

Radiotelescopi di Noto e Medicina: deformazioni gravitazionali valutate tramite un'indagine laser terrestre

S. Montaguti (1,2), M. Negusini (1), P. Sarti (1), L. Vittuari (2)

(1) IRA-INAf – Bologna, Via P. Gobetti, 101-40129 Bologna, Tel. +39 051-6399417, Fax +39 051-6399431, (s.montaguti | m.negusini | p.sarti) @ira.inaf.it

(2) DISTART – Università di Bologna, Via Risorgimento, 2-40136 Bologna, Tel. +39 051 2093103, Fax +39 051 6448073, (simonetta.montaguti | luca.vittuari) @mail.ing.unibo.it

Introduzione

I radiotelescopi VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) subiscono delle deformazioni gravitazionali al variare della loro elevazione che tendono a modificare la posizione del punto di riferimento. Tale punto normalmente coincide, per i telescopi VLBI, con il “*tracking point*” ITRF utilizzato per la realizzazione dell'ITRS (*International Terrestrial Reference System*).

La determinazione delle deformazioni è pertanto di importanza primaria e, a tutt'oggi, gli studi effettuati sull'argomento ed i relativi metodi di indagine risultano essere scarsi.

Per affrontare questa complessa problematica, si è applicata alle antenne di Noto e Medicina la metodologia del laser scanning terrestre.

La scansione delle parabole è stata possibile ponendo il laser all'interno della struttura, su due supporti stabili fissati in prossimità del fuoco secondario. Tali supporti sono stati appositamente realizzati per questo rilievo. Non era possibile, infatti, utilizzare le alte piattaforme esterne, impiegate solitamente nei rilievi fotogrammetrici, a causa della loro instabilità.

Il laser ad impulsi utilizzato per questa indagine possiede una risoluzione di circa 1,5 mm a 50m e ha permesso di ottenere nuvole di punti, rappresentanti le parabole scansionate, in un sistema di riferimento solidale allo strumento. Al fine di inserire le nuvole di punti acquisite dal laser in un sistema di riferimento topocentrico esterno sono stati utilizzati target sferici collegati a prismi retrodirettivi che sono stati osservati sia dal laser, sia tramite un rilievo terrestre eseguito con una coppia di total stations di alta precisione.

Abstract

In order to determine the gravitational deformations originated by the movement of the VLBI telescopes around the elevation axis of the VLBI antenna, a test campaign concerning the use of terrestrial laser scanning was carried out at Medicina and Noto radioastronomical observatories. The primary mirror of the antenna is not visible from the ground, except for very low elevations. This certainly poses serious limits to the application of terrestrial methods for structure's topology reconstruction. The approach of external elevated platforms usually adopted in photogrammetry cannot be used in laser scanning surveys since there is a need of continuously stable supports. Therefore ad hoc manufactured supports were fixed close to the antenna secondary focus for a complete laser scanning of the dish surface at any elevation. The pulse laser used in these experiments has a resolution in range of about 1.5 mm a 50m. Both Noto and Medicina antenna's surface have been scanned at different elevation's positions of the dish. The raw data acquired with the laser scanner intrinsically define clouds of points expressed with respect to an instrumental reference system. In order to connect the observed points to an external topocentric reference system, it is necessary to relatively align the different clouds using common points observed

through an ad hoc terrestrial survey. The surveys are described and their main objectives are clearly stated, with a homogeneous perspective for both terrestrial surveying techniques.

I radiotelescopi di Medicina e di Noto



Figura 1 - Antenna VLBI di Medicina

Le antenne VLBI di Noto e Medicina sono dei radiotelescopi di configurazione Cassegrain (specchio primario parabolico, specchio secondario iperbolico).

Il riflettore primario, di 32 metri di diametro, è costituito da 240 pannelli di alluminio sorretti da una travatura reticolare posteriore. In un sistema di riferimento cartesiano, il paraboloide caratterizzante lo specchio primario, avente vertice (0,0,0) e fuoco sull'asse z (0,0,f), è rappresentato dalla seguente equazione teorica:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (1)$$

La distanza focale (f) per le antenne di Noto e di Medicina vale 10,259 metri.

Se, sotto l'azione di forze agenti l'antenna si deforma, allora il paraboloide non è più quello precedentemente illustrato ma cambia

forma, posizione ed orientamento.

A differenza del radiotelescopio di Medicina (Figura 1), l'antenna di Noto dispone di un sistema, ad anello aperto, di movimentazione dei pannelli tramite attuatori elettromeccanici, in cui un computer aggiorna la posizione dello specchio attingendo da memoria a misure di deformazione d'antenna effettuate a priori con varie tecniche (teodolite, fotogrammetria, olografia) e ripristinando la forma parabolica a tutte le elevazioni (Orfei et al., 2004).

L'idea quindi che sta alla base del concetto di superficie attiva è quella di compensare gli effetti di deformazione per gravità della struttura di sostegno dello specchio primario muovendo i pannelli che ne formano la superficie.

La tecnica VLBI, insieme ad altre tecniche geodetiche spaziali quali il GPS, SLR-LLR e DORIS, contribuiscono alla realizzazione del sistema di riferimento internazionale terrestre (**ITRF**).

Prima della nascita della Geodesia Spaziale la precisione dei metodi utilizzati per realizzare i sistemi di riferimento e per misurare le reti di controllo limitavano all'ambito nazionale l'estensione del territorio sul quale era possibile lavorare.

Per le tecniche geodetiche sopra citate è possibile individuare dei punti di riferimento geometrici ai quali ricondurre, attraverso opportuni modelli, le osservazioni fisiche.

Nella maggior parte dei casi si tratta di punti non materializzati e neppure materializzabili e che devono, quindi, essere individuati attraverso modellizzazioni geometriche e considerazioni di simmetrie (Sarti et al., 2004). Per le antenne VLBI, ad esempio, il punto di riferimento è definito come il punto individuato dalla proiezione dell'asse mobile sull'asse fisso del radiotelescopio. Nel caso specifico di Noto e di Medicina, essendo i telescopi di tipo AZ-EL (Azimut-Elevazione) il punto di riferimento sarà individuato dalla proiezione dell'asse di elevazione su quello di azimut. Tale punto normalmente coincide, per i telescopi VLBI, con il "tracking point" ITRF utilizzato per la realizzazione dell'ITRS.

Le deformazioni gravitazionali dei radiotelescopi VLBI tendono a modificare la forma parabolica dello specchio primario e, quindi, la posizione del punto di riferimento. E' per tale motivo che, in ambito geodetico, si rende indispensabile determinare con estrema precisione le deformazioni indotte dalla gravità sulle antenne VLBI al variare della loro elevazione.

Misure effettuate presso gli osservatori radioastronomici di Medicina e Noto

La complessa problematica dell'individuazione delle deformazioni indotte dalla gravità sulle antenne VLBI al variare della loro elevazione può essere affrontata tramite metodologie diverse ed indipendenti (Bolli et al., 2006). In questo caso, il problema è stato affrontato applicando ai radiotelescopi di Noto e di Medicina la metodologia del laser scanning terrestre. In particolare, il rilievo è stato effettuato posizionando le antenne a diverse elevazioni (90° , 75° , 60° , 45° , 30° , 15°). Lo strumento utilizzato in questa indagine (*TRIMBLE-MENSI GS200*) è un laser ad impulsi che permette di acquisire la posizione di circa 5000 punti al secondo con una risoluzione di circa 1.5 mm a 50m e che utilizza la tecnologia del Tempo di Volo (TOF). Esso, infatti, calcola la distanza dalla superficie analizzata in funzione del tempo impiegato dall'impulso laser per compiere il tragitto di andata e ritorno.

Il GS200 (Figura 2) è stato posizionato sopra a due supporti stabili (F1 e F2) fissati in prossimità del fuoco secondario, creati appositamente per questo rilievo, e le scansioni sono state effettuate di notte con lo scopo di ridurre al minimo l'influenza degli effetti atmosferici di pressione e temperatura.

Il sistema laser utilizzato consente rotazioni di 360° e di 60° rispettivamente attorno all'asse verticale e all'asse orizzontale. Queste specifiche tecniche permetterebbero l'intera copertura della superficie interna dell'antenna mediante un solo stazionamento. A causa però dell'occlusione dovuta al tamburo che protegge l'alloggiamento dei ricevitori dell'antenna, sono stati necessari i due stazionamenti in F1 e F2 in modo da consentire il rilievo dell'intero specchio primario.

Il rilievo laser ha fornito nuvole di punti, rappresentanti le parabole scansionate, in un sistema di riferimento solidale allo strumento.

Al fine di inserire le nuvole di punti acquisite dal laser in un sistema di riferimento topocentrico esterno sono stati utilizzati 6 target sferici collegati a 6 prismi retrodirettivi (Figura 3), disposti sul bordo esterno del paraboloide dell'antenna VLBI, che sono stati osservati sia dal laser, sia tramite un rilievo terrestre eseguito con una coppia di *total stations* di alta precisione.

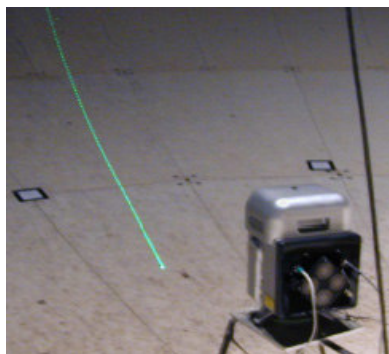


Figura 2 - Sistema Laser GS200



Figura 3 - Sfera e prisma

Elaborazione dei dati

Le coordinate del centro delle sfere sono state individuate dal software di post-elaborazione dei dati laser e da una compensazione ai minimi vincoli effettuata sulle osservazioni realizzate mediante le due stazioni totali, Leica TDA5005 (0,15 mgon; 1mm+2ppm) con ATR e Leica TC2003 (0,15 mgon; 1mm+1ppm). In particolare, si è considerata una rete di controllo a terra dalla quale è stato possibile rilevare i prismi predisponendo le antenne alle varie elevazioni e una rete interna all'antenna realizzata predisponendo le due stazioni totali sui supporti F1 ed F2 ed effettuando le misure con i radiotelescopi alla elevazione di 90° (Figura 4).

Le sfere sono state, invece, rilevate dalle stazioni totali mediante lo schema di "triangolazione", sfruttando le proprietà di simmetria delle sfere stesse (Figura 5).



Figura 4 - Strumenti TC2003 e TDA5005 nei punti di stazioneamento F2 ed F1 all'interno del VLBI

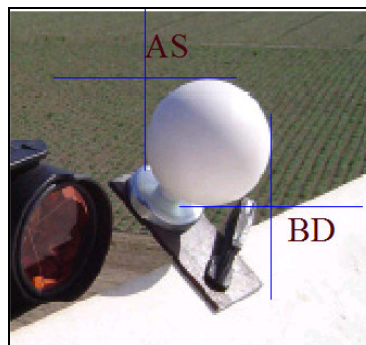


Figura 5 - Schema di Triangolazione sulle sfere posizionate al bordo del paraboloide

La compensazione rigorosa delle osservazioni topografiche (Figura 6) secondo il criterio dei minimi quadrati e la stima della matrice di varianza e covarianza dei parametri stimati, è stata realizzata mediante il software “STAR*NET” (Sawyer, 2001).

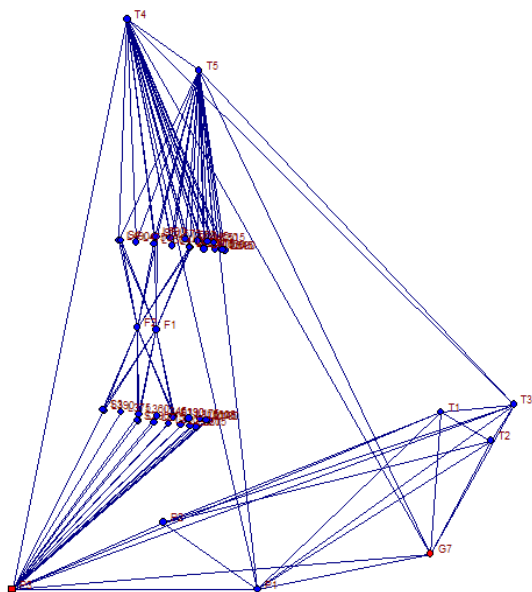


*Figura 6 - Schema della rete ottenuta mediante compensazione minimi vincoli con “STAR*NET”*

Mediante le misure topografiche effettuate all'interno dell'antenna sono state stimate, per una elevazione dell'antenna VLBI di 90° , le coordinate dei centri delle sfere ancorate al bordo del paraboloide, nonché dei sei prismi, ad esse solidali.

Gli stessi sei prismi sono stati misurati anche dall'esterno dell'antenna, facendo stazione sui pilastri di una rete topografica di controllo a terra. Tali misure sono state effettuate in corrispondenza delle diverse elevazioni dell'antenna (90° , 75° , 60° , 45° , 30° , 15°).

Successivamente è stato possibile stimare le coordinate dei centri delle sfere alle diverse elevazioni mediante una trasformazione conforme i cui parametri sono stati calcolati mediante la conoscenza delle coordinate dei prismi note sia in un sistema di riferimento interno all'antenna, sia in quello esterno fornito dalla rete topografica locale.

Tutto questo è stato fatto nell'ipotesi che le variazioni di posizione relativa tra ciascun prisma e la sfera adiacente ad esso indotte dalla rotazione dell'antenna siano trascurabili.

Questa ipotesi è stata ritenuta lecita in quanto i prismi e le sfere sono stati collocati a pochi centimetri l'uno dall'altro e risultano entrambi fissati ad un medesimo pannello metallico di rivestimento dell'antenna.

Mediante un'ulteriore stima dei parametri di trasformazione, tra le posizioni delle sfere nel sistema topografico alle diverse elevazioni dell'antenna, e le coordinate delle stesse sfere ottenute mediante il rilievo laser scanning, è stato possibile inserire le successive scansioni ottenute dall'interno dell'antenna VLBI, nel sistema di riferimento topocentrico esterno (Figura 7).

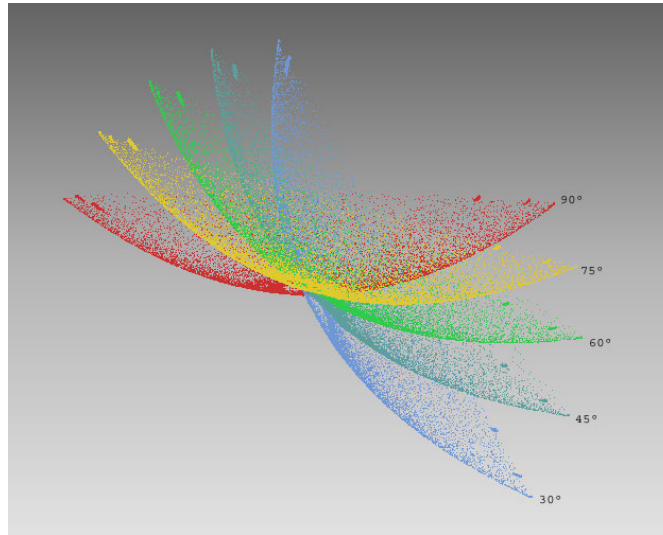


Figura 7 - Scansioni laser inserite nel sistema topocentrico esterno

Calcolo delle deformazioni gravitazionali delle antenne VLBI

Come detto in precedenza, il rilievo laser ha fornito nuvole di punti, rappresentanti le parabole scansionate, in un sistema di riferimento solidale allo strumento e pertanto decentrato rispetto al vertice (0,0,0) del paraboloide teorico rappresentato dalla formula (1).

E' stato, pertanto, realizzato un programma ad hoc (in Fortran 90) per risolvere il problema di reverse engineering che permettesse di determinare per ciascuna scansione, sia la focale del paraboloide best-fit, sia i parametri di rototraslazione in modo da ricondurre il solido stesso all'origine (0,0,0) di un sistema di riferimento intrinseco.

A tal fine sono state utilizzate tutte le nuvole misurate, alle varie elevazioni, dai due punti di presa F1 ed F2. Ciascuna delle nuvole è composta da un numero di punti che varia da 600 000 a 1 300 000.

Tale software ha permesso di determinare per tutte le nuvole di punti laser i parametri incogniti del problema, ossia le traslazioni tra il sistema di riferimento strumentale laser (x_c , y_c , z_c) e l'origine del paraboloide di rotazione, la distanza focale e le rotazioni rispetto agli assi x e y . La rotazione attorno all'asse z è stata trascurata in quanto la superficie risulta essere simmetrica per rotazione attorno a quest'ultimo asse.

Di seguito viene mostrato il grafico (Figura 8) che mette in relazione la distanza focale stimata tramite il codice Fortran (utilizzando le nuvole dei punti laser) al variare dell'elevazione dell'antenna VLBI. In figura 9 sono invece visualizzati i residui fra il paraboloide best-fit a 90° e lo stesso a 45° sia per Medicina che per Noto.

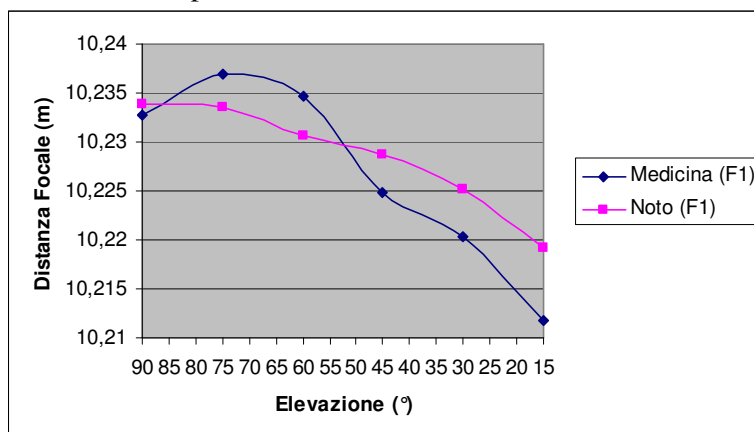


Figura 8 - Relazione fra Distanza Focale ed Elevazione delle antenne VLBI

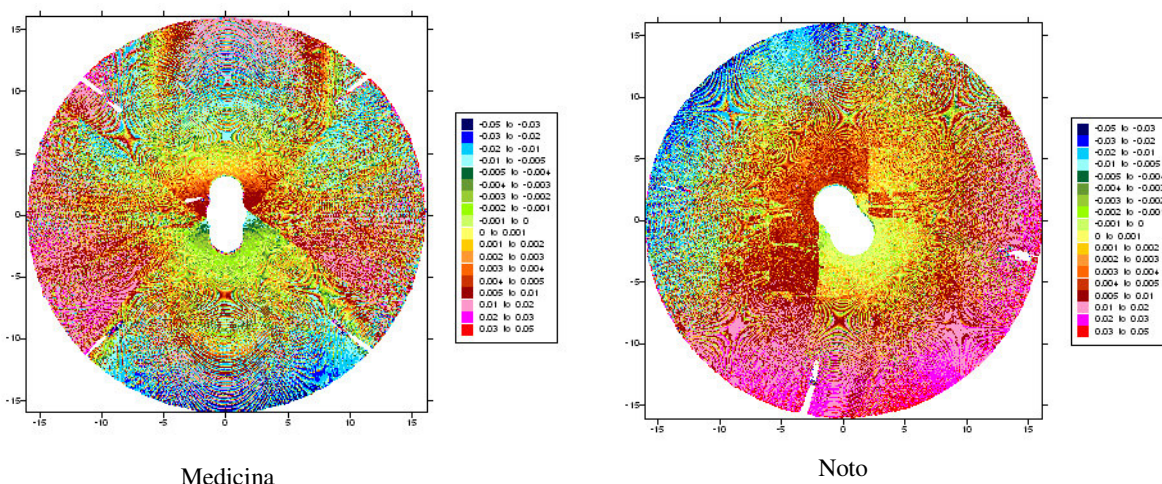


Figura 9 - Residui fra il Best-Fit del paraboloide di Medicina e Noto a 90° e 45°

Conclusioni

Le deformazioni gravitazionali che le antenne VLBI subiscono al variare dell'elevazione tendono a modificare la forma parabolica dello specchio primario, la focale ed altri importanti parametri che costituiscono le caratteristiche strutturali dei radiotelescopi. Una conoscenza accurata dell'ottica dei radiotelescopi è fondamentale per posizionare correttamente i ricevitori per le diverse radiofrequenze, siano essi alloggiati nel fuoco primario (è il caso dei ricevitori S ed X utilizzati in geodesia) o nel fuoco Cassegrain. Qualora l'antenna sia dotata di ottica attiva (è il caso dell'antenna di Noto) le informazioni circa la dipendenza della distanza focale dall'elevazione sono cruciali.

La tecnica laser scanning applicata allo studio dei paraboloidi delle antenne di Medicina e Noto rappresenta un metodo innovativo che ha fornito risultati molto interessanti. Quest'ultimi, uniti alle informazioni ricavate da studi e indagini condotte in passato sui radiotelescopi utilizzando metodi differenti, formano un insieme completo di dati che potranno essere utilizzati per la determinazione e la convalidazione delle deformazioni gravitazionali assolute e relative delle antenne VLBI. La creazione e la valutazione di opportuni modelli che possano descrivere, correggere o rimuovere gli effetti delle deformazioni strutturali sulle osservazioni, siano esse condotte in ambito astronomico o geodetico, rappresenta il prossimo obiettivo ed il seguito di questo lavoro.

References:

- Bolli P., GL. Deiana, S. Montaguti, M. Negusini, P. Sarti, L. Vittuari (2006) "Photogrammetry, Laser Scanning, Holography and Terrestrial surveying of the Noto VLBI dish" IVS 2006 Gen. Meeting Proc., Eds.: by D. Behrend and K. D. Baver, NASA/CP-2006-214140, pp. 172-176
- Orfei A., M. Morsiani, G. Zacchiroli, G. Maccaferri, J. Roda, F. Fiocchi (2004) "An Active Surface for Large Reflector Antennas", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 46, 4, pp. 11-19
- Sarti P., P. Sillard, L. Vittuari (2004) "Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation" J Geod, 78, 210-222, DOI 10.1007/s00190-004-0387-0
- Sarti P., M. Negusini, L. Vittuari, S. Montaguti, P. Tomasi (2003) "GPS - VLBI eccentricity at Noto Observatory: June 2003 survey results" Proc. XVII Working Meeting European VLBI for Geodesy and Astrometry, Noto, Italy, 21-23 Aprile 2005, pp. 51-55
- Sawyer R (2001) STAR*NET-PRO V6 least squares survey network adjustment program reference manual. Oakland, CA.