

Tutorial sulla post elaborazione delle misure GPS

1ª parte

di Vittorio Grassi

Una campagna di misure eseguite con ricevitori GPS può essere fatta con due o più ricevitori, secondo più sessioni e più giornate di misura. L'elaborazione dei dati, finalizzata al calcolo dei vettori (e quindi le coordinate dei punti rilevati) può essere eseguita con due schemi ben precisi:

a) **"Multibase"** dove vengono considerati e compensati in blocco tutti i vertici della rete e le posizioni dei satelliti per ogni sessione di misura. Con questo metodo vengono considerate tutte le correlazioni tra le osservazioni GPS ed è il metodo più rigoroso che tiene conto della geometria globale del problema. Il trattamento multibase viene utilizzato, normalmente, in applicazioni di tipo "scientifico" con software applicativi come Bernese, Gipsy, GAMIT, etc.

b) **"Singola base"** dove vengono elaborate le singole basi indipendenti senza tenere conto delle loro correlazioni. La maggior parte dei programmi "commerciali" segue questo metodo che fornisce buoni risultati con una maggiore semplicità. Poiché questo tutorial è dedicato agli operatori nel campo del rilievo territoriale come geometri e liberi professionisti, le trattazioni della presente nota faranno riferimento solo a questo metodo di elaborazione.

Il trattamento dei dati GPS in modalità SINGOLA BASE

Prima di iniziare qualsiasi calcolo occorre chiarirci le idee sul significato e sulla scelta dei parametri di calcolo.

L'elaborazione dei dati infatti può essere fatta sia per le misure in doppia frequenza che per quelle in singola frequenza, o secondo specifici parametri di calcolo che tengono in considerazione l'utilizzo di entrambi in casi.

I parametri di calcolo

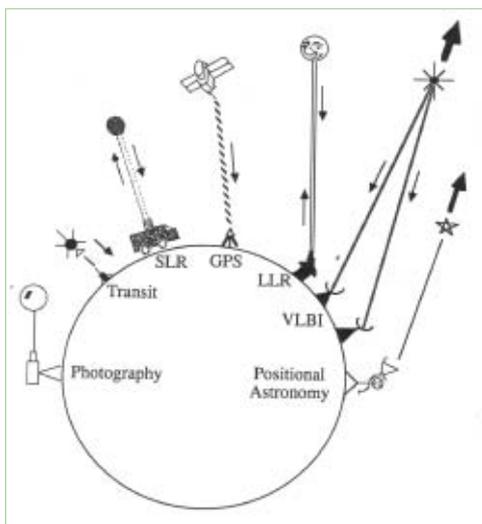
Prima di fare qualsiasi elaborazione è opportuno verificare quali siano i parametri di *default* dei calcoli che tutti i programmi di elaborazione dati memorizzano e propongono all'utente.

Tali parametri possono essere accettati nelle comuni elaborazioni così come sono, mentre per le elaborazioni più sofisticate, dove si richiede la massima precisione possibile, *devono* essere modificati dall'operatore secondo le proprie esigenze. Si prenderanno in esame i casi più frequenti, rimandando alle successive puntate i casi particolari di alcuni dei programmi di post-elaborazione trattati.

La larga diffusione del GPS nell'ambito professionale del rilievo geodetico e topografico registratasi nell'ultimo decennio non si è accompagnata con un analogo sviluppo delle conoscenze in termini di trattamento dei dati. Dal punto di vista generale, l'elemento determinante di questa nuova tecnologia è invece tutto legato al trattamento del dato, o *post-elaborazione*. Ed è altresì sempre più diffusa l'abitudine ad impiegare il GPS nella modalità *real time*, meno precisa e controllabile quanto alle coordinate finali, anche nell'ambito dei rilievi topografici e catastali. Si tratta di un ambito applicativo nel quale le misure dovrebbero essere validate da un processo specifico ed esatto (valori e parametri delle baseline, precisioni, etc.), conservandone memoria nella determinazione finale delle coordinate dei punti. Ma il lavoro richiede tempi sempre più stretti, e la formazione continua è un tema spesso ignorato in questo nostro Bel Paese. Così si preferisce concentrarsi sulla produzione, piuttosto che sulla qualità.

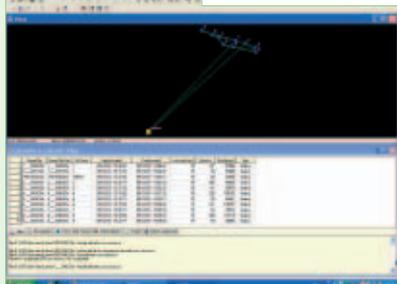
Con questo tutorial diamo inizio ad un inserto che riteniamo interessante per tutti coloro che vogliono fare del GPS uno strumento di evoluzione nel campo del rilievo territoriale, puntando sulla qualità dei dati, ottenibile solo a valle dell'esperienza. Questa prima parte getta le basi per le successive edizioni, che affronteranno passo per passo l'elaborazione dei dati GPS attraverso diversi software commerciali quali: TGO, della Trimble; SKI, della Leica Geosystems; l'implementazione tutta italiana del primo software di post-elaborazione GEMINI, sviluppato dalla Leonardo Software House in collaborazione con SOKKIA e il Politecnico di Como. Saranno esaminati anche software per l'analisi dei dati GLONASS+GPS, come il TTC della Trimble ed il PINNACLE della Topcon.

Buona lettura, ed un invito a seguire sulle pagine della nostra rivista le successive puntate del tutorial tenute da Vittorio Grassi, qualificato professionista con esperienza più che decennale sull'uso del GPS in campo geo-topografico e sul trattamenti dei dati.

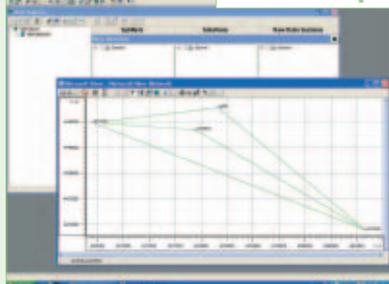


I sistemi di posizionamento dallo spazio

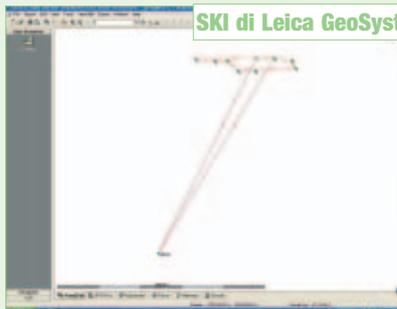
Gemini di Sokkia/Leonardo



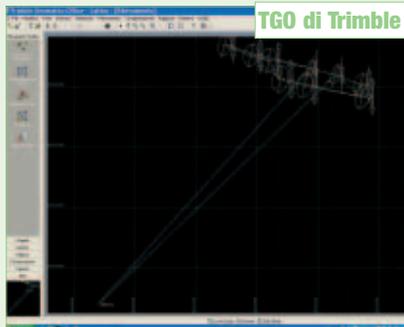
Pinnacle di Topcon



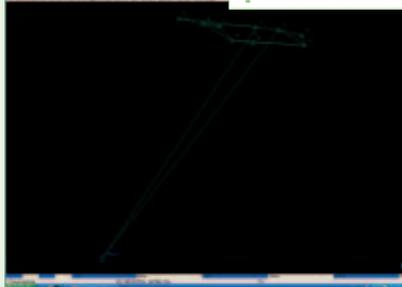
SKI di Leica GeoSystems



TGO di Trimble



Spectrum di Sokkia



Carrellata di screenshots dei principali softwares per l'elaborazione dei dati GPS in commercio

Angolo di "cut-off" o angolo d'elevazione

Di solito, nel rilievo mediante GPS, è consuetudine impostare tale valore a 15° sessagesimali anche se alcuni operatori consigliano, senza fondamento alcuno, un angolo di 10°.

Il valore di 15° è stato stabilito fin dagli albori della scienza del trattamento dati GPS, in quanto le osservazioni ai satelliti molto bassi sull'orizzonte oltre ad attraversare uno strato di ionosfera e di troposfera che esce fuori dai modelli utilizzati normalmente nei software di elaborazione, possono presentare anche molteplici effetti di multiriflessione. Inoltre con angoli troppo bassi i segnali satellitari presentano un basso rapporto segnale/rumore che provoca ulteriori problemi durante la risoluzione delle ambiguità causando una scarsa precisione nei risultati finali.

Quindi, per le comuni elaborazioni è consigliabile un valore di *cut-off* non inferiore 15°, mentre per elaborazioni più sofisticate e precise è opportuno a volte alzare tale valore anche a 20° 25°.

N.B.: se si prevede l'elaborazione di dati con angolo di 20°, lo stesso deve essere impostato sul ricevitore nella campagna di misure. In caso contrario alcune osservazioni non saranno impiegate per il calcolo della base e si potranno "perdere" uno o più satelliti. Può accadere, ad esempio, che vengano impiegati nel calcolo solo tre satelliti invece dei quattro necessari: in tal caso non ci si possono aspettare risultati affidabili.

Inoltre, variando l'angolo, è indispensabile eseguire una programmazione della campagna in quanto oltre al numero dei satelliti visibili occorre anche verificare l'andamento del GDOP e quindi scegliere opportune finestre dove la configurazione dei satelliti è quella ottimale e programmata. Sarebbe assurdo infatti elevare tale angolo perché si vuole una buona precisione e poi trovarsi, nel calcolo, un elevato valore del GDOP.

Le effemeridi

Una prassi standard, adottata in tutto il mondo nell'ambito dei rilievi GPS di routine, è quella di impiegare le effemeridi (traiettorie) trasmesse dai satelliti (broadcast) e registrate nel ricevitore.

Ma se le linee di base sono molto lunghe (per es. sopra i 50 km) o quando è

necessario procedere a rilievi di elevata precisione, è opportuno ricorrere alle effemeridi precise disponibili alcuni giorni dopo la data del rilievo sui siti ufficiali del sistema GPS.

N.B.: è perfettamente inutile usare le effemeridi precise allo scopo di aumentare la precisione di delle linee di base se non sussistono anche tutta una serie di attenzioni tali da garantire la precisione richiesta (lunghissimi tempi di osservazione, intervallo di campionamento elevato, calcolo della ionosfera e troposfera nell'ambito operativo delle misure GPS, bassissimo GDOP, ecc. ecc.).

Le effemeridi precise si possono reperire all'interno di vari siti, tra i quali vi segnaliamo quelli principali :

http://igiscb.jpl.nasa.gov/components/p_rods_cb.html che è il sito ufficiale del JPL (Jet Propulsion Laboratory), ente ufficialmente deputato a sovrintendere al sistema GPS USA.

<http://www.ngs.noaa.gov/gps/gps.html> che è il sito dell' National Geological Service, ovvero il Servizio Geologico Nazionale statunitense.

I files delle effemeridi che bisogna scaricare sono quelli nel formato XXXX.sp3, dove le prime 3 X indicano la settimana GPS, mentre la quarta sta ad indicare il giorno della settimana.

Normalmente la *settimana GPS* è indicata sui report delle misure GPS registrate, ma per chi volesse calcolarla essa è determinata come segue, a partire dalla definizione del giorno gregoriano, con le formule che seguono; ad esempio per la data del 19 febbraio 2005, abbiamo:

$$A = 367 * \text{anno} = 367 * 2005 = 735835$$

$$B = \text{anno} * \text{int} ((\text{mese}+9)/12) = 2005$$

$$C = \text{int} (7 * B / 4) = 3508$$

$$D = \text{int} (275 * \text{mese}/9) = 61$$

$$G = \text{giorno} = 19$$

$$J = 1721013.5 = 1721013.5$$

$$JD = A - C + D + G + J = 2543421.5$$

$$\text{Settimana GPS} =$$

$$\text{int} ((JD - 2444244.5) / 7) = 1310$$

$$\text{Il giorno della settimana} =$$

$$\text{mod} ((JD+0.5) / 7)+1 = 6$$

Quindi il file delle effemeridi da cercare per la data del 19 febbraio 2005 è: **13106.sp3**

N.B. Nelle formule: **int** è la parte intera dell'espressione, **mod** è il resto della divisione.

Intervallo di registrazione (Sampling rate)

L'intervallo di registrazione va scelto in funzione del tipo di rilievo e deve essere il medesimo su entrambi i ricevitori GPS e di conseguenza il medesimo selezionato sul programma di post-elaborazione dati. Si ricorda che non è concettualmente corretto registrare per esempio ad un intervallo di 15" ed elaborare a 30" (a parte il fatto che andrebbero persi la metà dei dati).

In genere l'intervallo di registrazione nell'ambito di rilievi geo-topografici può essere scelto tra 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30 e 60 secondi oppure, nel caso di rilievi in alta dinamica (traiettografia), l'intervallo di registrazione a volte è posto anche a 0.001 secondi.

La scelta dell'intervallo dipende da molteplici fattori, in genere per rilievi di tipo cinematico l'intervallo è compreso tra 1" e 5", mentre per rilievi di tipo statico tale intervallo può essere compreso tra 5" e 60". La maggior parte dei ricevitori attualmente in commercio propongono un intervallo di registrazione fisso di 15", oppure un intervallo predeterminato in funzione della modalità di rilievo scelta dall'operatore.

E' di estrema importanza notare che scegliendo il limite superiore per ogni tipo di lavoro si ottiene una minore dispersione dei risultati.

Ad esempio lavorando in modalità statica, se si vuole un'ottima precisione, è preferibile scegliere 60" al posto di 15". Inoltre si ricorda che per lavorare in modalità statica occorrono almeno 60 minuti di osservazioni per linee di base da 0 a 15 km. Questa almeno la teoria, anche se nella pratica a volte in funzione di diversi parametri e della finalità del rilievo la durata ottimale può essere superiore o inferiore a tale intervallo di tempo.

Il Modello ionosferico

La ionosfera è quella parte dell'atmosfera che circonda la terra ad altitudini tra 100 -1000 km ed è composta da elettroni, da atomi di carica elettrica e da molecole. La velocità di propagazione delle onde radio in alcuni punti della ionosfera è determinata dalla densità degli elettroni presenti in quel punto.

La densità degli elettroni viene quantificata contando il numero degli elettroni in una colonna verticale con un'area di base di un metro quadrato. Questo numero viene chiamato

contenuto totale di elettroni (*Total electron content*) o TEC.

Il TEC è una funzione di un insieme di radiazioni solari incidenti. Sulla parte dell'emisfero terrestre in cui è notte, gli elettroni liberi tendono a ricombinarsi con gli ioni, da cui la riduzione del TEC. Conseguentemente, in un particolare luogo della terra il TEC ha una forte variazione diurna.

Esistono, inoltre, variazioni stagionali del TEC, variazioni che seguono il periodo di rotazione mensile del sole (27 giorni) e quello del ciclo dell'attività solare (11 anni vedi fig. 3).

Nella fig. 1 si può vedere l'andamento dell'attività ionosferica del giorno 25 aprile 2005 nel mondo. Il colore azzurro indica una scarsa attività, il colore verde media attività, il colore giallo una forte attività ed il colore rosso una fortissima attività.

A partire dal primo riquadro a sinistra della prima fila e seguendo verso destra, i valori si riferiscono alle ore 0:00, 2:00, 4:00...fino alle 24:00.

Nella fig. 2, viene invece riportata la quantità media del TEC a partire dal 1995 e fino al 2005.

Tra gli errori conseguenti alle attività

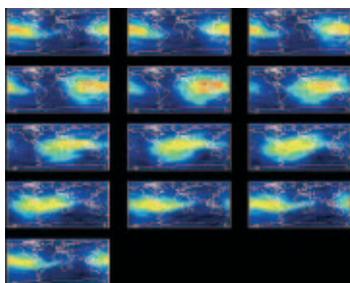


Figura 1

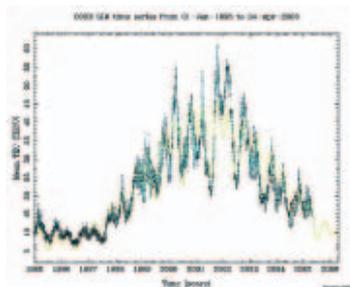


Figura 2

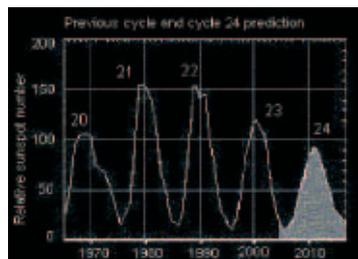


Figura 3 - Ciclo dell'attività solare (11 anni)

in ambito *ionosferico* l'errore maggiore riguarda la componente quota delle misure GPS.

L'utente che opera con strumentazione in singola frequenza può trarre profitto dal modello di correzione ionosferico mediante i coefficienti della stessa che vengono trasmessi quale parte del messaggio dai singoli satelliti. L'algoritmo di correzione è stato progettato per ridurre l'errore del gruppo di ritardo di circa il cinquanta per cento.

L'algoritmo impiegato per la correzione ionosferica delle misure è in grado di correggere sia le osservazioni diurne che quelle notturne basandosi su gruppi di coefficienti di correzione. Questi coefficienti sono schedulati a gruppi di dieci intervalli giornalieri o più dove occorre, al fine di calcolare i cambiamenti stagionali o quelli dovuti all'attività solare. Dopo aver applicato questo algoritmo di correzione alle pseudodistanze ottenute da un'unica frequenza, il rimanente errore è dovuto ad errori ionosferici di breve termine che in genere non vengono calcolati dai modelli usualmente impiegati.

Non tutti i programmi consentono una gestione completa del modello ionosferico da parte dell'utente, mentre quelli più sofisticati dispongono delle seguenti opzioni:

Standard - Il Modello Standard è un modello a singolo strato basato su un comportamento ionosferico empirico che è funzione dell'angolo orario del sole. Quando viene scelto tale modello si applicano le correzioni a tutte le osservazioni di fase. Le correzioni dipendono, come già detto, dall'angolo orario del sole al tempo della misura e dall'elevazione dei satelliti.

Computed - Il "Modello Calcolato" viene determinato analizzando le differenze fra i segnali L1 e L2 ricevuti a terra dal ricevitore. Quindi è applicabile solo con ricevitori in doppia frequenza. Il vantaggio che si ha usando il Modello Calcolato è che esso viene determinato in accordo con le condizioni prevalenti al momento e nella posizione di misura. Sono richiesti almeno 45 minuti di dati per poter calcolare un modello.

Klobuchar - Il "Modello Klobuchar" può essere usato se sono disponibili i dati dell'almanacco. Questo modello riflette particolarmente bene il ciclo di attività solare e può essere vantaggioso

quando l'attività solare è alta. Il modello di Klobuchar si deve selezionare solamente se si stanno usando osservazioni registrate con alcuni ricevitori (es. Leica). Se i dati di osservazione sono importati via RINEX, questo modello può essere impiegato solo nel caso in cui sia disponibile anche il file dati dell'almanacco.

None - Significa che non si vuole usare alcun modello, ed è impiegata per test operativi e analisi avanzate dei dati. E' bene non selezionare mai questa opzione in quanto non si possono avere buoni risultati senza usare un modello ionosferico adeguato alla situazione.

Il Modello troposferico.

Nella troposfera, la parte inferiore dell'atmosfera terrestre, la temperatura diminuisce man mano che aumenta la quota e quasi tutta l'attività descritta come "tempo atmosferico" avviene lì. Lo spessore della troposfera non è uguale ovunque. Essa si estende ad una quota inferiore sui poli e supera i 50 km sull'equatore.

Il suo effetto, che impropriamente si chiama rifrazione troposferica, non dipende dalla frequenza dei segnali radio. La rifrazione troposferica è un ritardo del segnale che può raggiungere i 2,0 ÷ 2,5 m allo zenit e cresce fino a 20 ÷ 28 m con un angolo di elevazione sull'orizzonte di 5°.

Varia in funzione della quota del ricevitore ed è dipendente da pressione, temperatura e umidità. La variazione di questi tre parametri meteorologici in funzione della quota, in particolare della temperatura e ancor più dell'umidità, è difficilmente modellabile e relativamente poco correlata ai rispettivi parametri misurati al suolo.

Esistono vari modelli per la stima del disturbo troposferico. Tipicamente sono basati su ipotesi di atmosfera in condizioni ideali, ovvero senza variazioni nel tempo e variazioni orizzontali (ad esempio modello di Saastamoinen). I modelli troposferici, come quelli ionosferici, non sono mai pienamente rappresentativi della reale condizione meteorologica al momento e nel luogo della misura; qualunque modellazione lascia un errore residuo dell'ordine del 5 -10% del disturbo totale.

Non tutti i programmi consentono una completa gestione dei modelli troposferici. Quelli più sofisticati consentono all'operatore la scelta tra i seguenti modelli:

Hopfield
Saastamoinen
Computed
None

Non c'è molta differenza nel risultato finale se si sceglie il modello Hopfield o Saastamoinen (almeno in Europa). Buoni vantaggi si ottengono con il modello **Computed** che richiede, però, almeno 45 minuti di osservazioni.

Mentre come già detto precedentemente, non si deve mai lavorare con l'impostazione "No troposphere" (Nessuna troposfera). Non ci si possono aspettare buoni risultati se non si usa un modello troposferico.

L'elaborazione delle baseline o linee di base

Una volta scelti i parametri di "default" o quelli che meglio si addicono al tipo di lavoro effettuato, nonché conseguentemente al tipo di calcolo che si intende eseguire anche in funzione della precisione desiderata, si passa alla elaborazione delle linee di base.

Tutti i programmi di elaborazione dati GPS utilizzano il metodo "per variazioni di coordinate" che sinteticamente consiste nel partire da una soluzione approssimata che viene migliorata attraverso un processo iterativo basato sul principio "dei minimi quadrati".

Inoltre, poichè le equazioni sono di tipo "trascendente", vengono "linearizzate" con un certo numero di termini partendo dal presupposto che le coordinate di partenza si conoscano con una precisione di circa 10 m.

Da qui l'esigenza di avere le coordinate del punto di partenza con sufficiente approssimazione, spesso coincidente con una determinazione in *single point*.

Quindi, per tradurre in pratica questo concetto, non si deve mai assumere come punto di partenza un punto che abbia le coordinate di navigazione, in quanto queste coordinate hanno un'approssimazione che varia da 15 a 30 m. Se lo si fa, si corre il rischio che il calcolo della linea di base non sia risolto attraverso il miglior approccio della soluzione delle ambiguità di fase pur avendo dei dati senza salti di ciclo.

Questo perché non si rispetta la precisione richiesta dalla linearizzazione.

A chi non è mai capitato di fare un calcolo di una linea di base fissando un

estremo e non risolvere le ambiguità, mentre fissando l'altro estremo le ambiguità sono tutte risolte?

Il motivo di questa incongruenza è proprio dovuto alla scarsa precisione delle coordinate iniziali, ed inoltre c'è da osservare che in ogni caso senza le coordinate iniziali adeguate la linea di base non potrà mai essere molto precisa.

Prima regola da rispettare, quindi, è quella di partire con delle buone coordinate che potrebbero essere quelle dell'IGM95 o quelle che si ottengono dal calcolo del "Single Point Positioning (SPP)" e che in italiano va sotto il nome di "Analisi non differenziata" dei dati.

Schema generale del trattamento dati

Anche se i diversi programmi di elaborazione dati usano algoritmi brevettati (Fara, Lambda, Tchebycheff, ecc.) le fasi principali del trattamento dei dati si possono generalmente sintetizzare nei seguenti passi:

1. Soluzione "punto singolo" con misure di codice. La soluzione approssimata è dedotta con l'uso del codice C/A (o P se disponibile).
2. Calcolo delle "singole differenze" di fase tra i due vertici della linea di base da calcolare e determinazione delle "doppie differenze".
3. Trattamento dei dati con le equazioni alle "triple differenze" partendo dalle coordinate approssimate ottenute precedentemente.

Quest'ultimo passaggio porta a determinare le componenti (ΔX , ΔY , ΔZ) del vettore nel sistema di riferimento geocentrico WGS84 senza il bisogno della conoscenza dell'ambiguità di fase iniziale.

Queste soluzioni, purtroppo, presentano diversi inconvenienti: una diminuzione della ridondanza, ipotesi sulla matrice di varianza covarianza (non sempre corrette a causa delle correlazioni) e maggior rumorosità, dovute alle tre differenziazioni fatte. Questo risultato, che può non rappresentare quindi quello ottimale, viene poi inserito come valore approssimato in un ulteriore processo di calcolo detto delle "doppie differenze".

Giunti a questa fase vengono quindi rideterminate, con processo iterativo, le componenti del vettore baseline assieme ai valori delle ambiguità di fase che non sono, generalmente, numeri interi (soluzione float) e vanno perciò fissati

agli interi più prossimi (soluzione fix). Per fare ciò, il programma di calcolo effettua un controllo delle deviazioni standard dei parametri delle "ambiguità", verificando che le stesse siano pari a piccole frazioni di ciclo.

Il fissaggio corretto dell'ambiguità è indicato, in molti programmi di elaborazione dati, da un fattore di qualità "ratio" il cui valore deve essere superiore ai minimi definiti in relazione alla lunghezza delle basi misurate, e dipendente dagli algoritmi impiegati. In alcuni programmi, invece, il fattore di qualità è indicato come *quality factor*, *varianza*, *contrast*, ecc..

Una volta fissate le ambiguità, le uniche incognite da calcolare risultano dunque le 3 componenti (ΔX , ΔY , ΔZ) del vettore che unisce i due vertici GPS. Quest'ultimo passaggio rappresenta normalmente il risultato finale del processo di calcolo con ambiguità fissate al valore intero (soluzione FIX).

I Test statistici

La bontà dei risultati del calcolo di una base può essere valutata secondo vari tipi di test statistici. I più utilizzati, di solito, sono i test "ratio" ed il test sulla "varianza".

Il test "ratio"

Il programma di calcolo individua, generalmente, più valori interi delle ambiguità, da utilizzare nella soluzione FIX. Vengono calcolate tutte le soluzioni con i valori probabili delle ambiguità e il relativo valore di varianza dell'unità di peso s_0^2 .

Il rapporto tra la seconda varianza più bassa e la migliore (la più bassa) in assoluto prende il nome di "ratio". Un rapporto elevato significa che tra le due soluzioni c'è molta differenza e, quindi, la soluzione scelta dal programma è quella che ha fissato correttamente gli interi.

Generalmente si ritiene accettabile un valore *ratio* >3 per linee di base inferiori a 5 km. Tale valore però diminuisce con l'aumentare della lunghezza della linea di base (per es. tra i 10 km e 20 km si accettano valori da 1,5 a 1,2). Tuttavia è da tener presente che questi valori oscillano anche di molto in funzione del software impiegato, per cui è bene consultare l'help in linea del programma e capire quali sono i valori standard consigliati.

E' bene tener presente che sul valore della ratio, essendo un rapporto, si può anche eseguire un test sul livello di confidenza in base alla distribuzione di

Fisher.

I Test sulla varianza dell'unità di peso (s_0^2).

La varianza dell'unità di peso fissata inizialmente s_0^2 (detta anche varianza di riferimento), deve risultare simile a quella stimata a posteriori che, in condizioni normali, dovrebbe essere pari ad 1, ma va ugualmente bene se quella a posteriori è comunque inferiore a quella a priori.

Elevati valori della varianza a posteriori possono indicare la presenza di:

- rumori nel segnale legati ad ostacoli o satelliti vicini all'orizzonte
- effetti troposferici o ionosferici non calcolati (ad esempio basi troppo lunghe calcolate con la solo L1)
- riflessioni multiple (multipath)
- errato calcolo delle ambiguità

L'elaborazione dati in doppia frequenza

Le elaborazioni in doppia frequenza possono essere eseguite combinando linearmente le frequenze L1 e L2 secondo le seguenti modalità generale:

$$L = n_1 * L1 + n_2 * L2$$

Dove n_1 ed n_2 possono essere numeri interi o frazionari, positivi o negativi. Ma usualmente le combinazioni adottate sono le seguenti:

WIDE LANE - é una combinazione lineare che viene normalmente impiegata per il fissaggio dell'ambiguità. Si è visto come nelle doppie differenze si ricerca l'intero più vicino: a causa del rumore di misura la ricerca può dare risultati diversi nel tempo. Se il rumore di misura è dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda, si può intuire la difficoltà ad individuare un solo probabile intero.

Conviene allora utilizzare le combinazioni delle portanti che permettano di simulare lunghezze d'onda maggiori. La combinazione *Wide Lane* (L_w) è ottenuta come differenza delle frequenze L1 - L2:

$$L_w = L1 - L2 = 1575.42 \text{ MHz} - 1227.60 \text{ MHz} = 347.82 \text{ MHz}$$

La lunghezza d'onda risultante sarà di 86,2 cm. Quindi, se la lunghezza d'onda è maggiore sarà più facile determinare

l'ambiguità, specie in presenza di rumori di misura, multipath o altro.

NARROW-LANE - questa combinazione è più precisa ma è più difficile determinare l'ambiguità intera di fase, e deriva dalla seguente combinazione:

$$LN = L1 + L2 = 575.42 \text{ MHz} + 1227.60 \text{ MHz} = 2803.02 \text{ MHz}$$

La lunghezza d'onda risultante sarà di 10,7 cm.

IONO-FREE - questa combinazione è esente dall'effetto del ritardo ionosferico ma distrugge il concetto di ambiguità intera. Quindi si usa solo per lunghe e lunghissime linee di base dove le soluzioni precedenti non sono valide.

Sono possibili ancora combinazioni di fase e di codice (Phase Smoothed Pseudoranges) ma sono generalmente impiegate per rilievi che richiedano una precisione intermedia tra l'uso del solo codice o l'uso delle fasi. Tipicamente ha una precisione sub-metrica e viene impiegato in applicazioni orientate al mapping GIS con apparati a basso costo.

Osservazioni e consigli

Ci sono programmi che consentono di impostare il tipo di combinazione desiderato mentre altri eseguono la scelta automaticamente. In quest'ultimo caso è bene andare a controllare, nel rapporto di calcolo, quale scelta sia stata fatta dal programma, tenendo presente quanto segue:

La soluzione Wide-lane non è in generale quella ottimale ma serve a stimare le ambiguità intere. Determinati questi valori di ambiguità, si procede con altre soluzioni tipo ionofree, narrow-lane, L1+L2 o solo L1.

- **Soluzione iono-free FIX:** (con ambiguità fissata ad intero) è quella ottimale nella maggior parte dei casi. Ottima soluzione quando si stimano le ambiguità intere con wide-lane. Non tutti i programmi di elaborazione dati hanno questo tipo di soluzione;
- **Soluzione iono-free Float:** va bene per basi di centinaia di km con lunghi tempi di acquisizione. Non è, generalmente, quella ottimale per basi più corte;
- **Soluzione wide-lane FIX:** può andar

bene per basi comprese tra 15 e 30 km è una soluzione da utilizzare con cautela. Non è generalmente consigliabile la soluzione wide-lane Float;

- **Soluzione L1 + L2 Fix:** ottima soluzione per basi fino a 20 km anche se da alcuni programmi è indicata come la soluzione ottimale per basi fino ad 80 km;
- **Soluzione L1 + L2 Float:** soluzione di scarsa precisione per qualsiasi lunghezza della linea di base. Va usata con cautela facendo opportuni controlli;
- **Soluzione L1 FIX:** da usare su basi corte (fino a 10 km) dove la ionosfera non influisce fortemente. Attenzione: se questo risultato si ottiene dalla elaborazione dei dati a doppia frequenza indica che la seconda frequenza era fortemente disturbata;
- **Soluzione L1 Float:** questa soluzione è meno precisa di quella L1 FIX. Per distanze maggiori di 15 km questa soluzione è poco affidabile a causa dell'effetto del ritardo ionosferico. Un altro motivo per cui si arriva a questa soluzione è un tempo di acquisizione troppo breve per il fissaggio delle ambiguità di fase.

L'elaborazione in singola frequenza

E' bene ricordare che con la singola frequenza si possono elaborare linee di base fino a 10 - 15 km. Per basi superiori a 15 km, diventa difficile arrivare alla soluzione FIX in singola frequenza, a causa della sensibilità delle osservazioni ai ritardi ionosferici, non eliminabili con la sola frequenza L1.

La soluzione ottimale è quella con ambiguità fissate ad intero (FIX). Se la soluzione non passa il test del ratio, viene generata la soluzione Float. La soluzione Float sulla sola L1 non è una soluzione ottimale: spesso il motivo per cui non si raggiunge il fissaggio dell'ambiguità è un tempo di occupazione troppo breve.

Quando un programma non risolve l'ambiguità'

A volte può capitare che, ad una prima elaborazione dei dati, il programma non riesca a risolvere le ambiguità. I consigli

da dare in questo caso variano molto da programma a programma. Esistono programmi che consentono un largo intervento da parte dell'operatore esperto ed altri che sono molto rigidi.

Tuttavia, il fatto che il software non riesca a risolvere le ambiguità è sempre indice di dati di partenza di scarsa qualità. L'ideale in questo caso sarebbe quello di ripetere le misure, ma questo non sempre è possibile. Si cercherà, quindi, di suggerire gli interventi più comuni.

Anche se va però sottolineato che qualsiasi intervento si esegue sui dati e anche se la linea di base verrà comunque calcolata, la sua affidabilità va controllata e l'operatore che realizza un tale intervento deve sempre conservare un ragionevole dubbio e fare delle opportune verifiche sul risultato ottenuto.

Altro suggerimento è quello di eseguire una modifica per volta e mai più modifiche contemporaneamente, salvo casi eccezionali.

Infine, cosa mai abbastanza ripetuta, è importante che l'operatore allo strumento prenda nota, su una idonea monografia, di tutto ciò che accade in campagna durante la sessione di misura: diagramma degli ostacoli, satelliti tracciati con l'orario, il rapporto segnale / rumore, valori del GDOP e loro modifiche, salti di ciclo con satellite interessato, su quale frequenza si è verificato, orario o epoca in cui è avvenuto, ecc. ecc.

Queste note vanno consegnate alla persona che elaborerà i dati in quanto costituiscono un prezioso supporto alla stesura dei calcoli finali.

Possibili interventi - E' bene ricordare, prima di addentrarsi sui possibili interventi, che se si eseguono due interventi separatamente ed entrambi portano alla risoluzione delle ambiguità, in generale è preferibile scegliere quella soluzione che elimina meno dati possibili, salvo le verifiche sul fattore di qualità visto in precedenza.

Intervento sui satelliti - Quasi tutti i programmi di elaborazione dati consentono di eliminare parzialmente o completamente un satellite. Per fare questo ogni programma offre strade diverse che bisogna imparare a scoprirle e ad utilizzarle. Se il programma di elaborazione dati utilizzato non prevedesse tali possibilità si dovrebbe ricorrere alla trasformazione dei dati grezzi in formato RINEX ed analizzare il

file con attenzione.

Occorre, inoltre, ricordare che l'eliminazione di uno o più satelliti provoca una modifica dei valori di GDOP. Per cui appena viene rielaborata la linea di base, prima ancora di verificare se sono state risolte le ambiguità, bisogna assicurarsi che il valore del GDOP sia rimasto nei limiti accettabili (normalmente inferiore al valore 8). E' perfettamente inutile ottenere la risoluzione delle ambiguità se il valore del GDOP fosse estremamente elevato. Questa regola è valida per osservazioni da pochi minuti fino a qualche ora, ma perde di significato se le osservazioni fossero di 24 ore o più.

Bisogna anche dire che se uno o più satelliti fossero presenti solo per poche epoche, specialmente all'inizio delle osservazioni, sarebbe opportuno procedere alla loro eliminazione.

Se, invece, i satelliti fossero sempre presenti si consiglia di andare a vedere il rapporto sull'elaborazione della linea di base per scoprire dove e quando si sono verificati i salti di ciclo e su quale frequenza.

I salti di ciclo si possono verificare secondo diversi casi come :

- **Riguardano un solo satellite** e sono avvenuti sia sulla L1 che sulla L2 soltanto per diverse epoche ma solo all'inizio delle osservazioni. In questo caso bisogna prendere nota dell'orario in cui sono cessati ed eliminare parzialmente il satellite fino all'epoca successiva a quella di cui si è preso nota.
- **Riguardano un solo satellite** e sono avvenuti sia sulla L1 che sulla L2 ma sono avvenuti sporadicamente durante tutto il periodo della osservazione. Bisogna eliminare totalmente il satellite.
- **Riguardano più satelliti** e sono avvenuti sia sulla L1 che sulla L2 soltanto per diverse epoche ma solo all'inizio delle osservazioni. Occorre eseguire una finestra sui dati (vedere paragrafo successivo).
- **Riguardano uno o più satelliti** e sono avvenuti solo sulla L1 o solo sulla L2: bisogna rielaborare la linea di base eliminando la frequenza interessata. Attenzione, però, alla lunghezza della linea di base. Se fosse corta (fino a 5km) nessun problema; se fosse di media lunghezza (da 5 a 10 km) planimetricamente la soluzione va

bene, altimetricamente si perderà qualcosa in precisione; se fosse maggiore di 15 km il risultato va considerato con molta, moltissima attenzione.

Altro caso che può verificarsi è che nel rapporto non sono presenti salti di ciclo oppure sono pochi e sporadici. In questo caso bisogna scoprire se il satellite ha tutti i dati previsti o mancano dati e in quale periodo.

Alcuni programmi consentono di avere un grafico come quello in figura 4:

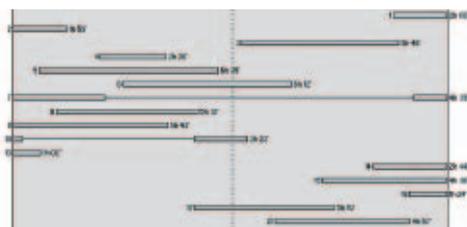


Figura 4

Questo grafico mostra in maniera molto chiara che:

- Il satellite 1 è presente solo alla fine della sessione di misura;
- il satellite 2 è presente solo all'inizio della sessione di misura;
- il satellite 7 è stato sempre presente ma ha registrato dati solo all'inizio e alla fine della sessione. Nel tratto intermedio indicato con una semplice linea non ci sono dati utilizzabili, etc.;

Se il programma di elaborazione dati fosse privo di tale funzionalità non resta che esaminare il file RINEX ed utilizzare il programma TeQC dell'UNAVCO scaricabile gratuitamente dal sito <http://www.unavco.org/facility/software/teqc/teqc.html> dove, oltre programma, si possono scaricare sia il manuale che alcuni esempi; naturalmente il tutto è in inglese.

Il programma TeQC mostra il grafico riportato in figura 5.

Questo grafico fa vedere molte più cose di quello precedente. I dati a doppia frequenza sono indicati con il simbolo #.

Dall'esame del grafico, ad esempio, si evince che:

- il satellite 1 è presente solo nella parte centrale della sessione;
- il satellite 2 è presente all'inizio e alla fine della sessione;
- il satellite 9, nella parte centrale, inizia con la presenza di multipath (simbolo S) e termina con dei salti di

by UNAVCO Summary File: ALBH0500.95S Receiver type:ROGUE srn-800

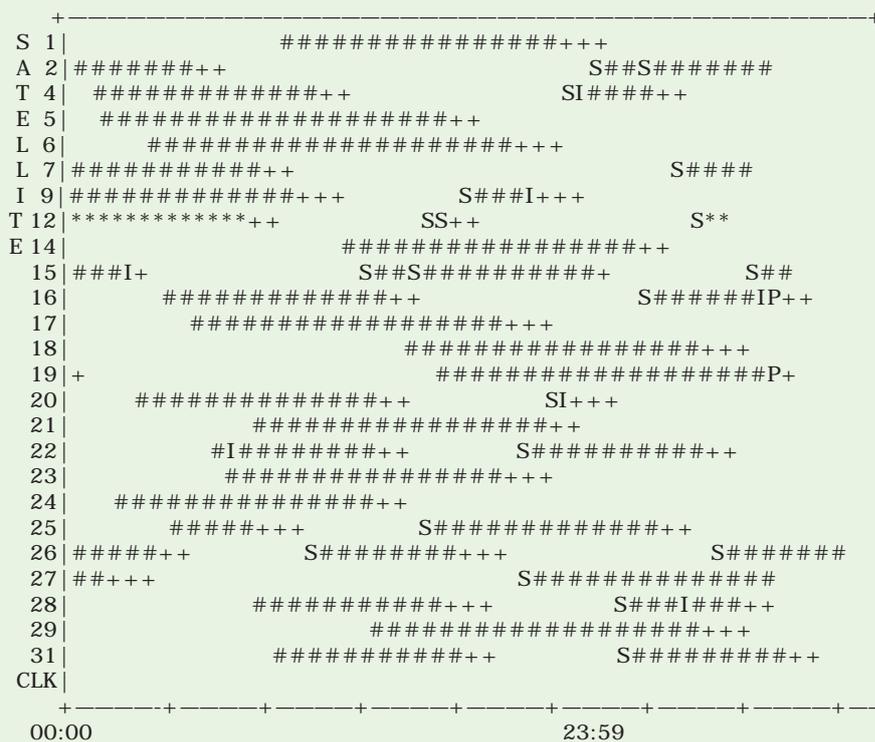


Figura 5

- ciclo (simbolo I);
 - il satellite 12 nella parte centrale ha registrato solo multipath etc.;
- Per l'esame dei dati acquisiti, dopo aver elaborato una linea di base, altri programmi di elaborazione dati mostrano i grafici dei residui utilissimi per individuare molti problemi. Si riporta un esempio (figura 6).

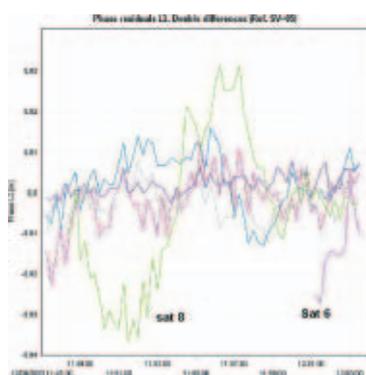


Figura 6

In questo grafico dei residui sulla doppia differenza di fase su L2 si nota che il satellite 6 è presente solo verso la fine della sessione ed ha residui più alti degli altri satelliti. Il satellite 8 invece, pur essendo quasi sempre presente, ha anche residui elevati.

Finestra sui dati - si ricorre a questo metodo quando occorre eliminare dei

dati all'inizio o alla fine delle osservazioni. Ad esempio quando più satelliti hanno salti di ciclo sulle diverse frequenze solo nelle prime epoche dell'osservazione, oppure quando uno o più satelliti entrano ed escono dalle osservazioni anche senza salti di ciclo.

E' molto più frequente la necessità di eseguire la finestra all'inizio delle osservazioni piuttosto che alla fine, però a volte capita di dover intervenire in tutti e due i casi.

Altre possibilità d'intervento sui dati - Alcuni programmi di elaborazione dati consentono altri tipi di interventi. In questi casi si consiglia di consultare il manuale d'uso del programma di elaborazione dei dati.

Consigli finali

Quasi tutti i programmi di elaborazione dati hanno una funzione che permette il calcolo automatico di tutte le linee di base per mezzo di opzioni del tipo: Automatic, Wizard, ecc. ecc.

Questi calcoli automatici possono andar bene per un primo sommario controllo dei dati raccolti durante la giornata di misura e al solo scopo di verifica della bontà dei dati, e per programmare eventuali misure aggiuntive per quelle linee di base che

presentassero dei problemi, ma nulla di più.

L'elaborazione automatica presenta diversi inconvenienti:

- Non tutti i programmi consentono di calcolare solo le linee di base indipendenti;
- Non sempre è possibile stabilire il verso di calcolo di una linea di base;
- L'analisi dei risultati è spesso difficoltosa.
- La precisione raggiungibile è nel complesso più scadente di quella che si può ottenere eseguendo una elaborazione manuale linea per linea.

L'elaborazione finale fa fatta esclusivamente a mano e linea per linea in quanto solo così è possibile variare, caso per caso, i parametri da impiegare ed il tipo di interventi da fare sui dati come ad esempio l'eliminazione parziale o totale di un satellite, eseguire idonee finestre sui dati, ecc. ecc.

Terminato il calcolo delle linee di base, e prima di passare alla compensazione delle rete, è indispensabile controllare la mancata chiusura di eventuali poligoni di collegamento. Questo per evitare che uno o più errori grossolani possano finire nella compensazione che risulterà scadente.

Inoltre, molti capitoli chiedono, oltre ai rapporti del calcolo delle singole linee di base, anche il controllo della mancata chiusura dei poligoni che non debbono superare determinati valori.

Ispezione dei file risultati

E' di estrema importanza imparare a leggere i diversi e numerosi report che, in tutti i programmi di elaborazione dati, accompagnano il calcolo delle linee di base.

Per fare ciò occorre tener presente la guida in linea del programma, e individuare sui tabulati l'esatta collocazione dei parametri significativi del calcolo. In genere sui tabulati finali di calcolo delle baseline GPS possiamo trovare i seguenti valori significativi:

- il numero delle ambiguità da calcolare e quelle risolte. Questi due numeri, per una buona soluzione della linea di base, dovrebbero essere uguali;

- le frequenze utilizzate per il calcolo della linea di base.;
- i test utilizzati per la verifica della soluzione scelta dal programma: ratio, contrast, ecc. ecc.;
- numero e distribuzione dei salti di ciclo: dovrebbero essere zero o pochissimi;
- Dati di campagna non utilizzati per il calcolo: dovrebbero essere pochissimi, altrimenti È indice di cattivi dati;
- Valori del GDOP: dovrebbero essere inferiori ad 8. Valori più elevati indicano una scarsa precisione nella linea di base;
- Valori del GDOP: dovrebbero essere inferiori ad 8. Valori più elevati indicano una scarsa precisione nella linea di base;
- Satelliti osservati e quelli utilizzati per il calcolo: questi due numeri dovrebbero coincidere. Non devono mai esserci meno di 4 satelliti.

Bibliografia

Alberto Cina	GPS Principi, modalità e tecniche di posizionamento Celid	2000
Leica Geosystem	Il sistema GPS Applicazioni e sviluppi Maggioli Editore	2003
Leica	Help in linea del software LGO	2004
Sokkia	Manuale di Spectrum Survey	2004
Sokkia	Manuale di Gemini	2004
Trimble	Manuale del TGO	2002
Topcon	Manuale di Pinnacle	2000
Vittorio Grassi	Esperienze ventennali nella elaborazione dei dati GPS sia con softwares scientifici che commerciali	Edizione fuori commercio

Autore

VITTORIO GRASSI

Vittorio Grassi è nato a Sulmona, in Abruzzo, dove ha frequentato l'Istituto Tecnico per Geometri. Dopo il diploma si è trasferito a Roma dove ha sostenuto alcuni esami nelle facoltà di Ingegneria Civile e Statistica. Si è specializzato, in un corso post laurea dell'Università "la Sapienza" di Roma, in Fotogrammetria terrestre ed aerea tenuto dal prof. Birardi.

Ha svolto la libera professione di Geometra occupandosi prevalentemente di rilievi geodetici, topografici ed aerofotogrammetrici.

Successivamente, dopo la vincita di un concorso nazionale, è stato capo del reparto geo-topografico della Direzione Generale delle Ferrovie dello Stato, poi delle Unità Speciali e dell'Alta Velocità.

E' stato docente nella Scuola Professionale delle Ferrovie dello Stato per corsi di addestramento dei geometri nuovi assunti specializzandoli in topografia, cartografia ed aerofotogrammetria.

Nel 1975 ha frequentato presso l'Università di Berna un corso sul GPS e poi si è specializzato negli Stati Uniti in "Elaborazione avanzata dei dati GPS". Ha frequentato i seguenti corsi: "GPS con il PC" presso l'Università "G. Colombo" di Padova; "Il GPS: metodologie ed applicazioni nell'ingegneria del territorio" presso il CISM (Centro Internazionale di Scienze Meccaniche) dell'Università di Udine; "Dynamic Real Time" organizzato da un'Università nel Maryland.

E' stato consulente per rilievi GPS presso varie Enti (Ferrovie Nord di Milano, Ente Flumendosa, Osservatorio Vesuviano, Università dell'Aquila) ed ha collaborato per lo sviluppo di softwares topografici e GPS con varie ditte tra cui Wild, Kern, AGA Geotronics e Leica.

