

Stazioni permanenti GPS e misure cinematiche in tempo reale

- L'affacciarsi del nuovo millennio è caratterizzato da soluzioni tecnologiche sempre più orientate ad utenti non specializzati, in tale contesto il diffondersi di applicazioni basate sull'impiego di informazioni geografiche, pone sempre più l'esigenza da parte dell'utente di soluzioni orientate al posizionamento affidabili e "pronte all'uso". A tale esigenza rispondono in linea di massima le sole soluzioni GPS orientate al rilievo cinematico e cinematico in tempo reale, altrimenti definito in letteratura come RTK (Real Time Kinematic). In particolare quest'ultima soluzione, basata su protocolli di trasmissione delle correzioni verso gli utenti rover, rappresenta una delle soluzioni che più soddisfa le esigenze di molteplici tipologie di utenti non specializzati nel trattamento di dati GPS.
- Le potenzialità produttive del posizionamento in tempo reale nell'ambito delle applicazioni territoriali sono enormi, e l'affidabilità delle soluzioni GPS dipendono tanto dalle reti di stazioni permanenti, quanto dalla infrastruttura di telecomunicazione.
- Attraverso un sintetico excursus storico l'articolo sviluppa un'ampia trattazione sulle potenzialità del GPS cinematico e dell'impiego che ne deriva nei settori di pertinenza.

Abbiamo assistito in questi ultimi anni all'istituzione di numerose stazioni permanenti GPS sul territorio nazionale. Alcune di queste sono inquadrare e coordinate in specifici progetti (es. ASI, EU-REF), altre rappresentano realtà locali e sono orientate a singole applicazioni.

Il "patrimonio geodetico" che tali stazioni producono quotidianamente, spesso disponibile via rete, è impiegato in importanti applicazioni quali la definizione di sistemi di riferimento e lo studio della loro evoluzione, la geodinamica mediante controllo delle deformazioni "crostali", l'inquadratura di reti geodetiche ed altro ancora.

Altri possono essere però i temi di interesse nelle quotidiane applicazioni di rilievo e produzione: le stazioni permanenti sono potenzialmente utilizzabili, in applicazioni cinematiche in tempo reale. Esse sono ormai una valida alternativa al rilievo tradizionale di dettaglio, rispetto al quale possono addirittura essere più produttive. Applicazioni interessanti non riguardano solo il mondo della cartografia e della topografia, ma campi estremamente diversificati quali "car-navigation" o "machine-control": macchine movimento terra, flotte di veicoli o velivoli sono tutti potenziali utenti del sistema GPS. In questa nota si vuole parlare dei potenziali vantaggi che una rete di stazioni permanenti GPS può offrire a coloro che fanno misure cinematiche in tempo reale.

Il posizionamento cinematico ieri e oggi

Il GPS è stato inizialmente applicato prevalentemente nella modalità di posizionamento statico. La modalità cinematica

di precisione rappresentava già però alla fine degli anni ottanta - inizio anni novanta, un'allettante prospettiva ancora legata al mondo della ricerca ma con ottica volta al mondo delle applicazioni. Nel 1989 F.Ackermann dell'Università di Stoccarda, richiese a tutti i gruppi di ricerca, disponibilità ed attrezzature per eseguire esperienze di GPS cinematico fotogrammetrico, finalizzate alla determinazione dei centri di presa della camera fotogrammetrica. Contestualmente anche in Italia venivano portate a termine le prime esperienze di GPS cinematico fotogrammetrico: in fig. 1 è riportata la traiettoria calcolata in una di queste prime esperienze, eseguita a Torino nel 1991.

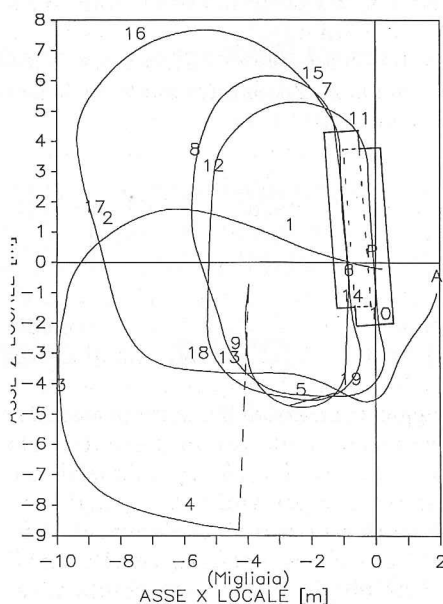


Fig.1 - Volo fotogrammetrico su Torino (anno 1991)

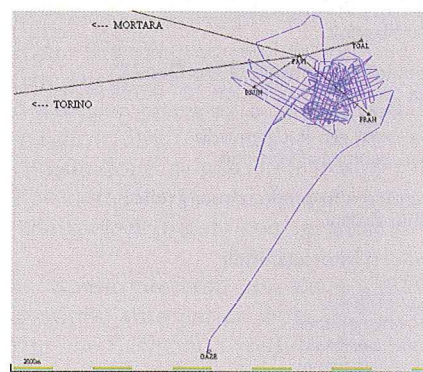


Fig.2 - Volo su Pavia per misure laser a scansione (anno 1999)

Al giorno d'oggi questo può essere fatto più facilmente: i ricevitori GPS sono più diffusi ed adeguati a questo scopo. In figura 2 è riportata la traiettoria cinematica di un volo recentemente eseguito a Pavia per misure laser a scansione, nel maggio 1999. Ma cosa è cambiato in questi anni?

Per poter operare in modalità cinematica è utile poter disporre di numerosi satelliti: la costellazione GPS, oggi garantisce ciò ma nel volo eseguito nel 1991 (fig.1), i soli 4 satelliti presenti nelle poche ore in cui era realizzabile una ripresa fotogrammetrica, rappresentavano un primo evidente limite. La perdita di contatto con anche uno solo di questi, richiedeva una nuova inizializzazione che senza le attuali tecniche di fissaggio delle ambiguità anche durante il movimento (OTF) ben difficilmente poteva portare a risultati affidabili, vanificando spesso tutta l'operazione.

Oltre al completamento della costellazione satellitare, sono state sviluppate tecniche di inizializzazione delle misure

di fase "On The Fly" (OTF) che consentono di affrontare più tranquillamente il problema dei *cycle slip* in volo, rendendone possibile il recupero.

In tutti i casi però il rilievo cinematico risulta per sua natura poco ridondante: questo produce infatti una posizione per ogni epoca di misura e diventa determinante anche ciò che accade nella stazione a terra. Eventuali *cycle slip* o perdita di dati nel ricevitore base, si traducono in epoche mancanti, nel processo cinematico. È dunque cautelativo utilizzare possibilmente più ricevitori a terra.

Se aumentare il numero di ricevitori "base" può essere pesante da un punto di vista logistico e operativo, proprio in questa fase le stazioni permanenti possono dare il loro contributo. Recenti sperimentazioni [2] evidenziano che queste, anche a grande distanza possono essere utilizzate nel posizionamento cinematico di precisione. A questo risultato contribuiscono senz'altro i nuovi algoritmi OTF, le effemeridi precise (nel caso di post-elaborazione) ma anche la conoscenza precisa delle coordinate dei siti delle stazioni permanenti GPS che si utilizzano come riferimento.

L'inizializzazione con misure di fase

L'inizializzazione cinematica della misura di fase, con ricevitore in movimento, si può ottenere integrando misure di codice e di fase, unitamente a sofisticati algoritmi di ricerca degli interi. La tecnica è detta più spesso OTF (*On The Fly*), ma ha sinonimi quali AROF (*Ambiguity Resolution On the Fly*), OTR (*On The Run*) ecc. L'acronimo non indica tuttavia una stessa procedura di calcolo: con la stessa sigla si indicano tecniche numerose e basate su principi diversi. Quasi tutti i programmi che prevedono il recupero delle ambiguità "in volo", fanno uso congiunto di codici e di fasi e di ricevitori a doppia frequenza. Tale trattazione viene presentata in fondo all'articolo per quanti necessitassero di ulteriori approfondimenti.

Misure cinematiche e stazioni permanenti GPS

Le misure cinematiche possono essere eseguite in maniera "continua" per varie applicazioni. In fotogrammetria la determinazione della posizione dei centri di presa della camera fotogrammetri-

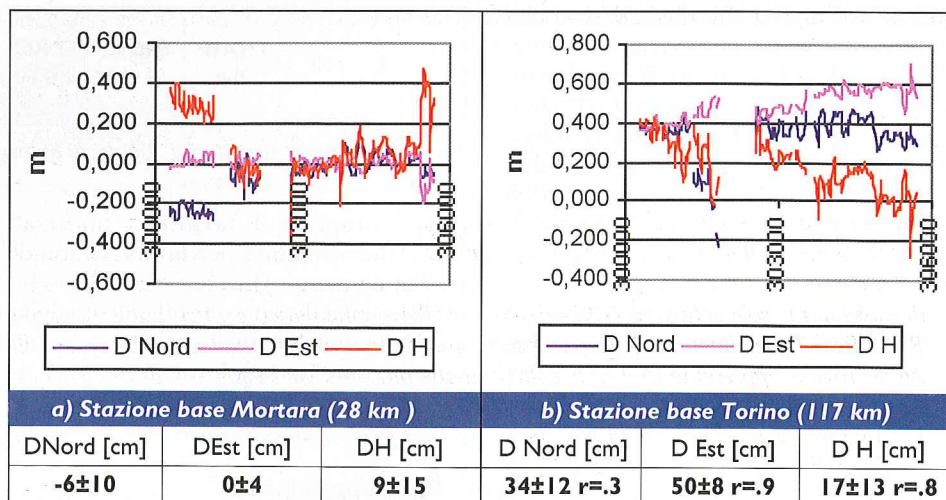


Fig.4 - Discrepanze rispetto alla traiettoria di riferimento

ca permette di ridurre l'appoggio a terra del blocco [1]. Misure Laser a scansione si basano sulla determinazione del vettore tra centro del sensore (in volo) e oggetto a terra: al GPS il compito di fornire l'origine.

Se il trattamento dei dati cinematici da stazioni base vicine alla zona del volo (pochi km), non comporta di norma problemi di inizializzazione o altro, valutiamo sperimentalmente ciò che succede con l'allontanamento della stazione di riferimento a decine o centinaia di km: tale è la densità attuale di stazioni permanenti GPS sul nostro territorio.

Nelle esperienze che seguono [4], dedotte da un volo per misure laser presso Pavia (fig.2), si sono considerate stazioni base a distanza variabile dalla zona di volo e analizzate le discrepanze rispetto ad una traiettoria nota di riferimento (ottenuta dalla media di più traiettorie da stazioni vicine).

Consideriamo una stazione di riferimento (Mortara) posta alla distanza di 28 km dalla stazione in volo. Nel diagramma di figura 4a sono riportati gli scarti nelle 3 componenti rispetto alla traiettoria di riferimento, in funzione del tempo di volo (in secondi). La loro media è di tipo centimetrico con sqm al massimo di ± 15 cm per la quota, che subisce le maggiori variazioni. I valori più elevati si riscontrano nella prima parte del volo dove, a causa di *cycle slips*, l'inizializzazione è meno affidabile. A questa distanza dal ricevitore mobile, l'impiego di diversi modelli troposferici ed effemeridi precise non ha influenzato significativamente i risultati.

Considerando come stazione di riferimento GPS quella permanente di Torino,

a circa 117 km dalla zona del volo, lo scarto quadratico medio delle discrepanze (fig. 4b) delle posizioni rispetto alla traiettoria di riferimento, è contenuto in ± 13 cm. A questa distanza appare determinante l'utilizzo di effemeridi precise per il miglioramento della precisione. Nonostante la soluzione sia dichiarata con ambiguità fissata (anche se con basso valore del *ratio*), la sua determinazione non può considerarsi in questo caso affidabile, come dimostrano sistematici di anche 50 cm nella componente Est (quella prevalente). Detti sistematici si comportano in maniera fortemente lineare in funzione del tempo di volo, come si deduce dall'indice di correlazione lineare *r* prossimo a 1. Considerazioni analoghe possono essere fatte anche aumentando la distanza tra stazione base e mobile a più di 300 km.

Le precisioni centimetriche sono dunque raggiungibili a patto di modellare sistematici con trend lineari. In operazioni cinematiche fotogrammetriche o per laser a scansione questo può essere fatto, a partire da punti d'appoggio a terra.

Posizionamento cinematico in tempo reale

Le misure in tempo reale (RT), sono necessarie per applicazioni topografiche, quali tracciamenti, nelle quali la posizione deve essere subito nota in un sistema di riferimento assegnato. Anche in applicazioni del rilevamento che vengono tradizionalmente risolte con tecniche "a posteriori" risulta però utile il RT. La necessità deriva dal poter avere direttamente sul terreno un controllo sulla bontà delle

misure effettuate. Le immediate verifiche che si facevano con misure classiche (media e sqm di più strati angolari, chiusure nella livellazione e altro) con il GPS non sono più possibili. Può succedere allora che nel lavoro di elaborazione dei dati possano sorgere problemi non rilevabili in campagna: ad esempio la bontà dell'inizializzazione della misura di fase sarà nota solo a posteriori.

Il rilievo in tempo reale è dunque apprezzato anche perché fornisce la sicurezza della correttezza del dato: i parametri visualizzabili sul display del ricevitore segnalano ad esempio quando la soluzione si può considerare a interi fissati, cycle slip o altro.

Le tecniche in tempo reale si basano sul posizionamento differenziale DGPS (*Differential GPS*). Questo può essere applicato alle misure di codice, per raggiungere precisione metrica o alle misure di fase con precisione centimetrica. In quest'ultimo caso la tecnica prende il nome di RTK (*Real Time Kynematic*) e richiede procedure di inizializzazione OTF

Il posizionamento differenziale DGPS

Il posizionamento differenziale DGPS è una tecnica basata sull'impiego di un ricevitore "base" in stazione su un vertice noto ed uno o più, solitamente in movimento, che occupano i vertici di nuova determinazione. La stazione "base" A, calcola le correzioni differenziali (PRC) su ogni range satellite - ricevitore base. Il range $\rho_A^j(t_0)$ è noto, in quanto note le coordinate della stazione A e dei satelliti j. Misurato il range $R_A^j(t_0)$, la correzione del range della fase per il satellite j all'epoca t_0 sarà [5]:

$$PRC(t_0) = \rho_A^j(t_0) - R_A^j(t_0) \quad (8)$$

Viene determinata anche la variazione di questa correzione nel tempo (RRC): entrambe sono trasmesse al ricevitore remoto B. Questo, applicate le correzioni ai range satellite - ricevitore mobile, può eseguire un posizionamento di tipo "assoluto" a partire da osservazioni corrette:

$$\rho_B^j(t) = PRC(t) + R_B^j(t) \quad (9)$$

La correzione del range della fase all'epoca t viene calcolata con la:

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC(t_0)(t - t_0) \quad (10)$$

...	1 bit	UDRE 2 bit	Sat.ID 5 bit	PRC 16 bit	RRC 8 bit	IOD 8 bit	1 bit	UDRE 2 bit	...
-----	-------	---------------	-----------------	---------------	--------------	--------------	-------	---------------	-----

Fig.5 - RTCM messaggio tipo 1 (fino a 40 bit ogni satellite)

dove compare il termine "latenza" ($t-t_0$), determinante per la precisione di posizionamento. Questo non è altro che la differenza di tempo tra il calcolo della correzione, nella stazione base, e la sua applicazione (tempi di trasmissione, calcolo ecc...).

La trasmissione della correzione differenziale

Le correzioni differenziali possono essere trasmesse secondo un protocollo standard chiamato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime service*), [10] articolato in numerosi messaggi. A titolo d'esempio, si riporta in fig.5 il contenuto del messaggio "Type 1" che contiene le correzioni differenziali PRC e la loro variazione RRC, per ogni satellite.

Esistono comunque formati proprietari delle varie case costruttrici, basati su pacchetti di trasmissione con compressioni ottimizzate, per una veloce trasmissione. Fondamentale è il mezzo di trasmissione della correzione differenziale: le normali radio in dotazione con i ricevitori GPS possono coprire distanze limitate a pochi km. Altri sistemi radio sono potenzialmente possibili: particolarmente promettente è il sistema DAB (*Digital Audio Broadcasting*).

La soluzione attualmente percorribile per ricevere e trasmettere a elevate distanze risulta la telefonia cellulare, che rispetto alle trasmissioni radio presenta il vantaggio di consentire una comunicazione "in andata e ritorno" tra stazione base e mobile, dove ciò possa essere utile. Un modem nella stazione permanente GPS, provvede ad inviare in tempo reale

le correzioni differenziali all'utente della stazione mobile, che ne fa richiesta tramite un modem GSM. In fig.6a è raffigurato uno di questi modem, composto da un combinatore a 2 tasti.

Misure RTK da stazioni permanenti: precisioni sperimentali

Per valutare la precisione RTK al variare della distanza dalla stazione di riferimento, si riportano i risultati di alcune esperienze fatte a partire dalla stazione permanente di Torino su poligoni di calibrazione a distanza crescente da questa.

In figura 7 sono riportate le discrepanze tra le coordinate del poligono e quelle ottenute in tempo reale, in planimetria (X,Y) nel sistema UTM-WGS84 e in altimetria (altezza ellissoidica), in funzione della distanza in km (ascissa) dalla stazione di riferimento. Si noti come le massime discrepanze in planimetria, non superino il valore di ± 5 cm ed i risultati siano analoghi alle varie distanze dal ricevitore fisso. Anche a 33 km non si rilevano significativi errori sistematici planimetrici. Effetti sistematici si evidenziano sulla componente altimetrica Z dove il decremento di precisione pare correlabile alla distanza "d" tra stazione base e mobile: i massimi scarti, legati probabilmente a ritardi non modellati del segnale nella troposfera e ionosfera, sono compresi in ± 14 cm a 33 km dalla stazione base.

Nelle esperienze eseguite non si sono evidenziati particolari problemi nella ricezione della correzione differenziale. Non pare invece correlabile la durata dei tempi di inizializzazione alla distanza tra le stazioni GPS: questa può durare pochi



Fig. 6 - a, b. Modem GSM e ricevitore GPS

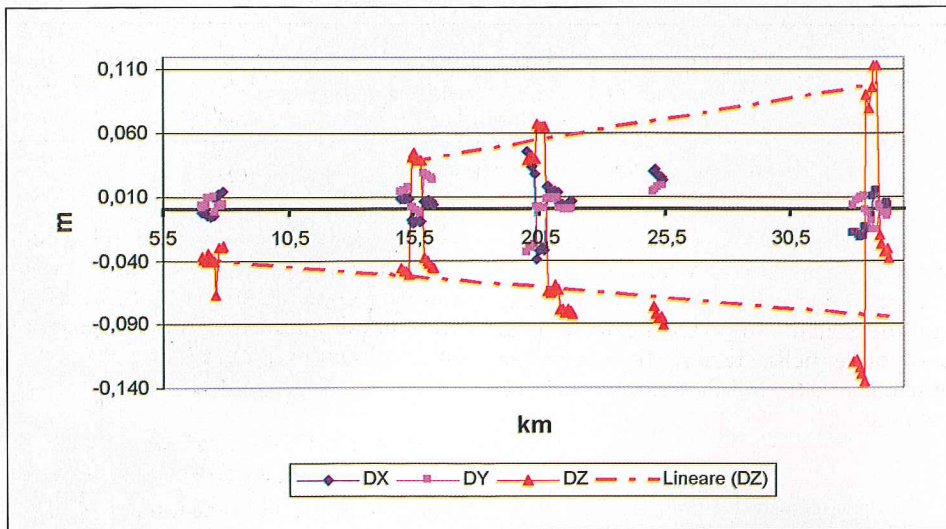


Fig.7 - Differenze tra posizione "nota" e cinematica RTK

secondi o diversi minuti in maniera poco dipendente dalla distanza. Ruolo fondamentale giocano evidentemente rumori di misura come *multipath*, interferenze o altre cause non rilevabili con la sola esplorazione visuale del sito.

Le stazioni virtuali

L'elevata precisione della tecnica RTK può essere limitata dai ritardi non modellati della ionosfera e della troposfera. La presenza di errori sistematici, da un lato richiede avere stazioni sufficientemente vicine tra loro per abbattere errori comuni col metodo differenziale ma dall'altro si scontra con il problema economico della realizzazione e gestione di un gran numero di stazioni GPS.

Un approccio all'utilizzo delle stazioni permanenti per misure cinematiche in RT si basa sul concetto innovativo di "Stazioni Virtuali" (*Virtual Reference Station*=VRS). Una rete di stazioni permanenti GPS (ma anche Glonass), è connessa in continuo via linea telefonica, ad un centro di controllo e raccolta dati dove, in base alle informazioni raccolte da tutti i ricevitori viene creato un *data base* di correzioni "regionali". Queste sono usate per creare una stazione GPS di riferimento "virtuale" situata in prossimità alla posizione del ricevitore mobile. Quest'ultimo interpreta e usa quindi dati che sono equivalenti a quelli che proverrebbero da una stazione di riferimento reale molto vicina.

Il principale vantaggio di questa tecnica è la riduzione e l'eliminazione dei sistematismi, che contribuisce a migliorare le prestazioni RTK. È possibile così diradare la densità della stazioni "reali"

di riferimento. Il *software* di gestione modella gli errori ionosferici, troposferici e d'orbita, interpolandoli in base alla posizione del ricevitore mobile a cui deve trasmetterli. Il centro di controllo deve dunque conoscere la posizione del ricevitore e aggiornarla per migliorare il calcolo della correzione differenziale: questo presuppone una trasmissione tra stazione base e mobile a due vie, possibile solo attraverso soluzioni di telefonia mobile.

I risultati resi noti dagli autori parlano di precisioni planimetriche dell'ordine di 1÷3 cm a distanza di 50 km dalle stazioni di riferimento e di una capacità di fissaggio ad intero delle ambiguità di fase nella metà del tempo rispetto a quanto occorrerebbe senza l'utilizzo di stazioni virtuali.

Conclusioni

L'affidabilità degli algoritmi OTF permettono di utilizzare stazioni GPS come ricevitori base anche a distanze notevoli, senza apparenti decrementi di precisione del posizionamento cinematico anche in tempo reale. È utile comunque compiere ancora qualche passo avanti. Per le procedure cinematiche è meglio disporre di dati con tempo di campionamento a 1 secondo, non solo per una buona previsione di *bias* con procedure di calcolo basate generalmente su filtro di Kalman, ma anche per applicare eventuali algoritmi di interpolazione.

Poche stazioni permanenti oggi trasmettono correzioni differenziali, come già da tempo avviene in altri paesi, se si esclude progetti in corso di realizzazione come quello presentato nell'ultima edizione di questa stessa testata. Un servizio

di questo tipo renderebbe interessante il GPS in campi ben più vasti del solo rilievo topografico per la cartografia. Diversi sono infatti gli ambiti di interesse (es. movimento terra o altro ancora) nei quali la sola rimozione della *Selective Availability* non ha portato al raggiungimento delle precisioni centimetriche che vengono generalmente richieste.

ALBERTO CINA
Politecnico di Torino
Dipartimento di Georisorse e Territorio
Cina@polito.it

BIBLIOGRAFIA

- 1 Ackermann, F. (1986) - *Camera orientation data for aerial triangulation* - ISPRS symposium Comm. III, Rovaniemi (Finland).
- 2 Ackermann, F. (1997) - *GPS for photogrammetry* - Bollettino di Geodesia e Scienze affini, 4, 387-406
- 3 Allison, T. (1998): *An Introduction to Carrier Phase and RTK initialization* - Trimble user conference, 1998.
- 4 Baldo, M. Cina, A. Manzano, A.(2000): "Gps cinematico in appoggio a misure laser a scansione". Atti della IV Conferenza ASITA, Genova, 2000
- 5 Cina, A. (2000) - GPS. Principi modalità e tecniche di posizionamento. Torino, CELID, 2000 - ISBN88-7661-417-6
- 6 Cina, A. Manzano, A. Venuti, G. (1995) - *Utilizzo delle nuove tecniche GPS cinematiche in fotogrammetria* - Rivista del Dipartimento del Territorio, n.3, 125-150
- 7 Hofmann-Wellenhof, B. Lichtenegger, H. Collins J. (1997) - "GPS Theory and Practice". New York, Springer-Verlag.
- 8 Landau, H. et al. (1995) - "Development and Implementation of a Centimeter-Accurate Real Time-Kinematic Positioning System." Proceeding of ION-GPS 95.
- 9 Leick, Alfred (1995): "GPS satellite surveying". New York, Wiley & Son.
- 10 RTCM Special Committee (1998) - *RTCM recommended standards for differential GNSS.*, Alexandria, Virginia (USA).
- 11 Talbot, N.C. (1998): "Recent advances in Real-Time Kinematic". Proceeding of ION-GPS 98.