
I principi base della Radiolocalizzazione e dei Sistemi di Navigazione Satellitare

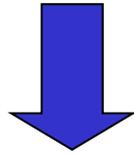
Pierfrancesco Lombardo

Localizzazione (I)

- **Localizzazione** : si vuole determinare la posizione di un utente (in un dato sistema di coordinate di riferimento spaziale) in:
 - un determinato istante temporale (stima di posizione)
 - una sequenza di istanti temporali successivi (tracking)
- **Punti di riferimento** : si assume di effettuare misure rispetto a punti di riferimento di posizione nota nel sistema di coordinate utilizzato.
- **Misure** : si assume di potere effettuare misure, con assegnato errore di misura in istanti di tempo noti (nello stesso sistema di riferimento temporale), di
 - Distanze
 - Angoli
- **Numero di coppie <misura, punto di riferimento>** : almeno pari al numero di incognite (vedi coordinate del sistema di riferimento) – per scrivere numero sufficiente di equazioni

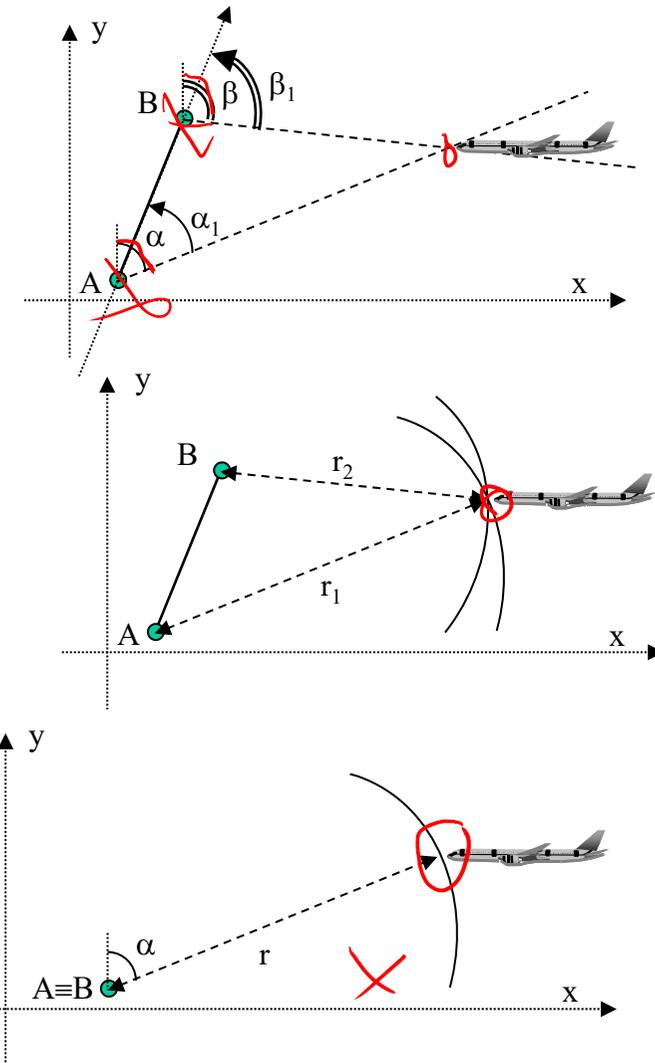
Esempi di Localizzazione nel piano

- 2 coordinate spaziali da determinare



- 2 coppie <misura, punto di riferimento>

- **Due angoli**
(+2 punti di riferimento distinti)
Intersezione fra due rette
- **Due distanze**
(+2 punti di riferimento distinti)
Intersezione fra due circonferenze
- **Un angolo ed una distanza**
(+2 punti di riferimento distinti o coincidenti)
Intersezione fra retta e circonferenza



Esempi di Localizzazione nello spazio

- 3 coordinate spaziali da determinare



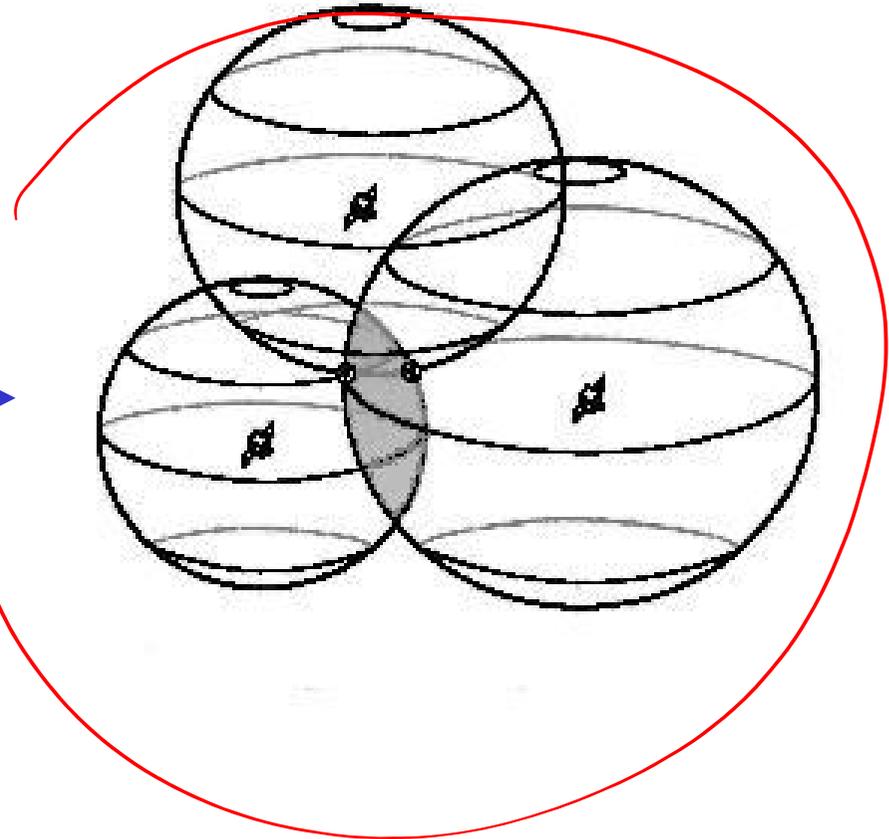
- 3 coppie <misura, punto di riferimento>

- **tre angoli**
(+3 punti di riferimento distinti)
Intersezione fra tre rette

- **tre distanze**
(+3 punti di riferimento distinti)
Intersezione fra tre superfici sferiche

- **due angoli ed una distanza**
(+3 punti di riferimento)
Intersezione fra due rette ed una superficie sferica

- **un angolo e due distanze**
(+3 punti di riferimento)
Intersezione fra una retta e due superfici sferiche



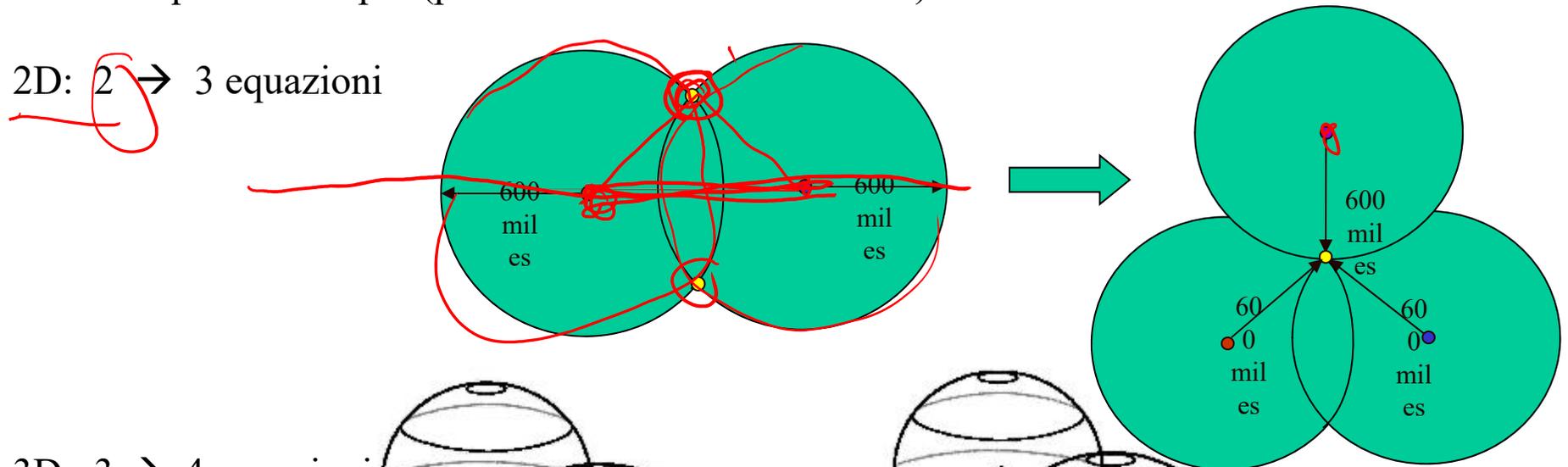
Localizzazione (II)

- **Non Autonoma (Autonoma)** : ha (non ha) bisogno di apparati esterni all'utente da localizzare.
- **Interna/Esterna** : chi effettua le misure e calcola la posizione?
 - Interna: L'utente misura le sue distanze/angoli autonomamente dai punti di riferimento e calcola la sua posizione
 - Esterna: qualcuno dall'esterno misura distanze ed angoli da punti dai punti di riferimento e calcola la posizione dell'utente (può poi decidere se comunicarla all'utente o no).
- **Scopo** : uso dei dati di posizione ottenuti in:
 - navigazione (stima di posizione o tracking): L'utente deve conoscere la sua posizione, quindi
 - Localizzazione interna
 - Localizzazione esterna + sistema di telecomunicazione (TLC)
 - monitoraggio e controllo remoto (stima di posizione o tracking): La posizione deve essere nota in un punto esterno all'utente:
 - Localizzazione esterna effettuata dal punto di monitoraggio/controllo
 - Localizzazione esterna con sistema di TLC per trasferire le misure nel punto di monitoraggio/controllo
 - Localizzazione interna con sistema di TLC per trasferire le misure nel punto di monitoraggio/controllo

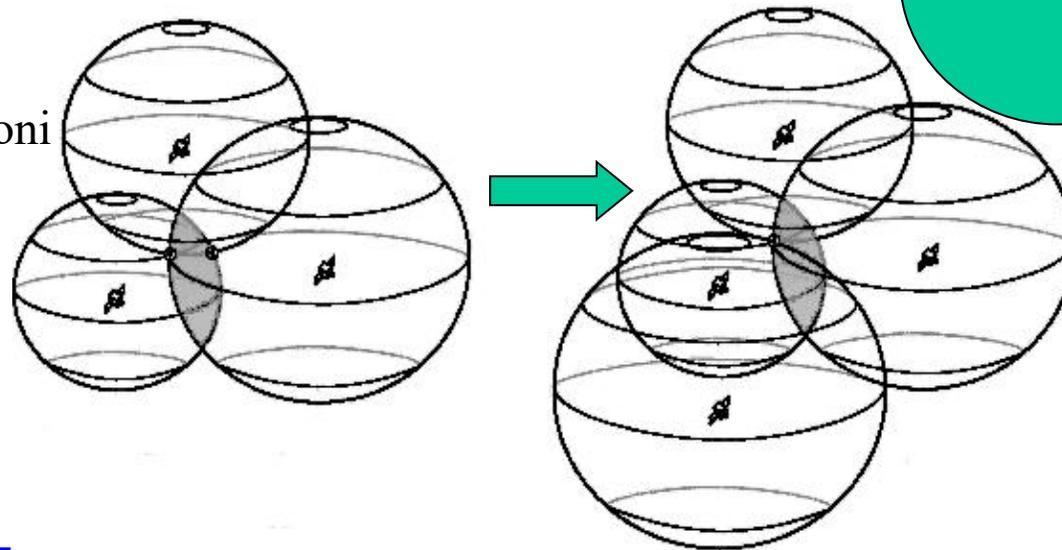
Localizzazione (III)

- **Ambiguità** : per risolvere l'ambiguità fra le due intersezioni, può essere necessaria una equazione in più (punto di riferimento + misura)

2D: 2 → 3 equazioni



3D: 3 → 4 equazioni



Localizzazione (IV)

- **localizzazione** : soluzione di sistema non-lineare di equazioni

$$\begin{cases} f_1(\mu_1; x_1, y_1, z_1; x_u, y_u, z_u) = 0 \\ f_2(\mu_2; x_2, y_2, z_2; x_u, y_u, z_u) = 0 \\ f_3(\mu_3; x_3, y_3, z_3; x_u, y_u, z_u) = 0 \end{cases}$$

Misura

punto di
riferimento

incognite

$$\sqrt{(x_u - x_1)^2 + (y_u - y_1)^2 + (z_u - z_1)^2} - \mu_1 = 0$$

Radio – Localizzazione (I)

- **Radio** : si utilizzano onde radio per effettuare le misure. Dunque si sfrutta la trasmissione, riflessione e ricezione di opportuni segnali e.m.. Trasmettitore, riflettore e ricevitore sono posizionati nella posizione utente e nei punti di riferimento
- **Attivo/passivo** : l'apparato utente è detto attivo se emette un segnale e.m., passivo se riceve soltanto ma non emette radiazioni (non intercettabile/riconoscibile in base alle sue emissioni).
- **Cooperante** : l'apparato utente è detto cooperante, se è necessaria la sua cooperazione per effettuare misure esterne (ad esempio rispondere ad interrogazioni)

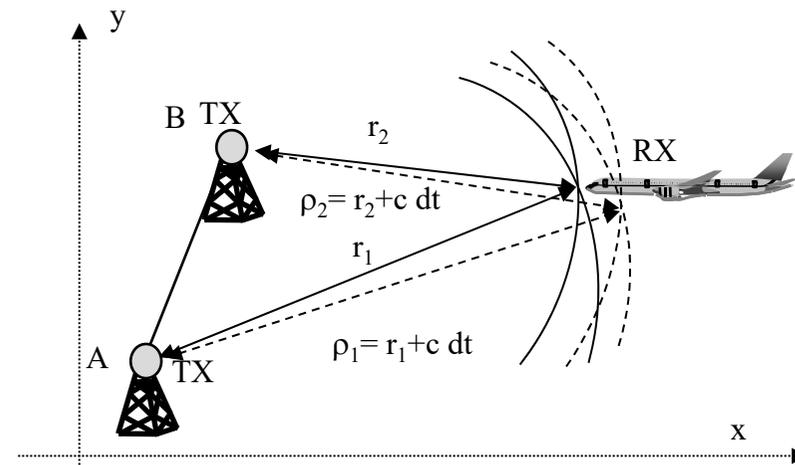
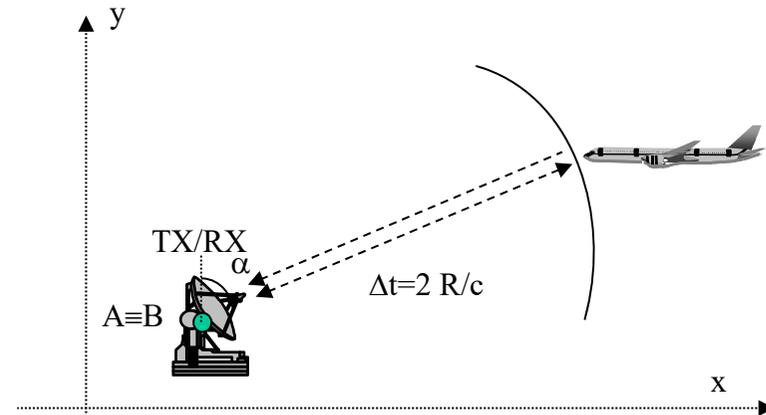
Radio – Localizzazione (III)

classificazione

	2D 3D	Interno Esterno	Attivo Passivo	Utente Cooperante	Sincrono Asincrono	misure			
Radar primario	2D	esterno	passivo	NO	sincrono	Distanza Angolo			
Radar secondario	3D	esterno	attivo	SI	sincrono	Distanza Angolo + quota baro			
2 VOR	2D	interno	passivo	SI	.	2 angoli			
2 DME	2D	interno	attivo	SI	sincrono	2 distanze			
VOR+DME	2D	interno	attivo	SI	sincrono	1 distanza 1 angolo			
VOR									

Esempi di sistemi sincroni/asincroni

- Sistemi con TX ed RX sincroni:
 - Radar primario
 - Radar secondario
 - DME
 - *(tipicamente i sistemi di misura 2 vie)*
- Sistemi con TX ed RX non sincroni
 - Due TX sincroni fra loro, ma orologio in RX non sincronizzato
 - *(tipicamente i sistemi di misura 1 via)*



Global Navigation Satellite System - GNSS

- Il sistema di navigazione satellitare globale GNSS è un sistema per il radio-posizionamento ed il trasferimento di temporizzazione dallo spazio, basato sui segnali trasmessi da una costellazione di satelliti
- Il GNSS mette a disposizione stime di Posizione, Velocità, Tempo (PVT) ad un numero illimitato di utenti nello spazio, nel cielo, a terra ed in mare.
- Le misure passive di PVT sono disponibili in ogni parte del mondo e con ogni tempo in un sistema di riferimento mondiale comune
- Alcuni sistemi contengono caratteristiche per rendere disponibile solo ad utenti autorizzati la accuratezza massima di servizio e protezione da disturbi
- Fra i sistemi GNSS conosciuti:
 - GPS (Global Positioning System) - US
 - GLONASS (GLObal Navigation Satellite System) - Russia
 - GALILEO - Europa

Stima di posizione da misure di distanza (I)

- **Assunzioni:**

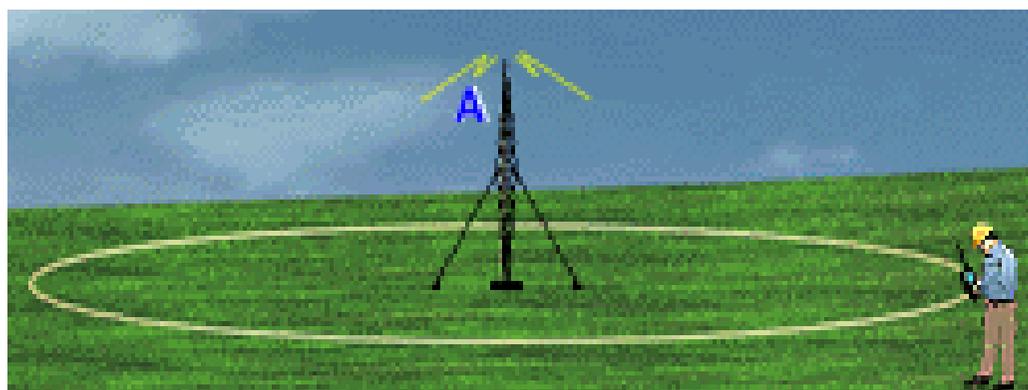
- 1) i punti di riferimento (A, B,..) sono noti
- 2) si ha un dispositivo in grado di misurare la distanza dai punti di riferimento

riferimento

- **Caso 2D**

posizionamento su una superficie :

- la distanza ρ_A da un punto di riferimento A permette di localizzare la posizione su una circonferenza di raggio assegnato ρ_A



- la distanza da due punti di riferimento A e B permette di stimare la posizione come uno dei due punti di intersezione delle due circonferenze di raggio assegnato ρ_A e ρ_B

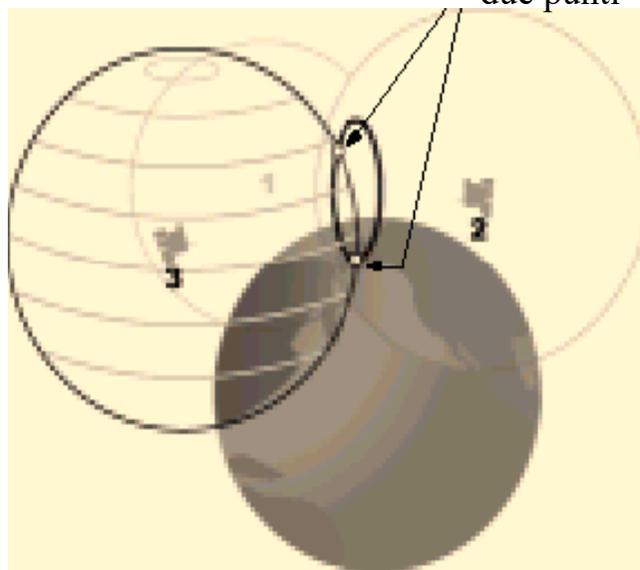
- resta una ambiguità che può essere risolta con conoscenza a priori o usando un terzo punto di riferimento C

Stima di posizione da misure di distanza (II)

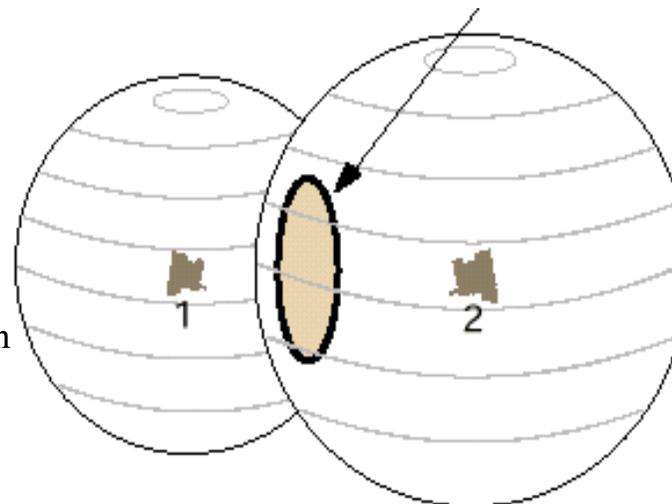
- **Caso 3D**

posizionamento nello spazio :

- le distanze da due punti di riferimento permettono di localizzare la posizione su una circonferenza di raggio assegnato



posizione localizzata sulla circonferenza:
intersezione delle due sfere



- la distanza da tre punti di riferimento permette di stimare la posizione come uno dei due punti di intersezione delle tre sfere di raggio assegnato
- resta una ambiguità che può essere risolta con conoscenza a priori (so di essere vicino alla terra e non nello spazio) o usando un quarto punto di riferimento

Radio – Localizzazione (II)

- **Misure tramite segnali Radio :**
 - **Angoli** : si sfrutta la forma del fascio di antenna per misurare la direzione di arrivo dell'onda e.m.:
 - Fascio di antenna direttivo convenzionale: massimo del fascio di antenna nella direzione del segnale
 - Antenna tipo monopulse: si sfrutta lo zero con alta precisione
 - **Distanze** : si determina la distanza in base al tempo necessario ad un segnale e.m. per percorrerla, assumendo una propagazione alla velocità della luce (eventualmente con opportune correzioni)

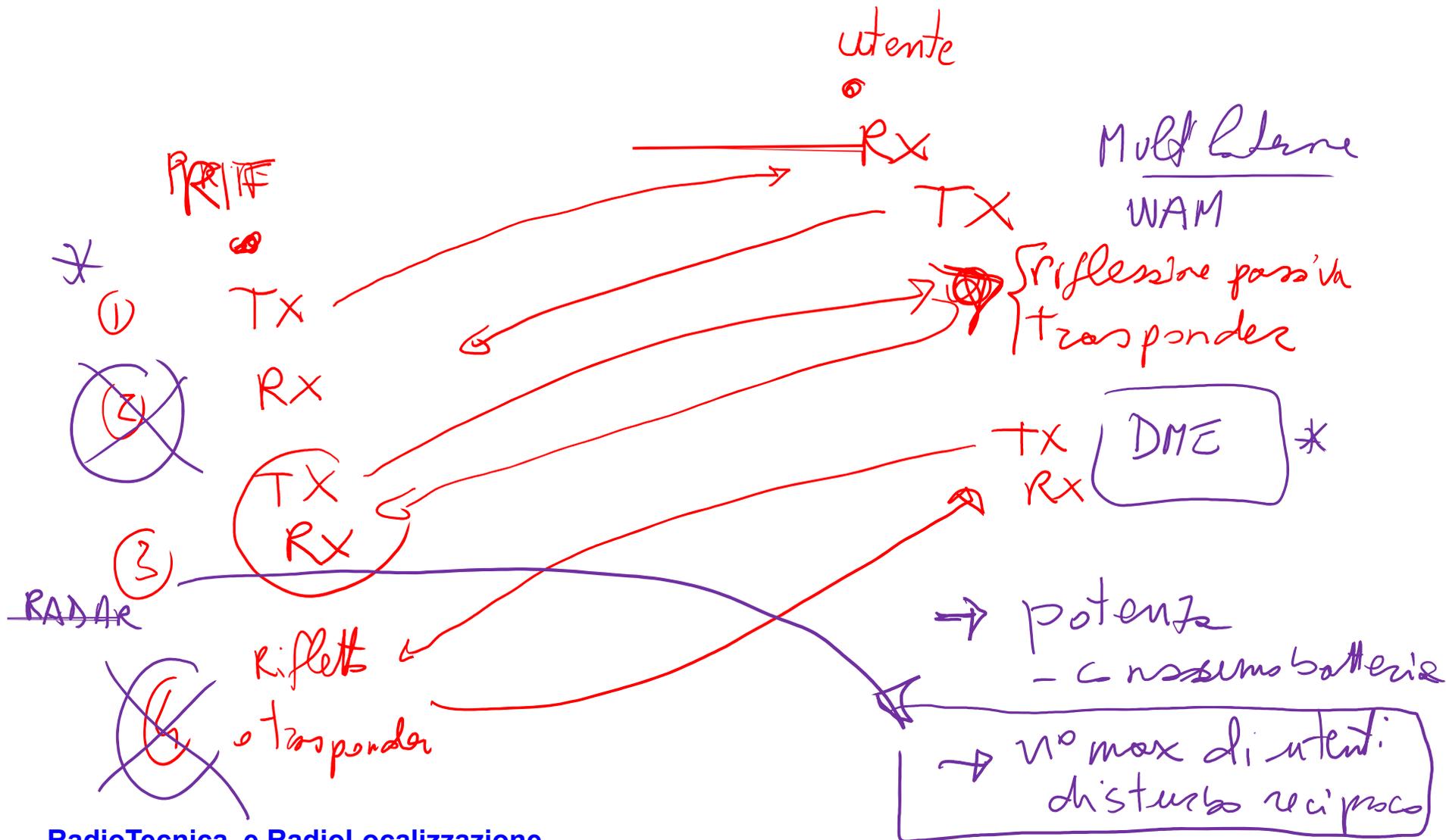
Misura di distanza con segnali radio

- **stima di distanza come stima di Tempo di Arrivo:**

- il punto di riferimento è costituito da un trasmettitore che emette un determinato segnale radio
- la distanza dal punto di riferimento A può essere stimata attraverso la misura del tempo che il segnale impiega per raggiungere il ricevitore (velocità della luce nel vuoto $3 \cdot 10^8$ m/s)

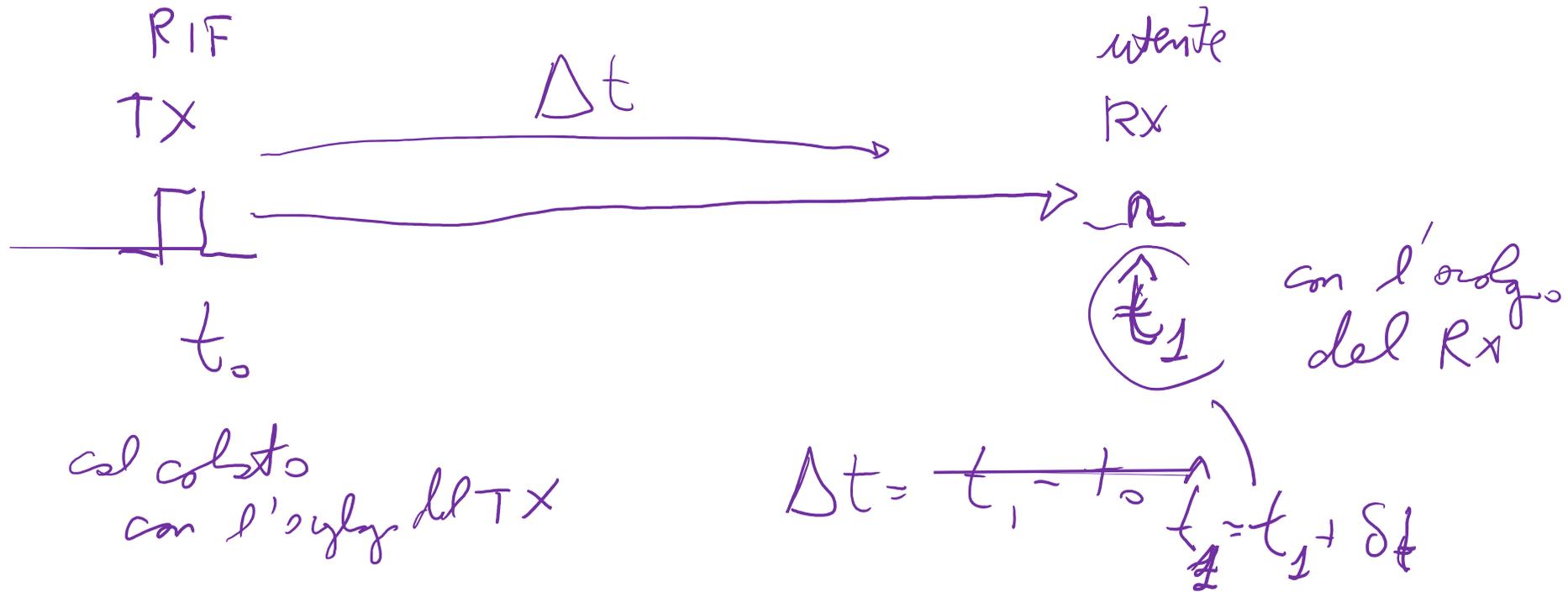
- **Problema del riferimento temporale:**

- *sistemi attivi* (RADAR): TX ed RX sono coincidenti ed usano la stessa temporizzazione, dunque basta che il sistema ricordi il tempo di trasmissione (non serve sistema di riferimento dei tempi assoluto)
- *sistemi passivi*: TX è nel punto di riferimento, mentre RX è nella posizione da determinare. TX ed RX dovrebbero avere lo stesso riferimento temporale ($1 \mu\text{s} = 300$ m, $1 \text{ ns} = 0.3$ m, dunque per avere accuratezza del metro gli orologi devono essere sincronizzati al ns)



misura Δt

$$R = c \cdot \Delta t$$



in pratica
$$\rho = (\hat{t}_1 - t_0) \cdot c = c \cdot (t_1 - t_0 + \delta t) =$$

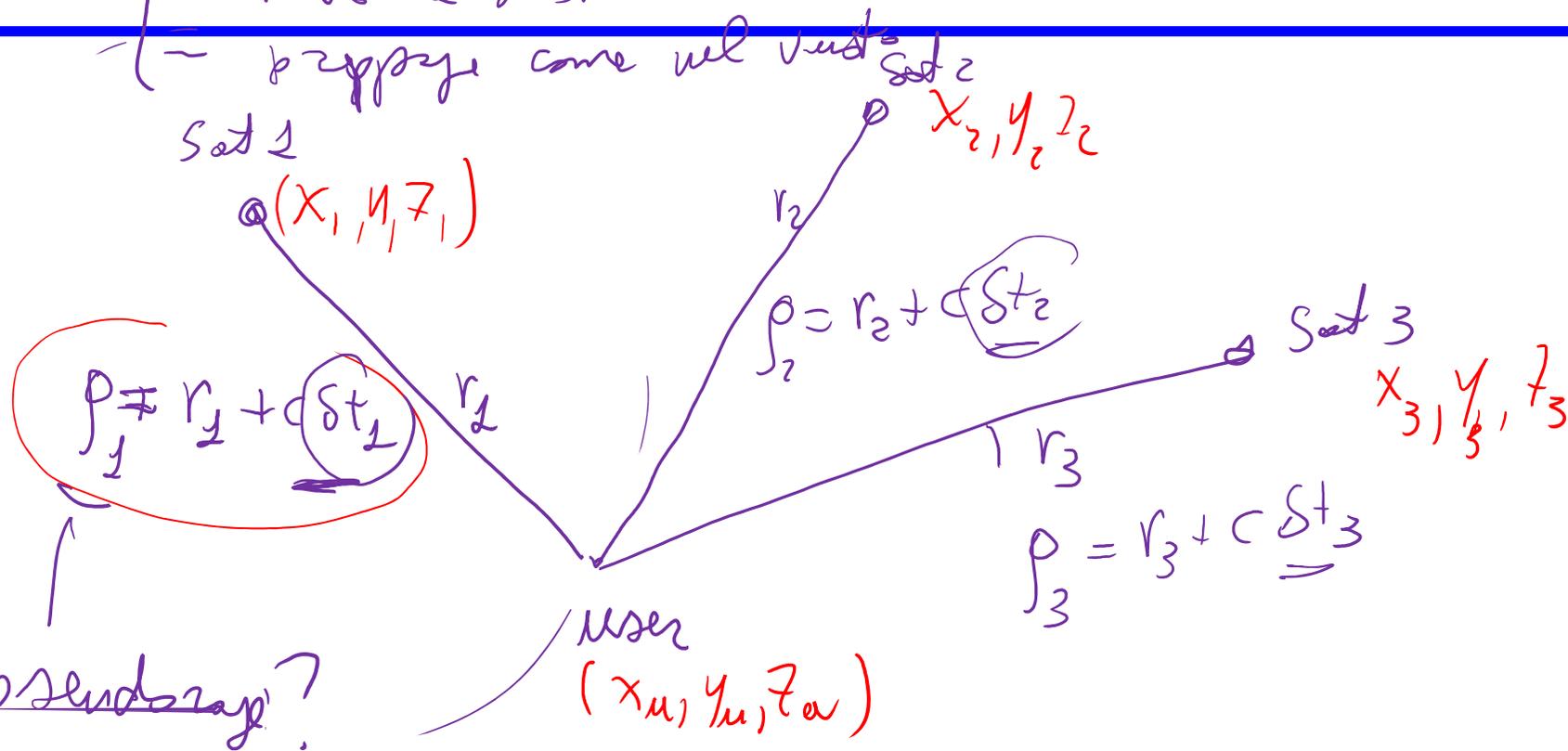
$$= \underline{c \Delta t} + c \delta t = R + \underline{c \delta t}$$

$$\delta t = ? \quad 10^{-6} \text{ s}$$

$$c \delta t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^{-6} = 300 \text{ m}$$



- H_p :
- conoscere ~~esatte~~ posizioni satellitari
 - misura distanza
-
- proporre come nel vuoto



$$\sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} - \rho_1 + c \delta t_1 = 0$$

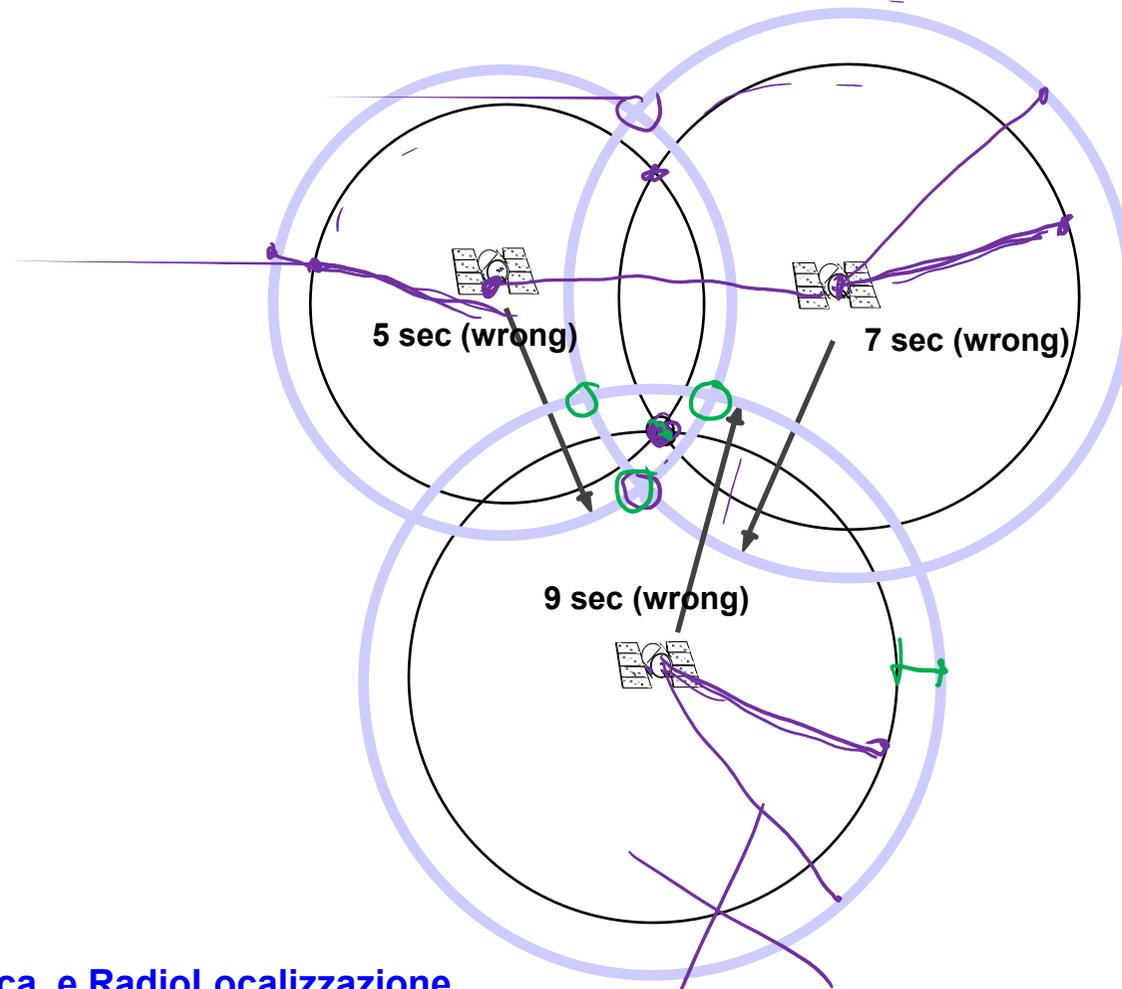
$$\sqrt{(x_2 - x_u)^2 + \dots} - \rho_2 + c \delta t_2 = 0$$

Dealing with Clock Error

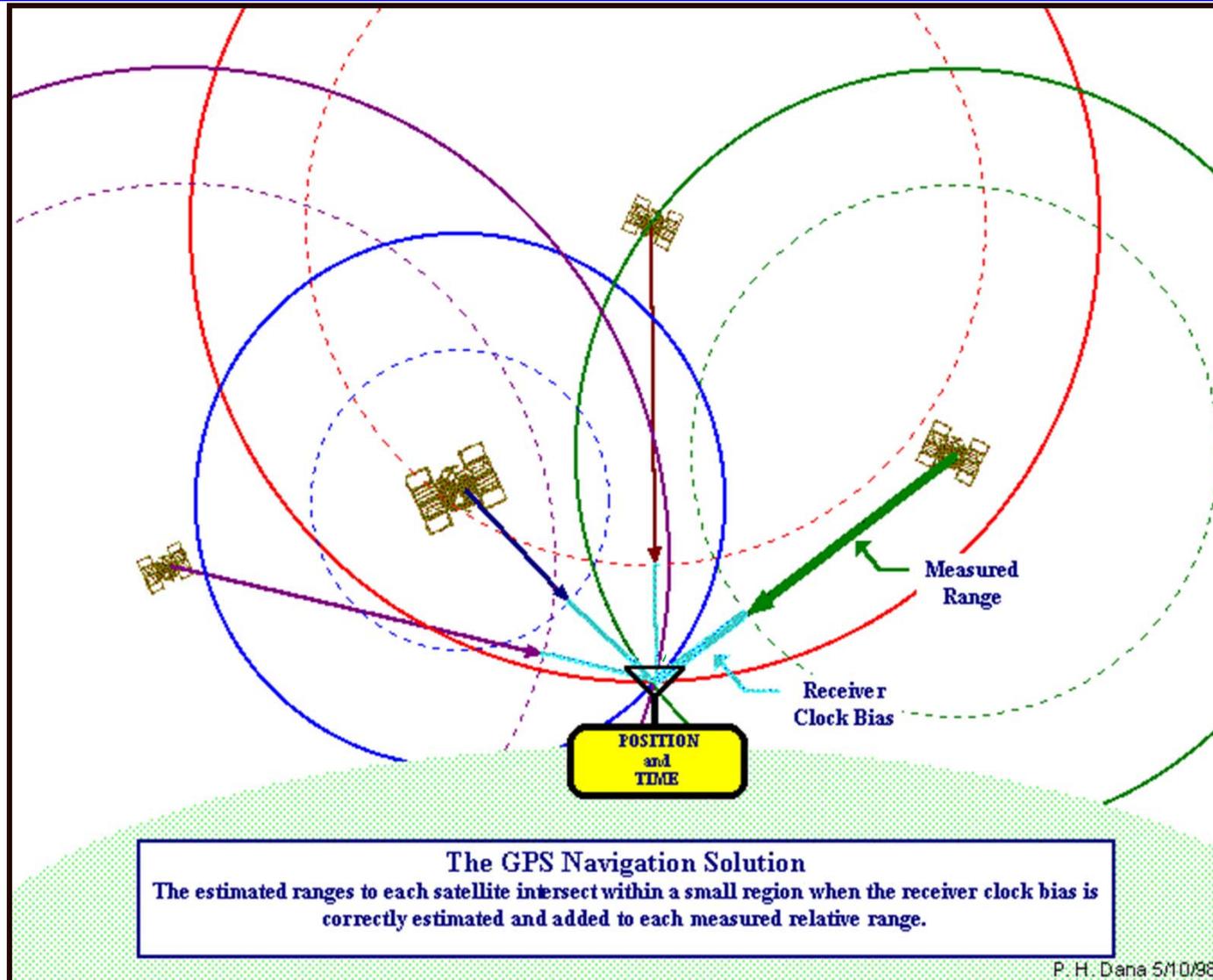
- Clocks onboard the GPS satellites are highly accurate.
- The problem is with the receiver.
- The problem is solved within the receiver through the use of a hardwired algebraic equation called “four equations for four unknowns”

Clock Offset

- The three spheres will not intersect



How Does GPS Work?

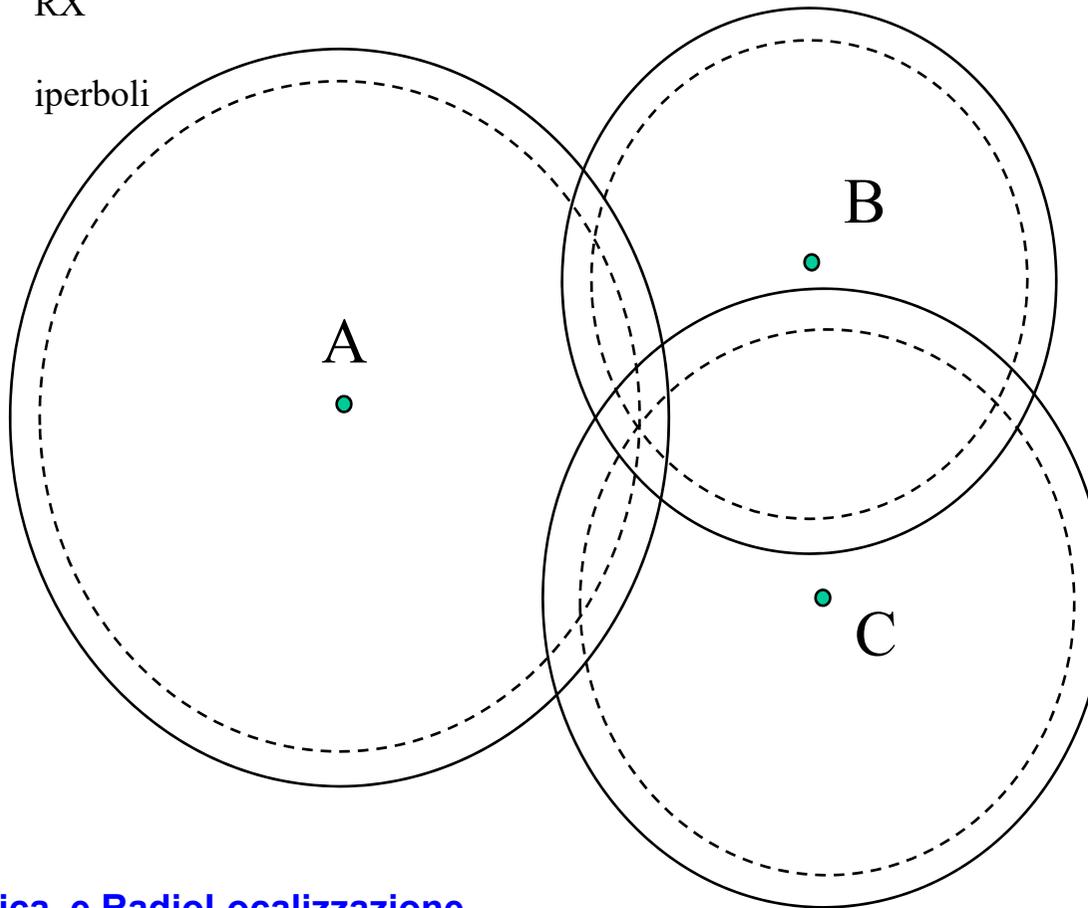


Esempio in 2D

- **Eliminazione di offset comune:**

RX

iperboli

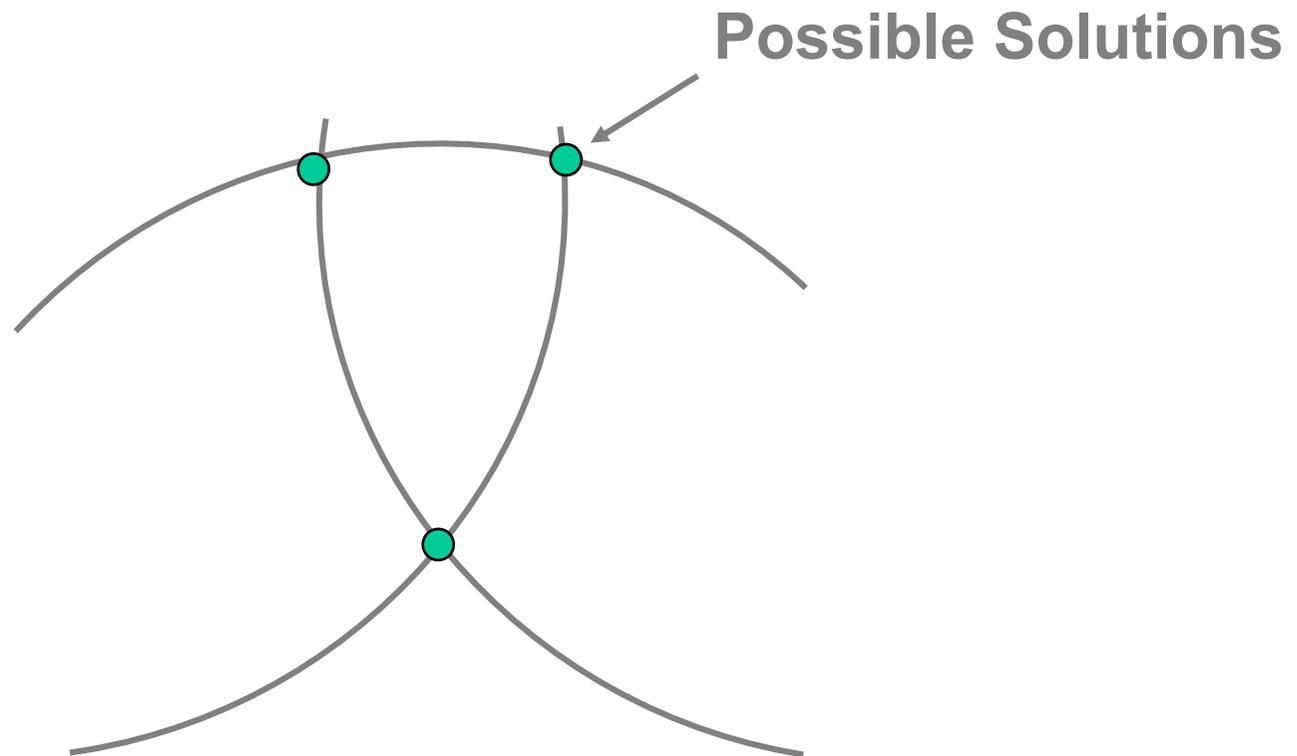


- TX sincronizzati
- offset comune solo dovuto al
- solo differenza di distanze: 2
- serve un riferimento in più (= stimare anche l'offset)

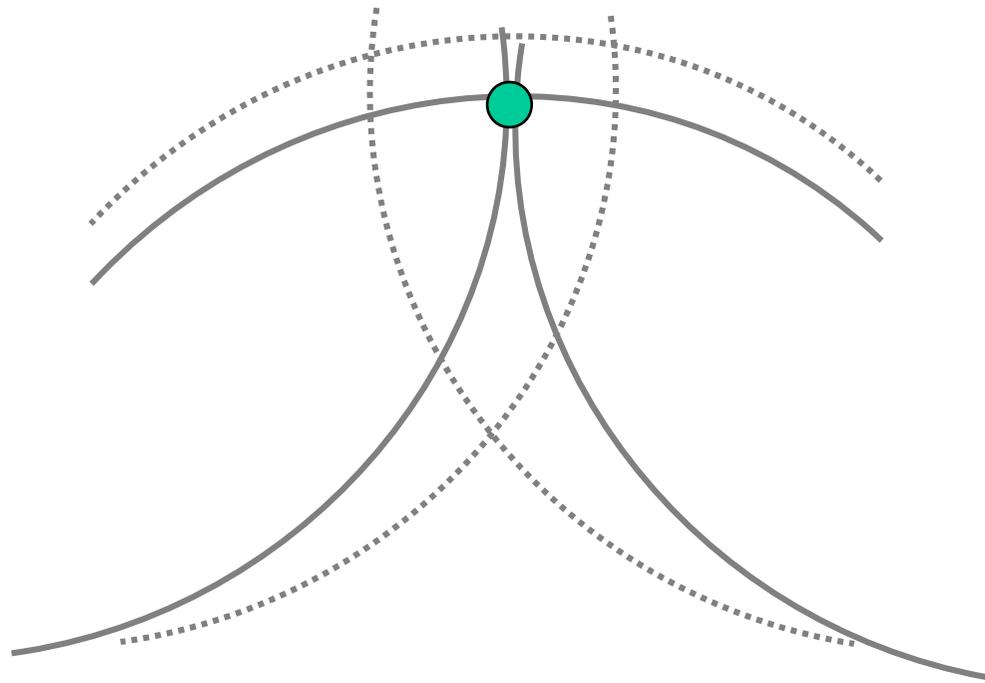
- **Caso 3D del GNSS:**

- (almeno) 4 equazioni (non lineari) in 4 incognite (x,y,z,t)
- è necessario avere almeno 4 satelliti in vista per risolvere il sistema di equazioni

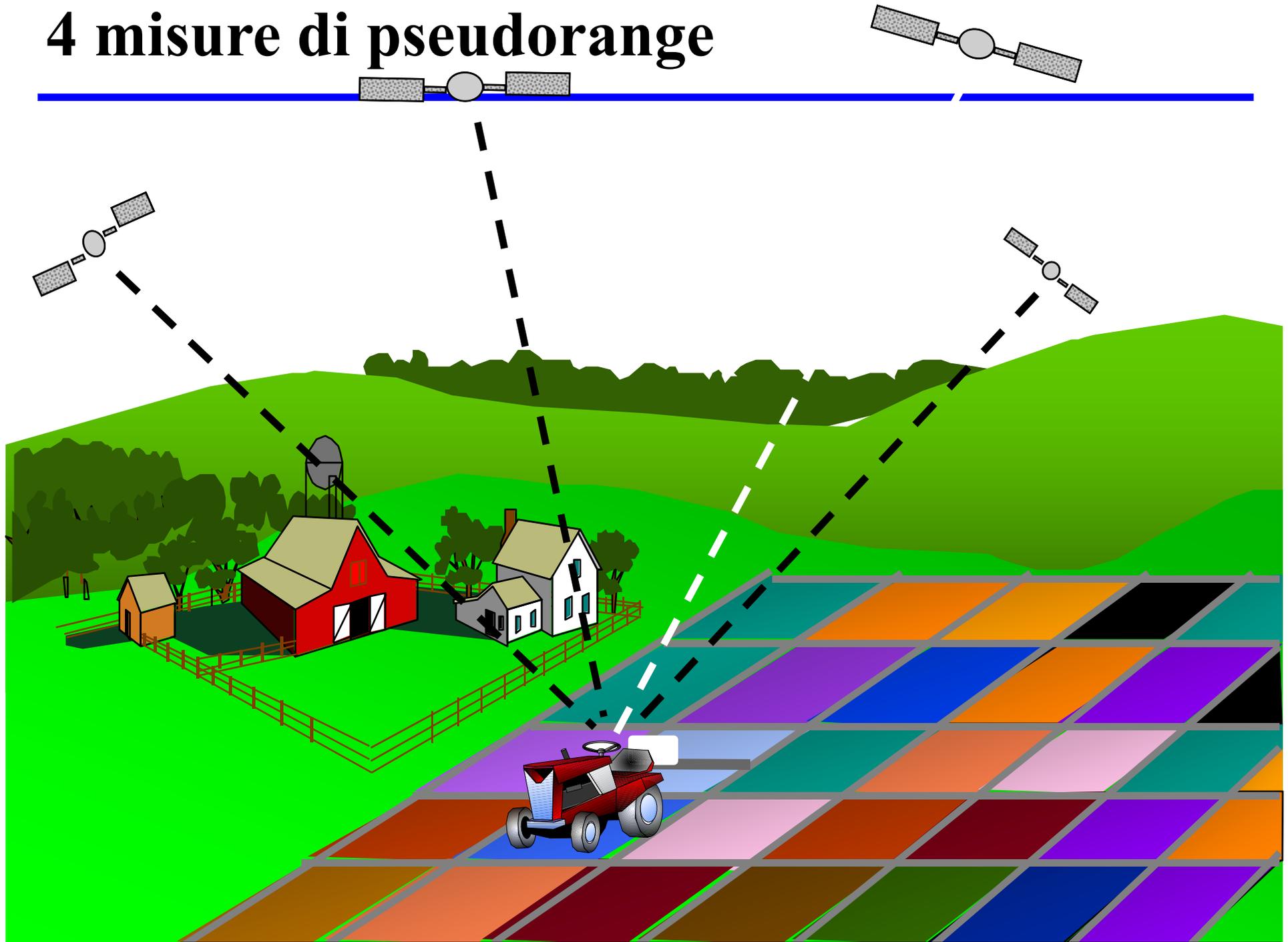
Effetto dell'errore sul clock



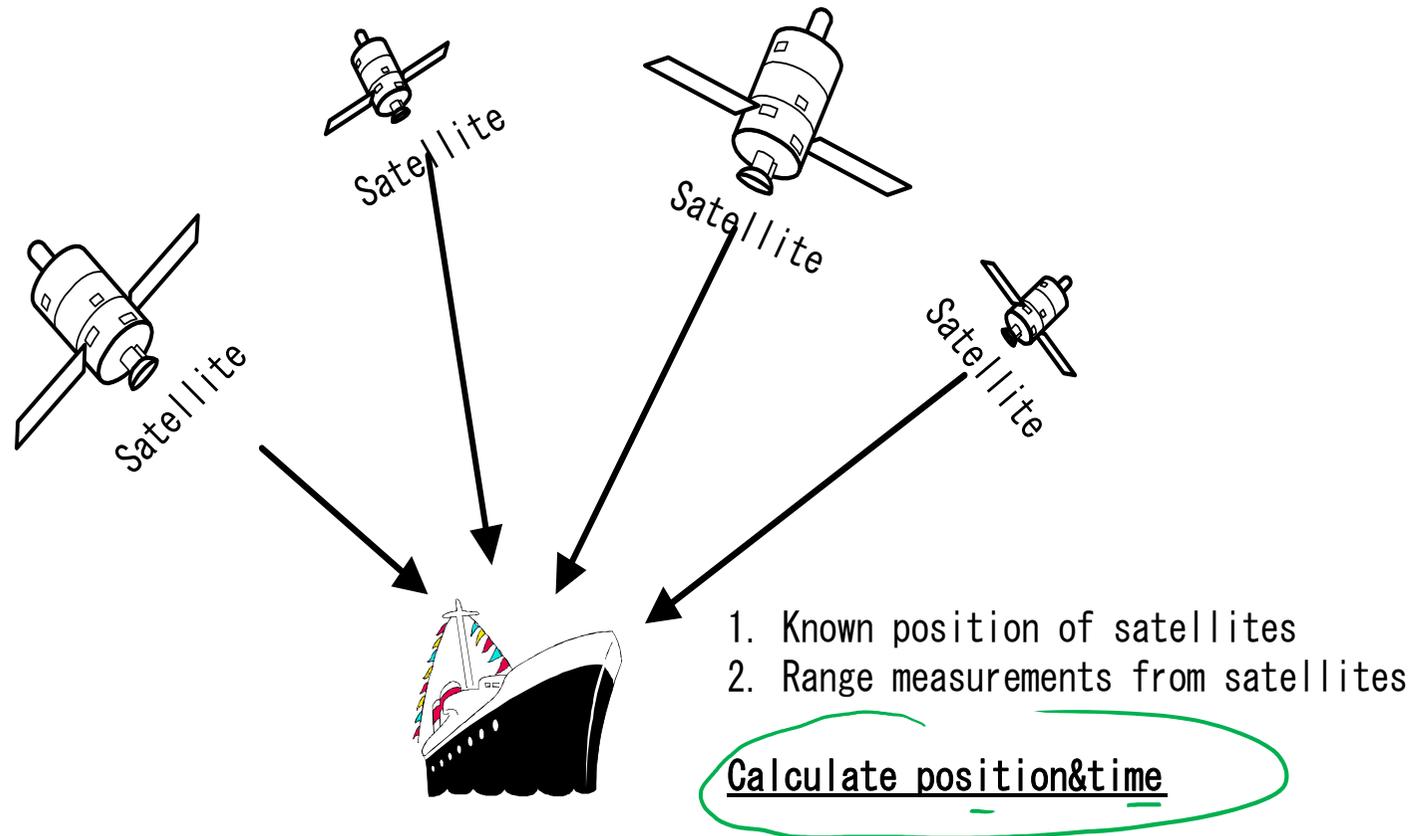
Sincronizzazione dell'orologio del ricevitore

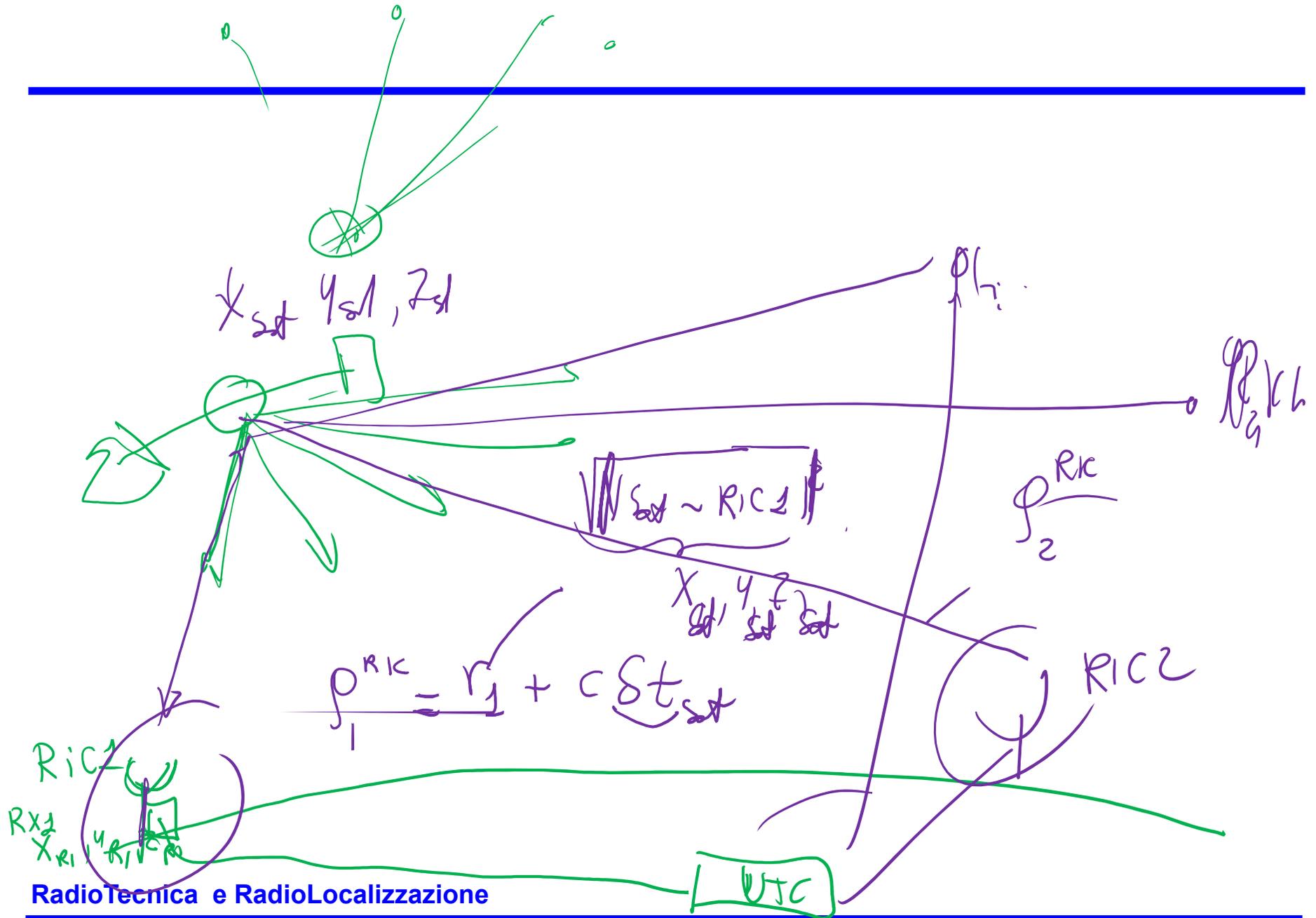


4 misure di pseudorange

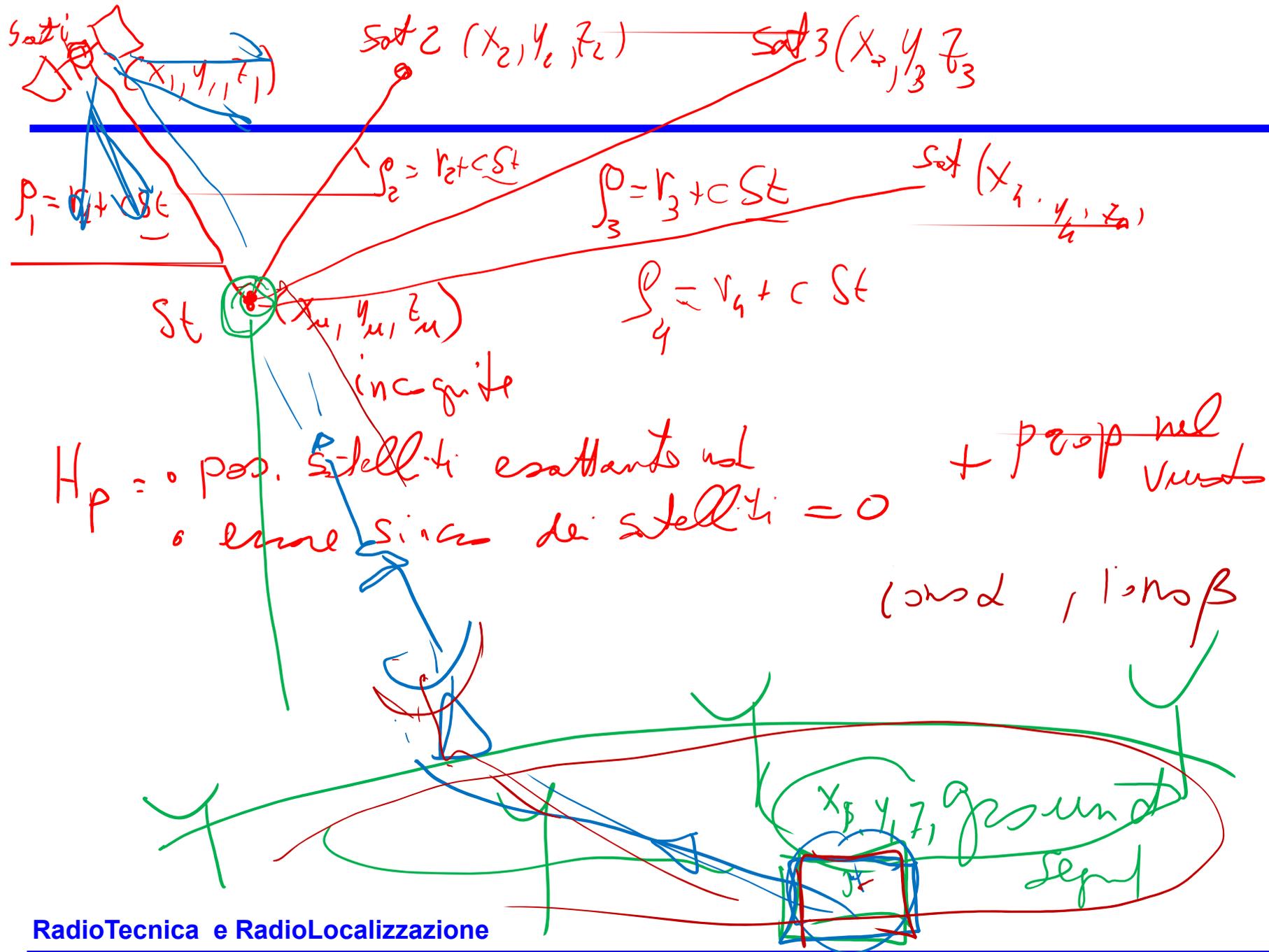


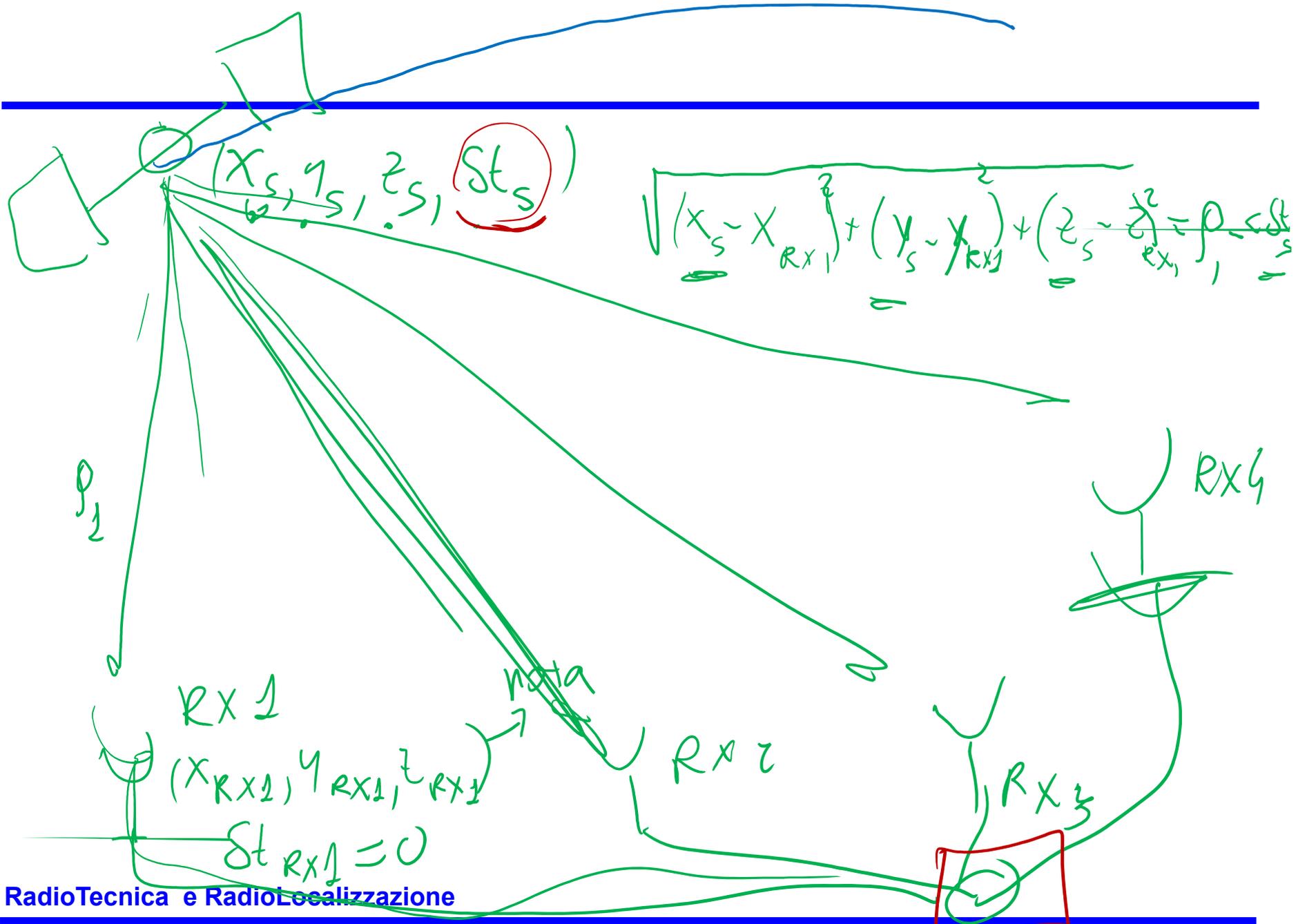
4D Positioning

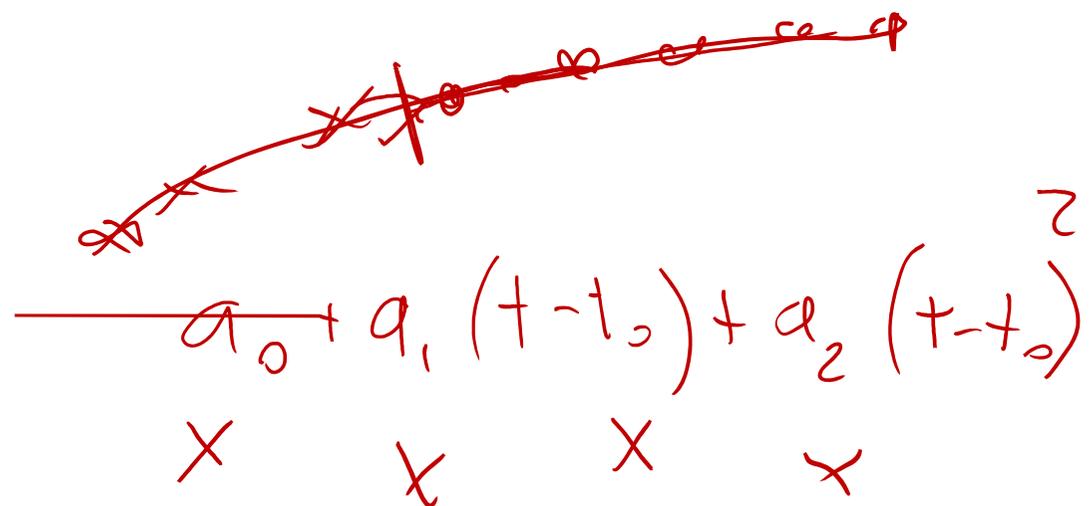




RadioTecnica e RadioLocalizzazione







Fondamenti di navigazione satellitare

• Condizioni per la radio-localizzazione:

- 1) La posizione dei punti di riferimento deve essere nota (Orbite satelliti e dati di effemeridi)*
- 2) L'istante di trasmissione dai punti di riferimento deve essere noto (correzioni orologi satelliti)*
- 3) Si devono poter rimuovere effetti che alterano la propagazione e.m. (correzione ionosferica etc...)*
- 4) Il ricevitore deve avere esattamente lo stesso riferimento temporale del trasmettitore o essere in grado di eliminare un offset comune a tutte le misure di distanza dai riferimenti (inversione sistema di almeno 4 equazioni)
- 5) il ricevitore deve essere in grado di misurare l'istante di arrivo del segnale inviato dal trasmettitore (forma d'onda e sua elaborazione)
(forma d'onda non ambigua, noti: forma d'onda trasmessa, frequenza, ecc...)

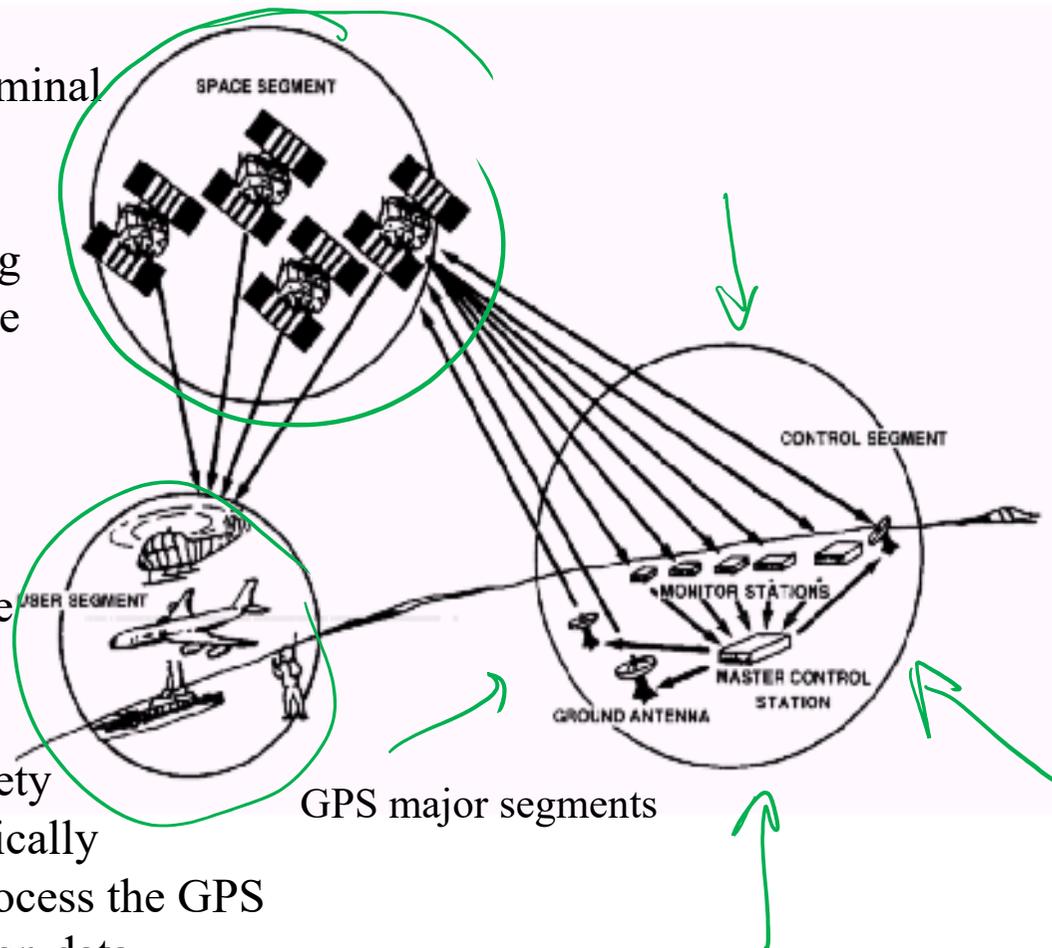
* Sono dati riportati nel messaggio di navigazione, trasmesso dal riferimento stesso

Misura di distanza con segnali radio

- **Effetti che alterano il tempo di arrivo di segnali e.m:**
 - ionosfera: dipendente dalla frequenza
 - troposfera: in dipendente dalla frequenza
 - rumore termico del ricevitore
 - ritardo nei circuiti del ricevitore
 - multipath
 - errori orbitali
 - degradazione intenzionale (SA=selective availability rimossa 1° Maggio 2000)

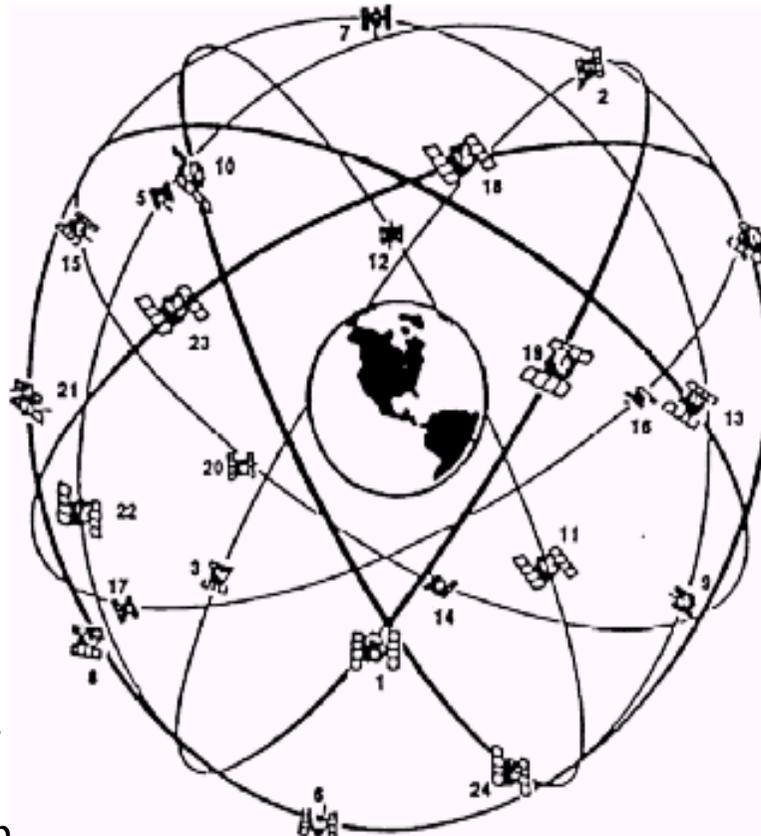
I 3 segmenti principali del GPS

- The space segment consists of a nominal constellation of 24 Navstar Satellites
- Each satellite broadcasts RF ranging codes and a navigation data message
- The control segment consists of a network of monitoring and control facilities which are used to manage the satellite constellation and update the navigation data messages
- The user segment consists of a variety of radio navigation receivers specifically designed to receive, decode, and process the GPS satellite ranging codes and navigation data messages



GPS: space segment

- constellation of 24 Navstar Satellites in semi-synchronous orbit (approx. 12 hours)
- the satellites are arranged in 6 orbital planes
4 satellites in each plane
- the orbital planes have an inclination angle of 55° with respect to the earth's equator
- the satellites have an average orbit altitude of 20200 km above the earth's surface
- the deployment in orbital planes assures that 4 satellites are always in view from every point on the surface with good geometric relationship for positioning



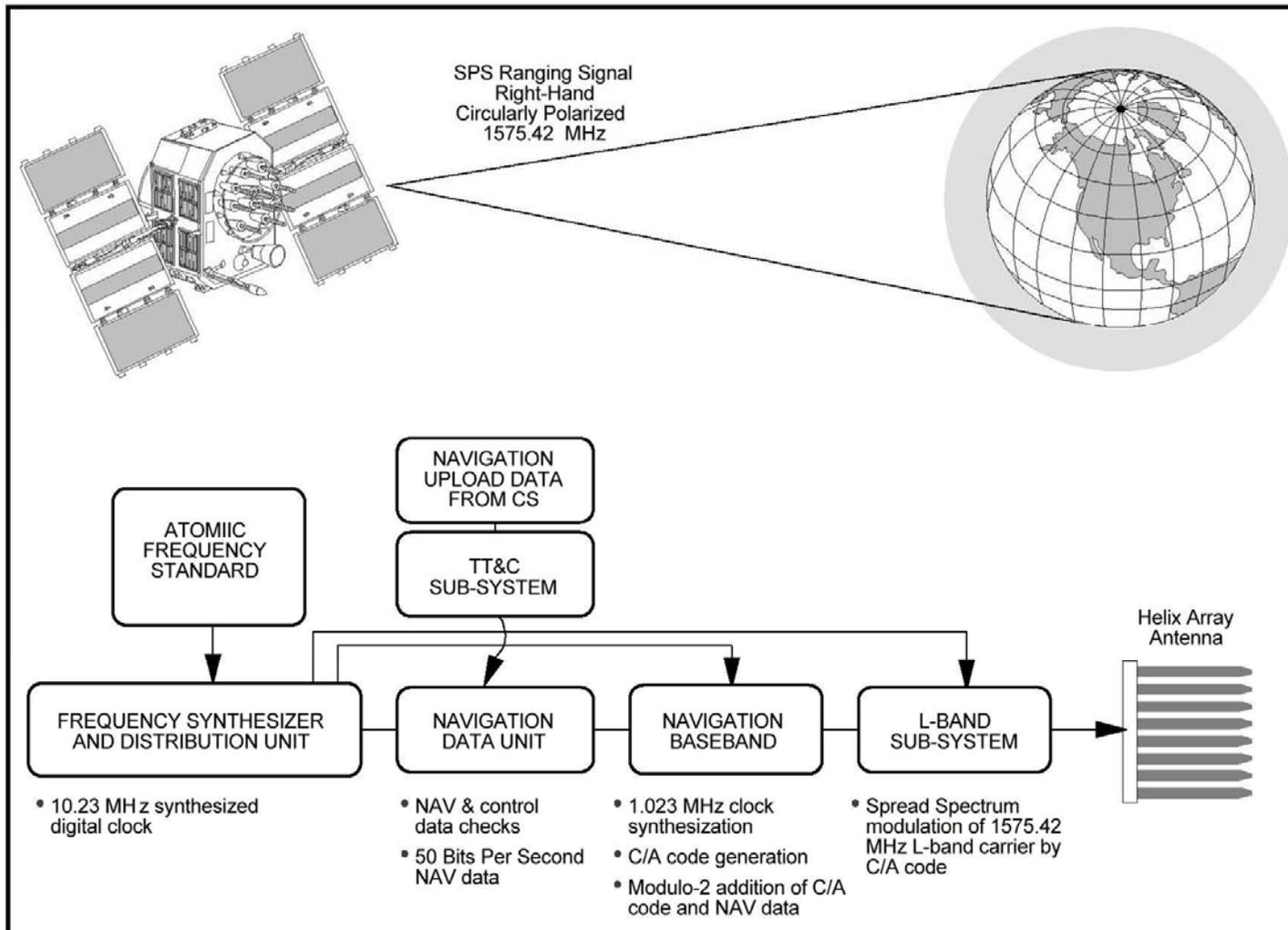
satellite constellation

GPS: space segment (II)

- The satellites transmit ranging signals on two D-band frequencies:

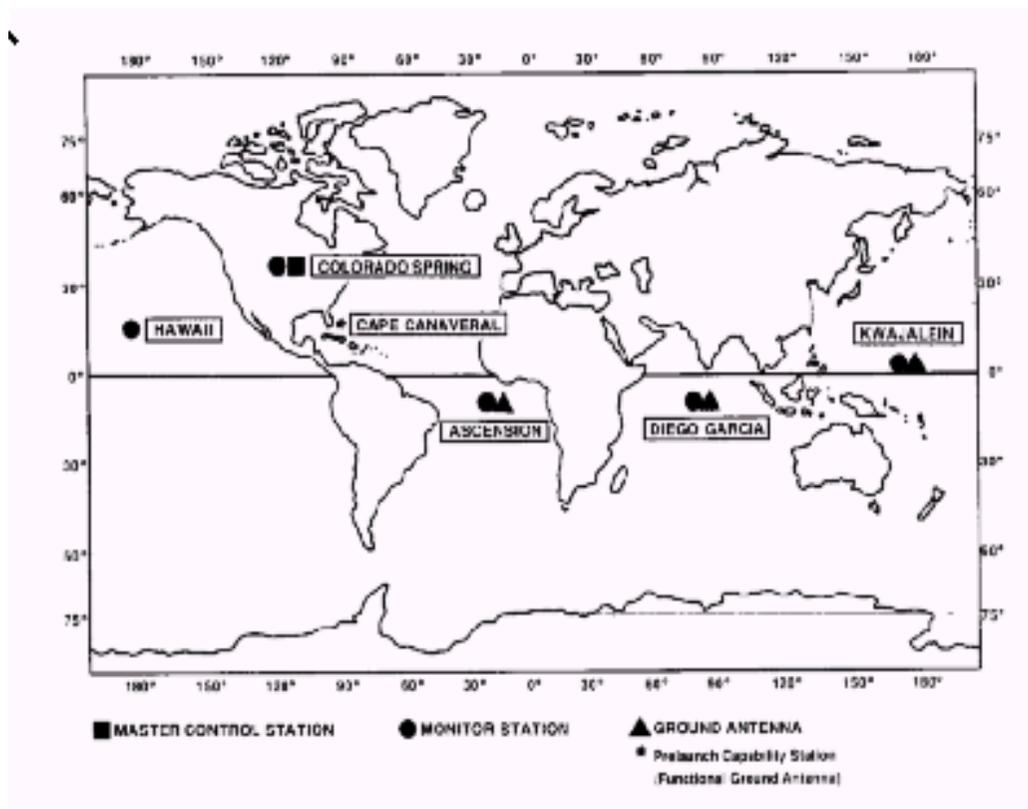
Link 1 (L1)	at	1575.42 MHz
Link 2 (L2)	at	1227.6 MHz.
- The satellite signals are transmitted using spread-spectrum techniques, employing two different ranging codes as spreading functions:
 - a 1.023 MHz coarse/acquisition code (C/A-code) on L1 and
 - a 10.23 MHz precision code (P-code) on both L1 and L2.
- Either the C/A-code or the P-code can be used to determine the range between the satellite and the user, however, the P-code is normally encrypted and available only to authorized users. When encrypted, the P-code is known as the Y-code.
- A 50 Hz navigation message is superimposed on both the P(Y) -code and the C/A-code.
- The navigation message includes satellite clock-bias data, satellite ephemeris (precise orbital) data for the transmitting satellite, ionospheric signal-propagation correction data, and satellite almanac (coarse orbital) data for the entire constellation.

GPS: space segment (III)



SPS Ranging Signal Generation and Transmission

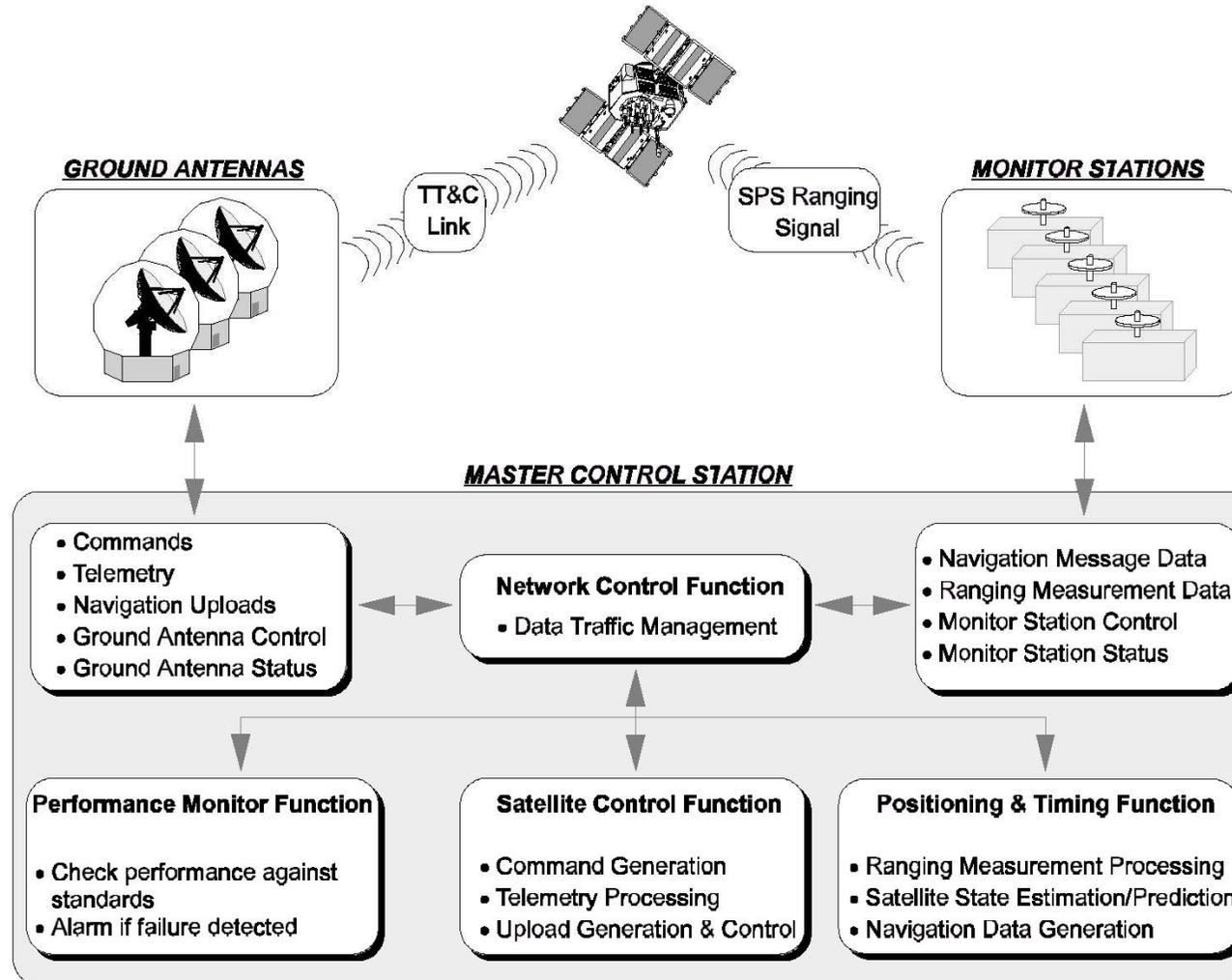
GPS: control segment



- **Master Control Station (MCS)**, at Falcon Air Force Base (AFB) in Colorado Springs, USA,
- **monitor stations (MS)**
- **ground antennas (GA)** at various locations
- **Pre-launch Compatibility Station (PCS)** located at Cape Canaveral, USA,
- **back-up MCS** capability.

RadioTecnica e RadioLocalizzazione

GPS: control segment (II)



The GPS Control Segment

GPS: user segment

- The User Segment consists of receivers specifically designed to receive, decode, and process the GPS satellite signals.
- Receivers can be stand-alone, integrated with or embedded into other systems.
- GPS receivers can vary significantly in design and function, depending on their application for navigation, accurate positioning, time transfer, surveying and attitude reference.

GPS services:

Two levels of service are provided by the GPS:

- the **Precise Positioning Service (PPS)** and
- the **Standard Positioning Service (SPS)**.

GPS: Precise Positioning Service

- The PPS is an accurate PVT estimation service which is available only to authorized users.
- The PPS is primarily intended for military purposes.

- The PPS is specified to provide 16 metres Spherical Error Probable (SEP) (3-D, 50%) positioning accuracy and 100 ns (one sigma) Universal Coordinated Time (UTC) time transfer accuracy to authorized users. (approx. 37 metres (3-D, 95%) and 197 nanoseconds (95%) under typical conditions)

- PPS receivers can achieve 0.2 m/s 3-D velocity accuracy, depending on receiver design.

- Access to the PPS is controlled by two features using cryptographic techniques, **Selective Availability (SA)** and **Anti-Spoofing (A-S)**:
 - SA** is used to reduce GPS position, velocity, and time accuracy to the unauthorized users. SA operates by introducing pseudorandom errors into the satellite signals.
 - The **A-S** feature is activated on all satellites to negate potential spoofing of the ranging signals. The technique encrypts the P-code into the Y-code. C/A code is not protected against spoofing.

- Encryption keys are provided to PPS users which allow them to remove the effects of SA and A-S
- PPS receivers that have not been loaded with a valid cryptographic key perform as an SPS receiver.
- PPS receivers can use either the P(Y)-code or C/A-code or both.
- Maximum GPS accuracy is obtained using the P(Y)-code on both L1 and L2.
- P(Y)-code capable receivers commonly use the C/A-code to initially acquire GPS satellites.

RadioTecnica e RadioLocalizzazione

GPS: Standard Positioning Service

- The SPS is a less accurate positioning and timing service which is available to all GPS users.
- In peacetime, the level of SA is controlled to provide 100 m (95%) horizontal accuracy (approx. equal to 156 m 3D (95%).
- SPS receivers can achieve approximately 337ns (95%) UTC time transfer accuracy.
- System accuracy degradations can be increased if necessary, for example, to deny accuracy to a potential enemy in time of crisis or war. Only the President of the United States, acting through the U.S. National Command Authority, has the authority to change the level of SA to other than peacetime levels.
- The SPS is primarily intended for civilian purposes, although it has potential peacetime military use.