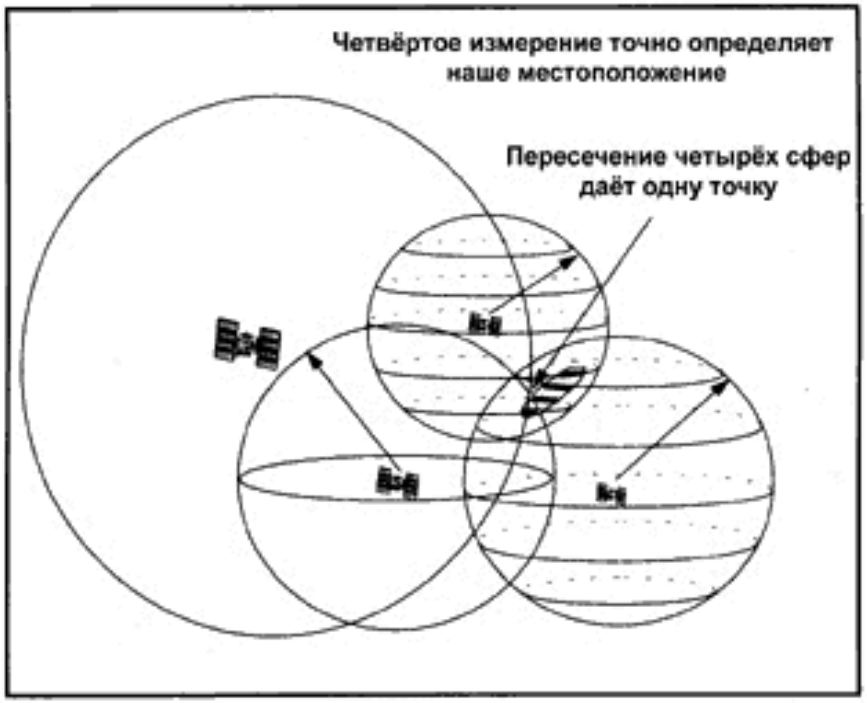
TECNOLOGIE di LOCALIZZAZIONE da RETE SATELLITARE

***G**lobal **P**ositioning **S**ystem – **Na**vigation **S**atellite **T**iming and **R**anging* (GPS-NAVSTAR)

Galileo

***Glo**bal **Na**vigation **S**atellite **S**ystem* (GLONASS)



IL sistema GPS-NAVSTAR

(Global Positioning System-
NAVigation Satellite Timing And Ranging)

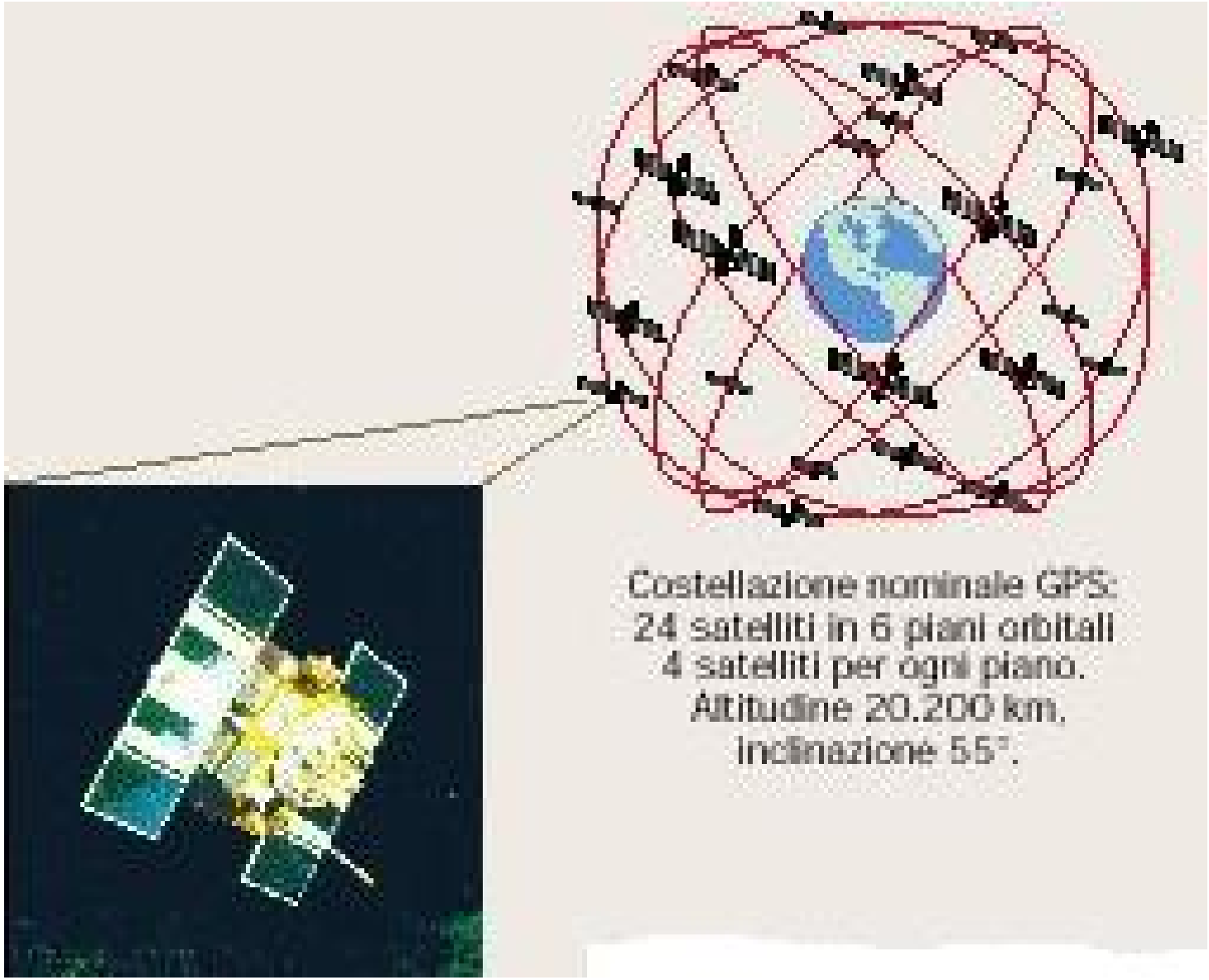
Introduzione

- **È un sistema per la localizzazione a livello globale in 3D (fino a quote di qualche decina di km), basato su una rete di stazioni di riferimento costitutita da 24 satelliti costruiti dalla *Lockheed-Martin***
- **Sviluppato in USA negli anni ’70 in ambito militare su progetto del DoD (Department of Defense)**
- **Il sistema è oggi gestito dal DoD, che, oltre provvedere alla manutenzione, stabilisce le regole di accesso al servizio**
- **Per informazioni vedere sito www.defenselink.mil oppure www.state.gov**

Informazioni generali

- La localizzazione è sostanzialmente basata sul metodo TOA rispetto a 3 (2D) o 4 (3D) satelliti in visibilità
- La misura dei ritardi di propagazione si basa sulla rice-trasmissione di segnali *spread-spectrum* ottenuti per mezzo di codici PN (Gold).
  Il TOA è calcolato sulla base della *epoca* delle sequenze PN ricevute dai satelliti, assieme ad un riferimento temporale fisso
- Il sistema GPS è quindi un sistema *sincrono*
- Come tutti i sistemi satellitari, può essere suddiviso in 3 *segmenti* (sottosistemi):
  - Spatial segment: insieme dei satelliti
  - Control segment: insieme di stazioni terrestri di controllo e manutenzione
  - User segment: insieme dei ricevitori GPS e corrispondenti apparati

Spatial Segment (1/4)



Costellazione nominale GPS:
24 satelliti in 6 piani orbitali
4 satelliti per ogni piano.
Altitudine 20.200 km.
Inclinazione 55°.

Spatial Segment (2/4)

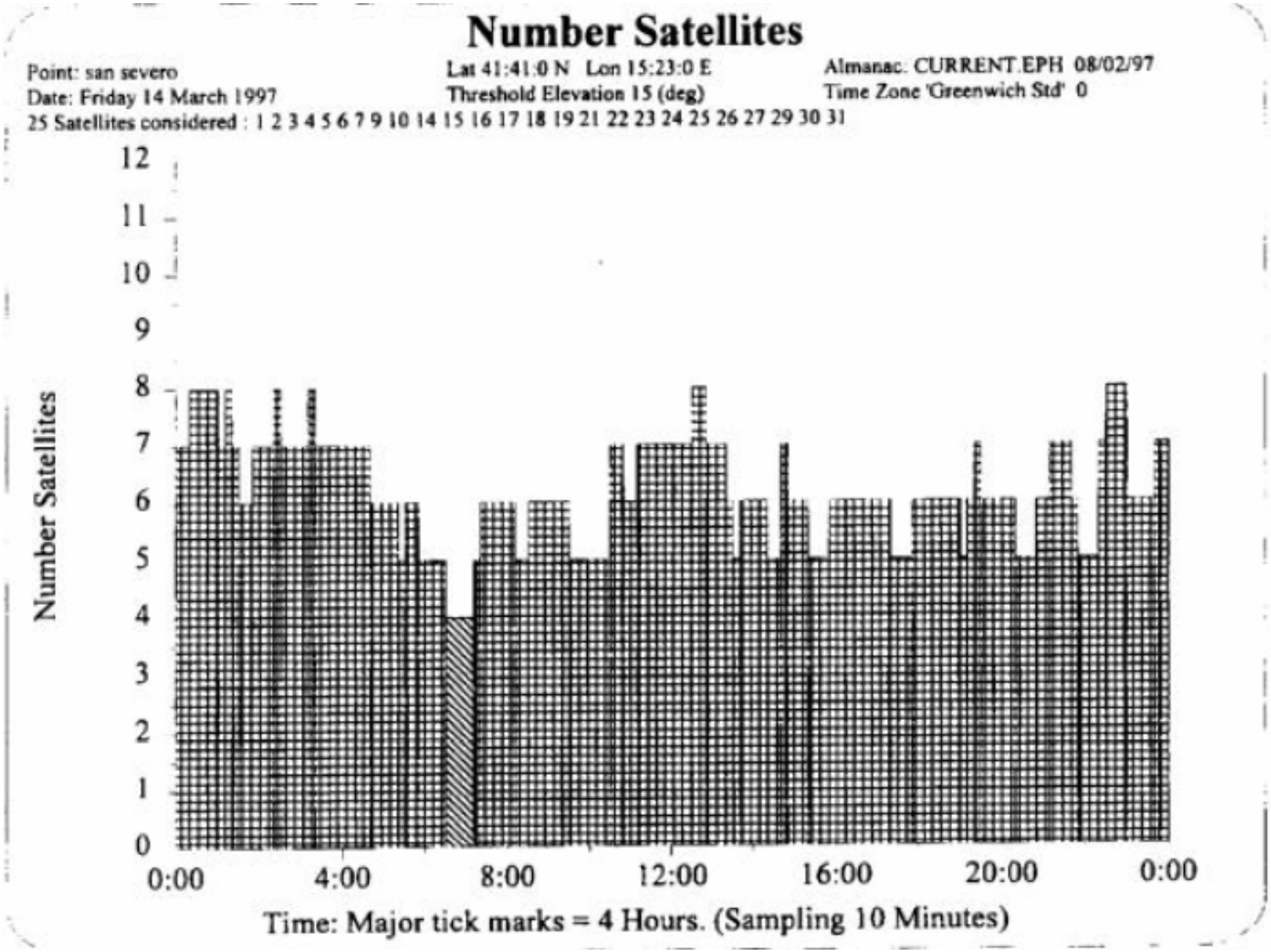
Descrizione del segmento spaziale:

- **24 satelliti** (+ 2 di scorta) su **6 orbite** quasi-circolari inclinate di 55° sul piano equatoriale, e ruotate di 60° l'una rispetto alla successiva attorno all'asse terrestre
- **Altezza media ~ 20200 km** sulla superficie terrestre (R_T ~ 6372 m)
- **Periodo di rivoluzione ~ 11h 58'**

  $v_{tang} \approx 3900$ m/sec = 14000 km/h

- I parametri orbitali fanno si che, in ogni istante e ovunque siano sempre visibili almeno 4 satelliti (fino ad un massimo di 12)

Esempio


Number Satellites
Point: san severo
Lat 41:41:0 N Lon 15:23:0 E
Almanac: CURRENT.EPH 08/02/97
Date: Friday 14 March 1997
Threshold Elevation 15 (deg)
Time Zone 'Greenwich Std' 0
25 Satellites considered : 1 2 3 4 5 6 7 9 10 14 15 16 17 18 19 21 22 23 24 25 26 27 29 30 31
Number Satellites
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0:00
4:00
8:00
12:00
16:00
20:00
0:00
Time: Major tick marks = 4 Hours. (Sampling 10 Minutes)

Spatial Segment (3/4)

Caratteristiche generali del singolo satellite

- Dimensioni ~ 130 cm × 180 cm × 200 cm;
- Peso ~ 800 Kg;
- P_{irr} = 700 W (per mezzo di pannelli solari);
- I satelliti costituiscono una rete sincrona, poiché condividono lo stesso riferimento temporale grazie a 4 orologi atomici di bordo (2 al cesio, 2 al rubidio) aventi stabilità media pari a una parte su 10^{12} (perdono un secondo ogni 10^{12} secondi ~ 317mila anni !!!);
- frequenza fondamentale degli orologi di bordo f_0=10,23 MHz
- Motori di bordo per imprimere correzioni di rotta;
- Carburante: vita media 7-8 anni;
- Antenne a polarizzazione circolare (destrorsa)

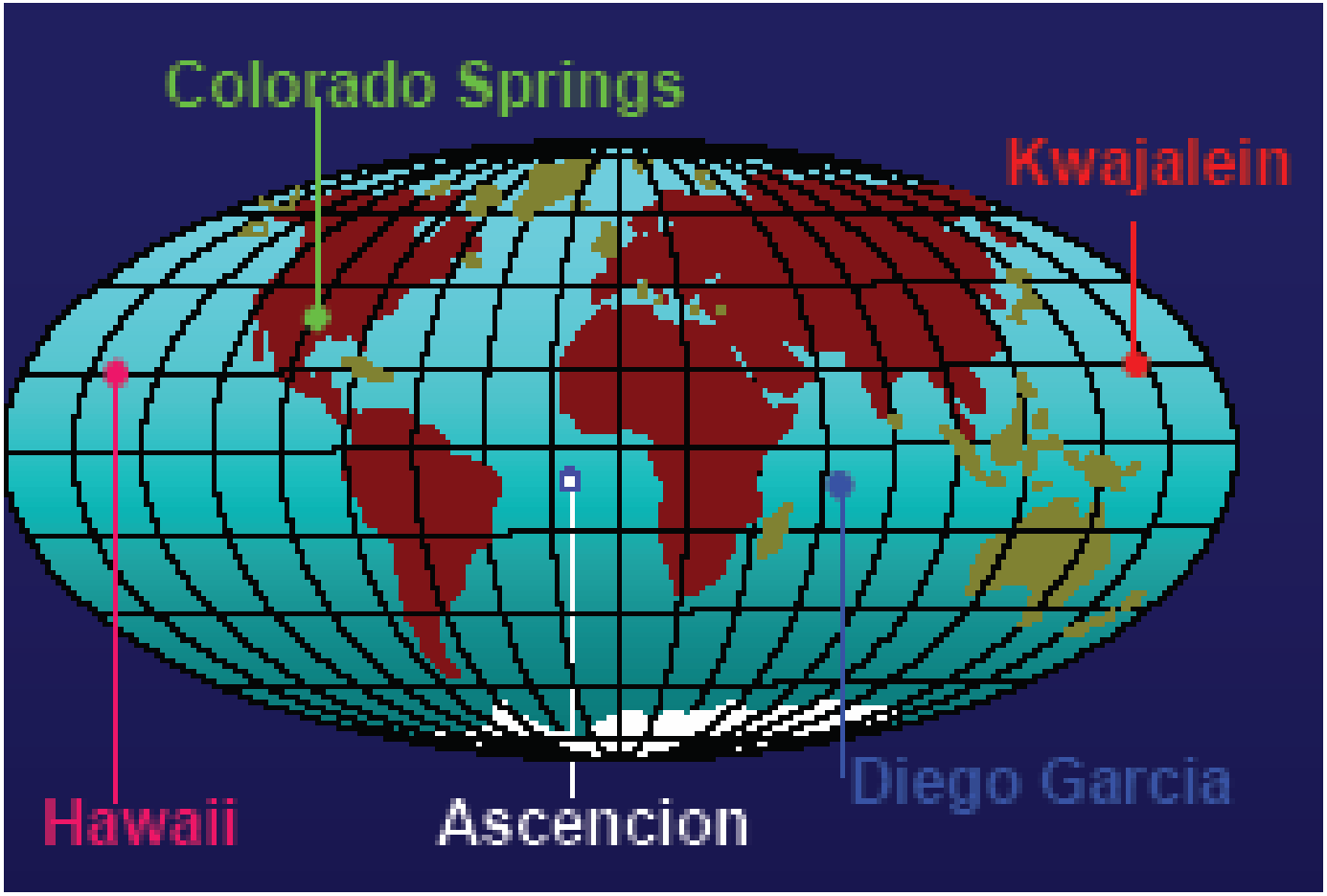
Spatial Segment (4/4)

Funzionalità principali del segmento spaziale

- Trasmettere informazioni agli utilizzatori attraverso l'invio di opportuni segnali;
- Ricevere e memorizzare informazioni trasmesse dal segmento di controllo;
- Mantenere un riferimento temporale molto stabile ed accurato per mezzo dei 4 oscillatori di bordo;
- Eseguire manovre di correzione d'orbita indicate dal segmento di controllo;

Control Segment (1/3)

Verifica lo stato di funzionamento dei satelliti e ne aggiorna le orbite; è costituito da una serie di stazioni di distribuite in prossimità dell'equatore



Control Segment (2/3)

- 5 *Monitor Stations* per il controllo (Colorado, Hawaii, Kwajalein, Ascension, Diego Garcia)
- 3 *Upload Stations* per la trasmissione di informazioni ai satelliti (Kwajalein, Ascension, Diego Garcia)
- 1 *Backup Station* (Sunnyvale, USA)
- 1 *Master Control Station* per il controllo dell'intero sistema (Colorado Springs)

Control segment (3/3)

Le *Monitor Stations* determinano 2 volte al giorno posizione, velocità e orbita dei satelliti e le comunicano alla *Master Station*

Nella *Master Station* si elaborano tutti i dati e si calcolano le correzioni delle "effemeridi" (dati orbitali)

I dati di correzione sono inviati alle *Upload Stations* e da qui ai satelliti in modo da correggere le rotte

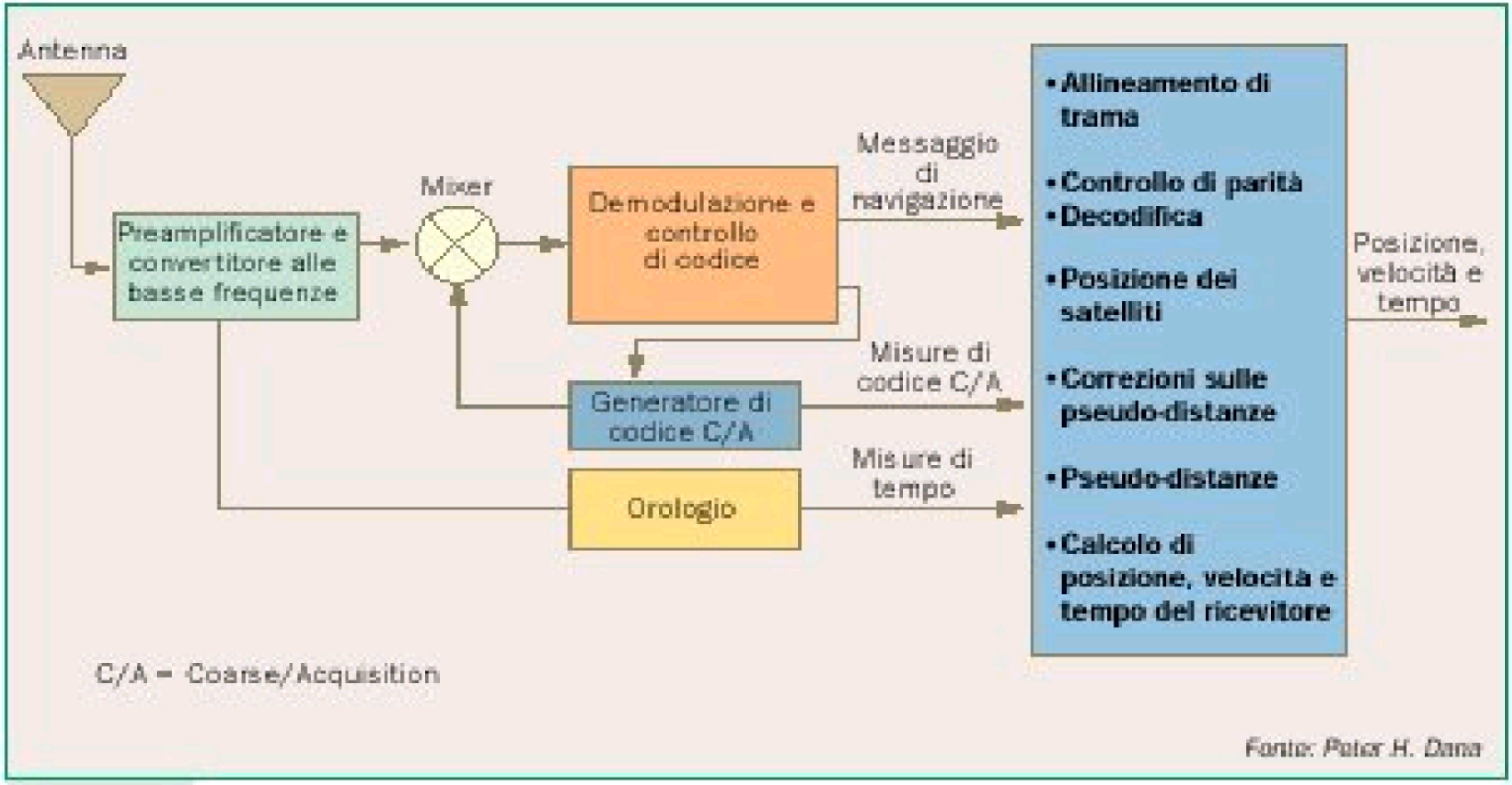
Una parte dei dati di correzione sono poi inviati dai satelliti agli utenti (tramite il messaggio di navigazione, vedi oltre) per determinare le contromisure da adottare

User Segment (1/2)

Tipico ricevitore GPS:

- Antenna omnidirezionale;
- Orologio (oscillatore al quarzo $\Rightarrow$ meno preciso di quelli di bordo);
- Ricevitore *spread-spectrum* multiplo con unità di generazione locale dei codici, in grado cioè di generare copia delle sequenze di codice emessi da ciascun satellite, da usare per le correlazioni coi segnali ricevuti ;
- Unità di elaborazione e memorizzazione dati;
- Unità di alimentazione;

User Segment (2/2)



Schema di un ricevitore GPS.

Il segnale GPS (1/3)

Ogni satellite trasmette due segnali *spread spectrum* (**L1** ed **L2**), aventi ampiezza di banda pari a **20,46 MHz** ciascuno ed ottenuti combinando opportunamente i seguenti segnali:

❶ Due portanti sinusoidali alle frequenze

$\mathbf{f_{L1} = 154 \times f_0 = 1575{,}42\ MHz}$ ($\lambda_1 = 19{,}05$ cm)

$\mathbf{f_{L2} = 120 \times f_0 = 1227{,}60\ MHz}$ ($\lambda_2 = 24{,}45$ cm)

❷ Due codici PN (Gold) - diversi per ogni satellite

- **codice** *Coarse/Acquisition* (**C/A**)

  lunghezza 1023 *chips*

  chip rate = $f_0/10 = 1{,}023$ Mchip/sec;

- **codice** *Precise* (**P** o **Y** se cifrato)

  lunghezza $6{,}1871 \cdot 10^{12}$ *chip*

  chip rate = $f_0 = 10{,}23$ Mchip/sec;

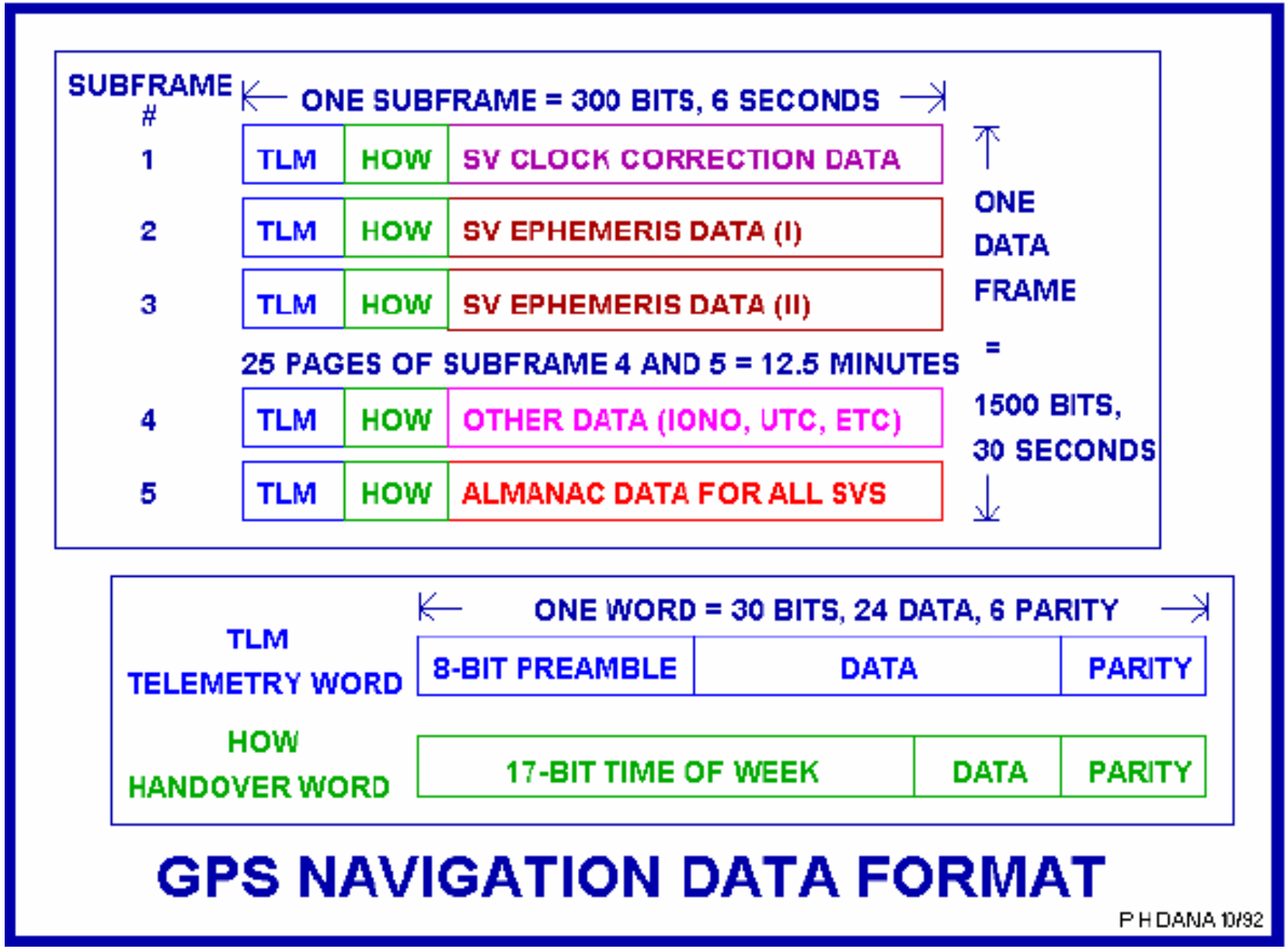
Il segnale GPS (2/3)

❸ **Messaggio di Navigazione** costituito da *frame* di 1500 bits, avente bit-rate di 50 bit/sec e suddiviso in 5 sottosequenze:

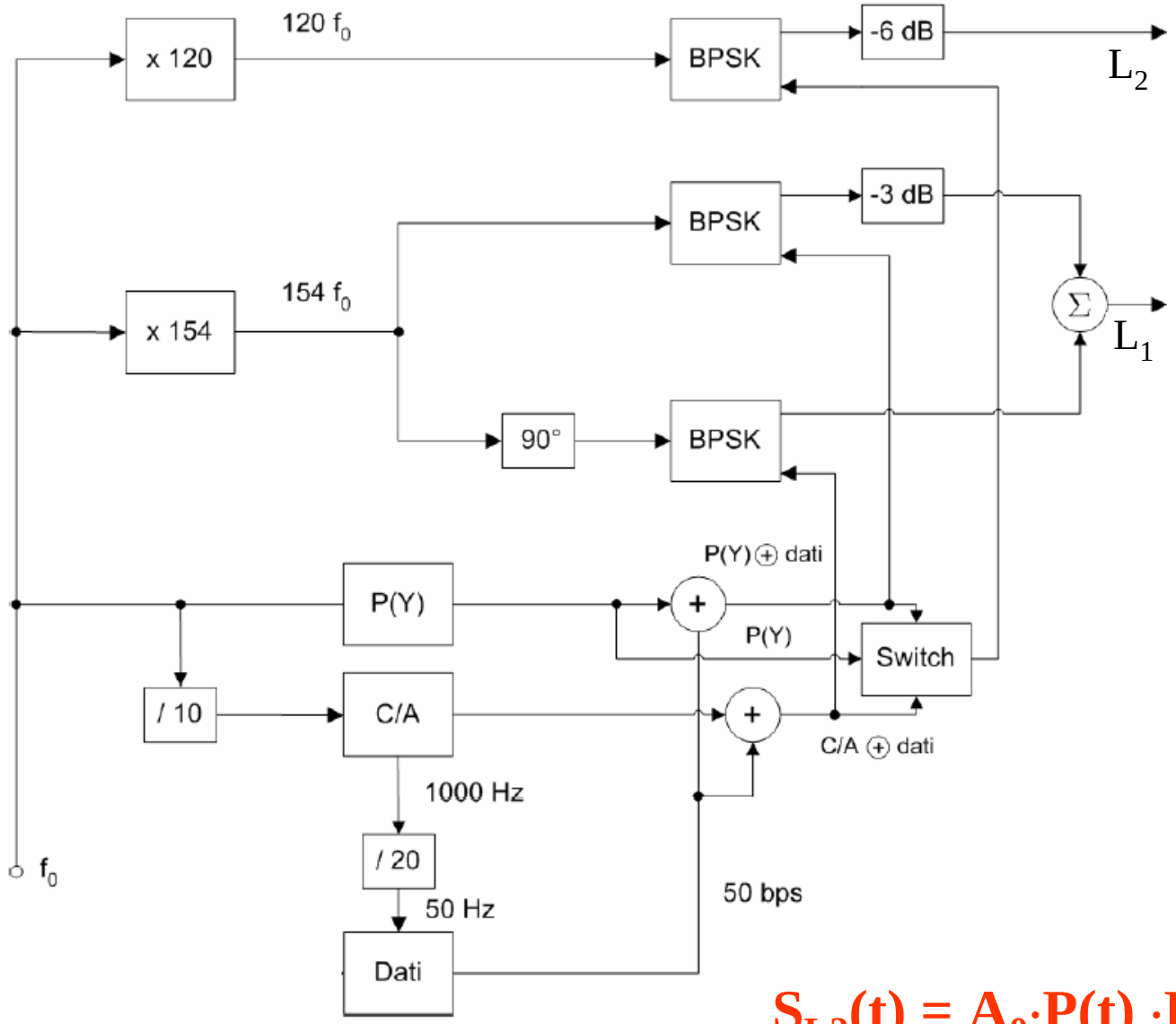
- dati per la correzione dell'errore dovuto all'offset degli orologi di bordo (sottosequenza 1);
- dati delle *effemeridi* – funzioni matematiche che descrivono le orbite con elevata precisione, consentendo al ricevitore di sapere quanti e quali satelliti sono visibili (sottosequenze 2 e 3);
- altri dati, relativi ad esempio alla correzione dovuta ai ritardi ionosferici (sottosequenza 4);
- l'*almanacco*, versione semplificata delle effemeridi (sottosequenza 5);

La ricezione dell'intero messaggio di navigazione richiede quindi un tracciamento continuo di almeno 30 sec.

Il segnale GPS (3/3)



I segnali L1 ed L2



$$S_{L2}(t) = A_0 \cdot P(t) \cdot D(t) \cdot \sin(2\pi f_{L2} t + \phi_2)$$

$$S_{L1}(t) = A_0 \cdot C(t) \cdot D(t) \cdot \sin(2\pi f_{L1} t + \phi_1) + A_0 \cdot P(t) \cdot D(t) \cdot \cos(2\pi f_{L1} t + \phi_1)$$

Riepilogo

PARAMETRI DELLA COSTELLAZIONE DEI SATELLITI GPS	
Numero di satelliti operativi	24
Numero di orbite	6
Numero di satelliti per orbita	4
Inclinazione nominale delle orbite rispetto all'equatore	55°
Altitudine nominale delle orbite	20192 Km
Periodo nominale di rivoluzione	11h 58m 00s

PARAMETRI DEI CODICI DI SPREADING E DEI DATI DI NAVIGAZIONE GPS		
Numero di elementi della sequenza di codice	C/A	1023
	P	$6{,}18\ 10^{12}$
Rate del codice	C/A	1.023 Mchip/s
	P	10.23 Mchip/s
Messaggio di navigazione	Rate	50 bit/s
	Modulazione	BPSK NRZ
	Lunghezza totale	12m 30s
	Lunghezza del frame	30 s

Stima della posizione (1/4)

Il sistema utilizza il metodo *Time Of Arrival* applicato dal terminale (localizzazione *handset based*):

- si stima il ritardo di propagazione τ_P fra satellite e terminale
- si stima l'istante t_0 di emissione del segnale da parte del satellite

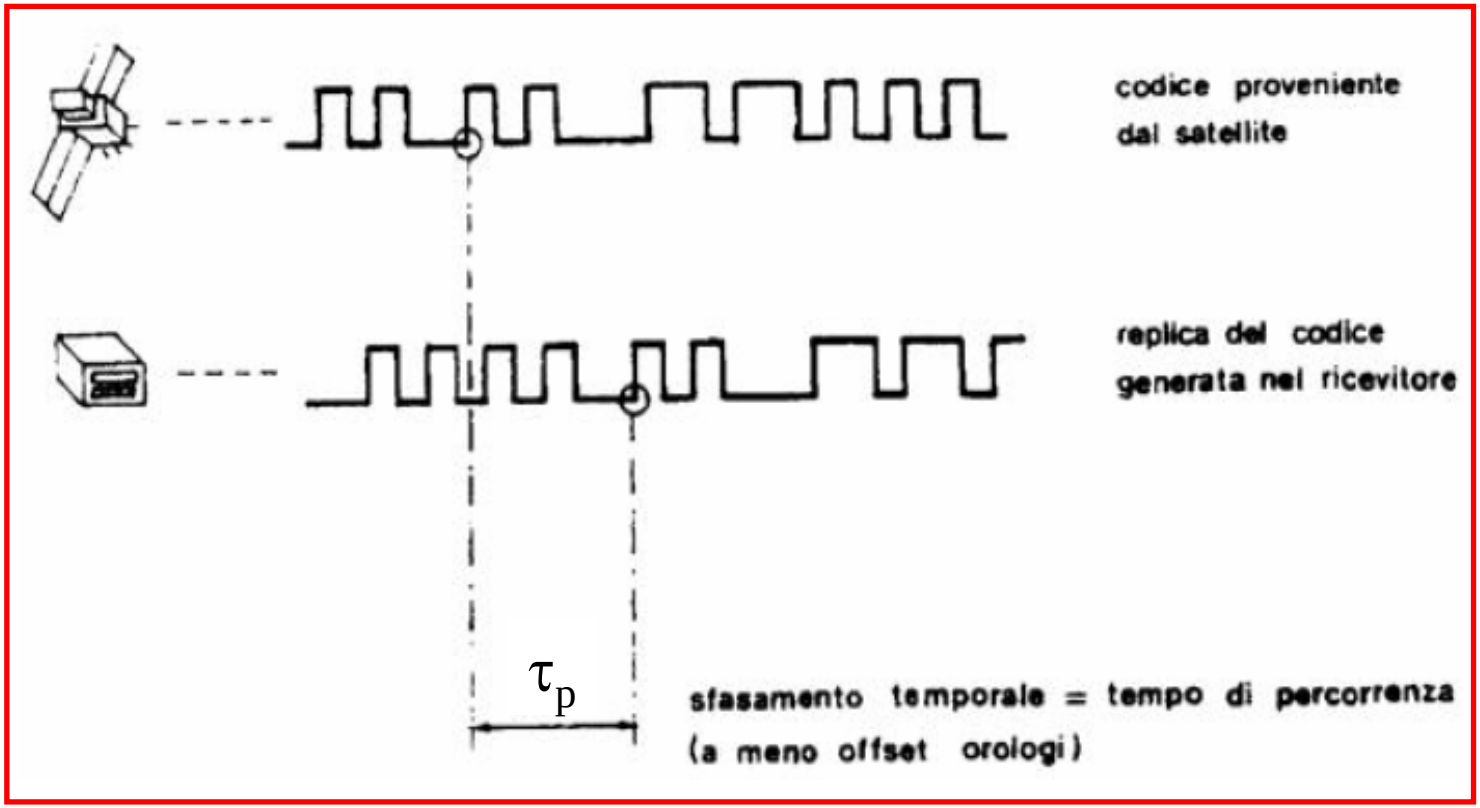
($t_0 = t - \tau_p$, t istante assoluto di ricezione misurato nel riferimento temporale del terminale)

- tramite le effemeridi si calcola la posizione $X_s(t_0)$, $Y_s(t_0)$, $Z_s(t_0)$, del satellite
- si uguaglia la distanza misurata con la distanza cartesiana

$$\sqrt{[X_S(t_0)-X_P]^2+[Y_S(t_0)-Y_P]^2+[Z_S(t_0)-Z_P]^2} = c\cdot\tau_p \quad \left(= \int_{t_0}^{t} c\,dt\right)$$

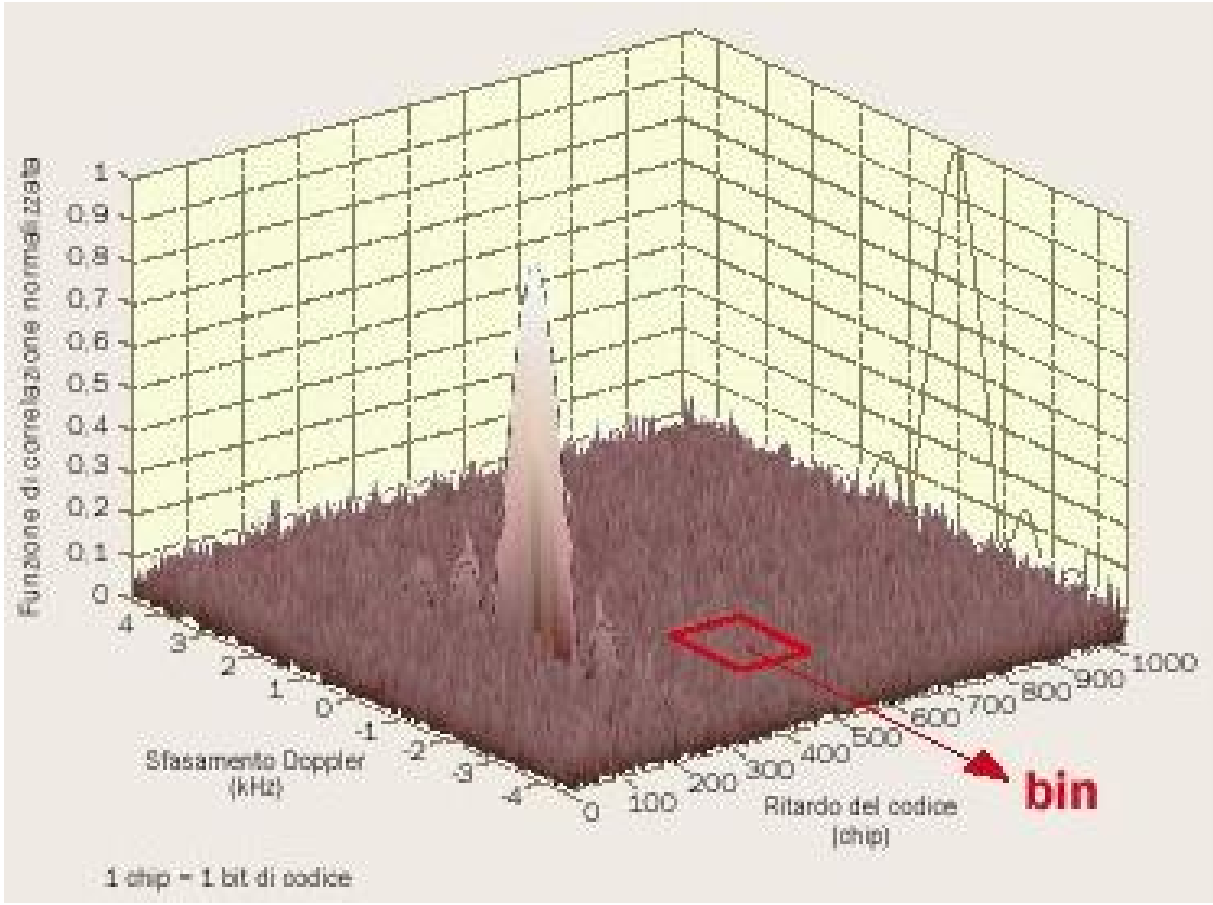
pseudo-distanza o *pseudorange*

Stima della posizione (2/4)



- Il segnale in codice che arriva dal satellite viene confrontato con una copia dello stesso codice generata localmente determinandone lo sfasamento temporale, ovvero lo “scorrimento” necessario per portare i due segnali a sovrapporsi perfettamente;

Stima della posizione (3/4)



- La ricerca è in realtà effettuata contemporaneamente sulla finestra dei *code delays* e su quella degli scostamenti di frequenza (e cioè su una banda pari a 8,4 kHz, generata dall'effetto Doppler) impiegando blocchi elementari detti *bins*;

Stima della posizione (4/4)

- Il tempo scandito dall'orologio del satellite risulta differente dal tempo relativo all'orologio del ricevitore (al quarzo e soggetto a *drift*)
- L'*offset* δt fra gli orologi di terra e di bordo si traduce in errore sul ritardo di propagazione $\Rightarrow \boldsymbol{\tau_p = \tau_{p,real} + \delta t}$

$$\sqrt{[X_S(t_0) - X_P]^2 + [Y_S(t_0) - Y_P]^2 + [Z_S(t_0) - Z_P]^2} = c \cdot (\tau_{p,real} + \delta t)$$

4 incognite $\Rightarrow$ necessarie 4 equazioni $\Rightarrow$ la visibilità di 4 satelliti

- Una volta acquisito il tempo assoluto, per un po' l'oscillatore al quarzo garantisce funzionamento anche con meno satelliti
- Una soluzione "di emergenza" può essere ottenuta anche con 3 satelliti quando sia nota a priori ad esempio la quota di P (ad es. Nella navigazione in mare)

Precisione teorica

- La risoluzione temporale è come noto in prima approssimazione dell'ordine di T_c:
  - codice C/A: $T_c \approx 1/(1.023\text{Mchip/sec}) = 977$ ns $\Rightarrow \sim 290$ m
  - codice P: $T_c \approx 1/(10.23\text{Mchip/sec}) = 97.7$ ns $\Rightarrow \sim 29$ m

- In realtà il ricevitore GPS è in grado di misurare lo scorrimento temporale dei due codici (ricevuto e locale) con una precisione ~ 1% T_c:
  - codice C/A ~ 2,9 m
  - codice P ~ 29 cm

- Le sequenze P sono utilizzate per scopi militari $\Rightarrow$ sono accessibili solo alle forze armate USA e non sono disponibili per applicazioni civili

Errori Sistematici (1/4)

1. **Disponibilità selettiva**: il DoD americano ha facoltà di inserire nel messaggio di navigazione alcuni errori “ad hoc” nel valore delle effemeridi

2. **Offset degli orologi dei satelliti**: gli orologi atomici di bordo hanno una stabilità pari a circa una parte su 10^{12} su un arco temporale di 24 ore $\Rightarrow$ errore temporale accumulato in un giorno $\sim 8{,}64 \cdot 10^{-8}$ s $\Rightarrow$ errore $\sim$ 26 m, che può essere compensato ma non completamente.
   Errore massimo residuo $\sim$ 13.8 m

3. **Ritardi da propagazione ionosferica/troposferica**: al variare dell’indice di rifrazione atmosferico si ha curvatura delle traiettorie dei raggi ottici e variazione della velocità di propagazione $\Rightarrow$ errori nella valutazione della pseudodistanza

Errori Sistematici (2/4)

4. **Cammini Multipli**: l 'errore dovuto ai percorsi multipli è quello più difficilmente eliminabile. Il segnale trasmesso dai satelliti subisce una serie di riflessioni e rifrazioni indotte dagli ostacoli che si ritrovano sul cammino diretto verso il ricevitore e si scompone in più contributi ricevuti in istanti differenti.
   In casi estremi essi possono causare errori superiori a 15 m.

5. **Rumore al ricevitore**: gli strati più bassi dell'atmosfera,densi di vapore acqueo,determinano ulteriori perturbazioni,tanto maggiori quanto più spesso è lo strato da attraversare,cioè quanto minore risulta l'angolo di elevazione del satellite (i ricevitori GPS scartano in modo automatico i segnali provenienti da satelliti con angoli di elevazione minori di 10° sull'orizzonte). Il contributo dovuto a questa perturbazione è definito rumore in ingresso al ricevitore. In questa fonte di errore ricade anche quello legato alle caratteristiche tecnologiche dello stesso ricevitore.

Errori Sistematici (3/4)

6. **Geometric Dilution Of Precision (GDOP)**: come avviene per tutte le misure ottenute per triangolazione,la precisione del posizionamento mediante GPS è limitata dalla disposizione nel campo visibile dei satelliti monitorati dal ricevitore. Il parametro GDOP (≥ 1)indica in ogni istante la bontà della configurazione satellitare costituisce un fattore moltiplicativo del valore quadratico medio dei singoli errori

Errori Sistematici (4/4)

Sorgente di errore	Errore tipico (metri)	
	codice civile C/A	codice militare P
disponibilità selettiva	24,0	0,0
ionosfera	7,0	0,01
troposfera	0,7	0,7
clock dei satelliti ed effemeridi	3,6	3,6
percorsi multipli in ricezione	1,8	1,2
rumore in ingresso al ricevitore	1,5	0,6
UERE	25,4	3,9
Accuratezza nel piano (intervallo di confidenza 2DRMS), per GDOP=4	101,5	15,6

2DRMS = twice Distance RMS oppure 2 Dimensional RMS
GDOP = Geometric Dilution of Precision
UERE = User Equivalent Range Error

Fonte: Internet