



Marica Franzini

Laboratorio di Geomatica - DICAr

Università di Pavia

email: marica.franzini@unipv.it



Errori di posizionamento

Errori di posizionamento - 1

Abbiamo visto nelle lezioni precedenti come il ricevitore utilizza il codice, o la fase, per determinare gli *pseudo-range* verso i satelliti e determinare in seguito le coordinate del vertice stazionato.

La precisione del posizionamento GPS dipende strettamente dalla precisione con cui vengono determinate gli *pseudo-range* satellite-ricevitore.

Nel calcolo di questa distanza vengono però commessi degli “errori” che si ripercuotono direttamente sull’accuratezza finale delle coordinate del punto misurato.

Errori di posizionamento - 2

Secondo una classica definizione gli errori che si possono commettere sono essenzialmente suddivisi in tre categorie:

- errori accidentali di misura
- errori sistematici o di modello (bias): rifrazione troposferica e ionosferica, errori di orologio, errore d'orbita
- errori vari di osservazione: multipath, elettronica del ricevitore, interferenze elettromagnetiche, variazione della posizione del centro di fase dell'antenna

1 - Errori accidentali

Errori accidentali di misura - 1

Il tempo di volo si determina attraverso un procedimento di correlazione tra il segnale emesso dai satelliti e quello generato localmente dal ricevitore.

Tuttavia il correlatore interno presente nei ricevitori commette un errore nell'effettuare questa operazione; tale errore è strettamente legato alla lunghezza d'onda del segnale utilizzato.

L'errore è stimato pari all'1-2% della lunghezza d'onda del segnale utilizzato; le precisioni sono quindi diverse a seconda della diversa componente che si considera.

Errori accidentali di misura - 2

Ricordiamo che le lunghezze d'onda in gioco sono:

- codice C/A $\rightarrow \cong 300 \text{ m}$
- codice P $\rightarrow \cong 30 \text{ m}$
- portanti L1 - L2 $\rightarrow 19 - 24 \text{ cm}$

Gli errori sulla determinazione dello *pseudo-range* sono pertanto:

- codice C/A $\rightarrow 3 - 6 \text{ m}$
- codice P $\rightarrow 0.3 - 0.6 \text{ m}$
- portanti L1 - L2 $\rightarrow 0.002 - 0.004 \text{ m}$

In realtà queste precisioni sono solo teoriche in quanto si devono considerare tutte le varie fonti di errore.

2 - Errori sistematici

Errori sistematici

Gli errori sistematici sono usualmente divisi in tre sotto-categorie:

- errori di orologio
- errori d'orbita
- errori rifrazione troposferica e ionosferica

Errori d'orologio

Abbiamo già diffusamente parlato del problema di sincronia tra gli orologi del sistema.

Per la qualità degli orologi al quarzo presenti nei **ricevitore**, l'asincronia di quest'ultimi deve essere considerata un'incognita del problema. Questa quantità viene ristimata ad ogni epoca di misura.

Le asincronie degli orologi dei **satelliti** sono stimate dal centro di controllo e fornite agli utenti tramite il messaggio navigazionale.

Poiché si tratta di stime a priori contengono un errore residuo che può portare ad calcolare lo pseudorange con un errore fino a 2 m.

Errori d'orbita - 1

Presupposto fondamentale per il posizionamento GPS è la conoscenza della posizione dei satelliti.

Le effemeridi predette, inviate dai satelliti attraverso il messaggio navigazionale, forniscono in realtà dei parametri di posizionamento non corretti trasmettendo la posizione teorica delle traiettorie seguite e non quella vera.

L'errore d'orbita è oggi notevolmente migliorato rispetto ad alcuni anni fa e può arrivare fino a 2.5 m.

E' possibile tuttavia ridurre notevolmente questo errore utilizzando le effemeridi precise.

Errori d'orbita – 2

Abbiamo già indicato come alcuni enti traccino le orbite satellitari e determinino a posteriori la traiettoria mettendola poi a disposizione della comunità.

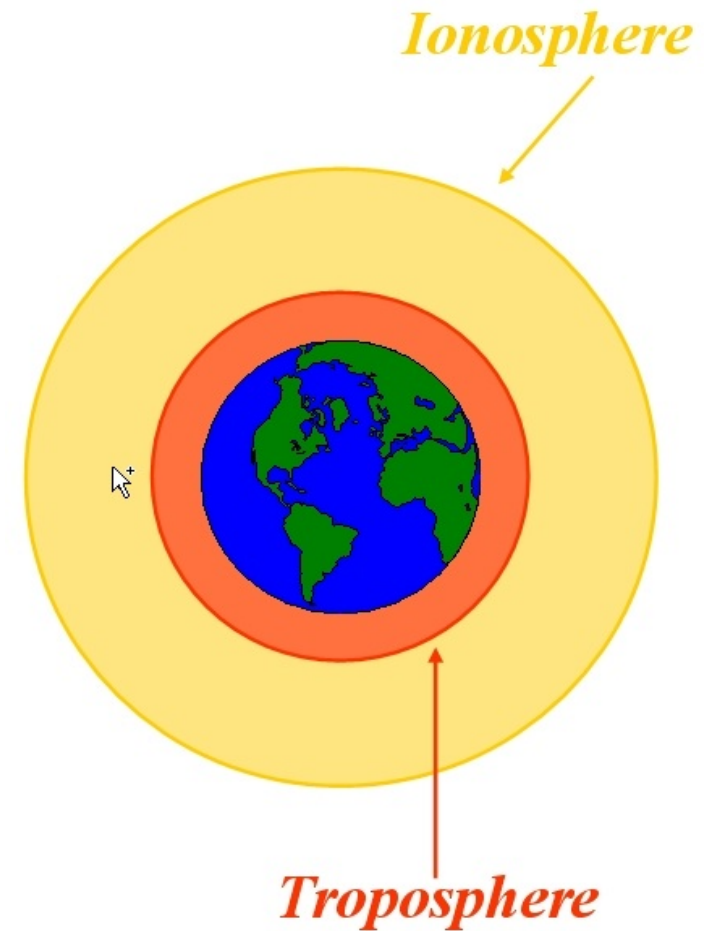
Questi prodotti sono disponibili a diversi tempi e, come regola generale, le effemeridi con maggior ritardo sono le più precise.

Le effemeridi finale, disponibili a 12-18 giorni di distanza, hanno un errore d'orbita dell'ordine di pochi centimetri.

Strato ionosferico e troposferico

E' noto che la velocità di propagazione della luce (o di un radio segnale) è costante nel vuoto ma che, quando la luce (o il segnale) attraversa uno strato di particelle cariche di elettricità, tale velocità diminuisce.

Allo stesso modo il segnale GPS subisce un rallentamento durante l'attraversamento dello strato ionosferico e troposferico.



Rifrazione ionosferica - 1

La ionosfera è la fascia compresa tra i 70 ed i 1000 km circondante la superficie terrestre.

In questa fascia dell'atmosfera, le radiazioni del Sole provocano la ionizzazione dei gas componenti, generando una densità di elettroni e ioni tal da influenza in modo sensibile l'indice di rifrazione nei riguardi di alcune frequenze (tra cui quelle GNSS).

Tale ionizzazione è più bassa negli strati inferiori e cresce negli strati più alti; inoltre, la rotazione terrestre fa sì che tale fenomeno abbia comportamenti diversi nelle fasi diurne/notturne, con un massimo che si raggiunge circa 2 ore dopo il punto di picco locale del sole.

Rifrazione ionosferica – 2

Esistono diversi modelli per stimare l'errore commesso dall'attraversamento dello strato ionosferico; essi sono sostanzialmente funzione di:

- frequenza del segnale
- angolo di incidenza
- contenuto totale di elettroni

Poiché gli errori legati alla rifrazione ionosferica dipendono dalla frequenza del segnale, essi sono diversi per le portanti L1 ed L2: questa caratteristica permette ai ricevitori a doppia frequenza di determinarne la loro entità.

Rifrazione troposferica - 1

La troposfera rappresenta la parte “bassa” dell’atmosfera che si trova direttamente a contatto con la superficie della Terra.

Ha uno spessore variabile con la latitudine e varia approssimativamente dagli 8 km ai poli fino ai 20 km all’equatore.

In essa è concentrata la maggior quantità di vapore acqueo ed è lo strato dove avvengono buona parte dei fenomeni meteorologici.

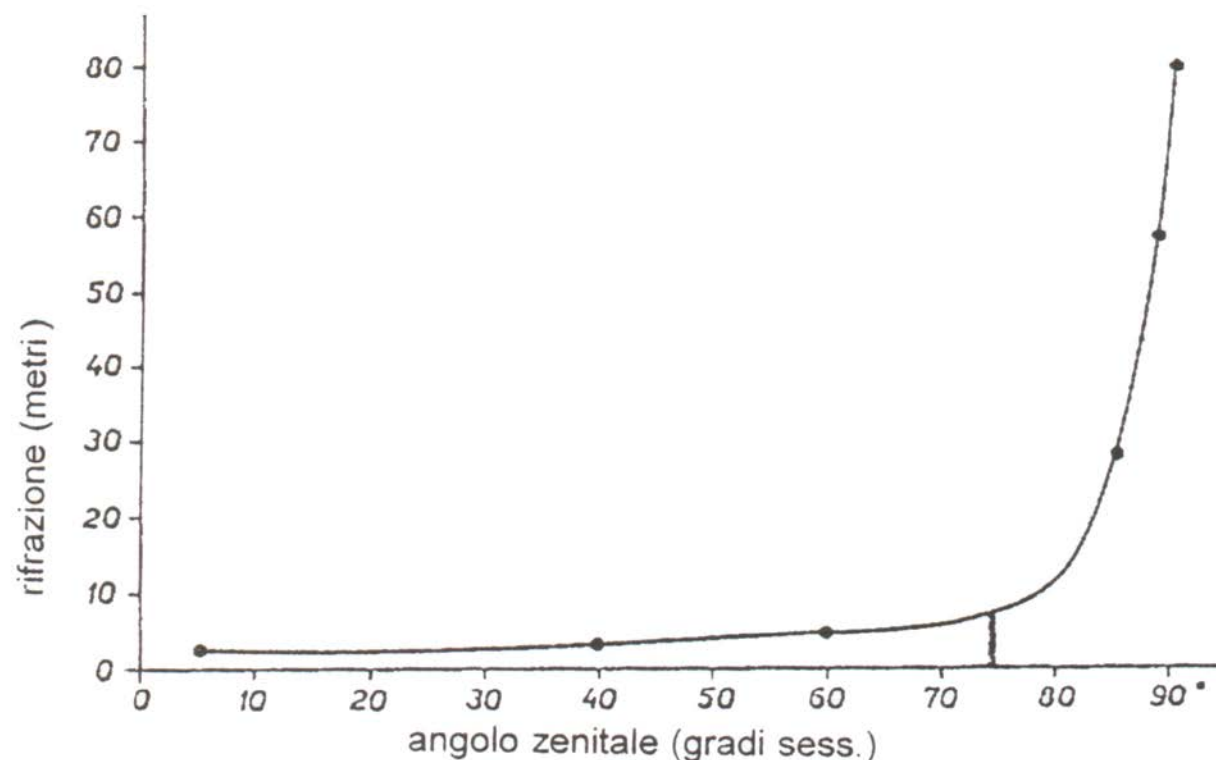
Il ritardo troposferico è indipendente dalle frequenze ed è dunque identico per le diverse portanti del segnale.

Esistono diversi modelli in letteratura e tra i più diffusi ci sono quelli di Hopfield e Saastamoinen.

Rifrazione troposferica – 2

Tali modelli dipendono da:

- parametri atmosferici
- angolo zenitale del satellite



Il modello di Hopfield (in figura) mostra che l'errore troposferico aumenta notevolmente quando si supera un angolo zenitale $z = 75^\circ$ (ovvero 15° di elevazione sull'orizzonte).

Selective Availability (SA)

Si è già messo in luce che il sistema GPS è stato ideato per scopi militari.

A questo proposito il DoD utilizzava una particolare modalità operativa, detta “Selective Availability” o SA, (letteralmente “disponibilità selettiva”) attraverso la quale, per ragioni di sicurezza, si potevano creare artificialmente errori di vario tipo nei segnali trasmessi diminuendo la precisione nel posizionamento da singolo ricevitore.

A partire dal 2 maggio 2000, il DoD ha però cessato di disturbare i segnali dei satelliti destinati all’uso civile del GPS.

3 - Errori vari di osservazione

Errori vari di osservazione

A questa voce fanno riferimento diversi fattori:

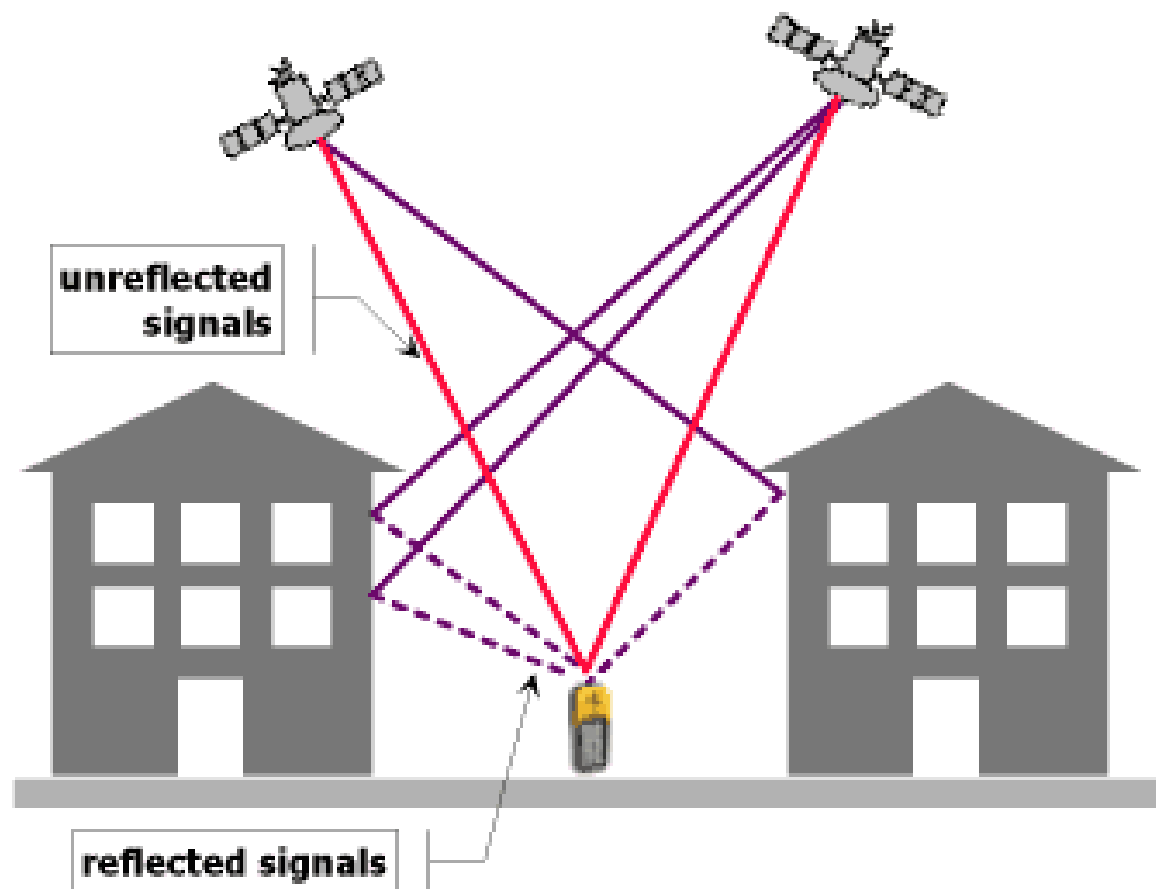
- il multipath (percorso multiplo)
- l'elettronica del ricevitore
- le interferenze elettromagnetiche
- le variazioni della posizione del centro di fase dell'antenna
- la configurazione satellitare: DOP

Sono fenomeni locali e non possono essere modellati ed eliminati.

La corretta scelta del posizionamento del ricevitore e della finestra temporale del rilievo sono di primaria importanza per non incorrere in questo tipo di inconveniente.

Multipath - 1

Il segnale emesso dai satelliti non sempre arriva in modo diretto al ricevitore ma può essere “sdoppiato” lungo il percorso da ostruzioni di varia natura (edifici, veicoli, etc.).



Multipath – 2

In questo caso il ricevitore riceve per prima la parte del segnale che direttamente arriva dal satellite e, successivamente, la parte del segnale riflessa.

Per eliminare il fenomeno del multipath, la posizione del ricevitore è di primaria importanza: l'antenna deve essere posizionata lontana dalle principali fonti di riflessione ed ad un'altezza consona.

Questo tipo di errore può essere quindi minimizzato soltanto con un'appropriata scelta della posizione della stazione e da un prolungamento del tempo di osservazione.

Elettronica ed interferenze elettromagnetiche

Alcuni errori dipendono dall'elettronica del ricevitore poiché le misure di sfasamento avvengono tramite correlazione di segnali in tempo reale.

Per un'ottimale correlazione è importante che il segnale non sia "sporco".

La qualità del segnale dipende inoltre da eventuali interferenze elettromagnetiche che possono causare elevata rumorosità e nel caso più sfavorevole determinano la perdita del segnale stesso.

Anche in questo caso la scelta della posizione è di fondamentale importanza; il vertice ideale dovrebbe trovarsi lontano da zone di disturbo (tralicci alta tensione, ripetitori radio-televisivi, linee ferroviarie, etc.).

Variazioni sul centro di fase dell'antenna

Il centro di fase dell'antenna è il punto (elettronico non meccanico) rispetto al quale il ricevitore determina la posizione. Tale posizione può variare in funzione della frequenza del segnale utilizzato e dell'elevazione del satellite.

Tali variazioni sono di piccola entità (1÷2 cm), ma non trascurabili nel posizionamento di elevata precisione.

Può essere stimato tramite adeguate procedure di calibrazione dell'antenna. Anche in questo caso enti internazionali come IGS mettono a disposizione dell'utenza tale dato: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>.

DOP - 1

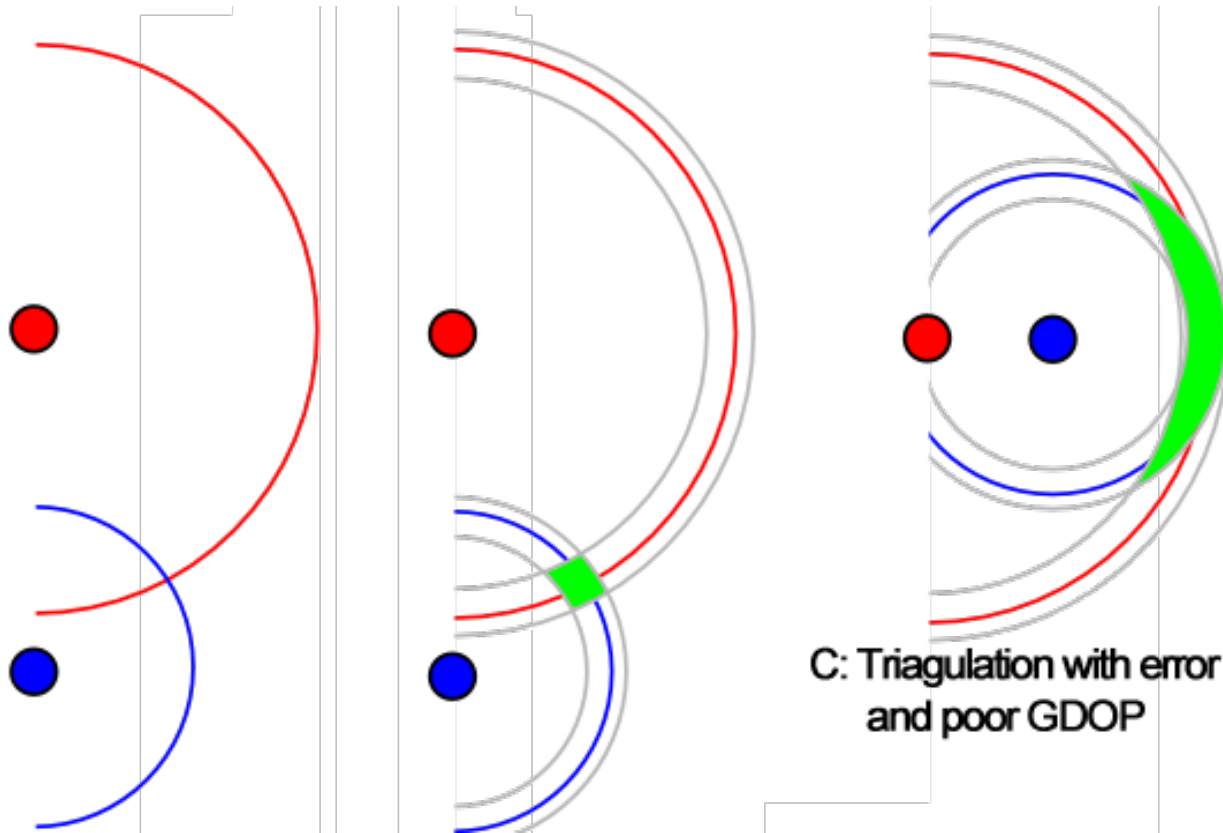
Sono indicatori della qualità del rilievo. Così come il numero di satelliti varia nel tempo anche tali parametri di qualità variano. In generale questi due elementi (numero dei satelliti e parametri di qualità) sono correlati tra loro.

Con il termine generale DOP (*Dilution Of Precision*) si indica l'effetto che la geometria satellitare ha sulla qualità finale del rilievo.

E' un concetto noto anche nella topografia classica: la geometria del rilievo influisce sulla qualità finale dei punti misurati (es. punti allineati).

DOP - 2

Per il GPS il concetto è simile:



DOP - 3

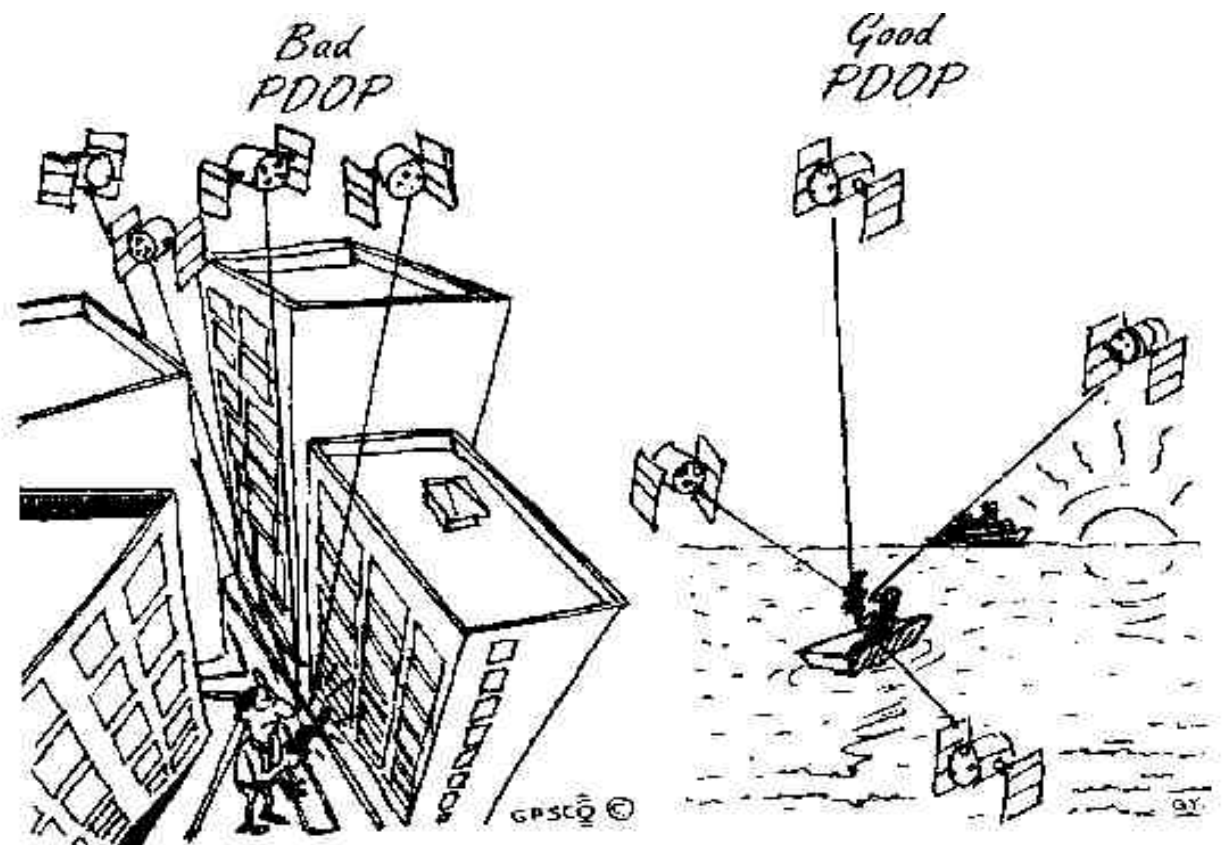
Esistono diversi parametri DOP:

- HDOP: horizontal DOP - parametro di qualità planimetrica
- VDOP: vertical DOP - parametro di qualità altimetrica
- PDOP: position DOP - l'insieme dei due parametri precedenti
- TDOP: temporal DOP - parametro di qualità del tempo
- GDOP: geometric DOP - l'insieme di PDOP e TDOP

Regole pratiche per PDOP

Il valore ideale è 1.

- $1 \leq PDOP \leq 4$ OTTIMO
- $4 < PDOP \leq 7$ DISCRETO
- $PDOP > 7$ PESSIMO



4 - Budget finale degli errori

Budget degli errori

Ecco il budget degli errori commesso da un ricevitore a doppia frequenza:

Effetti del ritardo ionosferico	± 5 m
Errore nell'effemeride del satellite	± 2.5 m
Sfasamento nell'orologio del satellite	± 2 m
Effetti del multipath	± 1 m
Effetti del ritardo troposferico	± 0.5 m
Tutte le altre fonti d'errore	± 1 m
Totale	± 12 m

Per un ricevitore di codice va aggiunto l'errore commesso dal correlatore interno (3-6 m).

5 - Esercitazione del 25 marzo 2014

Posizionamento assoluto 25 marzo 2014

E' stato rilevato con un vertice del poligono del Laboratorio di Geomatica.
Le coordinate del vertice sono note poiché determinare più volte in passato con metodi di posizionamento più accurati (posizionamento relativo).

Le coordinate nominali del vertice sono:

Est:	510669.859
Nord:	5005601.429
Altezza ellissoidica:	123.662

Rilievo con ricevitore di codice - 1

E' stato rilevato il punto con un ricevitore di codice Garmin 12XL.

Il punto è stato memorizzato 5 volte con le seguenti coordinate:

	Est	Nord
1	510674	5005601
2	510672	5005605
3	510671	5005602
4	510669	5005608
5	510673	5005608



Rilievo con ricevitore di codice - 2

Due considerazioni:

- il ricevitore utilizzato ha scopo navigazionale per cui non viene memorizzata la componente altimetrica
- il limite di qualità dei ricevitori di codice è visibile anche nel fatto che essi solitamente memorizzano le coordinate dei punti con una approssimazione metrica

Rilievo con ricevitore di codice - 2

	Est	Nord
1	510674	5005601
2	510672	5005605
3	510671	5005602
4	510669	5005608
5	510673	5005608
media	510671.8	5005604.8
dev.st	1.924	3.271

Il vertice stazionato ha delle coordinate che con un intervallo al 68.27% saranno comprese tra:

Est: 510671.8 ± 1.9

Nord: 5005604.8 ± 3.3

Rilievo con ricevitore a doppia frequenza - 1

Il risultato ottenuto con il ricevitore Leica a doppia frequenza è riportato nell'immagine sottostante.

The image shows a software dialog box titled "Proprietà punto" with three tabs: "Generale", "Valori stocastici", and "Dati tematici". The "Valori stocastici" tab is active. The dialog contains the following fields and options:

- ID punto: pp13 Attivato
- Classe del punto: Soluzione con punto singolo
- Sottoclasse del punto: Solo codice
- Tipo di coordinate: Reticolo WGS84 locali
- Formato coordinate: Est, nord, quota
- Modalità quota: ellissoidica ortometrica
- Est: 510670.3749 m Deviazione standard: 0.0754 m
- Nord: 5005601.8422 m Deviazione standard: 0.1005 m
- Quota: 128.9035 m Deviazione standard: 0.2294 m

At the bottom of the dialog, there are icons for file operations and three buttons: "OK", "Annulla", and "Applica".

Rilievo con ricevitore a doppia frequenza - 2

Qual è il significato di quelle coordinate?

Il vertice stazionato ha delle coordinate che con un intervallo al 68.27% saranno comprese tra:

Est: 510670.375 ± 0.075

Nord: 5005601.842 ± 0.101

Altezza ellissoidica: 128.904 ± 0.229

Fino ora abbiamo solo indicazioni sulla precisione del rilievo; la strumentazione a doppia frequenza risulta (come ci si aspettava) più precisa rispetto a quella di codice.

Accuratezza delle misure

Ma quanto siamo lontani, o vicini, al valore vero?

Disponendo delle coordinate del punto ottenute con un metodo di rilievo avente qualità superiore è possibile valutare l'accuratezza.

	Est	Nord	h
coord. vere	510669.859	5005601.429	123.662
ric. di codice	510671.8	5005604.8	
	1.941	3.371	

	Est	Nord	h
coord. vere	510669.859	5005601.429	123.662
ric. di fase	510670.375	5005601.842	128.904
	0.516	0.413	5.242