



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
PARTHENOPE



DOTTORATO DI RICERCA IN  
SCIENZE GEODETICHE E TOPOGRAFICHE

XV Ciclo

TESI DI DOTTORATO

TECNICA GPS MULTI-REFERENCE STATION  
PRINCIPI E APPLICAZIONE DEL SISTEMA MULTIREF™

Supervisor:  
Prof.dr. GERARD LACHAPELLE

Dottorando:  
GIOVANNI PUGLIANO

2002

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia vivamente Dr. Gérard Lachapelle, per il suo prezioso contributo di supervisor, e in particolare per la straordinaria disponibilità con cui ha trasmesso la sua enorme esperienza. L'attiva e amichevole collaborazione nata intorno a questa ricerca resterà motivo di gratificazione per il lavoro svolto.

Un ringraziamento particolare va al Prof. Raffaele Santamaria per il pieno supporto e i consigli ricevuti sin dall'inizio del dottorato.

Si ringrazia, inoltre, il Dr. Ing. Claudio Parente per le proficue discussioni e gli aiuti profusi durante l'intero corso di dottorato.

Si ringraziano Dr. Luiz Fortes e Paul Alves per il dialogo continuo e insostituibile e per la collaborazione durante il periodo all'Università di Calgary, in particolare per aver generosamente messo a disposizione di questa ricerca diversi software.

Un ringraziamento va a tutte le persone e gli enti che hanno favorito la realizzazione della sperimentazione in Italia: il Prof. Folco Pingue e il Dott. Vincenzo Sepe dell'Osservatorio Vesuviano, il Prof. Mauro Caprioli e l'Arch. Alfredo Scognamiglio del Politecnico di Bari, l'Ing. Angelo Morella e l'Amministrazione Comunale di Ariano Irpino, l'Ing. Alvaro Toledo dell'Istituto per Geometri di Battipaglia, l'Ing. Michele Rienzo e l'Arch. Emilio Bosco della Comunità Montana Vallo di Diano, l'Ing. Abele Pigna dell'Istituto per Geometri di Cerreto Sannita, il Geom. Antonio Mezza dell'Istituto per Geometri di Benevento, il tecnico Gennaro Cretella dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte, l'Ing. Mainieri dell'Istituto per Geometri di Sessa Aurunca, l'Ing. Agnello Fedullo dell'Istituto per Geometri di Vallo della Lucania, l'Istituto Salesiano di Caserta, l'Ing. Antonio Coppola, il Dott. Luca Trosa, i tecnici Mariano Rovito e Ferdinando Sposito dell'Istituto di Geodesia, Topografia e Idrografia, il Geom. Massimiliano Crisci, il tecnico Alberto Greco dell'Istituto di Navigazione.

Si desidera infine ringraziare tutte le persone che durante lo svolgimento del dottorato hanno manifestato la loro disponibilità e gentilezza; e in particolare la Dott.ssa Sara Vitolo - Responsabile dell'Ufficio Affari Generali dell'Università Parthenope.

## INDICE

INTRODUZIONE.....	1
Capitolo 1	
L'APPROCCIO MULTI-REFERENCE STATION.....	5
1.1 Posizionamento GPS RTK.....	5
1.2 Stazioni permanenti GPS.....	8
1.3 L'approccio multi-reference station.....	10
Capitolo 2	
ERRORI DIFFERENZIALI GPS.....	17
2.1 Equazioni degli errori differenziali GPS.....	18
2.2 Combinazioni delle misure di fase.....	22
2.3 Errore d'orbita.....	25
2.4 Errore ionosferico.....	29
2.5 Combinazione lineare Geometric-Free per l'analisi dell'errore ionosferico.	37
2.6 Errore troposferico.....	40
Capitolo 3	
IL SISTEMA MULTIREF™.....	44
3.1 Fondamenti matematici.....	44
3.2 Calcolo delle correzioni MultiRef™ con la collocazione.....	52
3.3 Funzione di covarianza del metodo MultiRef™.....	58
3.4 Risoluzione delle ambiguità di fase fra le stazioni della rete.....	64
3.5 Processo di trasmissione delle correzioni MultiRef™.....	71
Capitolo 4	
RETE TEST CAMPANIA GPS NETWORK.....	74
4.1 Progettazione delle reti GPS RTK.....	74
4.2 Progettazione della rete Campania GPS Network.....	75
4.3 Controllo di qualità dei dati GPS della rete Campania Network.....	79

## Capitolo 5

SPERIMENTAZIONE MULTIREF™ SULLA RETE CAMPANIA GPS NETWORK.....	84
5.1 Metodologia di analisi.....	84
5.2 Risultati nel dominio delle osservazioni.....	89
5.3 Risultati nel dominio delle posizioni.....	95
5.4 Risultati nel dominio delle ambiguità.....	102
5.5 Analisi su base temporale.....	106
5.6 Rapporto complessivo dei risultati per le sei configurazioni di rete.....	108
CONCLUSIONI .....	117
BIBLIOGRAFIA.....	119

## Appendice A

PROCEDURE OPERATIVE PER LA REALIZZAZIONE DELLA RETE CAMPANIA GPS NETWORK.....	131
A.1 Caratteristiche generali della rete.....	132
A.2 Materializzazione della rete.....	133
A.3 Esecuzione delle misure.....	135

## Appendice B

CALCOLO DELLE COORDINATE PRECISE DELLE STAZIONI DI RIFERIMENTO DELLA RETE CAMPANIA NETWORK CON IL SOFTWARE BERNESE.....	151
B.1 Elaborazione con software Bernese.....	151
B.2 Calcolo della rete Campania Network.....	153

## LIST OF TABLES

1.1	Comparison among three commonly known multi-reference station systems.....	15
2.1	Carrier-Phase measurement combinations.....	24
2.2	Comparison between L1 phase error and WL phase error, in metres.....	24
2.3	Information on the IGS orbit products.....	26
2.4	Satellite orbit errors in term out-of-plane, along-track and radial components.....	28
2.5	Variation of electron density and TEC.....	35
2.6	Zenith tropospheric delay.....	41
3.1	Covariance function parameters for Campania Network .....	64
4.1	Network baselines used to perform various tests using the MutliRef™ system.....	79
5.1	Characteristics of six test network scenarios.....	85
5.2	Raw and MultiRef double difference errors RMS and respective improvement for six scenarios for February 7, 2002.....	93
5.3	Raw and MultiRef position difference RMS values and respective improvement for six scenarios for February 7, 2002.....	101
5.4	Ambiguity domain improvement for thre scenarios BENE-21.5, AVEL-33, BATT-39 for February 7, 2002.....	103
A.1	Observation file characteristics.....	137
A.2	Summary of Campania Network reference stations.....	139
B.1	Percentage of L1 and L2 ambiguities fixed by Bernese to integer values in the Campania Network for February 7-12, 2002, using the QIF strategy.....	155
B.2	Comparison of station coordinates of 6-daily solutions for February 7-12, 2002, with respect to the combined solution in the Campania Network.....	156
B.3	Final adjusted coordinates of the Campania Network stations, referred to L1 phase centres.....	157

## LIST OF FIGURES

1.1	Coverage map using single reference station.....	7
1.2	Coverage map using independent reference stations.....	9
1.3	Coverage map using the multi-reference station approach.....	10
1.4	Three-step procedure for multi-reference station approach.....	12
1.5	Scheme of the network processing.....	14
2.1	Double difference measurements between the network stations.....	20
2.2	Earth-Centered-Earth-Fixed (ECEF) system.....	27
2.3	Satellite-Centered-Satellite-Fixed (SCSF) reference frame.....	27
2.4	Satellite position error.....	28
2.5	Vertical electron density profile.....	31
2.6	Seasonal variation of TEC from September 1999 to August 2000.....	32
2.7	Yearly sunspot numbers for the latest four cycles.....	32
2.8	Progression of solar cycle 23.....	33
2.9	Mean VTEC values from January 1995 to October 2002.....	34
2.10	Global Ionosphere Maps (GIM) for February 7, 2002, showing VTEC values in 4-hours intervals, starting at 9:00 a.m. ....	35
2.11	Double difference ionospheric delay calculated over 6 day period for PORT to CASE baseline (28 km), from February 7 to 12, 2002.....	39
2.12	Atmospheric layers.....	40
3.1	Scenario used to evaluate the resolution of the carrier-phase ambiguities between the network reference stations .....	65
3.2	Ambiguity resolution for network baselines ARIA-AVEL and ISCH-PORT	66
3.3	Ambiguity resolution for network baselines AVEL-BATT and BATT- CAST.....	67
3.4	Ambiguity resolution for network baselines AVEL-PORT and ARIA- CERR.....	68
3.5	Ambiguity resolution for network baselines CAST-PADU and PORT- SESS.....	69
3.6	Time to fix ambiguities vs. elevation of satellites and L1 double difference misclosures for AVEL to PORT baseline (43 km), over 5 hour period, from 11:00 to 16:00, for February 7, 2002.....	70
3.7	MultiRef™ data generation scheme.....	72

4.1	Region of the Campania GPS Network, in Italy.....	76
4.2	Relative locations of Campania permanent receiver sites.....	76
4.3	Campania GPS Network.....	78
4.4	Network baselines used to perform various tests using the MutliRef™ system.....	80
4.5	Number of visible satellites for February 7, 2002.....	80
5.1	Network maps for scenarios BENE-21.5 and CASE-28.....	86
5.2	Network maps for scenarios AVEL-33 and PADU-35.....	87
5.3	Network maps for scenarios ISCH-38.5 and BATT-39.....	88
5.4	Raw and MultiRef corrected L1 double difference misclosures for ARIA to AVEL baseline (33 km) for February 7, 2002.....	91
5.5	Raw and MultiRef corrected WL double difference misclosures for ARIA to AVEL baseline (33 km) for February 7, 2002.....	92
5.6	L1 double difference error RMS values for raw and MultiRef corrected measurements over six different scenarios for February 7, 2002.....	94
5.7	WL double difference error RMS values for raw and MultiRef corrected measurements over six different scenarios for February 7, 2002.....	94
5.8	L1 latitude errors using raw and MultiRef corrected measurements for the AVEL-33 scenario for February 7, 2002.....	96
5.9	L1 longitude errors using raw and MultiRef corrected measurements for the AVEL-33 scenario for February 7, 2002.....	97
5.10	L1 ellipsoidal height errors using raw and MultiRef corrected measurements for the AVEL-33 scenario for February 7, 2002.....	98
5.11	Raw and MultiRef corrected L1 position difference RMS values over six different scenarios for February 7, 2002.....	99
5.12	Raw and MultiRef corrected WL position difference RMS values for six different scenarios for February 7, 2002.....	100
5.13	Raw and MultiRef corrected IF position difference RMS values for six different scenarios for February 7, 2002.....	100
5.14	Map for raw and MultiRef corrected L1 position difference RMS values for six scenarios for February 7, 2002.....	102
5.15	Time to fix ambiguities and percentage of correctly fixed ambiguities for the BENE-21.5 scenario for February 7, 2002.....	104
5.16	Time to fix ambiguities and percentage of correctly fixed ambiguities for the AVEL-33 scenario for February 7, 2002.....	105
5.17	Time to fix ambiguities and percentage of correctly fixed ambiguities for the BATT-39 scenario for February 7, 2002.....	105
5.18	Network map for the scenario used in the test over 6-day observations.....	106

5.19	Diurnal variation of double difference error RMS values for raw and MultiRef corrected measurements for PORT to CASE baseline (28 km) from February 7 to February 12, 2002.....	107
Cl.1	Raw and MultiRef position accuracy vs. time to fix ambiguities.....	118
A.1	Campania GPS Network.....	132
A.2	Equipment used in the temporary stations.....	134
A.3	Time schedule of the MultiRef™ campaign over the Campania Network	135
A.4	Ariano Irpino GPS temporary station.....	140
A.5	Avellino GPS temporary station .....	141
A.6	Battipaglia GPS permanent station - Istituto Tecnico per Geometri “G. C. Gloriosi”.....	142
A.7	Caserta GPS temporary station .....	143
A.8	Castelgrande GPS temporary station .....	144
A.9	Cerreto Sannita GPS permanent station - Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri.....	145
A.10	Padula GPS permanent station - Comunità Montana Vallo di Diano.....	146
A.11	Portici GPS temporary station .....	147
A.12	Serrara Fontana, Isola di Ischia GPS permanent station - INGV Osservatorio Vesuviano.....	148
A.13	Sessa Aurunca GPS temporary station .....	149
A.14	Vallo della Lucania GPS permanent station - Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri “E. Cenni”.....	150
B.1	Costrained coordinates to IGS values.....	153
B.2	Independent baselines of the Campania Network processed by Bernese...	154



## INTRODUZIONE

Questa tesi presenta l'implementazione concreta del sistema MultiRef™ per il posizionamento GPS Network RTK.

Il MultiRef™ RTK è un sofisticato pacchetto di software che costituisce nel suo complesso il risultato di un programma di ricerca avviato, a partire dal 1996, presso il Dipartimento di Ingegneria Geomatica dell'Università di Calgary, in Canada.

Basato sull'approccio multi-reference station, il sistema MultiRef™ è un potente strumento di posizionamento in tempo reale RTK (real-time kinematic), destinato ad assumere un ruolo strategico nello sviluppo del settore delle stazioni permanenti GPS. Ai fini di un servizio di distribuzione delle correzioni differenziali, invece di una singola stazione di riferimento, il MultiRef™ offre infatti la possibilità di sfruttare più stazioni, mettendole in rete tra di loro in tempo reale. Ne consegue un significativo miglioramento delle precisioni, e allo stesso tempo una riduzione del numero di stazioni necessarie alla copertura del servizio.

Per quanto riguarda gli utenti finali i benefici sono legati all'incremento della distanza fra il ricevitore utente e le stazioni di riferimento. Proprio quest'ultimo aspetto rende l'approccio in esame molto interessante: l'incremento dell'interdistanza, infatti, rappresenta il requisito fondamentale per poter finalmente riuscire a realizzare il posizionamento cinematico di precisione con un solo ricevitore, e non più con una coppia.

Il metodo MultiRef™, attraverso l'utilizzo contemporaneo di più stazioni di riferimento, consente di stimare gli errori differenziali, che non vengono ridotti adeguatamente attraverso un processo differenziale tradizionale con singola stazione di riferimento. Ciò comporta un miglioramento nelle prestazioni degli algoritmi OTF (on-the-fly) di risoluzione dell'ambiguità di fase, che si riflette quindi sulle precisioni raggiungibili.

Alla base di questa ricerca innanzitutto sta la convinzione che la nuova tecnica, oltre all'elevato valore teorico, mostra un carattere pratico fortemente innovativo, ed è dunque di grande interesse procedere alla sua applicazione nel mondo reale delle

reti di stazioni permanenti GPS. Di qui la scelta di lavorare allo sviluppo di una specifica applicazione multi-reference station e realizzarne, tramite l'istituzione ad hoc di una rete regionale, un prototipo dimostrativo.

A tal proposito è stata dunque progettata e sviluppata in Italia la rete test Campania GPS Network, composta da dodici stazioni di riferimento GPS, distribuite uniformemente su tutto il territorio della Campania. Il progetto è stato concepito con un duplice obiettivo: da un lato condurre una sperimentazione del MultiRef™ a livello internazionale, finalizzata ad indagare le potenzialità del sistema in funzione della sua applicazione pratica; dall'altro avviarne lo studio anche in Italia.

Le ricerche fino ad oggi effettuate sull'argomento hanno mostrato sostanziali miglioramenti, rispetto alla tecnica RTK tradizionale, per baseline di differenti lunghezze, che vanno da circa 30 km fino ad estendersi anche oltre i 200 km. Tuttavia è evidente che al crescere delle distanze, pur evidenziandosi i miglioramenti rispetto alle misure classiche, possono rilevarsi livelli di precisioni e tempi di calcolo superiori ai valori ammissibili per il posizionamento RTK. Pertanto, l'utilizzazione del sistema MultiRef™, in contesti futuri, presuppone una conoscenza approfondita delle implicazioni che una completa funzionalità rispetto al posizionamento in tempo reale richiede.

L'obiettivo principale della tesi è dunque quello di analizzare gli aspetti fondamentali inerenti l'implementazione del sistema MultiRef™, con particolare attenzione dedicata alle precisioni e ai tempi di calcolo ottenibili in funzione dello schema di rete.

A tal fine un peso essenziale ha avuto dunque lo sviluppo ad hoc della rete Campania Network, sulla quale nel febbraio 2002 è stata effettuata una grossa campagna di misure con le dodici stazioni della rete operanti contemporaneamente in continuo per un periodo di sei giorni. In particolare queste prove sono state condotte in concomitanza col verificarsi del secondo picco dell'attuale ciclo dell'attività solare, prefigurandosi tale circostanza come un significativo fattore di condizionamento per quel che riguarda i criteri da seguire nella realizzazione delle reti RTK. Tutto il lavoro di progettazione, realizzazione e materializzazione della

rete e di raccolta dei dati è stato ideato e condotto integralmente in prima persona dall'autore.

Attesa la novità dell'argomento, questa tesi è stata realizzata grazie alla stretta collaborazione che l'autore ha stabilito con il Dipartimento di Ingegneria Geomatica dell'Università di Calgary, dove ha svolto parte dell'attività di ricerca in qualità di Ph.D. visiting student.

Per quel che riguarda l'iter di lavoro seguito, dopo un primo periodo dedicato allo studio in generale dell'approccio multi-reference station, la ricerca ha subito un'evoluzione, che l'ha portata sia ad approfondire i fondamenti teorici del metodo canadese, sia ad espandersi verso la fase di sperimentazione incentrata sullo sviluppo della rete Campania Network. Momento tipico dell'intero lavoro è stato il periodo trascorso presso l'Università di Calgary dove, in particolare, è stato effettuato il trattamento e l'analisi dei dati raccolti in Italia.

Riflettendo l'iter che ha caratterizzato lo svolgimento dell'attività di ricerca, la tesi si compone di sei capitoli, con l'aggiunta di due appendici.

Il primo capitolo è dedicato allo studio dello stato dell'arte dell'approccio multi-reference station: dopo una introduzione di alcuni argomenti correlati all'approccio, quali il posizionamento RTK e l'utilizzazione delle reti di stazioni permanenti GPS, vengono affrontati in particolare gli aspetti concettuali che sono alla base dei diversi metodi multi-reference station.

Il secondo capitolo è dedicato all'analisi degli errori differenziali, con particolare riferimento agli errori caratterizzati da correlazione spaziale. La loro analisi costituisce infatti una fase preliminare fondamentale ai fini dello studio del MultiRef™.

Nel terzo capitolo viene presentato il sistema MultiRef™, affrontandone i fondamenti teorici. In particolare si procede ad illustrare il sistema da un punto di vista matematico, introducendo la teoria della collocazione per quel che riguarda il calcolo delle correzioni con l'approccio in rete. Si passa poi all'esame degli aspetti inerenti sia il calcolo delle ambiguità in tempo reale tra le stazioni della rete che la trasmissione delle correzioni.

Il quarto e il quinto capitolo sono dedicati invece alla fase della sperimentazione: in particolare nel quarto capitolo si introduce la rete Campania Network, affrontandone gli aspetti progettuali e l'analisi preliminare dei dati grezzi; nel quinto capitolo il metodo MultiRef™ è applicato ai dati provenienti dalla rete. Viene quindi impostata e svolta l'analisi epoca per epoca dei risultati nel dominio delle misure, delle posizioni e dell'ambiguità, basandosi sul confronto con le misure classiche con singola stazione di riferimento.

La tesi contiene infine due appendici: la prima presenta una descrizione degli aspetti più strettamente operativi della realizzazione della rete Campania Network; la seconda invece illustra il calcolo delle coordinate precise delle stazioni di riferimento della rete, con il software Bernese: la loro conoscenza a priori è infatti ipotesi fondamentale per l'applicazione del sistema MultiRef™.

## **CAPITOLO 1**

### **L'APPROCCIO MULTI-REFERENCE STATION**

Nell'ambito delle misure GPS di fase, si definisce multi-reference station un nuovo approccio per il posizionamento differenziale cinematico in tempo reale, caratterizzato dall'utilizzazione delle reti di stazioni di riferimento.

Le correzioni per le misure di fase vengono calcolate non più sulla base dello schema classico di un singolo ricevitore di riferimento, ma si ottengono invece attraverso la compartecipazione di più stazioni fisse in rete, superando così le limitazioni delle tecniche differenziali impiegate fino ad oggi.

L'utilizzo contemporaneo di più stazioni di riferimento consente di stimare gli errori di misura GPS, che non vengono ridotti adeguatamente attraverso un processo differenziale tradizionale con singola stazione di riferimento. Ne consegue un significativo miglioramento della risoluzione delle ambiguità intere di fase, nonché la possibilità di incrementare la distanza fra il ricevitore utente e le stazioni di riferimento. Proprio quest'ultimo aspetto rende l'approccio in esame molto interessante: l'incremento dell'interdistanza, infatti, rappresenta un requisito fondamentale per l'utilizzazione delle stazioni permanenti GPS per applicazioni cinematiche in tempo reale.

#### **1.1 Posizionamento GPS RTK**

L'approccio multi-reference station può essere visto come una classe nuova di tecniche GPS RTK, a cui si dà il nome di Network RTK.

Atteso dunque il riferimento al concetto di RTK, occorre preliminarmente richiamare alcuni aspetti caratteristici della tecnica GPS RTK tradizionale. In particolare, vanno considerate le problematiche legate alla distanza fra stazione di riferimento e ricevitore utente, oltre alla necessità di impiegare una coppia di ricevitori.

Come è noto la tecnica differenziale GPS RTK normalmente ricorre all'impiego di una singola stazione di riferimento fissa su un vertice di coordinate note, localizzata in prossimità del ricevitore utente. Utilizzando misure GPS di fase, la posizione dell'utente viene calcolata con precisione centimetrica in tempo reale non appena si arriva alle soluzioni intere delle ambiguità di fase attraverso la modalità OTF (on-the-fly).

Tuttavia, nel caso delle tecniche differenziali in tempo reale con singola stazione di riferimento la risoluzione dell'ambiguità di fase è fortemente influenzata dalla distanza del ricevitore utente: si evidenzia infatti una sostanziale variazione delle prestazioni quando si supera una determinata soglia della distanza fra i ricevitori, individuata dalla perdita di validità dell'ipotesi di correlazione spaziale.

In particolare per distanze inferiori a tale soglia il raggiungimento dei valori interi dell'ambiguità di fase corrisponde ad un trascurabile effetto dell'errore differenziale d'orbita, e di quelli ionosferico e troposferico presenti nell'equazione fondamentale delle differenze doppie di fase [Lachapelle, 1997]:

$$\Delta\nabla\Phi = \Delta\nabla\rho + \Delta\nabla d\rho - \Delta\nabla d_{\text{ion}} + \Delta\nabla d_{\text{trop}} + \lambda\Delta\nabla N + \Delta\nabla\varepsilon(\Phi) \quad (1.1)$$

dove:

$\Delta\nabla\Phi$  è la differenza doppia delle misure di fase, in metri;

$\Delta\nabla\rho$  è la differenza doppia della distanza geometrica tra satellite e ricevitore;

$\Delta\nabla d\rho$  è l'errore differenziale d'orbita;

$\Delta\nabla d_{\text{ion}}$  è l'errore differenziale ionosferico;

$\Delta\nabla d_{\text{trop}}$  è l'errore differenziale troposferico;

$\lambda$  è la lunghezza d'onda della portante;

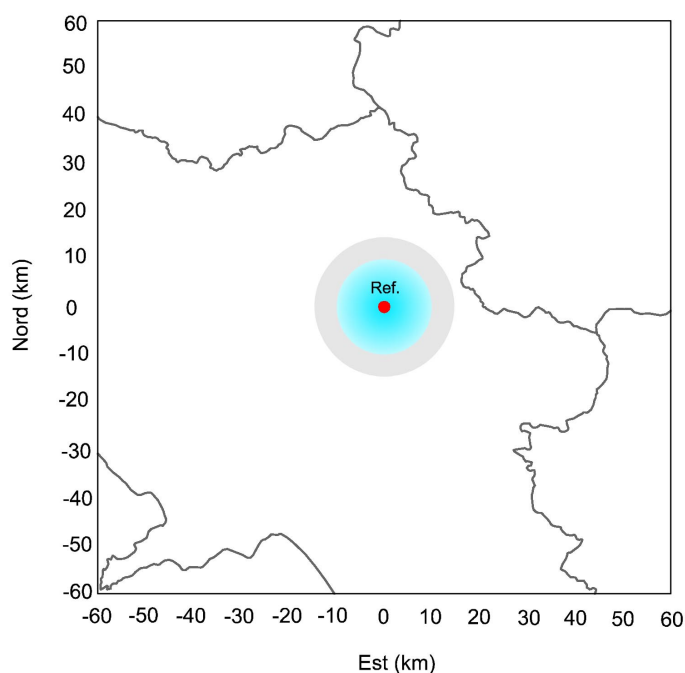
$\Delta\nabla N$  è la differenza seconda delle ambiguità di fase, in cicli;

$\Delta\nabla\varepsilon(\Phi)$  è la differenza seconda del rumore (multipath e rumore strumentale).

Nel caso di distanze più elevate, invece, l'entità degli errori differenziali cresce e il procedimento di risoluzione OTF delle ambiguità intere di fase si complica, dal

punto di vista sia dei tempi sia dell'affidabilità, con ripercussioni sull'accuratezza della posizione.

Inoltre, le differenti prestazioni non solo sono legate alle variazioni della distanza, ma mostrano anche sensibili variazioni dovute principalmente alle modificazioni temporali dello stato della ionosfera. Tale comportamento provoca difficoltà nell'individuare indicazioni affidabili sui tempi di calcolo e sulle precisioni ottenibili in funzione della distanza, rappresentando in particolare un ostacolo per la definizione della massima distanza raggiungibile. Come valori esemplificativi si riportano lunghezze comprese tra i 20 e i 30 km [Lachapelle et al., 1999], che tendono tuttavia a scendere fino a 10-15 km (figura 1.1) se si considerano periodi di massima attività solare.



**Figura 1.1: Esempio di copertura con singola stazione di riferimento**

Nel caso dell'approccio RTK tradizionale la distanza fra il ricevitore di riferimento e l'utente rappresenta quindi un forte limite di carattere operativo, peraltro ricollegabile a problemi di affidabilità delle misure legati all'impiego di una sola stazione di riferimento.

Strettamente connesso col problema della distanza, ne va individuato un secondo, non meno significativo, dovuto alla necessità di operare con una coppia di ricevitori e con altrettanti strumenti di comunicazione dati, aggravando di fatto l'operatività del metodo.

È per questo motivo che si guarda con interesse all'ipotesi di sfruttare come ricevitori di riferimento le stazioni permanenti GPS, con l'obiettivo di arrivare all'impiego di un solo ricevitore per il posizionamento locale, prospettandosi la possibilità di un'estesa diffusione dei servizi di correzioni differenziali in tempo reale.

## **1.2 Stazioni permanenti GPS**

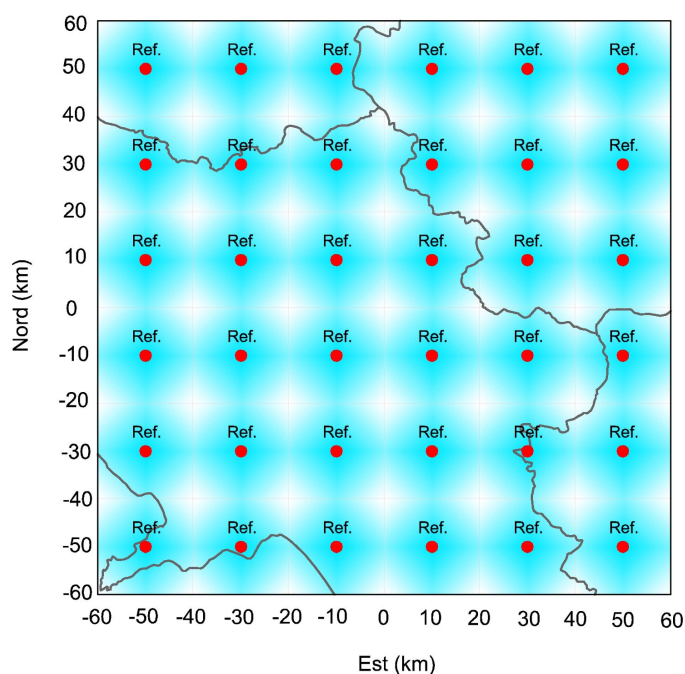
Le stazioni permanenti GPS vengono ampiamente adoperate per applicazioni GPS statiche in post-elaborazione, soprattutto in campo geodetico e geofisico. A tal proposito si distingue tra infrastrutture su scala globale e quelle su scala nazionale e regionale [de Jong, 1997]. Tra le prime è ben nota la rete mondiale dell'IGS (International GPS Service) [2001a], che ha il compito di generare le effemeridi precise dei satelliti GPS, i parametri dell'orientamento terrestre, le coordinate e la velocità delle stazioni, le correzioni degli orologi dei satelliti.

Per quanto riguarda invece le applicazioni su scala nazionale, l'interesse è rivolto verso l'utilizzo delle stazioni permanenti per diversi scopi sia scientifici che tecnologici [Duquenne et al., 2002; Manzano, 2002]. In particolare, in campo geodetico, si guarda con attenzione all'uso delle reti di stazioni permanenti come realizzazioni del sistema di riferimento nazionale. Tra i diversi paesi in cui sono stati condotti lavori in tal senso si indicano i seguenti: Brasile [Fortes et al., 1998]; Canada [McArthur & Steeves, 1988; GSD, 2002]; Finlandia [Koivula et al., 1999]; Germania [SAPOS, 2002]; Giappone [GSI, 2002]; Gran Bretagna [Dodson et al., 1999]; Israele [Wdowinski et al., 1999]; Italia [Vespe et al., 1998; Sansò & de Lacy, 2001]; Norvegia [SATREF, 2002]; Nuova Zelanda [Falvey & Beavan, 1999]; Olanda [van der Marel, 1998]; Spagna [Talaya & Bosch, 1999]; Svezia [Hedling et al., 2001]; Svizzera [Wild et al., 1999]; USA [NGS, 2002].



Se è ormai diffuso l'uso delle stazioni permanenti GPS per applicazioni statiche in post-elaborazione, d'altra parte queste infrastrutture stentano a ritagliarsi uno spazio adeguato nell'ambito delle applicazioni in tempo reale, soprattutto per quel che riguarda il posizionamento di precisione RTK. In questo caso diventa effettivamente più difficoltoso utilizzare le stazioni permanenti come ricevitori di riferimento in tempo reale, a causa sia dell'esistenza del limite della distanza e sia per la suscettibilità di questo limite a variare nel tempo. Finora è infatti prevalso l'uso della coppia di ricevitori in modo da evitare questi inconvenienti localizzando, volta per volta, il ricevitore di riferimento in posizione utile per l'utente.

Qualora si scegliesse di utilizzare comunque le stazioni permanenti GPS sulla base della tecnica RTK tradizionale, per sopperire ai problemi legati alla distanza, occorrerebbe incrementare notevolmente il numero dei ricevitori fissi: in tal caso, infatti, considerato che ad ogni stazione compete una propria area di influenza, autonoma da tutte le altre, la copertura di un'ampia zona si può ottenere materialmente soltanto se si sommano in modo elementare le diverse aree dei singoli ricevitori (figura 1.2).



**Figura 1.2: Esempio di copertura con stazioni di riferimento indipendenti**

Si osserva che questo approccio, già per estensioni di scala regionale, e ancor di più per interi territori nazionali, potrebbe risultare non conveniente, da un punto di vista sia economico che operativo. In effetti, benché si impieghino più stazioni di riferimento, soltanto quella più vicina all'utente verrebbe utilizzata per il posizionamento differenziale: i ricevitori non interagiscono tra loro, risultando ai fini del calcolo delle correzioni slegati gli uni dagli altri.

### **1.3 L'approccio multi-reference station**

L'approccio multi-reference station è nato proprio dall'esigenza di superare i limiti legati all'impiego dello schema classico di singola stazione di riferimento, fondandosi dunque sull'utilizzo in rete delle stazioni di riferimento GPS.

Si osserva che fino ad oggi la nozione di reti di stazioni GPS è stata tradizionalmente associata alle applicazioni statiche: in questo caso, infatti, i dati provenienti dalle diverse stazioni di riferimento vengono normalmente compensati in rete. Il calcolo viene effettuato utilizzando misure che tipicamente si estendono per diverse ore, operando quindi in post-elaborazione.

Per quanto riguarda invece le applicazioni cinematiche, alcune tecniche basate sull'approccio a rete sono state sviluppate nell'ambito del posizionamento differenziale con misure di codice: si tratta delle cosiddette tecniche WADGPS (Wide Area Differential GPS) [Kee, 1996].

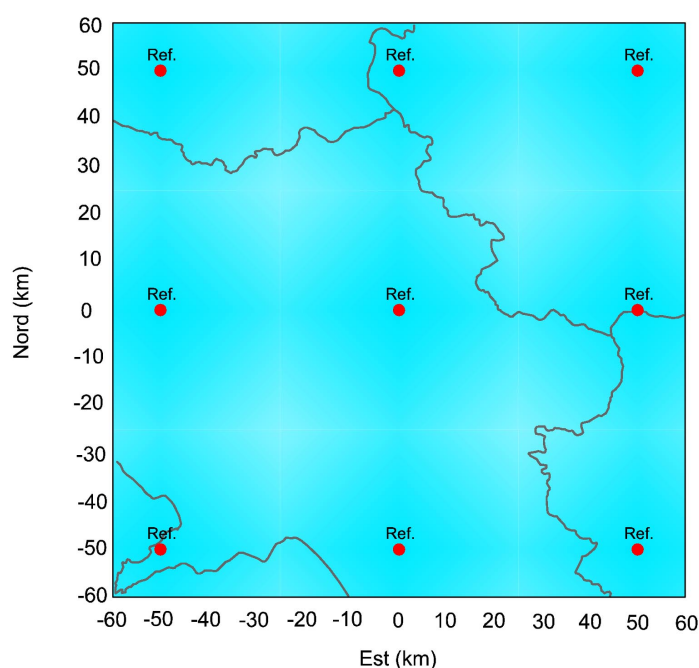
In particolare l'approccio multi-reference station può essere considerato connesso col precedente. Tuttavia il passaggio dagli schemi basati sulle misure di codice a quelli con le misure di fase non è immediato: nel secondo caso, infatti, si introducono problemi nuovi, primo fra tutti quello dell'accurata e affidabile risoluzione dell'ambiguità di fase. Inoltre, è da considerare che le applicazioni più precise possono mettere in luce problemi mascherati dall'errore stesso delle misure di codice e quindi non indagati.

L'approccio multi-reference station si basa sulla possibilità di sfruttare tutte le stazioni di riferimento contemporaneamente, consentendo di generare un unico set di correzioni. Combinando le osservazioni provenienti da diverse stazioni, di coordinate

note, è possibile modellare gli errori che variano con la distanza, quali l'errore d'orbita e l'errore ionosferico e troposferico.

Un risultato diretto della stima di questi errori è dato dalle migliori prestazioni degli algoritmi OTF di risoluzione dell'ambiguità di fase, rispetto al caso di singola stazione di riferimento. I benefici vengono valutati in termini di durata dei tempi d'inizializzazione e di corretto calcolo dell'ambiguità intera, riflettendosi poi sulle precisioni raggiungibili.

In particolare, in virtù di questi risultati, per un prefissato livello di precisione, rispetto al caso della tecnica RTK tradizionale, è possibile estendere l'uso degli algoritmi OTF dalle baseline "corte" ( $\leq 10$  km) alle baseline "medie" (10 – 50 km), incrementando la distanza massima ammissibile fra stazione di riferimento e utente. Ne consegue la possibilità di porre le stazioni di riferimento ad una maggiore distanza tra loro, comportando una riduzione del numero dei ricevitori fissi che arriva fino al 75% (figura 1.3).

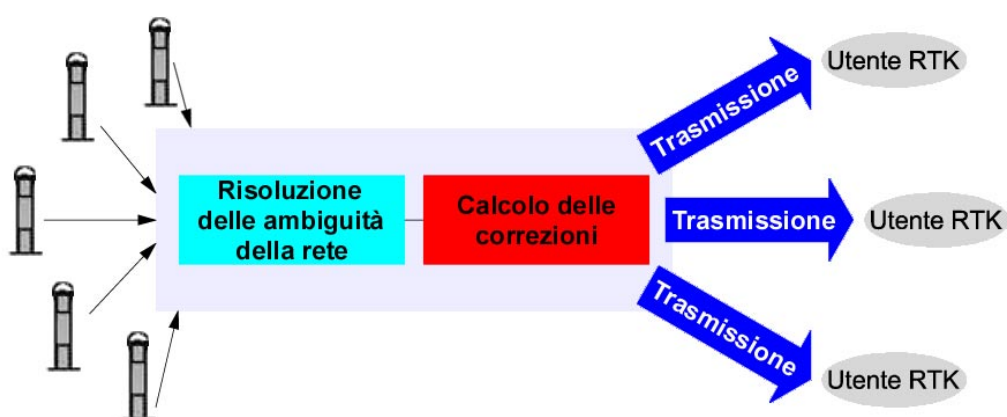


**Figura 1.3: Esempio di copertura con l'approccio multi-reference station**

Per l'approccio multi-reference station svolge un ruolo fondamentale la presenza di un centro di controllo in cui vengono raccolte ed elaborate in blocco e in tempo reale le misure GPS provenienti da tutte le stazioni di riferimento.

Si osserva che l'approccio in rete unitamente ad una gestione centralizzata costituiscono uno strumento fondamentale per un'adeguata gestione e manutenzione delle stazioni permanenti GPS. Allo stesso tempo, un importante vantaggio consiste nel garantire l'integrità e incrementare l'affidabilità del servizio di correzioni differenziali. Difatti, operando con l'approccio multi-reference station, se in uno stesso momento si interrompe il funzionamento di uno o più ricevitori, il contributo di questi ricevitori può essere eliminato dalla soluzione e le stazioni di riferimento rimanenti possono continuare a fornire all'utente le correzioni della fase, così da mantenere la disponibilità del servizio. Sebbene, in tali casi, la precisione della posizione risulti leggermente sacrificata, non sarà però così degradata come per le tecniche differenziali classiche in cui, se la singola stazione di riferimento dovesse venir meno, si otterrebbero soltanto risultati di posizionamento in single-point.

La completa definizione della metodologia multi-reference station prevede che si realizzino tre fasi fondamentali (figura 1.4): occorre innanzitutto risolvere in tempo reale le ambiguità di fase per tutti i ricevitori di riferimento; la parte principale riguarda quindi il calcolo delle correzioni differenziali GPS sulla base delle osservazioni provenienti dalla rete; in un terzo aspetto infine va considerato il processo di trasmissione, al ricevitore utente, delle correzioni stimate in tempo reale.



**Figura 1.4: Moduli fondamentali dell'approccio multi-reference station**

In particolare per il calcolo delle correzioni, l'utilizzo in blocco e in tempo reale dei dati raccolti da più stazioni di riferimento presuppone un'impostazione concettuale nuova rispetto ai metodi RTK tradizionali in cui, come è noto, l'utente combina semplicemente le sue misure con i dati trasmessi dal singolo ricevitore di riferimento. Con l'approccio multi-reference station si pone invece sostanzialmente un problema d'interpolazione.

A tal riguardo differenti metodi di stima delle correzioni sono stati proposti negli studi condotti dai seguenti autori: Han & Rizos [1996], Gao et al. [1997], Varner & Cannon [1997], Varner [2000], Raquet [1998], Raquet et al. [1998], Fortes [2002], van der Marel [1998], Wanninger [1995, 1999], Vollath et al. [2000, 2001], Wübbena et al. [1996, 2001].

Fotopoulos & Cannon [2001] hanno operato una classificazione dei diversi metodi multi-reference station sulla base degli algoritmi adottati dai vari autori per generare le correzioni. Raquet [1998] ha inoltre fornito un primo confronto tra i metodi, successivamente Raquet & Lachapelle [2001] hanno contribuito ad un'ulteriore sintesi della materia.

Atteso l'utilizzo prevalente di modelli nel dominio delle osservazioni e nello spazio degli stati, le principali differenze tra i metodi multi-reference station possono essere individuate nei seguenti punti:

- approccio non differenziato ovvero differenziato;
- problema di ottimizzazione basato sul ricorso ad un esplicito modello funzionale ovvero impostato sull'analisi statistica delle correlazioni esistenti fra le quantità osservate (metodo della collocazione);
- analisi separata dei diversi errori ovvero stima dell'errore di misura complessivo.

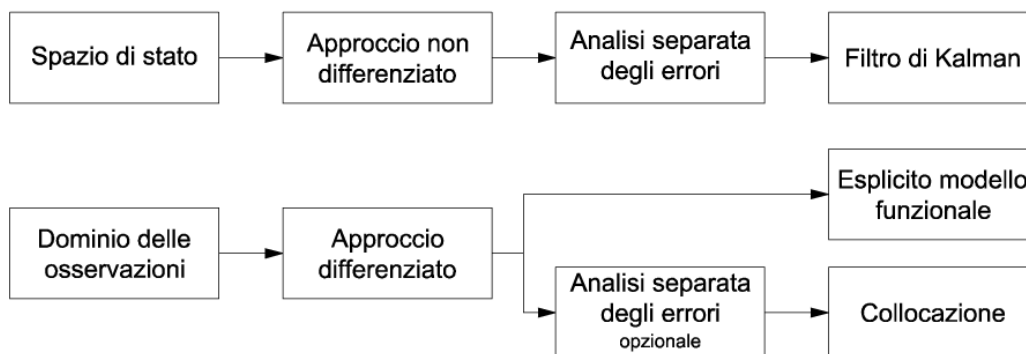
Per quanto riguarda la scelta tra i diversi metodi, si osserva che nel caso dell'approccio differenziato, attraverso il ricorso alle equazioni alle differenze, è possibile mettere a punto un modello a partire da elaborazioni dirette dei dati GPS rilevati durante il periodo di osservazione. Il modello così ricavato prescinde in larga misura dal contesto fisico, limitandosi a caratterizzare il legame tra i parametri così come esso risulta dalle osservazioni effettuate. In tal caso la generazione delle correzioni avviene sulla base di procedimenti di predizione che possono prevedere sia di ricorrere ad un esplicito modello funzionale ovvero di analizzare

statisticamente, tramite la collocazione, le correlazioni esistenti tra le quantità osservate. Con l'approccio differenziato si potrebbero avere difficoltà nella stima degli errori differenziali e nell'applicazione sui dati grezzi delle correzioni differenziali generate. A tal proposito il metodo della collocazione risolve brillantemente entrambi i problemi.

Viceversa nel caso dell'approccio non differenziato viene ricavato un modello dinamico nello spazio di stato e viene quindi applicato un filtraggio alla Kalman in cui ogni termine di errore costituisce un ulteriore parametro di stato. Se da una parte questo approccio consente potenzialmente un elevato dettaglio della descrizione del sistema, dall'altra tuttavia può comportare l'incremento dei costi computazionali legato all'allargamento dello spazio di stato. Il requisito di accuratezza impone infatti di considerare il maggior numero di errori all'interno del vettore di stato con ripercussioni dal punto di vista computazionale.

È per queste ragioni che si preferisce scegliere un metodo multi-reference station basato sulla collocazione, in grado di fornire algoritmi veloci assieme ad una rappresentazione compatta del fenomeno.

Nella figura 1.5 vengono schematizzati i procedimenti sopra descritti.



**Figura 1.5: Metodi di stima degli errori di misura GPS con l'approccio multi-reference station**

Per quel che riguarda il processo di trasmissione delle correzioni si considerano sostanzialmente due metodi: griglia di correzioni; funzione delle correzioni [Fotopoulos, 2000]. Con il primo approccio si presuppone di inviare all'utente i dati relativi ai vari punti della griglia. Nel secondo caso, invece, viene definita una forma

funzionale che consente di esprimere le correzioni in funzione della posizione dell'utente. In tal caso, se da una parte si potrebbe avere, rispetto alla griglia di correzioni, un minor carico di dati da inviare, dall'altra si possono incontrare difficoltà nell'esprimere il legame funzionale fra le correzioni con un'adeguata espressione analitica. Si osserva che il tipo di approccio da utilizzare è comunque strettamente legato con il metodo di calcolo delle correzioni.

Nell'ambito delle problematiche di trasmissione occorre inoltre notare che sempre più spesso si associa il termine virtual reference station (VRS) al settore delle reti di stazioni permanenti. Tuttavia il senso di questa espressione va distinto da quello di multi-reference station: il concetto di VRS individua infatti essenzialmente un metodo per accorciare la lunghezza della baseline tra il ricevitore di riferimento e l'utente [Raquet & Lachapelle, 2001].

I sistemi multi-reference station attualmente implementati sono i seguenti [Lachapelle, 2001]:

- Trimble Terrasat GmbH GPS-NET [Vollath et al. 2001] ;
- Geo++ GNSMART<sup>®</sup> [Wübbena et al., 2001];
- University of Calgary MultiRef<sup>™</sup> [Raquet, 1998].

Atteso dunque che il calcolo delle correzioni costituisce la fase fondamentale dell'approccio multi-reference station, si osserva che le maggiori differenze fra i tre sistemi, e i relativi effetti sul loro impiego pratico, risiedono sostanzialmente nei diversi metodi di calcolo sviluppati, anziché nel procedimento di trasmissione adottato. Sebbene la disponibilità di informazioni riguardanti i primi due dei suddetti sistemi sia alquanto limitata, in linea coi criteri schematizzati nella figura 1.5, si può procedere al seguente confronto riportato nella tabella 1.1:

**Tabella 1.1: Confronto fra i tre sistemi multi-reference station attualmente implementati**

Sistema	Spazio di stato (approccio non differenziato)	Dominio delle osservazioni (approccio differenziato)
Trimble Terrasat GmbH GPS-NET	✓	
Geo++ GNSMART <sup>®</sup>	✓	
University of Calgary MultiRef <sup>™</sup>		✓

Il sistema sviluppato all'Università di Calgary è alla base della ricerca condotta in questa tesi. Esso si configura come uno dei metodi più rigorosi dal punto di vista della teoria dell'ottimizzazione. Incentrato sugli errori differenziali, e in particolare sull'analisi delle loro proprietà stocastiche, ne fornisce una modellazione sull'area di copertura della rete utilizzando una funzione di covarianza. Consente, inoltre, di generare le correzioni per le osservazioni non differenziate effettuate sia dalle stazioni di riferimento sia dall'utente, garantendo dunque un elevato grado di flessibilità per quel che riguarda la loro applicazione.

Il metodo è stato sperimentato con successo in diversi paesi [Townsend et al., 1999; Fortes et al., 2000a, 2000b, 2001; Alves et al., 2001]. Le principali misure sono state effettuate in Norvegia, Canada, Brasile e Giappone mostrando netti miglioramenti rispetto alle tecniche tradizionali RTK.



## CAPITOLO 2

### ERRORI DIFFERENZIALI GPS

Gli errori differenziali GPS sono gli errori presenti nell'osservabile delle differenze doppie. Tali errori derivano dal fatto che alcuni tipi di errori di misura GPS non vengono ridotti adeguatamente attraverso il procedimento di calcolo delle differenze seconde, manifestandosi pertanto come termini differenziali nelle equazioni alle differenze doppie.

Al fine dello studio del metodo MultiRef™ è necessario esaminare attentamente questo tipo di errori, identificandone al meglio la natura e valutando il comportamento delle cause che possono produrli. Tale analisi è infatti fondamentale dal momento che il metodo si basa sull'osservabile delle differenze doppie, e si pone come obiettivo primario proprio la riduzione degli errori differenziali nell'intento di pervenire ad un incremento della capacità di risoluzione delle ambiguità intere di fase.

In particolare il metodo MultiRef™ è stato sviluppato tenendo conto della distinzione fra errori correlati spazialmente e incorrelati.

Nel primo gruppo rientrano gli errori sistematici prodotti da cause che presentano caratteristiche di correlazione spaziale; il loro comportamento cioè non varia sensibilmente da luogo a luogo per piccole distanze fra i ricevitori. Fanno parte di tale gruppo l'errore d'orbita dei satelliti, l'errore ionosferico e quello troposferico. Come è noto questi errori vengono ridotti attraverso l'utilizzo simultaneo di una coppia di ricevitori applicando le tecniche differenziali. Tuttavia, all'aumentare della distanza fra i due ricevitori, la differenza fra gli errori di misura della stazione di riferimento e quelli corrispondenti al ricevitore utente cresce in modo via via sempre più significativo, riducendosi i benefici di un approccio differenziale.

Si definiscono invece incorrelati gli errori dovuti a cause indipendenti attribuibili al ricevitore e al sito in cui si opera. Il multipath e il rumore strumentale possono essere considerati errori incorrelati. Essi, a differenza degli errori correlati, si amplificano attraverso l'applicazione del processo di differenziazione.

In questo capitolo, innanzitutto si procede alla definizione delle equazioni degli errori differenziali per una rete di stazioni di riferimento. Si intende cioè introdurre una forma matematica in grado di esprimere gli errori differenziali in funzione delle misure di fase disponibili dalla rete, effettuate contemporaneamente da tutti i ricevitori di riferimento.

Successivamente viene condotta un'analisi degli errori differenziali, richiamando preliminarmente le diverse combinazioni delle misure di fase effettuate con le due portanti L1 ed L2, utili per esaminare alcuni tipi di errori. In particolare vengono valutati gli errori dovuti alle cause caratterizzate da correlazione spaziale.

## 2.1 Equazioni degli errori differenziali GPS

Per esprimere gli errori differenziali si parte dall'osservabile originale della misura di fase  $\Phi$  generata dai ricevitori GPS ed espressa in metri dalla seguente equazione fondamentale [Lachapelle, 1997]:

$$\Phi = \rho + d\rho + c(dt - dT) - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}} + \lambda N + \varepsilon(\Phi) \quad (2.1)$$

dove:

$\rho$  è la distanza geometrica tra satellite e ricevitore;

$d\rho$  è l'errore d'orbita del satellite;

$c$  è la velocità della luce;

$dt$  è l'errore d'orologio del satellite;

$dT$  è l'errore d'orologio del ricevitore;

$d_{\text{ion}}$  è l'errore ionosferico;

$d_{\text{trop}}$  è l'errore troposferico;

$\lambda$  è la lunghezza d'onda della portante (19.03 cm per L1 e 24.42 cm per L2);

$N$  è l'ambiguità di fase (numero intero di lunghezze d'onda espresso in cicli);

$\varepsilon(\Phi)$  è il rumore della misura di fase (multipath e rumore strumentale).

Come è noto la distanza geometrica  $\rho$  è data dalla relazione

$$\rho = \|\mathbf{r} - \mathbf{R}\| \quad (2.2)$$

dove:

$\mathbf{R}$  è il vettore posizione del punto di osservazione;

$\mathbf{r}$  è il vettore posizione del satellite fornito dalle effemeridi.

Per quanto riguarda il metodo MultiRef™, si assumono note le coordinate dei punti di osservazione della rete, e si introduce di conseguenza l'osservabile misura-meno-distanza definita come differenza fra la distanza satellite-ricevitore misurata  $\Phi$  e quella geometrica  $\rho$

$$\bar{\Phi} = \Phi - \rho \quad (2.3)$$

Sostituendo l'equazione 2.1 nella 2.3, l'osservabile misura-meno-distanza assume la seguente espressione:

$$\bar{\Phi} = d\rho + c(dt - dT) - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}}^r + \lambda N + \varepsilon(\Phi) \quad (2.4)$$

dove:

$d_{\text{trop}}^r$  è l'errore troposferico residuo, dopo aver applicato un opportuno modello.

Dalla rete delle stazioni di riferimento proviene il seguente vettore delle misure per l'osservabile misura-meno-distanza:

$$\bar{\Phi} = [\bar{\Phi}_1^1 \dots \bar{\Phi}_1^{n_{\text{sv}}}, \bar{\Phi}_2^1 \dots \bar{\Phi}_2^{n_{\text{sv}}}, \dots, \bar{\Phi}_{n_{\text{rec}}}^1 \dots \bar{\Phi}_{n_{\text{rec}}}^{n_{\text{sv}}}]^T \quad (2.5)$$

dove:

$\bar{\Phi}_a^x$  è l'osservabile misura-meno-distanza per il ricevitore  $a$  e il satellite  $x$ ;

$n_{\text{sv}}$  è il numero di satelliti visibili;

$n_{\text{rec}}$  è il numero dei ricevitori della rete.

Il numero delle misure  $\bar{\Phi}$  disponibili per ogni epoca è dato da

$$n_m = n_{rec} \cdot n_{sv} \quad (2.6)$$

Considerato lo schema di due stazioni e due satelliti si applica il procedimento di calcolo delle differenze seconde all'equazione 2.4, ottenendo la seguente equazione alle differenze doppie:

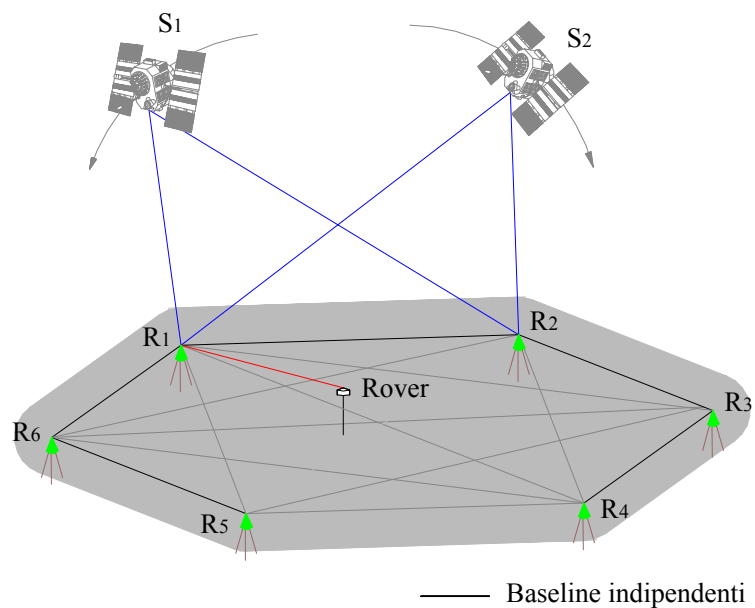
$$\Delta\nabla\bar{\Phi} = \Delta\nabla d\rho - \Delta\nabla d_{ion} + \Delta\nabla d_{trop}^r + \lambda\Delta\nabla N + \Delta\nabla\varepsilon(\Phi) \quad (2.7)$$

in cui si eliminano gli errori di orologio del satellite e del ricevitore.

Nel caso del metodo MultiRef<sup>TM</sup> le misure differenziali vengono derivate tra coppie di stazioni riferimento, ottenendo un numero di differenze doppie linearmente indipendenti pari a

$$n_{dd} = (n_{rec} - 1)(n_{sv} - 1) \quad (2.8)$$

La figura 2.1 illustra un esempio dello schema delle differenze doppie fra le stazioni di riferimento della rete.



**Figura 2.1: Differenze doppie fra le stazioni della rete**

In particolare, il metodo MultiRef™ prevede di utilizzare le differenze doppie definite dall'equazione 2.7 per mettere in evidenza gli errori differenziali attraverso la seguente equazione:

$$\Delta\nabla\bar{\Phi} - \lambda\Delta\nabla N = \Delta\nabla d\rho - \Delta\nabla d_{\text{ion}} + \Delta\nabla d_{\text{trop}}^r + \Delta\nabla\varepsilon(\Phi) \quad (2.9)$$

Analizzando questa equazione si osserva che il primo membro rappresenta l'errore di chiusura. A tal proposito sulla base del presupposto che sia nota tale quantità, l'applicazione del metodo MultiRef™ richiede, oltre alla conoscenza delle coordinate delle stazioni, di risolvere a priori le ambiguità di fase per tutti i ricevitori di riferimento.

Il secondo membro dell'equazione 2.9 è composto invece soltanto da termini corrispondenti a errori di misura, in cui si distingue una parte spazialmente correlata  $\Delta\nabla\delta_c l$

$$\Delta\nabla\delta_c l = \Delta\nabla d\rho - \Delta\nabla d_{\text{ion}} + \Delta\nabla d_{\text{trop}}^r \quad (2.10)$$

e una parte incorrelata  $\Delta\nabla\delta_u l$  (il pedice  $u$  sta per uncorrelated)

$$\Delta\nabla\delta_u l = \Delta\nabla\varepsilon(\Phi) \quad (2.11)$$

Sulla base delle relazioni 2.10 e 2.11, e considerando che  $\Delta\nabla$  è un operatore lineare, l'equazione 2.9 assume la seguente forma:

$$\Delta\nabla\bar{\Phi} - \lambda\Delta\nabla N = \Delta\nabla\delta_c l + \Delta\nabla\delta_u l = \Delta\nabla(\delta_c l + \delta_u l) = \Delta\nabla\delta l \quad (2.12)$$

Si introduce la matrice B delle differenze doppie, data da

$$B = \frac{\partial\Delta\nabla\bar{\Phi}}{\partial\bar{\Phi}} \quad (2.13)$$

in cui, considerato che le doppie differenze sono combinazioni lineari delle misure, gli elementi sono uguali a +1, -1 e 0.

Pertanto, sfruttando la matrice B, le equazioni alle differenze doppie del tipo della 2.12 possono esprimersi nel seguente modo:

$$B\bar{\Phi} - \lambda\Delta\nabla N = B\delta\mathbf{l} \quad (2.14)$$

Questa relazione rappresenta l'espressione definitiva per il calcolo degli errori differenziali fra le stazioni di riferimento della rete. Difatti se le misure vengono eseguite da stazioni di posizione nota con elevata precisione e si suppone inoltre di risolvere a priori le ambiguità di fase, è possibile, in questo caso considerare noto il primo membro dell'equazione 2.14 e trattare come parametri incogniti del problema proprio gli errori differenziali.

## 2.2 Combinazioni delle misure di fase

Nello studio del metodo MultiRef™ assumono una rilevante importanza alcune combinazioni lineari delle misure di fase delle portanti L1 ed L2.

In generale, utilizzando un ricevitore a doppia frequenza, si ricava l'osservabile  $\phi(\mu_1, \mu_2)$ , generata da una combinazione lineare di misure di fase, ed espressa in cicli dalla seguente relazione:

$$\phi(\mu_1, \mu_2) = \mu_1\phi_1 + \mu_2\phi_2 \quad (2.15)$$

dove:

$\mu_1, \mu_2$  sono i coefficienti;

$\phi_1$  è la misura di fase della portante L1, in cicli;

$\phi_2$  è la misura di fase della portante L2, in cicli.

Si considerano le equazioni delle misure di fase  $\phi_1$  e  $\phi_2$  espresse in cicli:

$$\phi_1 = \frac{1}{\lambda_1} (\rho + d\rho + cdt - cdT + d_{\text{trop}}) + d_{\text{ion}_1} + N_1 + \varepsilon(\phi_1) \quad (2.16)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{\lambda_2} (\rho + d\rho + cdt - cdT + d_{\text{trop}}) + d_{\text{ion}_2} + N_2 + \varepsilon(\phi_2) \quad (2.17)$$

dove:

$d_{\text{ion}}$  è l'errore ionosferico in cicli.

Queste espressioni si sostituiscono nell'equazione 2.15 che assume quindi la seguente forma:

$$\begin{aligned} \phi(\mu_1, \mu_2) = \frac{1}{\lambda(\mu_1, \mu_2)} (\rho + d\rho + cdt - cdT + d_{\text{trop}}) + \mu_1 d_{\text{ion}_1} + \mu_2 d_{\text{ion}_2} + \\ + \mu_1 N_1 + \mu_2 N_2 + \varepsilon(\phi_1, \phi_2) \end{aligned} \quad (2.18)$$

dove:

$\lambda(\mu_1, \mu_2)$  è la lunghezza d'onda corrispondente all'osservabile  $\phi(\mu_1, \mu_2)$ , avendo posto

$$\lambda(\mu_1, \mu_2) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \lambda_2 + \mu_2 \lambda_1} \quad (2.19)$$

$\varepsilon(\phi_1, \phi_2)$  è il rumore dell'osservabile  $\phi(\mu_1, \mu_2)$ , espresso in cicli dalla seguente equazione [Seeber, 1993]:

$$\varepsilon(\phi_1, \phi_2) = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2} \cdot \varepsilon(\phi) \quad (\text{cicli}) \quad (2.20)$$

dove per  $\varepsilon(\phi)$  si può considerare un valore pari a 0.01 cicli [Larson, 1996].

Le combinazioni prevalentemente utilizzate per lo sviluppo del metodo MultiRef<sup>TM</sup> sono schematizzate nella seguente tabella:

**Tabella 2.1: Combinazioni lineari delle misure di fase**

Osservabile	$\mu_1$	$\mu_2$	$\lambda(\mu_1, \mu_2)$
L1	1	0	19.03 cm
L2	0	1	24.42 cm
Widelane WL	1	-1	86.19 cm
Ionospheric-Free IF	1	$-\frac{f_2}{f_1}$	48.44 cm
Geometric-Free GF	$\lambda_1$	$-\lambda_2$	$\infty$

f frequenza del segnale ( $f_1=1575.42$  MHz,  $f_2=1227.60$  MHz)

La combinazione widelane, a cui corrisponde la lunghezza d'onda di 86.19 cm, viene presa in considerazione dal momento che è diffusamente utilizzata per la risoluzione dell'ambiguità di fase. A tal proposito è interessante valutare gli errori differenziali relativi alla combinazione widelane, confrontandoli in particolare con quelli ottenuti a partire dalla misura di fase della portante L1. Come mostrato da Raquet [1998] alcuni errori, espressi in metri, hanno uguale entità, mentre altri risultano amplificati applicando la combinazione widelane. Tale comportamento viene evidenziato attraverso il rapporto WL/L1, come indica la seguente tabella:

**Tabella 2.2: Confronto fra gli errori differenziali per misure di fase L1 e WL, in metri [Raquet, 1998]**

Tipo di errore	Errore L1 (m)	Errore WL (m)	$\frac{WL}{L1}$
Errore d'orbita	$\Delta\nabla dp$	$\Delta\nabla dp$	1
Errore troposferico	$\Delta\nabla T$	$\Delta\nabla T$	1
Errore ionosferico	$-\frac{1}{f_1^2} \Delta\nabla I$	$-\frac{\lambda_{WL}(f_1 - f_2)}{cf_1 f_2} \Delta\nabla I$	$\frac{f_1}{f_2} = 1.283$
Multipath per la L1	$\Delta\nabla \varepsilon(\Phi_{mult})$	$\frac{\lambda_{WL}}{\lambda_1} \Delta\nabla \varepsilon(\Phi_{mult})$	$\frac{\lambda_{WL}}{\lambda_1} = 4.529$
Rumore sulla L1	$\Delta\nabla \varepsilon(\Phi_{rx})$	$\frac{\lambda_{WL}}{\lambda_1} \Delta\nabla \varepsilon(\Phi_{rx})$	$\frac{\lambda_{WL}}{\lambda_1} = 4.529$



Come si vedrà in seguito le combinazioni Ionospheric-Free e Geometric-Free risultano invece particolarmente utili ai fini dell'indagine degli errori differenziali dovuti rispettivamente alla rifrazione troposferica e ionosferica.

### **2.3 Errore d'orbita**

Al fine di derivare l'osservabile misura-meno-distanza definita dall'equazione 2.3, il metodo MultiRef™ richiede la conoscenza delle coordinate dei satelliti GPS, espresse nel sistema di riferimento geocentrico WGS84 [DMA, 1991].

Come è noto, la posizione dei satelliti può essere ricavata sia attraverso le effemeridi trasmesse, predette dal segmento di controllo, sia ricorrendo alle effemeridi precise post-calcolate. Per quanto riguarda questo secondo tipo di effemeridi, tra i diversi servizi disponibili vi è quello fornito dagli enti NSWC (Naval Surface Warfare Center) e NIMA (National Imagery and Mapping Agency) [2000], nonché le effemeridi calcolate dall'IGS (International GPS Service) [2001a].

In particolare sulla base delle osservazioni GPS eseguite dalle stazioni fisse della rete mondiale IGS vengono elaborati diversi tipi di effemeridi: Final, Rapid e Ultra-Rapid [IGS ACC, 2001]. Tutti i dati IGS sono forniti nel formato SP3 [Remondi, 2001; Haw, 2001] e si riferiscono alle diverse definizioni del sistema internazionale ITRF (International Terrestrial Reference Frame) [LAREG, 2001]: ITRF97 fino al 3 giugno 2000; realizzazione IGS dell'ITRF97 (IGS ITRF97) [Ferland, 2000; Springer, 2000] dal 3 giugno 2000 al 2 dicembre 2001; realizzazione IGS dell'ITRF2000 (IGS00) dal 2 dicembre 2001 [Weber, 2001].

L'accuratezza dei vari tipi di effemeridi IGS è riportata nella seguente tabella, assieme alle principali caratteristiche di ogni prodotto [IGS, 2001b]:

**Tabella 2.3: Caratteristiche dei prodotti IGS [IGS, 2001b]**

Prodotto IGS	Accuratezza		Latenza	Aggiornamento
	Effemeridi	Orologi		
Ultra-Rapid	~25 cm	~5 ns	tempo reale	due volte al giorno
Rapid	5 cm	0.2 ns	17 ore	giornaliero
Final	<5 cm	0.1 ns	da 13 a 20 giorni	settimanale

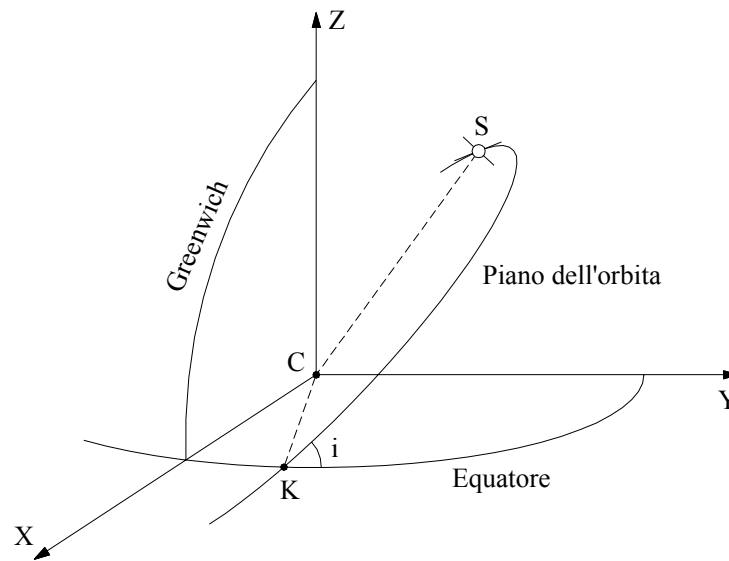
Sebbene le effemeridi Final e Rapid presentino una maggiore accuratezza, dalla tabella 2.3 si osserva che, tra i prodotti IGS, soltanto le effemeridi Ultra-Rapid possono essere utilizzate col metodo MultiRef™, dal momento che l'obiettivo finale è quello di fornire un servizio di correzioni in tempo reale.

Per le applicazioni GPS RTK vengono comunque tradizionalmente adoperate le effemeridi trasmesse. In tal caso le effemeridi vengono inviate agli utilizzatori attraverso il messaggio navigazionale modulato sulle portanti del segnale GPS di ogni satellite, consentendo di calcolare le coordinate sulla base dei sei elementi di Keplero e dei parametri corrispondenti alle perturbazioni dell'orbita kepleriana.

Attualmente le effemeridi trasmesse si ottengono dall'elaborazione dei dati acquisiti da sei stazioni di controllo: oltre alle cinque originali (Colorado Springs, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein e Hawaii), contribuisce al calcolo un'altra stazione localizzata a Cape Canaveral [U.S. Assistant Secretary of Defense, 2001].

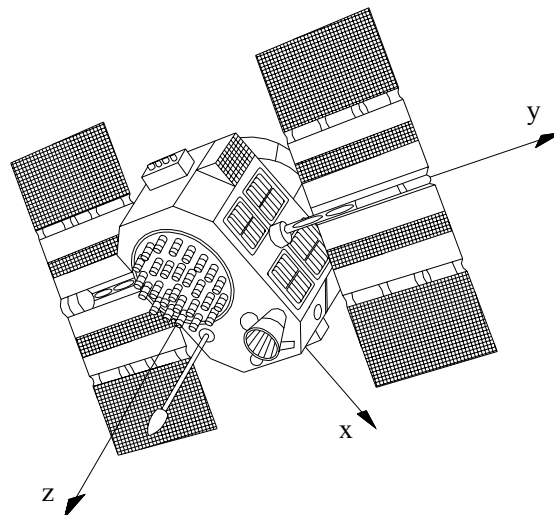
L'accuratezza delle effemeridi trasmesse era inizialmente compresa tra i 20 e i 50 m [Wells et al., 1986]. L'IGS [2001b] indica un'accuratezza, in assenza di SA, di 2.60 m, mentre ulteriori miglioramenti sono previsti quando sarà completato il programma AII (Accuracy Improvement Initiative) [Hay, 2000].

L'errore nelle effemeridi trasmesse, riferite ad un dato periodo, può essere valutato assumendo come coordinate vere dei satelliti quelle corrispondenti alle orbite IGS Final. L'analisi non viene condotta confrontando direttamente le coordinate geocentriche ECEF (Earth-Centered-Earth-Fixed) dei satelliti (figura 2.2).



**Figura 2.2: Sistema di riferimento ECEF (Earth-Centered-Earth-Fixed)**

Si considerano invece le componenti dell'errore d'orbita rispetto alla terna cartesiana SCSF (Satellite-Centered-Satellite-Fixed), avente l'origine nel centro di massa del satellite S, l'asse  $x$  diretto secondo la normale al piano dell'orbita e gli assi  $y$  e  $z$  coincidenti rispettivamente con la direzione tangenziale all'orbita e radiale (figura 2.3).



**Figura 2.3: Sistema di riferimento SCSF (Satellite-Centered-Satellite-Fixed)**

Sulla base di quest'impostazione Fortes [2002] ha calcolato un errore d'orbita di 4.36 m, riferito a misure eseguite nel 1999, e derivato dalle seguenti componenti:

**Tabella 2.4: Componenti dell'errore d'orbita nel sistema SCSF [Fortes, 2002]**

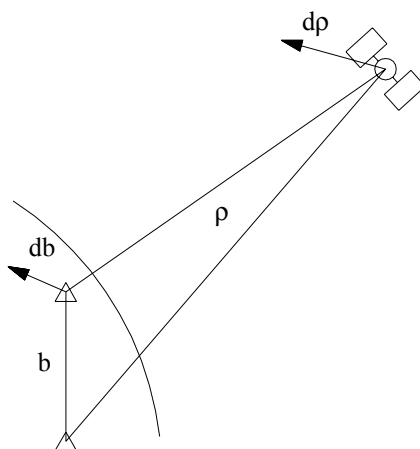
Componente	Scarto quadratico medio (m)
Normale	2.15
Tangenziale	3.72
Radiale	0.76

Per calcolare l'errore sulla distanza tra due ricevitori prodotto dall'errore d'orbita si può utilizzare la seguente relazione [Beutler et al., 1998] (figura 2.4):

$$\frac{db}{b} = \frac{dp}{\rho} \quad (2.21)$$

dove:

- b è la lunghezza della base;
- $\rho$  è la distanza media tra il satellite e i ricevitori;
- dp è l'errore nella posizione del satellite;
- db è l'errore sulla lunghezza della base causato da dp.



**Figura 2.4: Effetto dell'errore d'orbita sulla distanza tra due ricevitori**

L'equazione 2.21 esprime l'errore nel dominio della posizione. Considerando un errore  $d\rho$  di 4.36 m sull'orbita e una distanza  $\rho$  di 20000 km, si ricava una precisione relativa  $db/b$  di 0.22 ppm. Per una base di 100 km, l'errore d'orbita corrisponde quindi ad un errore sulla lunghezza di 2.2 cm.

Per quanto riguarda l'approccio differenziale, Raquet [1998] e Zhang [1999] hanno calcolato l'errore d'orbita differenziale, utilizzando dati raccolti nel 1997. Per lunghezze di base variabili da 29 a 498 km, i risultati hanno evidenziato gli effetti della riduzione della correlazione spaziale dell'errore d'orbita. In particolare, all'aumentare della distanza si è manifestato un incremento dello scarto quadratico medio dell'errore differenziale. Tale scarto è stato valutato dell'ordine di 0.1 ppm.

## 2.4 Errore ionosferico

L'errore ionosferico è dovuto alla rifrazione del segnale GPS, quando questo attraversa la ionosfera. Tale strato dell'atmosfera, caratterizzato da una rilevante concentrazione di ioni ed elettroni liberi, si estende all'incirca da 60 km fino a 1000 km al di sopra della superficie terrestre, ed è un mezzo dispersivo per le frequenze del segnale GPS.

In particolare l'effetto della ionosfera sulla propagazione del segnale dipende dalla frequenza ed è funzione del numero di elettroni lungo la traiettoria del segnale stesso. Trascurando i termini superiori al secondo ordine, l'errore ionosferico per le misure di fase è dato in cicli dall'espressione [Klobuchar, 1996]

$$d_{\text{ion}} = -\frac{I}{cf} \quad (2.22)$$

dove:

$$I = 40.3 \text{ TEC} \quad (\text{cicli} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \quad (2.23)$$

Il TEC (Total Electron Content) rappresenta il parametro adottato per descrivere lo stato della ionosfera. Esso è il contenuto di elettroni in una colonna di sezione unitaria lungo il cammino del segnale dal satellite al ricevitore, ed è dato dall'integrale della densità di elettroni  $N_e$  esteso a tutto il percorso interno alla ionosfera:

$$\text{TEC} = \int_R^S N_e ds \quad (2.24)$$

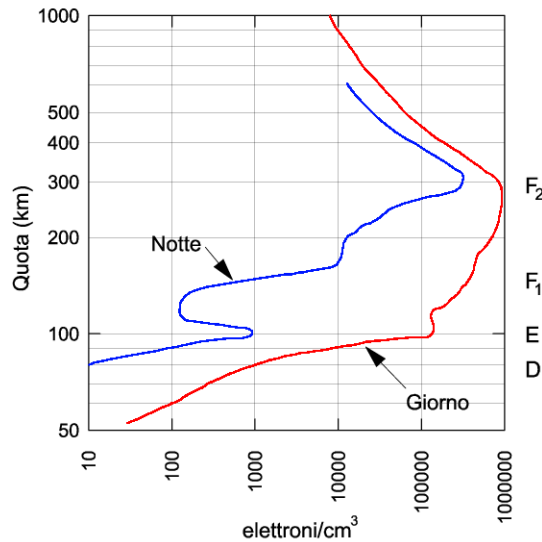
dove:

TEC è espresso in unità TEC (TECU) con  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elettroni/m}^2$

$N_e$  è la densità di elettroni ( $\text{elettroni/m}^3$ ).

Considerato che lo stato della ionosfera dipende sostanzialmente dalla radiazione elettromagnetica del Sole, responsabile della ionizzazione, e dallo sciame corpuscolare del vento solare, che ne produce le perturbazioni, si osserva di conseguenza che il TEC subisce numerose variazioni ricollegabili proprio ai fenomeni solari. In particolare, i valori del TEC presentano un andamento caratterizzato da periodicità giornaliera, stagionale e di undici anni legata al ciclo dell'attività solare.

La variazione del TEC con le ore del giorno è dovuta essenzialmente ai cambiamenti della struttura della ionosfera tra la notte e il giorno. La figura 2.5 mostra l'andamento tipico del grado di ionizzazione, espresso in  $\text{elettroni/cm}^3$ , in funzione della quota. La curva rossa indica il livello di ionizzazione nelle ore diurne quella blu corrisponde invece alla fase notturna quando la concentrazione di elettroni è più bassa.



**Figura 2.5: Variazione della densità degli elettroni negli strati della ionosfera**

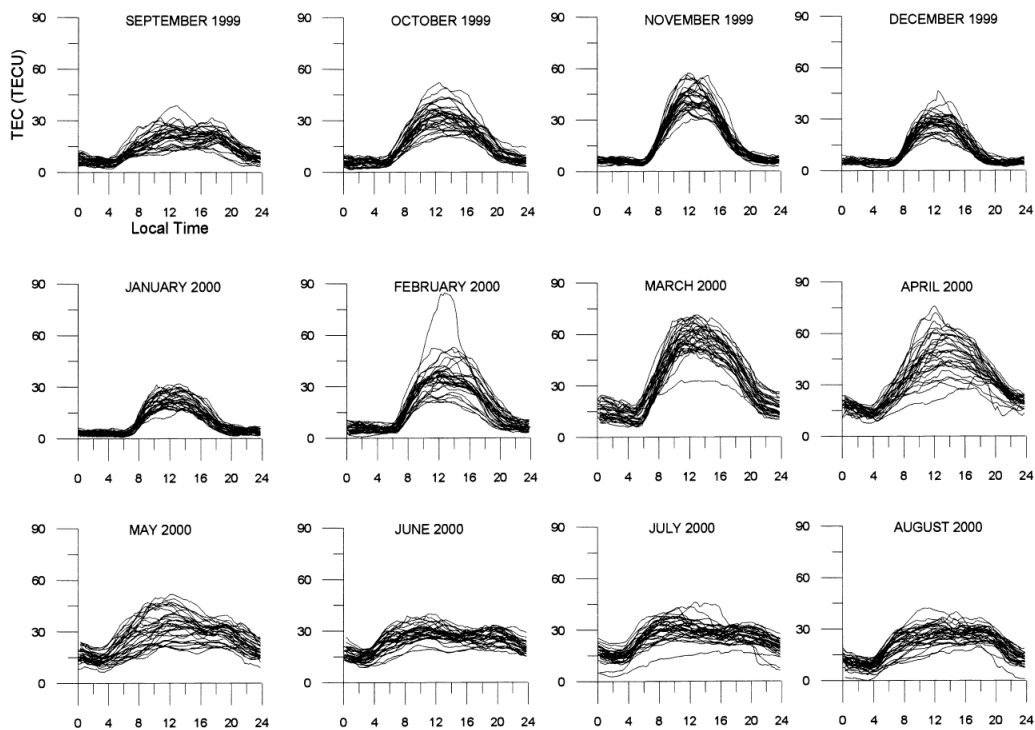
In particolare l'andamento della densità elettronica è influenzato dalla radiazione solare e dai tempi di ricombinazione. A tal proposito si osserva che la radiazione solare è massima alle altezze elevate e diminuisce col penetrare verso la superficie terrestre; analogamente i tempi di ricombinazione sono minori alle quote basse, riducendosi all'aumentare della densità atmosferica.

Si rileva pertanto che lo strato D, debolmente ionizzato, scompare rapidamente durante la notte; lo strato E presenta una riduzione della densità elettronica secondo un fattore pari circa a 200; gli strati più in alto, F<sub>1</sub> ed F<sub>2</sub>, sono invece quelli maggiormente ionizzati, e persistono anche nelle ore notturne, fondendosi tuttavia in unico strato F. Un fattore determinante per l'entità del TEC è rappresentato dalla densità di elettroni massima  $N_{max}$ , che si raggiunge nello strato F<sub>2</sub>.

Per quanto riguarda dunque i valori giornalieri del TEC essi presentano un massimo che si produce spesso un'ora dopo il mezzogiorno solare, in genere tra le 13:00 e le 15:00 ora locale; eventualmente si può poi rilevare anche un altro picco intorno alle ore dopo il tramonto.

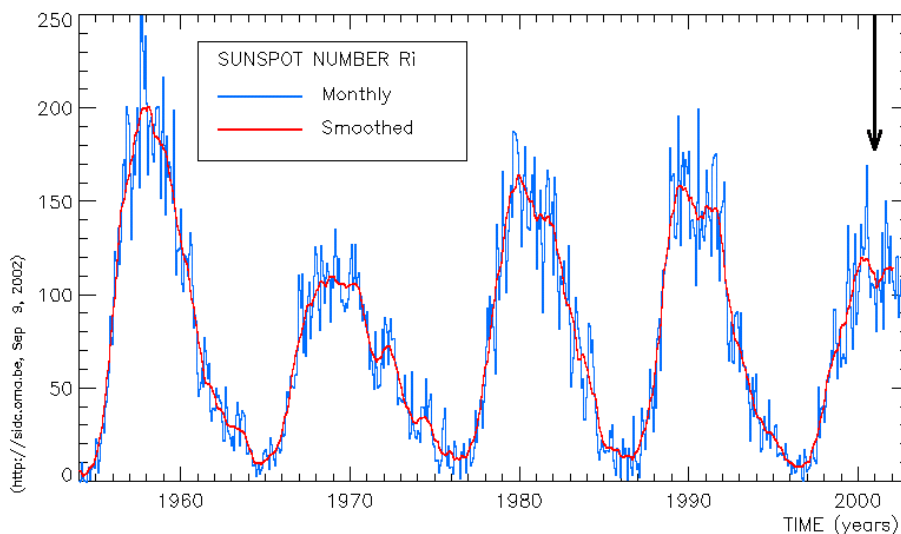
I valori del TEC presentano anche una variazione stagionale in funzione dei mesi dell'anno. Nell'emisfero Nord si registra un andamento con un minimo nell'estate, e un massimo invece sia agli equinozi, sia nell'inverno. L'entità del TEC può essere due o tre volte maggiore in inverno rispetto all'estate.

La figura 2.6 [Warnant and Pottiaux, 2000] mostra la tipica variazione giornaliera del TEC per le diverse stagioni, tra il 1999 e il 2000.



**Figura 2.6: Variazione giornaliera e stagionale del TEC nel periodo settembre 1999-agosto 2000 [Warnant and Pottiaux, 2000].**

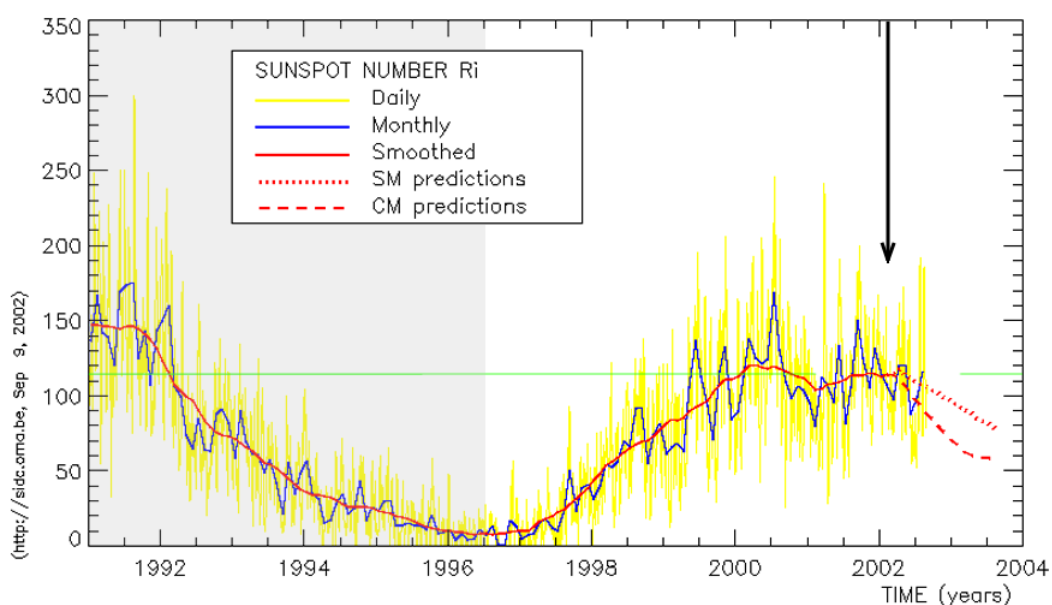
Il TEC varia inoltre in funzione dell'attività solare, caratterizzata dalla periodicità media di circa undici anni. La figura 2.7 [SIDC, 2002] mostra la successione degli ultimi quattro cicli dell'attività solare.



**Figura 2.7: Successione dei cicli dell'attività solare dal 1954 al 2002**



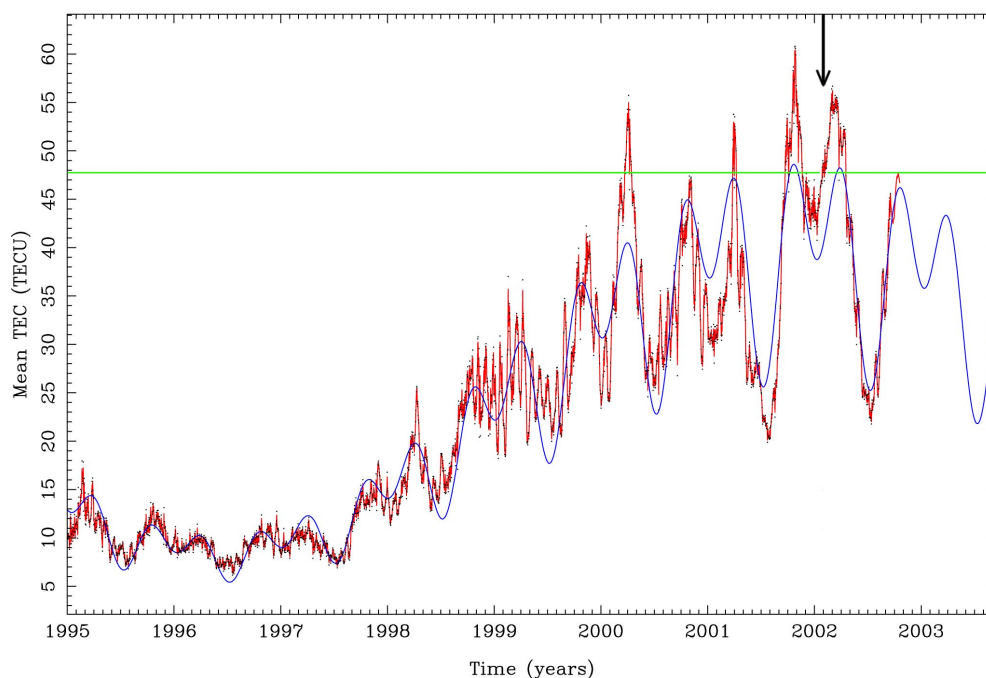
L'entità del TEC dipende dalla fase del ciclo dell'attività solare. Verso la metà del 1996 è iniziato il ciclo 23, di cui gli anni 2000-2003 costituiscono la fase di attività massima. In particolare, sulla base dei risultati del SIDC (World Data Center for the Sunspot Index) [SIDC, 2002], si evidenzia il tipico andamento a doppio picco in cui, dopo il massimo del 2000, viene rilevata una ripresa dell'attività con un secondo picco intorno all'inizio del 2002 (figura 2.8). Si nota che le misure utilizzate per questa tesi sono state effettuate nel periodo 7-12 febbraio 2002, in corrispondenza proprio del secondo picco del ciclo solare.



**Figura 2.8: Ciclo 23 dell'attività solare [SIDC, 2002]**

Per quanto riguarda l'influenza del ciclo dell'attività solare sulle variazioni del TEC, in figura 2.9 si riporta l'andamento calcolato dal CODE (IGS Center for Orbit Determination in Europe) [2002a].

CODE GIM time series from day 001, 1995 to day 260, 2002

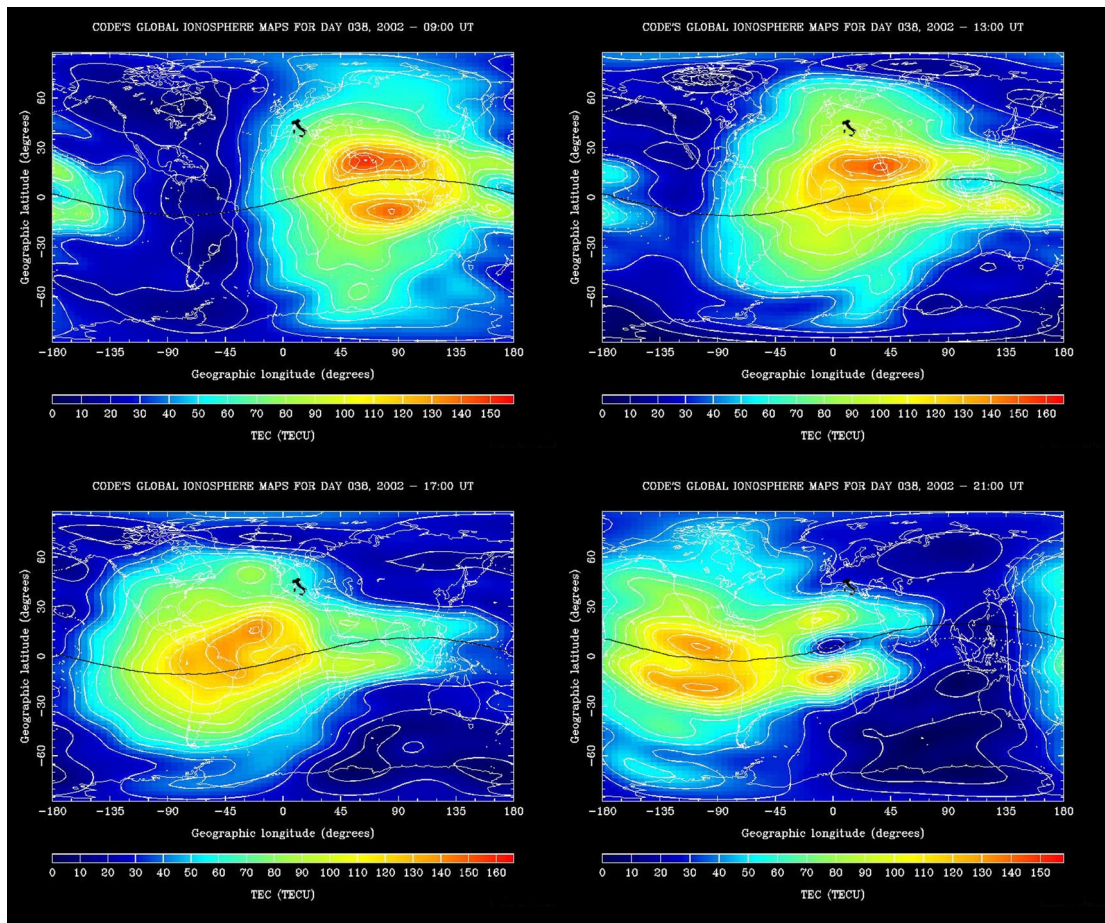


**Figura 2.9: Variazione del TEC a partire dal 1995 [CODE, 2002a]**

Oltre alle variazioni temporali il TEC è legato alla posizione geografica e geomagnetica. I massimi valori si raggiungono in corrispondenza dell'anomalia equatoriale intorno a  $\pm 15^\circ$  dall'equatore geomagnetico. Le variazioni del TEC in funzione della posizione sono rappresentate su scala mondiale attraverso le mappe GIM (Global Ionosphere Maps).

Il CODE [2002b] calcola per ogni giorno dell'anno una serie di dodici mappe in cui si riportano i valori del TEC nella direzione verticale (VTEC), con un intervallo di due ore. Tali mappe vengono derivate dai dati provenienti dalle stesse stazioni GPS della rete mondiale IGS adoperate per il calcolo delle effemeridi; in particolare l'andamento spaziale si ottiene per interpolazione mediante uno sviluppo in armoniche sferiche di grado 12 e ordine 8 [Schaer, 1999].

La figura 2.10 mostra le mappe relative al 7 febbraio 2002: in particolare sono stati riportati i dati per la fase 9:00-21:00 UT, con un intervallo di quattro ore. Si nota la tipica struttura a due occhi, che segue l'equatore geomagnetico e procede da est verso ovest, riflettendo il moto apparente del Sole attorno alla Terra; la doppia coda, presente in ogni mappa, corrisponde invece al secondo picco giornaliero.



**Figura 2.10: GIM (Global Ionosphere Maps) per il 7 febbraio 2002, raffiguranti il VTEC nella fase diurna, con un intervallo di quattro ore, a partire dalle 9:00 UT [CODE, 2002b]**

Nella tabella 2.5 [SEC, 1999] vengono riportati in sintesi i limiti entro cui variano i valori della densità di elettroni massima  $N_{max}$  e del contenuto totale di elettroni TEC.

**Tabella 2.5: Variazioni dei parametri della ionosfera [SEC, 1999]**

Parametro ionosferico	Variazione	
	Diurna (Medie latitudini)	Ciclo solare (Ore diurne)
$N_{max}$	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$ elettroni/cm <sup>3</sup>	$4 \times 10^5 - 2 \times 10^6$ elettroni/cm <sup>3</sup>
TEC	$5 - 50 \times 10^{16}$ elettroni/m <sup>2</sup>	$10 - 50 \times 10^{16}$ elettroni/m <sup>2</sup>

Nell'ambito della ionosfera un altro fattore influenza le misure GPS: la presenza di perturbazioni locali nella struttura della ionosfera provoca infatti rapide fluttuazioni aleatorie sia all'ampiezza sia alla fase del segnale. Questo fenomeno, noto con il nome di scintillazione [Aarons, 1982], risulta fortemente incorrelato sia spazialmente che temporalmente.

Gli effetti delle scintillazioni ionosferiche sono predominanti nelle regioni equatoriali ( $\pm 10-20^\circ$  di latitudine geomagnetica), aurorali ( $65-75^\circ$ ) e polari ( $>75^\circ$ ). Nella zona equatoriale le scintillazioni più significative si manifestano durante il periodo di massima attività solare, mentre nelle regioni alle alte latitudini il fenomeno è generalmente associato al verificarsi di tempeste magnetiche, e pertanto il picco si registra alcuni anni dopo il massimo del ciclo solare [Skone, 1998]. Quando si producono effetti anche alle medie latitudini, si tratta in tal caso dell'estensione dalle regioni equatoriali e aurorali.

In tutte le regioni le scintillazioni si riscontrano prevalentemente durante le ore notturne, dal tramonto alla mezzanotte e talvolta anche più tardi. Si evidenzia inoltre una variazione stagionale, legata alla longitudine, per cui gli effetti maggiori si producono nei mesi fra settembre e marzo nella zona che va dall'America all'India, e nei mesi fra aprile ed agosto, invece, per la regione del Pacifico [Wanninger, 1993].

La scintillazione influenza fortemente il corretto inseguimento del segnale, limitando la disponibilità delle misure di fase. In particolare la variazione della fase complica il funzionamento del circuito ad aggancio di fase PLL (Phase lock loop), mentre l'attenuazione dell'ampiezza può provocare la riduzione del rapporto segnale/rumore al di sotto di un'adequata soglia di lavoro. Sono state rilevate attenuazioni maggiori di 10 dB, nelle regioni polari e aurorali, che possono superare anche i 20 dB nella zona equatoriale, in condizioni di massimo dell'attività solare [Aarons and Basu, 1994].

Si osserva che gli effetti della scintillazione non sono legati soltanto all'entità del fenomeno ma dipendono anche dalle caratteristiche dei ricevitori GPS. Soprattutto per quanto riguarda la portante L2, l'impatto sulle prestazioni dipende dal tipo di tecnica adottata per ricostruire la portante. Difatti, atteso un decadimento del segnale di 27-30 dB per le tecniche codeless e di 14-17 per le semi-codeless rispetto al

procedimento diretto di correlazione, in presenza di scintillazione è stata rilevata una perdita di 13 dB per i ricevitori codeless rispetto a quelli semi-codeless [Woo, 1999]. Ulteriori ricerche sono state condotte allo scopo di studiare il comportamento dei diversi tipi di ricevitori GPS in presenza di scintillazione: i risultati hanno costantemente dimostrato le migliori prestazioni delle tecniche semi-codeless [Fortes, 2002; Skone and de Jong, 1999].

## 2.5 Combinazione lineare Geometric-Free per l'analisi dell'errore ionosferico

L'errore ionosferico può essere valutato utilizzando la combinazione lineare Geometric-Free delle misure di fase delle portanti L1 ed L2.

Dalla tabella 2.1 si considerano i coefficienti  $\mu_1=\lambda_1$  e  $\mu_2=-\lambda_2$ , pertanto l'equazione 2.15 assume la seguente forma:

$$\Phi_{GF} = \lambda_1\phi_1 - \lambda_2\phi_2 = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2.25)$$

dove:

$\Phi_{GF}$  è l'osservabile Geometric-Free espressa in metri.

Si osserva che la combinazione Geometric-Free è esprimibile unicamente in metri. Questa particolarità concorda col fatto che la corrispondente lunghezza d'onda  $\lambda_{GF}$ , in base all'equazione 2.19, risulta  $\infty$ .

Sostituendo nell'equazione 2.25 le espressioni di  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ , fornite dalla formula fondamentale 2.1, e tenendo presente che  $d_{ion}$  in metri è dato, in base all'equazione 2.22, da

$$d_{ion} = -\frac{I}{cf} \cdot \lambda = -\frac{I}{cf} \cdot \frac{c}{f} = -\frac{I}{f^2} \quad (m) \quad (2.26)$$

l'osservabile Geometric-Free viene quindi definita secondo la seguente relazione:

$$\begin{aligned}\Phi_{GF} &= \left( \rho + d\rho + d_{\text{trop}} - \frac{I}{f_1^2} + \lambda_1 N_1 + \varepsilon(\Phi_1) \right) - \left( \rho + d\rho + d_{\text{trop}} - \frac{I}{f_2^2} + \lambda_2 N_2 + \varepsilon(\Phi_2) \right) \\ &= -I \left( \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \right) + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon(\Phi_1) - \varepsilon(\Phi_2)\end{aligned}\quad (2.27)$$

Si nota che questa espressione è indipendente dagli orologi e dalla geometria (orbite e coordinate dei punti di stazione), da qui dunque il nome Geometric-Free.

L'obiettivo è quello di sfruttare tale osservabile per la stima degli effetti della rifrazione ionosferica sulle misure di fase. In particolare si dimostra che l'errore ionosferico differenziale si può esprimere attraverso la differenza doppia dell'osservabile Geometric-Free data da

$$\Delta \nabla \Phi_{GF} = \Delta \nabla \Phi_1 - \Delta \nabla \Phi_2 \quad (2.28)$$

Difatti applicando il procedimento di calcolo delle differenze seconde, dall'equazione 2.27 si ricava

$$\Delta \nabla \Phi_{GF} = -\Delta \nabla I \left( \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \right) + \lambda_1 \Delta \nabla N_1 - \lambda_2 \Delta \nabla N_2 + \Delta \nabla \varepsilon(\Phi_1) - \Delta \nabla \varepsilon(\Phi_2) \quad (2.29)$$

Atteso che per distanze tra i ricevitori maggiori di 10 km il multipath e il rumore strumentale risultano trascurabili rispetto all'errore ionosferico, l'equazione 2.29 diventa

$$-\Delta \nabla I = \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (\Delta \nabla \Phi_{GF} - \lambda_1 \Delta \nabla N_1 + \lambda_2 \Delta \nabla N_2) \quad (2.30)$$

Inoltre dalla formula 2.22 si deduce in termini differenziali

$$\Delta \nabla d_{\text{ion}_1} = -\frac{\Delta \nabla I}{c f_1} \quad (2.31)$$

Pertanto sostituendo l'equazione 2.30 nella 2.31, si ottiene in cicli

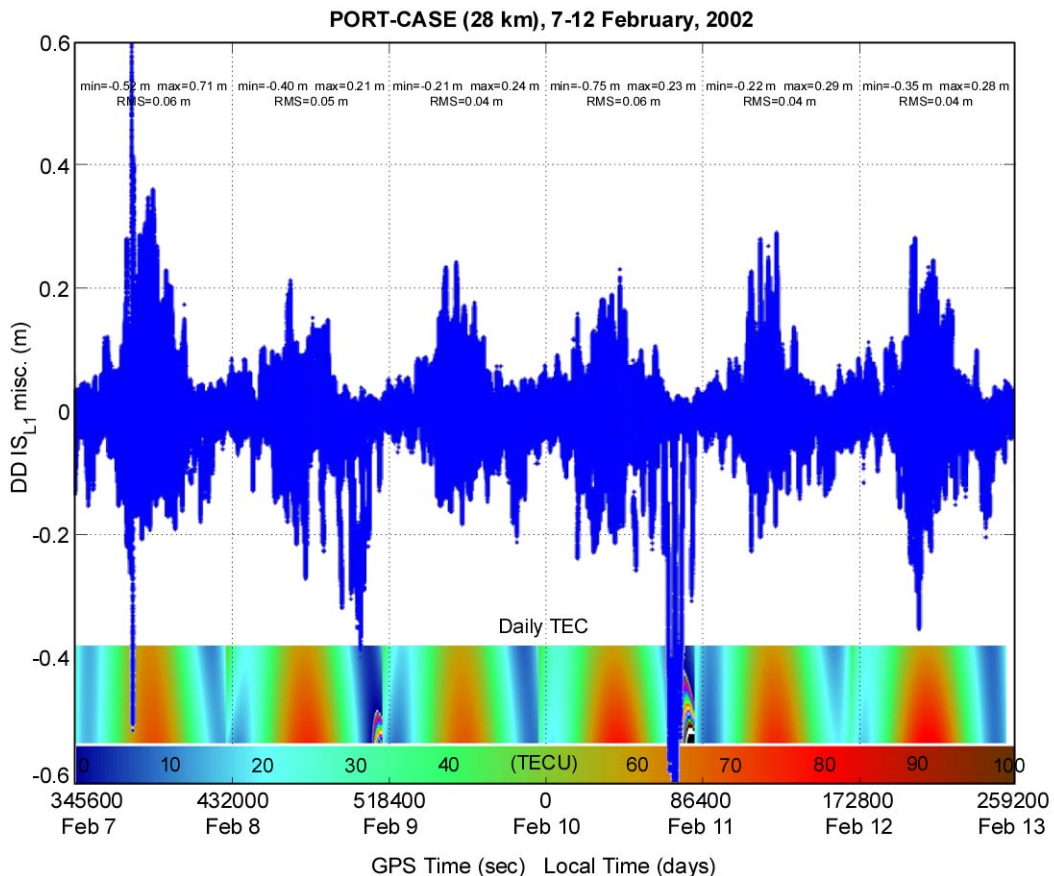
$$\Delta \nabla d_{\text{ion}_1} = \frac{1}{c f_1} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) (\Delta \nabla \Phi_{GF} - \lambda_1 \Delta \nabla N_1 + \lambda_2 \Delta \nabla N_2) \quad (2.32)$$

In definitiva l'errore ionosferico differenziale sulla portante L1 è dato, in metri, dall'equazione 2.32 moltiplicando per la lunghezza d'onda  $\lambda_1$ , cosicché si ha

$$\Delta \text{VIS}_{L1} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (\Delta \nabla \Phi_{\text{GF}} - \lambda_1 \Delta \nabla N_1 + \lambda_2 \Delta \nabla N_2) \quad (2.33)$$

Adottando il procedimento sopra descritto è stata valutata l'entità dell'errore ionosferico differenziale su misure effettuate sulla rete test Campania Network.

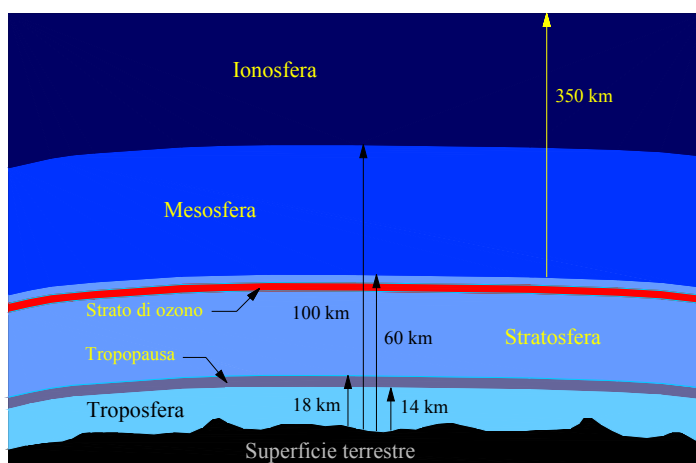
In particolare su sei giorni di misura relativi al periodo 7-12 febbraio 2002 si ha per la baseline PORT-CASE l'andamento mostrato in figura 2.11. Nel grafico vengono riportati i valori degli errori differenziali nell'osservabile Geometric-Free, inoltre questi valori sono messi a confronto con le mappe del TEC calcolate dall'ASI [2002a], corrispondenti alle latitudini dell'area in esame, per i suddetti giorni di misura.



**Figura 2.11: Errore differenziale ionosferico su sei giorni di misura per il periodo 7-12 febbraio 2002**

## 2.6 Errore troposferico

L'errore troposferico è l'errore prodotto dalla propagazione del segnale GPS attraverso l'atmosfera neutra. In particolare gli effetti subiti dal segnale sono dovuti all'attraversamento di una zona che inizia dalla superficie terrestre e si estende fino ad una quota intorno ai 60 km [Lachapelle, 1997]. Sebbene la troposfera si estenda soltanto fino a circa 10 km di altezza (figura 2.12) l'errore è detto troposferico poiché l'80% del ritardo totale dovuto all'atmosfera neutra è riconducibile alla sola troposfera.



**Figura 2.12: Strati dell'atmosfera terrestre**

La parte neutra dell'atmosfera è un mezzo non dispersivo per le frequenze del segnale GPS, e il ritardo sul segnale dovuto alla propagazione attraverso questa zona è dunque uguale sulle due portanti L1 ed L2. L'errore troposferico non può pertanto essere ridotto utilizzando una combinazione delle portanti, e si ricorre allora ai vari modelli capaci di descrivere l'effetto troposferico.

L'influenza della troposfera sulle misure GPS viene espressa in termini di componente secca o idrostatica e componente umida. La prima componente sostanzialmente non varia con la latitudine e la quota, e può essere descritta con elevata precisione ( $\pm 1\%$ ) da vari modelli, di cui Mendes [1999] ha fornito una dettagliata analisi. La componente umida, invece, dipende dalla distribuzione del vapore acqueo nell'atmosfera ed è difficile da modellare. Tale componente



corrisponde però soltanto al 10-20% della rifrazione troposferica totale [Lachapelle, 1997]. Le componenti secca e umida dell'errore troposferico possono raggiungere per visuali zenitali rispettivamente i valori di 2.3 m e 0.80 m [Spilker Jr., 1996], che tendono ad aumentare di circa dieci volte per visuali radenti l'orizzonte, intorno ai 10° di altezza [Seeber, 1993].

**Tabella 2.6: Ritardo troposferico per visuali zenitali**

Componente	Errore di distanza (m)
Secca	2.3
Umida	0.80

Nel caso del posizionamento differenziale, gli errori troposferici corrispondenti ai due ricevitori risentono delle condizioni climatiche locali, e risultano di conseguenza poco correlati spazialmente, soprattutto per quanto riguarda le quote.

L'errore troposferico differenziale è stato valutato variabile tra 1 e 4 ppm, in assenza di modellizzazione [Fortes, 2002], mentre risulta compreso tra 0.2 e 0.4 ppm dopo aver applicato un opportuno modello [Lachapelle, 1997].

In particolare, per valutare l'errore troposferico differenziale si può utilizzare la combinazione lineare Ionospheric-Free.

Tenendo presente che i coefficienti della combinazione Ionospheric-Free sono  $\mu_1=1$  e  $\mu_2=-f_2/f_1$ , si ottiene dall'equazione 2.18 la seguente relazione:

$$\begin{aligned} \phi_{IF} &= \frac{1}{\lambda_{IF}} (\rho + d\rho + cdt - cdT + d_{trop}) + \frac{I}{cf_1} - \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{I}{cf_2} + N_1 - \frac{f_2}{f_1} N_2 + \varepsilon(\phi_{IF}) \\ &= \frac{1}{\lambda_{IF}} (\rho + d\rho + cdt - cdT + d_{trop}) + N_1 - \frac{f_2}{f_1} N_2 + \varepsilon(\phi_{IF}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

dove:

$\lambda_{IF}$  è la lunghezza d'onda corrispondente all'osservabile Ionospheric-Free di 48.44 cm.

$\varepsilon(\phi_{IF})$  è il rumore dato dalla formula 2.20

$$\varepsilon(\phi_{IF}) = 0.01 \sqrt{1 + \frac{f_2^2}{f_1^2}} = 0.0127 \text{ cicli}$$

da cui in metri

$$\lambda_{IF} \varepsilon(\phi_{IF}) = 0.00614 \text{ m}$$

risultando più elevato rispetto al rumore sulla L1 di un fattore di 3.2

La combinazione Ionospheric-Free, oltre a presentare il vantaggio di annullare l'errore ionosferico fino al secondo ordine, consente di calcolare l'errore troposferico differenziale. Passando infatti all'espressione in metri e applicando il procedimento di calcolo delle differenze seconde, dall'equazione 2.34 si ricava

$$\lambda_{IF} \Delta \nabla \phi_{IF} = \Delta \nabla \rho + \Delta \nabla d\rho + \Delta \nabla d_{trop} + \lambda_{IF} \Delta \nabla N_{IF} + \lambda_{IF} \Delta \nabla \varepsilon(\phi_{IF}) \quad (2.35)$$

avendo posto

$$\Delta \nabla N_{IF} = \Delta \nabla N_1 - \frac{f_2}{f_1} \Delta \nabla N_2 \quad (2.36)$$

Dall'equazione 2.35, considerato che per distanze tra i ricevitori maggiori di 10 km il multipath e il rumore strumentale risultano trascurabili rispetto all'errore troposferico e all'errore d'orbita, si ha in definitiva

$$\Delta \nabla d_{trop} = \lambda_{IF} \Delta \nabla \phi_{IF} - \Delta \nabla \rho - \Delta \nabla d\rho - \lambda_{IF} \Delta \nabla N_{IF} \quad (2.37)$$

Questa formula fornisce proprio l'errore troposferico differenziale in funzione della differenza doppia  $\Delta \nabla \phi_{IF}$  dell'osservabile Ionospheric-Free, sulla base del presupposto di adoperare in post-processamento le effemeridi precise dei satelliti, in modo da eliminare il termine  $\Delta \nabla d\rho$ , e di conoscere le ambiguità di fase  $N_1$  ed  $N_2$  nonché le posizioni precise dei punti di stazione.

Adottando il procedimento sopra descritto è stata valutata l'entità dell'errore troposferico differenziale su misure effettuate in Norvegia [Raquet, 1998; Zhang, 1999] e in Brasile [Fortes, 2002]. In entrambi i casi i risultati hanno mostrato un

incremento dello scarto quadratico medio con la distanza, rappresentativo di una riduzione della correlazione spaziale.

La precedente equazione può essere utilizzata anche per stimare l'errore troposferico differenziale residuo dopo aver applicato un opportuno modello. Tradizionalmente col metodo MultiRef™ è stato adoperato il modello di Hopfield modificato [Goad & Goodman, 1974].

## CAPITOLO 3

### IL SISTEMA MULTIREF™

Dal 1996, presso il Dipartimento di Ingegneria Geomatica dell'Università di Calgary, è stato avviato un programma di ricerca sull'approccio multi-reference station, che ha condotto allo sviluppo del sistema di posizionamento GPS Network RTK, noto con il nome di MultiRef™.

Tale metodo ha origine dallo studio effettuato da Raquet [1998]. È a partire da questo lavoro che, nel corso degli ultimi anni, è stata quindi condotta un'intensa attività di ricerca [Lachapelle et al., 2000; Fotopoulos, 2000; Cannon et al., 2001; Fortes, 2002] che ha permesso di far progredire le conoscenze su vari aspetti particolari del problema, tra cui quelli relativi all'implementazione in tempo reale, affrontati in particolare dalla Robertson Enterprises di Calgary [Townsend et al., 1999].

Il sistema MultiRef™, nella versione definitiva per applicazioni in tempo reale, è un sistema altamente integrato, costituito da un complesso di moduli software che interagiscono fra loro. Il sistema attraverso i suoi moduli svolge sostanzialmente tre funzioni fondamentali: risoluzione in tempo reale delle ambiguità fra le stazioni della rete, calcolo delle correzioni, gestione dati in tempo reale.

Ognuna delle suddette funzioni costituisce un argomento rilevante nell'ambito del metodo MultiRef™. Seguendo questa schematizzazione degli argomenti di seguito vengono affrontati gli aspetti teorici e concettuali della nuova metodologia. In particolare l'attenzione viene rivolta al calcolo delle correzioni: questa fase costituisce infatti il punto cruciale dell'approccio multi-reference station.

#### 3.1 Fondamenti matematici

Per quanto riguarda la formulazione dei fondamenti teorici, il metodo MultiRef™, come si è detto, si basa sulla ricerca di Raquet [1998]. In particolare l'importanza di

questo lavoro è dovuta al fatto di aver messo in rilievo il trattamento degli errori differenziali, nel dominio delle osservazioni, per misure provenienti da una rete di stazioni di riferimento GPS.

La stima (predizione) degli errori di misura è stata sviluppata originariamente come problema di ottimizzazione attraverso il ricorso allo stimatore di Bayes. Seguendo tale impostazione è stato quindi proposto l'algoritmo NetAdjust [Raquet & Lachapelle, 2000].

Come è noto in un problema di ottimizzazione si definisce un funzionale, denominato funzionale di costo, e si cerca poi il modello che porta alla ottimizzazione del funzionale.

Nella stima di Bayes in particolare il parametro da stimare  $\mathbf{x}$  viene visto come variabile casuale, mentre il generico stimatore è una funzione dei dati  $\mathbf{Y}$ :

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{e}(\mathbf{Y}) \quad (3.1)$$

e sarà tanto migliore quanto più la variabile casuale  $\hat{\mathbf{x}}$  sarà vicina alla variabile casuale  $\mathbf{x}$  da stimare.

Come funzionale di costo si prende in esame la quantità:

$$B(\mathbf{e}) = E[\|\mathbf{x} - \mathbf{e}(\mathbf{Y})\|^2] \quad (3.2)$$

In particolare la derivazione di Raquet si basa sull'ipotesi che incognita  $\mathbf{x}$  e dato  $\mathbf{Y}$  siano variabili casuali con distribuzione congiuntamente gaussiana e a valor atteso nullo. L'incognita  $\mathbf{x}$  è stimata mediante uno stimatore lineare, uno stimatore cioè avente la struttura:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{e}_{\text{op}}(\mathbf{Y}) = \alpha + \beta\mathbf{Y} \quad (3.3)$$

Nella formulazione definitiva del metodo MultiRef™ [Fortes, 2002], la stima degli errori di misura GPS è stata derivata sulla base del metodo della collocazione usato tradizionalmente in geodesia per ottenere la stima di grandezze collegate al campo gravitazionale terrestre.

A tal proposito si considera il problema della predizione di una sequenza di valori argomentali ordinati secondo un parametro prescelto: osservato l'andamento di una variabile  $x(\cdot)$  in un insieme di punti del suo campo di esistenza, si vuole fare una predizione del valore che assumerà la stessa variabile in punti diversi dai punti di osservazione.

Con riferimento alla teoria dei processi stocastici, il metodo della collocazione si basa sull'ipotesi di fondo che si possa interpretare la serie di dati come campione estratto da una realizzazione di un processo stocastico stazionario.

Per quel che riguarda le nozioni di base sui processi stocastici, considerata una variabile casuale che dipende dall'esito  $\xi$  di un esperimento casuale, un processo stocastico è una sequenza di variabili, ciascuna dipendente dall'esito di un esperimento casuale. Indicando con  $X$  la famiglia di variabili della sequenza, si avrà:

$$X = x(\xi, \theta) \quad (3.4)$$

dove:

$\theta$  è un indice discreto;

$\xi$  è l'esito dell'esperimento casuale.

Fissato  $\theta$ , la funzione  $x(\cdot, \theta)$  è una variabile casuale, mentre, fissato  $\xi$ ,  $x(\xi, \cdot)$  è la sequenza dei valori assunti dal processo in corrispondenza dell'esito  $\xi$  dell'esperimento casuale (realizzazione del processo associata all'esito  $\xi$ ).

Una rappresentazione completa di un processo stocastico consiste nell'assegnare, per ogni intero positivo  $n$ , e per ogni  $n$ -pla di punti  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ , le caratteristiche probabilistiche della  $n$ -pla di variabili casuali  $x(\theta_1), x(\theta_2), \dots, x(\theta_n)$ . Ciò significa specificare la funzione di distribuzione:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = P[x(\theta_1) \leq x_1, x(\theta_2) \leq x_2, \dots, x(\theta_n) \leq x_n] \quad (3.5)$$

Equivalentemente, si può specificare la densità di probabilità:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = \frac{\partial^n F(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} \quad (3.6)$$

Introducendo una descrizione del secondo ordine, ossia se ci si limita a specificare i momenti del processo fino al secondo, il processo verrà descritto dal suo andamento atteso (media del processo stocastico):

$$\mu(\theta) = E[x(\theta)] = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x, \theta) dx \quad (3.7)$$

e dalla funzione di covarianza:

$$\begin{aligned} c(\theta_1, \theta_2) &= E[(x(\theta_1) - \mu(\theta_1))(x(\theta_2) - \mu(\theta_2))] = \\ &= \iint (x_1 - \mu(\theta_1))(x_2 - \mu(\theta_2))f(x_1, x_2, \theta_1, \theta_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Evidentemente si ha che

$$c(\theta, \theta) = \sigma^2(\theta) \quad (3.9)$$

dove:

$\sigma^2(\theta)$  è la varianza del processo stocastico.

Un processo stocastico si dice gaussiano (o normale) se, per ogni scelta di un insieme di indici  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  (con  $n$  qualsiasi), le corrispondenti variabili casuali  $x(\theta_1), x(\theta_2), \dots, x(\theta_n)$  sono congiuntamente gaussiane, vale a dire se il vettore

$$\mathbf{x} = [x(\theta_1) \quad x(\theta_2) \quad \dots \quad x(\theta_n)]^T \quad (3.10)$$

ha una distribuzione gaussiana.

Questa distribuzione è completamente definita quando siano date il valor atteso:

$$E[\mathbf{x}] = \begin{bmatrix} E[x(\theta_1)] \\ E[x(\theta_2)] \\ \vdots \\ E[x(\theta_n)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu(\theta_1) \\ \mu(\theta_2) \\ \vdots \\ \mu(\theta_n) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

e la matrice covarianza  $C$  del vettore considerato  $\mathbf{x}$ :

$$C = \begin{bmatrix} c(\theta_1, \theta_1) & c(\theta_1, \theta_2) & \dots & c(\theta_1, \theta_n) \\ c(\theta_2, \theta_1) & c(\theta_2, \theta_2) & \dots & c(\theta_2, \theta_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(\theta_n, \theta_1) & c(\theta_n, \theta_2) & \dots & c(\theta_n, \theta_n) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Considerato che nelle relazioni 3.11 e 3.12  $\mu(\theta)$  e  $c(\theta_1, \theta_2)$  sono rispettivamente l'andamento atteso e la funzione di covarianza del processo, si conclude che, nel caso dei processi gaussiani, le caratteristiche probabilistiche del processo sono completamente specificate una volta che siano assegnati andamento atteso e funzione di covarianza.

Infine, nell'ipotesi di processo a valor atteso nullo le caratteristiche del processo sono condensate nella sola funzione di covarianza.

In particolare le tecniche dei processi stocastici sono alla base del metodo della collocazione, formulato da Moritz [1980].

A tal riguardo sia  $\mathbf{l}$  un vettore di misure in  $q$  punti discreti:

$$\mathbf{l} = [l_1 \quad l_2 \quad \dots \quad l_q]^T \quad (3.13)$$

e si considera inoltre il vettore  $\mathbf{s}$ , detto segnale:

$$\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_m]^T \quad (3.14)$$

Si assume che entrambi i vettori abbiano media nulla:

$$E[\mathbf{l}] = 0 \quad E[\mathbf{s}] = 0 \quad (3.15)$$

e si introducono le seguenti matrici di covarianza:

$$\begin{aligned} C_{ll} &= [c(l, l)] \\ C_{sl} &= [c(s, l)] \\ C_{ss} &= [c(s, s)] \end{aligned} \quad (3.16)$$



dove:

$C_{II}$  è la matrice di covarianza delle misure;

$C_{ss}$  è la matrice di covarianza del segnale;

$C_{sI}$  è la matrice di cross-covarianza.

Dalla teoria della probabilità è noto che

$$C_{II} = E[(I - E[I])(I - E[I])^T] \quad (3.17)$$

Questa formula in base all'equazione 3.15 diventa:

$$C_{II} = E[\mathbf{II}^T] \quad (3.18)$$

Analogamente per il segnale si ricava:

$$C_{ss} = E[\mathbf{ss}^T] \quad (3.19)$$

mentre per la cross-covarianza si ha:

$$C_{sI} = E[\mathbf{sI}^T] \quad (3.20)$$

Nell'ipotesi che le matrici di covarianza siano a rango pieno e risultino note a priori unitamente al vettore delle misure  $\mathbf{I}$ , il problema da risolvere è quello della predizione del segnale  $\mathbf{s}$ . Con il metodo della collocazione la stima è basata sulla minimizzazione dell'errore quadratico medio in accordo con la categoria degli stimatori a minimi quadrati, in particolare la stima del segnale si ricava a partire dall'equazione:

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{HI} \quad (3.21)$$

In sostanza il problema si traduce nella stima della matrice H di tipo (m, q). Innanzitutto occorre verificare che la stima  $\hat{\mathbf{s}}$ , fornita dall'equazione 3.21, sia una stima non affetta da errore sistematico; difatti si ha:

$$E[\hat{\mathbf{s}}] = E[\mathbf{H}\mathbf{l}] = \mathbf{H}E[\mathbf{l}] = \mathbf{0} = E[\mathbf{s}] \quad (3.22)$$

Considerato il vettore errore di predizione dato dalla seguente equazione:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s} \quad (3.23)$$

e la corrispondente matrice di covarianza:

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = [c(\varepsilon, \varepsilon)] = E[\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^T] \quad (3.24)$$

si cerca quindi la matrice H che minimizza la  $C_{\varepsilon\varepsilon}$ .

Utilizzando le equazioni 3.21 e 3.23 si ricava:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T &= (\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s})(\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s})^T = (\mathbf{H}\mathbf{l} - \mathbf{s})(\mathbf{H}\mathbf{l} - \mathbf{s})^T = \\ &= (\mathbf{H}\mathbf{l} - \mathbf{s})(\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{s}^T) = \mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{s}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{s}^T + \mathbf{s}\mathbf{s}^T \end{aligned} \quad (3.25)$$

Applicando l'operatore E all'espressione 3.25 si ha:

$$\begin{aligned} E[\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T] &= E[\mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{s}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{s}^T + \mathbf{s}\mathbf{s}^T] = \\ &= E[\mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T] - E[\mathbf{s}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T] - E[\mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{s}^T] + E[\mathbf{s}\mathbf{s}^T] = \\ &= \mathbf{H}E[\mathbf{l}\mathbf{l}^T]\mathbf{H}^T - E[\mathbf{s}\mathbf{l}^T]\mathbf{H}^T - \mathbf{H}E[\mathbf{l}\mathbf{s}^T] + E[\mathbf{s}\mathbf{s}^T] \end{aligned} \quad (3.26)$$

Ricordando le equazioni 3.18 e 3.19, e tenendo presente che

$$C_{\mathbf{l}\mathbf{s}} = E[\mathbf{l}\mathbf{s}^T] = E[(\mathbf{s}\mathbf{l}^T)^T] = (E[(\mathbf{s}\mathbf{l}^T)])^T = C_{\mathbf{s}\mathbf{l}}^T \quad (3.27)$$

l'equazione 3.26 assume la seguente forma:

$$\begin{aligned}
C_{\varepsilon\varepsilon} &= E[\mathbf{H}\mathbf{H}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{s}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T - \mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{s}^T + \mathbf{s}\mathbf{s}^T] = \\
&= E[\mathbf{H}\mathbf{H}^T\mathbf{H}^T] - E[\mathbf{s}\mathbf{l}^T\mathbf{H}^T] - E[\mathbf{H}\mathbf{l}\mathbf{s}^T] + E[\mathbf{s}\mathbf{s}^T] = \\
&= \mathbf{H}\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{H}^T - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{H}^T - \mathbf{H}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T + \mathbf{C}_{\text{ss}}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Per ottenere l'espressione definitiva della matrice di covarianza  $C_{\varepsilon\varepsilon}$  occorre sommare e sottrarre all'equazione 3.28 il termine  $\mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}}$ , si ha pertanto:

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} + \mathbf{H}\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{H}^T - \mathbf{H}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{H}^T + \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} \tag{3.29}$$

Da cui se si considera che  $\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1} = \mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\parallel} = \mathbf{I}$ , con  $\mathbf{I}$  matrice unità di ordine  $q$ , si può moltiplicare il quarto e sesto termine del secondo membro dell'equazione 3.29 per  $\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}$ , mentre il quinto termine si moltiplica per  $\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\parallel}$ , l'equazione 3.29 può quindi essere scritta nella seguente forma:

$$\begin{aligned}
C_{\varepsilon\varepsilon} &= \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} + \mathbf{H}\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{H}^T - \mathbf{H}\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{H}^T + \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\parallel}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} = \\
&= \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} + \mathbf{H}\mathbf{C}_{\parallel}(\mathbf{H}^T - \mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T) - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\parallel}(\mathbf{H}^T - \mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T) = \\
&= \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} + (\mathbf{H}\mathbf{C}_{\parallel} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\parallel})(\mathbf{H}^T - \mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T) = \\
&= \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} + (\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1})\mathbf{C}_{\parallel}(\mathbf{H}^T - \mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{sl}}^T) = \\
&= \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} + (\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1})\mathbf{C}_{\parallel}(\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1})^T
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Analizzando l'equazione 3.30, si osserva in particolare che l'ultimo membro può essere espresso come somma di due matrici, e cioè:

$$\mathbf{A} = \mathbf{C}_{\text{ss}} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1}\mathbf{C}_{\text{ls}} \tag{3.31}$$

$$\mathbf{B} = (\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1})\mathbf{C}_{\parallel}(\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\text{sl}}\mathbf{C}_{\parallel}^{-1})^T \tag{3.32}$$

In definitiva, dall'equazione 3.31 si vede che la matrice  $\mathbf{A}$  non dipende da  $\mathbf{H}$ , pertanto la matrice  $\mathbf{H}$  che minimizza la matrice di covarianza  $C_{\varepsilon\varepsilon}$  degli errori di predizione sarà quella che rende nulla la matrice  $\mathbf{B}$ , e cioè:

$$H = C_{sl} C_{ll}^{-1} \quad (3.33)$$

Sostituendo l'equazione 3.33 nella 3.21, si ottiene quindi la forma finale della stima del segnale  $\hat{\mathbf{s}}$ , basata sulla conoscenza del vettore delle misure  $\mathbf{l}$  e delle matrici di covarianza  $C_{sl}$  e  $C_{ll}$ :

$$\hat{\mathbf{s}} = C_{sl} C_{ll}^{-1} \mathbf{l} \quad (3.34)$$

La matrice di covarianza del segnale predetto, si ottiene sostituendo l'espressione di  $H$ , data dalla 3.33, nell'equazione 3.30, da cui:

$$C_{\hat{\mathbf{s}}\hat{\mathbf{s}}} = C_{ss} - C_{sl} C_{ll}^{-1} C_{ls} \quad (3.35)$$

### 3.2 Calcolo delle correzioni MultiRef<sup>TM</sup> con la collocazione

La collocazione consente un'analisi statistica delle correlazioni esistenti tra gli errori di misura GPS. Il presupposto è quello di trattare i dati disponibili dalla rete delle stazioni di riferimento per predire gli errori di misura  $\delta \mathbf{l}_{cp}$  per il ricevitore utente in un generico punto all'interno della rete.

Nel caso specifico del metodo MultiRef<sup>TM</sup> le misure sono rappresentate dagli errori differenziali: si considera un set delle differenze doppie linearmente indipendenti scelto fra tutte le baseline relative alle stazioni della rete. Ricorrendo all'osservabile misura-meno-distanza  $\bar{\Phi}$ , definita dall'equazione 2.3 come differenza fra la distanza satellite-ricevitore misurata  $\Phi$  e quella geometrica  $\rho$ , l'algoritmo NetAdjust in particolare fa riferimento all'equazione 2.7, che viene qui di seguito riportata:

$$\Delta \nabla \bar{\Phi} = \Delta \nabla d\rho - \Delta \nabla d_{ion} + \Delta \nabla d_{trop}^r + \lambda \Delta \nabla N + \Delta \nabla \varepsilon(\Phi) \quad (3.36)$$

A partire da questa equazione, secondo il procedimento illustrato nel capitolo 2, gli errori differenziali fra le stazioni della rete si ottengono tramite l'equazione 2.14:

$$\mathbf{B}\bar{\Phi} - \lambda\Delta\nabla\mathbf{N} = \Delta\nabla\delta\mathbf{l} = \mathbf{B}\delta\mathbf{l} \quad (3.37)$$

in cui i termini al primo membro si ritengono noti a priori.

Considerati quindi come dati in ingresso gli errori differenziali sopra definiti, la soluzione del problema di stima degli errori di misura per il ricevitore utente può essere derivata sulla base del metodo della collocazione [Fortes, 2002].

Innanzitutto occorre conoscere le caratteristiche probabilistiche del processo; per quanto concerne l'andamento atteso si può affermare, grazie ai risultati sperimentali mostrati da Raquet [1998] a riguardo degli errori differenziali, che si tratta di un processo gaussiano a media nulla. Il processo sarà quindi completamente descritto dalla corrispondente funzione di covarianza.

Nell'ipotesi quindi che sia nota la funzione di covarianza del processo, la stima degli errori di misura per il ricevitore utente si ottiene applicando l'equazione 3.34, pertanto si ha:

$$\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp} = \mathbf{C}_{\delta\mathbf{l}_{cp},\Delta\nabla\delta\mathbf{l}} \mathbf{C}_{\Delta\nabla\delta\mathbf{l}}^{-1} \Delta\nabla\delta\mathbf{l} \quad (3.38)$$

Utilizzando inoltre l'equazione 3.37 ed applicando la legge di propagazione della covarianza, si ha:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\Delta\nabla\delta\mathbf{l}} &= E[(\Delta\nabla\delta\mathbf{l})(\Delta\nabla\delta\mathbf{l})^T] = E[(\mathbf{B}\delta\mathbf{l})(\mathbf{B}\delta\mathbf{l})^T] = \\ &= E[\mathbf{B}\delta\mathbf{l}\delta\mathbf{l}^T\mathbf{B}^T] = \mathbf{B}E[\delta\mathbf{l}\delta\mathbf{l}^T]\mathbf{B}^T = \mathbf{B}\mathbf{C}_{\delta\mathbf{l}}\mathbf{B}^T \end{aligned} \quad (3.39)$$

Ancora applicando la legge di propagazione della covarianza, si ottiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\delta\mathbf{l}_{cp},\Delta\nabla\delta\mathbf{l}} &= E[(\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp})(\Delta\nabla\delta\mathbf{l})^T] = E[(\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp})(\mathbf{B}\delta\mathbf{l})^T] = \\ &= E[(\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp})(\delta\mathbf{l}^T\mathbf{B}^T)] = E[\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp}\delta\mathbf{l}^T]\mathbf{B}^T = \mathbf{C}_{\delta\mathbf{l}_{cp},\delta\mathbf{l}}\mathbf{B}^T \end{aligned} \quad (3.40)$$

Sostituendo le equazioni 3.39 e 3.40 nella 3.38, e considerando inoltre l'equazione 3.37, si ottiene la forma finale della soluzione MultiRef<sup>TM</sup>:

$$\hat{\delta\mathbf{i}}_{cp} = C_{\delta\mathbf{i}_{cp},\delta\mathbf{i}} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} C_{\delta\mathbf{i}} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{B} \bar{\Phi} - \lambda \Delta \nabla \mathbf{N})^T \quad (3.41)$$

dove:

$\hat{\delta\mathbf{i}}_{cp}$  è il vettore delle correzioni delle misure di fase effettuate dal ricevitore utente, in metri;

$\hat{\delta\mathbf{i}}$  è il vettore delle correzioni delle misure di fase effettuate dalle stazioni di riferimento, in metri;

$\mathbf{B}$  è la matrice delle differenze doppie costituita di valori +1, -1 e 0 ( $\mathbf{B} = \partial \Delta \nabla \Phi / \partial \Phi$ );

$C_{\delta\mathbf{i}}$  è la matrice di covarianza per le misure di fase effettuate dalle stazioni di riferimento;

$C_{\delta\mathbf{i}_{cp},\delta\mathbf{i}}$  è la matrice di cross-covarianza.

La soluzione del problema è completamente definita generando anche le correzioni alle osservazioni provenienti dalle stazioni di riferimento. Queste correzioni vengono derivate direttamente applicando l'equazione 3.41 alle stazioni della rete, da cui si ha:

$$\hat{\delta\mathbf{i}} = C_{\delta\mathbf{i}} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} C_{\delta\mathbf{i}} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{B} \bar{\Phi} - \lambda \Delta \nabla \mathbf{N}) \quad (3.42)$$

Le equazioni 3.41 e 3.42 costituiscono la formulazione finale del metodo MultiRef<sup>TM</sup>. Come si vede, benché si parta da misure differenziali, esse corrispondono a misure non differenziate: presentano dunque il vantaggio di poter essere direttamente applicate alle misure grezze effettuate rispettivamente dal ricevitore utente e dalle stazioni di riferimento.

Si osserva che l'applicazione di queste formule, oltre alle coordinate precise delle stazioni e alle differenze doppie delle ambiguità intere fra le stazioni di riferimento,

richiede note a priori le matrici di covarianza  $C_{\delta l}$  e  $C_{\delta l_{cp}, \delta l}$ , tramite la definizione della funzione di covarianza del processo.

Per quanto riguarda gli elementi delle matrici  $C_{\delta l}$  e  $C_{\delta l_{cp}, \delta l}$ , essi sono le covarianze fra le osservabili  $\delta l_a^x, \delta l_b^y$ , dove a e b sono i ricevitori, x e y sono i satelliti, espresse dalla seguente equazione:

$$c_{ab}^{xy} = E[(\delta l_a^x)(\delta l_b^y)] \quad (3.43)$$

Al fine di derivare queste quantità, innanzitutto occorre ricavare l'espressione dell'osservabile  $\delta l$ . Essa, in accordo con l'equazione 3.37, è data dalla differenza tra l'osservabile misura-meno-distanza e l'ambiguità di fase. Sulla base dell'equazione fondamentale 2.1, si ottiene quindi:

$$\delta l = \Phi - \rho - \lambda N = d\rho + c(dt - dT) - d_{ion} + d_{trop}^r + \varepsilon(\Phi) \quad (3.44)$$

Questa equazione può essere riscritta trascurando gli errori di orologio del satellite e del ricevitore dal momento che vengono eliminati nel procedimento differenziale, e distinguendo gli errori di misura correlati  $d\rho, d_{ion}, d_{trop}^r$ , da quelli incorrelati  $\varepsilon(\Phi)$ , pertanto la 3.44 diventa:

$$\delta l = \delta_c l + \delta_u l \quad (3.45)$$

Si osserva inoltre che nella formulazione originaria dell'algoritmo NetAdjust è stato introdotto il punto di riferimento  $p_0$ , denominato zero-point, e definito in modo tale che risulta:

$$\delta_c l(p, p_0) = \delta_c l(p) - \delta_c l(p_0) \quad (3.46)$$

Sulla base di questa relazione, l'equazione 3.45 assume pertanto la seguente forma:

$$\delta l = \delta_c l(p, p_0) + \delta_c l(p_0) + \delta_u l \quad (3.47)$$

Considerato che il termine  $\delta_c l(p_0)$  viene eliminato nel procedimento differenziale, la formula finale dell'osservabile  $\delta l$  diventa:

$$\delta l = \delta_c l(p, p_0) + \delta_u l \quad (3.48)$$

Sostituendo l'equazione 3.48 nella 3.43, si ottiene quindi:

$$\begin{aligned} c_{ab}^{xy} &= E\left[\left(\delta_c l_a^x(p_a, p_0) + \delta_u l_a^x\right)\left(\delta_c l_b^y(p_b, p_0) + \delta_u l_b^y\right)\right] = \\ &= E\left[\delta_c l_a^x(p_a, p_0)\delta_c l_b^y(p_b, p_0) + \left(\delta_u l_a^x\right)\delta_c l_b^y(p_b, p_0) + \right. \\ &\quad \left. + \delta_c l_a^x(p_a, p_0)\left(\delta_u l_b^y\right) + \left(\delta_u l_a^x\right)\left(\delta_u l_b^y\right)\right] \end{aligned} \quad (3.49)$$

Considerato che non c'è correlazione tra  $\delta_c l(p, p_0)$  e  $\delta_u l$ , l'equazione 3.49 si riduce nella seguente:

$$\begin{aligned} c_{ab}^{xy} &= E\left[\delta_c l_a^x(p_a, p_0)\delta_c l_b^y(p_b, p_0) + \left(\delta_u l_a^x\right)\left(\delta_u l_b^y\right)\right] = \\ &= E\left[\delta_c l_a^x(p_a, p_0)\delta_c l_b^y(p_b, p_0)\right] + E\left[\left(\delta_u l_a^x\right)\left(\delta_u l_b^y\right)\right] \end{aligned} \quad (3.50)$$

In definitiva l'equazione 3.50 si specifica nelle seguenti forme:

$$c_{ab}^{xy} = \begin{cases} E\left[\delta_c l_a^x(p_a, p_0)\delta_c l_b^y(p_b, p_0) + \left(\delta_u l_a^x\right)\left(\delta_u l_b^y\right)\right] & \text{se } a = b \text{ e } x = y \\ E\left[\delta_c l_a^x(p_a, p_0)\delta_c l_b^y(p_b, p_0)\right] & \text{se } a \neq b \text{ e } x = y \\ 0 & \text{in tutti gli altri casi} \end{cases} \quad (3.51)$$

Si osserva che la prima delle equazioni 3.51 fornisce le varianze delle misure; la seconda esprime la covarianza delle misure effettuate da due differenti ricevitori dallo stesso satellite, in essa sono assenti gli errori  $\delta_u l$ , poiché incorrelati tra ricevitori differenti; tutti gli altri elementi della matrice sono nulli, assumendo per  $x \neq y$ , cioè tra satelliti differenti, incorrelati gli errori  $\delta_c l(p, p_0)$ . Per quanto riguarda quest'ultima ipotesi potrebbe tuttavia essere necessario includere le correlazioni tra satelliti, in modo da sfruttare le misure provenienti dai satelliti con maggiore elevazione e migliorare quindi, soprattutto ai fini dei procedimenti in tempo reale, le prestazioni ottenibili al sorgere dei satelliti, in accordo con quanto verrà mostrato nel paragrafo 3.4.



Per quanto riguarda il calcolo delle matrici di covarianza delle stime  $\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp}$  e  $\hat{\delta\mathbf{l}}$ , si ottiene dall'equazione 3.35 la seguente formula:

$$C_{\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp}} = C_{\delta\mathbf{l}_{cp}} - C_{\delta\mathbf{l}_{cp},\Delta\nabla\delta\mathbf{l}} C_{\Delta\nabla\delta\mathbf{l}}^{-1} C_{\Delta\nabla\delta\mathbf{l},\delta\mathbf{l}_{cp}} \quad (3.52)$$

dove:

$C_{\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp}}$  è la matrice di covarianza degli errori per il ricevitore utente.

Considerando le equazioni 3.39 e 3.40, oltre alla relazione 3.27, la 3.52 assume la seguente forma:

$$C_{\hat{\delta\mathbf{l}}_{cp}} = C_{\delta\mathbf{l}_{cp}} - C_{\delta\mathbf{l}_{cp},\delta\mathbf{l}} B^T (B C_{\delta\mathbf{l}} B^T)^{-1} B C_{\delta\mathbf{l}_{cp},\delta\mathbf{l}}^T \quad (3.53)$$

La matrice di covarianza degli errori alle stazioni di riferimento si ricava direttamente dall'equazione 3.53, ottenendo la seguente espressione:

$$C_{\hat{\delta\mathbf{l}}} = C_{\delta\mathbf{l}} - C_{\delta\mathbf{l}} B^T (B C_{\delta\mathbf{l}} B^T)^{-1} B C_{\delta\mathbf{l}} \quad (3.54)$$

Infine per quanto riguarda la stima delle quantità di cui vanno corrette le osservazioni effettuate dalle stazioni di riferimento, è interessante notare l'analogia con la formulazione del metodo dei minimi quadrati nel caso delle osservazioni condizionate: in particolare si confronta la stima delle correzioni relativa a questo caso con quella fornita dall'equazione 3.42. Con riferimento al modello delle osservazioni condizionate, si ha:

$$\hat{\mathbf{r}} = -C_1 B^T (B C_1 B^T)^{-1} \mathbf{w} \quad (3.55)$$

dove:

- $\hat{\mathbf{r}}$  è il vettore delle stime delle correzioni;
- $C_1$  è la matrice di covarianza delle osservazioni;
- $B$  è la matrice disegno, i cui elementi sono i coefficienti delle equazioni di condizione;
- $\mathbf{w}$  è il vettore degli errori di chiusura.

Dal confronto dell'equazione 3.42 con la 3.55 è evidente la coincidenza tra le due formule: si osserva che la differenza di segno indica che nel primo caso vengono stimati gli errori mentre nel secondo le correzioni, inoltre il termine  $B\bar{\Phi} - \lambda\Delta\nabla N$  corrisponde al vettore degli errori di chiusura.

Tale analogia risulta utile per la derivazione della stima della varianza dell'unità di peso  $\sigma_0^2$ , si ha infatti:

$$\sigma_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{r}}^T C_{\delta\mathbf{l}}^{-1} \hat{\mathbf{r}}}{v} \quad (3.56)$$

dove:

- $\hat{\mathbf{r}}$  è uguale a  $-\delta\hat{\mathbf{l}}$ ;
- $v$  è il numero delle equazioni di condizione, che nel caso del metodo MultiRef™ risulta uguale al numero totale delle differenze doppie indipendenti, formate utilizzando le osservazioni complessive provenienti dalla rete.

### 3.3 Funzione di covarianza del metodo MultiRef™

Come si è visto la conoscenza della funzione di covarianza costituisce un requisito fondamentale del metodo MultiRef™. A tal proposito Raquet [1998] ha introdotto sia una opportuna forma funzionale sia un procedimento per la stima empirica dei coefficienti della funzione a partire dai dati disponibili dalle operazioni di misura. Successivamente Fortes [2002] ha sviluppato un notevole lavoro di ricerca

finalizzato ad ottimizzare il metodo, conducendo in particolare un'indagine approfondita proprio sugli aspetti inerenti la definizione della funzione di covarianza. Facendo riferimento ai succitati lavori di seguito vengono richiamati i concetti fondamentali riguardanti tale argomento. Si osserva che questa trattazione è impostata sull'ipotesi di assenza di correlazione tra satelliti differenti.

Il metodo MultiRef<sup>TM</sup> si basa sull'utilizzo di una funzione di covarianza multidimensionale, espressa nella seguente forma generale:

$$c_{ab}^{xy} = f(p_a, p_b, p_0, \varepsilon, a, b) \quad (3.57)$$

dove:

$p_a, p_b$  sono le posizioni dei ricevitori;

$p_0$  è il punto di riferimento zero-point;

$\varepsilon$  è la media delle elevazioni del satellite x e y, rispettivamente  $\varepsilon^x$  ed  $\varepsilon^y$ ;

a, b sono i ricevitori utilizzati.

L'equazione 3.57 viene specificata tramite la funzione di covarianza allo zenith, ricorrendo ad una mapping function che esprime la relazione tra la varianza e la covarianza allo zenith con quelle alle elevazioni dei satelliti considerati, si ha pertanto:

$$c_{ab}^{xy} = \mu^2(\varepsilon) f_z(p_a, p_b, p_0, a, b) \quad (3.58)$$

dove:

$\mu(\varepsilon)$  è il valore della mapping function per la media delle elevazioni del satellite x e y;

Per quanto riguarda la mapping function è stata introdotta la seguente relazione:

$$\mu(\varepsilon) = \frac{1}{\text{sen}\varepsilon} + k_\mu \left( 0.53 - \frac{\varepsilon}{180^\circ} \right)^3 \quad (3.59)$$

dove:

$k_\mu$  è un coefficiente da determinare.

La stima di questo coefficiente si effettua per un intervallo di tempo prefissato tramite il seguente procedimento:

- calcolo delle misure  $\Delta\nabla\delta l$ , definite dall'equazione 3.37, per tutte le baseline della rete;
- eliminazione delle differenze doppie in cui i satelliti sono al di sotto dei  $45^\circ$ ;
- raggruppamento dei valori di  $\Delta\nabla\delta l$ , secondo l'elevazione  $\varepsilon^{\text{low}}$  del satellite più basso, in classi di ampiezza di  $3^\circ$ ;
- calcolo della varianza  $E[(\Delta\nabla\delta l)^2]$  per ognuna delle classi sopra definite;
- calcolo del valore  $\mu(\varepsilon^{\text{high}})$  come media, sull'intervallo di tempo di riferimento, dei valori ottenuti dalla seguente funzione

$$\mu_{\text{nominal}}(\varepsilon) = \frac{F_I(\varepsilon) + F_T(\varepsilon)}{2} \quad (3.60)$$

dove:

$\varepsilon$  è l'elevazione del satellite più alto per ogni differenza doppia;

$$F_I(\varepsilon) = 1 + 16 \cdot \left( 0.53 - \frac{\varepsilon}{180^\circ} \right)^3 \quad \begin{array}{l} \text{mapping function per la ionosfera} \\ \text{[Klobuchar, 1996]} \end{array} \quad (3.61)$$

$$F_T(\varepsilon) = \frac{1}{\text{sen}\varepsilon} \quad \begin{array}{l} \text{mapping function per la troposfera} \\ \text{[Spilker Jr, 1996]} \end{array} \quad (3.62)$$

- calcolo del valore  $\mu(\varepsilon^{\text{low}})$  per ogni intervallo tramite l'equazione

$$\mu(\varepsilon^{\text{low}}) = \sqrt{\frac{2E[(\Delta\nabla\delta l)^2]}{E[(\Delta\nabla\delta l_z)^2]} - \mu^2(\varepsilon^{\text{high}})} \quad (3.63)$$

dove:

$$E[(\Delta\nabla\delta l_z)^2] = g(90^\circ) \quad \text{con} \quad g(\varepsilon) = n_1 F_I(\varepsilon) + n_2 F_T(\varepsilon) \quad (3.64)$$

$n_1$  ed  $n_2$  sono coefficienti da stimare con compensazione ai minimi quadrati utilizzando la varianza di ogni classe come osservazione;

- stima ai minimi quadrati di  $k_\mu$  sulla base del modello fornito dall'equazione 3.59, utilizzando come osservazioni i valori  $\mu(\varepsilon^{\text{low}})$ , ricavati al punto precedente.

Per quanto riguarda la funzione di covarianza allo zenith, si osserva che la formulazione è stata derivata distinguendo la parte correlata da quella incorrelata; la funzione  $f_z$  viene quindi espressa tramite due differenti funzioni. Di conseguenza l'equazione 3.58 assume la seguente forma:

$$c_{ab}^{xy} = \mu^2(\varepsilon) [f_{z_c}(p_a, p_b, p_0) + f_{z_u}(\text{rec})] \quad (3.65)$$

dove:

$f_{z_c}, f_{z_u}$  sono rispettivamente le funzioni corrispondenti agli errori correlati e a quelli incorrelati; si osserva in particolare che il termine  $f_{z_u}$  è presente soltanto nel caso in cui  $a=b$ , ed è una costante per ogni stazione.

La definizione della funzione di covarianza nel caso del metodo MultiRef™, richiede quindi la conoscenza della forma funzionale sia della funzione  $f_{z_c}$ , sia della funzione  $f_{z_u}$ .

Per quel che riguarda la funzione  $f_{z_c}$ , associata agli errori correlati, facendo riferimento all'equazione 3.51, si può esprimere la seguente forma:

$$f_{z_c}(p_a, p_b, p_0) = E[\delta_c l_a(p_a, p_0)_z \delta_c l_b(p_b, p_0)_z] \quad (3.66)$$

Questa equazione, utilizzando la 3.46, diventa:

$$\begin{aligned} f_{z_c}(p_a, p_b, p_0) &= E[(\delta_c l_a(p_a)_z - \delta_c l_0(p_0)_z)(\delta_c l_b(p_b)_z - \delta_c l_0(p_0)_z)] = \\ &= E[\delta_c l_a(p_a)_z \delta_c l_b(p_b)_z - \delta_c l_0(p_0)_z \delta_c l_b(p_b)_z + \\ &\quad - \delta_c l_a(p_a)_z \delta_c l_0(p_0)_z + (\delta_c l_0(p_0)_z)^2] \\ &= E\left[\frac{1}{2}(\delta_c l_a(p_a)_z - \delta_c l_0(p_0)_z)^2 + \frac{1}{2}(\delta_c l_b(p_b)_z - \delta_c l_0(p_0)_z)^2 + \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}(\delta_c l_a(p_a)_z - \delta_c l_b(p_b)_z)^2\right] \\ &= \frac{1}{2}E[(\delta_c l_a(p_a)_z - \delta_c l_0(p_0)_z)^2] + \frac{1}{2}E[(\delta_c l_b(p_b)_z - \delta_c l_0(p_0)_z)^2] + \\ &\quad - \frac{1}{2}E[(\delta_c l_a(p_a)_z - \delta_c l_b(p_b)_z)^2] \end{aligned} \quad (3.67)$$

Introducendo la seguente funzione:

$$\sigma_{c_z}^2(p_m, p_n) = E[(\delta_c l(p_m)_z - \delta_c l(p_n)_z)^2] \quad (3.68)$$

dove:

$\sigma_{c_z}^2$  è la varianza dell'errore differenziale tra due punti arbitrari  $p_m$  e  $p_n$ .

in definitiva dall'espressione 3.67 si ricava la forma funzionale per la funzione di covarianza associata agli errori correlati, data dalla seguente equazione:

$$f_{z_c}(p_a, p_b, p_0) = \frac{\sigma_{c_z}^2(p_a, p_0) + \sigma_{c_z}^2(p_b, p_0) - \sigma_{c_z}^2(p_a, p_b)}{2} \quad (3.69)$$

Dall'esame dell'equazione 3.69 si nota che la conoscenza della funzione di covarianza associata agli errori correlati corrisponde a specificare la funzione  $\sigma_{c_z}^2(p_m, p_n)$ . Occorre in sostanza dare indicazioni sulla maggiore o minore dispersione degli errori differenziali. In particolare considerato che la correlazione degli errori di misura GPS si riduce con la distanza, nello sviluppo del metodo MultiRef™ si è scelto di interpolare la varianza degli errori differenziali definita dalla seguente relazione:

$$\sigma_{c_z}^2(p_m, p_n) = k_1 d + k_2 d^2 \quad (3.70)$$

dove:

$d$  è la distanza tra i punti  $p_m$  e  $p_n$ ;

$k_1, k_2$  sono i coefficienti che vanno determinati a partire dai dati disponibili dalle operazioni di misura.

Per quel che riguarda la funzione  $f_{z_u}$ , associata agli errori incorrelati, con riferimento all'equazione 3.51, si ha:

$$f_{z_u}(a) = E\left[\left((\delta_u 1_a)_z\right)^2\right] = \sigma_{u_z}^2(a) \quad (3.71)$$

Anche la varianza  $\sigma_{u_z}^2$ , come i coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$ , va stimata utilizzando i dati disponibili dalle operazioni di misura.

La stima di  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\sigma_{u_z}^2$  viene effettuata mediante compensazione ai minimi quadrati, sulla base del seguente procedimento:

- calcolo delle misure  $\Delta\nabla\delta l$ , definite dall'equazione 3.37, per tutte le baseline della rete, utilizzando le misure grezze relative ad un assegnato intervallo di tempo;
- riduzione delle misure  $\Delta\nabla\delta l$  allo zenith tramite la seguente equazione:

$$\Delta\nabla\delta l_{ab_z}^{xy} = \Delta\nabla\delta l_{ab}^{xy} \left[ \frac{\mu(\epsilon^x) + \mu(\epsilon^y)}{2} \right]^{-1} \quad (3.72)$$

dove:

$\mu(\epsilon^x)$ ,  $\mu(\epsilon^y)$  sono i valori assunti dalla mapping function rispettivamente per l'elevazione del satellite x e y;

- stima ai minimi quadrati di  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\sigma_{u_z}^2$  sulla base del seguente modello:

$$E\left[\left(\Delta\nabla\delta l_{ab_z}^{xy}\right)^2\right] = 2(k_1 d_{ab} + k_2 d_{ab}^2) + 2\sigma_{u_z}^2(a) + 2\sigma_{u_z}^2(b) \quad (3.73)$$

Per quanto riguarda in particolare la ricerca presentata in questa tesi, sono state adottate stime dei coefficienti della funzione di covarianza relative a dati reali provenienti da precedenti sperimentazioni (tabella 3.1): è stato infatti mostrato [Fortes, 2002] che una variazione di questi valori non comporta un impatto significativo sui risultati, soprattutto nel caso di baseline di lunghezza non elevata, con valori intorno ai 50 km.

**Tabella 3.1: Valori dei coefficienti della funzione di covarianza adottati nella sperimentazione sulla rete Campania Network**

<b>Coefficiente</b>	<b>L1</b>	<b>WL</b>
$k_1$ (cicli <sup>2</sup> /km)	5.90069e-04	3.04498e-05
$k_2$ (cicli <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	1.16116e-06	2.90428e-08
$k_\mu$	18.005	27.485

Tuttavia è evidente che per una realizzazione definitiva di una rete MultiRef™ si ritiene opportuno effettuare, in fase di istituzione del servizio, un calcolo ad hoc dei coefficienti, da ripetere poi preferibilmente tre volte nell'arco degli undici anni del ciclo solare, in corrispondenza cioè delle condizioni di massima, media e minima attività.

### **3.4 Risoluzione delle ambiguità di fase fra le stazioni della rete**

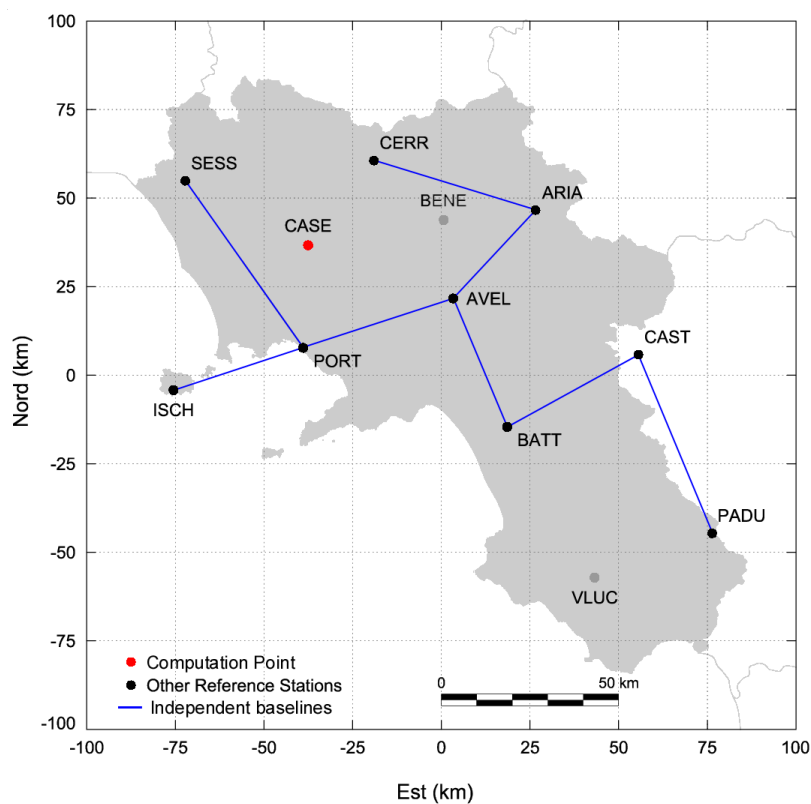
Il calcolo delle ambiguità di fase fra le stazioni della rete costituisce un punto fondamentale per l'applicazione del sistema MultiRef™: questa funzione viene eseguita in tempo reale tramite l'algoritmo NetAR (Network Ambiguity Resolution) [Sun et al., 1999].

Si osserva che i procedimenti attinenti alle ambiguità tra la rete rappresentano certamente uno degli aspetti più delicati ed importanti per quanto riguarda l'implementazione del MultiRef™ nella modalità RTK.

A tal proposito, con riferimento alla rete test Campania Network, si è proceduto a valutare il comportamento del metodo in relazione alle suddette problematiche.



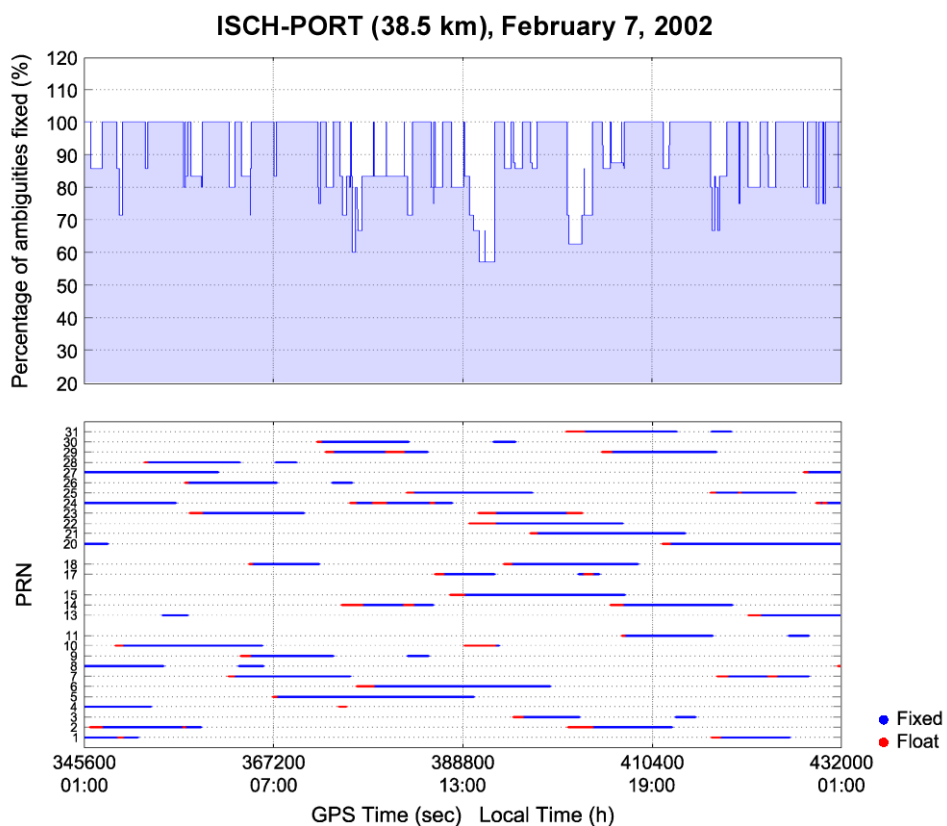
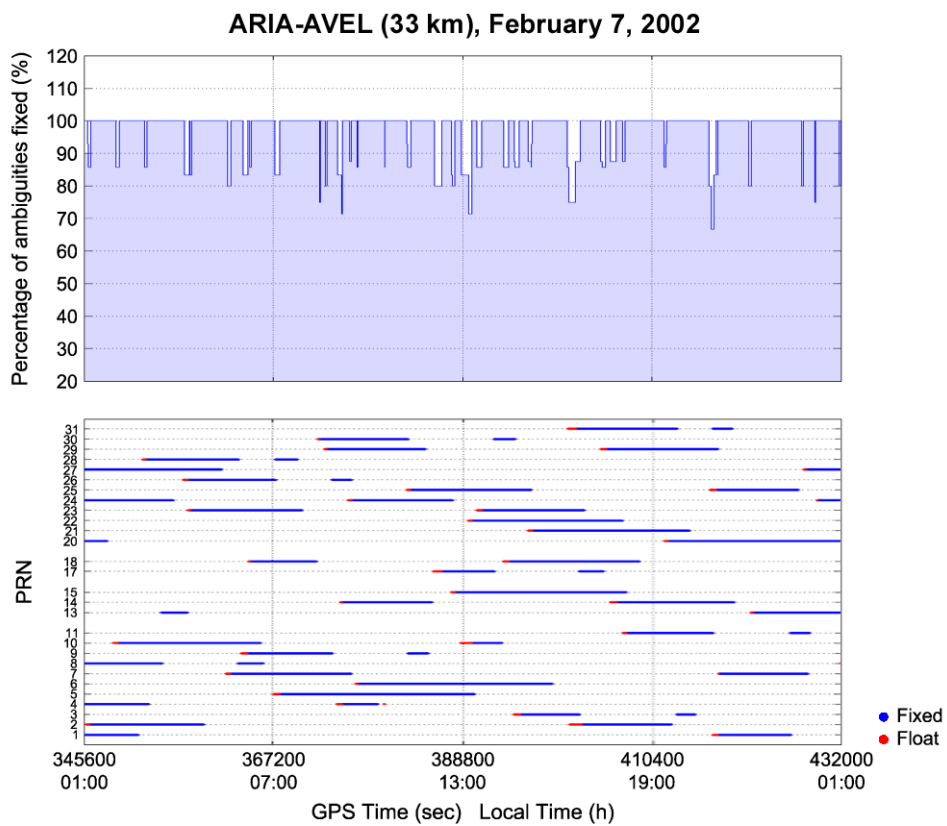
In particolare, individuato un gruppo di baseline indipendenti (figura 3.1),



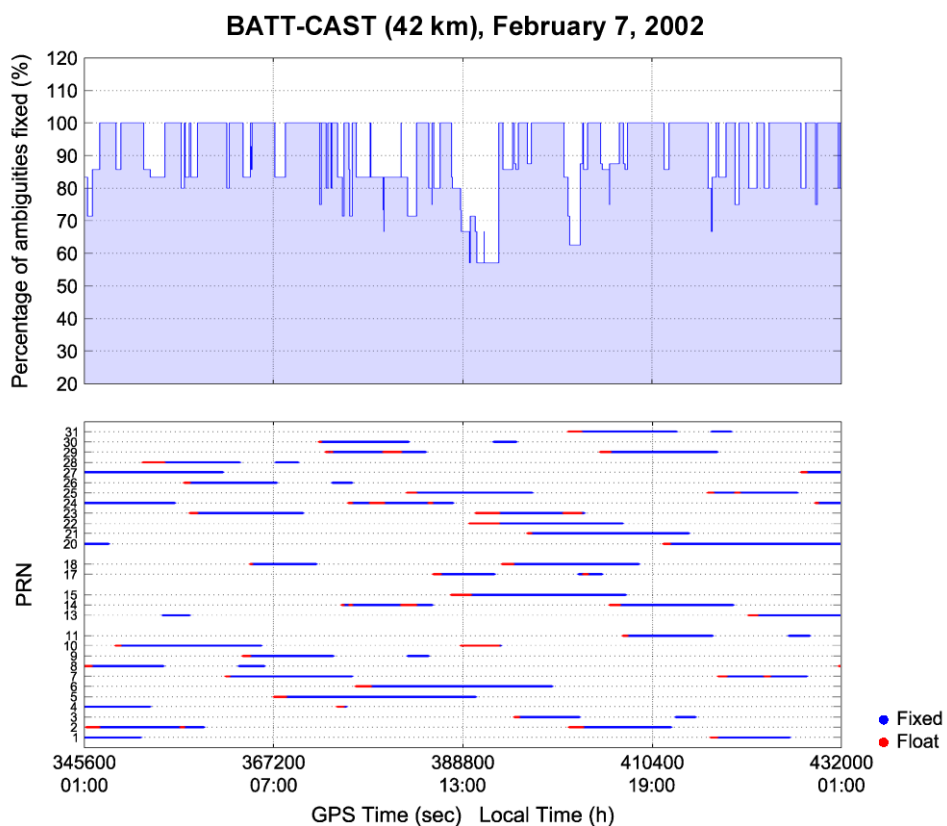
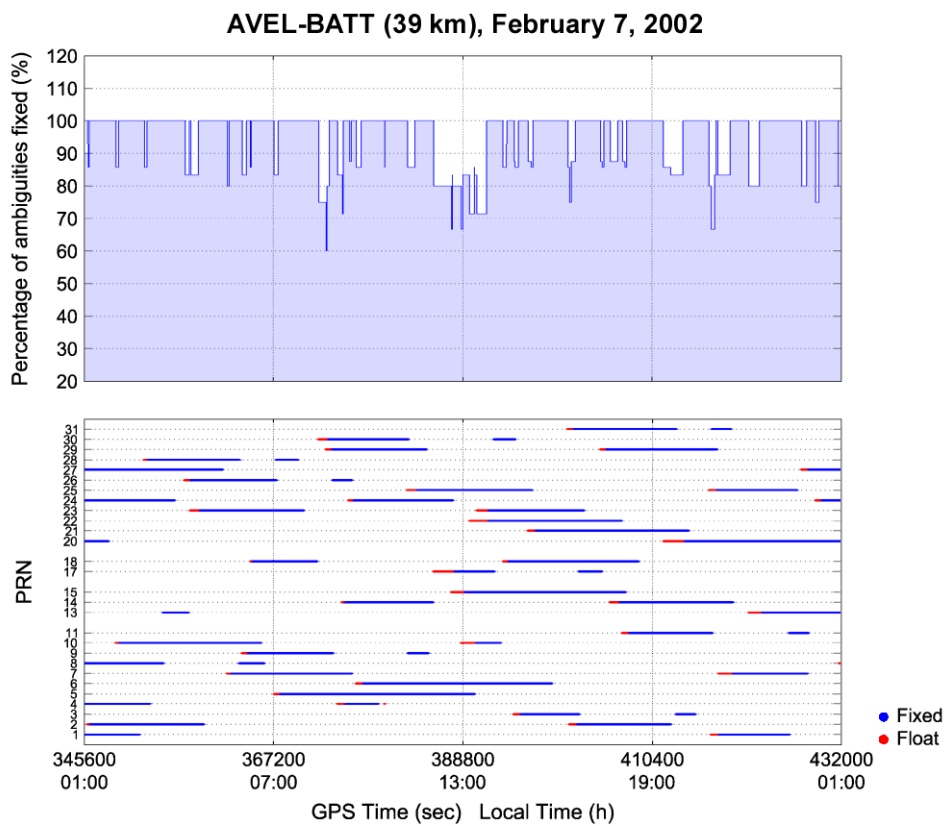
**Figura 3.1: Schema di rete utilizzato per la valutazione del procedimento di risoluzione in tempo reale delle ambiguità di fase fra le stazioni di riferimento<sup>1</sup>**

è stata condotta un'analisi su 24 ore di dati, per il giorno 7 febbraio 2002, incentrata sul calcolo delle percentuali di ambiguità fissate e sui relativi tempi di fissaggio; i risultati baseline per baseline vengono riportati nelle figure 3.2-3.5.

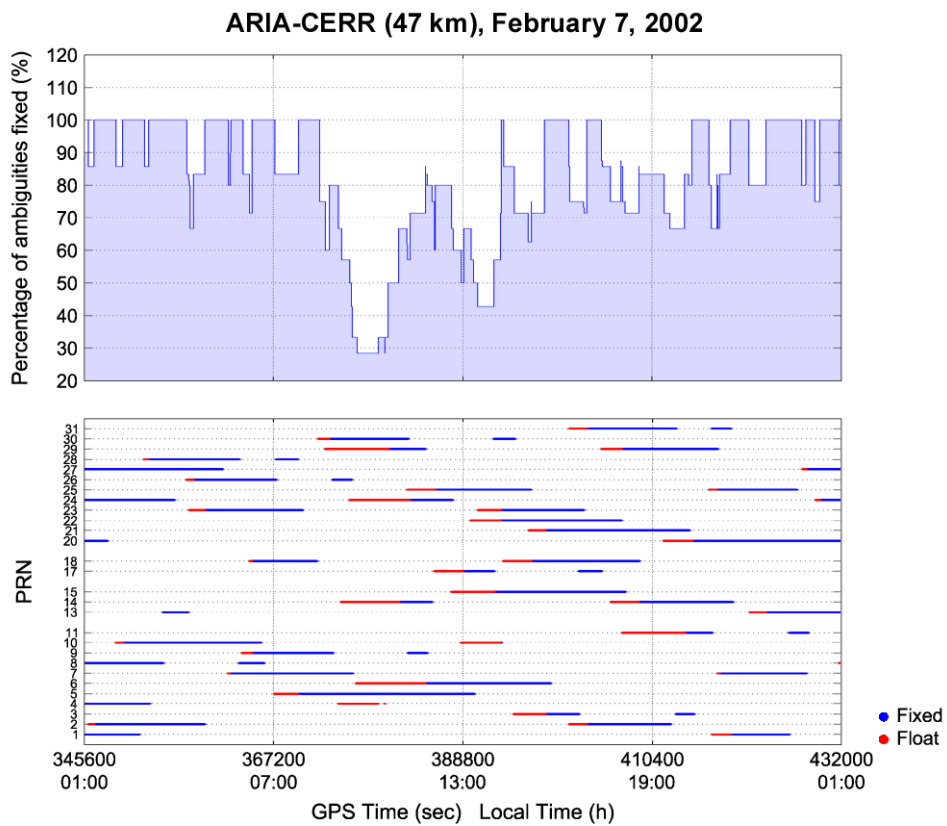
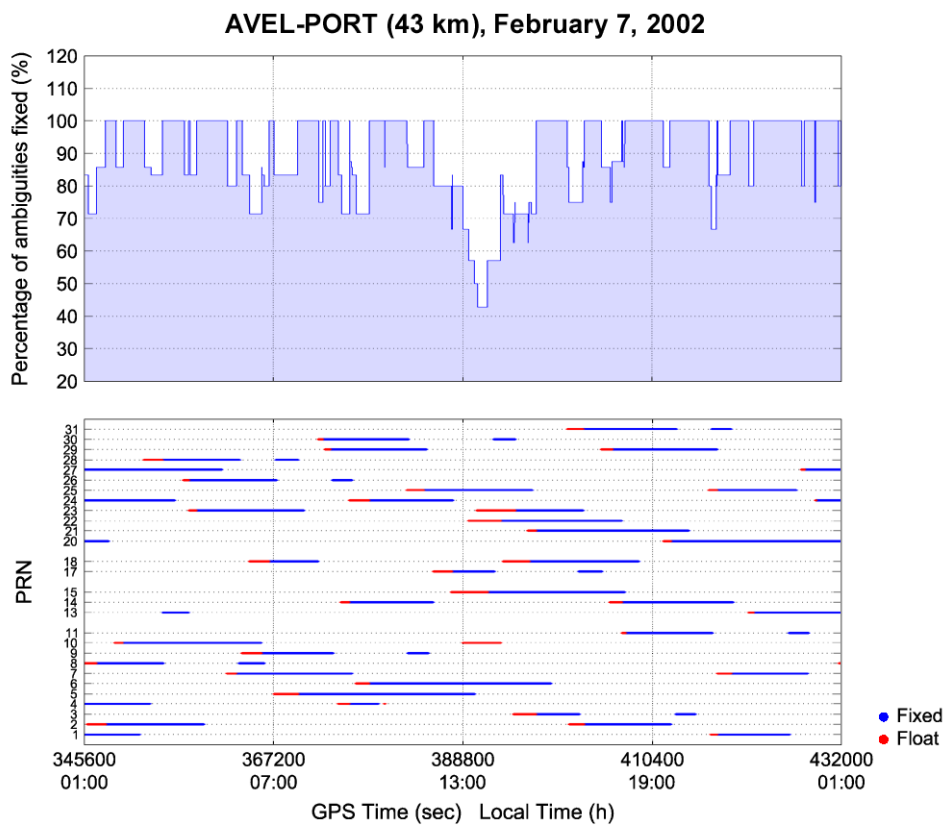
<sup>1</sup> Questo scenario corrisponde a quello utilizzato nel capitolo 5 per l'analisi su base temporale in cui non sono state impiegate le stazioni BENE e VLUC.



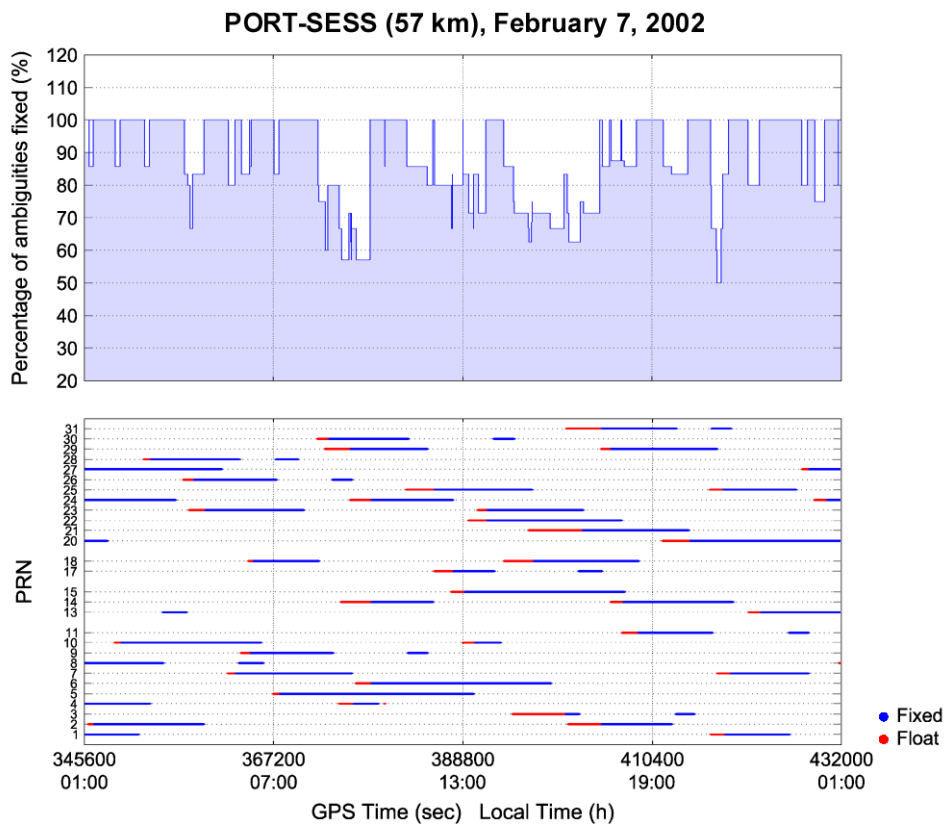
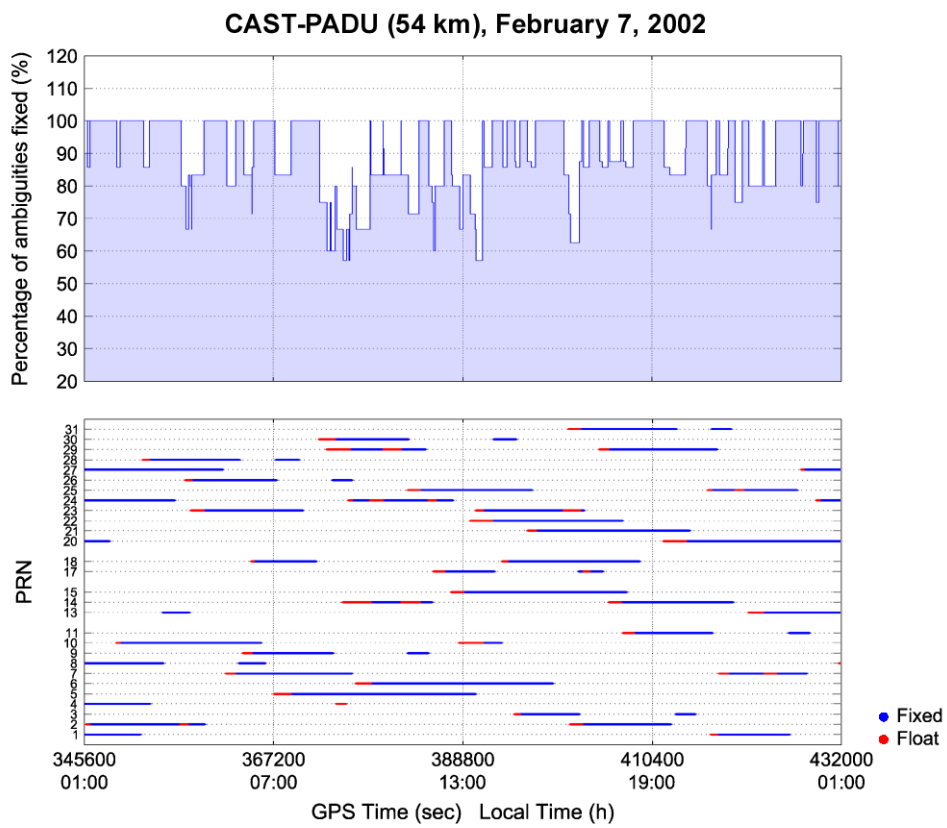
**Figura 3.2** Risoluzione delle ambiguità per le baseline ARIA-AVEL e ISCH-PORT



**Figura 3.3: Risoluzione delle ambiguità per le baseline AVEL-BATT e BATT-CAST**



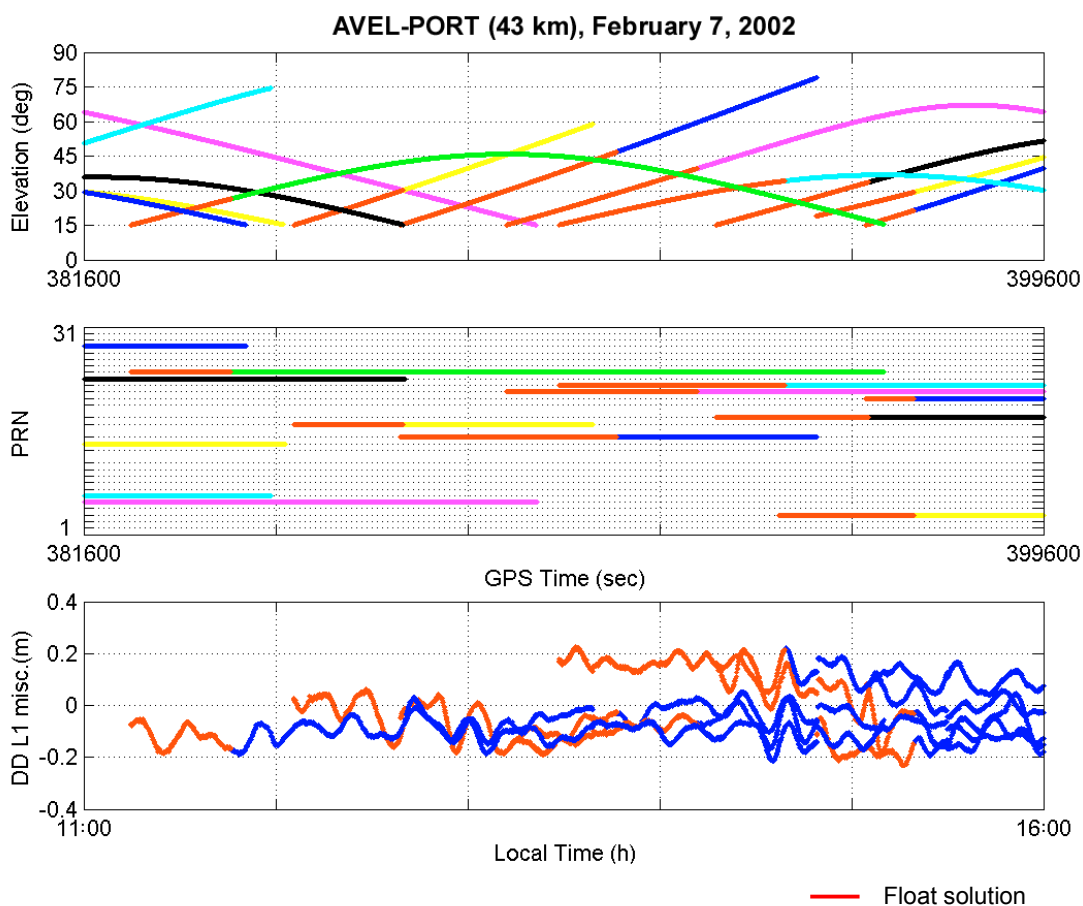
**Figura 3.4: Risoluzione delle ambiguità per le baseline AVEL-PORT e ARIA-CERR**



**Figura 3.5: Risoluzione delle ambiguità per le baseline CAST-PADU e PORT-SESS**

Dall'esame dei diagrammi precedenti si rileva che la stima delle ambiguità al sorgere dei satelliti risulta complicata rispetto al caso dei satelliti in vista per un intervallo di tempo più lungo. Questo comportamento è evidentemente una diretta conseguenza del fatto che le ambiguità vengono risolte in tempo reale: in tal caso, diventa infatti strategica la quantità di misure disponibili all'istante in cui si effettua la stima.

A tal proposito è stata condotta un'ulteriore indagine finalizzata a mettere in relazione i tempi di inizializzazione con l'elevazione dei satelliti, nonché con gli andamenti degli errori differenziali. In particolare il confronto ha interessato la baseline AVEL-PORT, con riferimento ad una finestra temporale compresa tra le 11:00 e le 16:00 ora locale del 7 febbraio 2002 (figura 3.6).



**Figura 3.6: Confronto tra elevazione dei satelliti, tempi di inizializzazione ed errori differenziali L1 sulla baseline AVEL-PORT, per l'intervallo 11:00-16:00 del 7 febbraio 2002**

### 3.5 Processo di trasmissione delle correzioni MultiRef™

Nell'ambito delle problematiche riguardanti il processo di trasmissione delle correzioni, l'obiettivo è quello di fornire all'utente come risultato ultimo un set di dati tale da consentire il calcolo della posizione semplicemente applicando gli algoritmi RTK standard, normalmente disponibili negli attuali ricevitori GPS.

Dal punto di vista operativo un ruolo fondamentale è svolto dalla presenza di un centro di controllo in cui vengono raccolte ed elaborate in blocco le misure GPS provenienti da tutte le stazioni di riferimento [Petrovski et al., 2000]: in particolare in tempo reale si risolvono le ambiguità di fase fra le stazioni della rete e si generano le correzioni MultiRef™.

Si osserva che le correzioni per la parte utente vengono calcolate tramite l'equazione 3.41 non già per una specifica posizione, bensì per una griglia di punti definiti; l'utente quindi determina le correzioni corrispondenti alla sua esatta posizione attraverso un'interpolazione fra i punti della griglia a lui più vicini [Fotopoulos, 2000]. Il vantaggio consiste nell'evitare il ricorso ad una comunicazione bidirezionale in virtù del fatto che non è richiesta la conoscenza a priori della posizione dell'utente. Allo stato attuale è stato proposto un aggiornamento del formato standard RTCM che tenga conto di questo tipo di approccio [Townsend et al., 2000].

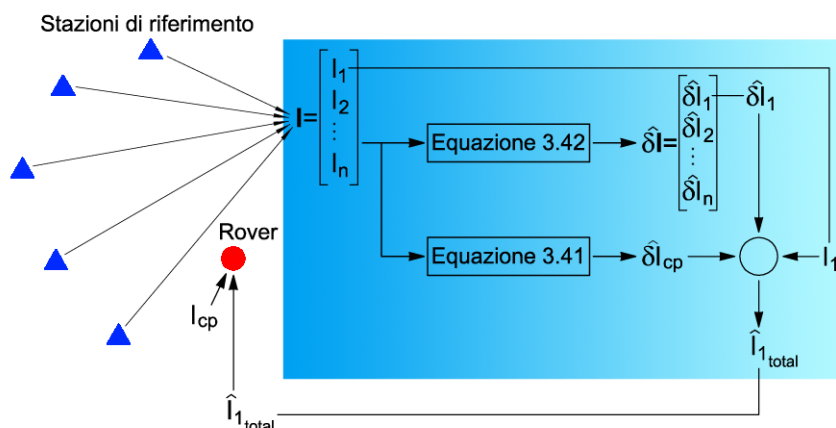
In effetti l'utente applica dunque un procedimento differenziale tradizionale utilizzando come dati di riferimento le misure espresse dalla seguente equazione:

$$\hat{l}_{\text{total}} = l_1 + \delta\hat{l}_1 - \delta\hat{l}_{\text{cp}} \quad (3.74)$$

dove:

- $l_1$  è la misura di fase originaria effettuata da una delle stazioni di riferimento della rete, denominata stazione primaria;
- $\delta\hat{l}_1$  è la correzione MultiRef™ della suddetta misura di fase, ricavata in base all'equazione 3.42;
- $\delta\hat{l}_{\text{cp}}$  è la correzione MultiRef™ corrispondente alla esatta posizione dell'utente, determinata per interpolazione fra i punti della griglia di correzioni.

Nella figura 3.7 viene schematizzato il procedimento sopra descritto.



**Figura 3.7: Schema operativo per l'applicazione delle correzioni MultiRef™**

Il fatto che nello schema precedente sia sufficiente utilizzare soltanto le misure provenienti da una delle stazioni della rete è dovuto al cosiddetto effetto di incapsulamento [Raquet, 1998; Fortes, 2002] dell'algoritmo NetAdjust: le misure corrispondenti ad ognuna delle stazioni di riferimento inglobano cioè le soluzioni MultiRef™ dell'intera rete. Come conseguenza dell'incapsulamento dei dati, deriva in particolare che le soluzioni del procedimento differenziale nel dominio delle osservazioni risultano le stesse qualunque sia la stazione di riferimento primaria selezionata.

L'utente può quindi combinare le proprie osservazioni con quelle corrispondenti ad una qualsiasi delle stazioni della rete. In questo contesto, con l'obiettivo di accorciare la lunghezza della baseline tra il ricevitore di riferimento e l'utente, si inserisce infine il concetto di VRS (virtual reference station): si tratta sostanzialmente di traslare in un punto molto più vicino all'utente le misure relative alla stazione di riferimento prescelta.

Lo schema secondo cui si ottiene la misura  $\Phi_{vir}$  corrispondente alla stazione di riferimento virtuale è il seguente:

$$\overline{\Phi}_{vir} = \overline{\Phi}_{ref} \quad (3.75)$$



dove:

$\bar{\Phi}$  è l'osservabile misura-meno-distanza, espressa dall'equazione 2.3, e cioè:

$$\bar{\Phi} = \Phi - \rho \quad (3.76)$$

Sostituendo quindi l'equazione 3.76 nella 3.75 si ha:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{vir}} - \rho_{\text{vir}} &= \Phi_{\text{ref}} - \rho_{\text{ref}} \\ \Phi_{\text{vir}} &= \Phi_{\text{ref}} + \rho_{\text{vir}} - \rho_{\text{ref}} \\ \Phi_{\text{vir}} &= \Phi_{\text{ref}} + \Delta\rho \end{aligned} \quad (3.77)$$

avendo posto

$$\Delta\rho = \rho_{\text{vir}} - \rho_{\text{ref}} \quad (3.78)$$

dove:

$\rho_{\text{ref}}$  è la distanza geometrica tra satellite e stazione di riferimento reale;

$\rho_{\text{vir}}$  è la distanza geometrica tra satellite e stazione di riferimento virtuale.

Il termine  $\Delta\rho$  rappresenta dunque la quantità da applicare alle misure originarie per traslarle dal punto di stazione del ricevitore reale al punto in cui si vuole localizzare la VRS.

Per quanto concerne infine l'architettura del sistema, il MultiRef™ si delinea come uno strumento flessibile. In particolare, esso si adatta bene ad essere espanso, quando la morfologia della rete viene modificata nel tempo: la struttura del MultiRef™ consente, infatti, di implementare il sistema dimensionandolo secondo l'effettiva necessità di stazioni, garantendogli nel contempo la capacità di crescita, legata all'incremento del numero dei ricevitori di riferimento.

## CAPITOLO 4

### RETE TEST CAMPANIA GPS NETWORK

Il sistema MultiRef™ è stato implementato su di una rete test realizzata in Italia, scegliendo come area di riferimento l'intero territorio della Campania. In particolare è stata concepita l'istituzione di una rete di dodici stazioni di riferimento GPS, con lo specifico obiettivo di poter disporre di un'infrastruttura ad hoc per la sperimentazione del MultiRef™.

In questo capitolo oltre a fornire alcune indicazioni sulla progettazione delle reti RTK, sono illustrati gli aspetti progettuali riguardanti la realizzazione della rete Campania Network. Per quel che riguarda gli aspetti più strettamente operativi vengono invece illustrati nell'appendice A. Di seguito sono presentati inoltre i risultati relativi al controllo di qualità sulle misure provenienti dalla rete. Si osserva che tale controllo ha costituito un'importante fase preliminare in prospettiva delle elaborazioni MultiRef™ vere e proprie i cui risultati vengono presentati nel capitolo 5.

#### 4.1 Progettazione delle reti GPS RTK

La scelta di sviluppare una rete ad hoc ha innanzitutto consentito di individuare ed affrontare sul campo gli aspetti progettuali nuovi legati alle applicazioni RTK multi-reference station.

A tal proposito si osserva che la corretta impostazione delle reti RTK non può avvenire secondo i criteri validi nell'ambito delle reti di stazioni permanenti classiche: sussiste, infatti, una sostanziale differenza derivante dall'ipotesi di compartecipazione in tempo reale fra le stazioni della rete.

Per quanto attiene alle scelte progettuali, la domanda posta più di frequente riguarda l'interdistanza tra i ricevitori di riferimento e quindi il numero di stazioni necessario a coprire una prefissata area di intervento. È evidente che se questo

interrogativo riveste senza dubbio un'importanza rilevante nell'ambito della tecnica multi-reference station, d'altra parte non è con esso che si esauriscono gli aspetti di cui tener conto nella progettazione delle reti. Nell'affrontare la problematica di progettazione delle reti RTK non si può infatti prescindere da una conoscenza approfondita delle caratteristiche del sistema multi-reference che si intende adottare.

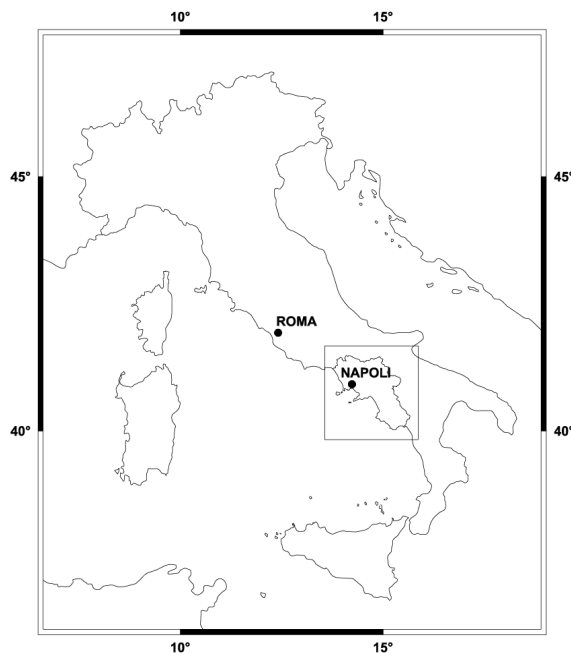
In particolare, considerato il comportamento del sistema in relazione al contesto fisico, occorre studiare attentamente la configurazione geometrica complessiva della rete al fine di ottimizzare l'utilizzo del sistema per ogni singolo caso.

Così come per le reti permanenti GPS classiche, anche nel caso multi-reference la prima fase della progettazione consiste nell'individuare l'area di copertura del servizio. L'obiettivo cui tendere nell'impostazione della rete è quello di assicurare una completa ed affidabile diffusione delle correzioni RTK sull'area in esame. È importante notare, però, che nell'approccio multi-reference station non viene fatta una distinzione tra le singole stazioni di riferimento, dal momento che collaborano tutte contemporaneamente al calcolo di un singolo set di correzioni.

Attesa dunque la natura dell'approccio multi-reference station, per quel che riguarda la geometria della rete, anziché adottare il classico schema di maglie quadrate, si ritiene più adeguato procedere secondo una soluzione alternativa. Inizialmente si può definire la geometria in maniera tale da disporre le stazioni GPS sul perimetro dell'area, evitando disuniformità di lunghezze delle baseline. Si può quindi esaminare criticamente la rete così definita e raffittirla per renderla pienamente idonea agli scopi del posizionamento RTK. Si cercherà dunque di ottenere la copertura richiesta aggiungendo un numero minimo di stazioni interne.

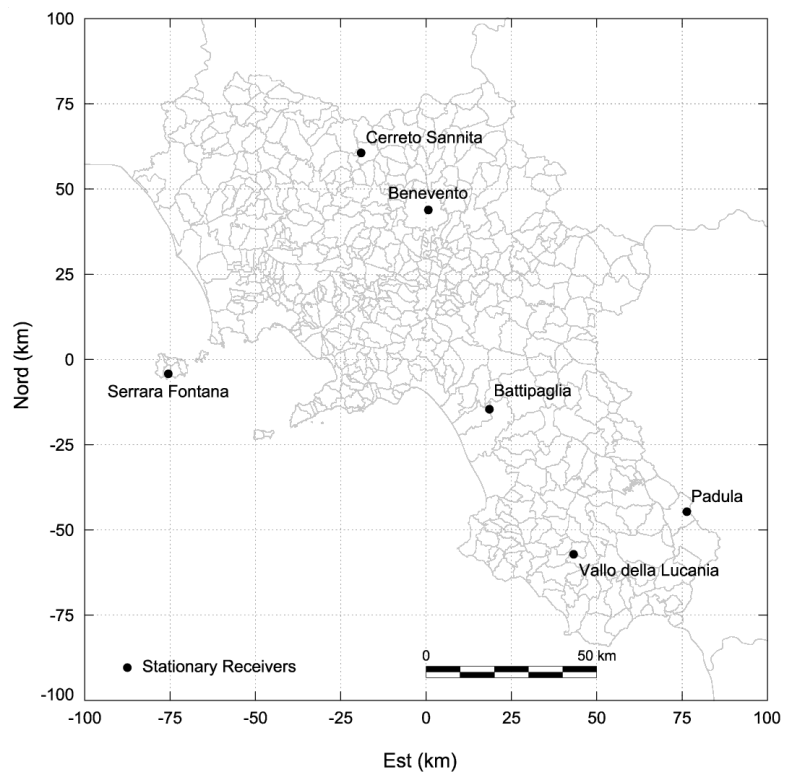
## **4.2 Progettazione della rete Campania GPS Network**

Come zona test per l'implementazione in Italia del sistema MultiRef™ è stata scelta la Campania (figura 4.1). Si è realizzata quindi una rete di dodici stazioni di riferimento GPS, estesa su tutto il territorio della regione per un'area complessiva pari a circa 13600 km<sup>2</sup>.



**Figura 4.1: Area di riferimento per la rete Campania GPS Network**

Nell'affrontare la progettazione della rete è stata innanzitutto condotta un'indagine sulle stazioni permanenti GPS presenti sul territorio che ha portato a individuare le sei stazioni riportate in figura 4.2.



**Figura 4.2: Posizione delle stazioni permanenti GPS in Campania**

Atteso che la distribuzione dei ricevitori, così come appare nella figura precedente, non è omogenea e tanto meno risulta idonea ad una immediata applicazione della tecnica multi-reference station, si è reso dunque necessario procedere ad un raffittimento ad hoc.

La soluzione progettuale adottata nasce dall'esperienza del gruppo di ricerca dell'Università di Calgary. Partendo dal presupposto di dover disporre di ricevitori di riferimento sul perimetro dell'area da coprire, si è assunta come dimensione caratteristica della rete l'interdistanza tra le stazioni perimetrali. In tal caso è stata adottata una lunghezza pari a circa 50 km, dettata principalmente dallo stato della ionosfera particolarmente attivo durante il periodo della sperimentazione.

È stato quindi predisposto un disegno di rete che ha previsto di istituire ex novo sei stazioni temporanee, di cui quattro (Ariano Irpino, Castelgrande, Portici, Sessa Aurunca) localizzate sul perimetro dell'area interessata e due (Avellino e Caserta) all'interno della rete. In particolare la stazione di Avellino è stata scelta in posizione pressoché baricentrica, mentre quella di Caserta è stata inserita allo scopo di aumentare il numero di possibili configurazioni test secondo quanto viene mostrato nel capitolo 5; a tal proposito si osserva che anche la stazione di Benevento è stata selezionata prevalentemente con questo scopo.

In figura 4.3 è riportata la disposizione finale delle stazioni di riferimento GPS della rete Campania Network.



**Figura 4.3: Campania GPS Network**

### 4.3 Controllo di qualità dei dati GPS della rete Campania Network

Nelle elaborazioni effettuate in questa ricerca sono stati utilizzati sei giorni di misura, corrispondenti al periodo 7-12 febbraio 2002. I dati sono stati acquisiti 24 ore su 24, in contemporanea dalle dodici stazioni di riferimento della rete, con un intervallo di campionamento di 1 s. Ulteriori informazioni sui dati acquisiti vengono fornite nell'appendice A.

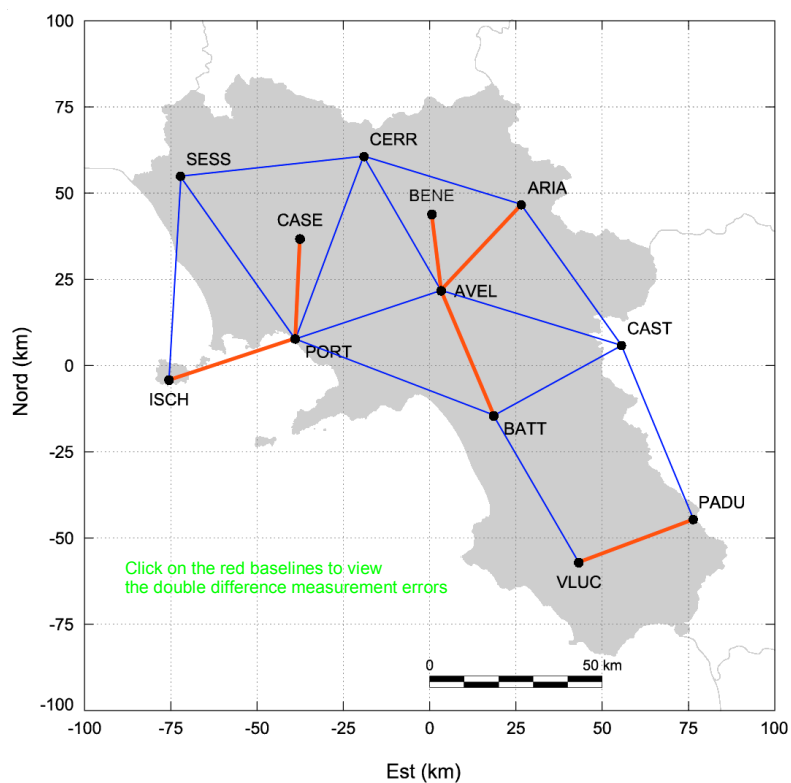
Al fine di garantire la qualità dei dati per l'elaborazioni MutliRef™, è stato fondamentale effettuare un loro controllo preventivo. In linea con l'impostazione del metodo MultiRef™ si è proceduto in modo differenziato al calcolo degli errori di chiusura nelle diverse osservabili di codice e fase. Note a priori dalle elaborazioni col software Bernese le coordinate dei punti di osservazione della rete e le ambiguità tra le stazioni, si è fatto ricorso in particolare all'osservabile misura-meno-distanza definita dall'equazione 2.3.

Si osserva che gli errori di chiusura sui dati grezzi così ottenuti, oltre a rappresentare la base per il controllo dei dati stessi, costituiscono le misure di riferimento per i confronti che vengono presentati nel capitolo 5.

Il controllo è stato effettuato su diverse baseline, e per i diversi giorni di misura. Alla fine di questo paragrafo vengono riportati in particolare i diagrammi dei risultati relativi alle sei baseline in tabella 4.1. Si tratta delle misure selezionate per i confronti con le elaborazioni MutliRef™ del capitolo 5. La loro disposizione è mostrata in figura 4.4.

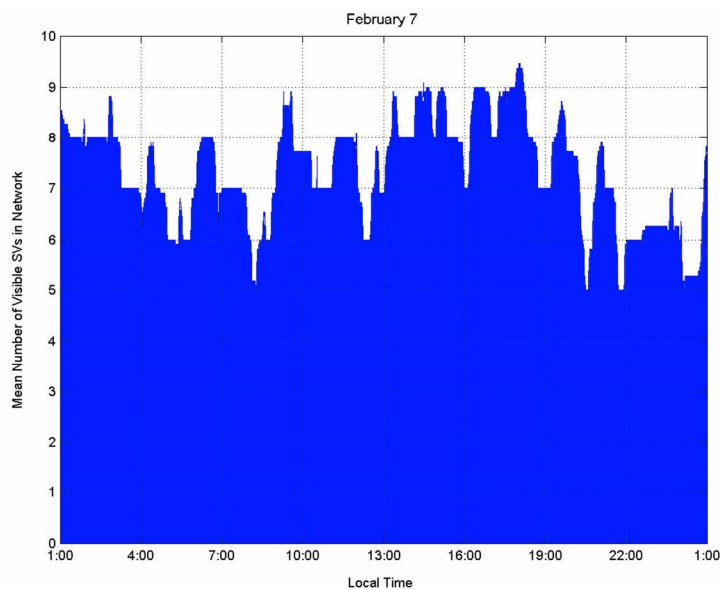
**Tabella 4.1: Baseline selezionate per il confronti nelle elaborazioni MutliRef™**

Baseline	Baseline length (km)
AVEL-BENE	21.5
PORT-CASE	28
ARIA-AVEL	33
VLUC-PADU	35
PORT-ISCH	38.5
AVEL-BATT	39



**Figura 4.4: Posizione delle baseline selezionate per i confronti nelle elaborazioni MutliRef™**

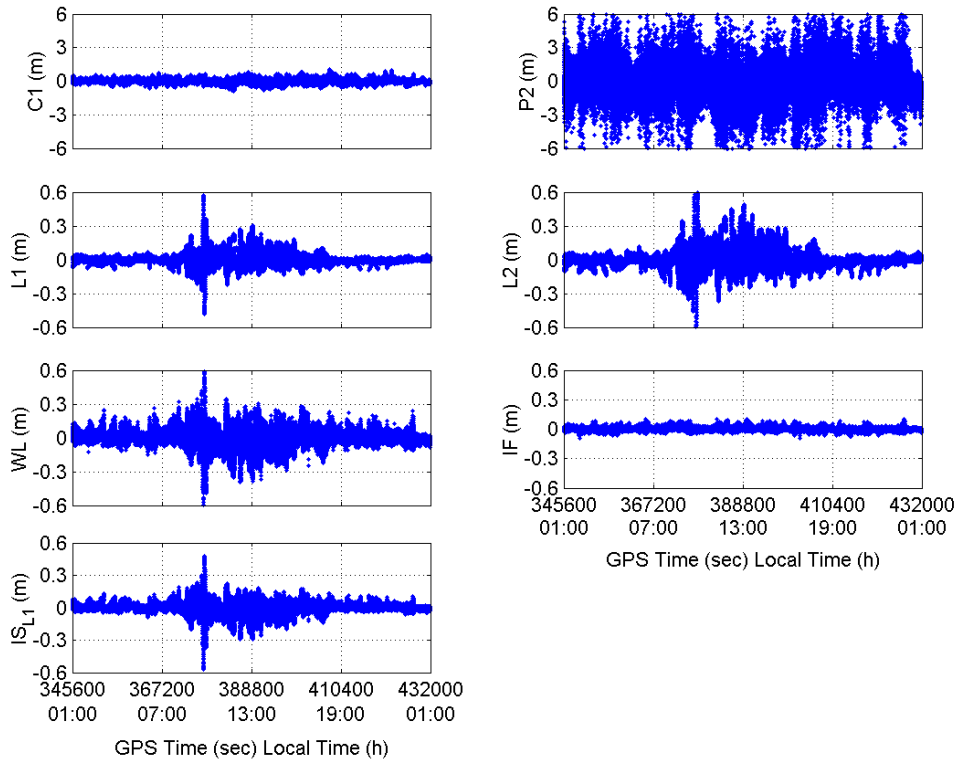
Nella figura 4.5 si riporta il diagramma del numero di satelliti (media sulle 12 stazioni) visibili al di sopra dell'angolo di elevazione di  $13^\circ$ , nelle 24 ore del giorno di misura del 7 febbraio 2002. Si tratta in particolare di tutti i satelliti che presentano misure valide sia in L1 che in L2.



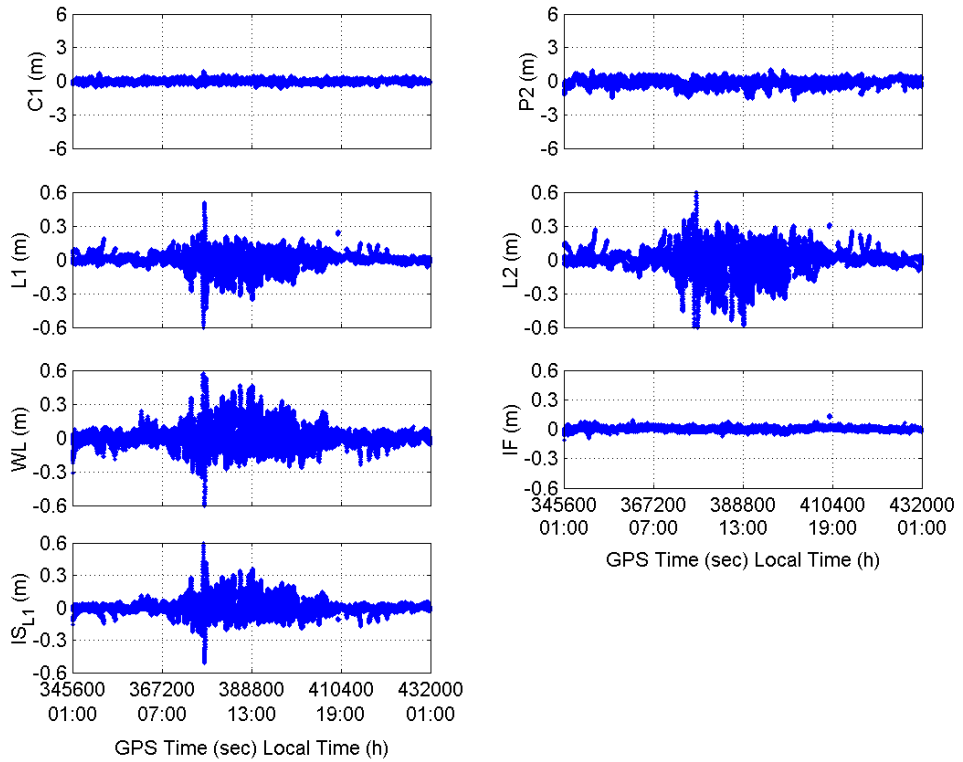
**Figura 4.5: Numero di satelliti visibili per il 7 febbraio 2002**



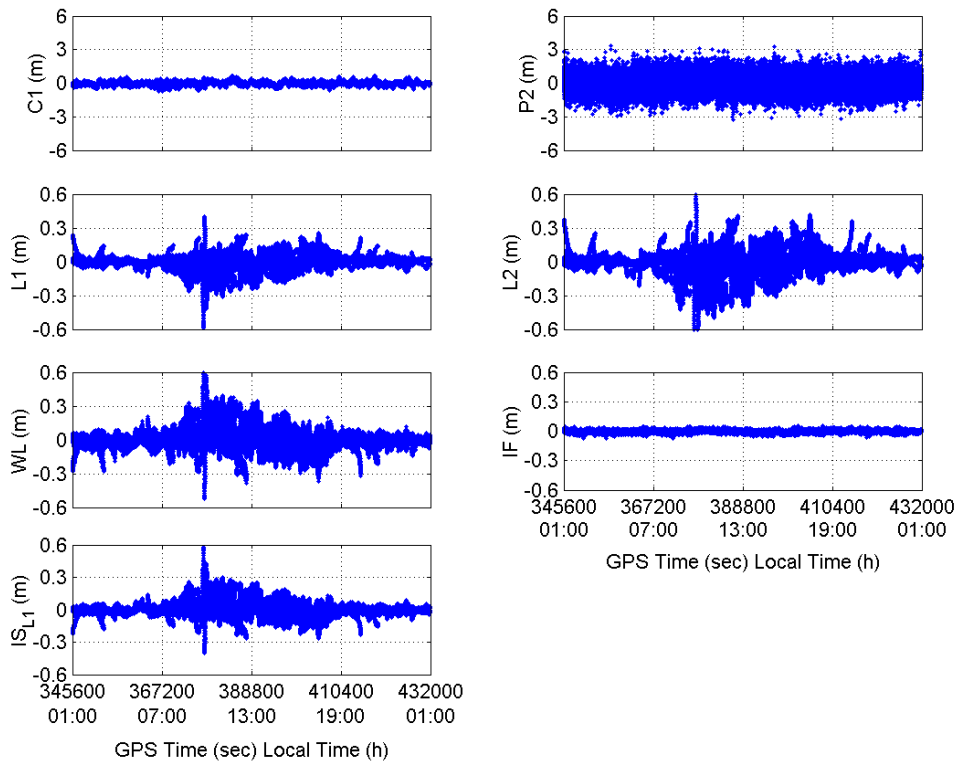
**AVEL-BENE (21.5 km), February 7, 2002**



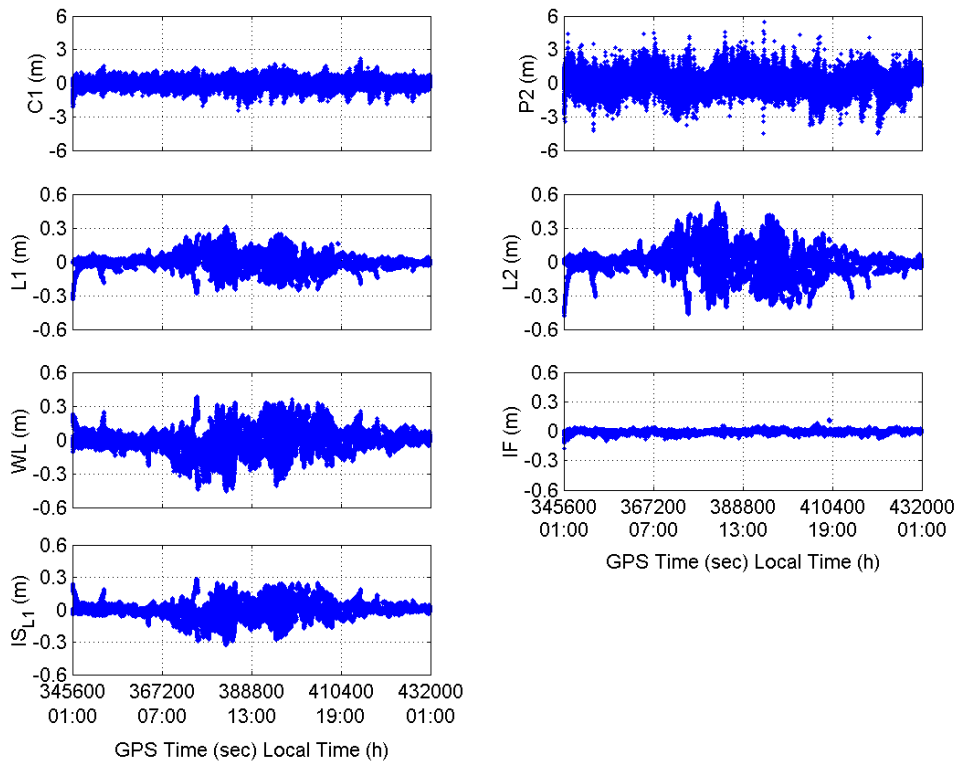
**PORT-CASE (28 km), February 7, 2002**



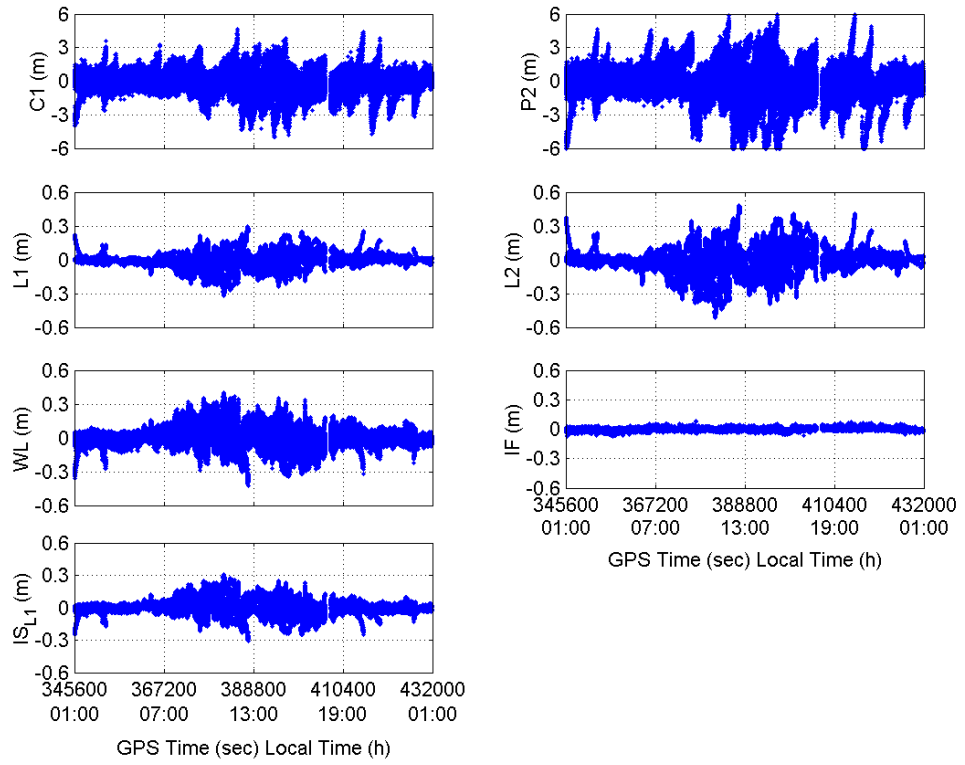
ARIA-AVEL (33 km), February 7, 2002



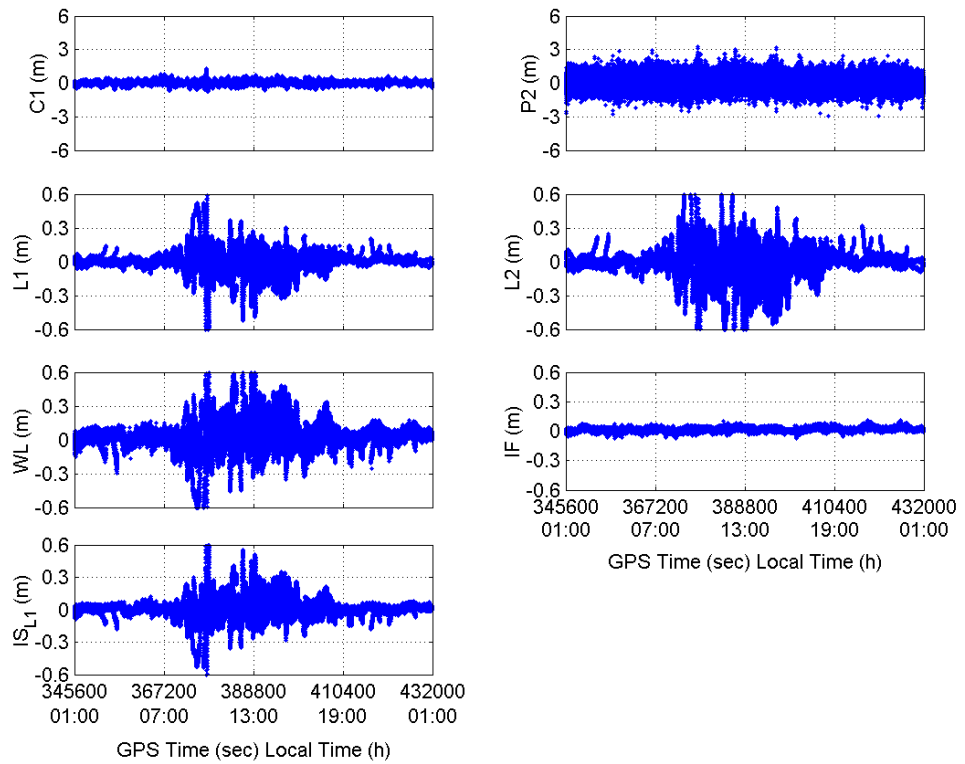
PORT-ISCH (38.5 km), February 7, 2002



**VLUC-PADU (35 km), February 7, 2002**



**AVEL-BATT (39 km), February 7, 2002**



## CAPITOLO 5

### SPERIMENTAZIONE MULTIREF™ SULLA RETE CAMPANIA GPS NETWORK

In questo capitolo vengono presentati i risultati relativi all'implementazione del sistema MultiRef™ sulla rete test Campania Network.

Le elaborazioni e l'analisi dei risultati hanno avuto come obiettivo primario la valutazione del miglioramento apportato al dato GPS dall'applicazione del metodo MultiRef™. I risultati sono stati ottenuti a partire dal calcolo delle correzioni differenziali tramite l'approccio multi-reference station, e confrontati dunque con lo schema classico di singola stazione di riferimento. In particolare l'analisi riguarda il dominio delle osservazioni, il dominio delle posizioni e quello dell'ambiguità.

L'indagine sperimentale è stata sviluppata sia in funzione delle caratteristiche geometriche su diverse configurazioni di rete per un assegnato giorno di misura (7 febbraio 2002), sia su base temporale per sei giorni di misura (7- 12 febbraio 2002) per un prefissato schema di rete.

#### 5.1 Metodologia di analisi

Nelle elaborazioni condotte in questa tesi sono stati effettuati i trattamenti MultiRef™ su sei configurazioni di rete, in modo da sperimentare una quanto più ampia varietà di scenari.

Ogni configurazione è costituita da misure di stazioni scelte fra le dodici complessivamente disponibili: di volta in volta viene rimossa dalla rete una specifica stazione di riferimento, da utilizzare come ricevitore utente. In particolare le diverse configurazioni, oltre a fornire differenti geometrie di rete, corrispondono a differenti lunghezze di baseline tra l'utente e la più vicina stazione di riferimento.

Sulla base di questo procedimento si assume che il ricevitore utente non sia in movimento. Si osserva che nell'ambito del posizionamento RTK tale stato risulta il

più severo: difatti rispetto al caso cinematico emerge un aumento del multipath, mentre gli errori differenziali d'orbita, ionosferico e troposferico sono indipendenti dalle condizioni di moto del ricevitore [Raquet, 1998].

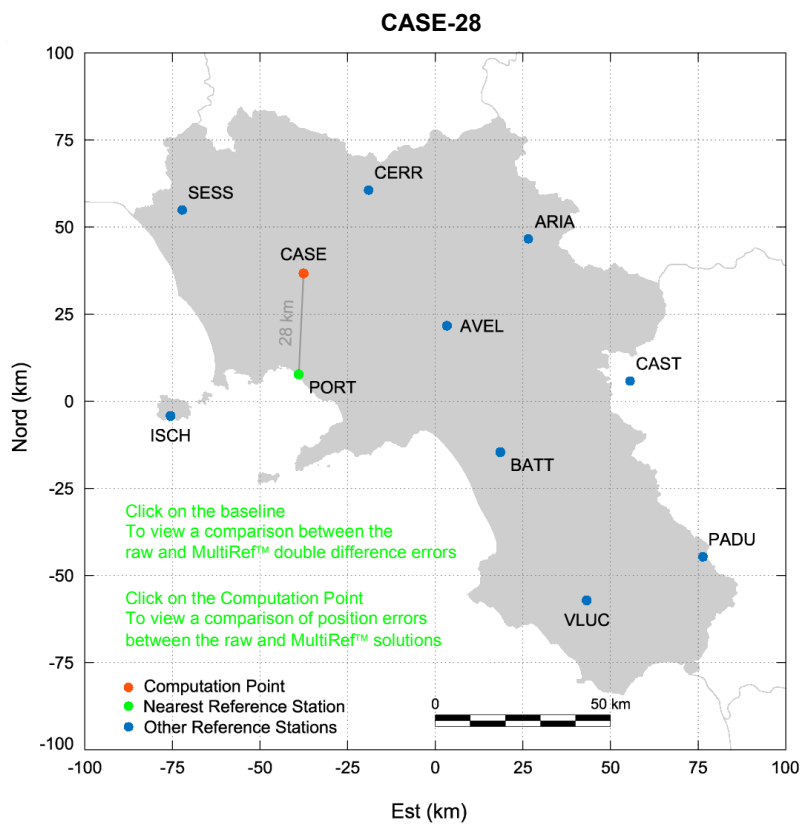
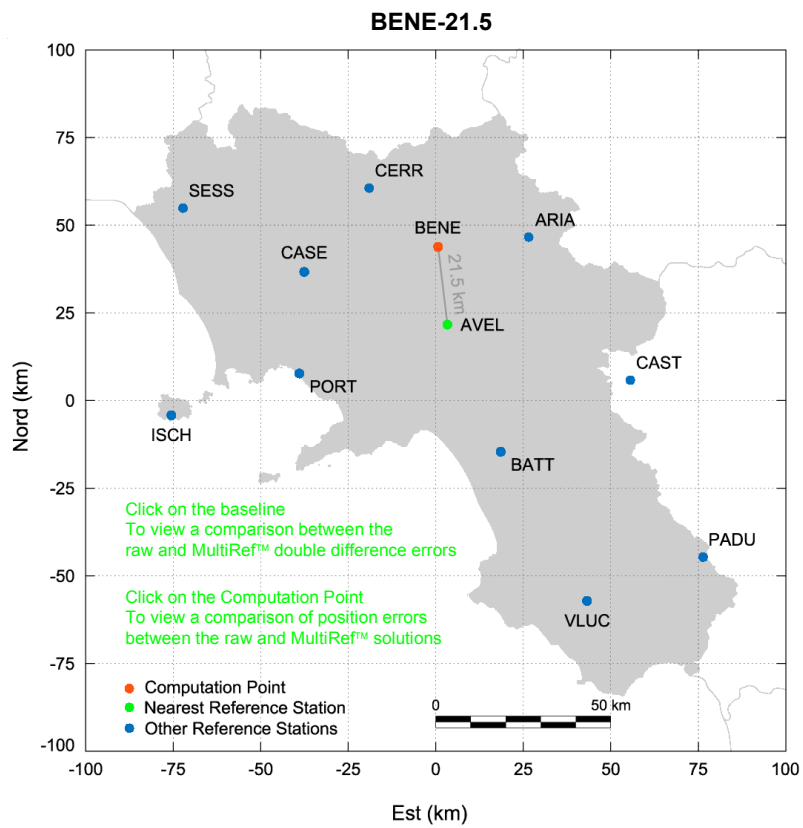
Nelle figure 5.1-5.3 vengono riportate le sei diverse configurazioni di rete; la tabella 5.1 ne riassume invece le principali caratteristiche. Ciascuna rete è denominata col nome del ricevitore utente corrispondente, nonché con la distanza in km dalla stazione di riferimento più vicina. Questo parametro assume infatti particolare importanza nel confronto tra il metodo MultiRef™ e la tecnica RTK tradizionale.

Ad eccezione della prima configurazione, in cui si introduce il punto BENE come utente, tutte le altre reti coinvolgono le stesse stazioni, tra cui alternativamente si seleziona il ricevitore utente.

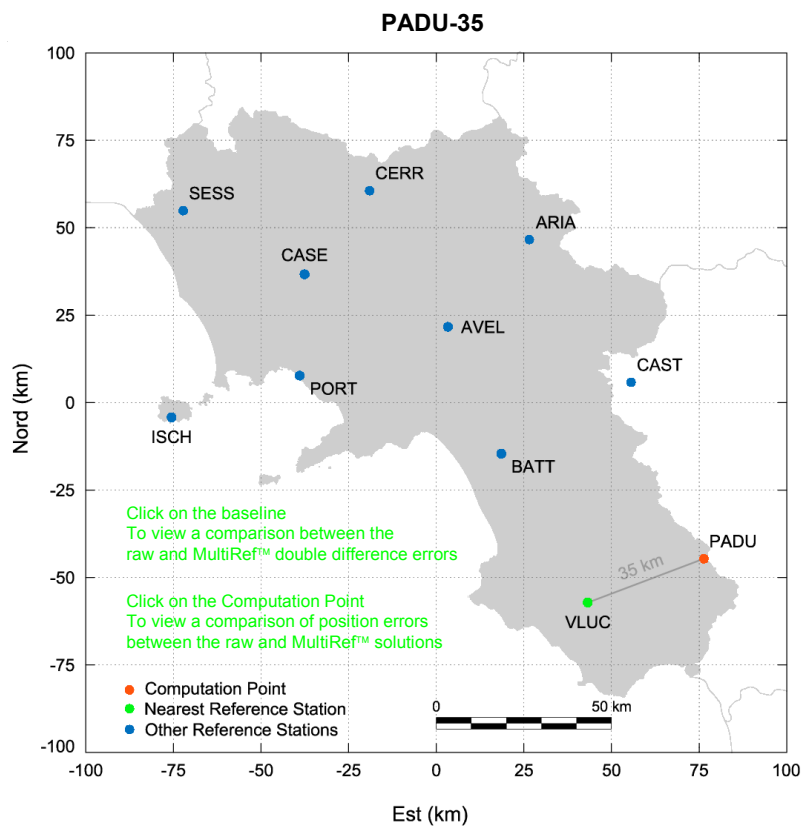
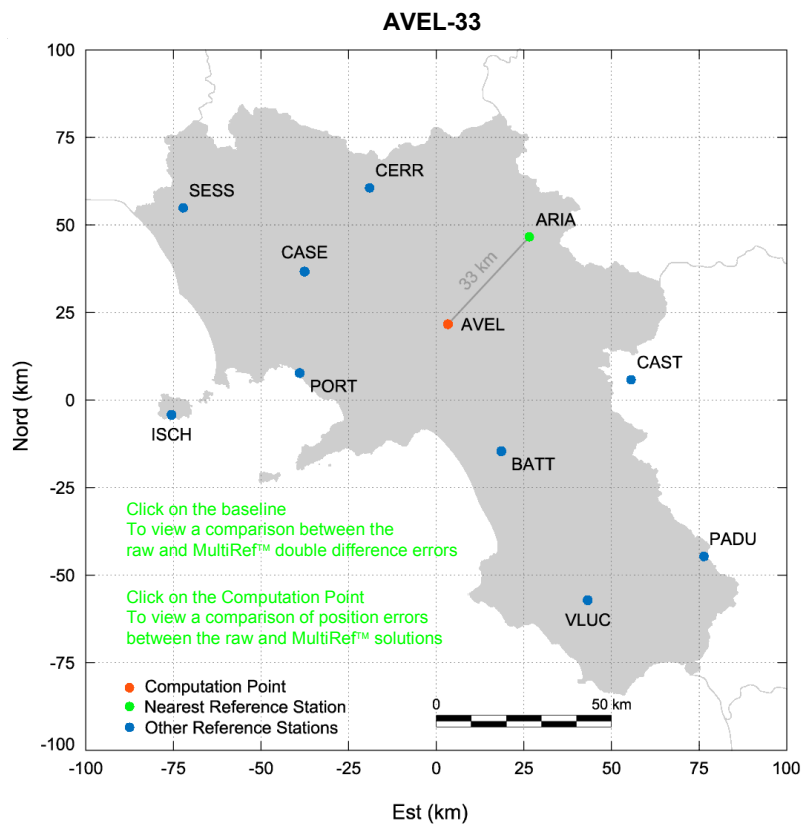
La rete utilizzata per il confronto temporale sui sei giorni è sostanzialmente la stessa della configurazione CASE-28, all'infuori della stazione VLUC, non inclusa poiché non ha acquisito per tutti i sei giorni.

**Tabella 5.1: Caratteristiche delle sei configurazioni di rete**

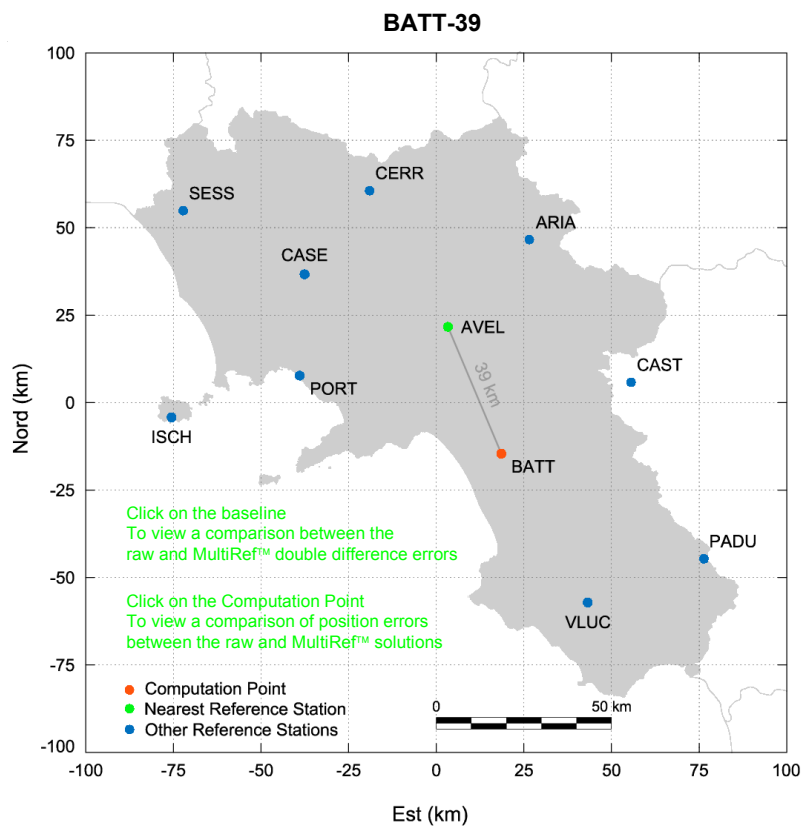
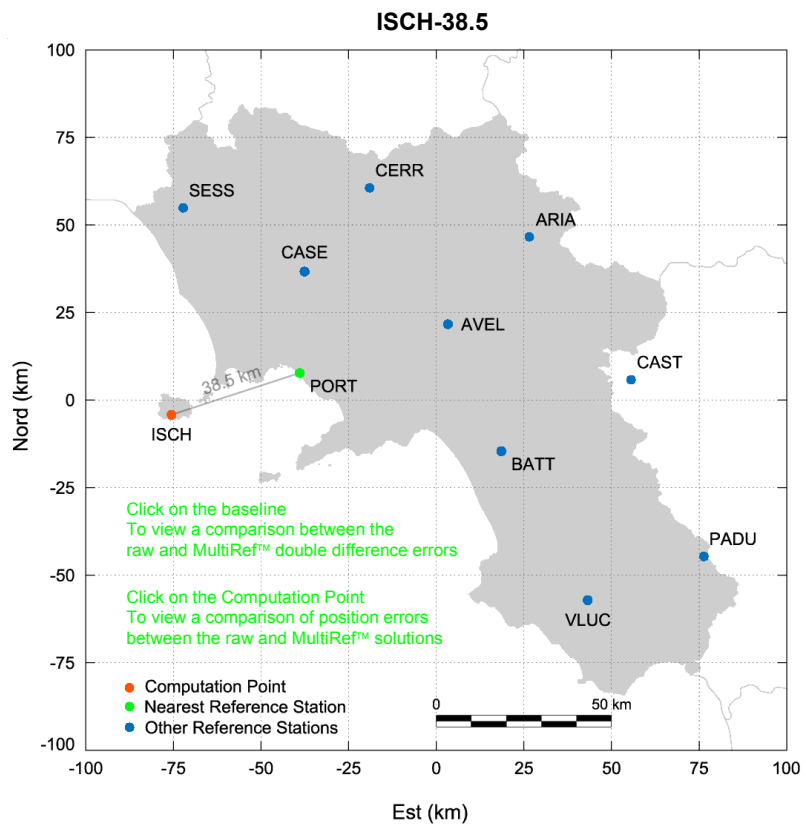
<b>Rete</b>	<b>Stazione di riferimento più vicina</b>	<b>Stazioni di riferimento della rete</b>
BENE-21.5	AVEL	AVEL CERR ARIA CASE PORT BATT CAST SESS ISCH VLUC PADU
CASE-28	PORT	PORT CERR SESS AVEL ISCH ARIA BATT CAST VLUC PADU
AVEL-33	ARIA	ARIA BATT CASE PORT CERR CAST SESS ISCH VLUC PADU
PADU-35	VLUC	VLUC CAST BATT AVEL ARIA PORT ISCH CASE CERR SESS
ISCH-38.5	PORT	PORT CASE SESS AVEL CERR BATT ARIA VLUC CAST PADU
BATT-39	AVEL	AVEL CAST VLUC PORT ARIA PADU CASE CERR ISCH SESS



**Figura 5.1: Configurazione delle reti BENE-21.5 e CASE-28**



**Figura 5.2: Configurazione delle reti AVEL-33 e PADU-35**



**Figura 5.3: Configurazione delle reti ISCH-38.5 e BATT-39**



Prendendo in esame il ricevitore utente e la stazione di riferimento più vicina, il confronto tra posizionamento RTK tradizionale e posizionamento multi-reference station è stato impostato utilizzando rispettivamente i dati grezzi e i dati corretti MultiRef™.

In particolare per quel che riguarda le misure corrette, si è trattato di calcolare ciascuna rete con il metodo MultiRef™, al fine di stimare le correzioni corrispondenti alle diverse configurazioni. In seguito ad ognuno di questi trattamenti, tramite l'equazione 3.41

$$\delta \hat{\mathbf{I}}_{cp} = C_{\delta l_{cp}, \delta l} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} C_{\delta l} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{B} \bar{\Phi} - \lambda \Delta \nabla \mathbf{N}) \quad (5.1)$$

sono state calcolate le correzioni per la posizione utente, mentre le correzioni generate attraverso l'equazione 3.42

$$\delta \hat{\mathbf{I}} = C_{\delta l} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} C_{\delta l} \mathbf{B}^T)^{-1} (\mathbf{B} \bar{\Phi} - \lambda \Delta \nabla \mathbf{N}) \quad (5.2)$$

sono state applicate ai dati grezzi della stazione di riferimento più vicina.

Tutte le elaborazioni condotte in questa ricerca sono state sviluppate facendo riferimento alle misure di fase L1, WL e IF.

## 5.2 Risultati nel dominio delle osservazioni

Il livello base di analisi riguarda il dominio delle osservazioni. In particolare sono stati esaminati gli errori di misura differenziali: questo tipo di indagine è infatti fondamentale dal momento che il metodo MultiRef™ ha come obiettivo primario proprio la riduzione degli errori differenziali, finalizzata al raggiungimento di significativi miglioramenti per quanto riguarda sia le precisioni, sia la risoluzione delle ambiguità intere di fase.

Le osservabili adottate sono quindi le differenze doppie di fase; l'equazione fondamentale che permette di ricavare gli errori differenziali, espressi in metri, è la 2.9, riportata nuovamente qui sotto:

$$\Delta\nabla\bar{\Phi} - \lambda\Delta\nabla N = \Delta\nabla d\rho - \Delta\nabla d_{\text{ion}} + \Delta\nabla d_{\text{trop}}^r + \Delta\nabla\varepsilon(\Phi) \quad (5.3)$$

L'analisi si basa sul confronto tra gli errori differenziali ricavati a partire dai dati grezzi e quelli ottenuti utilizzando le misure generate dal trattamento multi-reference station mediante la stima delle correzioni MultiRef™.

Di seguito si fa riferimento alla configurazione di rete AVEL-33. Il quadro completo dei risultati relativi alle sei configurazioni di rete, precedentemente introdotte, è presentato alla fine di questo capitolo nel paragrafo 5.6.1.

Le figure 5.4 e 5.5 riportano, rispettivamente per le misure L1 e WL, gli errori differenziali sulla baseline ARIA-AVEL (33 km) calcolati nelle 24 ore del 7 febbraio 2002 utilizzando sia i dati grezzi (figure 5.4a, 5.5a) che le misure corrette (figure 5.4b, 5.5b). In particolare, nelle figure 5.4c e 5.5c, il confronto delle soluzioni mostra in modo evidente l'effetto dell'applicazione del metodo MultiRef™.

Come si può vedere, per quel che riguarda gli errori differenziali, oltre a confermare che si tratta di valori a media nulla, l'andamento nel tempo di questi errori manifesta una minore dispersione in presenza delle correzioni MultiRef™. Si osserva un miglioramento in termini di RMS che raggiunge il 52% per la L1 e il 45% per la WL; in corrispondenza delle ore diurne si rilevano le riduzioni più significative dei valori assoluti, riconoscendo quindi un impatto prevalente sull'effetto della ionosfera.

Le elaborazioni sono state condotte utilizzando la stazione di riferimento più vicina al ricevitore utente; se si sviluppasse il procedimento differenziale ricorrendo invece ad una stazione più distante dall'utente, si osserva che questa scelta comporterebbe un incremento degli errori differenziali soltanto nel caso dei dati grezzi, mentre per le misure MultiRef™ i risultati rimarrebbero inalterati. Questo comportamento è dovuto al fatto che l'equazione 5.2 fornisce la stima delle correzioni per tutte le stazioni di riferimento della rete.

ARIA-AVEL (33 km), February 7, 2002

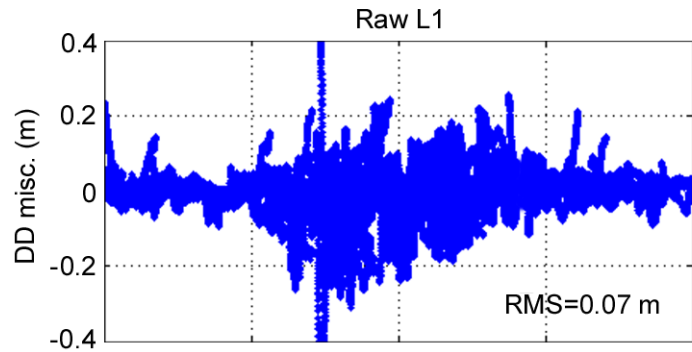


figura 5.4a

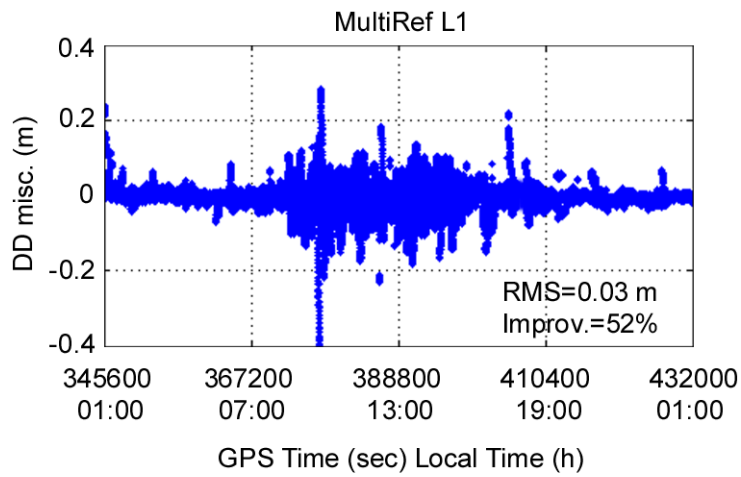


figura 5.4b

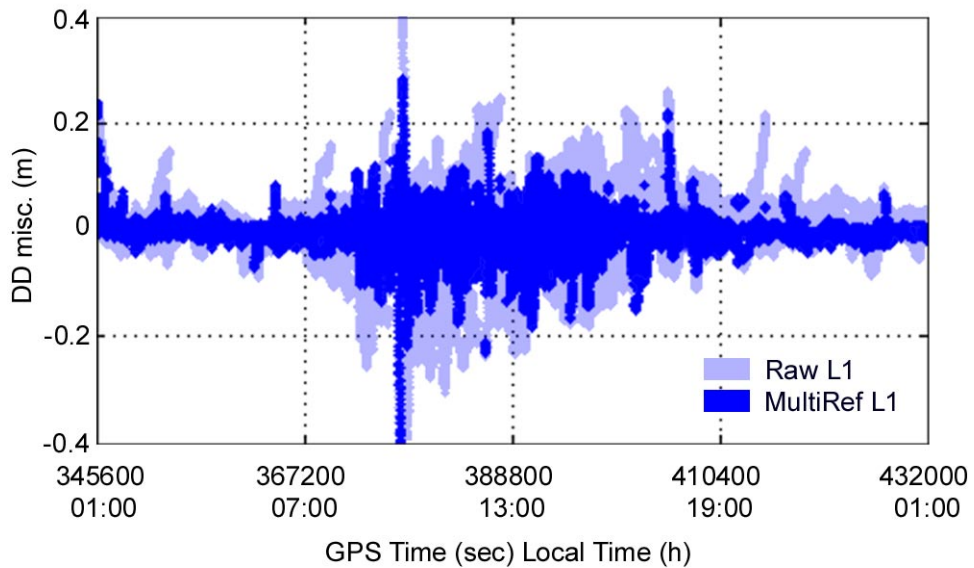


figura 5.4c

**Figura 5.4: Errori differenziali L1 ottenuti con i dati grezzi e con le misure corrette MultiRef per la baseline ARIA-AVEL (33 km), per il 7 febbraio 2002**

ARIA-AVEL (33 km), February 7, 2002

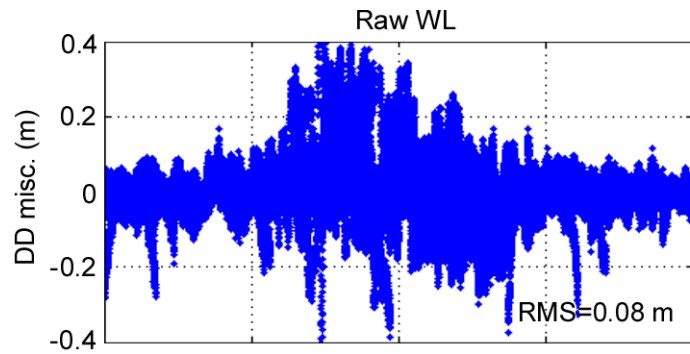


figura 5.5a

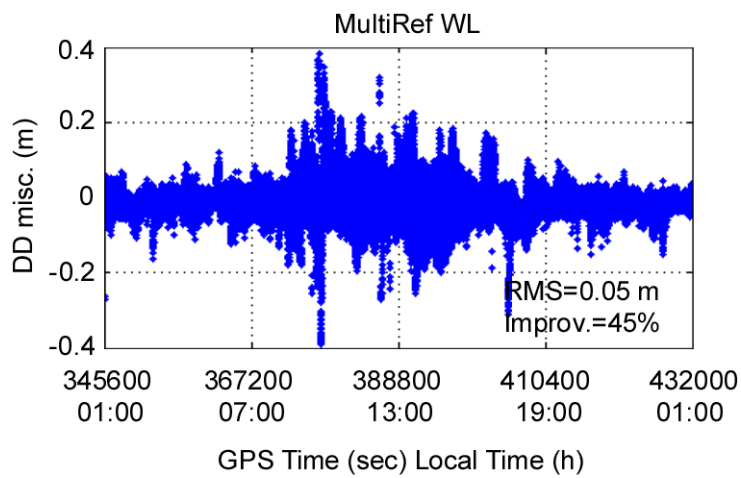


figura 5.5b

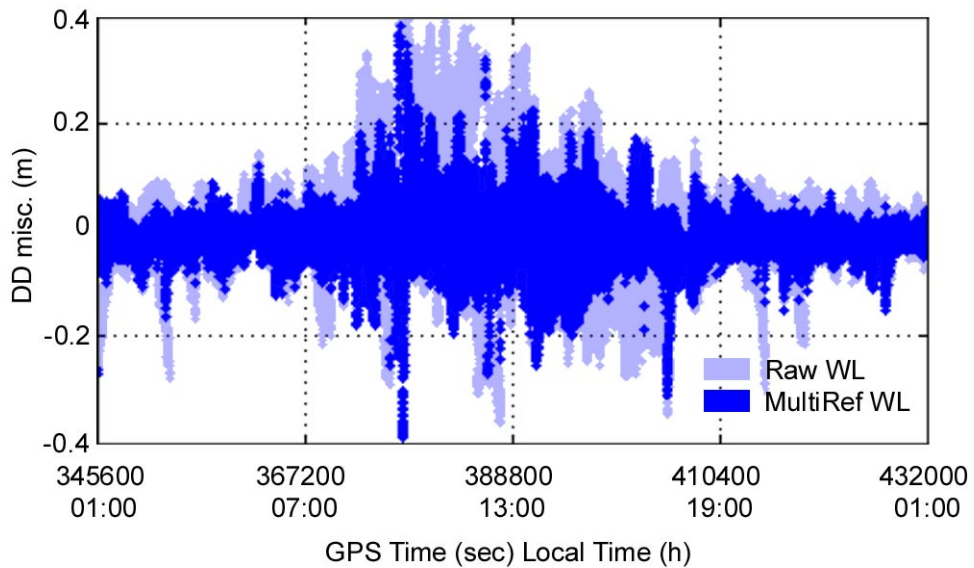


figura 5.5c

**Figura 5.5: Errori differenziali WL ottenuti con i dati grezzi e con le misure corrette MultiRef per la baseline ARIA-AVEL (33 km), per il 7 febbraio 2002**

Gli andamenti nel tempo degli errori differenziali sono stati osservati per sei baseline con lunghezze crescenti corrispondenti alle sei diverse configurazioni di rete. Nella tabella 5.2 vengono riportati i dati relativi ai confronti effettuati per il giorno di misura del 7 febbraio 2002.

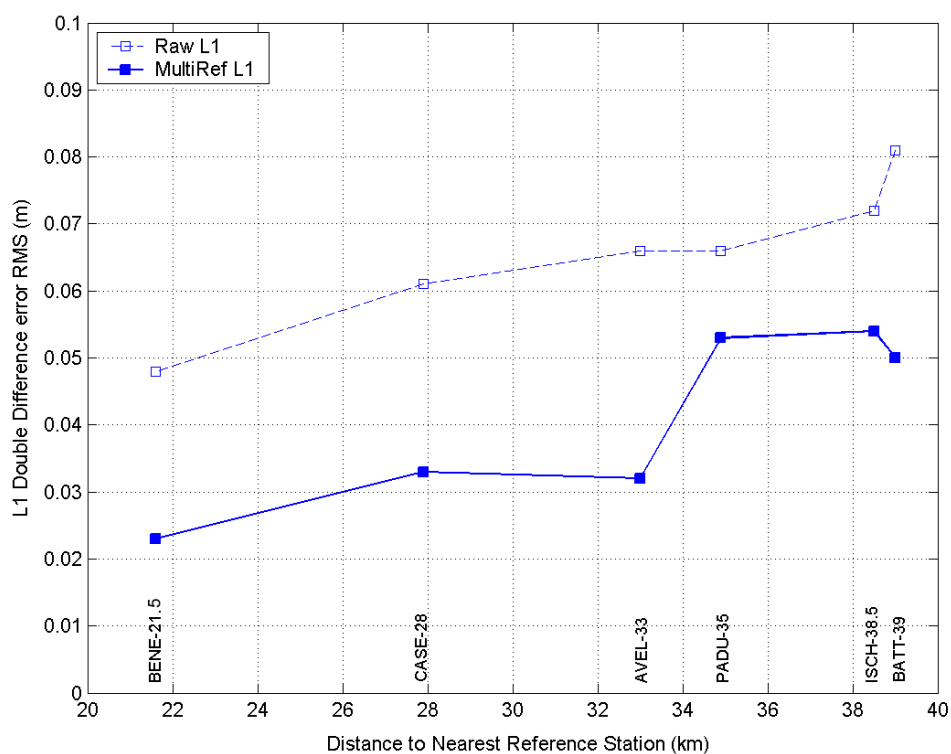
**Tabella 5.2: Valori di RMS degli errori differenziali L1, WL, IF relativi ai dati grezzi e alle misure corrette MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**

Baseline	Length (km)	L1 (m)			WL (m)			IF (m)		
		Raw	MultiRef	Imprv	Raw	MultiRef	Imprv	Raw	MultiRef	Imprv
AVEL-BENE	21,5	0,048	0,023	52%	0,067	0,041	39%	0,01	0,01	0%
PORT-CASE	28	0,061	0,033	46%	0,079	0,047	41%	0,02	0,02	0%
ARIA-AVEL	33	0,066	0,032	52%	0,082	0,045	45%	0,01	0,01	0%
VLUC-PADU	35	0,066	0,053	20%	0,087	0,075	14%	0,01	0,01	0%
PORT-ISCH	38,5	0,072	0,054	25%	0,102	0,080	22%	0,01	0,01	0%
AVEL-BATT	39	0,081	0,050	38%	0,114	0,073	36%	0,02	0,02	0%

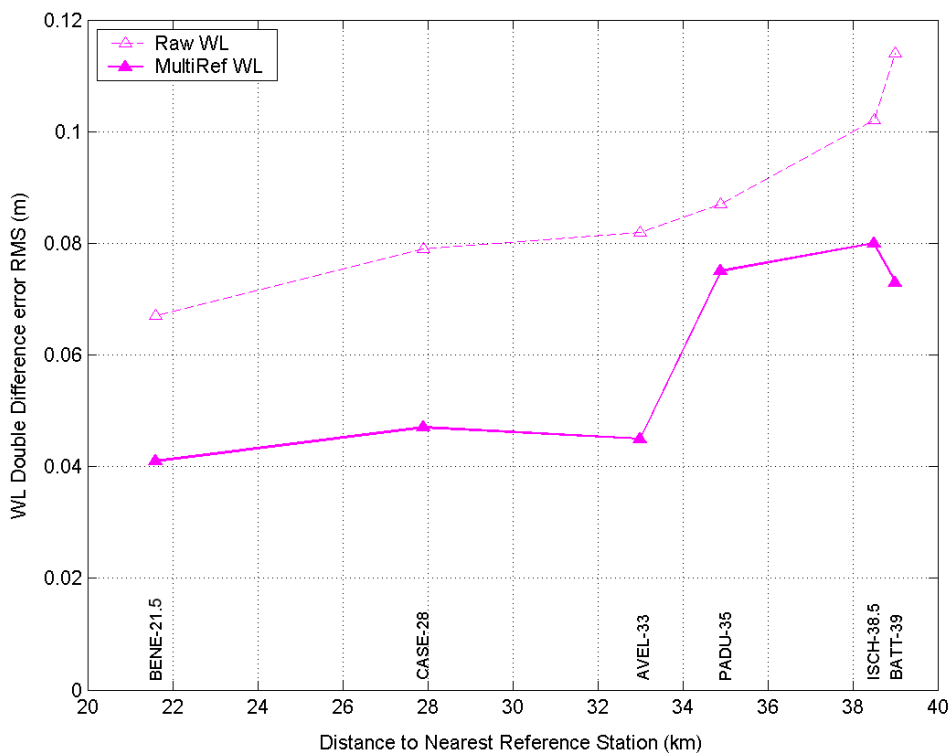
Questi risultati vengono inoltre rappresentati nelle figure 5.6-5.8 in funzione della lunghezza delle baseline.

Gli andamenti dei valori di RMS per le misure L1 e WL nel caso dei dati grezzi sono indicativi di una riduzione della correlazione spaziale al crescere della distanza. Si osserva che questo comportamento risulta attenuato in seguito all'applicazione del metodo MultiRef™ per quanto riguarda in particolare le prime tre baseline.

Le soluzioni PADU-35 e ISCH-38.5 si riferiscono a due scenari caratterizzati da un particolare disegno della rete: in entrambi i casi infatti il ricevitore utente è localizzato all'esterno dell'area di copertura della rete di riferimento corrispondente. Sebbene i valori di RMS per queste due configurazioni si discostino dall'andamento rilevato per gli schemi più regolari, con il MultiRef™ si raggiunge comunque un miglioramento di circa il 20% rispetto ai valori ottenuti a partire dai dati grezzi.



**Figura 5.6: Andamento dei valori di RMS degli errori differenziali L1 relativi ai dati grezzi e alle misure corrette MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**



**Figura 5.7: Andamento dei valori di RMS degli errori differenziali WL relativi ai dati grezzi e alle misure corrette MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**

### 5.3 Risultati nel dominio delle posizioni

Verificato l'apporto del metodo MultiRef™ nel dominio delle osservazioni, è importante tuttavia analizzarne l'effetto per quanto riguarda il dominio delle posizioni: occorre cioè valutare l'entità con cui la riduzione degli errori differenziali si riflette sull'accuratezza della posizione utente.

Per le diverse configurazioni di rete, in analogia con la procedura presentata nel paragrafo precedente, è stata sviluppata l'analisi della soluzione MultiRef™ per confronto con quella prodotta utilizzando semplicemente i dati grezzi.

In particolare la valutazione dei risultati si è basata sulla determinazione degli scostamenti di entrambe le soluzioni rispetto alle coordinate di riferimento ottenute con i trattamenti Bernese. Per ognuno dei sei scenari è stata stimata la posizione del ricevitore utente tramite il software FLYKIN™ [Lu et al., 1994]: il calcolo è stato effettuato prima con i dati grezzi, ed è stato quindi ripetuto utilizzando le misure corrette MultiRef™.

Il FLYKIN™ è un software, sviluppato all'Università di Calgary, che consente la risoluzione OTF delle ambiguità di fase. Tuttavia, atteso che l'obiettivo primario dell'analisi relativa al dominio delle posizioni consiste nel verificare il miglioramento apportato dal metodo MultiRef™ indipendentemente dal procedimento di risoluzione dell'ambiguità di fase, il programma è stato allora adoperato in una versione modificata in modo da introdurre le ambiguità di fase estratte a priori dal trattamento Bernese.

Anche in questo paragrafo vengono riportati in particolare i risultati relativi alla configurazione di rete AVEL-33 nelle 24 ore del 7 febbraio 2002 (figure 5.8-5.10). Gli andamenti degli scarti delle coordinate per le sei configurazioni complessive, per le misure L1 e WL, sono presentati nel paragrafo 5.6.2.

Esaminando la posizione AVEL con un'analisi epoca per epoca, si può vedere, in linea con i risultati relativi al dominio delle osservazioni, che l'effetto del metodo MultiRef™ si riflette sugli scarti in latitudine, longitudine e quota. Dal paragone con la soluzione ottenuta con lo schema classico di singola stazione di riferimento si rileva che gli RMS si riducono rispettivamente da 6 a 3 cm, da 6 a 2 cm, da 8 a 5 cm.

ARIA→AVEL (33 km), February 7, 2002

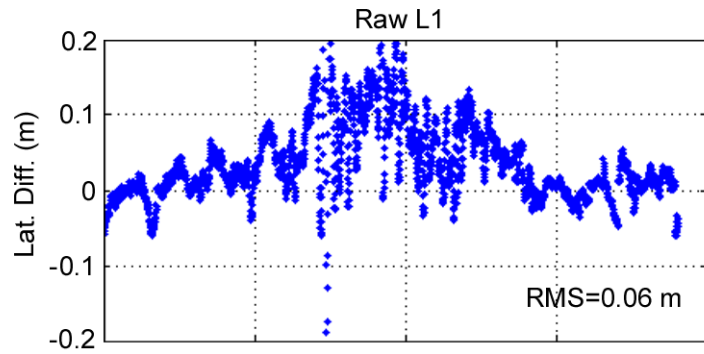


figura 5.8a

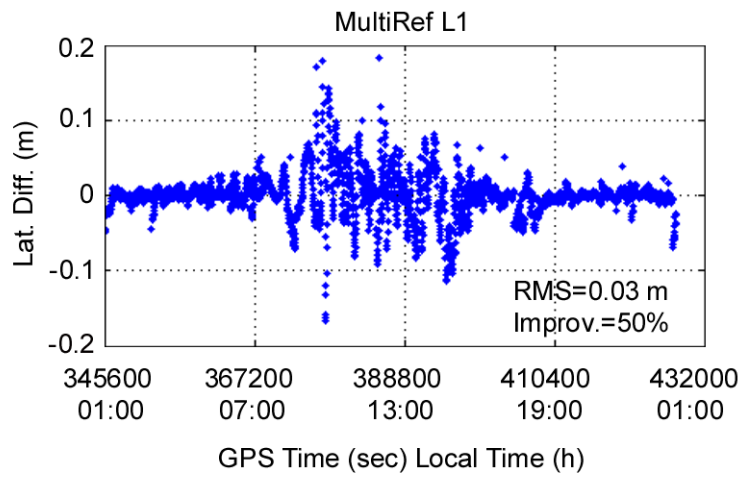


figura 5.8b

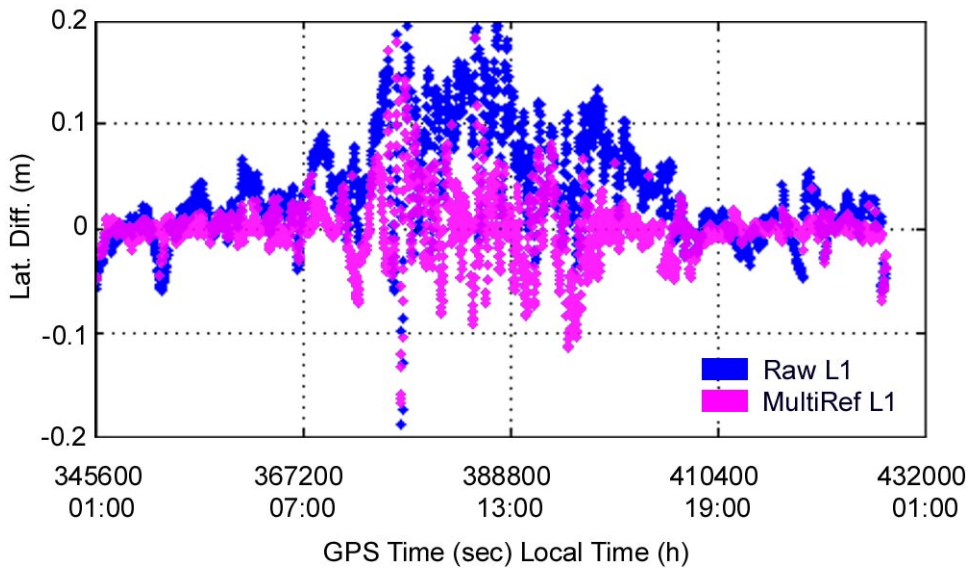


figura 5.8c

**Figura 5.8: Scarti in latitudine per le soluzioni L1 Raw e MultiRef del ricevitore AVEL, per il 7 febbraio 2002**



ARIA→AVEL (33 km), February 7, 2002

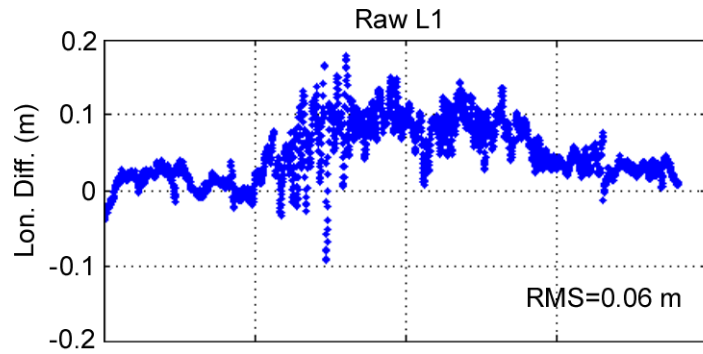


figura 5.9a

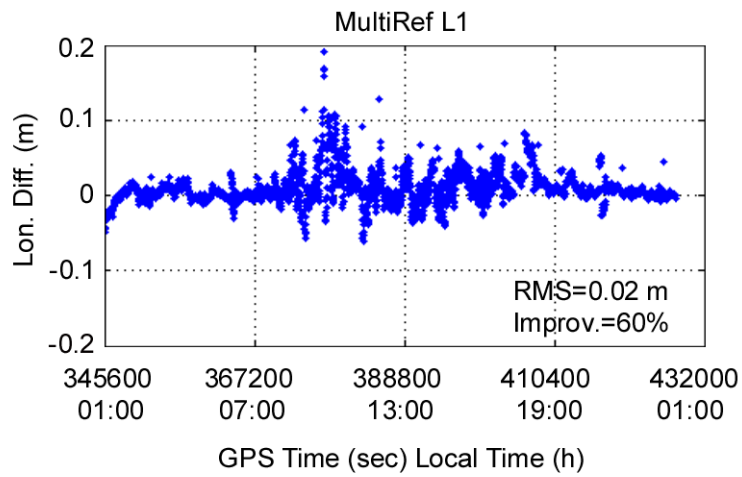


figura 5.9b

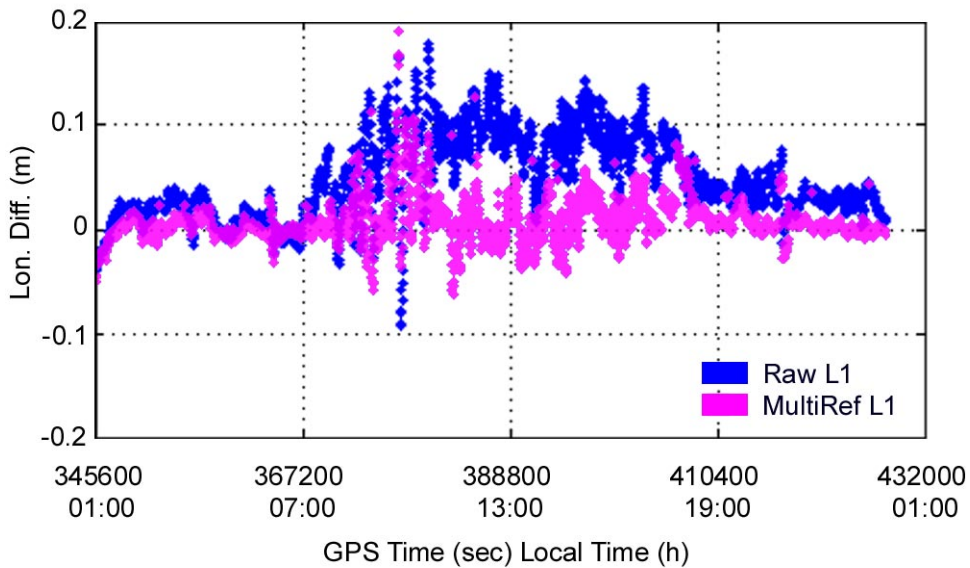


figura 5.9c

**Figura 5.9: Scarti in longitudine per le soluzioni L1 Raw e MultiRef del ricevitore AVEL, per il 7 febbraio 2002**

ARIA→AVEL (33 km), February 7, 2002

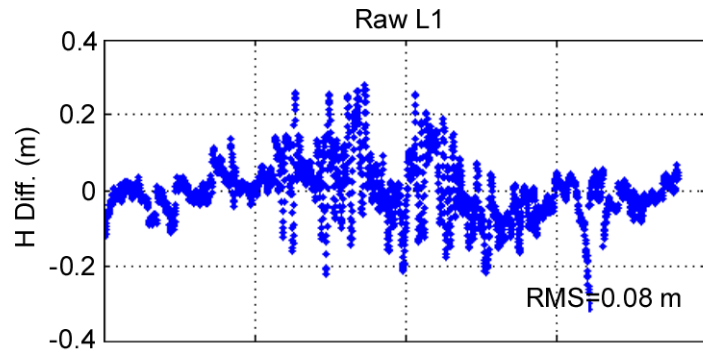


figura 5.10a

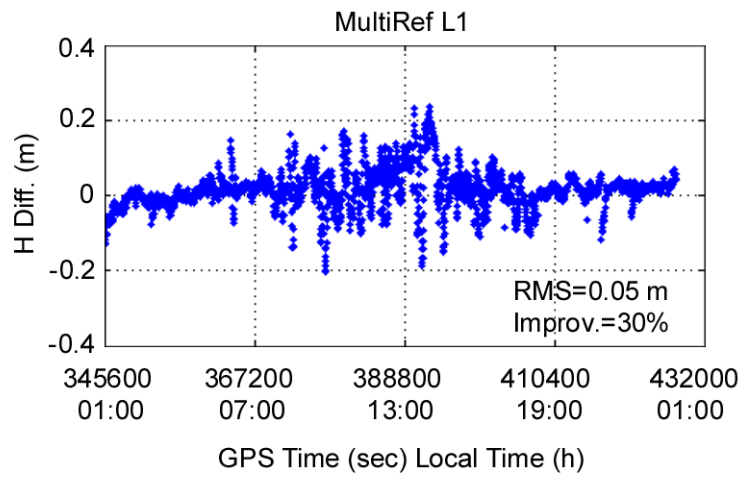


figura 5.10b

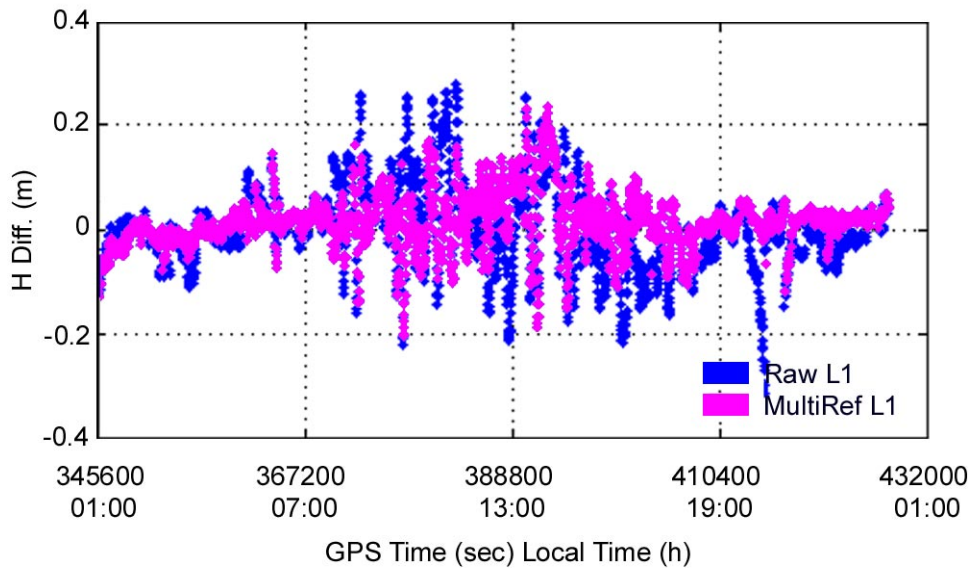
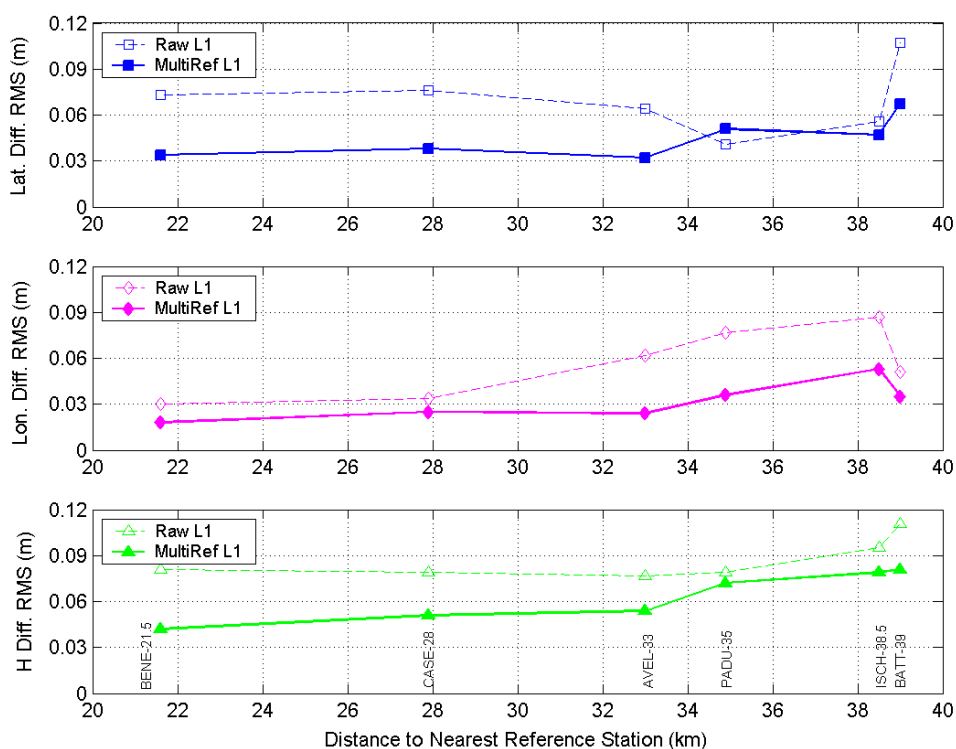


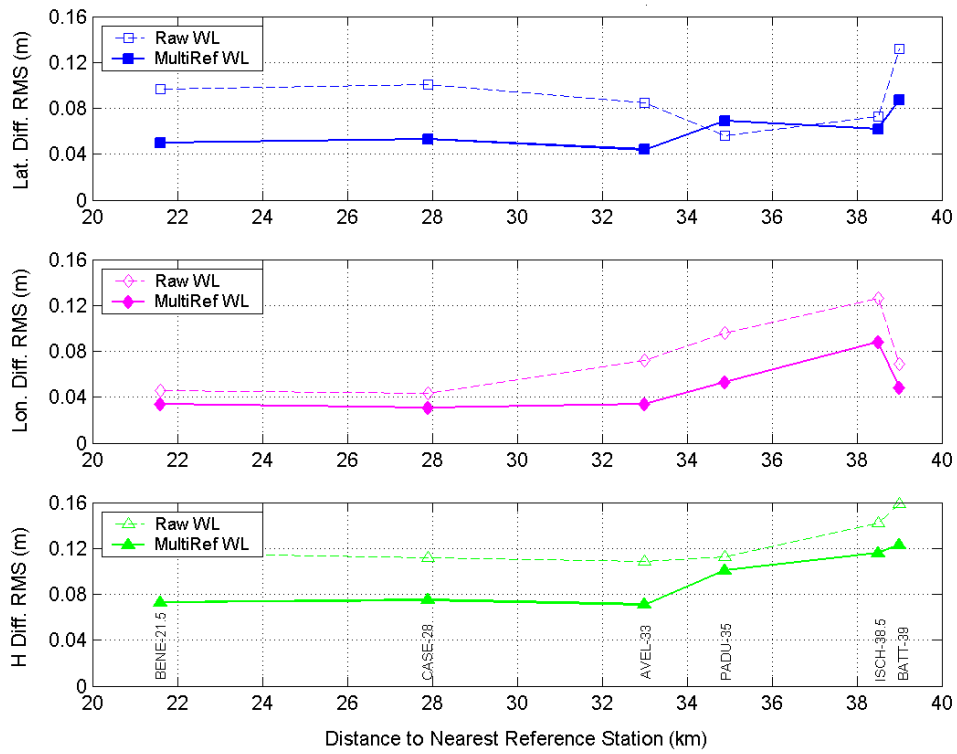
figura 5.10c

**Figura 5.10: Scarti in quota per le soluzioni L1 Raw e MultiRef del ricevitore AVEL, per il 7 febbraio 2002**

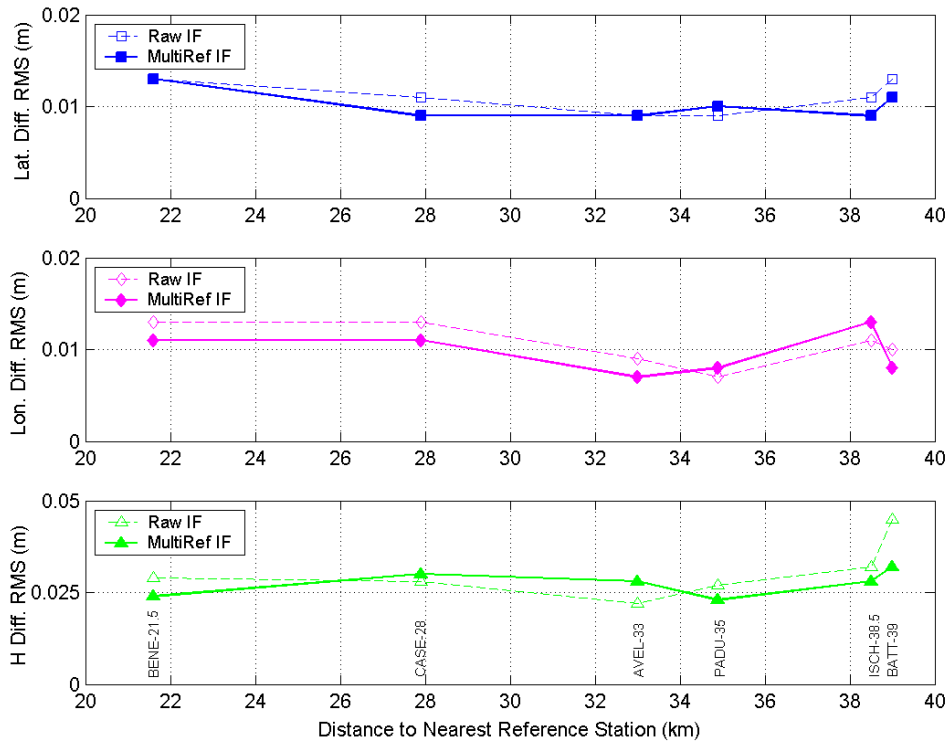
Nelle figure 5.11-5.13 vengono mostrati i valori di RMS degli scarti in latitudine, longitudine e quota in funzione della lunghezza delle baseline, rispettivamente per le misure L1, WL e IF. In quest'ultimo caso, utilizzando la combinazione ionosferic-free, rimane sostanzialmente l'effetto dovuto agli errori d'orbita e troposferico. Si osserva che nel caso gli scarti risultino bassi già con i dati grezzi, come accade prevalentemente per le misure IF, la soluzione MultiRef<sup>TM</sup> in effetti non varia rispetto alla soluzione Raw.



**Figura 5.11: Andamento dei valori di RMS degli scarti in latitudine, longitudine e quota relativi alle soluzioni L1 Raw e MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**



**Figura 5.12: Andamento dei valori di RMS degli scarti in latitudine, longitudine e quota relativi alle soluzioni WL Raw e MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**



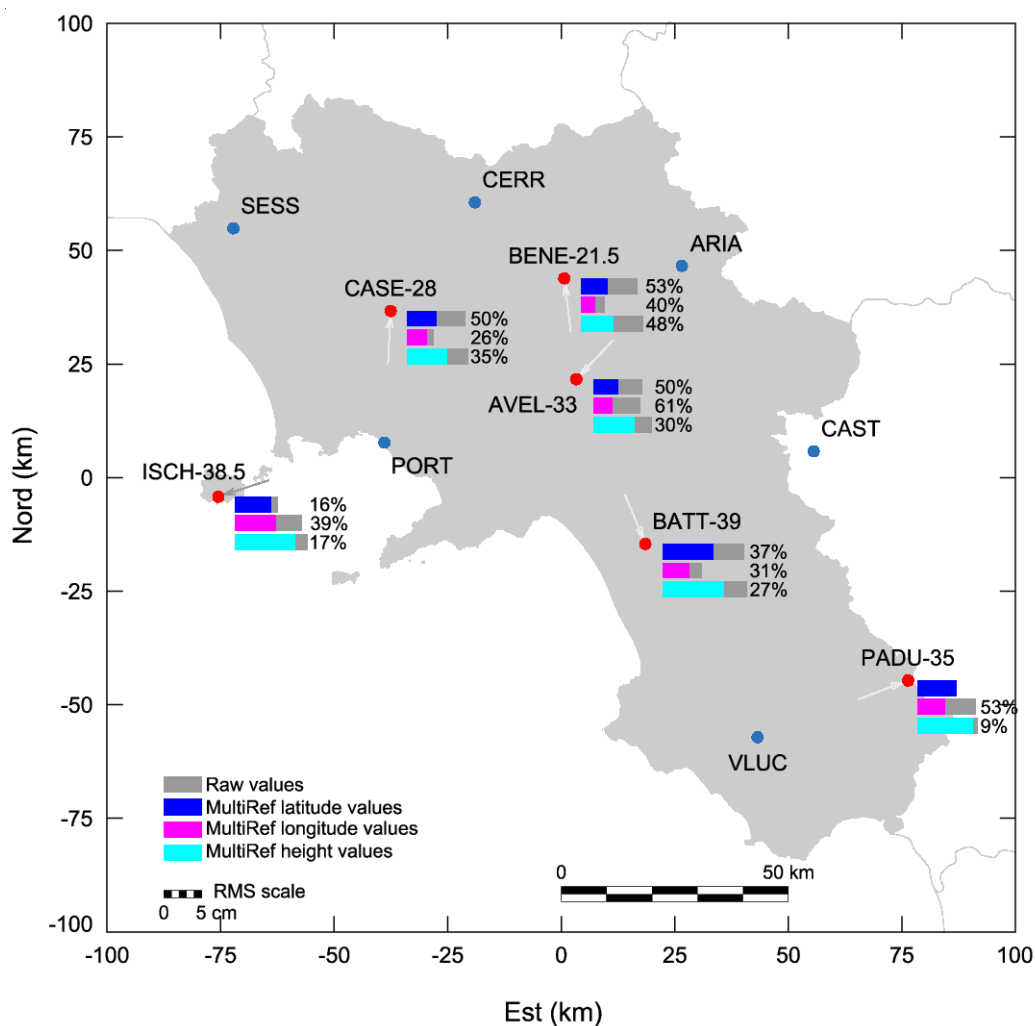
**Figura 5.13: Andamento dei valori di RMS degli scarti in latitudine, longitudine e quota relativi alle soluzioni IF Raw e MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**

Nella tabella 5.3 viene riportata una sintesi dei risultati nel dominio delle posizioni, relativi ai confronti effettuati per il giorno di misura del 7 febbraio 2002.

**Tabella 5.3: Valori di RMS degli scarti in latitudine, longitudine e quota relativi alle soluzioni Raw e MultiRef per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**

Coord. Component	L1 (m)			WL (m)			IF (m)		
	Raw	MultiRef	Imprv	Raw	MultiRef	Imprv	Raw	MultiRef	Imprv
<b>AVEL→BENE (21,5 km)</b>									
Latitude	0,073	0,034	53%	0,097	0,050	48%	0,01	0,01	0%
Longitude	0,030	0,018	40%	0,046	0,034	26%	0,01	0,01	0%
Ellipsoidal Height	0,081	0,042	48%	0,116	0,073	37%	0,025	0,025	0%
<b>PORT→CASE (28 km)</b>									
Latitude	0,076	0,038	50%	0,101	0,053	48%	0,01	0,01	0%
Longitude	0,034	0,025	26%	0,043	0,031	28%	0,01	0,01	0%
Ellipsoidal Height	0,079	0,051	35%	0,112	0,075	33%	0,03	0,03	0%
<b>ARIA→AVEL (33 km)</b>									
Latitude	0,064	0,032	50%	0,085	0,044	48%	0,01	0,01	0%
Longitude	0,062	0,024	60%	0,072	0,034	53%	0,01	0,01	0%
Ellipsoidal Height	0,077	0,054	30%	0,109	0,071	35%	0,025	0,025	0%
<b>VLUC→PADU (35 km)</b>									
Latitude	0,045	0,045	0%	0,065	0,065	0%	0,01	0,01	0%
Longitude	0,077	0,036	53%	0,096	0,053	45%	0,01	0,01	0%
Ellipsoidal Height	0,079	0,072	9%	0,113	0,101	11%	0,025	0,025	0%
<b>PORT→ISCH (38,5 km)</b>									
Latitude	0,056	0,047	16%	0,073	0,062	15%	0,01	0,01	0%
Longitude	0,087	0,053	39%	0,126	0,088	30%	0,01	0,01	0%
Ellipsoidal Height	0,095	0,079	17%	0,142	0,116	18%	0,03	0,03	0%
<b>AVEL→BATT (39 km)</b>									
Latitude	0,107	0,067	37%	0,132	0,087	34%	0,01	0,01	0%
Longitude	0,051	0,035	31%	0,069	0,048	30%	0,01	0,01	0%
Ellipsoidal Height	0,111	0,081	27%	0,159	0,123	23%	0,05	0,03	29%

In particolare, i risultati riguardanti le misure L1, per i sei scenari complessivi, sono stati visualizzati nella figura 5.14.



**Figura 5.14: Valori di RMS degli scarti in latitudine, longitudine e quota relativi alle soluzioni L1 per sei scenari, per il 7 febbraio 2002**

#### 5.4 Risultati nel dominio delle ambiguità

L'analisi dei risultati sviluppata per il dominio delle osservazioni e per quello delle posizioni culmina nell'esame degli effetti del metodo MultiRef™ sulla risoluzione dell'ambiguità di fase in modalità OTF (on-the-fly).

A tal proposito è stato effettuato il processamento per tre differenti distanze dalla stazione base, utilizzando le configurazioni BENE-21.5, AVEL-33 e BATT-39: in particolare i trattamenti sono avvenuti tramite il software FLYKIN Suite™ [GEOsurv, 1999].

L'analisi epoca per epoca, condotta sempre per confronto tra soluzione Raw e MultiRef™, si è focalizzata in particolare sui due aspetti fondamentali legati alla risoluzione delle ambiguità:

- tempi di inizializzazione;
- affidabilità dei risultati.

Per quel che riguarda la metodologia operativa, adoperando una modifica ad hoc, l'elaborazione FLYKIN su 24 ore di dati è stata effettuata in diverse iterazioni interrompendola appositamente secondo un intervallo di tempo prefissato: l'obiettivo infatti è stato quello di forzare il procedimento di ricerca delle ambiguità in modo da generarne più soluzioni nell'arco delle 24 ore.

Nella tabella seguente si riportano i risultati ottenuti per i tre scenari BENE-21.5, AVEL-33, BATT-39 relativi al giorno di misura 7 febbraio 2002.

**Tabella 5.4: Tempi di fissaggio e affidabilità della risoluzione delle ambiguità intere di fase per gli scenari BENE-21.5, AVEL-33, BATT-39 per il 7 febbraio 2002**

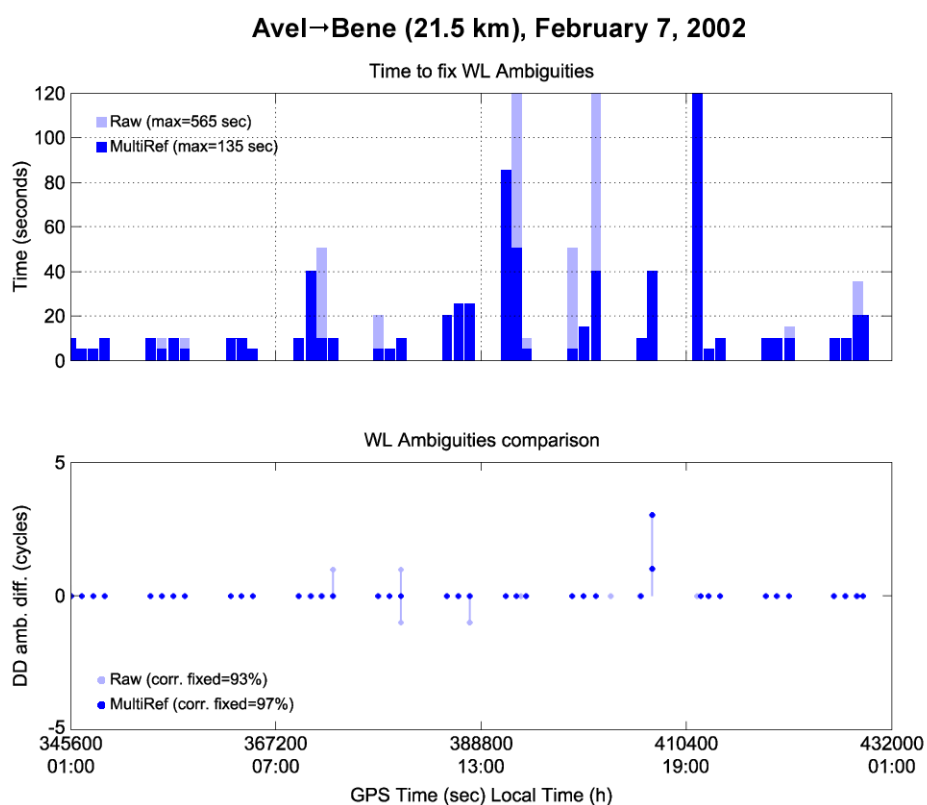
Baseline	% of corrected fixes of WL ambiguities		Mean time to correctly fix WL ambiguities (seconds)			Max time to correctly fix WL ambiguities (seconds)		
	Single Ref. St.	MultiRef	Single Ref. St.	MultiRef	Imprv	Single Ref. St.	MultiRef	Imprv
AVEL→BENE (21.6 km)	93	97	46	19	58%	565	135	76%
ARIA→AVEL (33 km)	93	95	77	25	68%	1150	290	75%
AVEL→BATT (39 km)	83	93	80	49	39%	630	345	45%

L'utilizzo del metodo MultiRef™ contribuisce in due diversi modi a semplificare il procedimento di risoluzione delle ambiguità di fase: difatti, generando misure più accurate, da una parte si riducono le dimensioni dello spazio di ricerca dall'altra migliora la capacità di verificare la soluzione tramite il test RATIO.

La tabella 5.4 mostra miglioramenti per quanto riguarda in generale le prestazioni nel dominio delle ambiguità; i benefici derivanti dall'applicazione del MultiRef™ oltre a manifestarsi in termini di affidabilità della soluzione e tempi medi

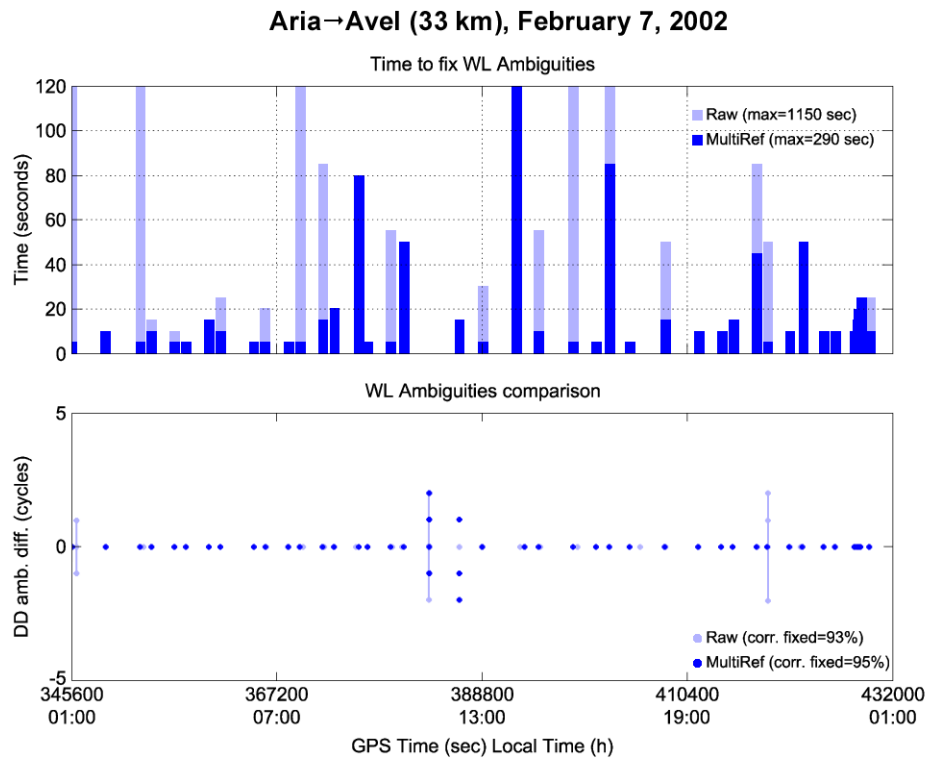
di inizializzazione, diventano ancor più significativi nella riduzione dei tempi massimi.

Le figure 5.15-5.17 visualizzano i risultati per i tre scenari in esame. Dai diagrammi relativi ai tempi di inizializzazione è evidente che i valori massimi si rilevano in corrispondenza delle ore in cui lo stato della ionosfera è maggiormente attivo; la loro riduzione conferma pertanto l'effetto preponderante del metodo MultiRef™ sull'errore ionosferico. Ai fini dell'analisi dell'affidabilità, per ogni scenario vengono inoltre riportati gli scarti delle doppie differenze delle ambiguità per entrambe le soluzioni Raw e MultiRef™ assumendo come valori di riferimento i risultati estratti dai trattamenti Bernese.

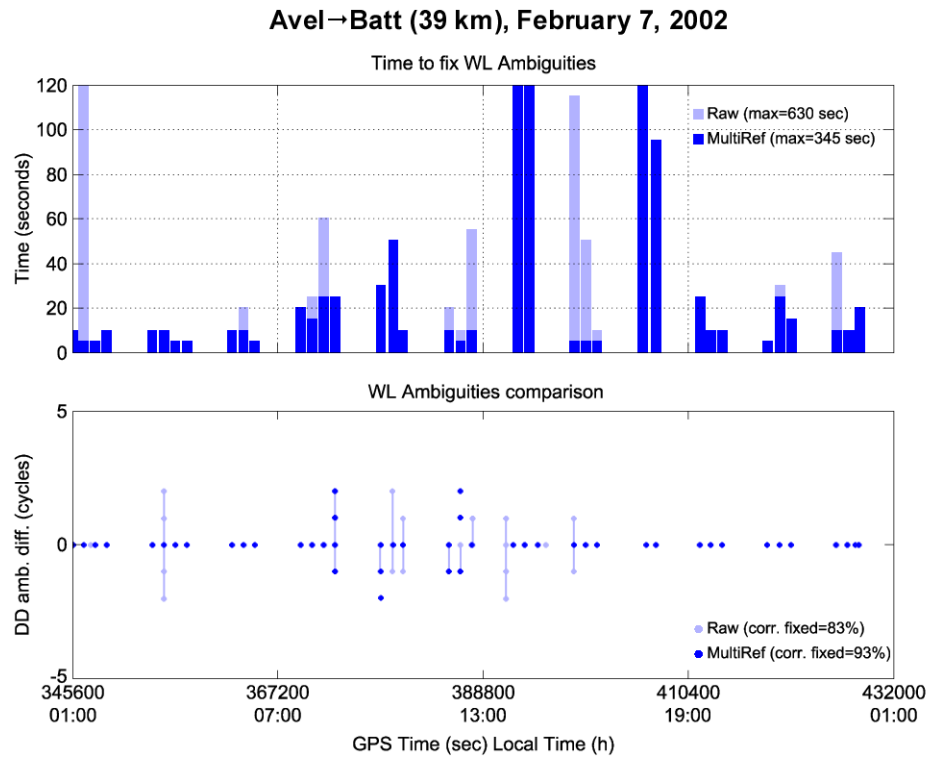


**Figura 5.15: Tempi di inizializzazione e affidabilità delle soluzioni delle ambiguità di fase per la configurazione BENE-21.5, per il 7 febbraio 2002**





**Figura 5.16: Tempi di inizializzazione e affidabilità delle soluzioni delle ambiguità di fase per la configurazione AVEL-33, per il 7 febbraio 2002**

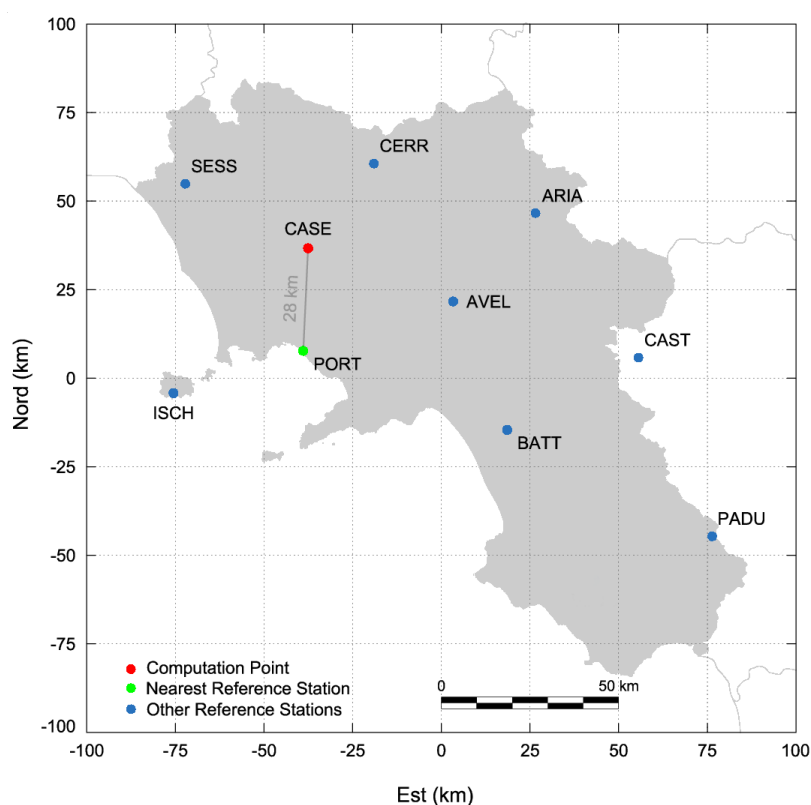


**Figura 5.17: Tempi di inizializzazione e affidabilità delle soluzioni delle ambiguità di fase per la configurazione BATT-39, per il 7 febbraio 2002**

## 5.5 Analisi su base temporale

Un ulteriore studio è stato condotto con l'obiettivo di conoscere il comportamento del metodo MultiRef™ in funzione delle variazioni temporali su base giornaliera.

A tal fine, per un prefissato schema di rete (figura 5.18) le correzioni MultiRef™ sono state ricalcolate per sei giorni di misura, relativamente al periodo dal 7 al 12 febbraio 2002.

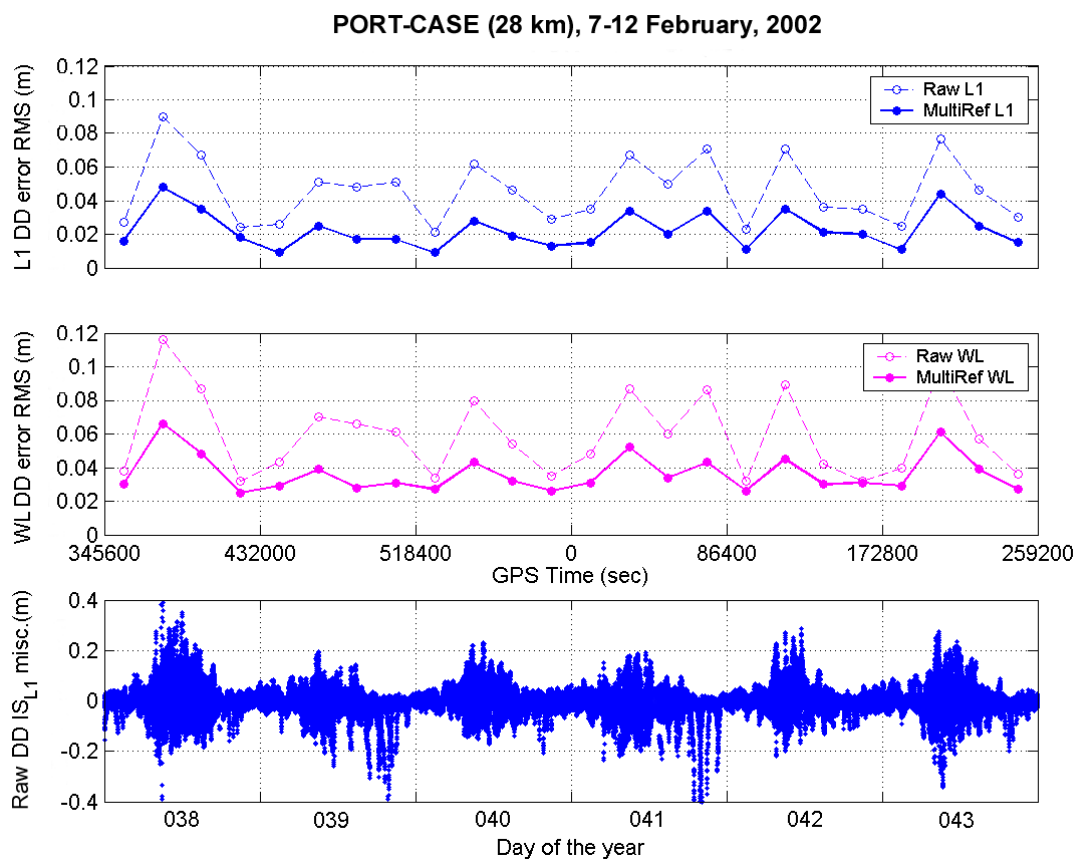


**Figura 5.18: Configurazione della rete Campania Network per l'analisi su sei giorni di misura**

L'analisi è stata condotta nell'ambito del dominio delle osservazioni esaminando in particolare l'andamento nel tempo degli errori di misura differenziali.

La figura 5.19 sintetizza i risultati ottenuti. Oltre a confermare il miglioramento legato all'utilizzo del metodo MultiRef™, questo tipo di analisi ha evidenziato una maggiore uniformità apportata dal metodo ai valori di RMS sui sei giorni: infatti, sebbene i grafici riflettano lo stato della ionosfera, la soluzione MultiRef™ tende

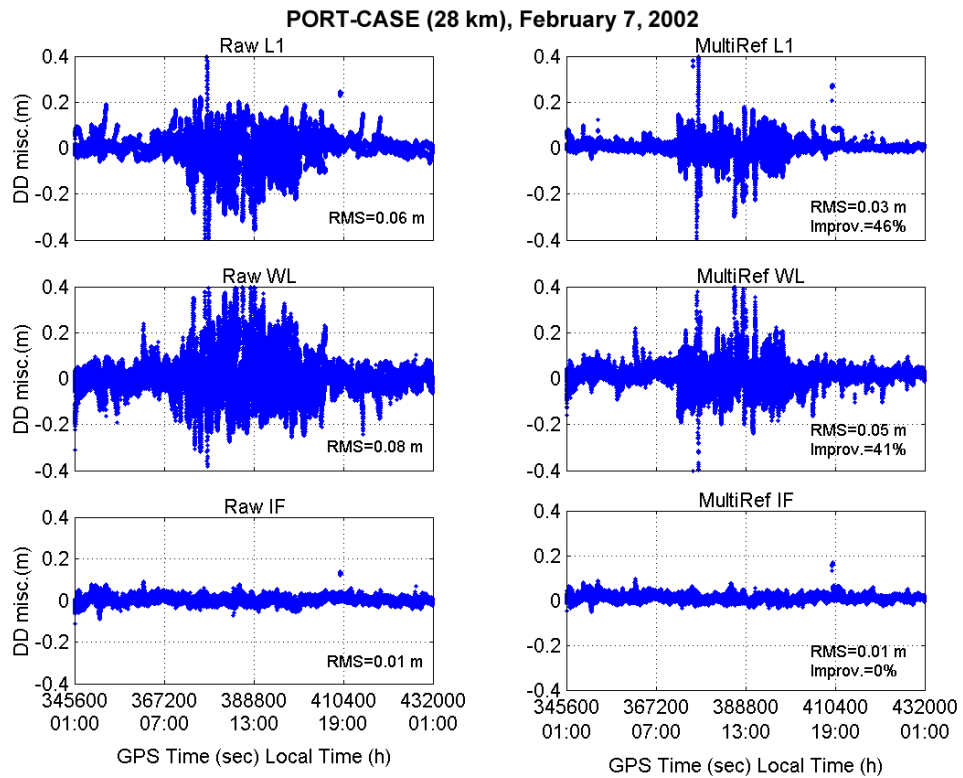
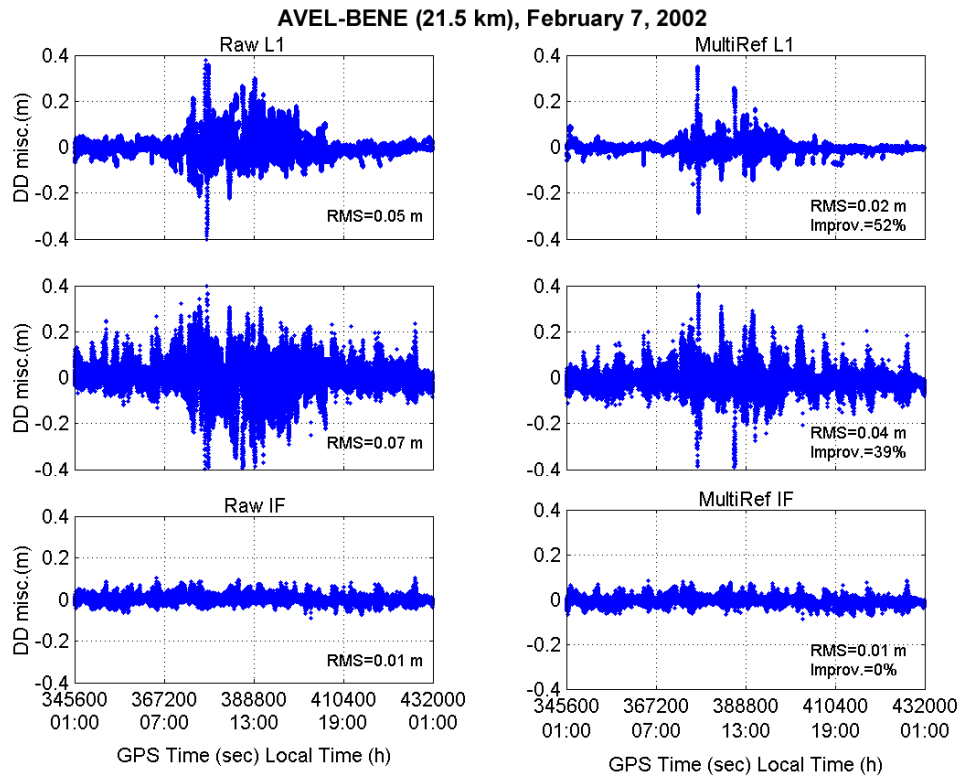
comunque ad assumere un andamento più piatto rispetto ai valori delle soluzioni Raw, sia per le misure L1 che WL.



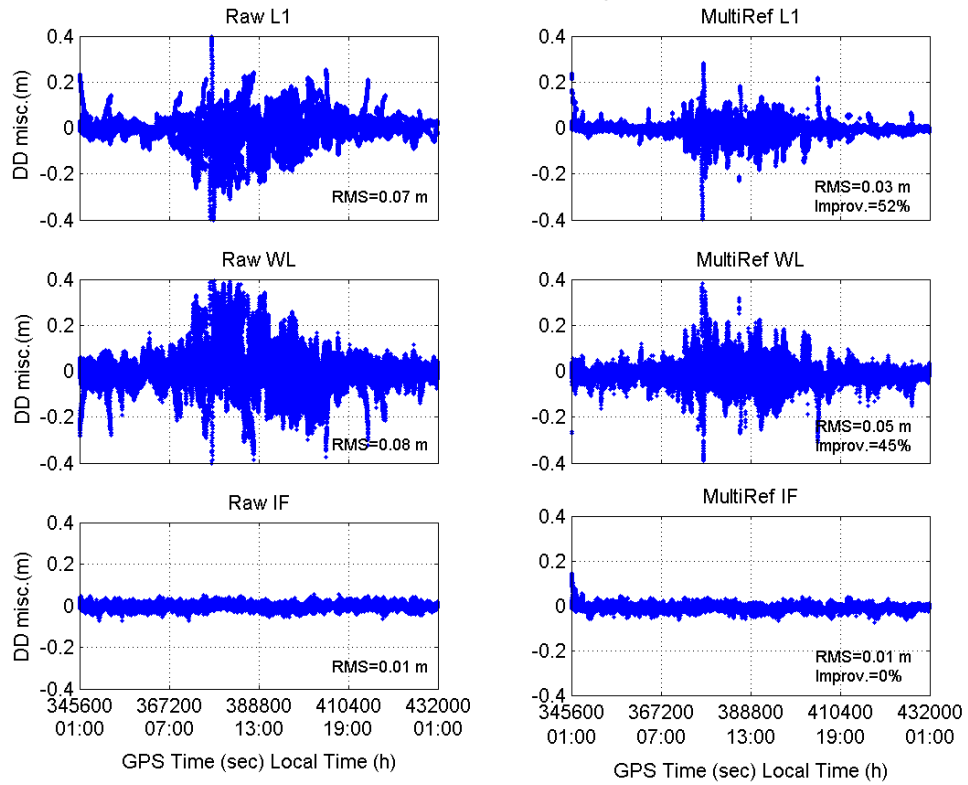
**Figura 5.19: Variazioni temporali dei valori di RMS degli errori differenziali L1 e WL relativi ai dati grezzi e alle misure corrette MultiRef per il periodo 7-12 febbraio 2002, per la baseline PORT-CASE (28 km)**

## 5.6 Rapporto complessivo dei risultati per le sei configurazioni di rete

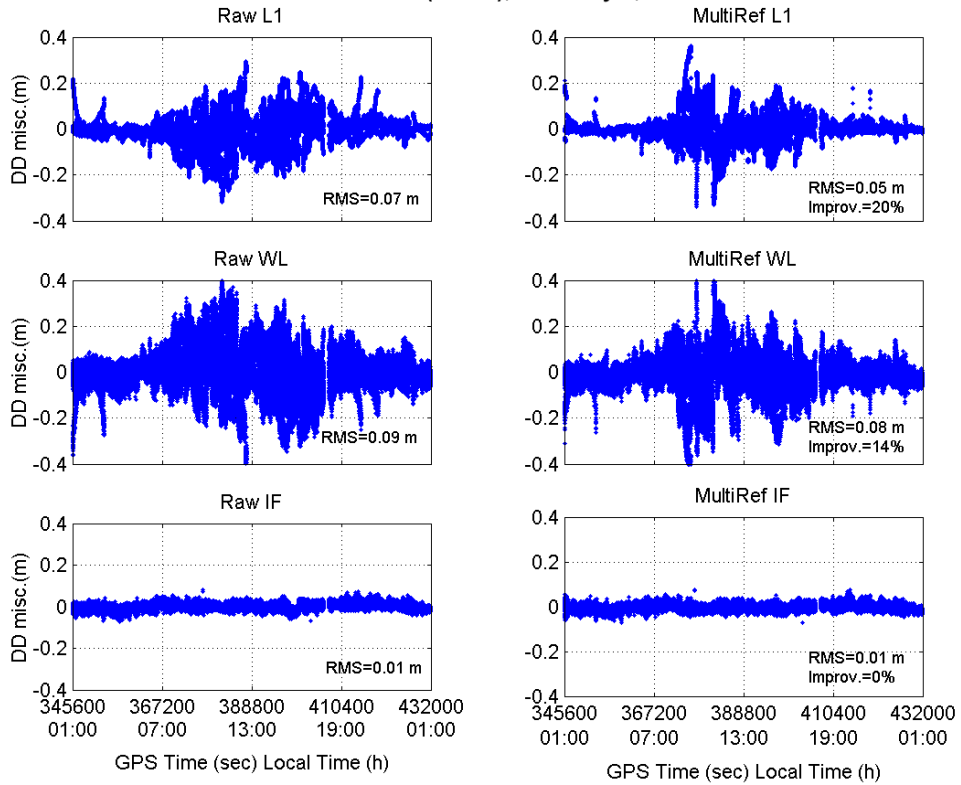
### 5.6.1 Dominio delle osservazioni



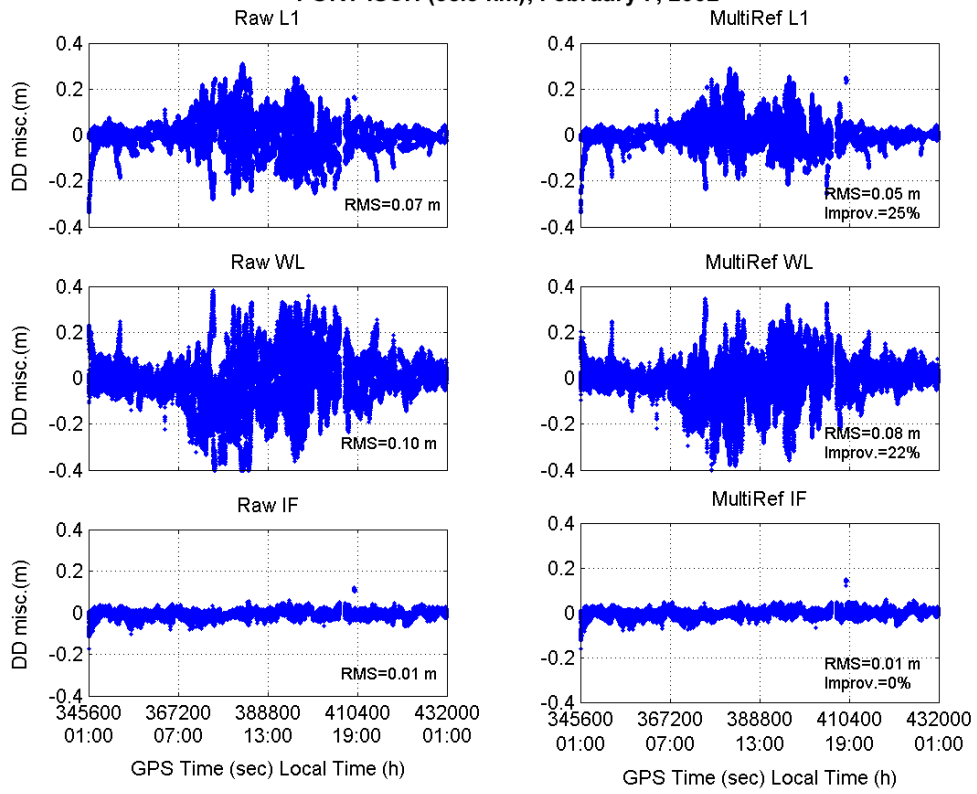
**ARIA-AVEL (33 km), February 7, 2002**



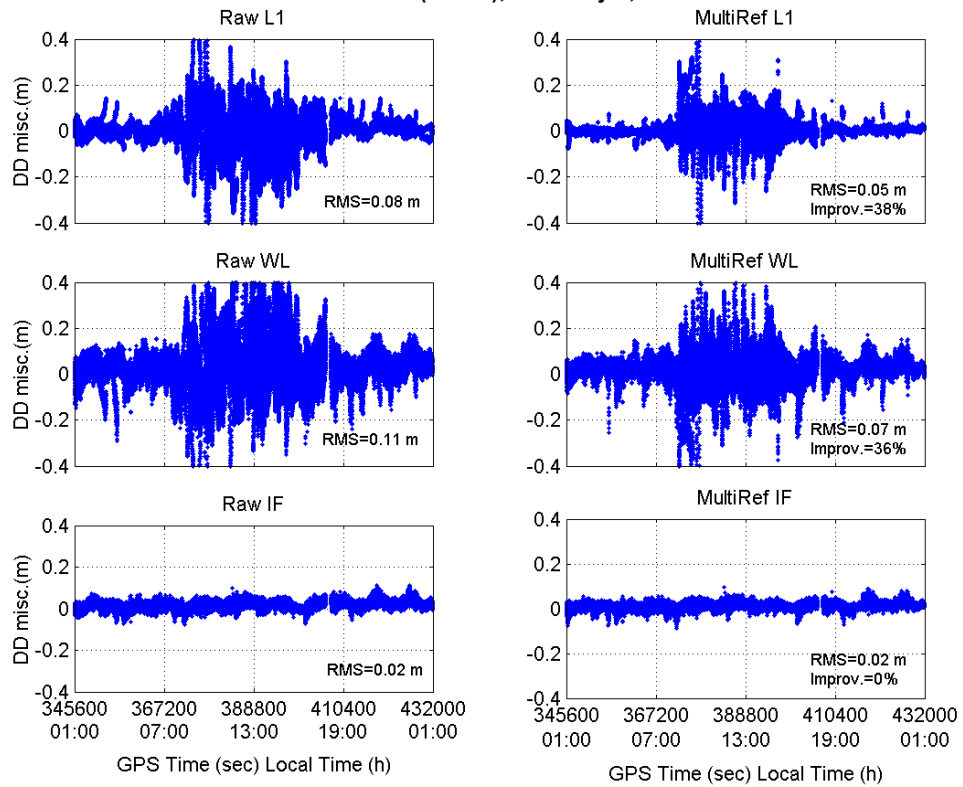
**VLUC-PADU (35 km), February 7, 2002**



**PORT-ISCH (38.5 km), February 7, 2002**

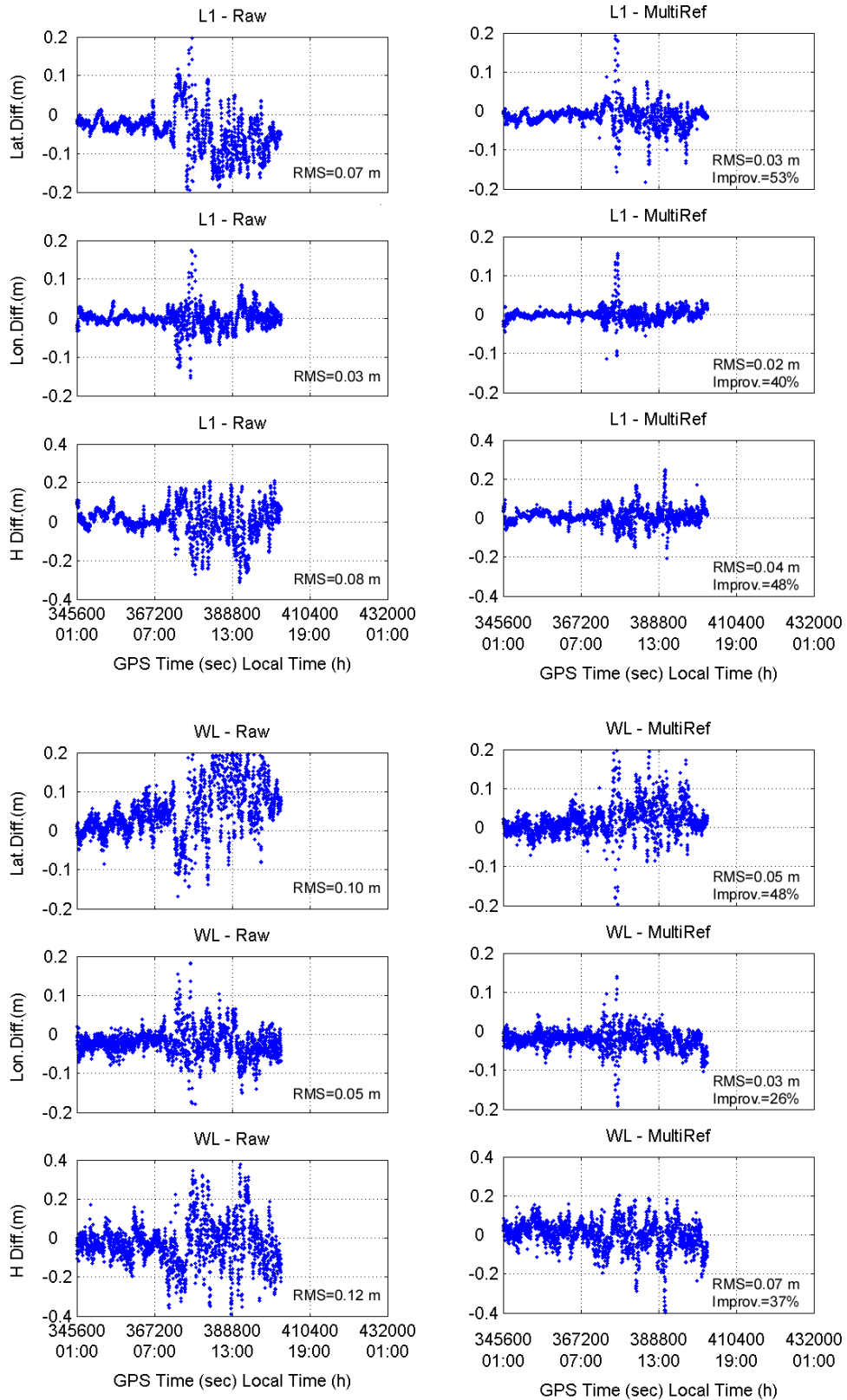


**AVEL-BATT (39 km), February 7, 2002**

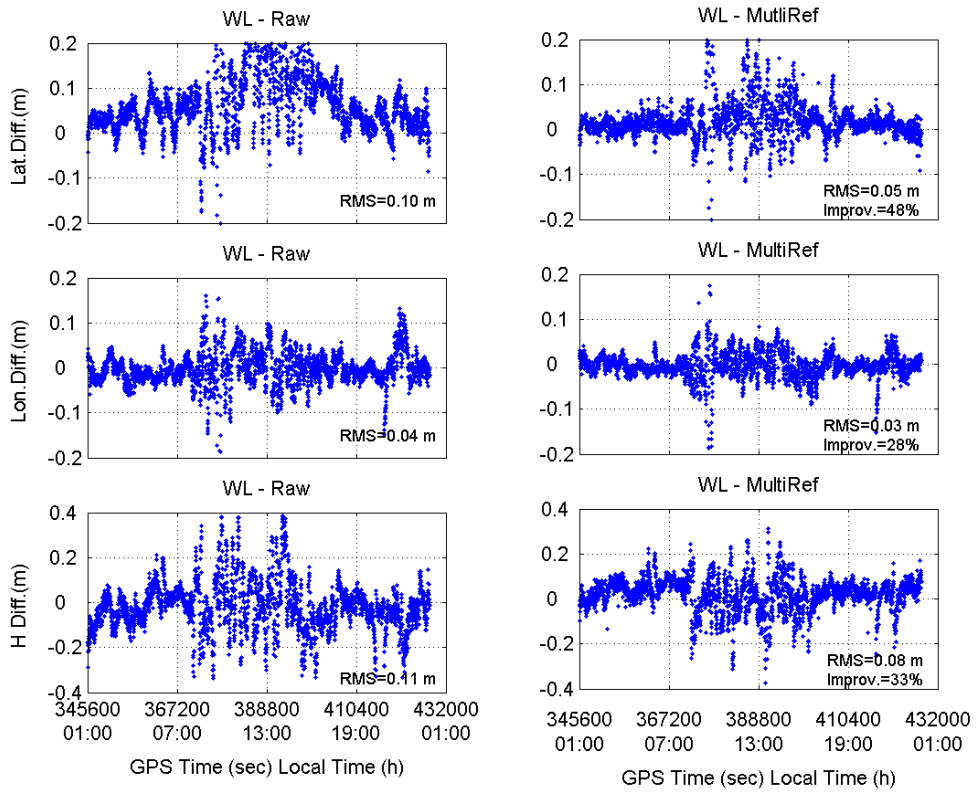
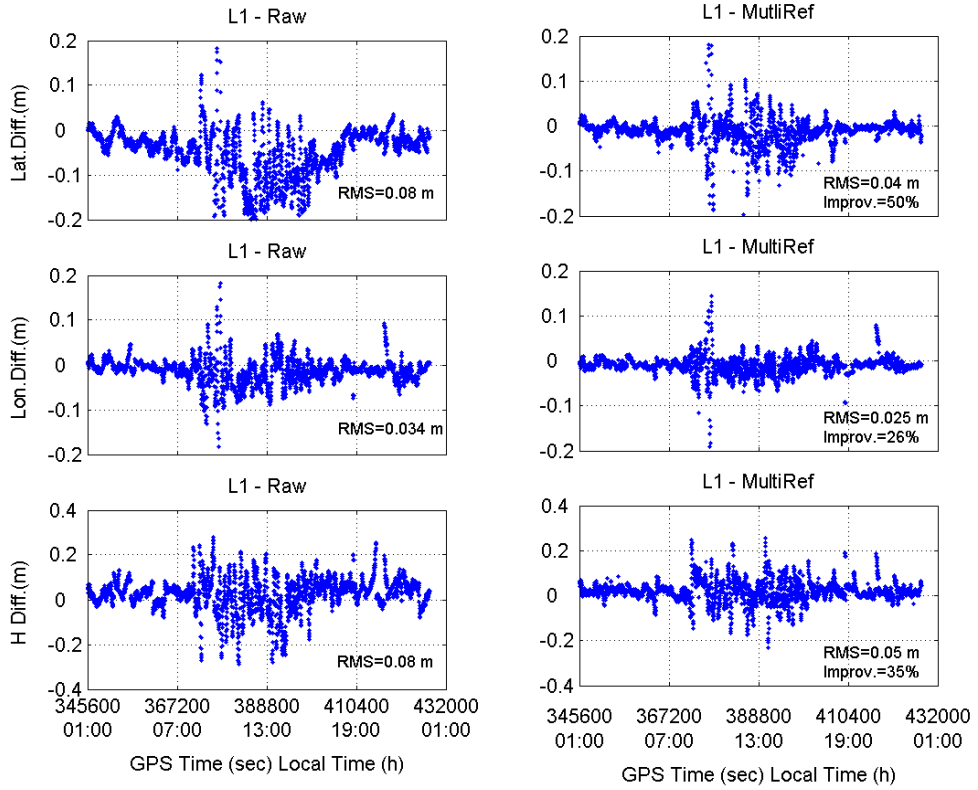


## 5.6.2 Dominio delle posizioni

AVEL → BENE (21.5 km), February 7, 2002

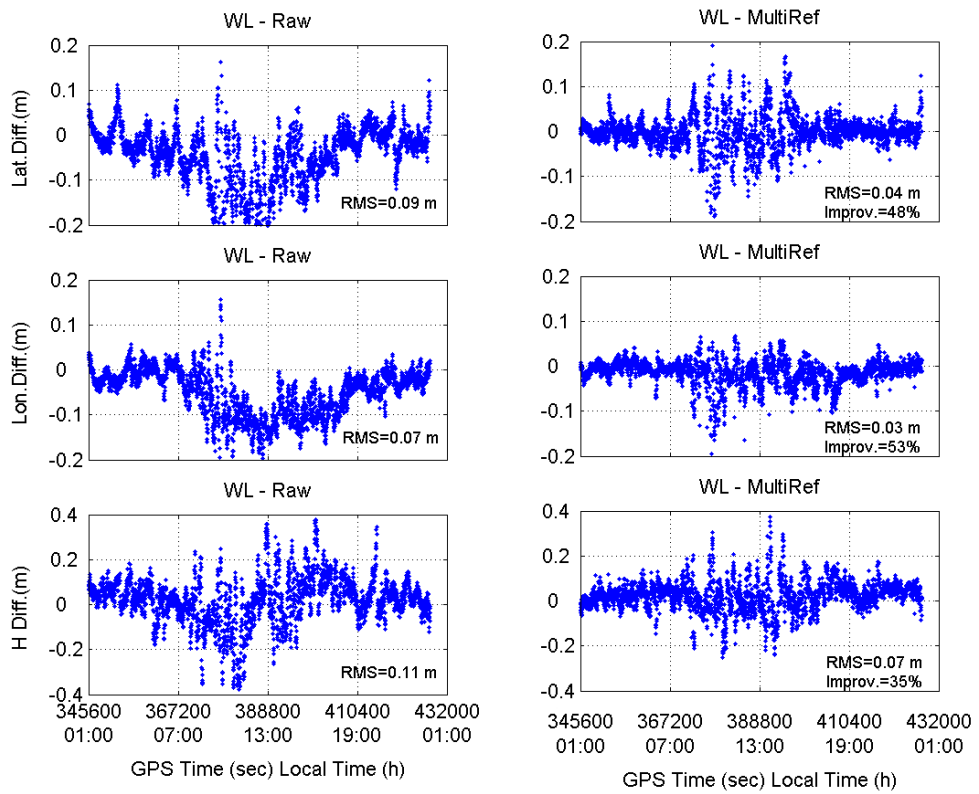
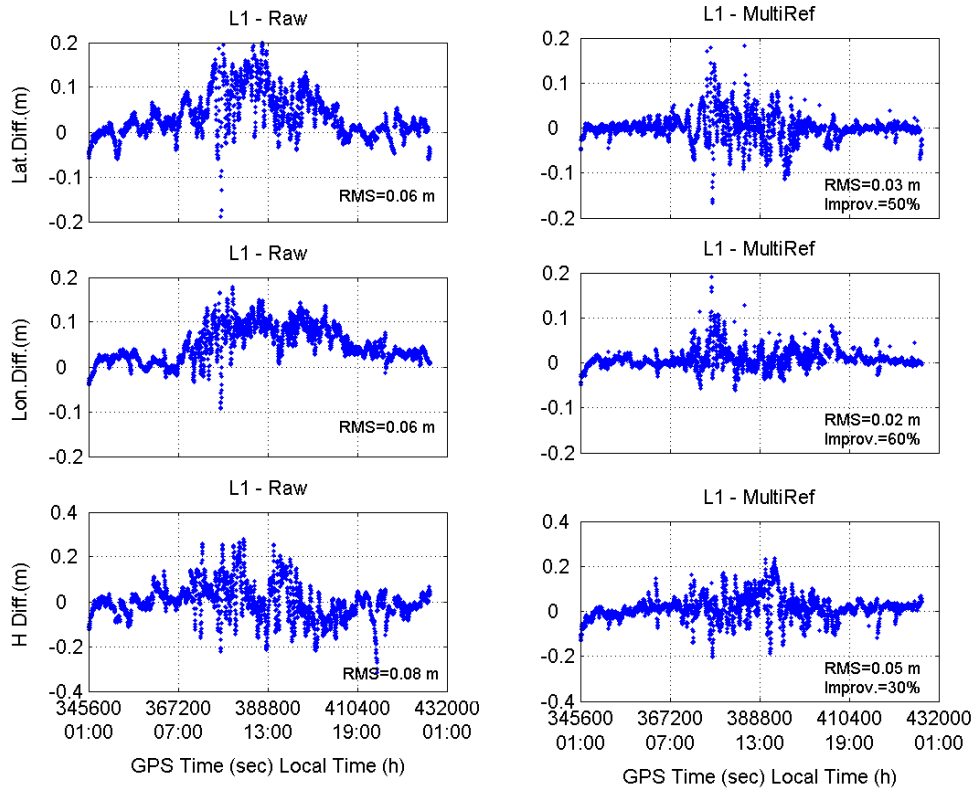


PORT-CASE (28 km), February 7, 2002

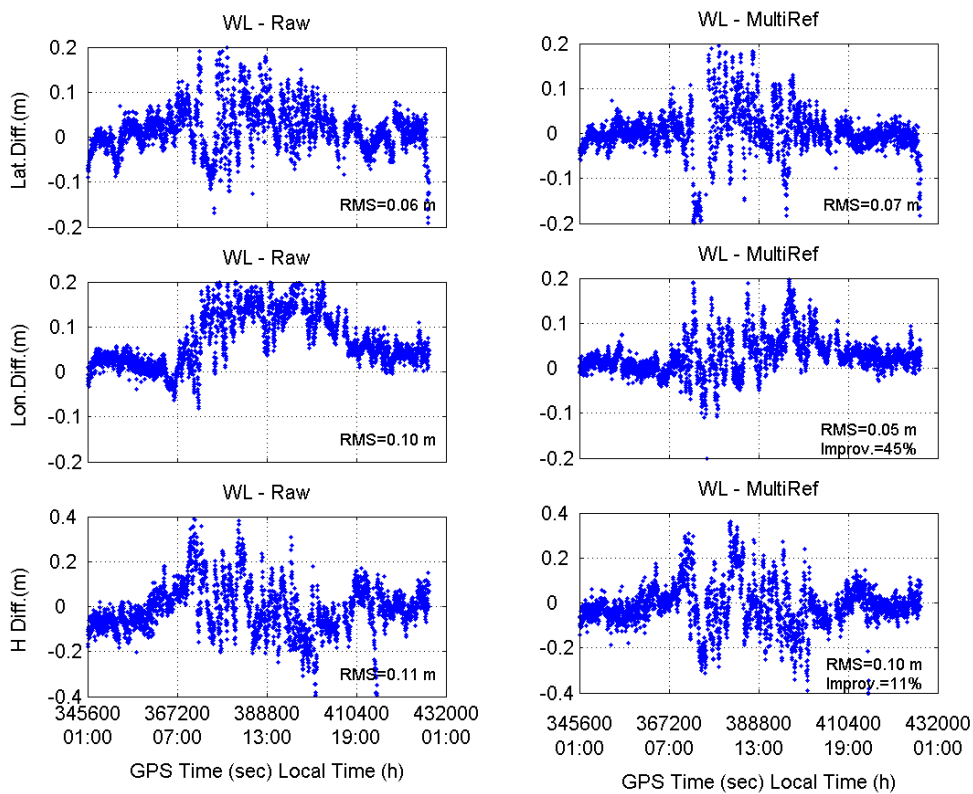
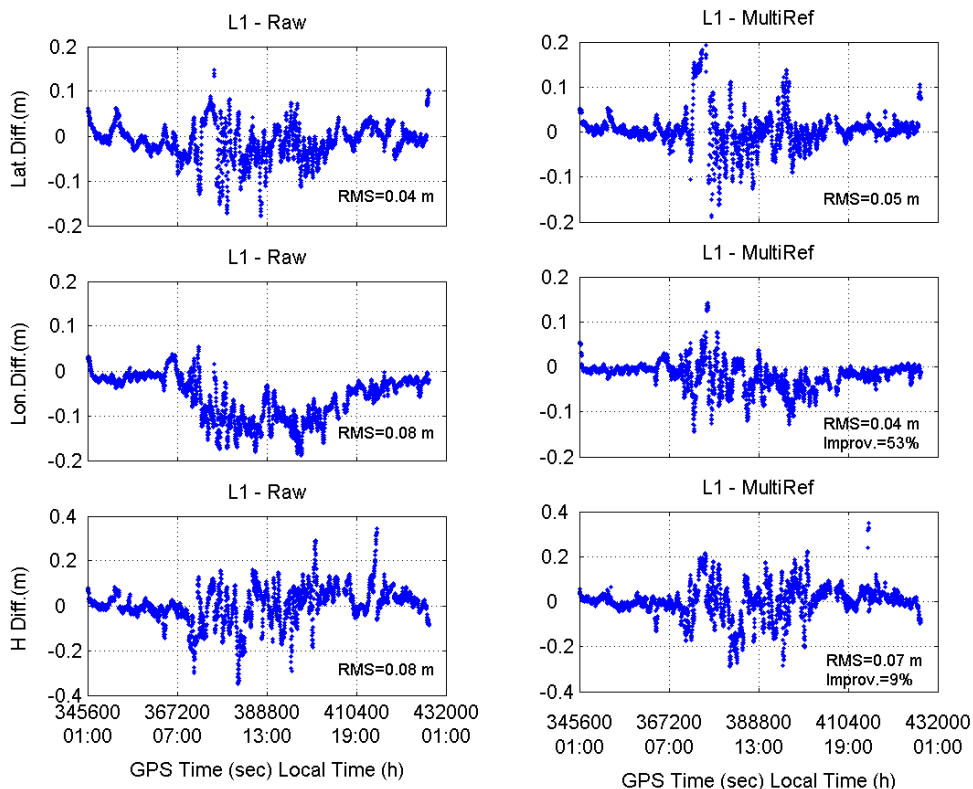




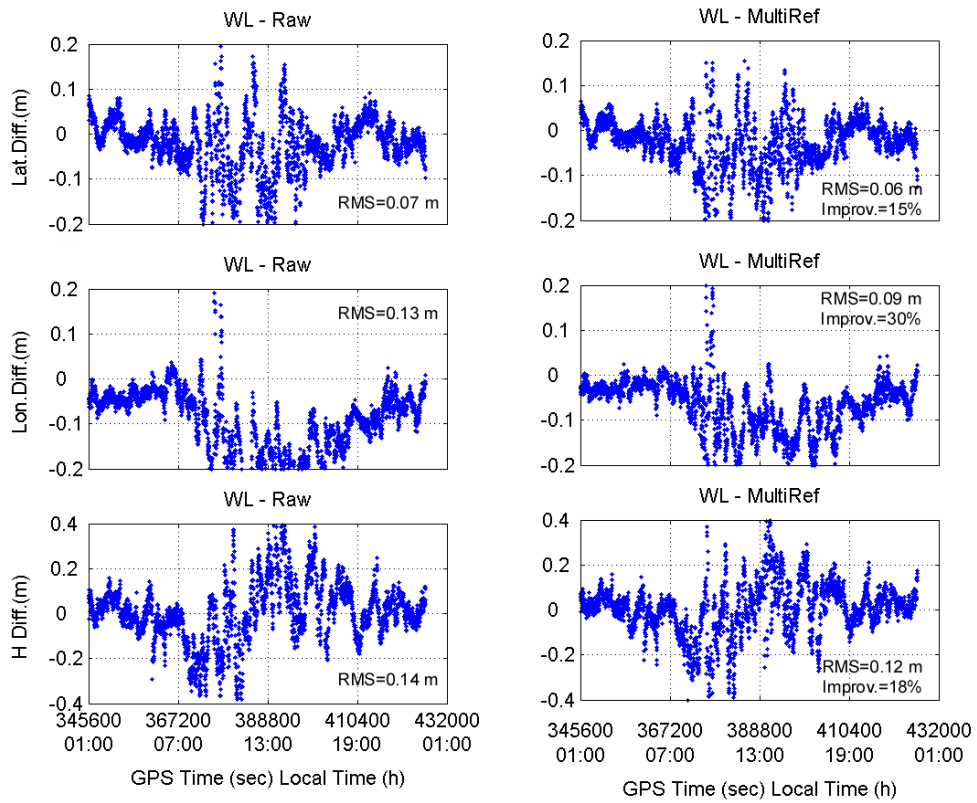
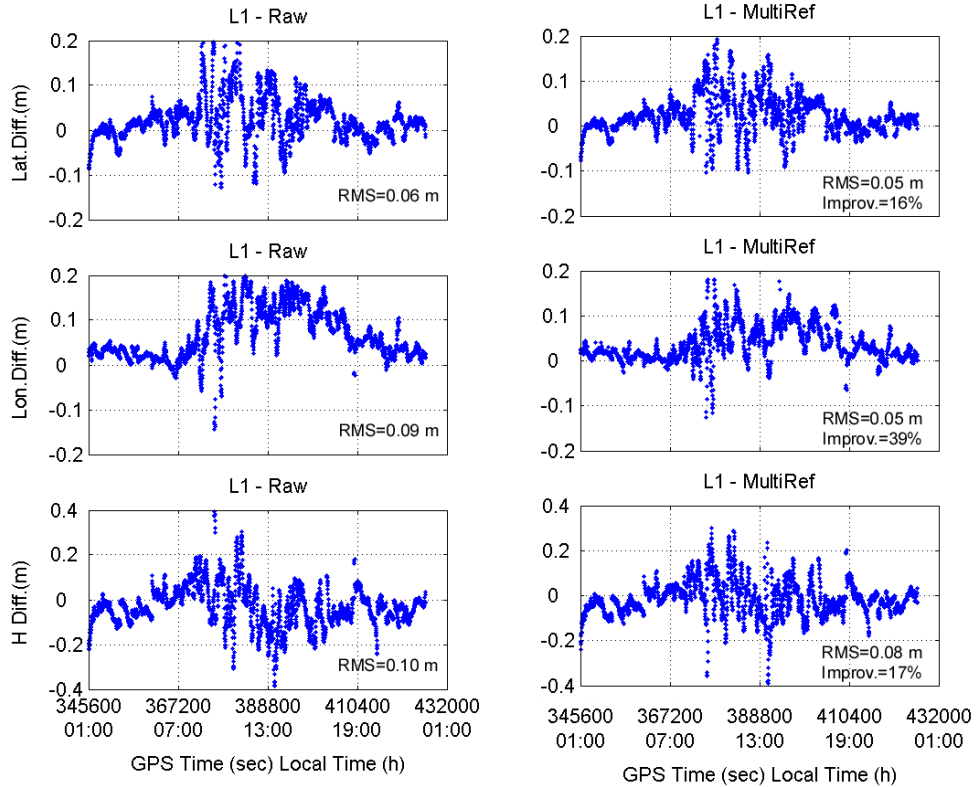
ARIA→AVEL (33 km), February 7, 2002



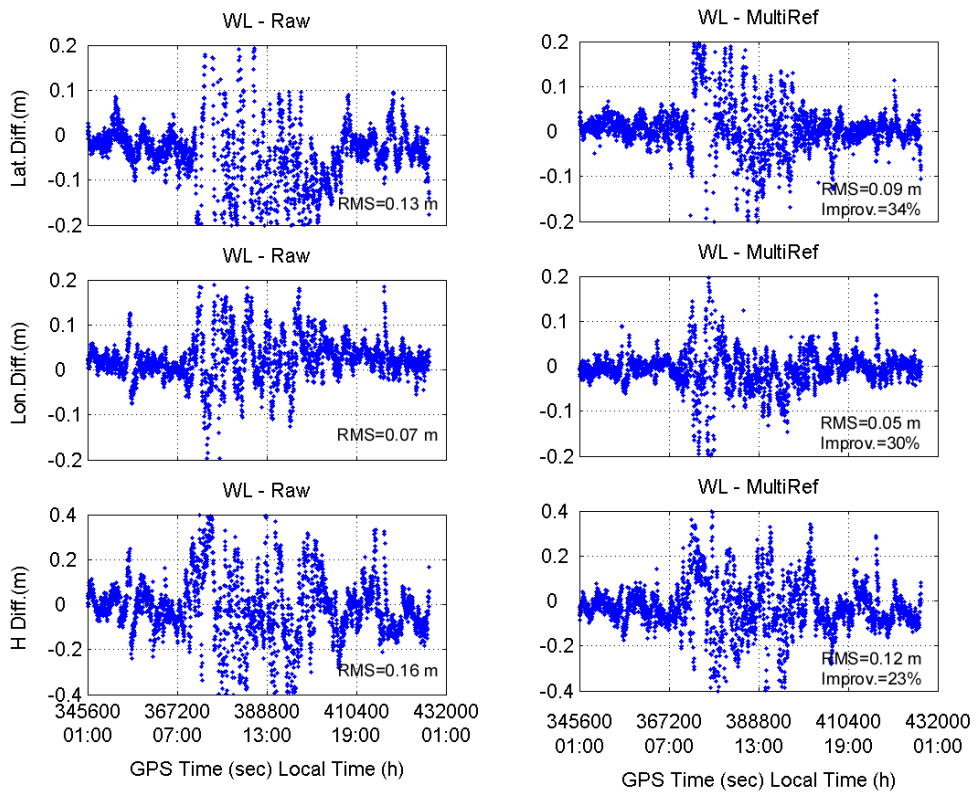
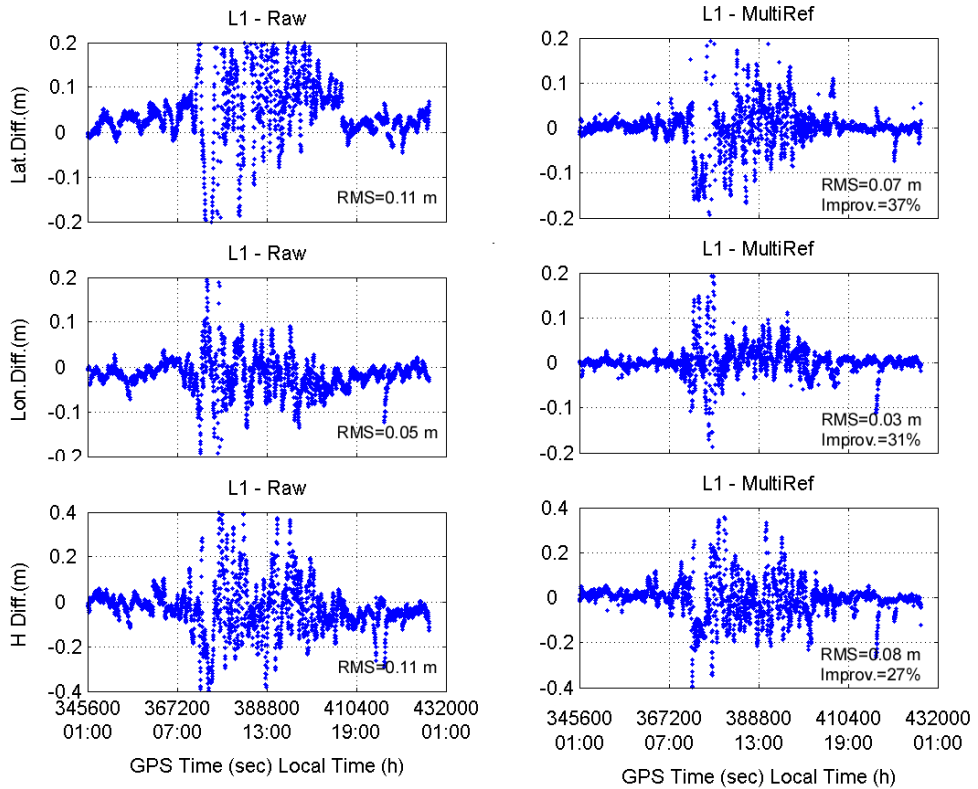
VLUC→PADU (35 km), February 7, 2002



PORT→ISCH (38.5 km), February 7, 2002



AVEL→BATT (39 km), February 7, 2002



## CONCLUSIONI

Negli ultimi anni ci sono stati continui sviluppi nell'ambito delle misure GPS. La tecnica multi-reference station senza dubbio è un ulteriore passo avanti che avrà un effetto significativo sull'utilizzo del GPS negli anni a venire. La sua importanza primaria consiste nel ridefinire il concetto stesso di reti di stazioni permanenti, determinando una vera e propria innovazione del processo produttivo nell'ambito delle misure GPS.

Finora infatti le stazioni permanenti hanno avuto soprattutto la funzione di vertici "attivi" di reti GPS per applicazioni statiche. Grazie alla metodologia multi-reference station, invece, le reti di stazioni permanenti possono finalmente essere utilizzate anche nelle applicazioni cinematiche in tempo reale, consentendo di adoperare effettivamente i ricevitori fissi come stazioni di riferimento per il posizionamento differenziale in tempo reale.

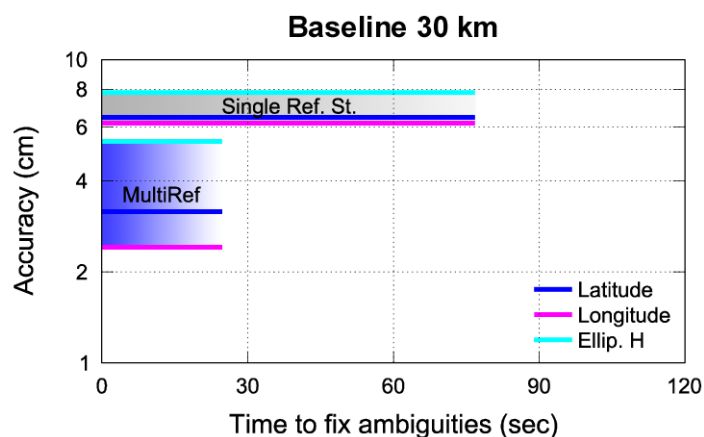
Si passa dunque dall'impiego della coppia di ricevitori, necessaria per raggiungere precisioni centimetriche in tempo reale, ad una fase nuova caratterizzata dalla possibilità di garantire lo stesso livello di precisione a utenti equipaggiati con un solo ricevitore. Si possono intuire quindi quali siano le potenzialità di tale approccio sia nell'ambito topografico e cartografico, ma soprattutto in quello della localizzazione e della navigazione di alta precisione.

Sebbene la tecnica multi-reference station presenti caratteristiche interessanti e vantaggiose da un punto di vista operativo, tuttavia la sua diffusione è attualmente ancora limitata e addirittura assente in molti paesi anche europei.

A tal proposito la ricerca condotta in questa tesi si presenta come un concreto contributo in vista di un'auspicabile utilizzazione in applicazioni future. Il lavoro si distingue infatti per aver realizzato un'esperienza pratica finalizzata all'analisi e sviluppo degli aspetti metodologici della tecnica multi-reference station in generale, e in particolare del sistema MultiRef™.

I risultati ottenuti in questo lavoro hanno mostrato che sia per l'accuratezza che per quanto riguarda i tempi di risoluzione delle ambiguità intere di fase emerge

chiaramente il miglioramento apportato dall'applicazione del sistema MultiRef™ rispetto alla tecnica tradizionale RTK con singola stazione di riferimento (figura 1).



**Figura 1: Accuratezza e tempo di fissaggio delle ambiguità di fase ottenibile con il sistema MultiRef™ per baseline di 30 km rispetto alla soluzione con singola stazione di riferimento**

È con questi presupposti che l'uso del sistema MultiRef™ si va ad inserire in un campo di studio di grande interesse, comprendente molteplici tematiche di tipo sia tecnico che scientifico. Si ritiene che le ricerche teoriche e sperimentali in questo campo vadano indirizzate, non solo sugli aspetti specifici della nuova tecnica multi-reference station, ma soprattutto sulle problematiche operative che garantiscano l'affidabilità della progettazione di reti permanenti GPS e facilitino, allo stesso tempo, un uso più razionale delle infrastrutture esistenti.

## BIBLIOGRAFIA

- Aarons, J. (1982). *Global Morphology of Ionospheric Scintillations*, Proceedings of the IEEE, Vol. 70, N° 4, pp. 360-378.
- Aarons, J. and Basu, S. (1994). *Ionospheric Amplitude & Phase Fluctuations at the GPS Frequencies*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1569-1578, Salt Lake City.
- Alves P., G. Lachapelle, M.E. Cannon, J. Liu, B. Townsend. (2001). *Evaluation of Multiple-Reference DGPS RTK Using a Large Scale Network*, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp. 665-671, Long Beach.
- ASI. (2002a). *Ionospheric solutions: Local TEC Maps*, [http://geodaf.mt.asi.it/DATA/GEOD/GPSD/IONOSPHERIC\\_SOLUTIONS/LOCAL\\_TEC\\_MAPS/2002/](http://geodaf.mt.asi.it/DATA/GEOD/GPSD/IONOSPHERIC_SOLUTIONS/LOCAL_TEC_MAPS/2002/)
- ASI. (2002b). *GeoDAF Geodetic Data Archiving Facility – GeoDAF GPS*, [http://geodaf.mt.asi.it/html/gps/gps\\_browse.html](http://geodaf.mt.asi.it/html/gps/gps_browse.html), Agenzia Spaziale Italiana.
- Beutler, G., W. Weber, U. Hugentobler, M. Rothacher, A. Verdun. (1998) *GPS for Geodesy*, Cap. 2: GPS Satellite Orbits, pp. 43-109, Springer-Verlag.
- Cannon, M.E., G. Lachapelle, L.P. Fortes, P. Alves, B. Townsend. (2001). *The Use of Multiple Reference Station VRS for Precise Kinematic Positioning*, Proceedings of the Japan Institute of Navigation, GPS Symposium 2001, pp. 29-37, Tokyo.
- CODE. (2002a), *Evolution of the Earth's mean TEC from January 1, 1995*, <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere/meantec.gif>

CODE. (2002b). *Global Ionosphere Maps Produced by CODE*, <http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html>, Global Center for Orbit Determination in Europe, Astronomical Institute, University of Bern.

DMA. (1991). *DoD World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, Defense Mapping Agency Technical Report 8350.2, Second Edition.

Dodson, A.H., R.M. Bingley, N.T. Penna, M.H.O. Aquino. (1999). *A National Network of Continuously Operating GPS Receivers for the UK*, Geodesy Beyond 2000: The Challenges of the First Decade, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 121, pp. 367-372, Springer-Verlag.

Duquenne, F., F. Peyret, L. Serres, B. Boullard. (2002). *Rapport du Groupe de Travail "Evaluation du Réseau GPS Permanent"*, Conseil National de l'Information Géographique, Commission Positionnement Statique et Dynamique.

Falvey, M., J. Beavan. (1999). *Real-Time Estimation of Precipitable Water Using New Zealand's Continuous GPS Network*, Paper presented at the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Birmingham, UK.

Ferland, R. (2000). IGSMail-2899: Original/New realization of ITRF97, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2000/msg00245.html>.

Fortes, L.P.S., R.T. Luz, K.D. Pereira, S.M.A. Costa, D. Blitzkow. (1998). *The Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC): Operation and Products*, Advances in Positioning and Reference Frames, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 118, pp. 73-78, Springer-Verlag.



- Fortes L.P., G. Lachapelle, M.E. Cannon, G. Marceau, S. Ryan, S. Wee, J. Raquet. (2000a). *Testing of a Multi-Reference GPS Station Network for Precise 3D Positioning in the St. Lawrence Seaway*, International Hydrographic Review (new Series), Vol. 1, N° 1, pp. 15-29.
- Fortes L.P., M.E. Cannon, G. Lachapelle. (2000b). *Testing a Multi-Reference GPS Station Network for OTF Positioning in Brazil*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City.
- Fortes L.P., M.E. Cannon, S. Skone, G. Lachapelle. (2001). *Improving a Multi-Reference GPS Station Network Method for OTF Positioning in the St. Lawrence Seaway*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 404-414, Salt Lake City.
- Fortes, L.P.S. (2002). *Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning*, PhD Thesis, UCGE Report Number 20158, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Fotopoulos, G. (2000). *Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations*, MSc Thesis UCGE Report N° 20142, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Fotopoulos, G., M.E. Cannon. (2001). *An Overview of Multi-Reference Station Methods for cm-Level Positioning*, *GPS Solutions*, Vol. 4, N° 3, pp. 1-20, John Wiley & Sons Inc.
- Gao, Y., Z. Li, J.F. McLellan. (1997). *Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-Level Positioning and Navigation*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1305-1313, Kansas City.

- GEOsurv. (1999). *Flykin Suite™ & Flykin Suite+ User's Manual, Rev. 112*, GEOsurv Inc., Nepean, Ontario.
- Goad, C. C. and Goodman, L. (1974). *A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model*, Proceedings of the Fall Annual Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, California.
- GSD. (2002). *Canadian Active Control System*, <http://www.geod.nrcan.gc.ca/>, Geodetic Survey Division of Geomatics Canada.
- GSI. (2002). *Crustal Deformation of Japan detected by GEONET - GPS Earth Observation Network of Geographical Survey Institute*, <http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html>, Geographical Survey Institute, Japan.
- Gurtner, W. (2002). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10*, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex210.txt>.
- Han, S., C. Rizos. (1996). *GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring Systems*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1827-1836, Kansas City.
- Haw, D. (2001). *SP3 Format*, [http://www.ngs.noaa.gov/GPS/SP3\\_format.html](http://www.ngs.noaa.gov/GPS/SP3_format.html).
- Hay, C. (2000). *The GPS Accuracy Improvement Initiative*, GPS World, June 2000, pp. 56-61, Advanstar Communications.
- Hedling, G., B. Jonsson, C. Lilje, M. Lilje. (2001). *SWEPOS® - The Swedish Network of Permanent GPS Reference Station (Status February 2001)*, International Conference FIG Working Week 2001, Seoul, Korea.

- Hugentobler, U., S. Schaer and P. Fridez. (2002). *Bernese GPS Software, Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Bern.
- Jong, C.D. de. (1997). *Principles and applications of permanent GPS arrays*, Ph.D. Thesis, Technical University of Budapest, Hungary, Delft University Press.
- IGS. (1999). *Standards for IGS Stations and Operational Centers – Version 1.3*, [http://igsb.jpl.nasa.gov/network/guide\\_igs.html](http://igsb.jpl.nasa.gov/network/guide_igs.html).
- IGS. (2001a). *International GPS Service*, <http://igsb.jpl.nasa.gov/>.
- IGS. (2001b). *IGS Product Table*, <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- IGS ACC. (2001). *General Information About the IGS Products*, <http://www.aiub.unibe.ch/acc.html>, IGS Analysis Center Coordinator (ACC) web site at the Astronomical Institute, University of Bern.
- Kee, C. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume II, Cap. 3: Wide Area Differential GPS, pp. 81-116, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- Klobuchar, J. A. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume I, Cap. 12: Ionospheric Effects on GPS, pp. 485-515, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- Koivula, H., M. Ollikainen, M. Poutanen. (1999). *The Finnish Permanent GPS Network – FinnRef*, The XIII General Meeting of the Nordic Geodetic Commission, Gävle, Sweden.
- Lachapelle, G. (1997). *GPS Theory and Applications*, ENGO 625 Lecture Notes, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.

- Lachapelle G., M.E. Cannon, L.P. Fortes, J. Stephen. (1999). *Feasibility Study on the use of a Multi-Reference Station Approach for OTF Ambiguity Resolution in a Constricted Waterway (St. Lawrence)*, Department of Geomatics Engineering's Report under contract with the Canadian Coast Guard, The University of Calgary.
- Lachapelle G., P. Alves, L.P. Fortes, M.E. Cannon, B. Townsend. (2000). *DGPS RTK Positioning Using a Reference Network*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1165-1171, Salt Lake City.
- Lachapelle, G. (2001). *Use of a Multiple Reference Station Approach for Enhanced GNSS RTK Marine Positioning and Navigation*, Proceedings of Satellite Navigation and Positioning World Conference, Nice.
- LAREG. (2001). *The International Terrestrial Reference Frame ITRF*, <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>, Laboratorty for Research in Geodesy.
- Larson, K. M. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume II, Cap. 20: Geodesy, pp. 539-558, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- Lu, G., M.E. Cannon, E. Chen, G. Lachapelle. (1994). *FLYKIN™ Operator's Manual, Version 2.0*, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Manzino, A. (2002). *Stazioni permanenti GNSS in Italia: Scopi, usi e prospettive*, Atti della 6<sup>a</sup> Conferenza Nazionale delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali (ASITA), Volume I, pp. LXXXI-CXIII, Perugia.

- McArthur, D., R.R. Steeves. (1988). *On the Impact of the Active Control System on Survey Control Networks*, Geodetic Survey Division, Canada Centre for Surveying, Ottawa.
- Mendes, V. de B. (1999). *Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques*, PhD Thesis, Technical Report N° 199, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.
- Moritz, H. (1980). *Advanced Physical Geodesy*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- NGS. (2002). *Welcome to the National CORS*, <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>, National Geodetic Survey, NOAA.
- NIMA. (2000). *NIMA Geospatial Sciences Division: Satellite Geodesy*, <http://www.nima.mil/GandG/sathtml/>.
- Petrovski, I., S. Kawaguchi, M. Ishii, H. Torimoto, K. Fujii, K. Ebine, K. Sasano, M. Kondo, K. Shoji, H. Hada, K. Uehara, Y. Kawakita, J. Murai, T. Imakiire, B. Townsend, M.E. Cannon, G. Lachapelle. (2000). *New Flexible Network-based RTK Service in Japan*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City.
- Pingue, F., G. Berrino, P. Capuano, C. Del Gaudio, F. Obrizzo, G. P. Ricciardi, C. Ricco, V. Sepe, S. E. P. Borgstrom, G. Cecere, P. De Martino, V. D'Errico, A. La Rocca, S. Malaspina, S. Pinto, A. Russo, C. Serio, V. Siniscalchi, U. Tammara, I. Aquino. (2002). *Sistema integrato di monitoraggio geodetico dell'area vulcanica attiva napoletana: reti permanenti e rilevamenti periodici*, Atti della 6<sup>a</sup> Conferenza Nazionale delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali (ASITA), Volume II, pp. 1751-1764, Perugia.

- Raquet, J.F. (1998). *Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers*, PhD Thesis, UCGE Report Number 20116, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Raquet, J., G. Lachapelle, T. Melgård. (1998). *Test of a 400 km x 400 km Network of Reference Receivers for Precise Kinematic Carrier-Phase Positioning in Norway*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 407-416, Nashville.
- Raquet, J., G. Lachapelle. (2000). *Development and Testing of a Kinematic Carrier-Phase Ambiguity Resolution Method Using a Reference Receiver Network*, Navigation, The Institute of Navigation, Alexandria, VA., Vol. 46, N° 4, pp. 283-295.
- Raquet, J., G. Lachapelle. (2001). *Multiple Reference RTK Positioning*, GPS World, Vol. 12, N° 4, pp. 48-53.
- Remondi, B.W. (2001). *The NGS GPS Orbital Formats*, <http://www.ngs.noaa.gov/GPS/Utilities/format.txt>.
- Sansò, F., M.C. de Lacy. (2001). *Uno studio sulle diverse applicazioni del GPS e sul futuro sviluppo della rete di stazioni permanenti GPS sul territorio italiano orientato alla creazione di un servizio geodetico nazionale*, International Geoid Service DIIAR, Politecnico di Milano.
- SAPOS. (2002). *Satelliten positionierungsdienst der deutschen Landesvermessung*, <http://www.sapos.de/>
- SATREF. (2002). *SATREF<sup>®</sup> - Satellittbasert referansesystem* <http://www.statkart.no/satref/omsatref.html>

- Schaer, S. (1999). *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*, PhD Thesis, Astronomical Institute, University of Bern.
- SEC. (1999). *Space Environment Topics: The Ionosphere*, <http://sec.noaa.gov/>, Space Environment Center.
- Seeber, G. (1993). *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*, Walter de Gruyter.
- SIDC. (2002). *Sunspot Index Graphics*, <http://sidc.oma.be/index.php3>, Sunspot Index Data Center, Royal Observatory of Belgium.
- Skone, S. (1998). *Wide Area Ionosphere Grid Modelling in the Auroral Region*, PhD Thesis, UCGE Report Number 20123, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Skone, S. and de Jong, M. (1999). *The Impact of Geomagnetic Substorms on GPS Receiver Performance*, Proceedings of the International Symposium on GPS, Tsukuba, Japan.
- Spilker Jr., J. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume I, Cap. 13: Tropospheric Effects on GPS, pp. 517-546, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- Springer, T. (2000). *IGSMail-2904: IGS ITRF97 realization*, <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2000/msg00250.html>.
- Sun, H., T. Melgård, M.E. Cannon. (1999). *Real-time GPS Reference Network Carrier Phase Ambiguity Resolution*, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp. 193-199, San Diego.

- Talaya, J., E. Bosch. (1999). *CATNET, a permanent GPS network with real-time capabilities*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 33-39, Nashville.
- Townsend, B., G. Lachapelle, L.P. Fortes, T. Melgård, T. Norbech, J. Raquet. (1999). *New Concepts for a Carrier Phase Based GPS Positioning Using a National Reference Station Network*, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp. 319-326, San Diego.
- Townsend B., K. Van Dierendonck, J. Neumann, I. Petrovski, S. Kawaguchi, H. Torimoto. (2000). *A Proposal for Standardized Network RTK Messages*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City.
- U.S. Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications and Intelligence. (2001). *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, <http://www.igeb.gov/SPS-2001-final.pdf>.
- van der Marel, H. (1998). *Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 49-58, Nashville.
- Varner, C.C., M.E. Cannon. (1997). *The Application of Multiple Reference Stations to the Determination of Multipath and Spatially Decorrelating Errors*, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp. 323-333, Santa Monica.
- Varner, C.C. (2000). *DGPS Carrier Phase Network and Partial Derivative Algorithms*, PhD Thesis, UCGE Report Number 20129, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.



- Vespe, F., A. Manzano, M. Fermi. (1998). *La rete fiduciale di stazioni permanenti GPS in Italia*, Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia (SIFET), N° 3, pp. 9-18.
- Vollath, U., A. Buecherl, H. Landau, C. Pagels, B. Wagner. (2000). *Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City.
- Vollath, U., A. Deking, H. Landau, C. Pagels. (2001). *Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*, Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, pp. 470-474, Banff, Canada.
- Wanninger, L. (1993). *Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS*, GPSWorld, July 1993, pp. 48-54, Advanstar Communications.
- Wanninger, L. (1995). *Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere*, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 55-62, Palm Springs.
- Wanninger, L. (1999). *The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-networks under Solar Maximum Conditions*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1419-1427, Nashville.
- Warnant, R. and Pottiaux, E. (2000). *The Increase of the Ionospheric Activity as measured by GPS*, Earth Planets Space, Vol. 52, N° 11, pp. 1055-1060.
- Wdowinski, S., Y. Bock, Y. Forrai, Y. Melzer, G. Baer, D. Levitte. (1999). *The GIL network of continuous GPS monitoring in Israel for geodetic and geophysical*

*applications*, Paper Presented at the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Birmingham, UK.

Weber, R. (2001). IGSMail-3605: Towards ITRF2000, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2001/msg00450.html>.

Wells, D., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.P. Schwarz, J.M. Tranquilla, P. Vanicek. (1986). Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, Fredericton.

Wild U., R. Hug, T. Signer, A. Wiget. (1999). *The Automated GPS Network for Switzerland (AGNES)*, Paper Presented at the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Birmingham, UK.

Woo, K.T. (1999). Optimum Semi-Codeless Carrier Phase Tracking of L2, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 289-305, Nashville.

Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier. (1996). *Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1845-1852, Kansas City.

Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz. (2001). *RTK Networks Based on Geo++<sup>®</sup> GNSMART – Concepts, Implementation, Results*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 368-378, Nashville.

Zhang, J. (1999). *Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays*, MSc Thesis, UCGE Report Number 20132, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.

## APPENDICE A

### PROCEDURE OPERATIVE PER LA REALIZZAZIONE DELLA RETE CAMPANIA GPS NETWORK

A partire dal settembre 2001 ha avuto inizio l'attività rivolta allo sviluppo della rete test Campania GPS Network, culminata nel febbraio 2002 con la realizzazione della campagna di misure finalizzata alla sperimentazione del sistema MultiRef™.

In questa appendice si riporta una descrizione di insieme della rete, con particolare attenzione alle esperienze concrete che hanno condotto alla sua realizzazione e all'esecuzione delle misure.

Il lavoro di progettazione, materializzazione e organizzazione della rete e di rilevamento dei dati è stato ideato e condotto integralmente dall'autore. Si è trattato di sviluppare una rete di dodici stazioni GPS distribuite sul territorio della Campania, e di eseguire quindi le misure, contemporaneamente dalle dodici stazioni, con l'intervallo di campionamento di 1 s, per sei giorni, 24 ore su 24.

Nell'ambito generale della ricerca, l'esigenza di una gestione unitaria ed uniforme della rete ha imposto che l'autore svolgesse di persona ognuna delle fasi di sviluppo dei lavori: in particolare sono state installate sei stazioni temporanee ex novo e gestite direttamente nove delle dodici stazioni complessive. Per la realizzazione del programma si è quindi resa necessaria un'organizzazione molto complessa, in relazione soprattutto alle tempistiche e alle dimensioni dell'operazione.

La rilevanza del progetto risiede anche nel complesso delle risorse adoperate. A tal proposito decisivo è stato il contributo dei seguenti soggetti:

- Osservatorio Vesuviano, sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Stazione GPS di Serrara Fontana – Isola di Ischia);
- Dipartimento di Vie e Trasporti del Politecnico di Bari;
- Comunità Montana Vallo di Diano (Stazione GPS di Padula);
- Istituto Tecnico per Geometri “G. C. Gloriosi” (Stazione GPS di Battipaglia);
- Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri di Cerreto Sannita (Stazione GPS di Cerreto Sannita);
- Istituto Tecnico per Geometri “Galileo Galilei” (Stazione GPS di Benevento);

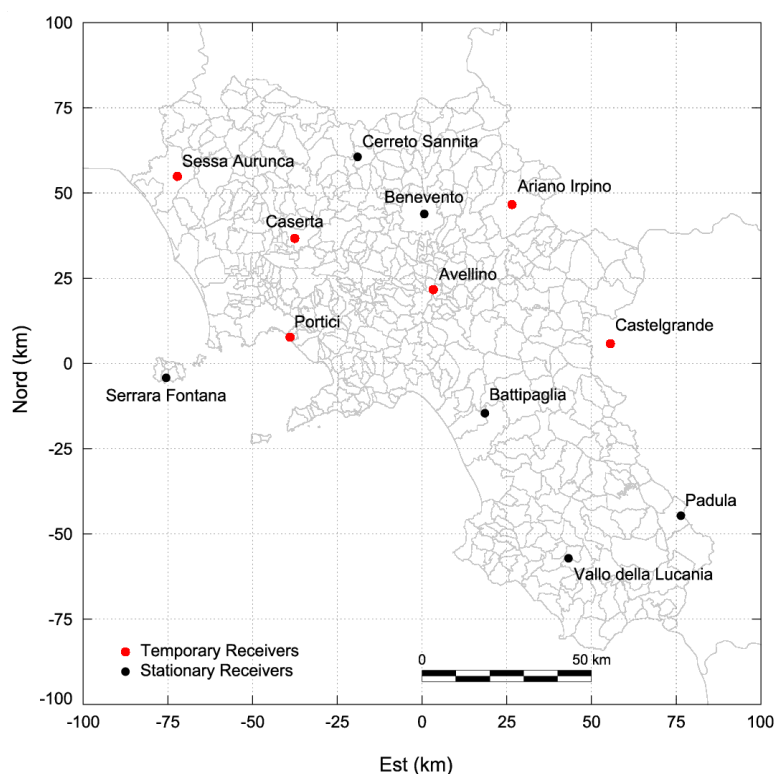
- Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri “E. Cenni” (Stazione GPS di Vallo della Lucania).

Tutte queste istituzioni si sono infatti rese disponibili ad offrire la propria collaborazione sia per l'utilizzo delle rispettive stazioni permanenti, sia mettendo a disposizione la strumentazione per le stazioni temporanee.

### A.1 Caratteristiche generali della rete

Le principali caratteristiche della rete sono le seguenti (figura A.1):

- rete regionale;
- area di riferimento: area della Campania (170 km × 170 km);
- 12 stazioni GPS (6 stazioni esistenti e 6 stazioni temporanee installate ex novo);
- interdistanza media di circa 50 km;
- 12 ricevitori doppia frequenza;
- 4 antenne choke ring e 8 antenne con ground plane;
- intervallo di campionamento di 1 s;
- acquisizione per sei giorni 24 ore su 24.



**Figura A.1: Campania GPS Network**

## **A.2 Materializzazione della rete**

Ai fini della realizzazione della rete, dal punto di vista operativo, è stato necessario affrontare problematiche differenti in funzione del tipo di stazione, esistente ovvero temporanea. In questa fase gli aspetti più impegnativi dell'operazione hanno riguardato da una parte il coordinamento delle varie stazioni esistenti, dall'altra la ricerca dei siti e l'installazione delle stazioni temporanee.

Nell'ambito delle stazioni permanenti esistenti, dopo aver condotto una ricognizione delle infrastrutture presenti sul territorio, si è sviluppata un'intensa attività operativa legata soprattutto alla stretta collaborazione con i responsabili delle varie stazioni, e concretizzatasi nella disponibilità dei loro dati.

Le stazioni individuate appartengono a soggetti diversi e possiedono caratteristiche differenti tra loro a seconda delle attrezzature e delle metodologie di gestione impiegate. In questo contesto è stata avviata una fase preliminare indirizzata alla conoscenza dei requisiti di ciascuna stazione in relazione alle specifiche finalità della ricerca.

Innanzitutto, atteso il normale funzionamento con un intervallo di campionamento di 30 s, è stata chiesta la disponibilità ad acquisire dati ad 1 s ininterrottamente per un periodo minimo di sette giorni. Di conseguenza, oltre a prendere in considerazione le caratteristiche dei siti e le caratteristiche tecniche, si è concentrata l'attenzione sulla parte relativa alla gestione dei dati.

Per quanto attiene invece l'impianto delle stazioni temporanee, si è trattato di affrontare per ognuna delle sei stazioni i problemi posti dall'istituzione ex novo [IGS, 1999].

La monumentazione è avvenuta su fabbricati preesistenti. Nei riguardi della scelta dei siti è stato verificato sia che le ostruzioni sull'orizzonte non superassero i 10-15° di elevazione, sia l'assenza di superfici riflettenti in maniera da evitare il più possibile il multipath. Diverse prove di ricezione hanno inoltre consentito di controllare la qualità delle misure in relazione ad eventuali disturbi elettromagnetici.

Per quanto riguarda il supporto dell'antenna, si è cercato di rispondere ai requisiti di stabilità, costo e facilità di installazione, in relazione soprattutto alla durata della campagna di misure. A tal fine sono state impiegate staffe metalliche, comunemente in commercio, modificate mediante l'innesto di una barra con filettatura 5/8" in maniera da predisporre l'attacco per l'antenna.

Dal punto di vista degli aspetti logistici, per ogni stazione ha assunto particolare importanza la ricerca dell'ambiente per l'ubicazione del ricevitore e del computer di gestione. Oltre a dover garantire siti vigilati e dotati di alimentazione elettrica, si è reso necessario verificare la distanza fra antenna e ricevitore in funzione della lunghezza del cavo di collegamento. Nel caso in esame in particolare il limite è derivato dal fatto di avere a disposizione prevalentemente cavi di 10 m di lunghezza.

Per quanto riguarda l'attrezzatura delle stazioni temporanee, le diverse istituzioni sopra elencate hanno messo a disposizione una cospicua strumentazione, che con l'aggiunta di quella disponibile presso gli Istituti di Navigazione e di Topografia, Geodesia e Idrografia dell'Università Parthenope, ha costituito l'intero equipaggiamento adoperato.

Sono stati utilizzati ricevitori a doppia frequenza e antenne con ground plane. Per protezione dalla mancanza di energia elettrica si sono impiegate batterie tampone. La gestione è stata effettuata tramite computer portatili (figura A.2).



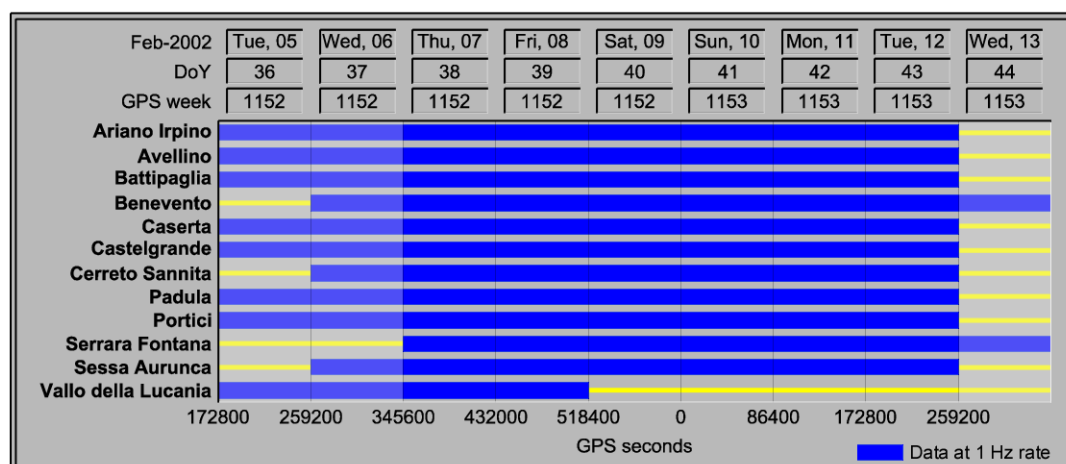
**Figura A.2: Ricevitori e computer portatili utilizzati nelle stazioni temporanee**

Dopo aver affrontato la ricerca e la scelta dei sei siti necessari, accertatane l' idoneità, si è proceduto all' installazione delle relative stazioni. Il prosieguo del lavoro ha visto quindi l' attuazione delle fasi di acquisizione e gestione dei dati.

### A.3 Esecuzione delle misure

La campagna di misure è stata condotta nel febbraio 2002: i dati utilizzati nelle elaborazioni MultiRef™ corrispondono a sei giorni consecutivi di misura relativi al periodo di osservazione che va dal 7 al 12 febbraio, a cui si aggiungono i tempi impiegati per l' accensione e lo spegnimento delle varie stazioni.

I tempi di misura con cui si è articolata la sperimentazione sono riportati in dettaglio nella figura A.3.



**Figura A.3: Tempi della campagna MultiRef effettuata sulla rete Campania Network**

Prima della campagna definitiva sono state effettuate anche altre misure dalle varie stazioni funzionanti sia singolarmente che in contemporanea: in particolare l' attivazione della stazione di Portici è servita a configurare preventivamente i PC delle stazioni temporanee interfacciati ai rispettivi ricevitori.

Si osserva che in una prima serie di prove la rete comprendeva anche la stazione GPS di Terzigno. Grazie alla collaborazione dell' Unità Funzionale Geodesia (UFG)

dell'Osservatorio Vesuviano sono, infatti, stati messi a disposizione i dati acquisiti in questa stazione, appartenente alla rete GPS permanente del sistema integrato di monitoraggio geodetico per la sorveglianza dell'area vulcanica napoletana [Pingue et al., 2002]. Considerata tuttavia la breve distanza tra la stazione di Terzigno e quella di Portici, installata successivamente, si è deciso in fase definitiva di utilizzare soltanto uno dei due punti disponibili.

Nel corso della campagna è stata realizzata anche un'installazione di un giorno a Petina che però non è stato possibile sfruttare appieno nelle elaborazioni. Si tratta di un punto scelto in posizione baricentrica rispetto al quadrilatero definito dalle stazioni di Battipaglia, Castelgrande, Padula e Vallo della Lucania. In particolare sono state acquisite 24 ore di misure corrispondenti al 12 febbraio, per il quale però non sono risultati disponibili i dati di Vallo della Lucania.

Per quanto riguarda la gestione della rete, tra i fattori che hanno maggiormente inciso sull'organizzazione dei lavori vanno certamente considerati il numero delle stazioni da controllare nonché le dimensioni dell'area interessata. Innanzitutto, in mancanza di uno strumento di controllo in remoto, è stato fondamentale porre l'attenzione sulle fasi di accensione e di monitoraggio. Al fine di stabilire un legame tra le diverse stazioni, si è resa necessaria una particolare pianificazione delle misure e degli spostamenti, che consentisse di pervenire nel più breve arco di tempo possibile al funzionamento contemporaneo di tutte le stazioni, ottimizzando l'uso delle risorse impegnate.

Inoltre, cercando di minimizzare ed omogeneizzare i tempi di passaggio da una stazione all'altra in funzione dei problemi di distanza e di viabilità, si è ripetutamente attuata una perlustrazione in circolo dell'intera rete, in modo da garantirne il controllo continuo durante il periodo di acquisizione.

In fase di rilevamento e gestione dei dati, l'esigenza di dover acquisire con un intervallo di 1 secondo ha rappresentato, un ulteriore onere operativo di cui si è dovuto tener conto fin dalla progettazione stessa delle misure.

Nelle stazioni temporanee i dati sono stati scaricati sulla memoria dei computer portatili, senza che venissero memorizzati nel ricevitore, impostando direttamente il campionamento ad 1 s. In questo caso proprio l'utilizzo dei computer portatili ha richiesto una maggiore attenzione. A tal proposito, oltre a dover disporre di una



capacità di memoria sufficiente all'archiviazione di almeno sei giorni di dati, particolare importanza è stata assunta dagli aspetti inerenti la comunicazione ricevitore/PC: assicurare un corretto processo di ricezione dalla porta seriale ha costituito infatti un aspetto delicato dell'esecuzione delle misure.

Per quanto riguarda invece le stazioni esistenti, a fianco all'acquisizione con l'intervallo di campionamento ad 1 s, si è posta l'esigenza di mantenere la disponibilità dei dati a 30 s. La soluzione più semplice consiste nell'impostare, tramite il software di gestione, l'acquisizione con entrambi gli intervalli. Non tutti i programmi tuttavia consentono questa funzione: in tal caso si procede a posteriori alla decimazione a 30 s. Un'altra soluzione è stata invece adottata per Serrara Fontana. La stazione appartiene all'Osservatorio Vesuviano e fa parte della rete GPS in acquisizione continua per il controllo delle deformazioni del suolo sull'isola di Ischia. Attesa l'esperienza che sta dietro la realizzazione di questa rete, la raccolta dei dati provenienti dalle varie stazioni avviene in modo automatico, tramite il controllo in remoto, direttamente presso il centro di elaborazione dati dell'Istituto a Napoli. In questo caso, in presenza della gestione centralizzata, per effettuare l'acquisizione dei dati ad 1 s si è proceduto, con l'appoggio dell'Osservatorio Vesuviano, ad affiancare alla strumentazione esistente un computer portatile per l'archiviazione diretta dei dati, mantenendo così invariata l'acquisizione in remoto a 30 s.

Per quanto riguarda il formato dei dati, le misure utilizzate in questa ricerca sono state registrate nel formato RINEX versione 2.10 [Gurtner, 2002]. In particolare, si è deciso, per il tipo di elaborazioni da effettuare, di archiviare file giornalieri contenenti dati acquisiti con epoche di 1 s dalle 00:00:00 alle 23:59:59 ora GPS. La tabella seguente indica alcune caratteristiche dei file archiviati.

**Tabella A.1: File formato RINEX**

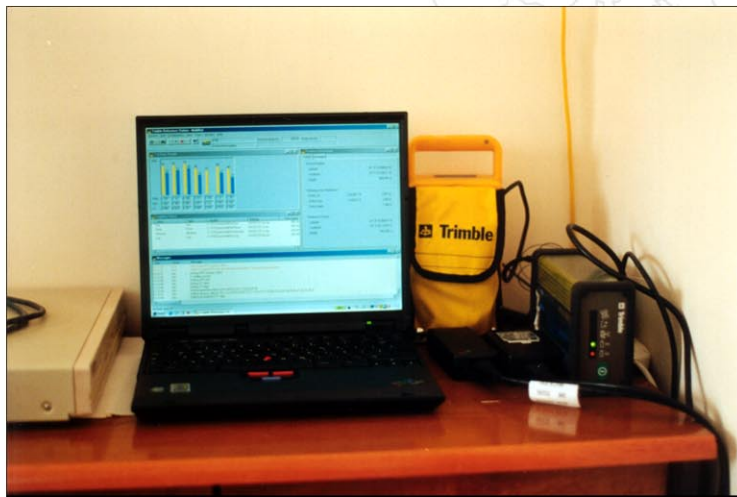
RINEX L1/L2	Intervallo di campionamento	File compressi	File non compressi
File giornalieri di 24 h	1 s	~ 19 MB	~ 46 MB

Di seguito si riporta una scheda di riepilogo delle principali informazioni sulle dodici stazioni della rete (tabella A.2). Vengono inoltre riportate le fotografie di ciascuna stazione (figure A.4-A.14).

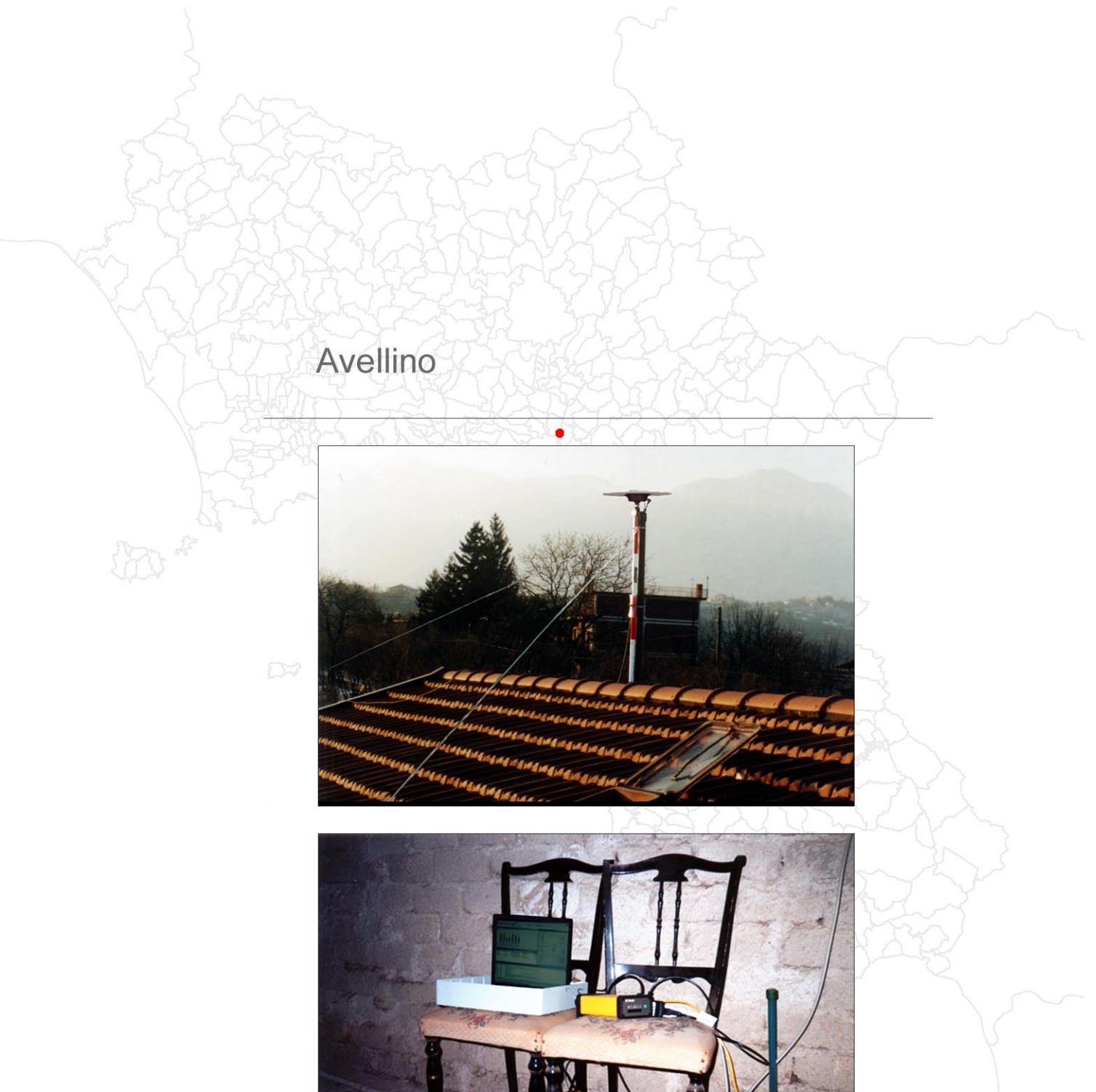
**Tabella A.2: Principali informazioni sulle stazioni della rete Campania Network**

Stazione	Codice Identif.	Informazioni generali			Coordinate WGS84			Equipaggiamento			Gestione dei dati			
		Tipo di stazione	Sito / Ente Proprietario	Provincia	Latitudine	Longitudine	Quota elliss.	Tipo di ricevitore	Tipo di antenna	ARP	Formato	Rate	Ore ric./giorno	Periodo di osservazione
Ariano Irpino	ARIA	Temporanea	Municipio	Avellino	41° 9' 10.027" N	15° 5' 20.257" E	842.46 m	TRIMBLE 4700	TR GEOD L1/L2 GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Avellino	AVEL	Temporanea	Abitazione privata	Avellino	40° 56' 16.826" N	14° 49' 4.745" E	371.63 m	TRIMBLE 4700	TRM 33429.00+GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Battipaglia	BATT	Permanente	Istituto Tecnico per Geometri "G. C. Gloriosi"	Salerno	40° 36' 39.360" N	14° 59' 11.301" E	143.73 m	TRIMBLE 4700	DORNE MARGOLIN TRIM	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Benevento	BENE	Permanente	Istituto Tecnico per Geometri "Galileo Galilei"	Benevento	41° 7' 52.420" N	14° 47' 5.496" E	227.80 m	TRIMBLE 4000SSI	TR GEOD L1/L2 GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	6 – 13 Feb, 2002
Caserta	CASE	Temporanea	Istituto Salesiano	Caserta	41° 4' 12.476" N	14° 20' 9.500" E	131.99 m	TRIMBLE 4700	TR GEOD L1/L2 GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Castelgrande	CAST	Temporanea	Stazione astronomica	Potenza	40° 47' 13.456" N	15° 25' 17.350" E	965.49 m	TRIMBLE 4000SSI	TRM 33429.20+GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Cerreto Sannita	CERR	Permanente	Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri	Benevento	41° 16' 52.367" N	14° 33' 19.380" E	319.57 m	TRIMBLE 4700	DORNE MARGOLIN TRIM	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	6 – 12 Feb, 2002
Padula	PADU	Permanente	Comunità Montana Vallo di Diano	Salerno	40° 20' 11.364" N	15° 39' 8.656" E	589.51 m	TRIMBLE 4700	DORNE MARGOLIN TRIM	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Portici	PORT	Temporanea	Abitazione privata	Napoli	40° 49' 7.227" N	14° 19' 45.608" E	78.04 m	TRIMBLE 4700	TRM 33429.00+GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 12 Feb, 2002
Serrara Fontana	ISCH	Permanente	INGV – Osservatorio Vesuviano	Napoli	40° 42' 41.723" N	13° 53' 42.745" E	440.85 m	TRIMBLE 4000SSI	TR GEOD L1/L2 GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	7 – 13 Feb, 2002
Sessa Aurunca	SESS	Temporanea	Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri	Caserta	41° 13' 54.630" N	13° 55' 48.031" E	209.61 m	TRIMBLE 4700	TRM 33429.00+GP	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	6 – 12 Feb, 2002
Vallo della Lucania	VLUC	Permanente	Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri "E. Cenni"	Salerno	40° 13' 50.450" N	15° 15' 57.270" E	445.34 m	LEICA SR9500	LEIAT 504	Bottom of antenna	RINEX	1 Hz	24 h	5 – 8 Feb, 2002

Ariano Irpino



**Figura A.1: Stazione GPS temporanea di Ariano Irpino**



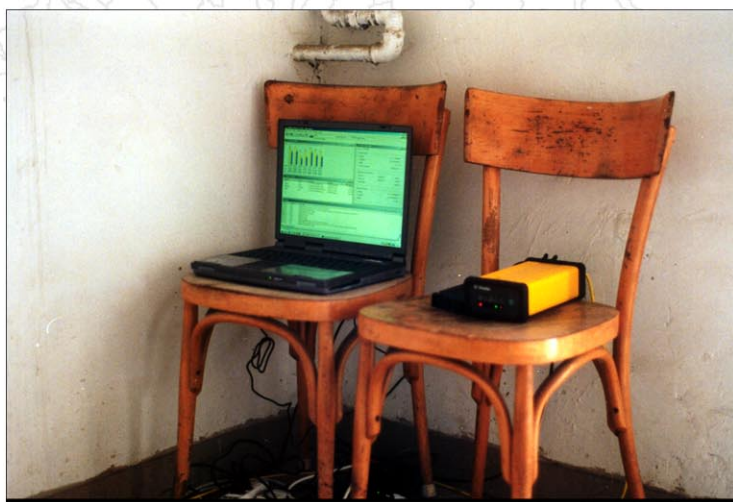
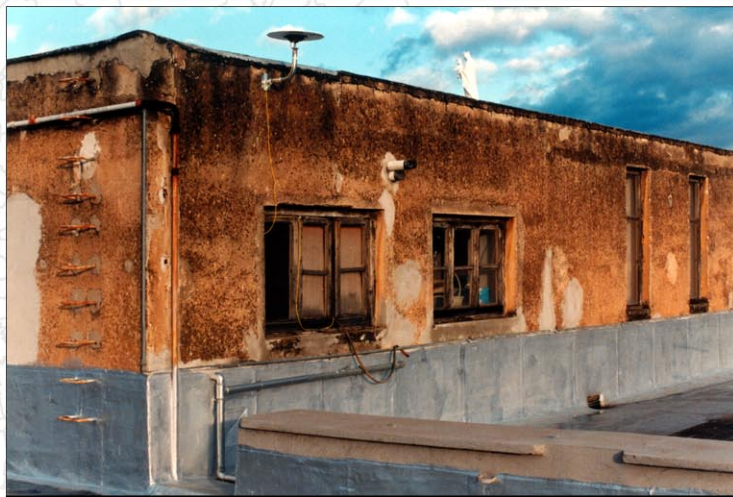
**Figura A.2: Stazione GPS temporanea di Avellino**

Battipaglia



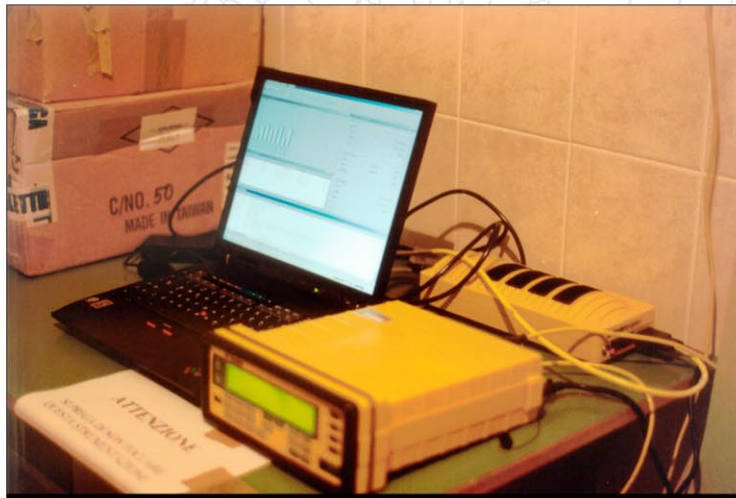
**Figura A.3: Stazione permanente GPS di Battipaglia  
Istituto Tecnico per Geometri “G. C. Gloriosi”**

## Caserta



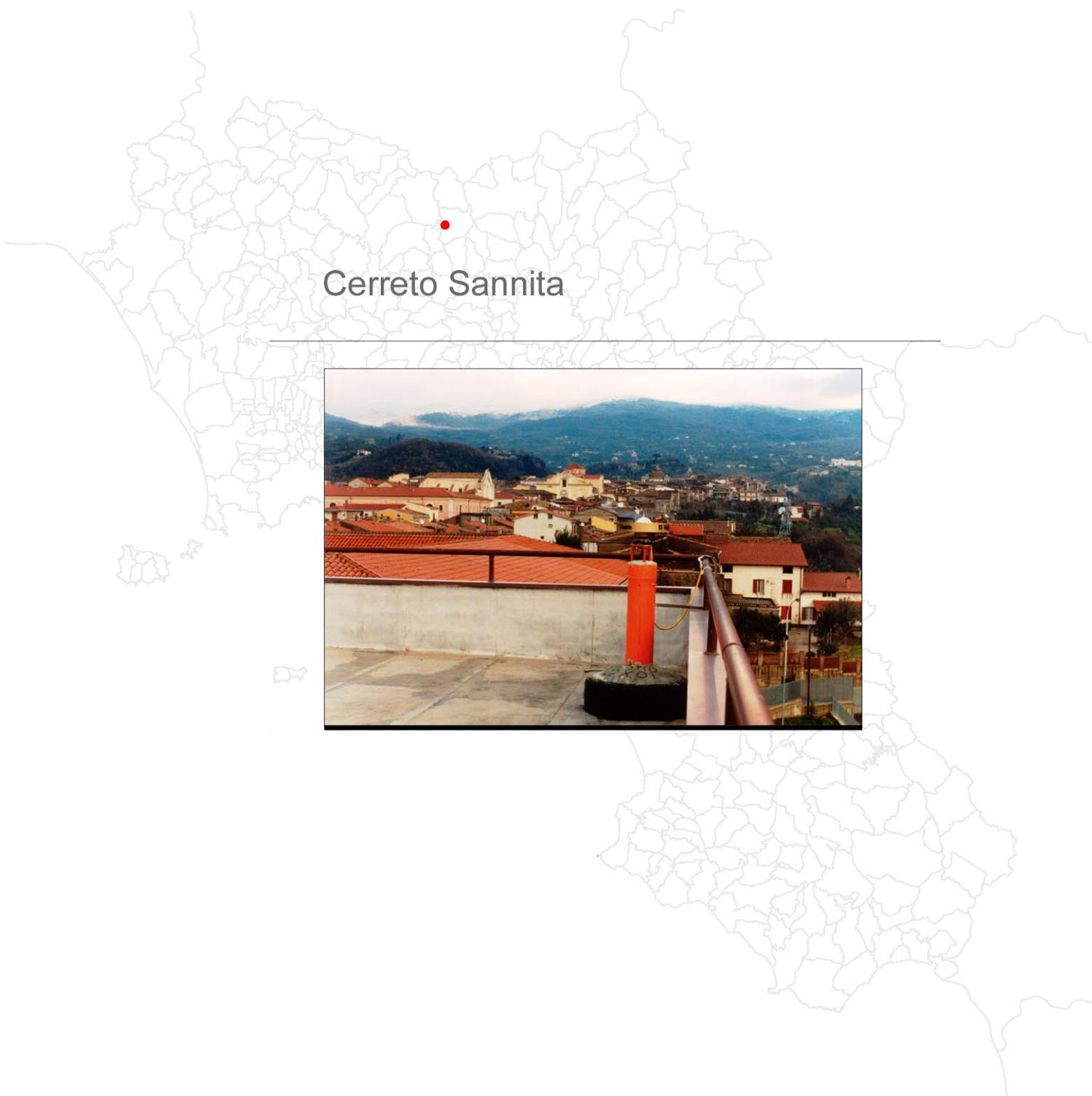
**Figura A.4: Stazione GPS temporanea di Caserta**

## Castelgrande



**Figura A.5: Stazione GPS temporanea di Castelgrande**





**Figura A.6: Stazione permanente GPS di Cerreto Sannita  
Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri**

Padula



**Figura A.7: Stazione permanente GPS di Padula  
Comunità Montana Vallo di Diano**



**Figura A.8: Stazione GPS temporanea di Portici**

## Serrara Fontana



**Figura A.9: Stazione permanente GPS di Serrara Fontana – Isola di Ischia  
INGV - Osservatorio Vesuviano**

## Sessa Aurunca



**Figura A.10: Stazione GPS temporanea di Sessa Aurunca**

## Vallo della Lucania



**Figura A.11: Stazione permanente GPS di Vallo della Lucania  
Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri “E. Cenni**

## **APPENDICE B**

### **CALCOLO DELLE COORDINATE PRECISE DELLE STAZIONI DI RIFERIMENTO DELLA RETE CAMPANIA NETWORK CON IL SOFTWARE BERNESE**

L'applicazione del metodo MultiRef™ è finalizzata a fornire le correzioni differenziali su di una prefissata area di copertura. In linea con questo obiettivo, alla base del MultiRef™ si pone l'ipotesi fondamentale dell'uso di stazioni di riferimento di coordinate note e precise; la loro precisione condiziona, infatti, il calcolo delle correzioni con ripercussioni sulla posizione del ricevitore utente. In questa ricerca il calcolo delle coordinate per la rete Campania Network è stato effettuato tramite l'utilizzo del software Bernese, versione 4.2 [Hugentobler et al., 2001].

Per quel che riguarda invece il calcolo delle ambiguità di fase fra le stazioni della rete, si osserva che, nell'applicazione del sistema MultiRef™, la risoluzione viene effettuata direttamente dal sistema in tempo reale. Difatti il modulo software NetAR (Network Ambiguity Resolution) assolve proprio a questo compito. In questa tesi, tuttavia, la necessità di evidenziare specifici risultati ha richiesto che le ambiguità fossero note anche a priori, oltre che con il modulo NetAR. In tal caso è stato utilizzato ancora il Bernese per l'estrazione delle ambiguità intere.

#### **B.1 Elaborazione con software Bernese**

Il software Bernese è un sistema sofisticato, che trova applicazione nei seguenti campi:

- rapida elaborazione di misure GPS, sia in singola che doppia frequenza, per il rilevamento di zone di limitata estensione;
- calcolo di reti permanenti GPS;
- risoluzione delle ambiguità di fase per baseline lunghe (oltre 2000 km, adoperando effemeridi precise);

- modellazione della ionosfera e della troposfera;
- stima degli errori di orologio;
- combinazione di misure ottenute da differenti tipi di ricevitori, consentendo di tenere in conto le variazioni del centro di fase delle antenne;
- calcolo delle orbite e stima dei parametri di rotazione terrestre.

In questa ricerca le applicazioni hanno riguardato il calcolo delle coordinate e la stima delle ambiguità.

Le singole sessioni giornaliere sono state elaborate in modalità multibase; le soluzioni di sessione sono quindi state compensate congiuntamente in multissessione.

Nei trattamenti condotti in questo lavoro si è tenuto conto dei diversi bias tramite:

- effemeridi precise;
- errori di orologio dei satelliti;
- parametri dei centri di fase di ogni tipo di antenna;
- stime troposferiche.

In particolare, per ogni giorno di misura, le operazioni di calcolo sono state condotte, sulla base dei seguenti passaggi:

- creazione delle orbite, a partire dalle effemeridi precise del tipo IGS final;
- elaborazione dei codici al fine di raffinare le coordinate iniziali di ogni stazione contenute nei file di dati RINEX, determinare gli errori di orologio dei ricevitori, eliminare osservazioni fuori tolleranza;
- formazione delle differenze singole di fase fra i ricevitori, secondo la selezione di baseline indipendenti; la scelta è stata operata seguendo preferibilmente il criterio delle baseline più corte al fine di facilitare la risoluzione delle ambiguità;
- pretrattamento delle misure di fase L1 ed L2 finalizzato all'identificazione di cycle slips, osservazioni disaccoppiate, ecc.
- compensazione ionospheric-free delle differenze doppie di fase in soluzione float, inclusa la stima dei ritardi troposferici allo zenith dopo l'applicazione del modello di Saastamoinen, al fine di determinare coordinate sufficientemente approssimate per ogni stazione;
- risoluzione delle ambiguità intere di fase L1 ed L2 per ogni baseline, con le coordinate fissate ai valori ottenuti nel passaggio precedente;



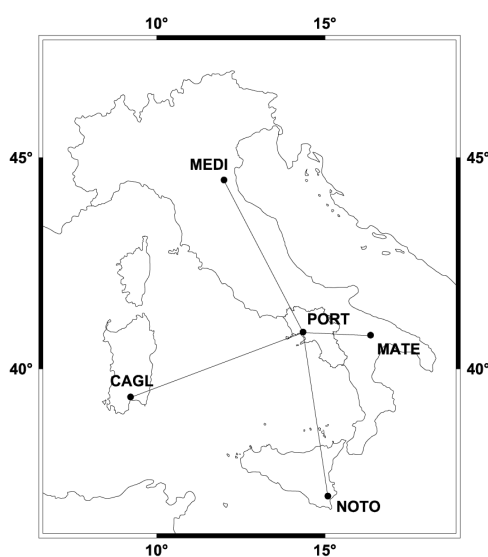
- risoluzione ionospheric-free delle differenze doppie di fase in soluzione fixed, utilizzando le ambiguità intere di fase ottenute col passaggio precedente, includendo di nuovo la stima dei ritardi troposferici allo zenith e salvando i file delle equazioni normali nel formato NEQ (Normal Equation).

Dopo aver generato per ogni giorno di misura le soluzioni di sessione, si sono ricavate le coordinate finali della rete effettuando una compensazione multisezione tramite il programma ADDNEQ del pacchetto Bernese.

## B.2 Calcolo della rete Campania Network

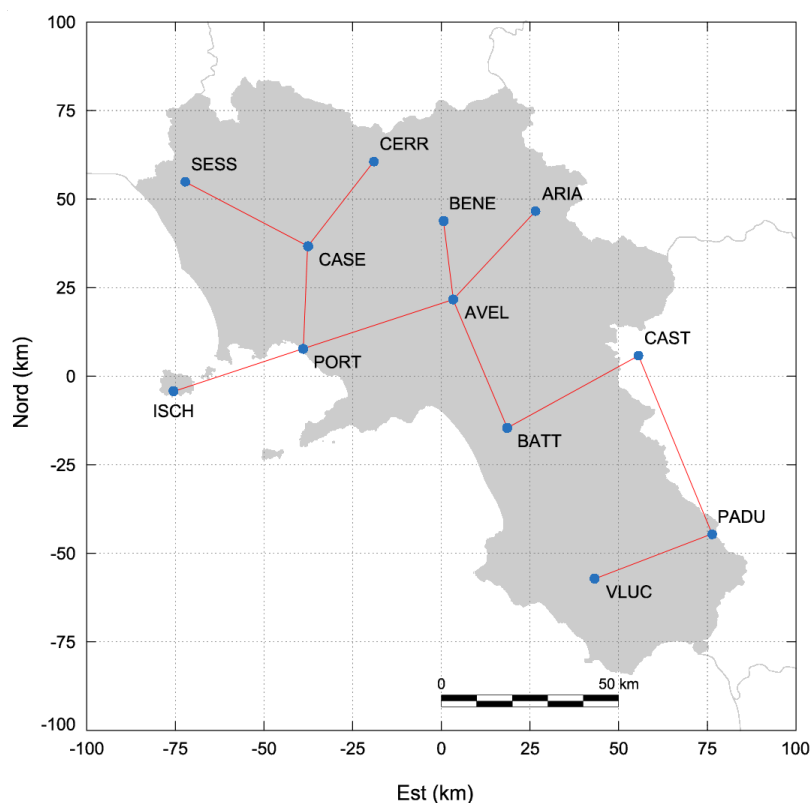
Nei trattamenti Bernese della rete Campania Network sono stati utilizzati sei giorni di dati dal 7 al 12 febbraio 2002, con un intervallo di campionamento di 30 s.

Per quanto riguarda il calcolo delle coordinate, l'applicazione del metodo MultiRef<sup>TM</sup> richiede soprattutto che non vengano introdotte distorsioni né sulla forma né sulle dimensioni delle reti stesse. A tal proposito in questo lavoro, per le operazioni di calcolo col Bernese si è assunto il solo punto PORT come vertice fisso, collegato a quattro stazioni italiane della rete internazionale IGS (Cagliari, Matera, Medicina, Noto1) (figura B.1). I file di dati in formato RINEX per queste quattro stazioni sono stati estratti dal server GeoDAF dell'ASI [2002b].



**Figura B.1 :Inquadrimento su stazioni IGS**

Nella figura B.2 vengono mostrate le baseline indipendenti formate nell'elaborazione Bernese della rete. La loro lunghezza è compresa tra 21.6 e 53.7 km. Sebbene sia stato utilizzato il criterio di selezionare le baseline più corte, talvolta la scelta di specifiche baseline è stata tuttavia dettata dalla loro importanza nelle successive elaborazioni MutliRef™.



**Figura B.2: Schema delle undici baseline indipendenti formate nell'elaborazione Bernese della rete Campania Network**

Per tutte le baseline selezionate sono state risolte le ambiguità intere di fase utilizzando la tecnica QIF (Quasi Iono-Free). I passi fondamentali di questa tecnica prevedono di determinare le differenze doppie delle ambiguità di fase per entrambi le portanti L1 ed L2, in soluzione float, introducendo un modello stocastico della ionosfera; successivamente il criterio di ricerca degli interi consiste nel minimizzare il valore assoluto della differenza tra le ambiguità ionospheric-free relative ai valori float e quelle calcolate con i valori interi in L1 e L2.

La tabella B.1 riporta le percentuali di ambiguità fissate ad interi per ogni baseline.

**Tabella B.1: Percentuali di ambiguità in L1 e L2 fissate ai valori interi utilizzando la tecnica QIF, sulla rete Campania Network, per i giorni 7-12 febbraio 2002**

Baseline		Baseline length (km)	Percentage of L1 and L2 ambiguities fixed using the QIF strategy					
			Feb. 7	Feb. 8	Feb. 9	Feb. 10	Feb. 11	Feb. 12
AVEL	BENE	21,6	76	77	77	71	77	76
CASE	PORT	27,9	86	91	85	86	89	91
CASE	CERR	29,8	89	95	89	86	89	91
ARIA	AVEL	33,0	87	91	89	82	91	91
PADU	VLUC	34,9	81	75				
CASE	SESS	38,5	83	91	87	89	85	89
ISCH	PORT	38,5	69	71	68	67	71	71
AVEL	BATT	39,0	81	79	82	75	85	85
BATT	CAST	41,7	62	69	66	60	65	63
AVEL	PORT	43,3	85	84	87	77	85	87
CAST	PADU	53,7	68	71	73	68	66	69

Il trattamento in blocco delle sessioni di misura già trattate singolarmente ha consentito infine di stimare la soluzione finale per le coordinate delle stazioni della rete.

La tabella B.2 illustra il confronto tra le diverse soluzioni di sessione rispetto alla soluzione finale: si può vedere una elevata ripetibilità sui risultati delle sessioni giornaliere, con scarti massimi di 3 mm nella componente Nord, di 2 mm in Est e 1 cm in quota.

La tabella B.3 contiene invece le coordinate finali con le rispettive precisioni.

**Tabella B.2: Scarti delle soluzioni giornaliere per le coordinate della rete Campania Network per i giorni 7, 8, 9, 10, 11 e 12 rispetto alla soluzione finale multisessione**

Station	Coord.	Feb. 7 sol. versus Combined (mm)	Feb. 8 sol. versus Combined (mm)	Feb. 9 sol. versus Combined (mm)	Feb. 10 sol. versus Combined (mm)	Feb. 11 sol. versus Combined (mm)	Feb. 12 sol. versus Combined (mm)
ARIA	N	-0,7	-0,4	-0,3	1,2	0,4	-0,2
	E	0,7	0,6	0,1	1,3	-1,8	-0,8
	U	-3,0	-5,0	-1,0	-0,4	8,4	1,0
AVEL	N	-1,3	-0,4	-0,9	2,4	0,8	-0,4
	E	-0,4	1,7	0,2	0,1	-0,7	-0,8
	U	-9,0	-6,3	0,7	0,0	10,2	4,1
BATT	N	-0,7	0,7	-0,8	1,1	1,1	-1,3
	E	0,8	1,7	0,7	-0,5	-2,3	-0,4
	U	-0,3	-3,9	0,4	0,8	5,4	-2,5
BENE	N	-1,7	0,5	-0,2	1,2	1,0	-0,6
	E	-1,1	1,5	0,2	1,3	-1,1	-0,9
	U	-5,8	-4,4	0,4	-1,0	8,0	2,3
CASE	N	0,1	0,0	-0,7	0,9	1,4	-1,5
	E	0,1	1,9	-0,6	0,1	-0,3	-1,1
	U	-1,2	-5,4	1,4	-1,9	7,2	-0,1
CAST	N	-1,9	0,8	-0,2	1,0	1,6	-1,2
	E	0,5	1,5	0,5	0,1	-1,6	-1,0
	U	-0,9	-2,9	-0,2	0,7	5,6	-2,4
CERR	N	-0,5	-0,1	-0,9	0,1	0,9	0,5
	E	-0,2	0,2	-0,4	-0,2	0,4	0,2
	U	-2,7	-3,9	-0,2	2,9	10,9	-7,2
ISCH	N	-1,2	-0,3	-0,5	1,3	1,3	-0,5
	E	-0,2	0,3	-2,6	1,3	0,3	0,9
	U	-1,4	-1,9	-2,3	4,1	8,2	-6,8
PADU	N	-1,2	-0,2	-0,2	0,7	1,8	-0,8
	E	1,8	2,4	0,0	-0,9	-2,0	-1,3
	U	-5,6	-4,6	-0,2	2,1	9,8	-1,2
PORT	N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	U	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SESS	N	0,2	0,2	-0,3	1,3	0,0	-1,2
	E	-0,6	1,0	-0,7	0,6	0,6	-0,8
	U	-5,8	-3,8	0,9	-2,7	8,8	2,1
VLUC	N	-0,7	-0,2				
	E	0,4	1,0				
	U	-4,6	-2,7				

VLUC non ha osservato nei giorni 9, 10, 11 e 12 febbraio

**Tabella B.3: Stima finale delle coordinate delle stazioni di riferimento della rete Campania Network riferite ai centri di fase L1**

Station	Coordinates		RMS
ARIA	Latitude	41° 9' 10.026723"	0,0002
	Longitude	15° 5' 20.257104"	0,0001
	Ellip. h	842.4562 m	0,0009
AVEL	Latitude	40° 56' 16.825743"	0,0002
	Longitude	14° 49' 4.745027"	0,0001
	Ellip. h	371.6266 m	0,0009
BATT	Latitude	40° 36' 39.360340"	0,0002
	Longitude	14° 59' 11.301120"	0,0001
	Ellip. h	143.7348 m	0,0009
BENE	Latitude	41° 7' 52.419891"	0,0002
	Longitude	14° 47' 5.496065"	0,0001
	Ellip. h	227.7978 m	0,0010
CASE	Latitude	41° 4' 12.475863"	0,0002
	Longitude	14° 20' 9.499888"	0,0001
	Ellip. h	131.9884 m	0,0009
CAST	Latitude	40° 47' 13.456263"	0,0002
	Longitude	15° 25' 17.349937"	0,0001
	Ellip. h	965.4949 m	0,0010
CERR	Latitude	41° 16' 52.367079"	0,0002
	Longitude	14° 33' 19.380516"	0,0001
	Ellip. h	319.5672 m	0,0009
ISCH	Latitude	40° 42' 41.723050"	0,0002
	Longitude	13° 53' 42.744856"	0,0001
	Ellip. h	440.8513 m	0,0010
PADU	Latitude	40° 20' 11.363753"	0,0002
	Longitude	15° 39' 8.656419"	0,0001
	Ellip. h	589.5146 m	0,0010
PORT	Latitude	40° 49' 7.227547"	0,0000
	Longitude	14° 19' 45.608406"	0,0000
	Ellip. h	78.0380 m	0,0000
SESS	Latitude	41° 13' 54.630290"	0,0002
	Longitude	13° 55' 48.030669"	0,0001
	Ellip. h	209.6076 m	0,0009
VLUC	Latitude	40° 13' 50.449712"	0,0002
	Longitude	15° 15' 57.270350"	0,0002
	Ellip. h	445.3393 m	0,0014