



ISSN 1590-2595

quaderni di geofisica

n. 39

LE PRIME STAZIONI GPS PERMANENTI INGV-CNT PER IL MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI CROSTALI DELL'AREA ITALIANA

Marco Anzidei, Giuseppe Casula,
Alessandro Galvani, Federica Riguzzi,
Grazia Pietrantonio, Angelo Massucci, Sergio Del Mese

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

2006

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Viviana Castelli (MI)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Sergio Gurrieri (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Leonardo Sagnotti (RM2)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Gianluca Valensise (RM1)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - responsabile

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

Sabrina Palone

Tel. +39 06 51860405

Fax +39 06 51860585

redazionecen@ingv.it

quaderni
di
geofisica



**LE PRIME STAZIONI GPS PERMANENTI INGV-CNT PER IL
MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI CROSTALI
DELL'AREA ITALIANA**

Marco Anzidei, Giuseppe Casula, Alessandro Galvani, Federica Riguzzi,
Grazia Pietrantonio, Angelo Massucci, Sergio Del Mese

INGV-CNT

U.F. Geodesia e Telerivamento

Riassunto

In questi ultimi anni molti Enti o Università italiane e straniere impegnate in studi geofisici a carattere geodinamico e geodetico, hanno sentito la necessità di realizzare reti GPS in monitoraggio continuo capaci di raggiungere le migliori precisioni possibili ottenibili e al contempo di poter disporre di dati inquadrati in un solo sistema di riferimento. Infatti i dati GPS acquisiti in continuo su reti realizzate con procedure automatizzate di acquisizione, trasmissione e analisi dei dati, rappresentano un potente mezzo per studiare le deformazioni del suolo di origine tettonica e vulcanica, consentendo avanzamenti significativi nella ricerca geofisica e geodetica e per scopi di monitoraggio orientati per applicazioni di Protezione Civile.

Con questi obiettivi sono state realizzate le stazioni GPS di Roma (INGR), Villavallelonga (VVLO), Roseto degli Abruzzi (RSTO), Gibilmanna (GBLM), Preturo (INGP) e Monte Argentario (MAOO), distribuite nelle aree italiane di principale interesse geodinamico e sismologico. Queste sono state collocate in particolare dove andava colmato un gap sulla distribuzione di stazioni permanenti già esistenti afferenti alla rete GPS dell'Agenzia Spaziale Italiana. Le stazioni, realizzate secondo criteri che soddisfano la ricerca geofisica, sono costituite da ricevitori GPS geodetici a doppia frequenza le cui antenne sono state collocate su pilastri in cemento armato prevalentemente fondati su affioramenti rocciosi.

In questa pubblicazione viene descritto lo stato attuale della rete, la struttura dei monumenti geodetici, la strumentazione utilizzata, le modalità di acquisizione e trasmissione dei dati, la loro analisi e archiviazione. Viene anche mostrato un confronto sulla qualità dei dati prodotti dalle stazioni INGV rispetto alle stazioni di Matera (MATE) e Cagliari (CAGL), afferenti alla rete internazionale dell'International Geodynamic Service.

Introduzione

La tecnica geodetica spaziale Global Positioning System (GPS) rappresenta un mezzo estremamente potente, versatile ed efficace per fornire informazioni relative alle deformazioni del suolo non solo per scopi puramente scientifici ma anche per la prevenzione di rischi naturali e di Protezione Civile. In particolare, rispetto alle altre tecniche di geodesia spaziale disponibili (VLBI, SLR, DORIS, SAR), la tecnica GPS, proprio per la sua accuratezza, versa-

tilità di utilizzo, costi limitati, rapidità e maggior semplicità nell'acquisizione e trattazione dei dati, si è largamente diffusa per scopi geofisici [Granci, 1999]. La motivazione principale che porta alla necessità di avere a disposizione informazioni geodetiche di alta precisione per scopi geofisici, ottenute da reti di stazioni GPS permanenti a densità sufficientemente elevata, è lo studio della evoluzione spaziale e temporale delle deformazioni crostali, di aree soggette a rischio sismico e vulcanico. Infatti, i dati provenienti dalle reti GPS possono essere utilizzabili con successo per la modellazione della sorgente deformativa, permettendo di ampliare le conoscenze sui processi fisici che causano terremoti ed eruzioni. In ambito geodinamico, queste reti permettono di studiare la cinematica delle placche e al contempo forniscono dati utili per lo studio dei parametri atmosferici (ionosfera e troposfera) [Anzidei et al., 1997, Mirena et al., 1997, Circolo and Spalla, 1997].

Esempi di applicazione di reti GPS permanenti ad una densità spaziale sufficiente per il monitoraggio delle deformazioni della crosta terrestre ci provengono dal Giappone e dagli U.S.A. già dai primi anni '90 [Sheimada and Bock, 1992; Miyazaki et al., 1995; Tsuji et al., 1995; Zhang, 1996; Zhang et al., 1997; Naito et al., 1998; Shen et al., 1998; Bock et al., 1997]. Queste reti di monitoraggio geodetico (circa 1000 stazioni solo in Giappone, ed altrettante quelle previste nell'ambito del progetto Plate Boundary Observatory, per la costa Pacifica degli Stati Uniti; <http://sopac.ucsd.edu/projects/pbo>) stanno producendo importanti risultati sulla conoscenza dei campi di deformazione sia a scala locale (aree vulcaniche e faglie attive) che regionale (cinematica delle placche). Inoltre, il loro inquadramento nella rete globale dell'International GPS Service for Geodynamics (IGS), sta consentendo di studiare direttamente la cinematica delle placche continentali. L'utilizzo di reti GPS permanenti, contestualmente a quelle non permanenti [Dong et al., 1998], oltre alle applicazioni geodinamiche, consentono di studiare le deformazioni legate al ciclo sismico o eruttivo [Wdowinski et al., 1997]. L'obiettivo è quello di utilizzare i dati geodetici per identificare i segnali associati a possibili correlazioni spaziali e temporali dei fenomeni vulcanici e sismici [Wald D.J. and Heaton T.H., 1994; Pollitz et al., 1997]. Nel caso dello studio delle deformazioni a scala locale, la combinazione di dati GPS con osservazioni di tipo Interferometria Differenziale SAR [Bock Y. and Williams S., 1997] permette una definizione completa degli spostamenti superficiali associati al ciclo sismico [Massonnet D. et al., 1993];

Massonnet et al., 1996] e della dinamica dei vulcani [Massonnet et al., 1995; Briole et al., 1997]. In Italia, le tecniche GPS e DInSAR sono state recentemente impiegate con successo per lo studio delle sorgenti della sequenza umbromarchigiana del 1997 [Salvi et al., 2000]. I risultati di quest'ultima ricerca dell'INGV, in cui l'analisi congiunta di dati geodetici e sismologici ha prodotto significativi risultati sulla conoscenza della sorgente sismica [Hustad et al., 1998; Anzidei et al., 1998; Stramondo et al., 1999; Salvi et al., 1999], dimostrano infatti l'importanza di eseguire un monitoraggio geodetico, in cui il GPS sia di supporto al DInSAR.

Nonostante la ricerca geodetica finalizzata allo studio delle deformazioni crostali abbia avuto rapidi ed enormi sviluppi nell'ultimo decennio, questo tipo di ricerca necessita di un forte sviluppo in Italia, dove la conoscenza dei processi geodinamici e sismotettonici sono

ancora per molti aspetti poco noti. Inoltre la richiesta crescente di informazioni scientifiche da diffondere in tempi brevi, che la Protezione Civile può utilizzare per la gestione dei rischi naturali, non solamente durante la fase di emergenza ma anche per scopi di prevenzione, richiede la realizzazione di strumenti tecnologici capaci di assolvere questo tipo di domanda. Con questo scopo, nell'ambito delle attività perseguite dalla Unità Funzionale Geodesia e Telerilevamento della sezione CNT dell'INGV, sono state istituite le prime stazioni GPS in monitoraggio continuo. Questa attività è stata perseguita anche nell'ambito di progetti specifici finanziati dall'Agenzia Spaziale Italiana. Queste costituiscono un primo nucleo della costituenda rete GPS nazionale dell'INGV, finalizzata allo studio dei movimenti del suolo per scopi geodinamici, sismotettonici e per la stima della pericolosità sismica e vulcanica dell'area italiana che è tra quelle a maggiore rischio sismico del Mediterraneo.

STAZIONI GPS PERMANENTI INGV-CNT

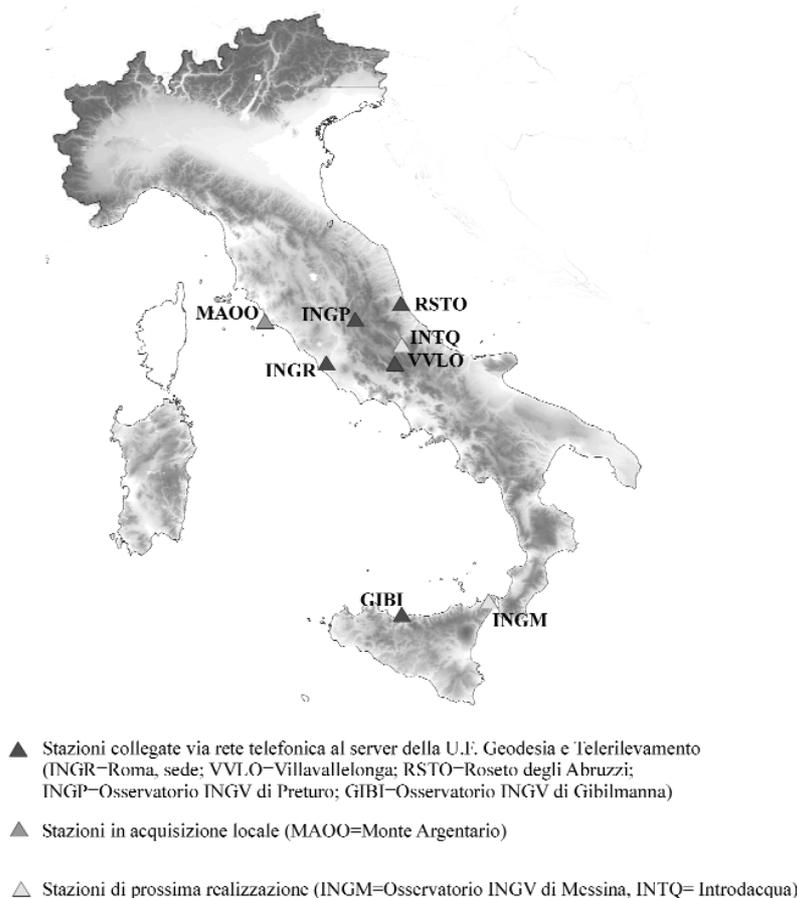


Figura 1a. Distribuzione delle stazioni GPS permanenti INGV-CNT operative ad ottobre 2003 di Roseto degli Abruzzi (RSTO), Villavallelonga (VVLO), Roma (INGR), Preturo (INGP), Gibilmanna (GIBI) e Monte Argentario (MAOO). Tutte le stazioni, ad eccezione di INGR che è la più vecchia e realizzata secondo i requisiti ASI, sono installate su roccia secondo stringenti requisiti geofisici.

1. Il primo nucleo di stazioni

L'avvio delle prime stazioni GPS permanenti è stato effettuato nell'ambito del progetto *Applicazione delle tecniche spaziali per la valutazione del campo di deformazione crostale e della pericolosità sismica dell'Appennino centro meridionale*, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana. Per la realizzazione delle stazioni, sono stati scelti adeguati criteri costruttivi, in modo da poter disporre di dati che potessero essere di elevata affidabilità per studi geodinamici e sismologici (Fig. 1).

Dopo una attenta valutazione sulle caratteristiche geologiche dei siti, sulla qualità di ricezione (visibilità del cielo oltre i 15° di elevazione al di sopra dell'antenna, assenza di sorgenti di multipath e di disturbi elettromagnetici capaci di distorcere la ricezione del segnale) e sulla situazione logistica (alimentazione a rete 220 V; aree protette per prevenire possibili furti o danneg-

giamenti; protezione delle superfici esterne dei cavi di collegamento antenna-ricevitore con canaline interrate; ricevitore, acquisitore e sistema di trasmissione conservati in ambiente ben aerato riparato dall'acqua e dall'umidità), si è proceduto alla realizzazione delle stazioni secondo criteri adottati dalle reti internazionali [Anzidei ed Esposito, 2003].

2. I monumenti geodetici

Il tipo di materializzazione scelto per la monumentazione di una rete geodetica rappresenta una fase determinante nella sua costruzione. I monumenti delle reti geodetiche dedicate a scopi geofisici devono essere duraturi nel tempo e caratterizzati da elevate stabilità meccaniche a lungo termine, al fine di fornire dati significativi sull'andamento delle deformazioni del suolo nel tempo.

Sulla base della esperienza maturata dall'INGV e da altri Enti italiani e stranieri per la realizzazione di alcune stazioni permanenti, sono stati adottati standard fondamentali per la loro realizzazione.

Le stazioni hanno richiesto una scelta di materiali di elevata qualità per la realizzazione

dei monumenti e la progettazione si è dovuta adattare ai singoli casi, definendo fondazioni adeguate al litotipo affiorante (Fig. 2):

Stazioni su litotipi non massivi. I monumenti sono costituiti da pilastrini in cemento armato di sezione circolare di 30 cm di diametro o di sezione quadrata 25x25 cm, con altezza compresa tra 100 e 200 cm. In alcuni casi sono dotati di una piccola platea a pianta quadrata di 150x150 cm. La fondazione del pilastrino, dotato di armatura in ferro, si può spingere anche oltre i 200 cm di profondità. I tre elementi costruttivi (pilastrino, platea e fondazione) sono vincolati tra loro mediante l'armatura in ferro per dare continuità strutturale e adeguata rigidità al monumento.

Stazioni su litotipi massivi. Anche in questo caso i monumenti sono costituiti da pilastrini in cemento armato di sezione circolare di 30 cm di diametro o di sezione quadrata 25x25 cm, con altezza compresa tra 100 e 200 cm. La fondazione del pilastrino, dotato di armatura in ferro, è costituita da un palo in acciaio infisso in roccia anche fino ad oltre la profondità di

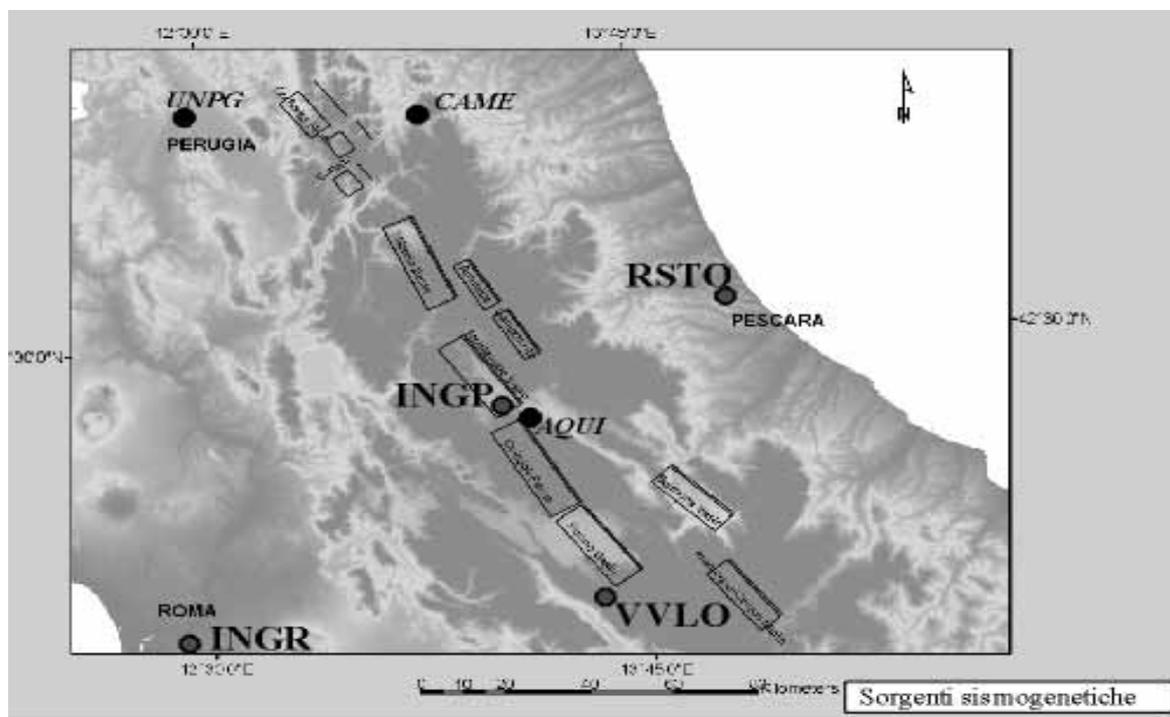


Figura 1b. Particolare della figura precedente con la distribuzione delle stazioni GPS permanenti INGV-CNT (in rosso, INGR, INGP, VVLO, RSTQ) e dell'Agenzia Spaziale Italiana (in blu, UNPG, CAME e AQUI) operative nell'Appennino centrale. Le stazioni INGV raffittiscono e migliorano la geometria della rete ASI attraverso la catena appenninica, dal versante tirrenico a quello adriatico. Nella figura sono riportate le potenziali sorgenti sismogenetiche (in ocra) e le faglie (in rosso), indicate da Valensise e Pantosti [2001].

100 cm. Gli elementi costruttivi (pilastrino, e palo in acciaio) sono saldati tra loro, per dare continuità strutturale e adeguata rigidità al monumento.

Stazioni su edifici. Tale tipo di installazione deve essere generalmente evitata perché gli edifici possono essere soggetti a deformazioni e contrazioni, anche sensibili, per effetto della espansione termica giornaliera e stagionale. Questi movimenti a bassa frequenza possono occultare il dato di deformazione di origine geofisica. Inoltre, in caso di evento sismico rilevante, il danneggiamento subito dall'edificio produrrebbe una deformazione permanente del monumento geodetico non corrispondente a quella reale del suolo, impedendo qualsiasi interpretazione geofisica o nel caso peggiore portare alla perdita totale della stazione. Se si è costretti a scegliere questo tipo di installazione, si dovranno prediligere costruzioni in cemento armato ad un solo piano con fondazioni poste su terreni stabili. Nel caso della stazione INGR, l'antenna è posta sull'edificio della sede INGV di Roma, in quanto è una delle prime stazioni permanenti italiane, realizzata secondo i criteri scelti dall'ASI. Tuttavia, per la buona qualità costruttiva del fabbricato e del

monumento geodetico, i dati acquisiti fino ad oggi mostrano buona stabilità nelle componenti Nord, Est e UP della variazione della posizione della stazione nel tempo, e non sembrano subire segnali attribuibili a deformazioni locali, come mostrato dalla serie temporale dei dati di Figura 17b.

3. Collocazione dell'antenna

La collocazione dell'antenna sul pilastrino è costituita da una interfaccia con un auto-centramento tipo 3-D, realizzato in acciaio inox (Fig. 3). Questo sistema, alto circa 40 cm e progettato dalla Unità Funzionale Geodesia e Telerilevamento dell'INGV-CNT, permette un montaggio preciso e ripetibile dell'antenna, consentendone la sostituzione senza perdere la ripetibilità del dato in quanto l'altezza è fissa e il datum verticale e orizzontale sono costanti. Questo viene a sua volta posto sul pilastrino vincolandolo alla sua armatura metallica.

Le antenne utilizzate sono dotate della certificazione IGS-UNAVCO (www.unavco.ucar.edu), sia per le prestazioni sia per la determinazione del centro di fase. In particolare sono state utilizzate le seguenti antenne, tutte dotate di ground plane per la protezione dei multipath e possibi-

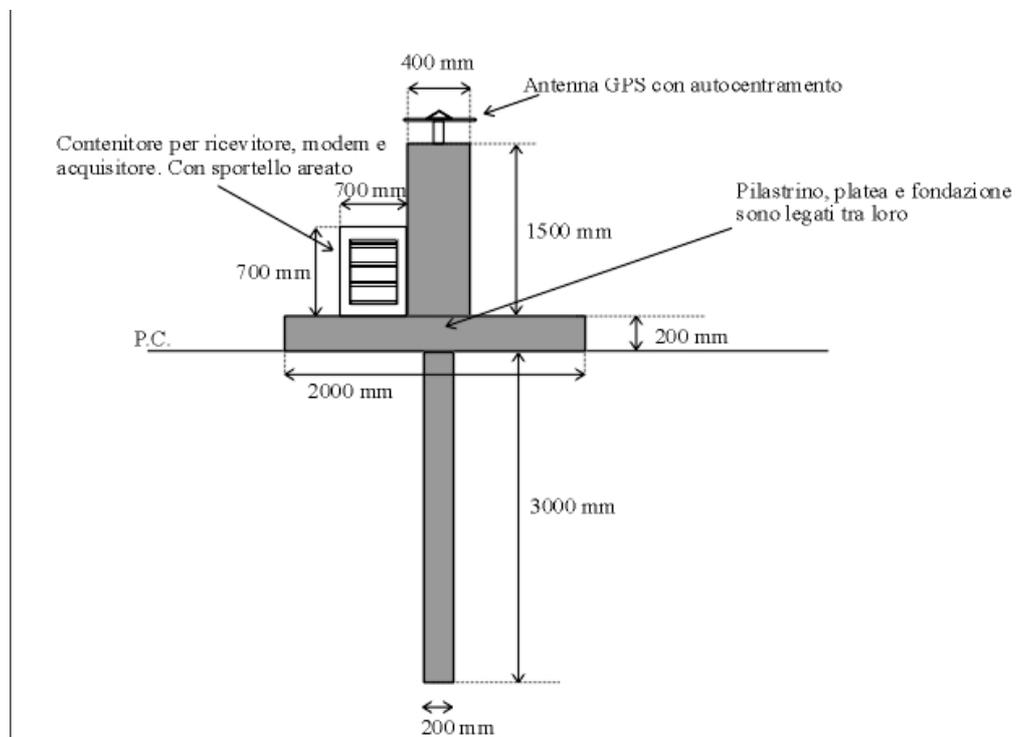


Figura 2. Schema di pilastrino generico in c.a. per litotipi non massivi. L'antenna viene montata su un supporto tipo 3-D vincolato all'armatura del piastrino e affogato nel cemento. La fondazione può spingersi anche fino a tre metri di profondità a seconda delle caratteristiche dei terreni.

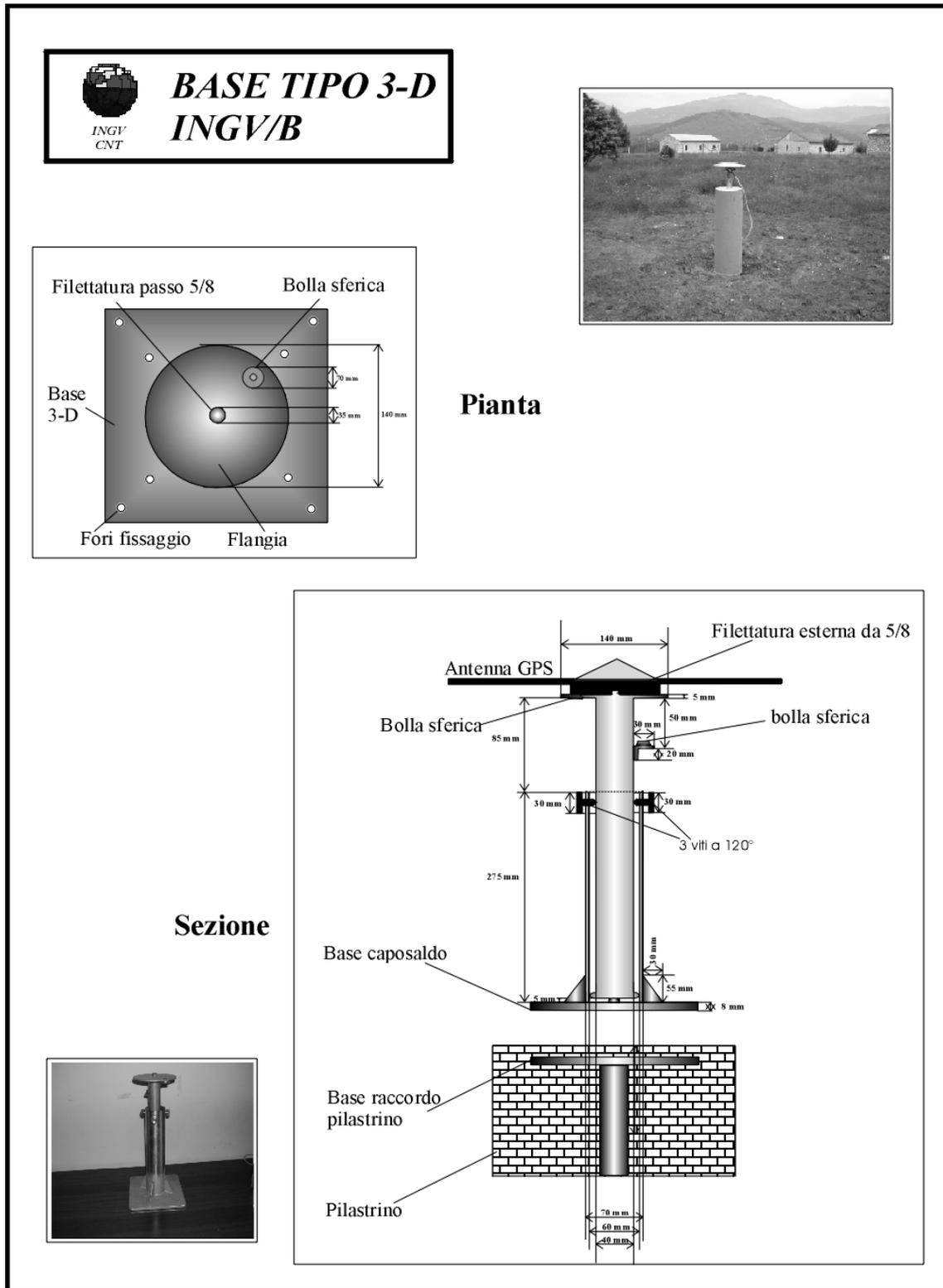


Figura 3. Autocentramento 3-D in acciaio inox tipo INGV/B (vers.1.0) per stazioni permanenti. L'antenna viene avvitata sulla flangia superiore del sostegno, orientabile e verificabile mediante livella a bolla sferica.

lità di protezione con radome certificato IGS-UNAVCO:

- Trimble Dorne-Margolin Choke Ring [www.trimble.com];
- Trimble Zephyr Geodetic (www.trimble.com)

- Trimble TR-GEOD L1/L2 GP (TRM 22020-00) [www.trimble.com]

I ricevitori GPS

I ricevitori GPS, al pari delle antenne,

sono anch'essi dotati della certificazione IGS-UNAVCO [www.unavco.ucar.edu] e sono costituiti da ricevitori Trimble 4700, Trimble 4000SSI e Trimble 5700 con le seguenti caratteristiche fondamentali:

- doppia frequenza (senza opzione Glonass);
 - codici e fasi su L1 e L2 e criptamento del codice P e AS (SA=off);
- 12 o 24 canali ;
- capacità di acquisire fino a 12 satelliti;
 - passo di campionamento variabile;
 - protezione da mancanza di alimentazione, scariche atmosferiche, disturbi e.m.;
 - porte per collegamento a sistemi di acquisizione, trasmissione e controllo remoto;
 - possibilità di memoria espandibile (flash-card) per collocazione tipo "stand alone".

4. Alimentazione delle stazioni

Le stazioni sono alimentate a rete elettrica 220V e sono dotate di gruppo di continuità capace di assicurare l'alimentazione del sistema da alcuni minuti ad alcune ore in caso di mancanza provvisoria di corrente. Il sistema è comunque capace di ristabilire automaticamente le procedure di acquisizione e di trasmissione anche dopo un suo completo spegnimento. Il consumo del complesso ricevitore GPS, sistema di acquisizione e comunicazione è di circa 80 W. A tutte le stazioni è presente energia elettrica a

220 V, mentre la comunicazione dati è fornita da una linea telefonica commutata gestita dalla Telecom Italia.

5. Il sistema di acquisizione

Ogni stazione è dotata di un sistema di acquisizione locale, costituito da un PC o, come nel caso della stazione di Villavallelonga, da un sistema Genesis. Questi sono collegati al ricevitore GPS e alla linea telefonica (Fig. 4).

L'acquisizione dei dati GPS sia su PC che su Genesis, è guidata dal software Trimble Reference Station [www.trimble.com], in ambiente Windows '98, NT e XP. Il software consente le seguenti facilitazioni:

acquisizione sul disco fisso del computer tutte le informazioni provenienti dai satelliti (codici, fase, effemeridi etc.).

Generazione di files dati (.DAT, SSF, RINEX) ad intervalli orari definibili dall'utente su PC.

Possibilità di configurazione di autocancellazione dei files a tempo o capacità dell'hard disk del PC definibili dall'utente.

Mostrare finestre sullo stato di attività della stazione GPS (stato dei satelliti, messaggistica etc..).

Possibilità tramite programmi commerciali (ad es. tipo PC Anywhere) di prelevare i files generati da TRS, senza interrompere il processo di acquisizione.



Figura 4. Schema delle stazioni GPS remote con trasferimento dati mediante linea telefonica commutata al PC server dell'INGV-CNT, UF Geodesia e Telerilevamento.

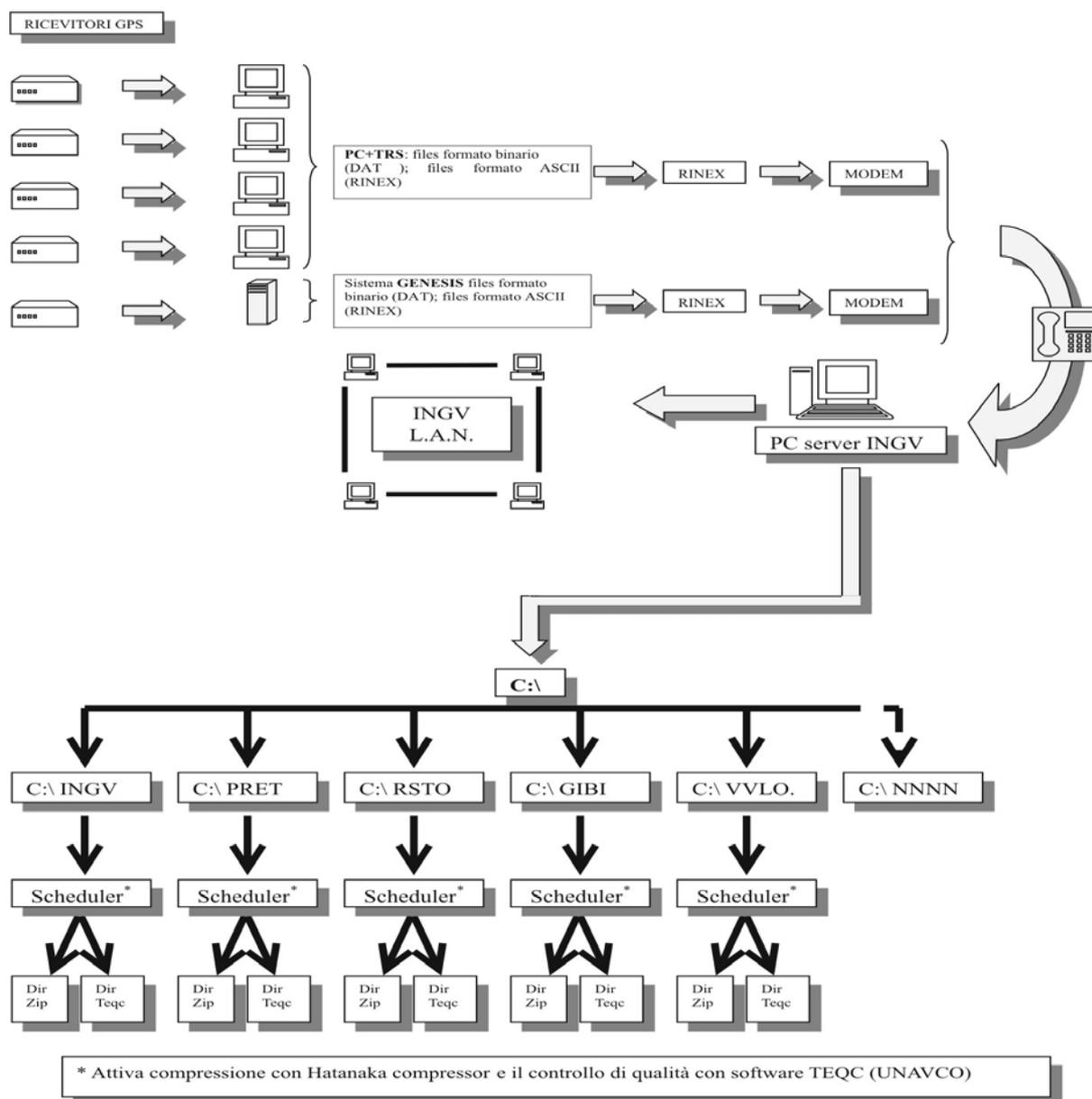


Figura 5. Il PC-server dedicato all'acquisizione dei dati alla stazione di Roma (INGR) e delle altre stazioni remote. In alto sulla sinistra il ricevitore GPS Trimble 4000SSI e, al di sotto, il modem per la comunicazione con le altre stazioni GPS. In alto a destra un antenna geodetica Trimble Dorne-Margolin Choke Ring.

I dati, organizzati in file giornalieri della durata di 24 ore con passo di campionamento di 30 secondi, vengono successivamente immagazzinati in direttori specifici sia in formato binario (.DAT) che ASCII, compressi con le procedure di Hatanaka.

I files vengono quindi trasferiti via linea telefonica al server della rete posto presso la sede INGV-CNT della UF Geodesia e Telerilevamento dove vengono archiviati in CD-ROM. Il collegamento del PC alla rete locale dell'INGV permette la condivisione dei direttori tra gli utenti (Fig. 4, 5). In particolare il Genesis svolge anche il compito di evidenziare e visualizzare opportunamente gli allarmi invia-

ti dalla stazione GPS che si trova al momento fuori tolleranza rispetto ai parametri impostati. Gli allarmi inviati possono essere di vari tipi come ad esempio, invio di e-mail, messaggi SMS verso telefoni cellulari, icone grafiche. I componenti hardware del sistema sono costituiti da unità CPU con processore tipo PC dotato di memoria interna, ambiente operativo Windows NT, unità di alimentazione a batteria. Il controller comunica automaticamente ad una stazione master, posta presso il centro di controllo) il verificarsi di cali nella tensione di alimentazione o problemi nella ricezione del segnale GPS.

6. Trasmissione dati

Le moderne tecnologie consentono la gestione di strumentazione remota senza l'intervento umano in loco, sebbene la trasmissione dei dati rappresenti una delle maggiori difficoltà per la gestione di una rete di monitoraggio GPS per le dimensioni dei files giornalieri che devono essere trasferiti dalle stazioni ai centri di raccolta dati. Il sistema adottato (Fig. 4), è basato sulle tecniche di trasmissione con linea telefonica commutata. Questa rappresenta una soluzione tra le più semplici ed economiche per la gestione della stazione. Tuttavia le limitazioni sono dipendenti dalla possibilità di ottenere un collegamento fisico tra la stazione e la borchia telefonica più vicina. La velocità di trasmissione dipende dall'area geografica e può variare sensibilmente. Si può stimare una durata di trasmissione variabile da 2 a 6 minuti circa per stazione, per il trasferimento di un file giornaliero compresso delle dimensioni medie di 700 Kb. I requisiti del modem telefonico utilizzato per le linee commutate sono:

- Alimentazione 12 V per collegamento ad una unità di back up
- V.32, V.32 bis per protocollo di comunicazione
- V.42, MNP per compressione dati e correzione errori
- RTS/CTS per controllo di flusso hardware
- Baud rate ad alta velocità (2.4, 19.2 Kb/s)
- Compatibile con RS232

La trasmissione dei dati dalle stazioni remote e la loro ricezione presso il sistema di acquisizione locale è affidata a procedure automatizzate implementate nel sistema operativo Windows. Si sta anche esplorando la possibilità di poter utilizzare le tecnologie di trasmissione via rete telefonica cellulare GPRS o UMTS, che potrebbero fornire prestazioni simili a quelle delle linee telefoniche tipo ADSL, utilizzate per la trasmissione veloce di dati.

Tuttavia, la trasmissione via satellite può costituire una ottima alternativa a quelle senza cavo in quanto si è completamente svincolati da connessioni fisiche a terra. Permette la realizzazione di una stazione ovunque richiesto, senza dipendere dalla presenza di linee telefoniche di qualsiasi tipo.

La velocità di trasmissione è elevata e consente con sistemi tipo Cygnus-Lybra/Nanometrics di trasferire il file epoca per epoca, ricostruendo il file giornaliero in un server dedicato presso il centro raccolta dati. Inoltre, questo sistema permette di utilizzare un

solo sistema di trasmissione per inviare oltre a quelli GPS, anche altri dati provenienti da differenti tipi di sensori (ad es. sismici).

7. Archiviazione dei dati

Una rete GPS permanente produce una larga quantità di dati che necessita di una adeguata archiviazione al fine di poter essere facilmente accessibile e consultabile in ogni momento. Il sistema di acquisizione locale, posto presso la UF Geodesia e Telerilevamento della sezione INGV di Roma, CNT, è costituito da un piccolo server nel quale funzionano in cascata dei software automatizzati dedicati all'acquisizione, compressione e archiviazione, secondo parametri pre-impostati.

Lo scheduler di Windows, ha il compito di organizzare temporalmente le chiamate alle stazioni GPS e di inviare i files ricevuti nelle directory preposte. Il server è collegato alla Local Area Network (LAN) permettendo la condivisione del data base geodetico tra gli utenti. Vengono quindi realizzati back up periodici dei dati Rinex e Dat, su supporti ottomagnetici tipo CD-Rom.

8. Descrizione delle stazioni attive

Le stazioni sono state realizzate a partire dal 1997 con la stazione di Roma (INGR). Nel maggio del 2000 è stata realizzata la prima stazione remota a Villavalleonga. Questa è stata utilizzata in via sperimentale per la messa a punto del sistema di acquisizione locale, trasmissione dati e acquisizione dati al server posto all'INGV-CNT di Roma. Tra il maggio 2001 e il settembre 2003 sono state quindi realizzate le stazioni di Gibilmanna, Roseto degli Abruzzi, Preturo e Monte Argentario.

Dopo un primo periodo di valutazione i dati sono acquisiti in via continuativa dal 16 aprile 2003. La descrizione delle stazioni è anche disponibile presso il sito WEB dell'INGV all'indirizzo internet:

<http://www.ingv.it/%7eroma/profilo/fondazione/sezioni/cn/UF-Geodesia/index2.html>.

8.1 INGR

La stazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (sigla INGR) è posta all'interno della struttura della sede INGV di Roma (Fig. 6). La stazione è permanente dal 1999 ed afferisce alla rete GPS nazionale dell'Agenzia Spaziale Italiana a partire dal mese di gennaio 2002. Il monumento geodetico è

Nome stazione	Sigla	Data costruzione	Lat	Lon	ht (m)	Ricevitore/Antenna & acquisitore	Trasmissione dati	Stato (10/03)
INGR- Roma	INGR	03/1997	41°49'41"	12°30'53"	104	Trimble 4000ssi con Geodetic GP & PC	Local Area Network (LAN)	Attiva
Villavallelonga	VVLO	05/2000	41°52'11"	13°37'23"	1046	Trimble 4700 con Choke Ring & Genesis	Linea telefonica	Attiva
Gibilmanna	GBLM	05/2001	37°59'25"	14°01'34"	1036	Trimble 5700 con Zephyr Geodetic & PC	Linea telefonica	Attiva
Roseto degli Abruzzi	RSTO	09/2001	42°39'30"	14°00'05"	103	Trimble 4700 Choke Ring & PC	Linea telefonica	Attiva
Preturo	INGP	09/2003	42°22'57"	13°18'59"	510	Trimble 5700 con Zephyr Geodetic & PC	Linea telefonica	Attiva
Monte Argentario	MAOO	07/2003	42°25'41"	11°07'51"	226	Trimble 5700 con Zephyr Geodetic & PC	Satellitare Nanometrics	Attiva (*)

(*) Attiva in acquisizione locale. Trasmissione dati da integrare con rete sismica nazionale e sistema Nanometrics

Tabella 1. Le stazioni GPS permanenti INGV-CNT. Dal 16 aprile 2003 le stazioni sono pienamente operative. I dati sono disponibili su richiesta presso la UF Geodesia e Telerilevamento della Sezione INGV-CNT di Roma.

costituito da un pilastro in cemento armato posto sul solaio dell'edificio ed è ancorato ad uno dei pilastri portanti dell'edificio fondati sulla formazione vulcanica del *Tufo di Villa Senni* relative alla IV° fase del ciclo Tuscolano – Artemisio (“Tufo di Villa Senni”) [De Rita D., Rosa C., 1990].

L'antenna è posta su un supporto fisso costituito da un cilindro in ottone di circa 2 m di altezza, fissato all'armatura del pilastro. La strumentazione consiste in un ricevitore TRIMBLE 4000 SSI dotato di antenna tipo TRIMBLE GEODETIC L1/L2 COMPACT with Ground Plane (Trimble 22020-00) collegata con un cavo coassiale di 30 mt di lunghezza, seguendo gli standard indicati dall'IGS per le stazioni permanenti.

8.2 Villavallelonga

La stazione di Villavallelonga, (sigla VVLO) è posta nella parte NE dell'abitato di Villavallelonga (AQ), all'interno della struttura che ospita la stazione sismica digitale a tre componenti della Rete Sismica Nazionale dell'INGV (Fig. 7). Il monumento geodetico è costituito da un supporto tipo 3-D INGV/A installato sull'affioramento carbonatico e cementato con resine epossidiche bicomponenti. La stazione è posta sugli affioramenti calcarei dei Monti della Marsica occidentale in corrispondenza di una

modesta cresta calcarea del Cretacico inferiore in facies di piattaforma carbonatica che separa la dorsale di Monte Serra Lunga da quella di M. Alto - M. Fontecchia. [Galadini F. e Messina P., 1993]. La strumentazione consiste in un ricevitore Trimble 4700 dotato di antenna tipo Choke



Figura 6. La stazione di Roma INGR

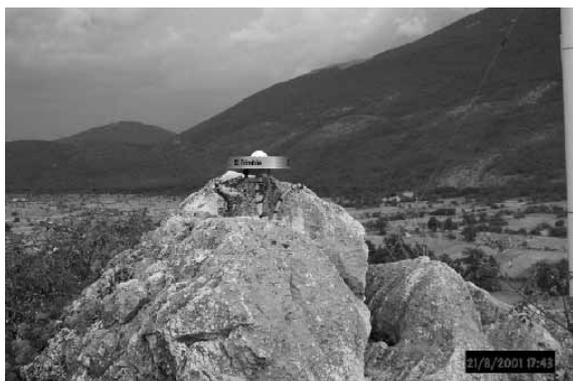


Figura 7. La stazione di Villavallelonga (VVLO).

Ring collegata tramite un cavo coassiale da 10 mt. L'alimentazione è a rete 220 V, servita da un gruppo di continuità. I dati vengono acquisiti in locale da un acquisitore tipo Genesis e poi trasferiti mediante linea telefonica commutata alla sede INGV di Roma.

8.3 Roseto degli Abruzzi

La stazione di Roseto degli Abruzzi (sigla RSTO) è posta nella periferia dell'abitato, nel terreno dell'Istituto Tecnico Statale per Geometri "V. Moretti", Via Castellammare Adriatico 3. La stazione è stata costruita nel settembre 2001. Il monumento geodetico è costituito da un pilastro in c.a. (Fig. 8) di dimensioni 200x25x25 cm, dotato di fondazione di 1,5 m x 1,5 m posta alla profondità di 1 m, sui depositi alluvionali terrazzati coerenti [Ghisetti & Vezzani, 1997]. Questi poggiano sulla sequenza di depositi di avanfossa, prevalentemente argillosi, del Pliocene medio – Pleistocene Inferiore che passano verso l'alto a sabbie e conglomerati di facies litorali fluvio deltizie e continentali [Bigi et al., 1997; Nisio, 1997].

Il supporto dell'antenna è del tipo 3D/A INGV-CNT, in acciaio inox, collocato sul pilastro e collegato all'armatura del cemento armato. La strumentazione consiste in un ricevitore Trimble 4700 dotato di un'antenna tipo Choke Ring collegata al ricevitore tramite un cavo coassiale di 30 m interrato, passante nel pilastro. I dati vengono immagazzinati in un PC locale tramite il software TRS (Trimble Reference Station) [Trimble, 1999]. I dati vengono poi trasferiti mediante linea telefonica commutata alla sede INGV di Roma.

8.4 Gibilmanna

La stazione di Gibilmanna (sigla GBLM) è posta nel terreno dell'Osservatorio Geomagnetico INGV (Fig. 9). La stazione è stata costruita nel maggio 2000. Il monumento geodetico è costituito da un pilastro in c.a. di

dimensioni 200x25x25 cm con fondazione ad oltre 1 m dal piano campagna e piccola platea di 1,5x1,5 m, edificato su terreni appartenenti al flioth numidico dell'Oligocene – Miocene inferiore. Sul pilastro è posto il supporto per l'antenna tipo 3D INGV, collegato all'armatura del pilastro. La strumentazione consiste in un ricevitore Trimble 5700 dotato di antenna tipo Zephyr Geodetic, collegata al ricevitore tramite un cavo coassiale di 30 m interrato e passante nel pilastro. I dati vengono immagazzinati localmente in un PC tramite il software di controllo acquisizione dati TRS (Trimble Reference Station). I dati acquisiti vengono poi trasferiti mediante linea telefonica commutata alla sede INGV di Roma.

8.5 Preturo

La stazione di Preturo (sigla INGP) è posta nel terreno dell'Osservatorio Geomagnetico INGV di Preturo (AQ) (Fig. 10). La stazione è stata costruita nel settembre 2002. Il monumento geodetico è costituito da un pilastro in cemento armato di sezione circolare del diametro di 30 cm con fondazione a circa 1.5 m dal piano campagna, poggiante sui terreni quaternari alluvionali. Sul pilastro è posto il supporto dell'antenna tipo 3-D INGV, collegato all'armatura del pilastro. La strumentazione consiste in un ricevitore TRIMBLE 5700 dotato



Figura 8 La stazione di Roseto degli Abruzzi (RSTO).



Figura 9. La stazione di Gibilmanna (GIBI).

di antenna tipo Zephyr Geodetic, collegata al ricevitore tramite un cavo coassiale di 30 m interrato e passante esternamente al pilastrino. I dati vengono immagazzinati localmente in un PC tramite il software di controllo acquisizione dati TRS (Trimble Reference Station). I dati acquisiti vengono poi trasferiti mediante linea telefonica commutata alla sede INGV di Roma.

8.6 Monte Argentario

La stazione di Monte Argentario (sigla MAOO) è posta su terreni demaniali del Comune di Porto Santo Stefano (Fig. 11). La stazione è stata costruita nel luglio 2003. Il monumento geodetico è costituito da un pilastrino in cemento armato di dimensioni 100x30 cm con fondazione di oltre 1 m dal piano campagna, poggiante sui terreni calcarei. Sul pilastrino è posto il supporto dell'antenna tipo 3-D INGV, collegato all'armatura del pilastrino. La strumentazione consiste in un ricevitore Trimble 5700 dotato di antenna tipo Zephyr Geodetic, collegata al ricevitore tramite un cavo coassiale di 30 m interrato e passante nel pilastrino. I dati vengono immagazzinati al momento solo localmente mediante PC dotato di software di controllo acquisizione dati TRS (Trimble Reference Station). La stazione, che si integra con quella



Figura 10. La stazione di Preturo (INGP).

della nuova rete sismica nazionale centralizzata, è dotata di sistema di trasferimento dati satellitare mediante il sistema Nanometrics. I dati acquisiti verranno trasferiti mediante questo sistema alla sede INGV di Roma.

9. Controllo di qualità dei dati

Ogni stazione ha acquisito giornalmente per 24 ore con un intervallo di acquisizione di 30 sec. Il dato RAW, in formato binario, è stato automaticamente trasformato in formato RINEX (ASCII). I files giornalieri in formato RINEX, per ogni stazione, sono stati sottoposti ad un Quality Check tramite software TEQC sviluppato dall'UNAVCO (UniversityNAVstarConsortium) [www.unavco.ucar.edu/data_support/software/qc/qc.htm]. Il software, che utilizza una combinazione lineare delle frequenze portanti del segnale GPS, controlla il numero di osservazioni acquisite, il numero di cycle slips, il valore di RMS associato al multipath calcolato con i codici C/A e P sulla portante L1 (P1 multipath) e con il codice P sulla portante L2 (P2 multipath). Vengono anche date indicazioni sul ritardo troposferico, sul clock slip, sulla elevazione e azimuth dei satelliti utilizzati. I dati vengono raccolti in un file "summary". Si deve tuttavia tenere presente che qualsiasi fonte di rumore sconosciuta può venire interpretata come multipath, sia di origine interna (strumentale) come ad es. il rumore generato dall'elettronica del ricevitore che di origine esterna come ad es. da interferenze elettromagnetiche prodotte da antenne trasmettenti che operano a frequenze vicine a quelle GPS [Betti et al., 1997]. I database utilizzati ed elencati in tabella sono di estensione variabile in funzione del periodo di attivazione delle stazioni. (Tab.2). Per la sola stazione di MAOO, poiché è attiva da poco tempo, non viene presentata l'analisi completa della qualità del dato per l'esiguità del data base disponibile.



Figura 11. La stazione di Monte Argentario(MAOO).

Stazione (sigla)	Database (J.D. anno 2003)	Formato files
INGR	106 - 337	RINEX
GIBI	103 - 281	RINEX
VVLO	104 - 301	RINEX
RSTO	198 - 301	RINEX
INGP	267 - 301	RINEX
MAOO	259-263; 294-296	RINEX

Tabella 2. Database utilizzato per il controllo di qualità.

Tutte le stazioni evidenziano valori di RMS sul multipath per la frequenza portante L1 (P1 multipath) al di sotto dei valori massimi standard (0,50 m) (Tab. 3) (Fig. 12). I valori di RMS sul multipath per la frequenza portante L2 (P2 multipath) sono generalmente più elevati ma al di sotto dei valori massimi standard (0,65m). La stazione di INGR presenta valori di P2 multipath al di sopra di 1,14 m. (Tab.3 e Fig. 13).

Il rapporto fra numero di osservazioni complete (fasi e codici) e cycle slips (cycle slip di ritardo ionosferico dovuto alla bassa elevazione dei satelliti e cycle slip calcolato sui codici della L1 o della L2 o su entrambe le portanti), mostra valori elevati per quasi tutte le stazioni, con alcuni picchi verso valori minori dovuti a fattori locali e temporanei (Tab 3, Fig. 14). Al fine di valutare la qualità delle stazioni INGV rispetto alle stazioni internazionali che afferiscono alla

rete IGS, abbiamo incluso nell'analisi del TEQC anche le due stazioni italiane di Matera e Cagliari. Queste mostrano valori di P1 multipath, P2 multipath e Cycle slips prossimi a quelli calcolati per la stazione INGR dimostrando che la qualità delle stazioni INGV è comparabile o migliore di stazioni già inserite nelle reti internazionali.

10. Elaborazione automatica dei dati della rete permanente GPS

I dati provenienti dalla rete GPS dell'INGV vengono elaborati congiuntamente ai dati provenienti da altre stazioni GPS permanenti installate dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), da varie Università, scuole o altre istituzioni (Fig. 15).

Al fine di elaborare i dati GPS provenienti da ricevitori diversi è indispensabile trasformarli nel formato standard *RINEX* (formato *ASCII*, acronimo che sta per *Receiver Independent Exchange Format*). Il formato di interscambio dati RINEX [Gurtner, 1994; Riguzzi, 1995] è stato sviluppato presso l'*Astronomical Institute* dell'Università di Berna in vista della campagna *E.U.R.E.F.* del 1989, alla quale hanno partecipato più di 60 ricevitori di tipo e marca diversi, e successivamente integrato e modificato fino all'attuale versione.

L'analisi delle stazioni permanenti viene generalmente eseguita dai centri internazionali mediante software scientifici come il *Gamit/Globk* (sviluppato al MIT, USA), il *Gipsy* (sviluppato al JPL, USA) e il *Bernese*

Sigla staz.	Mp1max (m)	Mp1min (m)	Mp2max (m)	Mp2min (m)	O/cslip max	O/cslip min
GBLM	0,17	0,07	0,34	0,14	21187	152
INGP	0,24	0,15	0,37	0,26	253	16
INGR	0,27	0,12	1,35	1,14	589	267
RSTO	0,13	0,06	0,22	0,12	22557	1237
VVLO	0,12	0,08	0,39	0,15	20918	1306
MAOO	0,12	0,12	0,30	0,19	141	112
CAGL	5,05	0,16	7,37	0,92	868	92
MATE	0,38	0,15	1,55	1,26	128	35

Tabella 3. Valori dei parametri di qualità delle stazioni. In corsivo le stazioni IGS di Cagliari e Matera.

- Valore max aspettato per Mp1 > 0,50 m
- Valore max aspettato per Mp2 > 0,65 m

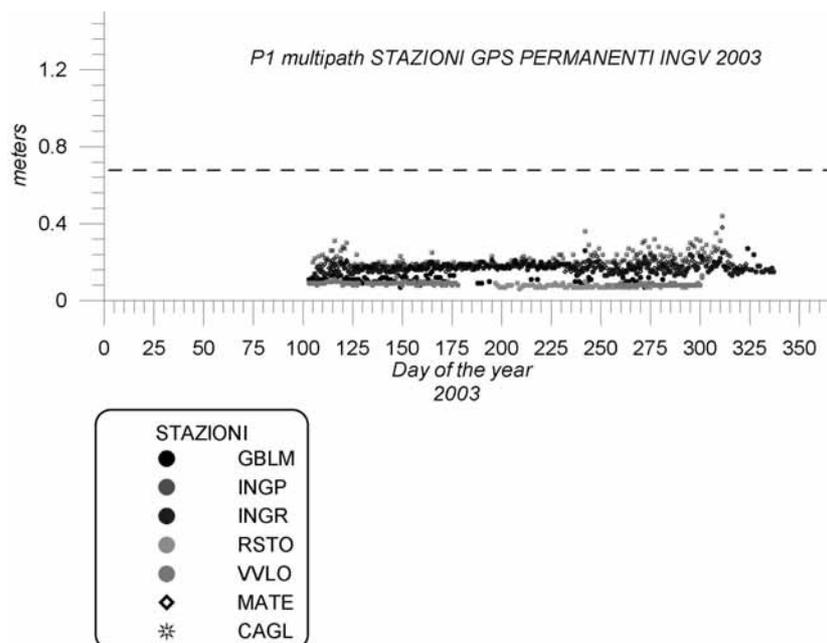


Figura 12. Distribuzione del multipath per la frequenza L1 (software TEQC).

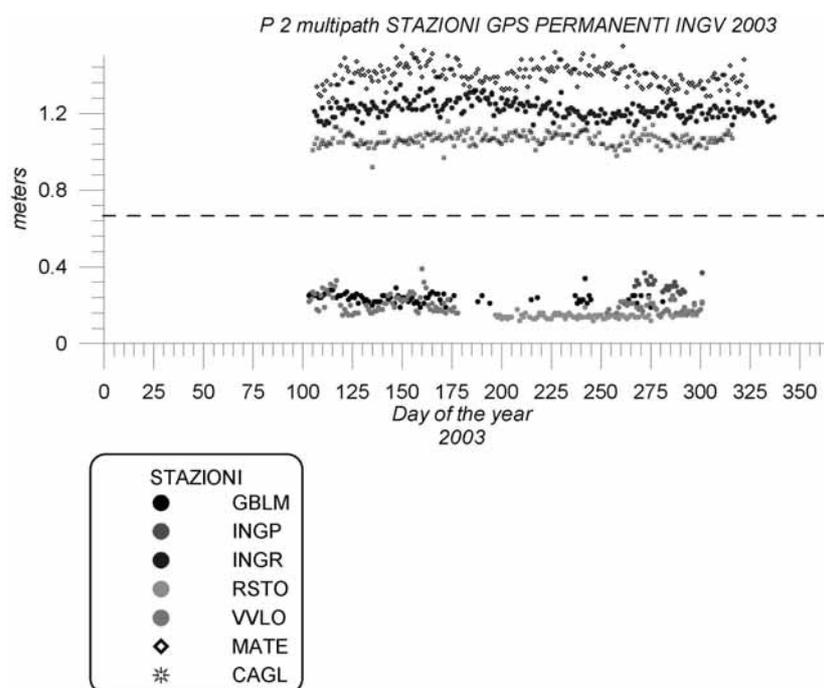


Figura 13. Distribuzione del multipath per la frequenza L2 (software TEQC).

(sviluppato dall'Astronomical Institute dell'Università di Berna), seguendo strategie di calcolo specifiche, come ad es. quelle descritte da Blewitt et al. [1993]. In questo lavoro è stata messa recentemente a punto una procedura automatica di analisi dei dati utilizzando il *Bernese Processing Engine* (BPE) del *software* Bernese (versione 4.2) in ambiente DOS (Fig. 16).

Tale *software* è costituito da oltre 30 programmi in Fortran, 350 *subroutine* e 10.000 linee di codice, per una dimensione totale di

circa 75 Mb.

La struttura generale del programma è organizzata in 5 sezioni principali [Beutler et al., 2000]:

- SEZIONE DI TRASFORMAZIONE, serve a generare *file* di diversi formati, utili sia all'elaborazione che allo scambio dati;
- SEZIONE ORBITALE, utile alla rappresentazione delle orbite precise (o *broad-cast*), nell'intervallo di tempo di interes-

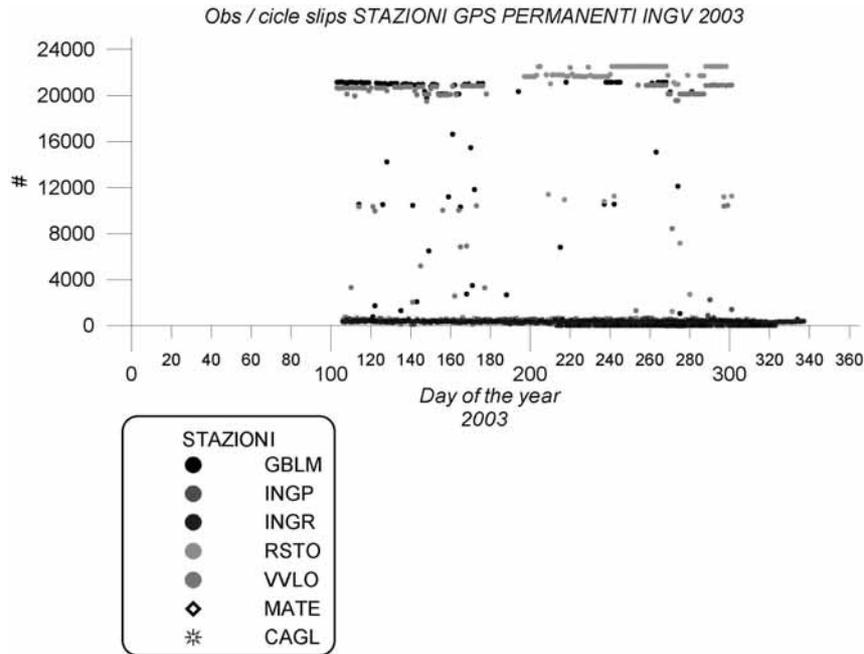


Figura 14. Distribuzione dei cycle slips (software TEQC).

- se, mediante sviluppo in serie di un polinomio di grado 10;
- SEZIONE DI ELABORAZIONE, è la parte di calcolo vera e propria nella quale viene effettuata una ripulitura del dato da *outlier* e salti di ciclo, vengono stimati i parametri (coordinate, ambiguità, modelli atmosferici, orbite) mediante compensazione ai minimi quadrati utilizzando osservazioni in doppia differenza di fase.
- SEZIONE DI SIMULAZIONE, genera osservazioni GPS (sia di codice che di fase);
- SEZIONE DI SERVIZIO, utile nella gestione e aggiornamento di *file*, visualizzazione di formati binari, confronti tra insiemi di coordinate;
- BPE (*Bernese Processing Engine*), consente l'automatizzazione di tutta la procedura di elaborazione (definita nelle sezioni 1-3).

Per quanto riguarda la rete GPS elaborata in automatico, attualmente (novembre 2003) vengono analizzati i dati di 17 stazioni GPS permanenti, ciascuna delle quali fornisce dei *file* giornalieri ASCII in formato RINEX aventi una dimensione media di circa 2 Mb ciascuno.

Il processamento dei dati GPS necessita, oltre che dei *file* di osservazione delle singole stazioni, anche di altri *file* che vengono distribuiti in rete, con cadenze differenti, dalle banche dati internazionali preposte a tale compito, come ad esempio l'*International GPS Service*

(IGS). In particolare, i *file* giornalieri necessari sono quelli contenenti

- le effemeridi precise dei satelliti (.sp3), disponibili con circa 2 settimane di ritardo, circa 200 KB ciascuno mentre quelli forniti con cadenza diversa riguardano il moto del polo (.erp), circa 400 KB
- gli eventuali problemi dei satelliti (.crx), circa 80 KB

Complessivamente, per ciascuna giornata di misura, la mole di dati da gestire ammonta a circa 35 MB.

Sono stati implementati appositi programmi di servizio per lo scarico automatico dei dati delle stazioni permanenti "non INGV" e dei *file* di servizio necessari al processamento dei dati GPS (effemeridi precise ecc.) dalle banche dati *on-line* (SOPAC, GEODAF-ASI, AIUB, CDDIS).

I dati (*file* RINEX di 24 ore, campionati a 30 secondi) vengono elaborati su base giornaliera, producendo per ogni giorno un *file* di coordinate (.crd), uno contenente la matrice di covarianza delle coordinate stesse (.cov) e un *file* contenente i ritardi troposferici (.trp) stimati ogni ora (di interesse per eventuali applicazioni meteorologiche).

I punti salienti relativi all'elaborazione giornaliera possono essere schematizzati come segue (si veda l'appendice per la terminologia usata):

- 1) l'osservabile utilizzata è la fase delle portanti; le misure di codice vengono utilizzate per stimare il difetto di sincronizza-

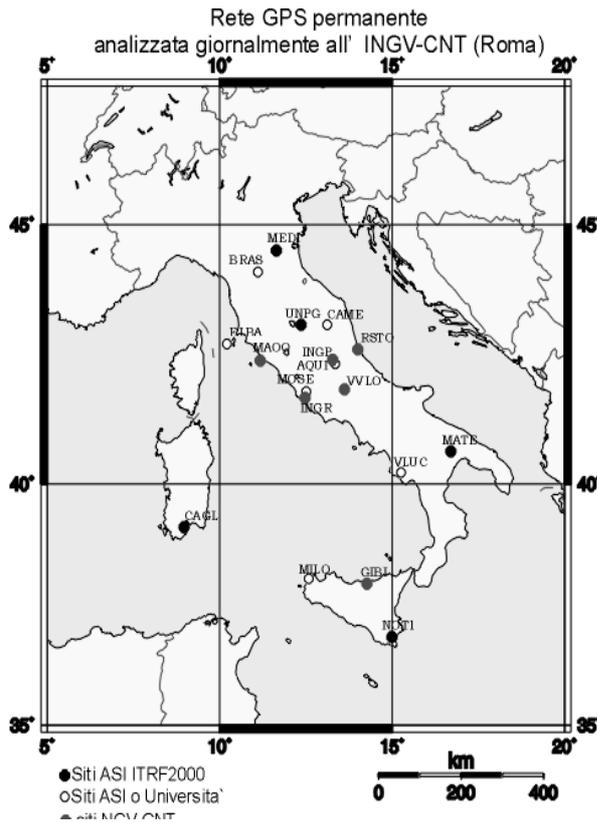


Figura 15. Rete GPS giornalmente analizzata all'INGV sez. CNT.

- zione dell'orologio del ricevitore rispetto al tempo GPS;
- 2) l'angolo di *cut-off* delle osservazioni è 10° (osservazioni sotto i 10° vengono scartate);
- 3) viene applicato il modello IGS_01 delle correzioni delle variazioni del centro di fase dell'antenna dovute all'elevazione dei satelliti;
- 4) pre-elaborazione (ripulitura del dato): le osservazioni vengono pre-elaborate in singola base mediante la costruzione delle triple differenze di fase, cercando i salti di ciclo sulle portanti L1 e L2; se un salto di ciclo non può essere riparato in maniera affidabile, viene incrementato di un'unità il numero di ambiguità da stimare. In questa fase viene effettuato anche un controllo di qualità del dato con rimozione di eventuali *outlier*;
- 5) l'elaborazione viene effettuata mediante le differenze doppie di fase della combinazione lineare denominata *ionosphere-free* (L3);
- 6) i ritardi troposferici totali vengono stimati su base oraria, senza applicare nessun modello troposferico a priori ed utilizzando la *mapping function dry-Niell*, come consigliato dal manuale del software

BERNESE

- 7) data la dimensione della rete la ionosfera non viene modellizzata, ma viene utilizzata, come detto sopra, la combinazione di frequenze L3;
- 8) le ambiguità vengono risolte mediante la tecnica QIF (*Quasi ionosphere-free*)

La soluzione finale giornaliera viene effettuata a rete in due differenti modi:

- 1) fissando le coordinate di una sola stazione (nel nostro caso MATE) ai loro valori giornalieri ITRF00 (forniti dallo IERS);
- 2) vincolando le coordinate delle stazioni MATE, CAGL, NOTO, MEDI ai loro valori ITRF00 (forniti dallo IERS), tenendo conto dei loro scarti quadratici medi; in questo secondo caso, al contrario del primo, la soluzione giornaliera risulta inquadrata nel sistema ITRF00;

Successivamente vengono calcolate le soluzioni settimanali (mediante compensazione delle soluzioni giornaliere del tipo 1) con produzione di *file* settimanali in formato internazionale SINEX (.snx), contenenti coordinate e relative matrici di covarianza.

Le soluzioni settimanali prodotte risultano inquadrare nel sistema di riferimento ITRF00; ciò si ottiene vincolando in fase di compensazione le coordinate delle stazioni ITRF00 di MATE, CAGL, NOTO, MEDI con i rispettivi scarti quadratici medi.

11. Analisi delle serie temporali

Le soluzioni giornaliere delle stazioni INGV, poste nel sistema di riferimento internazionale ITRF00, sono inizialmente disponibili nel sistema cartesiano geocentrico, ossia sono note le coordinate (X, Y, Z) di ciascuna stazione.

Tali serie vengono successivamente ripulite dagli *outlier* mediante un test a 3s e successivamente trasformate nei sistemi di coordinate cartesiane locali (Nord, Est, quota), che a loro volta rimangono ancorate al sistema ITRF00. Nelle Fig. 17, 18 e 19 sono riportate le serie temporali giornaliere delle tre componenti (N, E, quota) per le stazioni GPS di GBLM, INGR, RSTO, VVLO e INGR. Il tempo è espresso in giorni dell'anno (Day Of the Year - DOY) per il 2003 (dal DOY 100 al 300 circa).

Dalle serie temporali delle soluzioni giornaliere è possibile poi ricavare le velocità delle stazioni. Queste avranno valori maggiormente affidabili dal momento in cui le serie saranno sufficientemente lunghe in modo da mediare

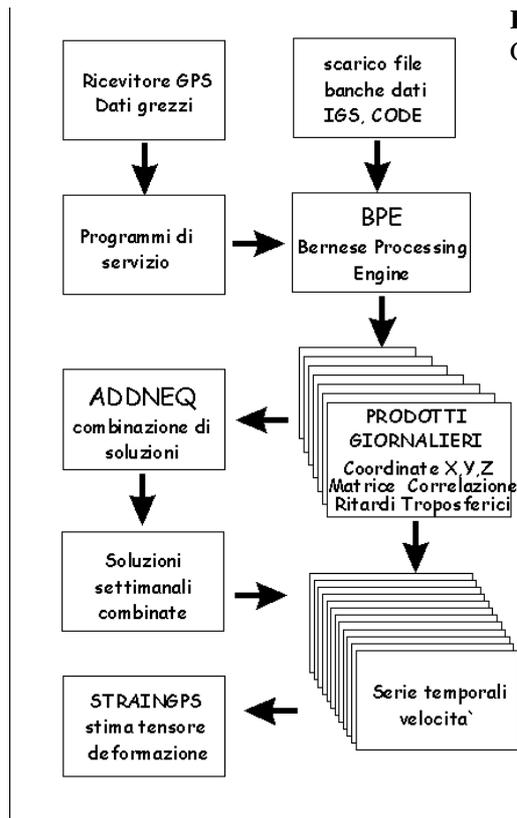


Figura 16. Diagramma di flusso della procedura di analisi dati GPS con il software Bernese.

vari effetti sistematici residui (per es. andamenti stagionali) [Williams, 2003; Caporali, 2003].

Poiché le stazioni analizzate sono attive in maniera continuativa da pochi mesi, non è al momento possibile fornire stime della velocità e valutare la entità di segnali periodici annuali o semi annuali. Infatti, per avere una stima affidabile della velocità, è necessario disporre di una serie temporale di circa due anni.

E' in fase di studio una nuova metodologia di stima delle velocità che non riduce tale stima a quella di semplici rette di regressione, ma che tiene conto delle correlazioni, tutt'altro che trascurabili, esistenti tra i vari punti delle serie temporali, ovvero tra le varie soluzioni giornaliere [Barzaghi et al., 2002; Caporali et al., 2003; Williams, 2003].

12. Disponibilità dati e soluzioni

I dati GPS delle stazioni INGV sono attualmente disponibili su richiesta in formato

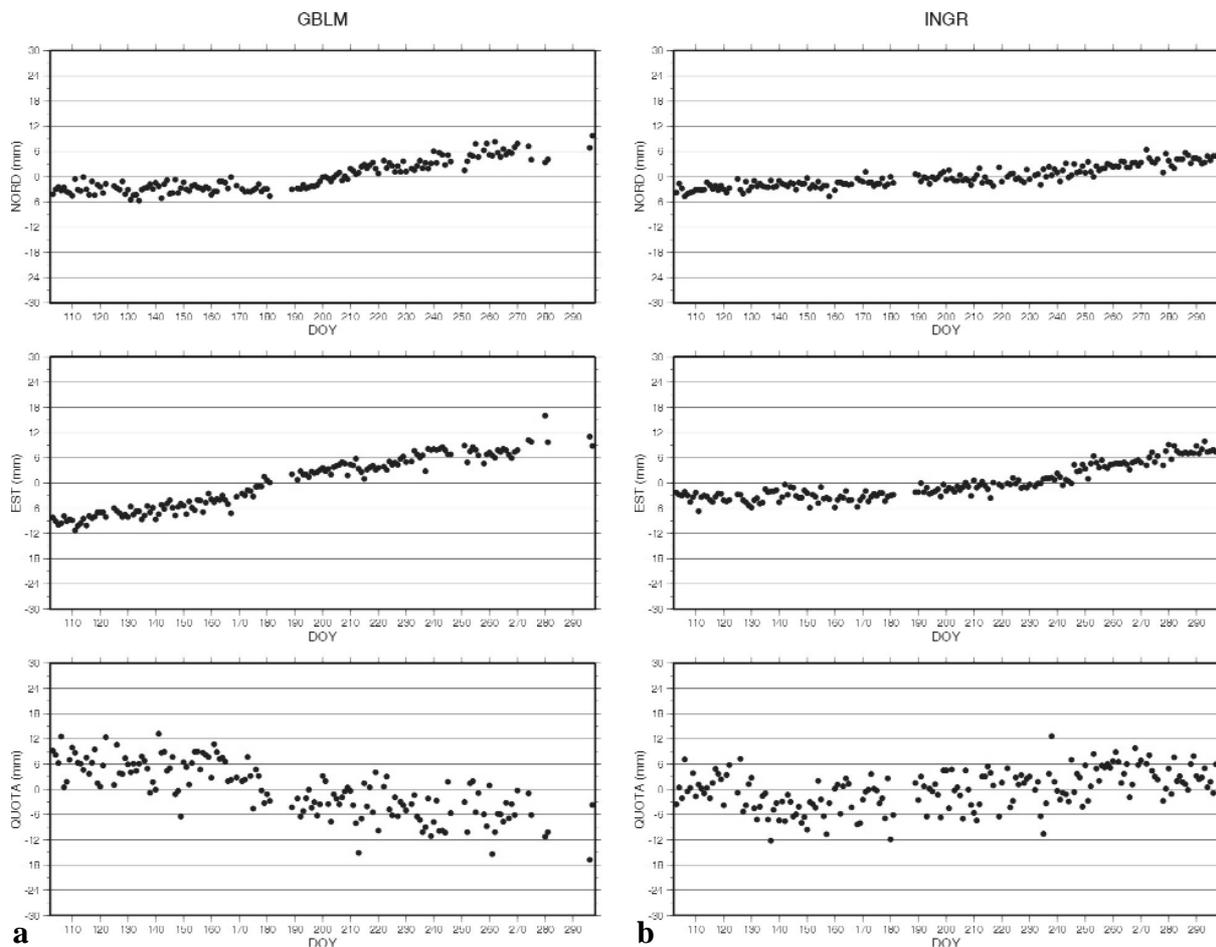


Figura 17. Serie temporali per le componenti Nord, Est e Quota, delle stazioni GPS di a) Gibilmanna (GMLM) e b) Roma (INGR).

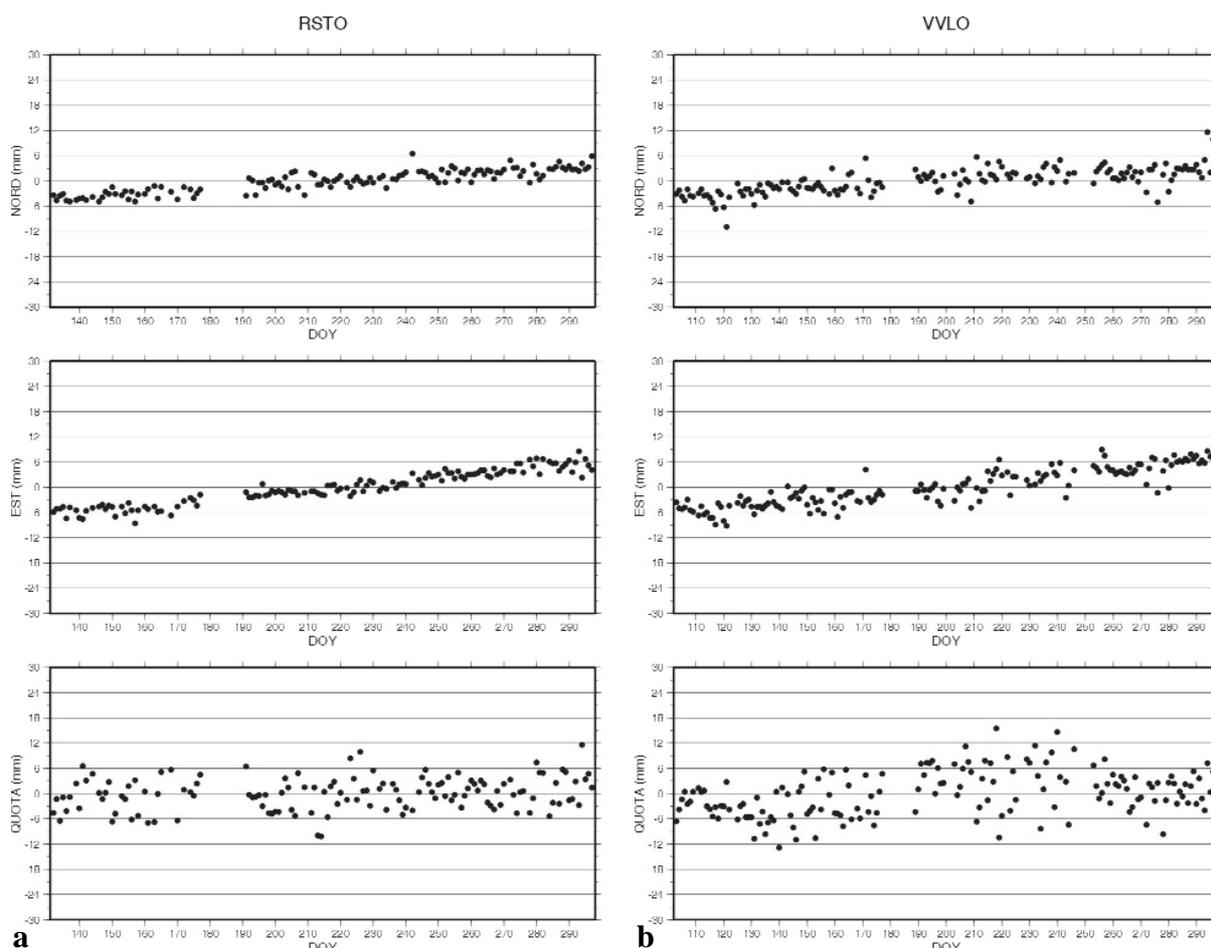


Figura 18. Serie temporali per le componenti Nord, Est e Quota, delle stazioni GPS di a) Roseto degli Abruzzi (RSTO) e b) Villavallelonga (VVLO).

RINEX o RINEX compresso per le stazioni di VVLO, RSTO, GBLM e INGP a partire dal giorno 102 del 2003. I dati di INGR sono direttamente disponibili sul sito WEB dell'ASI <http://geodaf.asi.mt.it>, in quanto vengono elaborati congiuntamente a quelli di tutte le stazioni GPS permanenti italiane anche dal Centro di Geodesia Spaziale di Matera.

Le soluzioni settimanali sono attualmente disponibili in formato SINEX solo per utenti INGV sulla macchina VAX ING750, *account* RETEGPS, accessibile tramite SET DEF.

Le serie temporali e alcuni documenti riguardanti la rete sono disponibili sul sito WEB dell'U.F. Geodesia e Telerilevamento <http://www.ingv.it/labtel2/ufpage.htm>, nell'area Geodesia - Reti Geodetiche GPS.

E' stato recentemente richiesto di ampliare il sistema di gestione della banca dati GPS implementando un calcolatore completamente dedicato a *WEB server* di gestione della gran mole di dati e soluzioni che si producono.

Conclusioni

Sebbene le stazioni GPS non permanenti esistenti a scala regionale e locale stiano fornendo informazioni cruciali per la comprensione dei processi geofisici in atto nel Mediterraneo centrale e nell'Appennino [Anzidei et al., 2001; Serpelloni et al., 2001, D'Agostino et al., 2001, Oldow et al., 2001; Hollenstein et al., 2003], la necessità di disporre di stazioni in monitoraggio continuo permette di migliorare la risoluzione temporale e spaziale sulle disomogeneità di comportamento strutturale alla scala italiana e più in generale del Mediterraneo centrale. Le stazioni permanenti consentono di ottenere precisioni superiori in coordinate e velocità rispetto alle stazioni non permanenti, permettendo di fornire nell'arco temporale di circa tre anni di dati, prime stime di velocità utili per la osservazione e modellazione dei processi di deformazione crostale.

I prodotti che derivano dalla realizzazione della rete permanente si possono così riassumere:

- Produzione di soluzioni giornaliere e set-

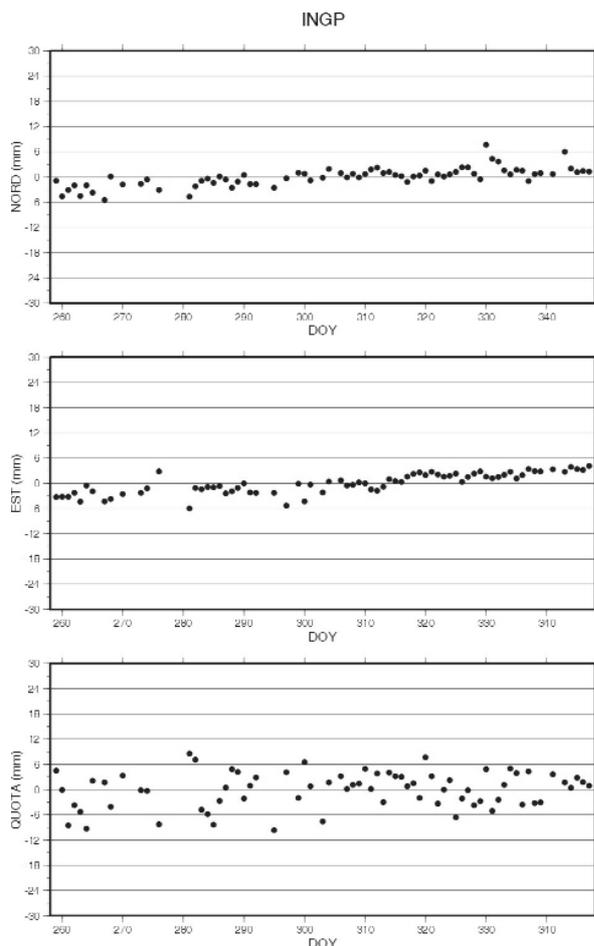


Figura 19. Serie temporali per le componenti Nord, Est e Quota, della stazione GPS di Preturo (INGP).

timanali di coordinate delle stazioni della rete in formato h-files o Sinex;

- Produzione di soluzioni di velocità e di deformazione ottenute dall'analisi delle reti GPS in formato sinex;
- Archivio dati GPS
- costruzione di una struttura WEB per la diffusione e divulgazione dei prodotti e risultati delle reti GPS.

I risultati provenienti da queste reti, in termini di parametri delle deformazioni crostali (velocità orizzontali e verticali, tassi di deformazione) ci consentiranno di approfondire significativamente le nostre conoscenze sulla tettonica e la geodinamica del Mediterraneo centrale e della penisola Italiana. In particolare, questi risultati potranno essere utilizzati per i seguenti scopi: 1) nello sviluppo di modelli numerici utilizzandoli come vincolo sperimentale 2) per ottenere informazioni sul rapporto tra deformazione sismica e deformazione asismica di aree o particolari segmenti di faglie attive; 3) per vincolare modelli di sorgente sismica (deformazioni cosismiche); 4) per individuare

segnali transienti nel campo di deformazione legati all'interazione tra strutture sismogeniche, nell'ambito dello studio del ciclo sismico; 5) integrazione con dati SAR per lo studio delle deformazioni cosismiche ed in prospettiva di futuri sviluppi dell'interferometria radar, per lo studio delle deformazioni inter-sismiche e post-sismiche, anche mediante la tecnica dei Permanent Scatterers; 6) studi relativi ai sistemi di riferimento (ITRF, EUREF) e del geode.

E' indubbio che tutti queste applicazioni avranno una ricaduta significativa sulla stima del rischio sismico, attraverso l'utilizzo di approcci multidisciplinari di stima della pericolosità, così come dimostrato in altre aree della Terra.

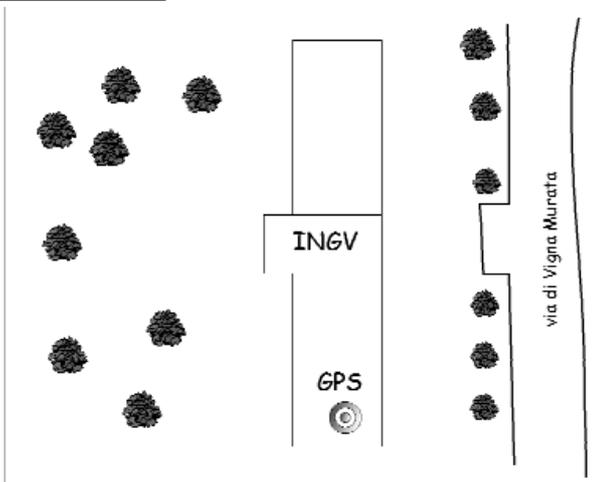
Bibliografia

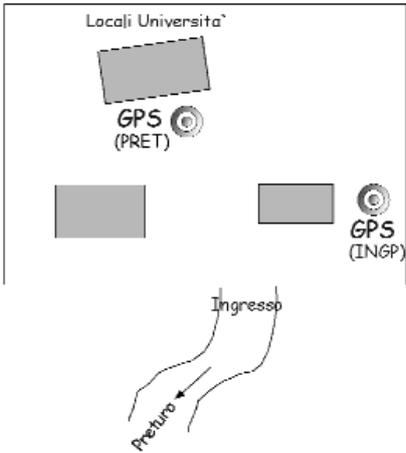
- Anzidei M., Baldi P., Galvani A., Hunstad I., Pesci A. (1998): Coseismic displacements of the 26th September 1997 Umbria-Marche earthquake (Italy) detected by GPS. *Annali di Geofisica* vol.42, n.4, 597-607.
- Anzidei M., Baldi P., Casula G., Galvani A., Mantovani E., Pesci A., Riguzzi F., Serpelloni E. (2001): Insights on present-day crustal motion in the central Mediterranean area from GPS surveys. *Geophysical J. Int.*, 146, 98-110
- Anzidei M. ed A. Esposito (2003): Linee guida per la identificazione di siti idonei alla realizzazione di stazioni GPS permanenti e non permanenti. *Rapporti Tecnici dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, n.18.
- Anzidei M., Bianchi C., Ciruolo L., Pezzopane M., Scotto C. (1997): Gravity waves propagation in Thermosphere observed from electron density profile and Total Electron Content measurement. *Annali di Geofisica*, vol.XL, n.6
- Barzaghi R., Borghi A., Crespi M., Pietrantonio G., Riguzzi F. (2002): *GPS permanent network solution: the impact of temporal correlations*, V "Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy", Matera.
- Betti B., L. Biagi, M. Crespi and F. Riguzzi (1999). GPS sensitivity analysis applied to non permanent GPS control networks. *Journal of Geodesy*, 73, 158-167.
- Beutler, G., Brockmann, E., Dach, R., Fridez, P., Gurtner, W., Hugentobler, U., Johnson, J., Mervant, L., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T., Weber, R. (2000). *Bernese Software 4.2*. Astronomical Institute, University of Berne.
- Blewitt, G., Bock, Y. & Gendt, G. (1993): Regional clusters and distributed processing, *Proc. 105 Analysis Center Workshop*, J. Kouba, ed., Int. Assoc. of Geodesy, Ottawa, Canada, 61-92.
- Bock Y., Agnew D.C., Fang P., Genrich J.F., Hager B.H., Herring T.A., Hudnut W., King R.W., Larsen S., Minster J.B., Stark K., Wdowinski S. and Wyatt F. (1993): Detection of crustal deformation from the Landers earthquake sequenze using continuous geodetic measurements. *Nature*, vol.361, 28.

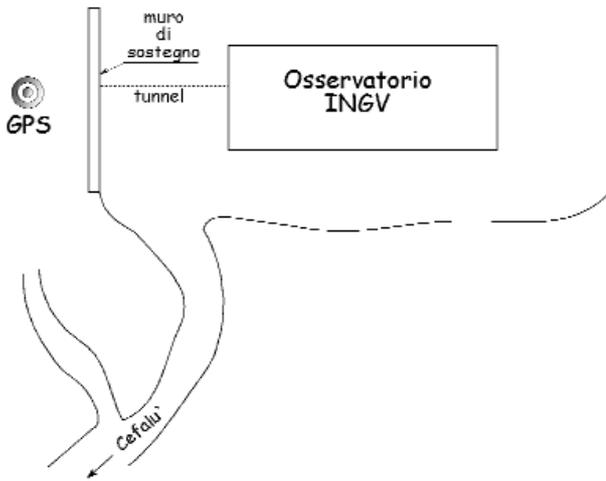
- Bock Y., Wdowinski S., Fang P., Zhang J., Williams S., Johnson H., Behr J., Genrich J., Dean J., Van Donselaar M., Agnew D.C., Wyatt F., Stark K., Oral B., Hudnut K., King R., Herring T., Dinardo S., Young W., Jackson D., Gurtner W. (1997): Southern California Permanent GPS geodetic array: Continuous measurements of regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes. *Jour. Geop. Res.*, 102, B8, 18013-18033.
- Bock Y. Williams S. (1997): Integrated satellite interferometry in Southern California. *EOS*, vol.78, n.29, 22.
- Betti B., Cina A., Tombolini L. (1997): The Turin Politecnico Permanent GPS station. Proceedings of the workshop on the Italian GPS permanent network. F. Vespe and M.Fermi Editors. Telespazio. 123-132.
- Briole P., Massonnet D., Delacourt C. (1997): Post eruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, vol.24, n.1
- Caporali A. (2003): Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS network – I. Statistical analysis of the time series of permanent GPS stations. *Geophysics Journal International*, 155, 241-253.
- Ciraolo L. and Spalla P. (1997): Comparison of TEC evaluation from NNSS and GPS. *Radio Sci.*, 32 (3), 1071-1080.
- Dong, D., Herring, T. A. & King, R.W. (1998): Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, 72, 200-214.
- Granci M. (1999): Misure GPS per il controllo delle deformazioni nell'area dei Colli Albani (Roma). Università degli Studi La Sapienza, D.I.T.S., Tesi di laurea anno accademico 1998-1999.
- Gurtner, W. (1994): RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version2. Astronomical Institute, University of Berne.
- Oldow J.S., L. Ferranti, D.S. Lewis, J.K. Campbell, B. D'Argenio, R. Catalano, G. Pappone, L. Carmignani, P. Conti, C.L.V. Aiken (2002): Active fragmentation of Adria, the north African promontori, central Mediterranean orogen, *Geology*, 30, 9, 779-782.
- Hollenstein C., Kahle H.G., Geiger A., Jenny S., Goes S. and Giardini D. (2003): New GPS constraints on the Africa-Eurasia plate boundary zone in southern Italy. *Geoph. Res. Lett.*, 30, 18, 1935
- Hunstad I., Anzidei M., Baldi P. Cocco M., Galvani A., Pesci A. (1998): Modelling Coseismic displacements during the 1997 Umbria-Marche earthquake (Central Italy). *Geoph. Jou. Int.*, 139, 283-295
- IGS, <http://igsceb.jpl.nasa.gov>
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol.364, 8.
- Massonnet D., Briole P., Arnaud A. (1995): Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, vol.375.
- Massonnet D., Thatcher W. and Vadon H. (1996): Detection of postseismic fault-zone collapse following the Landers earthquake. *Nature*, vol.382.
- Mirena G., Riguzzi F., Zuccheretti E. (1997): Measurements of ionospheric TEC in the direction of GPS satellites and comparison with three ionospheric models. *Annali di Geofisica*, XL, 6, 1527-1533.
- Miyazaki S., Tsuji H., Hatanaka Y. (1995): Regional Crustal deformation of Japan observed by GSI's Nationwide GPS array (GAPES). *AGU Fall Meeting*
- Naito I., Hatanaka Y., Mannoji N., Ichikawa R., Shimada S., Yabuki T., Tsuji H., Tanaka T. (1998): Global Positioning System Project to improve Japanese weather, earthquake predictions. *EOS*, vol.79, n.26
- Pollitz, F. (1997): Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth, *J. Geophys. Res.*, 102, 17,921-17,941.
- Riguzzi F. (1995): *La trasformazione delle osservazioni GPS nel formato internazionale di scambio RINEX*: Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 1.
- Salvi S., Stramondo S., Cocco M., Tesauro M., Hunstad I., Anzidei M., Briole P., Baldi P., Sansosti E., Fornaro G., Lanari R., Doumaz F., Pesci A. and A. Galvani (2000): *Modeling Coseismic Displacements resulting from SAR interferometry and GPS measurements during the 1997 Umbria-Marche seismic sequence*. *Journal of Seismology*, 4.
- Serpelloni E., Anzidei M., Baldi P., Casula G., Galvani A., Pesci A., Riguzzi F. (2001): *Geodetic measurement of crustal deformations in Southern-Central Apennines (Italy) from repeated GPS surveys*. *Annali di Geofisica*, 44, 3, 627-648.
- Shimada S., Bock Y. (1992): Crustal deformation Measurements in Central Japan determined by a Global Positioning System Fixed-Point network. *Journal Geophysical Research*, vol.97, n.6.
- Stramondo, S., Tesauro, M., Briole, P., Sansosti, E., Salvi, S., Lanari, R., Anzidei, M., Baldi, P., Fornaro, G., Avallone, A., Buongiorno, M.F., Franceschetti, G., Boschi, E. (1999): *The September 26, 1997 Colfiorito, Italy, earthquakes: modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS*, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 7, pp. 883-886.
- Tsuji H., Hatanaka Y., Sagiya T., Hashimoto M. (1995): Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Okai earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan. *Geophysical Research Letters*, vol.22, n.13.
- Valensise e Pantosti (Editors) (2001): Database of Potential Sources for Earthquakes Larger Than M. 5.5 in Italy. *Annali di Geofisica*, suppl. vol. 4484, 180 pp
- Williams S.P.D. (2003): Offsets in Global Positioning System time series. *Journal of Geophysical Research*, 108, B6, 2310 www.unavco.ucar.edu www.trimble.com
- Wald D.J. and Heaton T.H. (1994): Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California, earthquake. *Bull. Soc. Seism. Am.*

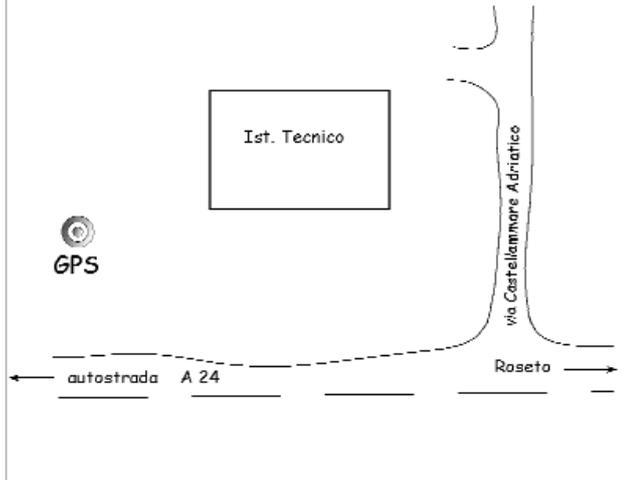
- Vol.84, n.3, pp.668-691, 1994*
- Wdowski S., Bock Y., Zhang J., Fang P., Genrich J. (1997): Southern California permanent GPS geodetic array: spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *Jour. Geoph. Res.*, 102, B8, 18057-18070.
- Williams S.D. P (2003), Offsets in Global Positioning System time series *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, B6
- Shen Z.K., Dong D., Herring T., Hudnut K., Jackson D., King R., McKlusky S., Sung L. (1997): Crustal deformation measured in Southern California. *EOS*, vol.78, n.43.
- Zhang, J. (1996): *Continuous GPS measurements of crustal deformation in southern California*, PhD thesis, University of California, San Diego.
- Zhang, J., Bock Y., Johnson H., Fang P., Williams S., Genrich J., Wdowski S., Behr J. (1997): Southern California permanent GPS geodetic array: Error analysis of daily position estimates and site velocities. *Jour. Geoph. Res.*, 102, B8, 18035-18055.

Appendice/1
Monografie delle stazioni GPS

 RETE GPS PERMANENTE	Istituto Naz. di Geofisica e Vulcanologia (INGR) 001
Provincia: Roma Comune: Roma	Proprietà: Istituto Nazionale di Geof. e Vulc.
Elementi planimetrici (coord. WGS84): Lat. : 41° 49' 41,09" N x : 4646739,3 Lon. : 12° 30' 53,27" E y : 1031416,6 Ht. : 104 mt circa z : 4231464,0	
Cartografia: 1:25 000 Elementi altimetrici:	
Materializzazione: palo in ottone e pilastrino in c.a.. Piano di paragone: base della filettatura del palo. Data: 18 - 03 - 1997 Monumentato da: Anzidei	Note:
Informazioni aggiuntive: sito protetto. Dotato di alimentazione a 220 V e linea telefonica commutata.	
Accesso: Via di vigna murata, 605 Roma	
Geologia LITOLOGIA: deposito massivo a matrice cineritico grossolana - lapillosa di colore violaceo nerastra povero in fini e ricco di cristalli di leucite, biotite e clinopirosseno, contenente grosse scorie nere, generalmente incoerente, Lapilli e blocchi di litici lavici ed olocristallini possono raggiungere il 30% del deposito (Tufo di Villa Senni" o "Pozzolanelle" Auct). STRUTTURA: Vulcano dei Colli Albani .	
	

 RETE GPS PERMANENTE	Preturo Provincia: L' Aquila Comune: L' Aquila	(INGP) 002 Proprieta` : INGV
Elementi planimetrici (coord. WGS84): Lat. : 42° 22' 56.95" N x : 4592128.4 Lon. : 13° 18' 58.63" E y : 1086911.5 Ht. : 732 m circa z : 4277575.4	Materializzazione: 3d su pilastro in calcestruzzo. Piano di paragone: Data: 29 - 11 - 1999 Monumentato da: Anzidei, Del Mese.	Cartografia: 1:25 000 145 III SE Elementi altimetrici: Informazioni aggiuntive: sito protetto. Possibilita` di alimentazione 220 V e di protezione del ricevitore. Cavo di 10 m per l' antenna.
Accesso: Da L' Aquila prendere la S.S. 17 per Rieti. Quindi svoltare sulla S.S. 80 dir in direzione di Preturo - Pizzoli . Passato l'abitato di Preturo dopo circa 1,2 Km svoltare a destra quindi ancora la prima a destra fino a raggiungere la localita` Casale Calore. Il vertice e` posto all'interno dell' Osservatorio Geomagnetico ING di Preturo. Il vertice e` monumentato su di un pilastro in calcestruzzo posto a circa 5 m dai locali dell' Universita` dell' Aquila.	 <p>The diagram shows a road labeled 'Preturo' with an arrow pointing towards 'Ingresso'. To the right of the road, two rectangular buildings are shown. The one closer to the road is labeled 'GPS (PRET)' and the one further away is labeled 'GPS (INGP)'. Above the buildings, a dashed line indicates the 'Locali Universita`'.</p>	
Geologia LITOLOGIA: Deposito limo sabbiosi di colore bruno-avana con intercalazioni di piccoli ciottoli calcarei. Questi litotipi sono stati ricondotti a facies continentali di ambiente lacustre (Blumetti et alii, 1996). STRUTTURA: Sistema delle faglie dell'Alta Valle dell'Aterno in particolare riferibile alla depressione di L' Aquila - Scoppito delimitata a Nord e NE dalla faglia di Monte Pettino (Bagnaia et al., 1996; Blumetti et al., 1996; Basili et al., 1999; Barchi et al., 2000 Valensise e Pantosti, 2001).		
		

 RETE GPS PERMANENTE	Gibilmanna (GBLM) 003	
	Provincia: Palermo Comune: Cefalu`	Proprieta` : Ist. Naz. di Geof. e Vulcanologia.
Elementi planimetrici (coord. WGS84): Lat. : 37° 59' 25.00" N x : 4883820.9 Lon. : 14° 01' 34.00" E y : 1220040.4 Ht. : 1036 m circa z : 3905237.5		Cartografia: 1:25 000 Elementi altimetrici:
Materializzazione: 3 - D/B Piano di paragone: flangia 3 - D Data: 10 - 05 - 2001 Monumentato da: Anzidei, D' Anna	Note: Raggiungibile con auto da strada.	Informazioni aggiuntive: sito protetto posto nel terreno di proprieta` dell' osservatorio Geomagnetico dell' INGV. Dotato di alimentazione a 220 V e linea telefonica commutata.
Accesso: Da Cefalu` procedere in direzione di Gibilmanna, salire fino a raggiungere l' Osservatorio geomagnetico INGV. Il vertice e` posto nel terreno antistante l' Osservatorio.		
Geologia: Argille brune scagliose con noduli di ferro. Flish numidico (Oligocene - Miocene inf.)		
		

 RETE GPS PERMANENTE	Roseto Provincia: Teramo Comune: Roseto degli Abruzzi	(RSTO) 004
	Proprietà : Istituto Tecnico Statale " V. Moretti" via Castellammare Adriatico 3.	Cartografia: 1:25 000 Elementi altimetrici:
Elementi planimetrici (coord. WGS84): Lat. : 42° 39' 30.00" N x : 4558252.7 Lon. : 14° 00' 05.00" E y : 1136625.9 Ht. : 103 m circa z : 4299739.5	Note: Raggiungibile con auto da strada.	
Materializzazione: 3-D/B Piano di paragone: flangia 3-D Data: 10 - 09 - 2001 Monumentato da: Anzidei, Coccina, Galvani, Massucci .		
Accesso: La stazione e' posta nel terreno di proprietà dell' Istituto scolastico Tecnico Statale "V. Moretti", presso la periferia dell' abitato di Roseto degli Abruzzi.		
Geologia: Depositi alluvionali terrazzati coerenti posti sulla sequenza di depositi di avanfossa del Pliocene medio-Pliocene inferiore delle successioni del bacino periadriatico.		

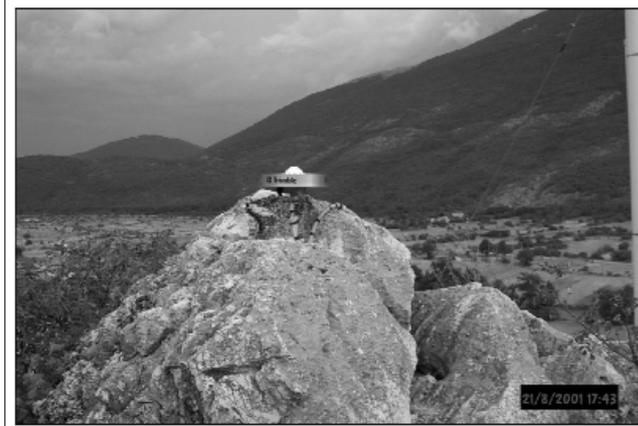


 RETE GPS PERMANENTE	Villavallelonga Provincia: L'Aquila Comune: Villavallelonga	(VVLO) 005 Proprietà: Comunale
	Elementi planimetrici (coord. WGS84): Lat. : 41° 52' 10,72" N x : 4623605.4 Lon. : 13° 37' 23,62" E y : 1120552.2 Ht. : 1045 m circa z : 4235531.1	Cartografia: 1:25 000 152 IV SE Elementi altimetrici:
Materializzazione: 3-D Piano di paragone: Flangia 3-D Data: 30 marzo 2000 Monumentato da: Anzidei, Del Mese.	Note: Con auto da strada.	

Accesso:
 Da Avezzano proseguire in direzione di Trasacco e successivamente per Villavallelonga; giunti all' ingresso del paese superare la stazione di servizio e proseguire per circa 700 m, svoltare a sinistra e successivamente a destra, percorrere circa 250 m; il punto e' situato in alto sulla destra a circa 15 m dalla strada.

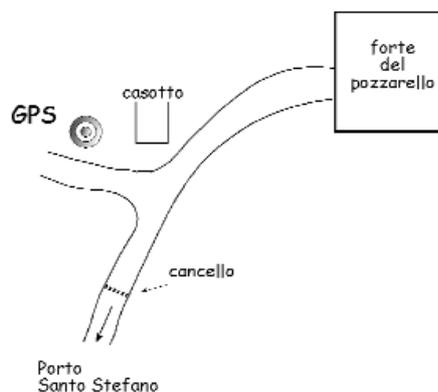


Geologia:
LITOLOGIA: Calcari avana chiaro tipo mudstones e packstones a luoghi ricristallizzati, con sottili litoclasti calcitiche. Si osservano delle piccole milioliti e frammenti di nerinee. Spessore degli strati compreso tra 50 ed 80 centimetri, stratificazione N190°,40° e N10°,30° (Calcari a Requienie, Cretacico inferiore).
STRUTTURA: Villavallelonga, a SW della Piana del Fucino (Galadini e Messina, 2001).



 RETE GPS PERMANENTE	Monte Argentario Provincia: Grosseto Comune: Monte Argentario		(MAOO) 006
	Proprietà: Comunale		Cartografia: 1:25 000
Elementi planimetrici (coord. WGS84): Lat. : 42° 25' 41.00" N x : Lon. : 11° 07' 51.00" E y : Ht. : 226 m circa z :		Elementi altimetrici:	
Materializzazione: 3 - D/A Piano di paragone: flangia 3-D Data: 10 - 07 - 2003 Monumentato da: Anzidei, Giovanni.		Note: Raggiungibile solo con auto da fuoristrada. Informazioni aggiuntive: sito protetto alimentazione 220 V Le chiavi di accesso sono anche disponibili presso l' Ufficio Tecnico del Comune.	

Accesso:
 Da Porto Santo Stefano seguire la strada per il Forte del Pozzarello. Pochi metri prima dell' ingresso al forte raggiungere il casotto della stazione, posto sulla sinistra della strada.



Geologia:
 Calcari dolomitici grigio chiari e scuri, compatti spesso vacuolari, talora con gessi. del Triassico sup.



Appendice/2
Breve introduzione al GPS

Il sistema di posizionamento digitale GPS

Il NAVSTAR/GPS (NAVigation Satellite Time And Ranging / Global Positioning System) è un sistema di posizionamento globale basato sull'emissione, da parte di una costellazione di satelliti artificiali, di segnali complessi che permettono di ricavare informazioni relative al tempo ed alle distanze tra satelliti e ricevitore. Attraverso la ricezione e l'interpretazione di tali segnali, mediante apposita strumentazione, è possibile realizzare un posizionamento tridimensionale (anche in tempo reale) in un sistema di riferimento cartesiano geocentrico.

Nato da un progetto statunitense per scopi militari, il GPS è stato concesso, per le sue vastissime potenzialità applicative, agli usi civili nella prima metà degli anni '80 e si è rapidamente diffuso in vari campi di applicazione: terrestre (rilievi a varie scale, monitoraggio di deformazioni, posizionamento in tempo reale di veicoli), marino (rilievi batimetrici, studi oceanografici sulla direzione delle correnti, posizionamento di imbarcazioni in tempo reale, ecc.), aereo e spaziale (rilievi fotogrammetrici senza punti di appoggio, posizionamento in tempo reale di velivoli e di altri satelliti artificiali, ecc.).

Nell'ambito di un rilievo geodetico, i vantaggi offerti da un tale sistema di misura sono:

- la semplicità di esecuzione delle misure;
- la precisione dei risultati che un lavoro ben eseguito può fornire e la rapidità del rilievo: al giorno d'oggi si riescono a raggiungere ed in alcune applicazioni a superare le precisioni ottenibili con le migliori strumentazioni terrestri, impiegando minor tempo sia per le sessioni di misura che per l'elaborazione dati;
- la non necessaria intervisibilità tra i punti e l'inesistenza di limiti massimi di distanza;
- l'unicità del sistema di riferimento per la planimetria e per l'altimetria.
- la possibilità di lavorare di notte o in presenza di condizioni meteorologiche sfavorevoli (pioggia o foschia), che renderebbero molto difficile o impossibile il ricorso a metodologie classiche.

Gli svantaggi:

- la necessità della visibilità dei satelliti che limita i rilievi solo all'aperto e la sensibilità a disturbi elettromagnetici;
- la disuniforme precisione in planimetria (maggiore), ed in quota (minore);
- la necessità di occupare i vertici da rilevare, che esclude la possibilità di utilizzo

per alcune tipologie di vertici (vertici materializzati da assi di campanili, spigoli di muri, ecc.);

- la diversità tra il sistema di riferimento GPS e quello geodetico nazionale.

Nonostante tali svantaggi, in molte applicazioni in ambito geodetico il GPS è ormai in grado di sostituire completamente (o quanto meno di integrare notevolmente) le tecniche di rilievo tradizionale.

Esso risulta particolarmente indicato per il rilievo periodico di reti geodetiche finalizzate al controllo delle deformazioni in ambito locale, regionale ed anche continentale.

Le componenti del sistema

Il sistema GPS può considerarsi suddiviso in tre segmenti:

- il *segmento spaziale*;
- il *segmento di controllo*;
- il *segmento di utilizzo*.

Il *segmento spaziale* è costituito da una costellazione di 24 satelliti (fig. 1), più due di scorta, disposti su 6 piani orbitali distanziati di 60° in ascensione retta ed inclinati di 55° rispetto all'equatore celeste (fig. 2). Il raggio dell'orbita è pari a circa 26.000 Km, con un periodo di rivoluzione di 12 ore siderali.

La particolare geometria della costellazione garantisce che da ogni punto della terra siano sempre visibili almeno 4 satelliti.

Le principali funzioni del segmento spa-

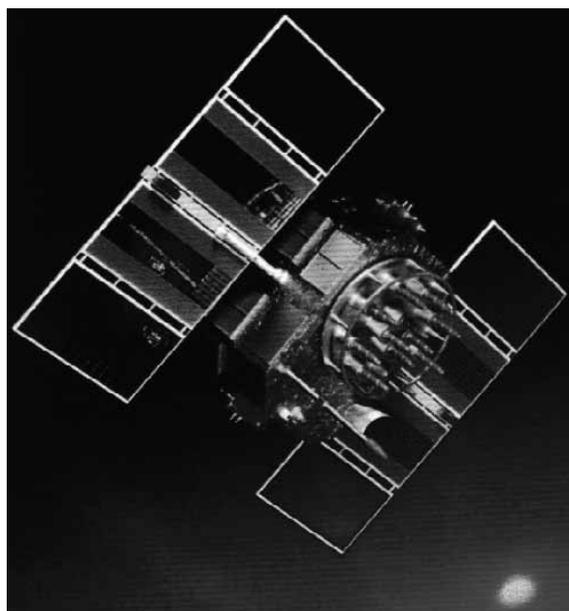


Figura 1. Esempio di satellite GPS.

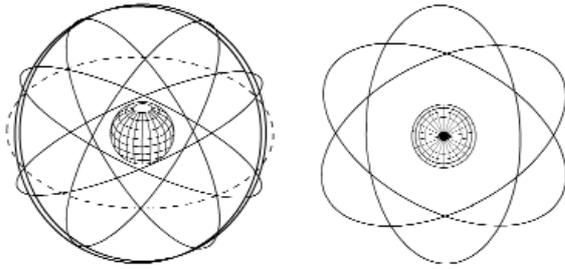


Figura 2. Disposizione orbitale dei satelliti GPS.

ziale sono quelle di trasmettere varie informazioni agli utilizzatori attraverso l'invio di diversi tipi di segnali, di ricevere e memorizzare le informazioni provenienti dal segmento di controllo e permettere a quest'ultimo di eseguire le opportune correzioni d'orbita attraverso razzi di manovra; infine la capacità di mantenere un segnale di tempo molto accurato utilizzando quattro oscillatori atomici (due al cesio e due al rubidio) collocati a bordo di ciascun satellite.

Il *segmento di controllo* è costituito da cinque stazioni a terra, quasi equispaziate lungo la linea equatoriale (fig. 3), la cui posizione risulta nota con grande precisione. In base alle funzioni svolte vengono classificate come *Monitor Station* (MSS), *Master Control Station* (MCS) e *Ground Control Station* (GCS). La loro funzione principale è il continuo tracciamento dei satelliti al fine di calcolarne le effemeridi e le correzioni degli orologi e di caricarle sulle loro memorie di banda. A Colorado Springs (U.S.A.) è situata la cosiddetta stazione principale di controllo (MCS), cui confluiscono e vengono processati tutti i dati registrati nelle MSS. Le GCS costituiscono infine il collegamento tra MCS e segmento spaziale, trasmettendo ai satelliti le istruzioni e i messaggi prodotti dalle elaborazioni della MCS che andranno poi a costi-

tuire una parte essenziale del segnale inviato dal satellite.

Il *segmento utente* è costituito da tutti gli utenti civili e militari dotati essenzialmente di un ricevitore in grado di ricevere, decodificare ed elaborare il segnale ricevuto. Tale strumentazione, come tutti gli apparecchi elettronici in generale, ha subito nel corso degli ultimi anni una rapida evoluzione che ha permesso in poco tempo una drastica riduzione dell'ingombro, del peso e del consumo di energia e contemporaneamente un aumento delle prestazioni: si è passati da apparati delle dimensioni di una valigia e del peso di alcune decine di kg ad apparecchi compatti e leggeri. Esistono oggi svariati tipi di ricevitori che si differenziano per l'uso di una singola o doppia frequenza, per la strategia adottata nella decodifica del segnale, per la precisione che forniscono nel posizionamento, per la capacità di memorizzare dati, ecc..

In generale, uno strumento GPS è costituito da:

- un'antenna ricevente con preamplificatore, che può essere separata o inglobata nel ricevitore;
- un ricevitore, dotato di visore e tastiera per il controllo dell'apparato, con all'interno un oscillatore di precisione al quarzo;
- una batteria di alimentazione, di norma esterna all'apparato principale;
- una dotazione di cavi per il collegamento dei componenti o di questi ad altre unità;
- un *software* per la gestione dei processi di acquisizione e di memorizzazione presente su *ROM* all'interno dello strumento.

Gli strumenti attualmente in commercio possono essere suddivisi in due categorie alle

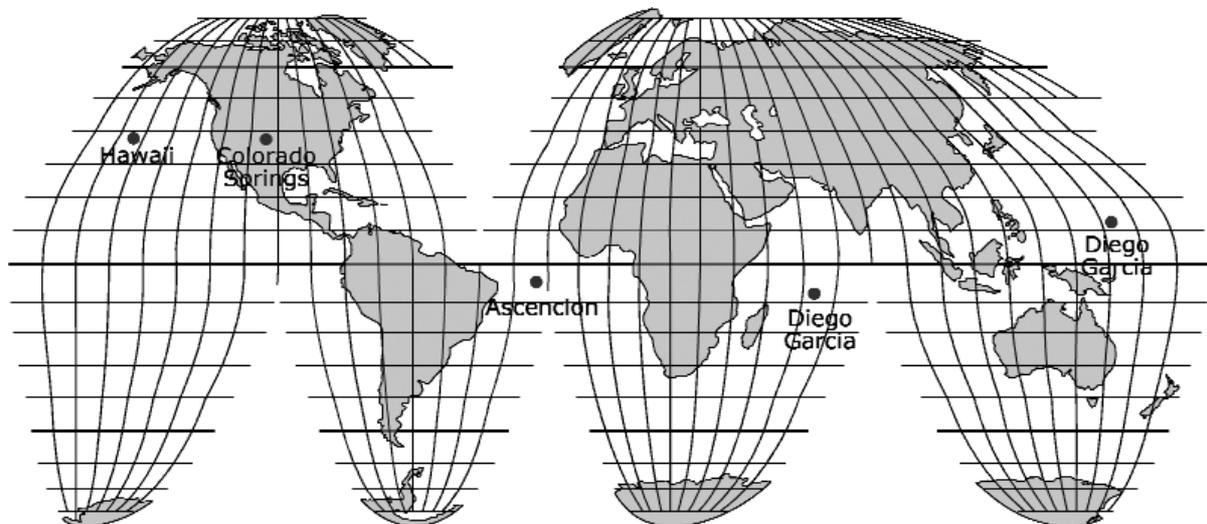


Figura 3. Ubicazione delle stazioni del segmento di controllo.

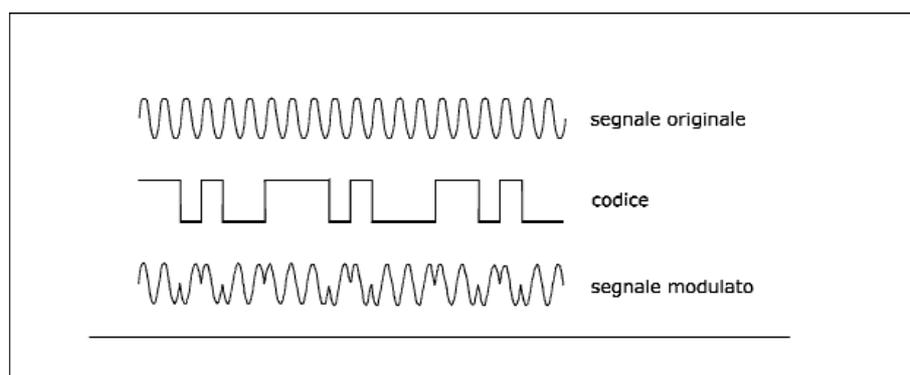


Figura 4. Struttura del segnale GPS.

quali corrispondono due diverse metodologie operative:

- strumenti in grado di determinare esclusivamente la posizione assoluta del punto (metodo del *point positioning*) attraverso *misure di pseudorange*;
- apparati che oltre allo *pseudorange* sono in grado di eseguire *misure di fase* sulle onde portanti del segnale, consentendo un posizionamento relativo tra più strumenti che hanno acquisito contemporaneamente (metodo del *differential positioning*).

Delle differenze tra i due tipi di misure sopra accennati si tratterà più ampiamente nelle pagine successive.

Il segnale GPS

È un segnale complesso, composto dalla sovrapposizione di più onde (fig. 4):

PORTANTI + CODICI + MESSAGGIO

Gli oscillatori a bordo di ogni satellite forniscono un segnale elettromagnetico continuo con frequenza fondamentale f_0 pari a 10.23 MHz; a partire da f_0 si ottengono le frequenze multiple o sottomultiple delle onde costituenti il segnale.

Il sistema utilizza due diverse portanti:

- L1 con frequenza f_{L1} pari a $154 \times f_0 = 1575.42$ MHz e lunghezza d'onda $\lambda_{L1} \cong 19$ cm
- L2 con frequenza f_{L2} pari a $120 \times f_0 = 1227.60$ MHz e lunghezza d'onda $\lambda_{L2} \cong 24$ cm

poiché le perturbazioni dovute alla propagazione del segnale nella ionosfera variano in funzione della frequenza del segnale stesso e quindi utilizzando due frequenze si possono valutare ed eliminare gli effetti ionosferici.

Le due portanti vengono modulate mediante tre codici:

- C/A (*Course Acquisition*) con frequenza $f_{C/A}$ pari a $1/10 \times f_0$; si ripete ogni millesimo di secondo ed è diverso per ogni satellite per permetterne l'individuazione.
- P (*Precise*) con frequenza f_P pari a f_0 ; si ripete ogni 267 giorni, periodo che viene suddiviso in segmenti di 7 giorni, ciascuno assegnato ad un satellite.
- D (*Data*) con frequenza f_D pari a 50 Hz consiste in 1500 bit inviati in 30 s.

I primi due sono detti *Pseudo Random Noise* (PRN, rumori pseudo-casuali) in quanto realizzati tramite una sequenza pseudo casuale di +1 e -1. Il terzo è anch'esso un codice binario, ma strutturato in modo da fornire un ben preciso messaggio: parametri di correzione degli orologi, effemeridi predette, almanacco e stato di salute dei satelliti, modello ionosferico ed altri indici (n° settimana GPS, precisione delle effemeridi del satellite, ecc.).

Effemeridi trasmesse ed effemeridi precise

Si distinguono due tipi di effemeridi:

- le effemeridi trasmesse (tramite il messaggio navigazionale D);
- le effemeridi precise;

che si differenziano in base alla precisione che sono in grado di offrire.

Le *effemeridi trasmesse* (o *broadcast ephemerides*) sono quelle calcolate dal segmento di controllo sulla base delle orbite precedentemente compiute dallo stesso satellite: i dati raccolti nell'ultima settimana vengono compensati col metodo dei minimi quadrati e viene determinata una prima stima della traiettoria (effemeridi di riferimento) con errori dell'ordine del centinaio di metri. Poi, a intervalli di 12-24 ore vengono trasmesse le correzioni da apportare alle effemeridi di riferimento calcolate sulle ultime orbite compiute dal satellite. Così corrette le effemeridi trasmesse hanno errori dell'ordine dei 5-10 m. Le informazioni sulle effemeridi

trasmesse vengono memorizzate dal ricevitore per poter poi essere utilizzate in sede di elaborazione e consentendo inoltre il posizionamento in tempo reale.

Vengono inoltre messe a disposizione le cosiddette *effemeridi precise* (o calcolate), che si basano sul tracciamento dei satelliti da parte della rete di stazioni permanenti dell'IGS - *International GPS Service*. Tali effemeridi hanno una precisione molto superiore rispetto alle precedenti (circa 20 cm), in quanto non si tratta di orbite predette ma di orbite ricalcolate. Le effemeridi precise sono disponibili generalmente due settimane dopo la raccolta dei dati e quindi non possono essere utilizzate per il posizionamento in tempo reale.

Misure con il sistema GPS

Il segnale inviato dai satelliti viene captato dal ricevitore il quale ne effettua una replica al suo interno. L'operazione impegna il ricevitore per qualche istante dopo l'accensione e consiste nel riprodurre col proprio oscillatore un segnale simile a quello ricevuto, che si differenzia da quest'ultimo per uno sfasamento lungo l'asse dei tempi. Per questa operazione, ad ogni satellite collegato viene riservato un differente canale all'interno del ricevitore.

A questo punto possono essere eseguite due differenti misure sul segnale GPS:

- misure di *pseudorange* (effettuate sui codici PRN modulanti la portante);
- misure di fase (effettuate sulle portanti demodulate).

Entrambe hanno lo stesso contenuto geometrico (distanza ricevitore-satellite), ma precisioni diverse. Inoltre soltanto le prime forniscono senza particolari elaborazioni risultati in tempo reale, con la possibilità di utilizzo a livello navigazionale.

La distanza così determinata è da intendersi tra i due estremi individuati fisicamente dal centro di fase dell'antenna del ricevitore e dal centro di fase dell'antenna del satellite.

Misure di pseudorange

Assumendo come nota in ogni istante la posizione dei satelliti nello spazio, rispetto ad un prefissato sistema di riferimento cartesiano (detto WGS84 e discusso nel seguito), un qualsiasi punto nello stesso sistema di riferimento avrà coordinate esprimibili mediante un sistema di tre equazioni del tipo:

$$d_j^i = \sqrt{(X^i - X_j)^2 + (Y^i - Y_j)^2 + (Z^i - Z_j)^2} \quad (1)$$

avendo posto:

d_j^i = distanza geometrica tra satellite i e ricevitore j ;

X^i, Y^i, Z^i = coordinate dell' i -esimo satellite (con $i = 1, 2, 3$);

X_j, Y_j, Z_j = coordinate del ricevitore j (incognite);

Affinchè sia possibile determinare la posizione di quel punto in quello istante è quindi necessario misurare la distanza tra il punto in questione ed almeno tre satelliti.

Questa misura è effettuata sui codici modulanti le portanti, i quali permettono di determinare il tempo necessario al segnale per giungere dal satellite alla stazione di ricezione.

Operativamente la misura viene effettuata confrontando il segnale proveniente dal satellite con quello riprodotto all'interno del ricevitore (fig. 5); si valuta quindi di quanto deve essere traslata la replica, sull'asse dei tempi, per ottenere l'allineamento con il codice ricevuto (in corrispondenza della massima correlazione tra i codici). Il ritardo ΔT tra i due codici, il cosiddetto *time delay*, rappresenta proprio il tempo che il segnale impiega a coprire la distanza incognita ed è ottenuto come differenza tra l'origine del tempo di ricezione T_j (letto sull'orologio del ricevitore j) e quella del tempo di trasmissione T^i (letto sull'orologio del satellite i):

$$\Delta T_j^i = T_j - T^i \quad (2)$$

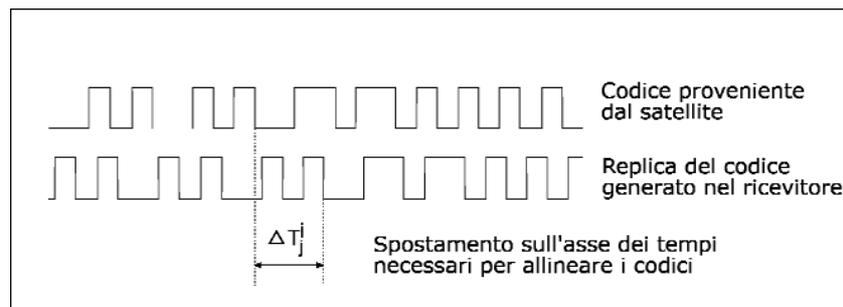


Figura 5. Misura di pseudorange.

Indicando con ΔT_j^i l'intervallo temporale necessario al segnale per giungere dal satellite i al ricevitore j e moltiplicandolo per la velocità di propagazione del segnale c (velocità della luce nel vuoto), si ottiene una lunghezza che rappresenta lo *pseudorange* (o pseudo distanza):

$$\rho_j^i = c\Delta T_j^i \quad (3)$$

Si parla di *pseudorange* in quanto la grandezza così determinata è una distanza affetta dall'errore di sincronismo tra l'orologio del ricevitore e quello del satellite (oltre che da altri errori di minore entità verranno introdotti in seguito). Infatti l'espressione (3) non può essere considerata corretta poiché richiederebbe che tutti gli orologi (satelliti e ricevitore) fossero costantemente sincronizzati. Al contrario, mentre gli orologi dei satelliti si possono ritenere adeguatamente sincronizzati tra loro, ciò non è valido per il ricevitore (fig. 6).

Viene quindi introdotta nel problema un'ulteriore incognita rappresentata dal difetto di sincronizzazione (*offset*) tra i tempi dei due gruppi di orologi:

$$\Delta T_j^i = (T_j - T^i) = (t_j - t^i) + (dt_j - dt^i) = \frac{\rho_j^i}{c} + (4)$$

$$+ (dt_j - dt^i) = \frac{\rho_j^i}{c} + (dt_j - dt^i)$$

in cui:

$(dt_j - dt^i)$ = difetto di sincronizzazione tra satelliti i e ricevitore j , incognito.

L'incognita aggiuntiva richiede perciò l'osservazione di un quarto satellite. Il sistema di equazioni (1), riscritto assumendo come grandezza osservabile la pseudodistanza, diventa quindi:

$$\rho_j^i = \sqrt{(X^i - X_j)^2 + (Y^i - Y_j)^2 + (Z^i - Z_j)^2} + c(dt_j + dt^i) \quad (5)$$

essendo:

ρ_j^i = pseudorange tra satellite i e ricevitore j , misurato;

c = velocità di propagazione del segnale, nota;

dt^i = offset di tempo del satellite i , noto dal messaggio navigazionale D;

dt_j = offset di tempo del ricevitore j , incognito;

X^i, Y^i, Z^i = coordinate dell' i -esimo satellite, note dal messaggio navigazionale D;

X_j, Y_j, Z_j = coordinate del ricevitore j , incognite;

Ogni satellite osservato fornisce una equazione del tipo (5) e quindi è possibile determinare la posizione del ricevitore risolvendo un sistema di almeno 4 equazioni che contengono le sole incognite di posizione e del difetto di sincronizzazione. Tale operazione viene eseguita dal *software* del ricevitore in tempo reale, fornendo ad ogni epoca di misura la posizione del ricevitore.

Gli stessi dati possono essere registrati ed elaborati in un secondo tempo così da modellizzare analiticamente alcune cause di errore e rimuoverle parzialmente. Nel caso in cui siano osservati più di quattro satelliti è possibile (sia in tempo reale che successivamente) stimare la soluzione secondo il principio dei minimi quadrati, aumentando l'affidabilità del posizionamento.

Le precisioni massime conseguibili nella misura dello pseudorange dipendono dal codice sul quale viene effettuata la misura; una regola pratica esprime la precisione come percentuale

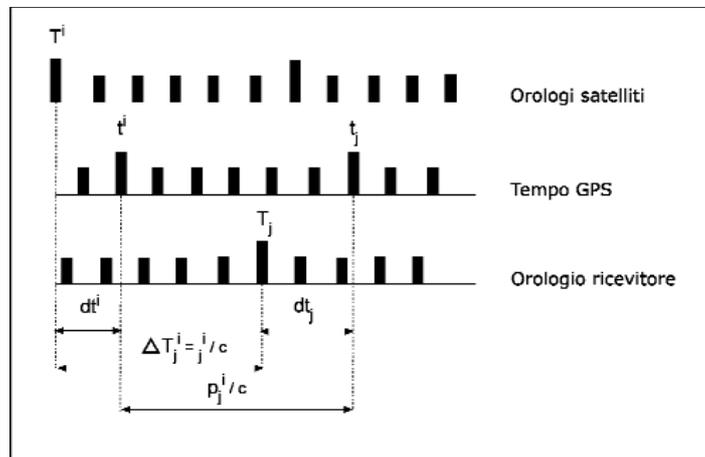


Figura 6. Difetti di sincronismo del ricevitore e dei satelliti rispetto al tempo generale GPS.

della lunghezza d'onda del segnale ($0.2 \div 1\%$):

- nel caso del codice C/A ($\lambda \approx 300$ m) l'incertezza è dell'ordine dei 0.5 – 3 m
- nel caso del codice P ($\lambda \approx 30$ m) l'incertezza è di circa 0.1 – 0.3 m.

Vedremo però nel seguito che la presenza di altre cause d'errore impedisce generalmente di raggiungere tali precisioni.

Misure di fase

Le misure di fase si effettuano sull'onda portante demodulata dai codici; l'osservazione è costituita dalla differenza tra la fase dell'onda portante ricevuta e la fase di un'onda di riferimento generata all'interno del ricevitore, all'istante della ricezione.

Il principio operativo risulta essenzialmente analogo a quello utilizzato per i codici: in entrambi i casi si giunge infatti alla determinazione della distanza considerando lo sfasamento tra due onde ma, mentre per lo pseudorange la grandezza misurata è una differenza di tempo, in questo caso si tratta proprio di una differenza di fase.

La misura di fase è costituita da due componenti, una frazionaria e l'altra intera (fig. 7):

- la componente frazionaria consiste nello sfasamento $\phi_j^i(t_j)$ ($0 \leq \phi_j^i \leq 1$ ciclo) tra la fase dell'onda portante inviata dal satellite all'epoca t_j e la fase della copia della portante generata dall'oscillatore interno al ricevitore alla stessa epoca;
- la componente intera è rappresentata dalla variazione della differenza $\Delta N(t_0, t_j)$ tra il numero di cicli interi ricevuti dal satellite ed il numero di cicli interi generati dall'oscillatore interno al ricevitore all'epoca t_j rispetto all'epoca iniziale t_0 , equivalente alla variazione del numero intero di lunghezze d'onda comprese nella distanza satellite-ricevitore tra le

suddette epoche.

Se non vi fosse moto relativo tra il satellite ed il ricevitore, il principio della misura della distanza satellite-ricevitore sarebbe uguale a quello su cui si basa il funzionamento del distanziometro ad onde elettromagnetiche, quindi il problema si ricondurrebbe direttamente alla determinazione del numero intero di lunghezze d'onda comprese nella distanza satellite-ricevitore (ambiguità di fase N).

Si considerino due oscillatori (j, i) posti a distanza costante d che generano onde elettromagnetiche di uguale frequenza f e si misuri lo sfasamento $\Phi_j^i(t_j)$ tra le loro fasi in corrispondenza dell'oscillatore j all'epoca di ricezione t_j ; ipotizzando di operare in condizioni ideali (senza errori di orologio e di rifrazione) è possibile scrivere la seguente relazione:

$$\Phi_j^i(t_j) - \Phi_j^i(t_j) = \Phi^i(t_j - \tau) - \Phi_j^i(t_j) = \Phi_j^i(t_j - \tau) - \Phi_j^i(t_j) \quad (6)$$

essendo:

t_j = epoca di ricezione del segnale all'oscillatore j ;

τ = tempo di propagazione, ovvero il tempo impiegato dall'onda per percorrere la distanza d ;

$\Phi_j^i(t_j)$ = fase dell'onda proveniente dall'oscillatore i ricevuta all'epoca t_j dall'oscillatore j ;

$\Phi_k^i(t_j - \tau)$ = fase dell'onda trasmessa dall'oscillatore i all'epoca $t_j - \tau$ (uguale a $\Phi_j^i(t_j)$);

$\Phi_j^i(t_j - \tau)$ = fase dell'onda generata dall'oscillatore j all'epoca (uguale a $\Phi_j^i(t_j - \tau)$).

Sviluppando in serie di Taylor il termine $\Phi_j^i(t_j - \tau)$ in un intorno dell'epoca t_j fino al primo ordine e ricordando che:

si ottiene:

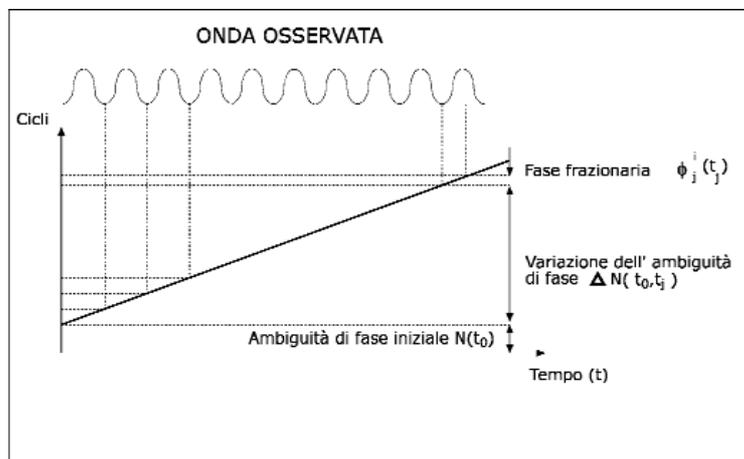


Figura 7. Misure di fase.

$$\Phi_j^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = -f\tau = -\frac{d}{\lambda} = -N(t_j) - \varphi_j(t_j) = -N - \varphi_j^i \quad (7)$$

in cui:

λ = lunghezza d'onda

d = distanza tra gli oscillatori

N = numero intero di lunghezze d'onda nella distanza d

φ_j^i = parte frazionaria dello sfasamento

Va notato che nella (7) l'ambiguità di fase e lo sfasamento rimangono costanti nel tempo, poiché costante è la distanza d tra gli oscillatori.

Il moto relativo tra satellite e ricevitore fa invece variare nel tempo queste due quantità e quindi è necessario misurarle continuamente entrambe. In pratica è però impossibile misurare l'ambiguità di fase $N(t_j)$ ad ogni epoca, mentre si può misurare la sua variazione nel tempo $\Delta N(t_0, t_j)$; rimane allora incognita solo l'ambiguità di fase all'epoca iniziale (ambiguità iniziale di fase $N(t_0)$) poiché sussiste la relazione:

$$N(t_j) = N(t_0) + \Delta N(t_0, t_j)$$

Conseguentemente, sempre ipotizzando che non vi siano errori di nessun tipo, l'equazione di osservazione relativa alla misura di fase risulta:

$$\Phi_j^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = -N(t_0) - \Delta N(t_0, t_j) - \varphi_j^i(t_j) \quad (8)$$

Sulla base di quanto detto sopra è possibile considerare le misure di fase sotto due punti di vista differenti ma equivalenti:

- come misure di distanze (variabili) affette da una ambiguità di fase incognita variabile nel tempo:

$$\Phi_j^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = -N(t_j) - \varphi_j^i(t_j); \quad (9)$$

- come misure di differenze di distanze affette da una ambiguità di fase iniziale incognita:

$$\Phi_j^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = -N(t_0) - [\Delta N(t_0, t_j) + \varphi_j^i(t_j)]; \quad (10)$$

Nel seguito si sceglie la forma (10) per separare le quantità misurate $\Delta N(t_0, t_j)$ e $\varphi_j^i(t_j)$ dai parametri $\Phi_j^i(t_j)$, $\Phi_j(t_j)$, $N(t_0)$ e si pone:

$$\Phi_j^i(t_j) = \varphi_j^i(t_j) + \Delta N(t_0, t_j),$$

cosicché l'equazione di osservazione (8) diventa:

$$\Phi_j^i(t_j) = \Phi_j(t_j) - \varphi_j^i(t_j) - N(t_0). \quad (11)$$

Per esplicitare le incognite geometriche nella (11) si procede in modo analogo a quanto fatto per ricavare la (7) in cui compare la distanza d ; si deve però tenere presente che in questo caso il tempo di propagazione è variabile nel tempo e quindi si ottiene:

$$\begin{aligned} \Phi_j^i(t_j) &= \Phi_j(t_j) - \varphi_j^i(t_j) - N(t_0) = \\ &= \Phi_j(t_j) - \Phi^i(t_j - \tau(t_j)) - N(t_0) = \\ &= \Phi_j(t_j) - \Phi^i(t_j) + f\tau(t_j) - N(t_0) = \\ &= \Phi_j(t_j) - \Phi^i(t_j) + f \frac{\rho_j^i(t_j)}{c} - N(t_0) \end{aligned} \quad (12)$$

I termini $\Phi_j(t_j)$ e $\Phi^i(t_j)$ sarebbero uguali se si operasse in condizioni ideali, poiché per ipotesi, in tal caso, gli oscillatori del satellite e del ricevitore dovrebbero essere identici. Come già detto però, esiste sempre un difetto di sincronizzazione (variabile nel tempo), esprimibile come differenza dei rispettivi difetti di sincronizzazione al medesimo istante $dt^i(t_j)$, $dt_j(t_j)$, rispetto al tempo GPS. Bisogna quindi introdurre nella (12) il termine relativo agli errori di orologio in termini di fase.

Essendo:

$$\Phi_j(t_j) = \Phi(t_j) + d\Phi_j(t_j)$$

$$\Phi^i(t_j) = \Phi(t_j) + d\Phi^i(t_j)$$

con:

$\Phi(t_j)$ = fase dell'oscillatore ideale

$d\Phi_k(t_j) = fdt^i$ (difetto di sincronizzazione del satellite all'epoca di ricezione)

$d\Phi_j(t_j) = fdt_j$ (difetto di sincronizzazione del ricevitore all'epoca di ricezione)

Differenziando le due espressioni si ottiene:

$$\Phi_j(t_j) - \Phi^i(t_j) = f(dt_j - dt^i)$$

e quindi la (12) diventa:

$$\Phi_j^i(t_j) = f(dt_j - dt^i) + f \frac{\rho_j^i(t_j)}{c} - N(t_0) \quad (13)$$

Nell'equazione di osservazione alla misura di fase compaiono in definitiva la seguenti incognite:

- 3 coordinate incognite del punto di stazione (X_j , Y_j , Z_j);
- l'incognita dovuta al difetto di sincronizzazione degli orologi ($dt_j - dt^i$);
- l'incognita di ambiguità iniziale $N(T_0)$ (numero intero).

Si vedrà in seguito che in realtà nell'e-

quazione (13) debbono essere considerate ulteriori incognite che renderanno necessario adottare particolari combinazioni lineari delle equazioni medesime.

Anche nella misura di fase la precisione massima conseguibile può essere espressa empiricamente come percentuale della lunghezza d'onda del segnale ($0.5 \div 1\%$), quindi un'incertezza dell'ordine dei $1 \div 2$ mm (essendo $\lambda_{L1} \cong 19$ cm e $\lambda_{L2} \cong 24$ cm).

Errori del sistema GPS

Le misure GPS sono affette da un notevole numero di errori di varia natura, classificabili come:

- a) puri errori strumentali;
- b) errori di modello (*biases*);
- c) errori di osservazione;
- d) degradazione intenzionale del segnale.

Tutti gli errori possono essere quantificati in termini di effetto sulla distanza satellite-ricevitore. Gli errori *b*, *c*, e *d* sono notevolmente superiori ai primi e la loro entità impedisce di raggiungere le massime potenzialità del sistema citate precedentemente e, per tale motivo, essi vanno eliminati o quantomeno minimizzati.

Errori strumentali

Sono dovuti alla precisione intrinseca che l'apparecchiatura è in grado di fornire nelle misure di pseudorange e di fase; se ne può tenere conto empiricamente considerandoli come frazione ($0.2 \div 1\%$) della lunghezza d'onda utilizzata.

Errori di modello (*biases*)

Sono errori sistematici, comuni sia a misure di pseudorange che di fase e possono essere riconducibili a:

- indeterminazione dell'orbita dei satelliti ($d\rho$), presente sia per le effemeridi "*broadcast*" che per le "*precise*", dovuta alla difficoltà di modellizzare tutte le forze non gravitazionali che perturbano il moto dei satelliti;
- *offset* di sincronismo degli orologi dei ricevitori (dt_r) e dei satelliti (dt_s);
- propagazione dei segnali attraverso l'atmosfera; in particolare si distinguono le perturbazioni dovute alla ionosfera d_{ion} , parte ionizzata dell'atmosfera compresa tra i 50 ed i 100 Km di quota, il cui effetto dipende dalla frequenza del segnale; e quelle dovute alla troposfera, la parte dell'atmosfera soggetta a variazioni climatiche che va da 0 a 10 Km di quota, il cui

effetto d_{trop} dipende dal contenuto di umidità, dalla temperatura e dalla pressione.

Tipici delle sole misure di fase sono i *biases* di ambiguità delle onde portanti.

Errori di osservazione

Sono errori di natura accidentale che si verificano nell'acquisizione del segnale da parte del ricevitore. Alcuni di questi errori non sono del tutto eliminabili, ma minimizzabili attraverso l'uso di tecniche e procedure appropriate. Comprendono:

- *Cycle slips* (salti di ciclo), dovuti all'elevata rumorosità del segnale o a temporanee ostruzioni della linea di vista ricevitore-satellite. Fintanto che le onde portanti sono ricevute senza interruzioni durante una sessione di osservazione, si genera una sola ambiguità incognita $N_j(t_0)$ per ogni coppia ricevitore-satellite. Nel caso si verifichi una interruzione nella ricezione della fase al tempo t_0 , al momento del "riaggancio" del segnale, al tempo t , la parte frazionaria della misura di fase è la stessa di quella che si sarebbe ottenuta se non vi fosse stata la discontinuità, ma il numero intero di cicli $N_j(t_0, t)$ intercorsi tra l'inizio e la fine dell'interruzione viene perso. È proprio $N_j(t_0, t)$ l'entità del *cycle slip*. Concettualmente, sarebbe necessario introdurre una nuova ambiguità incognita al tempo t , che riduce la ridondanza delle osservazioni e rende le procedure di compensazione più laboriose. È però possibile nella maggioranza dei casi identificare e rimuovere i *cycle slips* mediante un pre-processamento dei dati, attraverso una sequenza di procedure automatiche, di volta in volta più raffinate.
- *Multipath*, fenomeno che peggiora il rapporto segnale/rumore, generato dalla contemporanea ricezione del segnale proveniente direttamente dal satellite e di altri segnali riflessi da superfici circostanti l'antenna (alberi, edifici, cartelli, ecc.). È possibile ridurre l'effetto usando particolari tipi di antenne.

Variazione del centro di fase dell'antenna, dovuta al fatto che le antenne non sono in grado di ricevere i segnali in modo perfettamente isotropo sia azimutalmente che zenitalmente; uno stesso segnale, ricevuto da due antenne di ugual tipo ma orientate diversamente, genera misure diverse. Il problema può essere ridotto utilizzando antenne dello stesso tipo e orientandole tutte nella stessa direzione.

Criptazione e degradazione intenzionale del segnale

Il Dipartimento della Difesa degli U.S.A., che gestisce il funzionamento del GPS, si riserva la possibilità dell'uso esclusivo o della degradazione in qualunque momento del segnale GPS.

Ciò può essere realizzato in due diversi modi:

- mediante il cosiddetto *Anti-Spoofing* (AS), che consiste nella sovrapposizione di un ulteriore codice pseudo-casuale incognito al codice P, che prende così il nome di codice Y. Con tale espediente si rende impossibile il posizionamento di precisione agli utilizzatori non militari.
- mediante la modalità *Selective Availability* (SA), che consiste in una degradazione delle informazioni contenute nel messaggio navigazionale D (deterioramento delle effemeridi trasmesse e dei parametri per la correzione degli orologi dei satelliti).

Errori ed equazioni di osservazione

Le equazioni di osservazione (5) e (13) rappresentano i modelli puramente geometrici delle misure di pseudo-range e di fase. Dalle considerazioni fatte nel presente paragrafo si rende necessario completare tali espressioni, introducendo i termini relativi agli errori sistematici (*biases*).

Le equazioni possono essere così riscritte:

$$p_j^i = d_j^i + c(dt_j - dt^i) + d\rho + d \quad (\text{pseudorange}) \quad (14)$$

$$\Phi_j^i(t_j) = f \frac{\rho_j^i(t_j)}{c} + f(dt_j - dt^i) + \frac{f}{c}(d\rho + d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}} + de) - N(t_0) \quad (\text{fase}) \quad (15)$$

dove:

dt^i = errore di sincronizzazione del satellite i ;
 dt_j = errore di sincronizzazione del ricevitore j ;
 $d\rho$ = errore dovuto all'incertezza dell'orbita dei satelliti;
 d_{ion} = errore dovuto all'attraversamento della ionosfera;
 d_{trop} = errore dovuto all'attraversamento della troposfera;
 de = errore dovuto al rumore del segnale, al multipath ed alla variazione del centro di fase dell'antenna.

Cenno alle tecniche di elaborazione

Gli errori accidentali hanno una entità notevolmente inferiore rispetto a quelli sistematici, e vengono contenuti sia mediante una idonea architettura *hardware* che con un'opportuna scelta dei punti di stazione.

Gli errori sistematici possono essere rimossi adottando particolari procedimenti operativi e combinazioni delle osservazioni, in modo da eliminare alcune delle incognite e giungere alla soluzione del problema, rendendolo comunque sempre iperdeterminato per aumentare la precisione e l'affidabilità delle stime. I metodi operativi impiegati (per scopi geodetici di alta precisione) si riducono in sostanza al calcolo di posizioni relative fra due ricevitori (basi GPS), in cui le osservazioni vengono processate con i cosiddetti *metodi differenziali*: eseguendo opportune differenze tra le osservazioni di fase, si riesce a ridurre o eliminare gli errori sistematici comuni alle osservazioni coinvolte.

In particolare vengono impiegate:

- le differenze singole tra ricevitori,
- le differenze singole tra satelliti,
- le differenze doppie,
- le differenze triple.

La *differenza singola tra ricevitori* (fig. 8) è la differenza delle misure di fase acquisite da ricevitori che osservano lo stesso satellite, nello stesso istante; questa osservabile elimina sostanzialmente i biases dei satelliti (errori degli orologi e di orbita), inoltre per basi corte (inferiori a 10 – 15 Km), si ha in genere una forte riduzione dei ritardi atmosferici, poiché il segnale attraversa praticamente la stessa porzione di atmosfera.

Se in maniera analoga si differenziano le osservazioni di un solo ricevitore su due satelliti si ottiene la *singola differenza* tra satelliti (fig. 9), che elimina gli errori di orologio relativi al ricevitore. La *doppia differenza* (fig. 10) è la differenza tra le misure ottenute da due ricevitori che osservano due differenti satelliti simultaneamente. In questo caso si eliminano gli errori sistematici dovuti ai ricevitori ed ai satelliti e se la base è inferiore ai 10 – 15 Km vengono ridotti notevolmente anche gli errori di propagazione atmosferica. Le differenze doppie, inoltre, consentono la determinazione delle ambiguità iniziali di fase come numeri interi, ma hanno, per la legge di propagazione della covarianza, un rumore 2 volte superiore a quello della misura di fase originaria. Si deve poi sottolineare che, a differenza delle misure originarie e delle singole differenze, le differenze doppie sono general-

mente correlate e ciò complica la loro elaborazione. La *tripla differenza* (fig. 11) è ottenuta dalla differenza tra due doppie differenze calcolate in istanti diversi; oltre ad eliminare gli errori sistematici, come la doppia differenza, essa è indipendente dalle ambiguità iniziali di fase e consente l'identificazione e la prima correzione dei cycle slips. Per contro, nelle differenze triple si ha un peggioramento della qualità delle misure per l'aumento del rumore pari a $2\sqrt{2}$ volte

quello iniziale.

Se la lunghezza delle basi eccede i limiti sopra indicati, è necessario utilizzare ricevitori a doppia frequenza. Attraverso la combinazione lineare delle frequenze portanti L1 e L2 è possibile ottenere delle osservabili con caratteristiche particolarmente utili. Tra tutte le possibili combinazioni lineari ne emergono tre definite convenzionalmente come L3, L4, L5.

La combinazione L3 ha lunghezza d'onda

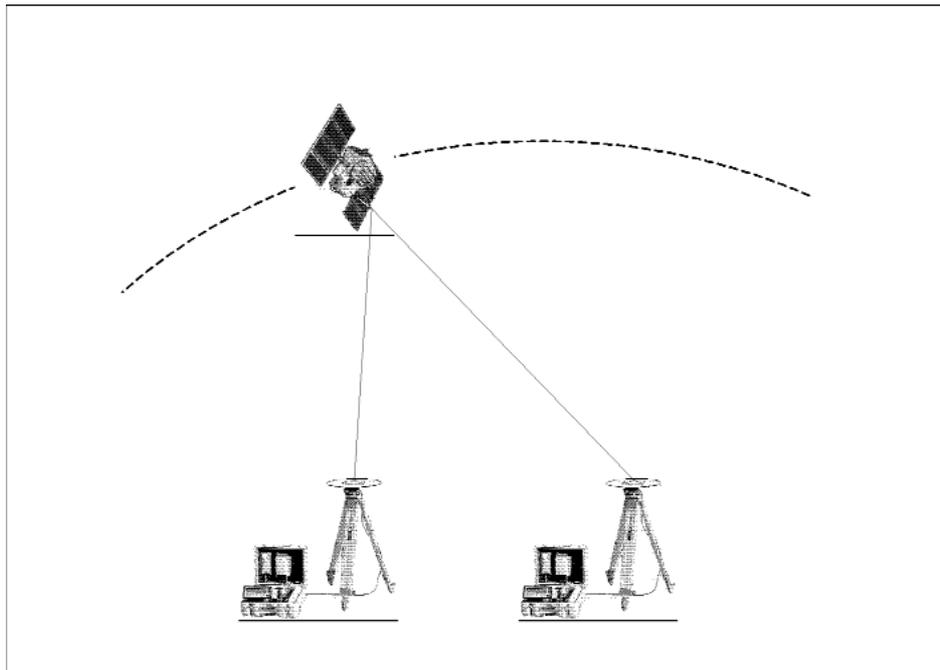


Figura 8. Differenza singola fra ricevitori.

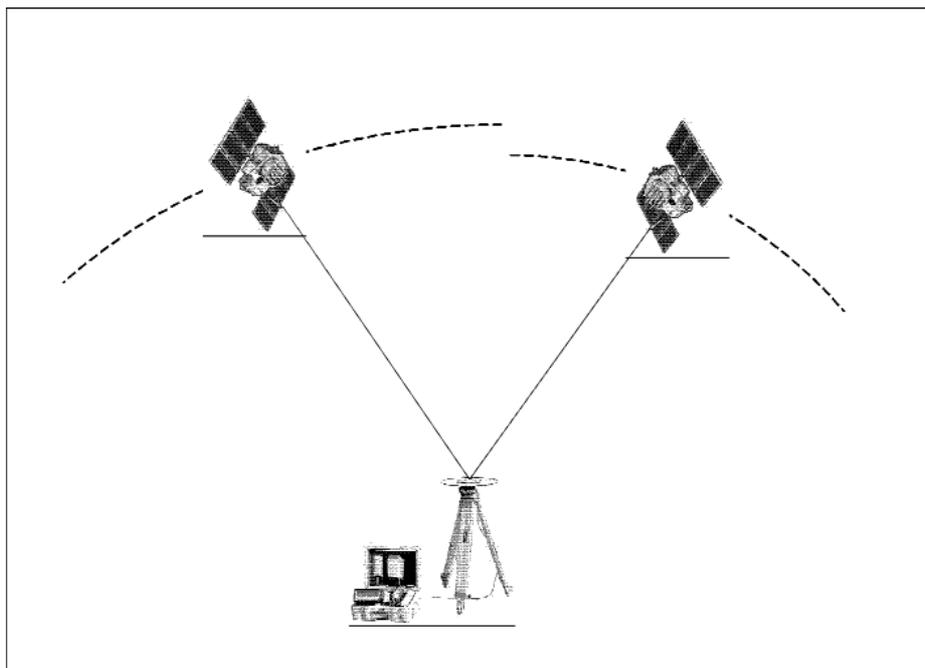


Figura 9. Differenza singola fra satelliti.

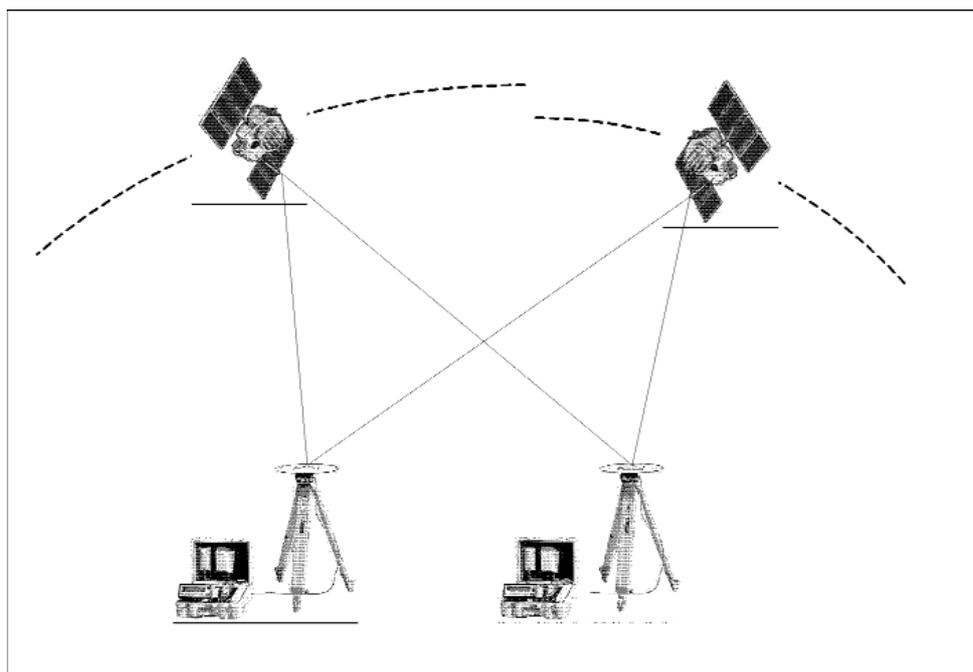


Figura 10. Differenza doppia.

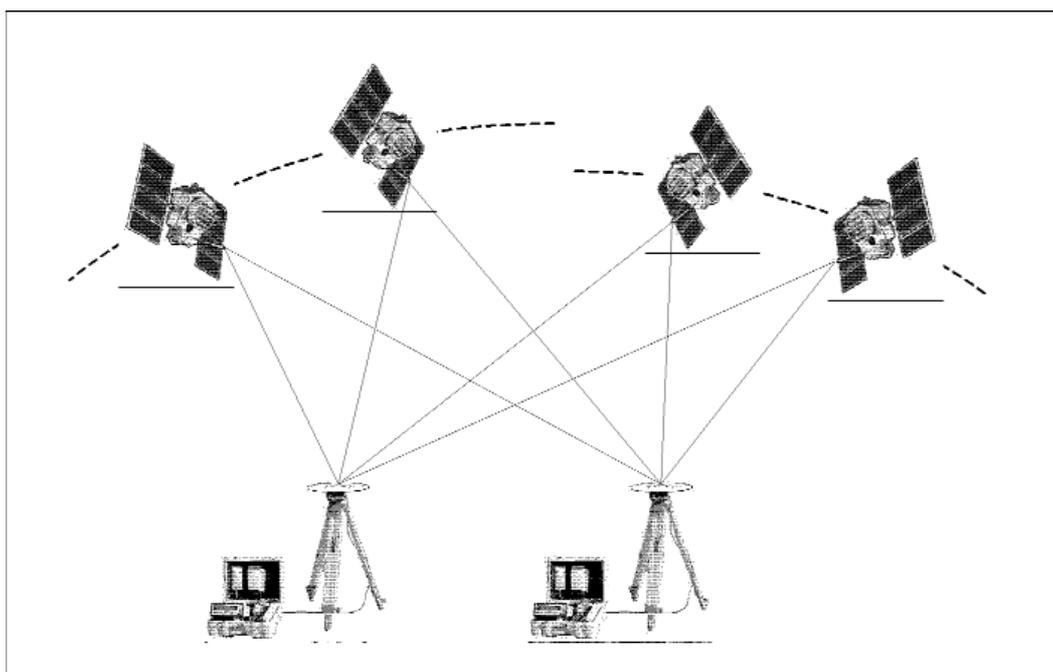


Figura 11. Differenza tripla.

nulla e pertanto non risente dell'errore di ritardo ionosferico, per tale motivo è detta anche *ionosphere-free*. Il suo utilizzo nella stima dei parametri incogniti consente di eliminare l'effetto della ionosfera, ma va anche detto che il rumore associato a questa osservabile è valutabile intorno a 3 volte quello della portante.

La combinazione L4, detta anche *geometry-free*, risulta indipendente dallo sfasamento del tempo del ricevitore e dalla geometria (coordinate e orbite) del sistema. Ha la caratte-

ristica di avere lunghezza d'onda infinita.

La combinazione L5, avendo una lunghezza d'onda pari a 86 cm, è particolarmente adatta alla risoluzione delle ambiguità ed è chiamata anche *wide-line*. Ha lo svantaggio di essere caratterizzata da maggior rumore.

Metodi di misura

Il GPS è un sistema molto flessibile e

consente diversi tipi di rilievo in funzione di esigenze, tempi, costi e precisione. In generale un rilievo GPS è caratterizzato da diversi fattori (tab. 1).

Tipo di osservabile	<i>Pseudorange</i>
	<i>Fase</i>
Tipo di posizionamento	<i>Assoluto</i>
	<i>Relativo</i>
Modalità di processamento dei dati	<i>In tempo reale</i>
	<i>A posteriori</i>
Modalità del posizionamento	<i>Statico</i>
	<i>Cinematico</i>

Tabella 1. Principali caratteristiche di un rilievo GPS.

Le misure di fase sono principalmente utilizzate per il rilievo geodetico. Quelle di pseudorange, avendo una precisione inferiore, sono utilizzate essenzialmente per la navigazione. Altra fondamentale distinzione è quella tra il posizionamento **assoluto e relativo**. Nel primo caso vengono utilizzate le equazioni di osservazione (9) e (10) (essenzialmente solo la (9)) senza procedere ad alcuna differenziazione; non vengono quindi eliminati gli errori sistematici relativi alle effemeridi e per questo il metodo è usato prevalentemente nella navigazione con misure di pseudorange. Al contrario, nel posizionamento relativo, quanto più le basi sono piccole rispetto alla distanza fra il ricevitore e il satellite, tanto più le cause d'errore comuni ad entrambe le osservabili (orbite, sincronia orologi, rifrazione atmosferica) tendono ad annullarsi nella differenza.

Il posizionamento in tempo reale viene utilizzato esclusivamente per la navigazione, è eseguito principalmente con misure di pseudorange in modo assoluto o relativo, con una precisione non molto elevata. Per scopi speciali, quali ad esempio l'atterraggio automatico di velivoli, si preferisce il posizionamento relativo in tempo reale con misure di fase, che richiedono però particolari condizioni al contorno riguardanti la geometria satellitare e le caratteristiche dei ricevitori GPS.

Esistono infine procedure statiche e dinamiche. Il metodo statico prevede che il sistema ricevitore-antenna sia fermo rispetto alla terra durante la ricezione. Il metodo cinematico consiste nello stazionamento di un ricevitore su di un punto noto, mentre un secondo ricevitore, posizionato su di un mezzo mobile, registra in continuo.

Le applicazioni geodetiche di alta preci-

sione finalizzate al controllo delle deformazioni, che in particolare verranno considerate nel seguito, richiedono sempre rilievi in modalità statica con misure di fase e posizionamento relativo. In tal caso, l'elaborazione dei dati acquisiti viene eseguita a posteriori, anche perché spesso sono necessarie informazioni (effemeridi precise, parametri per la correzione degli orologi dei satelliti) non disponibili al momento delle misure.

Il sistema di riferimento GPS

L'output finale di un rilievo effettuato col metodo GPS consiste nelle coordinate tridimensionali di punti sulla superficie terrestre, in un sistema di riferimento cartesiano geocentrico, fisso rispetto alla terra, che viene convenzionalmente indicato con il nome di WGS84 (*World Geodetic System*). Tale sistema è stato definito dal Dipartimento della Difesa degli U.S.A. nel 1984 sulla base di dati geodetici disponibili fino a quel momento.

Le caratteristiche del sistema WGS84 sono (fig. 12):

- origine nel centro di massa della terra;
- asse Z parallelo alla direzione dell'asse di rotazione convenzionale terrestre al 1984;
- asse X generato dall'intersezione del piano equatoriale ortogonale all'asse z, con il piano meridiano di Greenwich;
- asse Y che completa la terna cartesiana destrorsa.

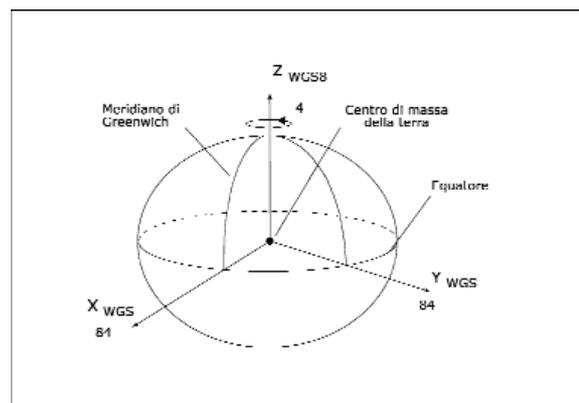


Figura 12. Il sistema di riferimento WGS 84.

Al sistema è associato un ellissoide geocentrico definito dai seguenti parametri:

$$a = 6378137 \text{ m} \quad (\text{semiasse maggiore})$$

$$f = 1/298.257 \quad (\text{schacciamento})$$

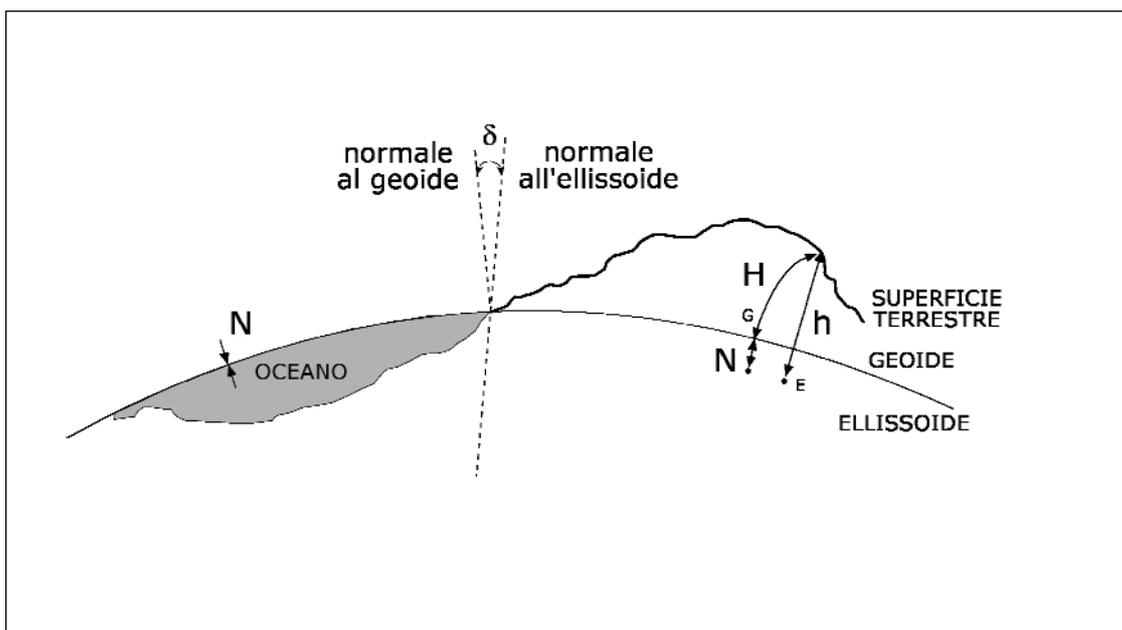


Figura 13. Quota ortometrica e quota ellissoidica.

Il centro e l'asse di rotazione dell'ellissoide coincidono con l'origine e l'asse Z del sistema cartesiano, quindi le coordinate di un punto possono essere espresse sia in coordinate cartesiane (X,Y,Z) che in coordinate ellissoidiche (φ, λ, h). Il vantaggio di operare con tale sistema a livello mondiale è la possibilità di esprimere in un unico riferimento gli elementi geodetici e le coordinate cartografiche in qualunque zona della Terra.

Il GPS pertanto utilizza un unico sistema di riferimento tridimensionale, a differenza di quanto avviene nelle misure con metodi geodetici terrestri. In questo caso, infatti, le coordinate "planimetriche" (φ, λ) sono riferite ad un ellissoide nazionale, mentre la quota è riferita al geoide (quota ortometrica H). Più in dettaglio, il sistema geodetico nazionale ROMA40 (e l'associato sistema cartografico nazionale Gauss-Boaga) utilizza come ellissoide di riferimento quello di Hayford, i cui parametri caratteristici sono:

$$\begin{aligned} a &= 6378388 \text{ m} && \text{(semiasse maggiore)} \\ f &= 1/297 && \text{(schiacciamento)} \end{aligned}$$

Tale ellissoide è orientato nel punto trigonometrico del I° ordine di Roma-Monte Mario con azimut ellissoidico della direzione verso il punto trigonometrico del I° ordine di Monte Soratte pari a $6^\circ 35' 00.88''$.

È quindi evidente che un punto sulla superficie terrestre avrà coordinate ellissoidiche (λ, φ) diverse nei due sistemi di riferimento.

Per quanto concerne l'altimetria si pone un problema analogo: il GPS fornisce le *quote ellissoidiche* rispetto all'ellissoide WGS84, nel sistema nazionale si adottano invece le *quote ortometriche*, riferite al mareografo di Genova.

Per maggior chiarezza è bene ricordare le definizioni di quota ortometrica e ellissoidica (fig. 13).

Da un punto P della superficie terrestre è possibile individuare un solo punto corrispondente G del geoide considerando la linea di forza del campo della gravità passante per P; la lunghezza dell'arco di linea di forza PG è la *quota ortometrica* del punto P, indicata con H (fig. 13).

Se dallo stesso punto P si conduce la perpendicolare alla superficie ellissoidica nel punto E, la lunghezza del segmento PE rappresenta la *quota ellissoidica* del punto P, indicata con h (fig. 13).

Lo scostamento della superficie geoidica rispetto a quella ellissoidica è spesso descritto tramite curve di livello che rappresentano l'*ondulazione del geoide* (N), definita come differenza tra la quota geodetica h e la quota ortometrica H (fig. 13):

$$N = h - H$$

Da ultimo è importante sottolineare che, nel caso di reti GPS finalizzate al controllo delle deformazioni, non vi è evidentemente alcuna necessità di trasformare le coordinate nel sistema nazionale e tutte le analisi possono essere convenientemente svolte in coordinate WGS84.



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma - Italy
www.ingv.it