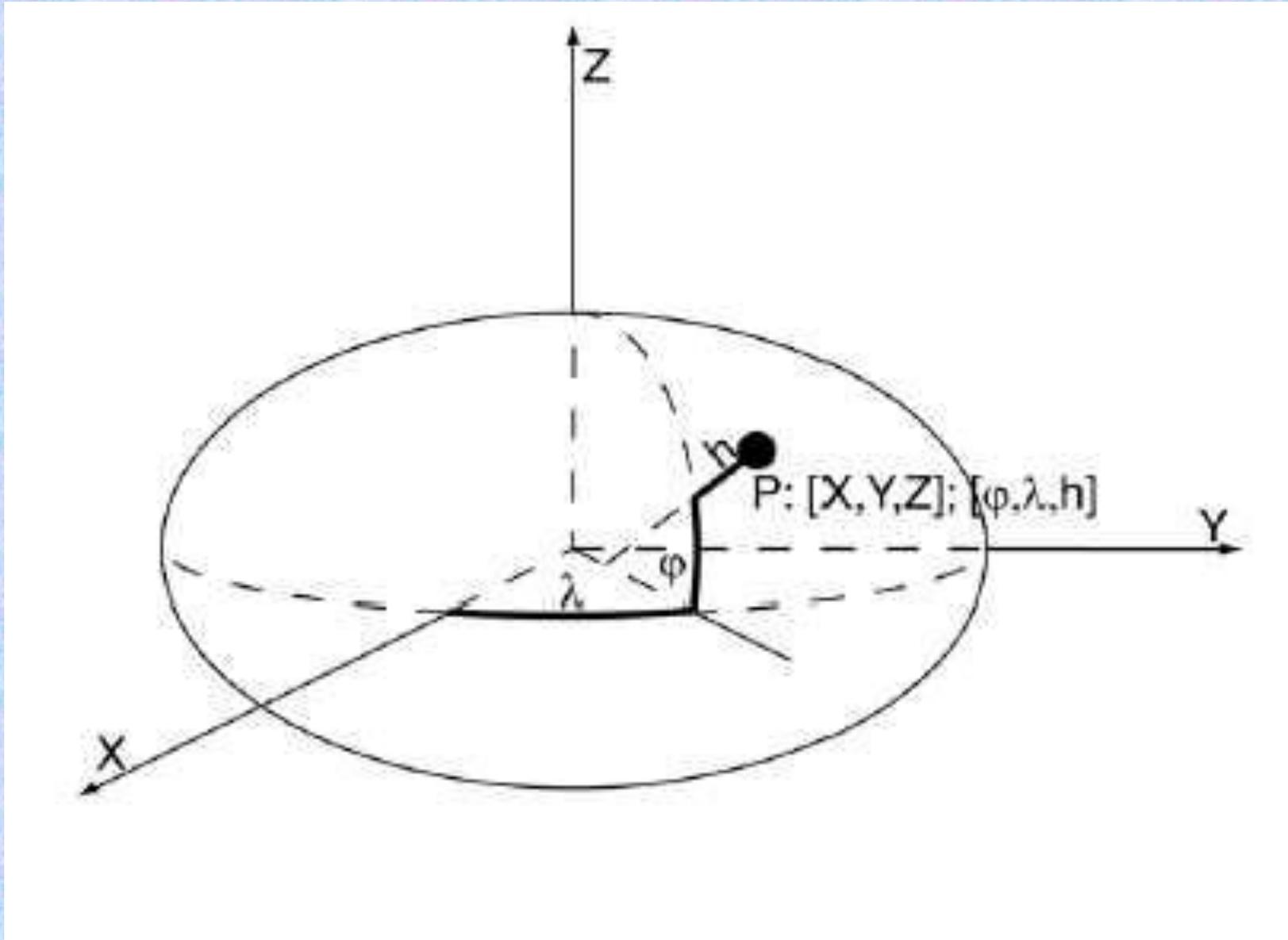
Il GPS (Global Positioning System) è un Metodo di posizionamento basato sulla ricezione di segnali provenienti da satelliti artificiali.

Sviluppato dal DoD (Department of Defence) degli USA a partire dagli anni 70, è pienamente operativo dall'agosto 1994.

Il GPS fornisce il posizionamento tridimensionale in un sistema di riferimento geocentrico:

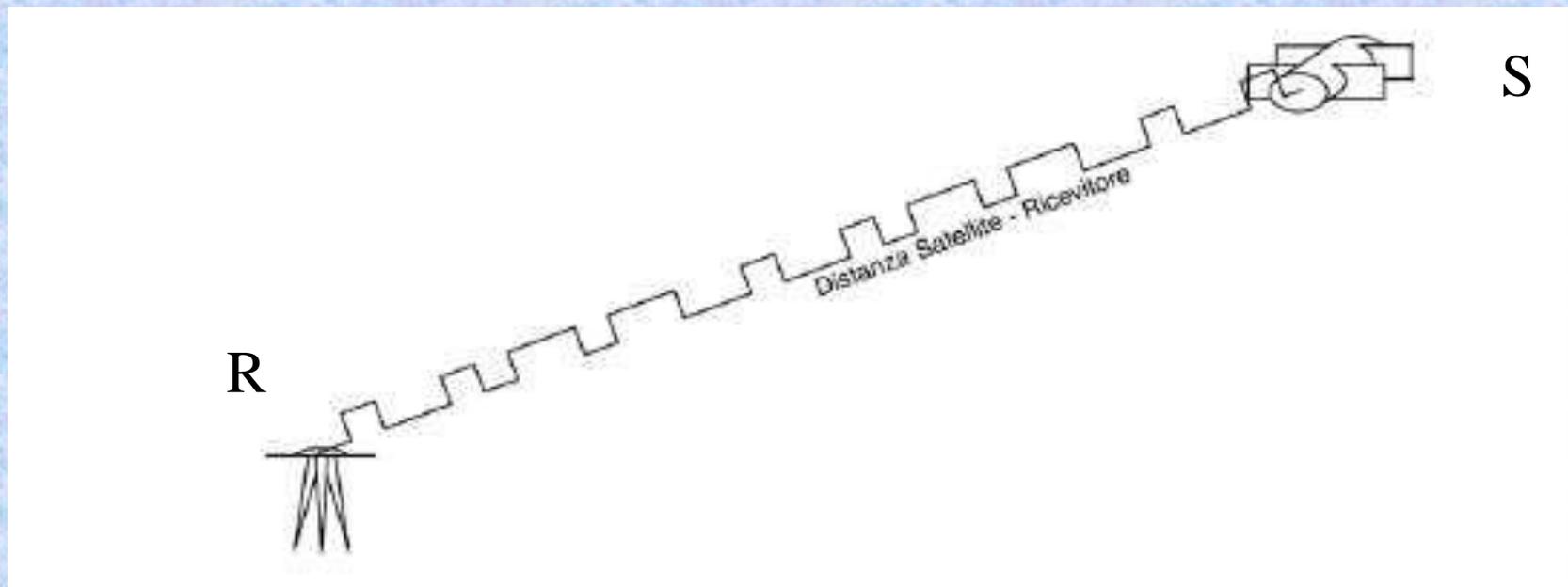
coordinate geocentriche cartesiane (X, Y, Z) o

coppia di coordinate ( $\varphi, \lambda$ ) e altimetria h.

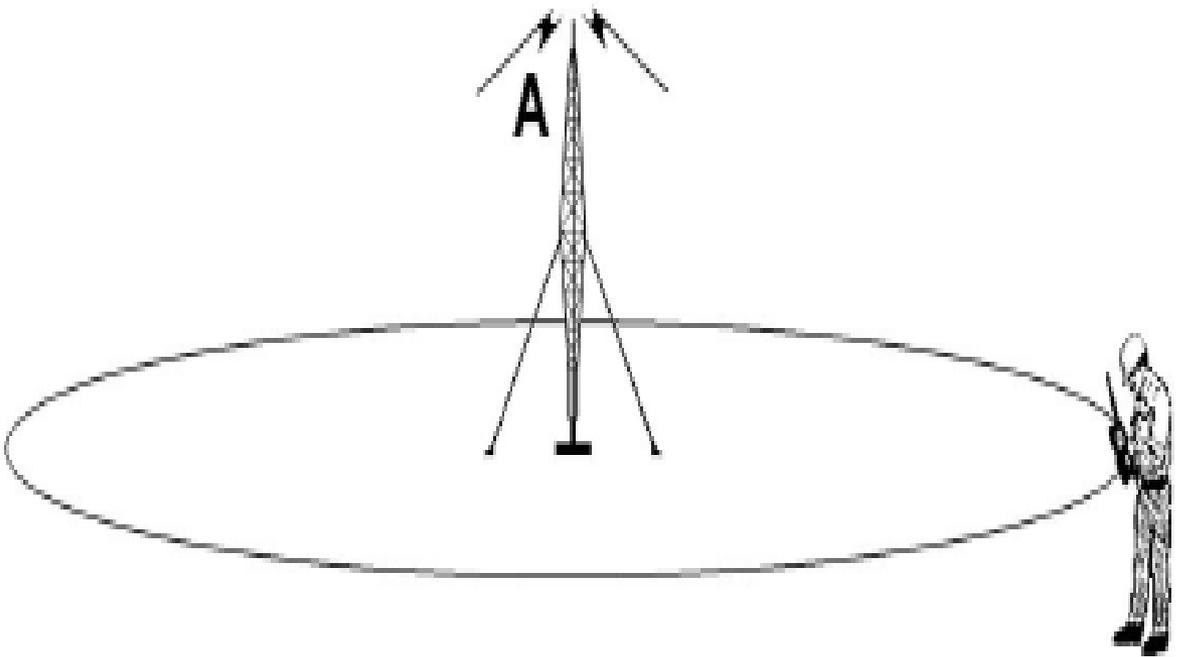


# La misura

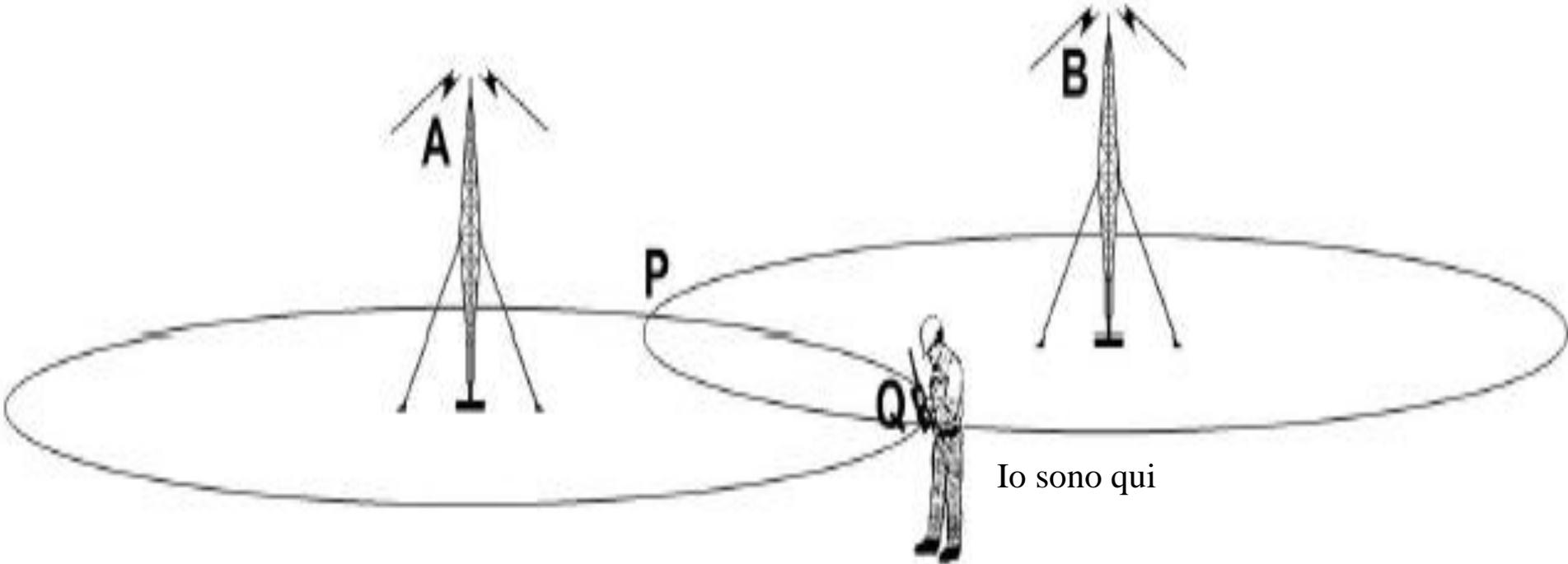
Fissato il Sistema di Riferimento e supposta nota la posizione del satellite (S) dalle effemeridi, si misura il tempo impiegato ( $\tau$ ) dalle onde elettromagnetiche, emesse da un apparato a bordo del satellite, per raggiungere il punto R di cui si vuole determinare la posizione.



Il tempo viene moltiplicato per la velocità di propagazione  $c$  del segnale e si ottiene una stima di distanza  $\rho$ .



Nel piano bastano 2 distanze da 2 punti noti per individuare la propria posizione: la posizione deve appartenere alla circonferenza di centro A e, contemporaneamente, alla circonferenza di centro B. Quindi o si è in P o si è in Q. Una delle due è da scartare perché, anche se non so esattamente dove mi trovo, intuisco che una delle due soluzioni è completamente fuori dalla zona dove mi trovo.



Io sono qui

# Il posizionamento assoluto: trilaterazione da tre satelliti

Siano  $S^1$ ,  $S^2$  e  $S^3$  le posizioni note di 3 satelliti;

siano  $\rho^1_R$ ,  $\rho^2_R$   $\rho$  e  $\rho^3_R$  le distanze misurate fra questi e un ricevitore R di posizione incognita:

ogni distanza misurata vincola il ricevitore a una sfera di centro  $S^i$  e raggio  $\rho^i_R$  ;

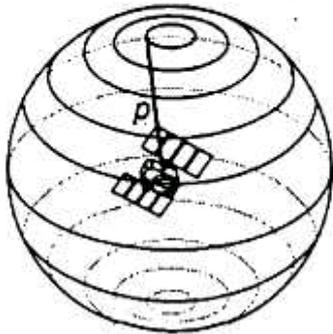
R può trovarsi unicamente nei 2 punti di intersezione delle sfere  $S(S^1, \rho^1_R)$ ,  $S(S^2, \rho^2_R)$ ,  $S(S^3, \rho^3_R)$ .

# Il posizionamento assoluto: trilaterazione da tre satelliti

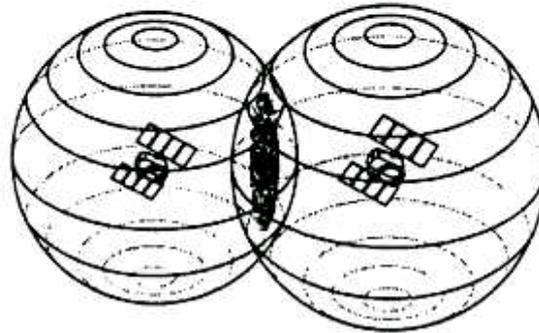
R può trovarsi unicamente nei 2 punti di intersezione delle sfere  $S(S^1, \rho^1_R)$ ,  $S(S^2, \rho^2_R)$ ,  $S(S^3, \rho^3_R)$ .

Anche in questo caso, intuisco che una delle due soluzioni è da scartare.

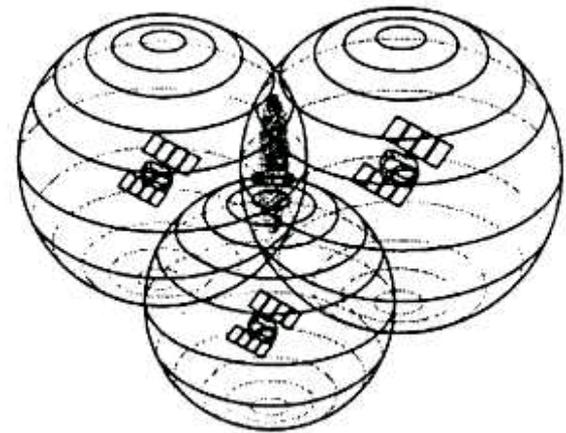
a)



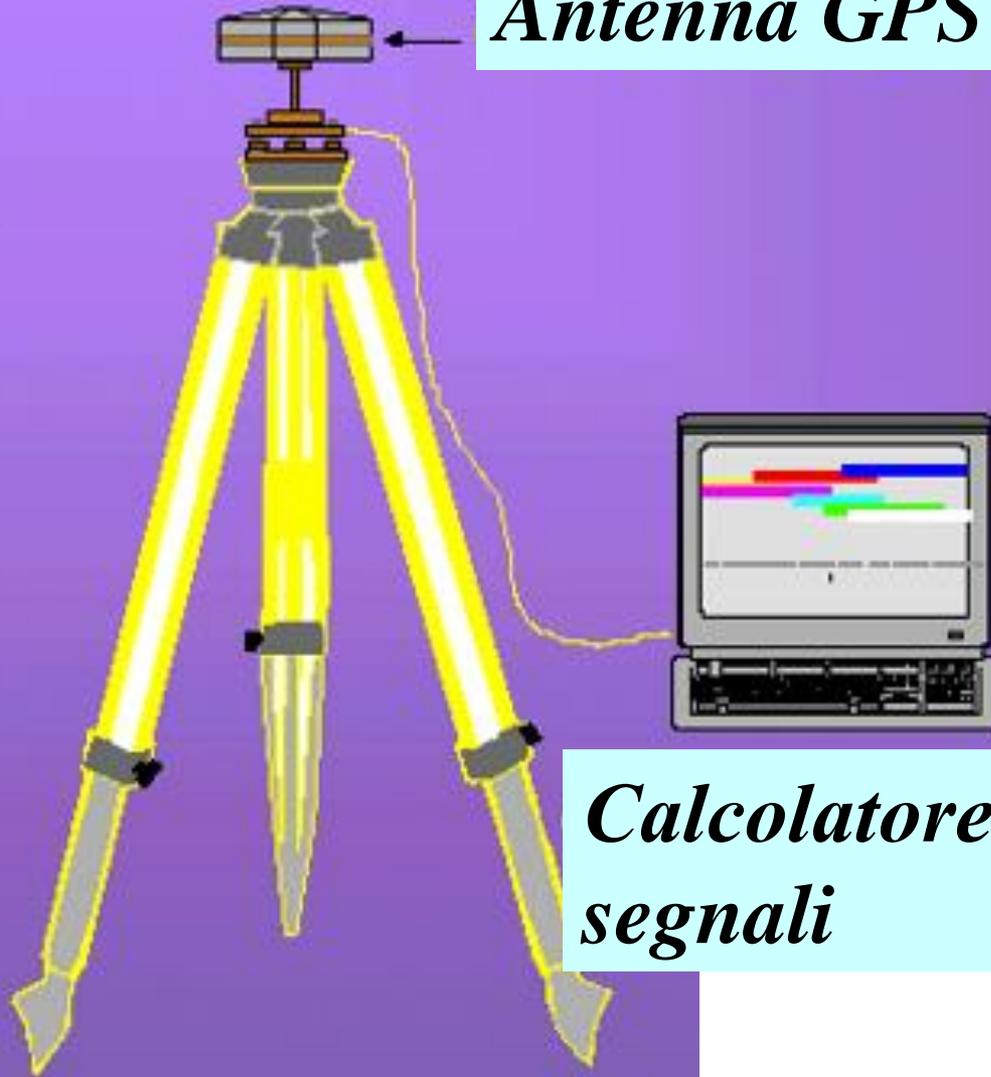
b)



c)



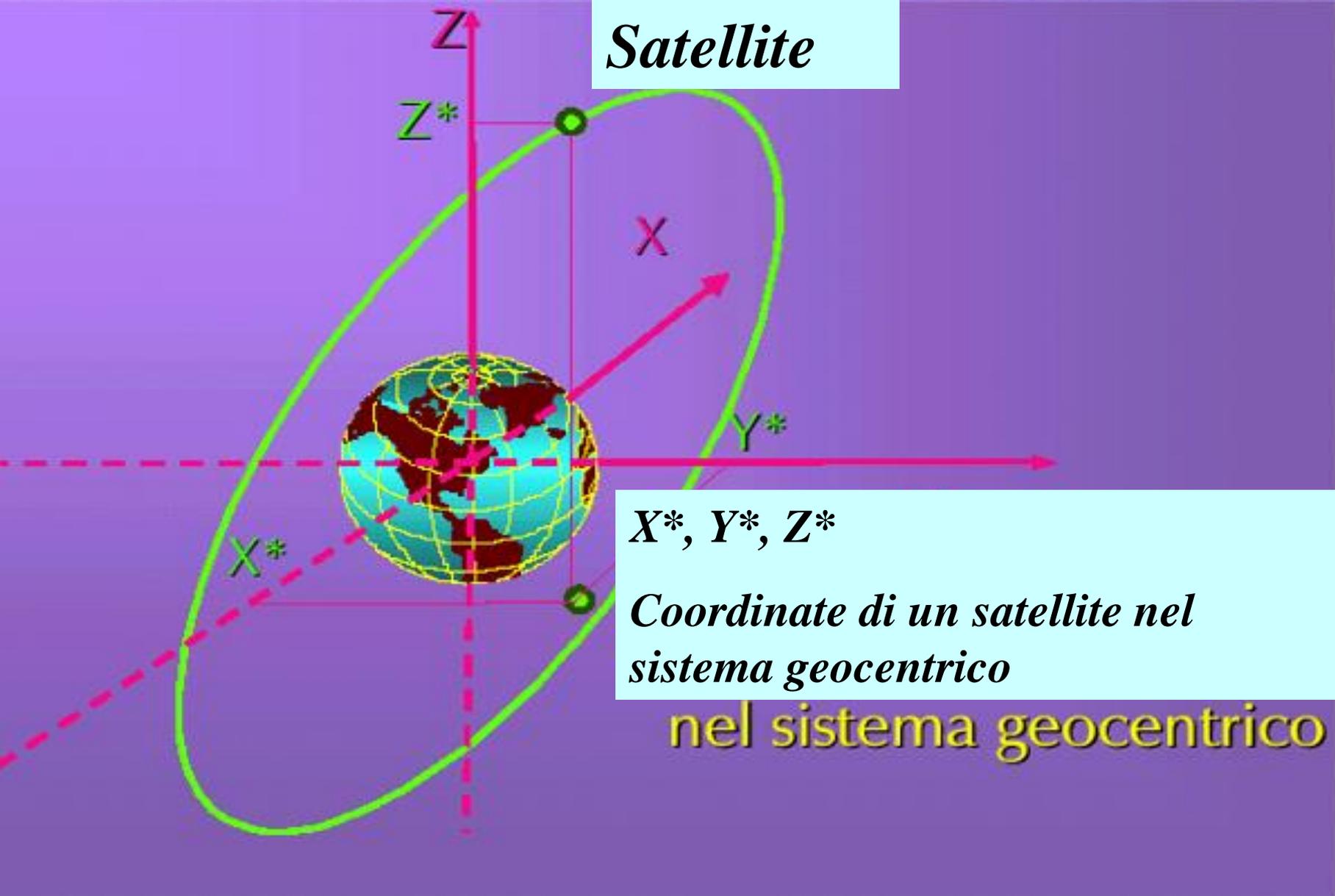
*Antenna GPS*



*Calcolatore per l'elaborazione dei segnali*

*Fonte: Prof.ssa A. Spalla,  
Università di Pavia*

# Satellite



$X^*, Y^*, Z^*$

*Coordinate di un satellite nel  
sistema geocentrico*

*nel sistema geocentrico*



*Il ricevitore GPS è nel punto P e misura le distanze  $D_1$  dal satellite 1,  $D_2$  dal satellite 2 e  $D_3$  dal satellite 3.*

*Fonte: Prof.ssa A. Spalla, Università di Pavia*

$$D_i = \sqrt{(X_P - X_i^*)^2 + (Y_P - Y_i^*)^2 + (Z_P - Z_i^*)^2}$$

*Un programma che conosce la posizione dei tre satelliti, calcola la posizione del punto P*

## Il segnale GPS

---

Alcuni punti chiave:

- i satelliti generano onde piane e le modulano per inviare verso terra le informazioni necessarie ai ricevitori per il posizionamento
- gli orologi atomici di bordo vengono sfruttati per generare onde piane di una prefissata frequenza

Nel GPS esiste quindi una frequenza fondamentale pari a  $f_0 = 10.23 \text{ Mhz}$

## Le portanti - 1

---

Abbiamo detto che con il termine portante si indica l'onda piana utilizzata per modulare un segnale.

In realtà il GPS non utilizza un'unica onda piana ma due differenti onde ottenute a partire dalla frequenza fondamentale.

Da  $f_0$  vengono generate due frequenze:

1.  $f_1 = 154 \cdot f_0 = 1.575420 \text{ Ghz}$
2.  $f_2 = 120 \cdot f_0 = 1.227600 \text{ Ghz}$

I satelliti emettono quindi un segnale complesso caratterizzato dalla presenza di due onde piane portanti dette  $L_1$  e  $L_2$ , aventi frequenze  $f_1$  e  $f_2$ .

## Determinazione della range - 1

---

La stima della distanza è una facile deduzione una volta fatta un'ipotesi sulla velocità di propagazione del segnale (*distanza = tempo · velocità*); tale velocità viene posta, in prima approssimazione uguale alla velocità della luce  $c$ .

In forma analitica:

$$r_i^j = \Delta t_i^j \cdot c$$

dove  $c = 2.998 \cdot 10^8 m/s$

Il sistema GPS si basa sull'ipotesi fondamentale che la posizione dei satelliti nel sistema WGS84 sia nota in ogni istante di tempo. Attraverso il GPS è possibile misurare la distanza tra un punto e almeno tre satelliti di posizione nota, per cui si possono ricavare le coordinate  $(X, Y, Z)$  del punto stesso, risolvendo algebricamente un sistema di tre equazioni in tre incognite del tipo:

$$d_R^i = \sqrt{(X^i - X_R)^2 + (Y^i - Y_R)^2 + (Z^i - Z_R)^2} \quad i=1,3 \quad (1)$$

avendo posto:

- $d_R^i$  = distanza tra il satellite  $i$ -esimo e il punto R (quantità misurata)
- $(X^i, Y^i, Z^i)$  = coordinate dell' $i$ -esimo satellite,  $i=1,2,3$  (quantità note)
- $(X_R, Y_R, Z_R)$  = coordinate del punto R (quantità incognite)

Di fatto la determinazione della distanza può avvenire attraverso la misura del tempo necessario al segnale GPS per giungere dal satellite al ricevitore posto sul punto di coordinate incognite, ottenuta come differenza fra il tempo di ricezione (letto sull'orologio del ricevitore) e del tempo di trasmissione (letto sull'orologio del satellite), per cui occorre che tutti gli orologi (i 3 dei satelliti e quello del ricevitore) siano perfettamente sincronizzati.

Gli orologi dei satelliti possono essere ritenuti adeguatamente sincronizzati fra loro, mentre non si può dire la stessa cosa per l'orologio del ricevitore (di qualità inferiore), per cui nelle equazioni di osservazione ( 1 ) occorre inserire una nuova incognita che tenga conto dello sfasamento (offset) tra la scala temporale degli orologi dei satelliti e la scala temporale del ricevitore.

La presenza di tale l'incognita aggiuntiva richiede pertanto l'osservazione di un quarto satellite affinché sia possibile il posizionamento in tempo reale. Il sistema di equazioni di osservazioni viene riscritto introducendo l'offset  $\Delta T$  :

$$P_R^i = \sqrt{(X^i - X_R)^2 + (Y^i - Y_R)^2 + (Z^i - Z_R)^2} + c \cdot \Delta T \quad i=1,4 \quad (2)$$

dove:

- $P_R^i$  = pseudo-range (pseudodistanza) tra il satellite i-esimo e il punto R. Poiché la misura della distanza vera e propria (range) è perturbata dall'errore di sincronizzazione, essa è chiamata pseudo-range (quantità misurata).
- $(X^i, Y^i, Z^i)$  = coordinate dell'i-esimo satellite,  $i=1,2,3,4$  (quantità note)
- $(X_R, Y_R, Z_R)$  = coordinate del punto R (quantità incognite)
- $\Delta T$  = offset del tempo di ricezione (quantità incognita)
- $c$  = velocità di propagazione del segnale (quantità nota)

Ci sono dunque 4 incognite: le coordinate (tre) del punto in cui è il ricevitore e lo sfasamento (offset) del tempo di ricezione.

Occorre risolvere un sistema in quattro equazioni (una per ogni satellite) e 4 incognite: occorrono in definitiva quattro satelliti visibili, cioè tali che i segnali da essi provenienti siano captati dal ricevitore.

la distanza reale e la quantità misurata sono legate dalla seguente relazione:

$$d_R^i = P_R^i - c \cdot \Delta T \quad (3)$$