

UN'INDAGINE SULLA STIMA DEI VETTORI ECCENTRICITÀ TRA STRUMENTI GEODETICI CO-LOCATI NEI SITI ITRF

Claudio ABBONDANZA(*), Monia NEGUSINI(**), Pierguido SARTI(**), Luca VITTUARI(*)

(*) DISTART, Università di Bologna, viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Tel. +39.051.2093109

(**) IRA, Istituto Nazionale di Astrofisica, via P. Gobetti 101, 40129, Bologna, Tel.+39.051.6399417

claudio.abbondanza;luca.vittuari@mail.ing.unibo.it ; negusini;p.sarti@ira.inaf.it

Riassunto

La stima dei vettori eccentrici negli osservatori geodetici co-locati è d'importanza cruciale nelle procedure di combinazione e calcolo di *Terrestrial Reference Frames* (TRF) che scaturiscono dalla integrazione di osservabili spazio-geodetiche di varia natura. In effetti la disponibilità di *local ties* dotate di informazione statistica esaustiva rappresenta l'unico mezzo per poter integrare osservabili geodetiche che derivano da tecniche differenti, consentendo, al tempo stesso, di valutare la coerenza dei singoli TRF "monotecnica" nelle procedure di combinazione. Tuttavia, l'alto grado di conoscenze richieste per la produzione di eccentricità, sia sul fronte operativo sia su quello teorico, ne inficia l'ampia diffusione e ne inibisce l'impiego. E' inoltre opportuno sottolineare che una delle maggiori difficoltà nel processo di produzione delle *local ties* è connessa all'inquadramento del vettore eccentricità calcolato con tecniche terrestri nell'ITRF. A tal proposito, la possibilità di ottenere eccentricità attraverso un approccio GPS potrebbe facilitare l'intero processo produttivo: il vettore eccentricità sarebbe naturalmente inquadrato nel sistema globale di interesse (ITRF). Questo lavoro approfondisce gli aspetti connessi all'impiego di un approccio GPS nella produzione di eccentricità VLBI-GPS nel sito co-locato dell'Istituto Nazionale di Astrofisica di Medicina (BO).

Abstract

When dealing with the combination of different space-geodetic techniques, the availability of local ties which connect instrumental Reference Points in co-location sites plays a crucial role. As a matter of fact, the local tie provides the only possibility in integrating mono-technique *Terrestrial Reference Frames*. Furthermore, if endowed with a thorough statistical information, it permits the quality's assessment of the observables involved in the combination; nevertheless the high degree of know-how – both theoretical and practical- required for producing a very high precision eccentricity prevents from a broader diffusion. As regards, the possibility to pursue eccentricities through a GPS approach, rather than through a terrestrial one, could ease the whole productive process, both for the survey and for the final vector's alignment into an *ITRF* realization. This paper deepens the aspects connected to the use of such an approach in performing the VLBI-GPS eccentricity at the observatory of Medicina (Bologna – Italy), managed by the Istituto Nazionale di Astrofisica.

Introduzione

Produrre una stima statisticamente compiuta di una *local tie* è l'atto conclusivo di un processo di misura di alta precisione del vettore eccentrico, l'ente geometrico che connette i *reference points* degli strumenti spazio-geodetici co-locati nel medesimo sito; in tal senso, nel processo che conduce alla produzione di una *local tie* aspetti operativi si sovrappongono a tematiche eminentemente teoriche: dall'approccio di rilievo nel sito co-locato, alla sua pianificazione, l'elaborazione delle osservabili acquisite, la scelta di un opportuno modello geometrico che i dati acquisiti devono onorare e la sua implementazione in un contesto statistico di stima, sino alla fase finale

dell'allineamento del vettore eccentrico in una realizzazione ITRF. I *reference points* che definiscono una eccentricità rappresentano *markers geodetici*, peculiari dello strumento, compiutamente definiti nello spazio in modo tale da poterne assegnare coordinate tridimensionali univoche in un opportuno sistema di riferimento. Qualora tali *markers* non siano punti fisicamente materializzabili (e.g.: VLBI e SLR) e, quindi, direttamente accessibili, la loro posizione spaziale deve essere rilevata in maniera indiretta progettando un *network* topografico tridimensionale nel sito co-locato. Finora la produzione di eccentricità per via indiretta è stata affidata all'esecuzione di rilievi terrestri ad altissima precisione; l'alto grado di specializzazione richiesto nella loro esecuzione, pur essendo requisito imprescindibile per perseguire stime di eccentricità sub-millimetriche, ne inficia una piena diffusione. Il rilievo di *local ties* attraverso metodi GPS potrebbe rappresentare una valida alternativa metodologica nella produzione di vettori eccentrici, garantendo contemporaneamente notevoli vantaggi sia sotto l'aspetto operativo che computazionale: da un lato le eccentricità calcolate tramite GPS consentirebbero un notevole risparmio di tempo e manodopera altamente specializzata; ed inoltre permetterebbero la possibilità di attuare un allineamento immediato del vettore in una realizzazione ITRF. Quest'ultimo aspetto è di importanza cruciale: l'applicazione di una trasformazione conforme tra un sistema di riferimento locale topocentrico ed una terna geocentrica è di difficile realizzazione ma ha un impatto fondamentale sull'utilizzo dell'eccentricità nel calcolo del sistema globale, come implicitamente evidenziato dai risultati contenuti in Ray ed Altamimi (2005).

Scopo del presente lavoro è quello di investigare la possibilità di produrre *eccentricità* fondate su un approccio GPS, comparandone i risultati colle analoghe *local ties effettuate con metodologie "terrestri"*, nel caso dell'osservatorio di Medicina in cui è presente una co-locazione tra GPS e VLBI.

Gli approcci al rilievo impiegati nella produzione dell'eccentricità VLBI-GPS di Medicina

I dati di partenza impiegati nel processamento delle *local ties* sono di duplice natura, riferendosi da un lato ad elaborazioni del network terrestre progettato a Medicina nel 2002, e dall'altro, ad un rilievo GPS realizzato *ad hoc* nel medesimo anno. Una tale disponibilità è alla base della possibilità di attuare un confronto immediato della qualità di un vettore eccentrico stimato attraverso un approccio GPS rispetto al medesimo ottenuto tramite un approccio terrestre.

Per quanto concerne la progettazione e la strutturazione della rete GPS, si disponeva di 5 sistemi GPS geodetici, 3 dei quali (Trimble 4700 e TRM29659.00) sono stati installati sui pilastri che formano la rete locale dell'osservatorio di Medicina; mentre i 2 restanti (Trimble 4000 SSI e TRM22020.00+GP) sono stati fissati sul paraboloide dell'antenna VLBI attraverso 2 appositi supporti, in modo tale da renderli solidali al moto del radiotelescopio. Nel corso del rilievo, l'antenna VLBI è stata mossa in azimuth ed elevazione: a meno di effetti deformativi della struttura, gli spostamenti azimutali del radiotelescopio fanno descrivere ai ricevitori cerchi in azimuth; analogamente, spostamenti in elevazione implicano la descrizione di cerchi in elevazione. Durante il moto dell'antenna VLBI, i ricevitori GPS occupano la medesima posizione per un tempo di 15 minuti, secondo un approccio di rilievo *rapido statico* come descritto in (Tomasi et al., 2003); il processamento del dato GPS così acquisito è stato eseguito col BERNESSE GPS SOFTWARE v4.2; un opportuno inquadramento del rilievo GPS nella realizzazione *ITRF2000* è stato possibile includendo nella procedura di elaborazione osservabili provenienti dalla sottorete di stazioni permanenti IGS costituita dai siti di Aiaccio, Cagliari, Grasse, Graz, Matera, Medicina, Noto, Wettzell e Zimmerwald. Il processamento del dato GPS secondo l'approccio rapido statico è stato compiuto sperimentando 2 differenti modelli relativi di variazione del centro di fase delle antenne (*Phase Center Variation models*): IGS ed NGS, che modellano la variazione del centro di fase dell'antenna in funzione dell'elevazione dei satelliti della costellazione GPS. Come si mostrerà di seguito, la scelta di un modello di calibrazione delle antenne influenza la stima delle eccentricità.

Per quanto attiene alla progettazione del *network* terrestre, il rilievo segue lo schema di una rete tridimensionale mista, in cui le posizioni dei *targets* applicati sul paraboloide dell'antenna VLBI,

dei punti di controllo a terra e dell'*Antenna Reference Point* del GPS sono stati determinati ricorrendo a triangolazioni e trilaterazioni ridondanti. Per una descrizione esaustiva dell'approccio terrestre al rilievo dell'eccentricità di Medicina si rimanda a (Vittuari et al., 2005)

La procedura di stima delle eccentricità

Nel caso di Medicina, l'eccentricità, oggetto di stima, è il vettore che congiunge il punto di riferimento dell'antenna GPS con il punto invariante dell'antenna VLBI. Il calcolo delle eccentricità, siano esse terrestri o fondate su un approccio GPS, si basa su un processo rigoroso di stima statistica ai minimi quadrati. L'adozione di un modello funzionale ibrido alla base della procedura di stima (Sillard P. 2001) consente di impiegare contestualmente "osservazioni" di coordinate, derivate dal calcolo della rete, a condizioni geometriche che intervengono a definire i *punti di riferimento*; per una descrizione esaustiva del modello funzionale impiegato e della sua implementazione nel codice CLEMENr si rimanda a (Sarti et al., 2004). Tale software, appositamente implementato, consente la stima del vettore eccentrico ed esegue una *trasformazione di network*, che, nel caso terrestre, allinea il vettore dal sistema di riferimento topocentrico in una opportuna realizzazione ITRF. Il processamento delle eccentricità fondate su un approccio GPS resta sostanzialmente invariato nella struttura statistica, poiché le coordinate dei punti in uscita dal BERNESE GPS SOFTWARE v4.2 sono trattate alla stregua di osservazioni dotate di informazione statistica *a priori* (la loro matrice di varianza-covarianza completa). Inoltre i vincoli di natura geometrica che intervengono a definire i punti invarianti degli strumenti coinvolti nella *local tie*, adeguatamente formalizzati, sono inseriti nel medesimo contesto di stima giocando il ruolo di equazioni di condizione. Rispetto alla versione originaria del software, sono stati implementati moduli aggiuntivi che traducono nuove condizioni geometriche che i punti della rete devono soddisfare; l'approccio ad un grado di vincolamento superiore e modulabile si è, in effetti, mostrato efficace nel trattare *dataset* statisticamente rumorosi (Dawson et al., 2006) e, come tali, comparabili al dato GPS stesso.

Nella fattispecie, l'implementazione di nuovi vincoli geometrici, orientata alla produzione di eccentricità GPS, ha consentito di stimare differenti realizzazioni di vettori eccentrici con un grado di condizionamento geometrico crescente. Inoltre è stato aggiunto un ulteriore modulo statistico per il *datasnooping* che consente l'individuazione e la localizzazione di errori grossolani nelle osservazioni.

Lo stesso tipo di processamento a grado di vincolamento crescente è stato applicato anche al *dataset* terrestre di Medicina 2002, in modo tale da disporre di realizzazioni di eccentricità tra di loro compatibili, confrontabili statisticamente e per tipologia di condizioni geometriche applicate.

La comparazione tra eccentricità terrestri e GPS nel caso di Medicina 2002.

L'indagine qualitativa che conduce alla valutazione dell'affidabilità delle *local ties* ottenute mediante un rilievo GPS è condotta su più livelli, comparando le caratteristiche di una eccentricità GPS con l'omologa terrestre ottenuta sotto medesime condizioni di vincolamento:

1. dal punto di vista geometrico si confronteranno i moduli dei vettori eccentrici ed il loro orientamento spaziale.
2. dal punto di vista statistico si considereranno le accuratezze nella stima delle coordinate dei punti del vettore eccentrico e la dispersione associata ai parametri che definiscono l'assetto delle eccentricità nello spazio.

L'orientamento del vettore eccentrico nello spazio è descritto facendo uso di 3 parametri caratteristici di un sistema di coordinate sferiche (φ , θ , ρ) con origine sul punto invariante VLBI ed assi coordinati orientati parallelamente alla terna geocentrica, rispettivamente latitudine sferica, longitudine sferica e modulo del raggio vettore.

Le nuove condizioni geometriche implementate.

Di seguito si dà una rassegna delle nuove condizioni geometriche implementate all'interno del software per l'elaborazione statistica delle eccentricità:

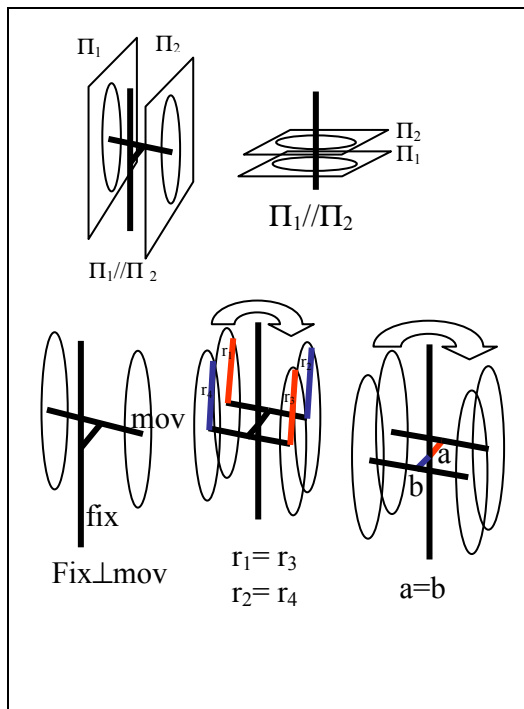


Figura 1 - Schema dei vincoli geometrici imposti

1. *parallelismo di superfici azimuthali e verticali*: nel corso delle rotazioni del radiotelescopio, i ricevitori mobili GPS rilevano le posizioni di punti che descrivono, a meno degli effetti deformativi della struttura, curve piane canoniche:
 - durante la rotazione del VLBI in elevazione, i ricevitori GPS descrivono una coppia di cerchi di elevazione che devono essere paralleli l'un l'altro.
 - durante le rotazioni del VLBI in azimuth, i ricevitori GPS descrivono una coppia di cerchi azimuthali che devono essere paralleli l'un l'altro
2. *ortogonalità interassiale*: come noto, il versore ortogonale ad uno dei cerchi azimuthali rappresenta una realizzazione dell'asse di rotazione fisso (di azimuth). Viceversa il versore ortogonale ad uno dei cerchi di elevazione definisce una realizzazione dell'asse di rotazione mobile (di elevazione); tale condizione impone che i versori rappresentativi degli assi di rotazione dell'antenna VLBI siano mutuamente ortogonali.

3. *equivalenza del raggio dei cerchi di elevazione*: gli archi circolari descritti dallo stesso ricevitore GPS nel corso di rotazioni in elevazione del radiotelescopio ed appartenenti a diverse realizzazioni dell'asse di rotazione secondario devono avere lo stesso raggio.

4. *Stima dell'offset assiale del radiotelescopio*

L'imposizione di questa condizione conduce ad una stima dell'*offset* assiale per un radiotelescopio AZ-EL, come nel caso di Medicina; poiché l'*offset* assiale è definito (Sarti ed Angermann, 2005) come la minima distanza che intercorre tra l'asse di rotazione fisso del VLBI e quello mobile. E' quindi possibile produrre una stima di tale entità per ciascuna realizzazione dell'asse di rotazione secondario. L'*offset* assiale è un ente geometrico intrinseco del radiotelescopio; è quindi lecito imporre, in contesto di stima ai minimi quadrati, a tale entità un valore comune.

Va sottolineato che le condizioni di vincolo succitate sono integralmente applicabili sia alle eccentricità ottenute da rilievi terrestri sia a quelle ottenute da rilievo GPS.

La stima delle eccentricità e le caratteristiche delle soluzioni proposte.

Nel prosieguo saranno messe a confronto differenti stime della eccentricità *VLBI-GPS* dell'osservatorio di Medicina misurate nel 2002, con un approccio classico al rilievo e con un approccio *GPS*.

Sono state prodotte differenti soluzioni, ciascuna delle quali caratterizzata da un vincolamento gradualmente crescente, in modo tale da valutare gli effetti di un condizionamento geometrico variabile sulla stima dell'eccentricità e sulle sue proprietà statistiche.

Nel caso delle eccentricità GPS si sono elaborate, come già accennato, due diverse soluzioni in funzione del modello *Phase Center Variations (PCV)* impiegato (IGS e NGS).

Qui di seguito forniamo alcune informazioni in merito alle soluzioni applicate ed alle codifiche impiegate nei quadri sinottici di confronto:

- **(cum1)** stima il vettore eccentrico producendo una soluzione debolmente vincolata quale quella esposta compiutamente in (Sarti et al., 2004)
- **(cum4)** produce una stima del vettore eccentrico introducendo la condizione di parallelismo delle superfici azimutali e di quelle di elevazione.
- **(cum5)** aggiunge alla soluzione precedente il vincolo di ortogonalità interassiale.
- **(cum2)** produce una stima del vettore eccentrico impiegando la condizione di parallelismo, di ortogonalità interassiale e quella che conduce ad una stima univoca dell'*offset* assiale
- **(cum3)** produce una soluzione a massimo grado di vincolamento aggiungendo alla precedente configurazione la condizione di eguaglianza dei raggi (non applicabile al data set terrestre di Medicina 2002)

Analisi dei risultati.

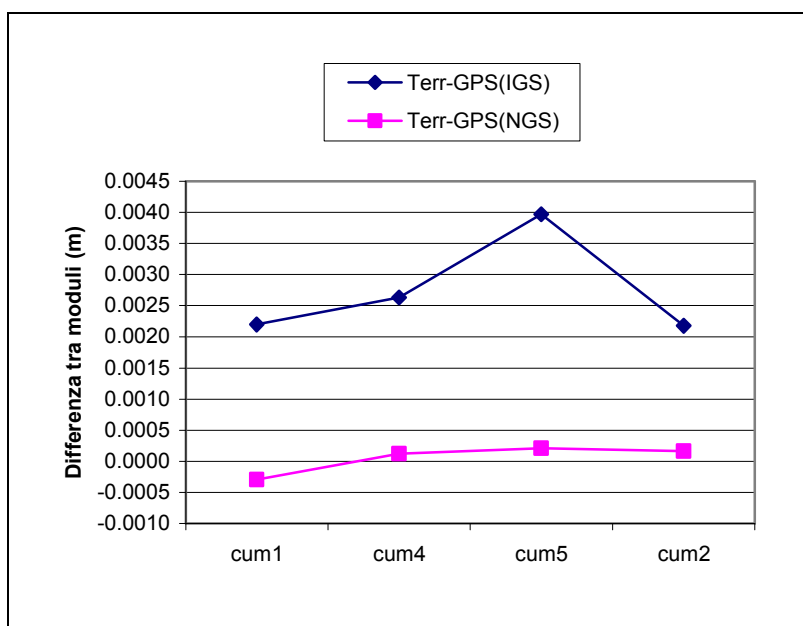


Figura 2 – Differenze tra i moduli delle eccentricità terrestre e GPS al variare del grado di vincolamento applicato

La valutazione dell'affidabilità geometrica delle eccentricità prodotte con il ricorso ad un approccio GPS è condotta sulla base delle differenze dei moduli dei vettori ex-centro, terrestri e GPS, a parità di vincolamento geometrico applicato nella stima ai minimi quadrati. Come testimoniato dai risultati (figura 2), è evidente una dipendenza della soluzione dal modello scelto per la variazione del centro di fase delle antenne GPS. Un migliore accordo tra eccentricità terrestre ed omologa GPS è possibile adottando l'*NGS PCV model*; in tal caso la differenza tra moduli si attesta su valori sempre inferiori al millimetro, testimoniando la capacità dell'approccio GPS nel

produrre stime altamente compatibili, dal punto di vista geometrico, con quelle terrestri.

Il grafico riportato in (figura 3) è esemplificativo dell'effetto del vincolamento geometrico sulla accuratezza del vettore eccentrico terrestre; si sottolinea che, in tale contesto, si sono assegnate le dispersioni in termini di *scarti quadratici medi* non delle coordinate dei *Reference Points* VLBI e GPS della *local tie*, quanto piuttosto delle componenti del vettore eccentrico riferite alla terna geocentrica *ITRF2000*; è evidente che il vincolamento progressivo induce una debole diminuzione della dispersione sulle 3 componenti dell'eccentricità terrestre nell'ordine del decimo di millimetro.

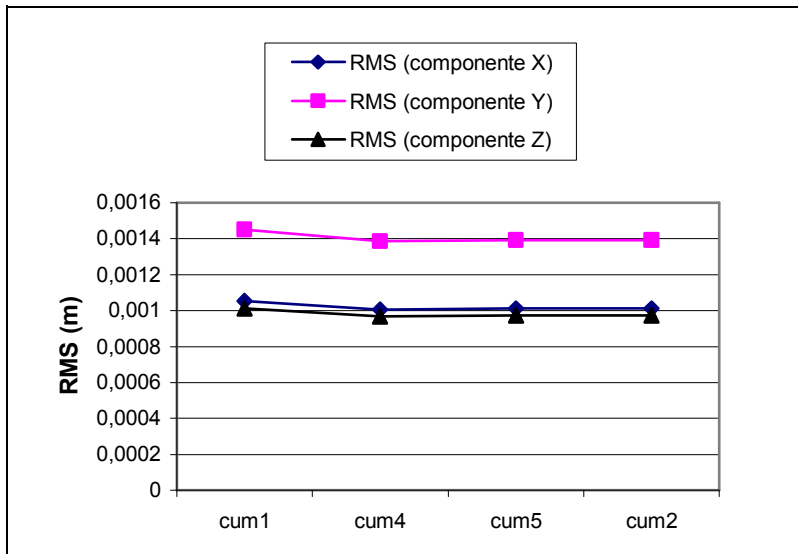


Figura 3 – Andamento degli scarti quadratici medi delle componenti dell'eccentricità terrestre al variare del vincolo applicato

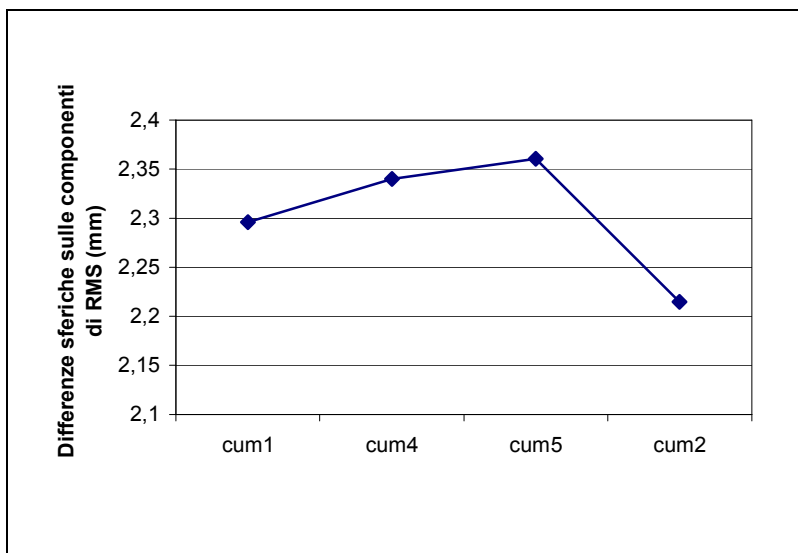


Figura 4 – Andamento delle differenze sferiche sulle componenti di errore quadratico medio GPS(NGS)-Terr al variare del vincolo applicato

L'andamento delle dispersioni nel caso di eccentricità GPS è invece riportato in (figura 4) ; ivi si rappresentano le *differenze sferiche delle 3 componenti dell'RMS*, ovvero la norma euclidea del vettore costituito dalle differenze delle radici quadrate delle varianze nelle 3 componenti geocentriche, della soluzione GPS(NGS) con la soluzione terrestre al variare del vincolo applicato. I valori delle differenze sferiche in esame si attestano nell'intervallo [2,2; 2,35] mm, testimoniando che la stima delle eccentricità GPS, benché precisa e consistente con quella terrestre, è più dispersa rispetto a quella terrestre.

Il diagramma rappresentato in (figura 5) è d'aiuto, invece, per l'analisi dell'orientamento spaziale della eccentricità GPS in relazione a quella terrestre. In tal caso si sono considerati gli *RMS* associati alla latitudine e alla longitudine sferica di ciascuna eccentricità; poiché gli *RMS* definiscono intervalli di variazione angolare possono essere espressi, se opportunamente moltiplicati per la norma del vettore eccentrico, come intervalli di archi circolari in latitudine ds_{φ_s} e longitudine ds_{λ_s} . La seminorma del

vettore di componenti mutuamente ortogonali $(ds_{\lambda_s}, ds_{\varphi_s})$ definirà il

raggio dell'intorno circolare al cui interno oscilla l'eccentricità a seguito dell'indeterminazione sui parametri d'orientamento. In tal caso le due eccentricità mostrano un comportamento antitetico al variare del grado di vincolo geometrico: nel caso terrestre diminuisce debolmente l'oscillazione complessiva all'aumentare del condizionamento; viceversa nel caso GPS si assiste ad un aumento con differenze rispetto alla soluzione terrestre che raggiungono l'ordine del decimo di mm; da un tale andamento si ha pertanto ulteriore conferma che l'eccentricità GPS è più dispersa, anche in termini di orientamento, rispetto a quella terrestre. Per contro il diagramma in (figura 6) si fa indicatore della consistenza delle stime GPS a fronte di quelle terrestri: esso mostra l'andamento della latitudine sferica nei due casi in esame in associazione alla dispersione sulla latitudine stessa come evidente, l'intervallo di confidenza del parametro di orientamento della stima GPS contiene ampiamente il valore centrale della stima terrestre di φ_s .

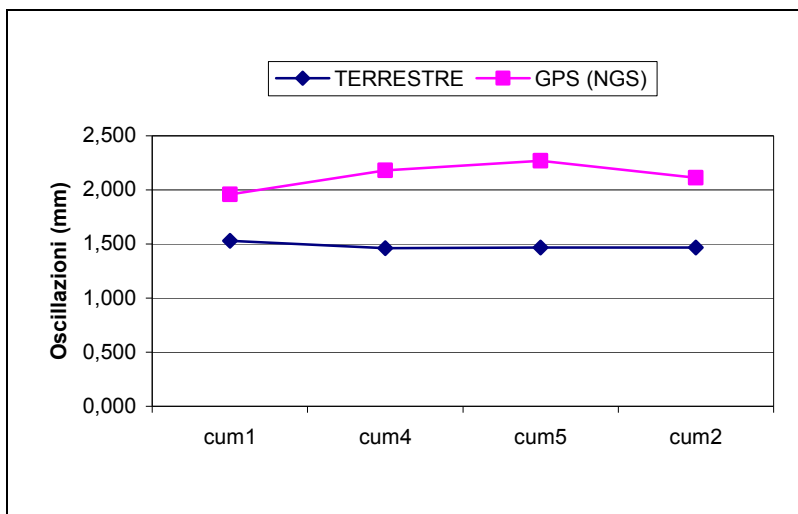


Figura 5 –Andamento della seminorma del vettore ($ds_{\lambda_s}, ds_{\phi_s}$) al variare del vincolo applicato

approfondire un tale approccio alla produzione delle eccentricità in modo più sistematico, al fine di verificarne la ripetibilità e la riproducibilità su analoghi rilievi e la fattiva spendibilità in un contesto di combinazione multi-tecnica orientata alla produzione di *TRF*. Si sottolinea, inoltre, l'effetto del progressivo vincolamento geometrico: esso ha un riflesso benefico sulla statistica del problema di stima delle eccentricità tanto più marcato quanto più accurato è il dato di partenza, come

Conclusioni.

Benché la dispersione statistica delle eccentricità tenda a degradarsi quando si considerano eccentricità prodotte col rilievo GPS, un tale approccio produce risultati incoraggianti: l'accordo sui moduli dei vettori eccentrici, a parità di condizionamento geometrico, nel caso terrestre ed in quello GPS è considerevole; al tempo stesso l'orientamento spaziale di una *local tie GPS* è del tutto coerente con i risultati "classici" e tende ai valori terrestri all'aumentare del condizionamento geometrico. Tali risultati inducono, pertanto, ad

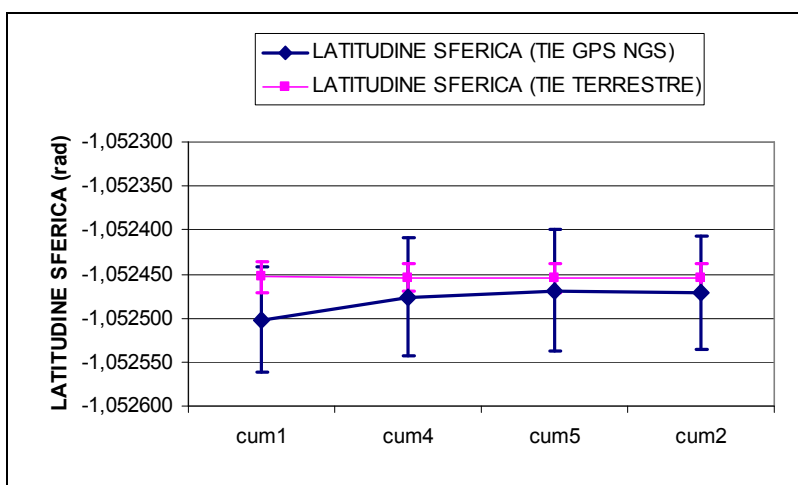


Figura 6 –Andamento della latitudine sferica ϕ_s con indeterminazioni associate al variare del vincolo applicato

Bibliografia.

Altamimi Z. (2005), ITRF and Co-locations Sites, Proc. IERS Workshop on Site Co-location. Matera, Italy. 23-24 October 2003, Eds. Richter B., Schwegmann W., Dick R.W, IERS Technical Note 33 8-15
 Dawson J., Sarti P., Johnston G., Vittuari L.(2006), Indirect Approach to Invariant Point Determination for VLBI and SLR Systems: An Assessment, submitted to J. Geodesy
 Ray J., Altamimi Z., Evaluation of co-location ties relating the VLBI

and GPS reference frames (2005), J. Geodesy 79 189-195.

Sarti P., Angermann D.(2005), Terrestrial Data Analysis and SINEX Generation, Eds. Richter B., Schwegmann W., Dick R.W, IERS Technical Note 33 118-127

Sarti P., Sillard P., Vittuari L.(2004), Surveying Co-located Space Geodetic Instruments for ITRF computations, J. Geodesy 78 210-222.

Sillard P., Estimation par moindres carrés, Collection IGN, Éditeur Lavoisier, 2001

Tomasi P., Sarti P., Vittuari L., Negusini M. (2002) Local Geodetic Survey of VLBI and GPS reference points and ex-centre at Medicina, Proc. of Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Leipzig, 2003.

Vittuari L., Sarti P., Sillard P., Tomasi P., Negusini M. (2005), Surveying the GPS-VLBI eccentricity at Medicina: methodological aspects and practicalities; Proc. IERS Workshop on Site Co-location. Matera, Italy. 23-24 October 2003 Eds. Richter B., Schwegmann W., Dick R.W.; IERS Tech. Note, 33, 33-48