#### Test funzionale del controllo del subriflettore del Sardinia Radio Telescope

Orlati Andrea<sup>1</sup> Buttu Marco<sup>2</sup> Zacchiroli Gianpaolo<sup>1</sup> Morsiani Marco<sup>1</sup> Fiocchi Franco<sup>1</sup> Buffa Franco<sup>2</sup>

1 - I.N.A.F. Istituto di Radioastronomia.

2 – I.N.A.F. Osservatorio di Cagliari.

## IRA 501-16

| 1 | INT  | RODUZIONE   | 3  |
|---|------|---|----|
|   | 1.1  | DEFINIZIONI E ABBREVIAZIONI                                       | .3 |
| 2 | SIST | TEMA DI RIFERIMENTO DEL SUBRIFLETTORE                             | 6  |
| 3 | ALL  | INEAMENTO DEL SUBRIFLETTORE                                       | 7  |
|   | 3.1  | Sistema di riferimento MTM  | .7 |
|   | 3.2  | Asse di Best fit di M2  | .7 |
|   | 3.3  | CORREZIONI DI M2 PER EFFETTO GRAVITAZIONALE                       | .7 |
|   | 3.4  | Correzione di M2 con superficie attiva                            | .9 |
|   | 3.5  | POSIZIONAMENTO DEL SUBRIFLETTORE TRAMITE IL SOFTWARE DI CONTROLLO | .0 |
| 4 | BEA  | AM DEVIATION FACTOR   |    |
| 5 | PRC  | DVE FUNZIONALI  | 11 |
|   | 5.1  | Focusing1   | .2 |
|   | 5.2  | ERRORE DI POSIZIONE RISPETTO ALLE CURVE DI COMPENSAZIONE          | .4 |
|   | 5.3  | PRECISIONE DELL'INSEGUIMENTO1                                     | .7 |

# 1 Introduzione

Nell'ambito del commissioning tecnico si è definita la fase di "fine tuning" come quella serie di attività utili a determinare l'efficienza di SRT (per tutte le elevazioni) con le ottiche allineate come da fotogrammetria eseguita da MTM.

A seguito del lavoro di messa in servizio dei servo minori e della SMCU (Servo Minor Control Unit), si è resa necessaria una fase di verifica e validazione funzionale del software di controllo in carico di gestire la movimentazione del servo sistema secondario.

L'attività in questione ha compreso diversi elementi:

operazioni di scelta del fuoco e del ricevitore;

monitoring dello stato degli azionamenti;

controllo della cinematica del subriflettore;

esecuzione dei polinomi per l'allineamento del subriflettore;

esecuzione di focus scan per l'ottimizzazione di fuoco.

Questo documento si propone di sintetizzare i test eseguiti per validare gli ultimi due requisiti i quali, unitamente alla messa in servizio della superficie attiva, sono di fondamentale importanza per le misure di "fine tuning".

#### **1.1** Definizioni e abbreviazioni

| ABS    | Activity Breakdown Structure   |
|--------|--|
| ACU    | Antenna Control Unit   |
| AER    | Alidade Equipment Room   |
| AIV    | Acceptance Integration Verification                                    |
| APER   | Apex Equipment Room  |
| BDF    | Beam Deviation Factor  |
| BWG    | Beam Wave Guide Room   |
| BWHM   | Beam Width Half Maximum  |
| CED    | Centro Elaborazione Dati   |
| CO     | Cassetto Ottico  |
| CR     | Control Room   |
| DBBC   | Digital Base Band Converter  |
| DC     | Drive Cabinet  |
| EER    | Elevation Equipment Room   |
| EVN    | European VLBI Network  |
| F1     | Fuoco Primario (davanti al subriflettore, ottica Gregoriana)           |
| F2     | Fuoco Secondario (a livello del rotatore in fuoco Gregoriano)          |
| F3     | Fuoco BWG  |
| FO     | Fibra Ottica   |
| GAI    | Gruppi di Attività Integrata   |
| GFR    | Gregrian Focus Positioner  |
| GFR-CS | Sistema di Controllo (servo) del Rotatore dei Feed in Fuoco Gregoriano |
| GG     | Gruppo Generatori  |
|        |  |

| GRP    | Gregorian Receiver Positioner  |
|--------|--|
| GRR    | Gregorian Receiver Room  |
| IRA    | Istituto di Radio Astronomia   |
| IRIG-B | Inter-Range Instrumentation Group time codes di tipo B                         |
| LAN    | Local Area Network   |
| M1     | Specchio riflettore primario   |
| M2     | Subriflettore al vertice del quadrupode  |
| M3     | Specchio selettore della focale BWG  |
| M3R-CS | Sistema di Controllo del Rotatore dello specchio M3                            |
| M4     | Specchio con focale per ricevitori intermedi                                   |
| M5     | Specchio con focale eguale a Medicina  |
| MOM    | Minute di Meeting  |
| MS     | Master Synthetiser   |
| MSCU   | Minor Servo Control Unit   |
| NC     | Non Conformità   |
| OAC    | Osservatorio Astronomico di Cagliari   |
| РСР    | Principal Control Panel  |
| PFP    | Primary Focus Positioner   |
| PFP-CS | Sistema di Controllo (servo) del Posizionatore Ricevitori in Fuoco Primario    |
| PI     | Principal Investigator   |
| PLC    | Programmable Logic Controller  |
| PS     | Project Scientist  |
| RCP    | Remote Control Panel, per il controllo remoto del servo principale             |
| RF     | Radio Frequenza  |
| IF     | Intermediate Frequency   |
| RFI    | Radio Frequency Interference   |
| RJ45   | Connettore cavi LAN in rame  |
| RNC    | Riunione di Non Conformità   |
| S/R    | Subriflettore  |
| SRP    | Sub Reflector Positioner   |
| SRP-CS | Sistema di Controllo (servo) del Posizionatore del Subriflettore               |
| SRT    | Sardinia Radio Telescope   |
| TBC    | To Be Checked  |
| TBD    | To Be Defined  |
| TBW    | To Be Written  |
| TF     | Testa Fredda, ovvero refrigeratore criogenico dei dewar dei singoli ricevitori |
| T&F    | Tempo e Frequenza, genera il riferimento di frequenza e tempo per la stazione  |
| TRB    | Test Review Board  |
| TRR    | Test Readiness Review  |
| UEER   | Upper Elevation Equipment Room   |
| UTC    | Coordinated Universal Time   |
| VCB    | Verification Control Board   |
|        |  |

| VLBI | Very Long Base | Interferometry |
|------|----------------|----------------|
| VLBI | Very Long Base | Interferometr  |

- **WBS** Work Breakdown Structure
- **TPI** Total power integrator
- Tsys Temperatura di sistema

## 2 Sistema di riferimento del subriflettore

Si è verificata la corrispondenza tra il sistema di riferimento delle equazioni del moto di M2 e quello applicato dalla geometria degli assi e dal servo sistema. Per fare questo, si sono applicate delle traslazioni e delle rotazioni positive e negative sui singoli assi; esaminando le elongazioni dei bracci meccanici (X, Y1, Y2, Z1, Z2, Z3) è stato possibile concludere che il sistema di riferimento delle equazioni del moto è quello illustrato in Figura 1: considerando l'antenna allo zenith e rivolta a sud (azimuth 180°)

- Origine degli assi nel vertice di M2 (subriflettore)
- Asse Y, ortogonale all'asse di elevazione dell'antenna, traslazione positiva verso nord.
- Asse X, parallelo all'asse di elevazione dell'antenna, traslazione positiva verso ovest
- Asse Z, positivo in direzione dello specchio primario M1
- Rotazioni positive in senso orario (CW) guardando, dall'origine degli assi, lungo la direzione positiva dell'asse.



Figura 1 - Sistema di riferimento del subriflettore, considerando l'antenna allo zenith e rivolta verso sud (azimuth 180°)

# 3 Allineamento del subriflettore

#### 3.1 Sistema di riferimento MTM

Considerando l'antenna allo zenith e rivolta verso sud (azimuth 180°), Il sistema di riferimento usato da MTM al quale riferire l'allineamento di M2 può essere così descritto:

- Origine degli assi nel vertice di M1 (specchio primario)
- Asse Y, ortogonale all'asse di elevazione dell'antenna, positivo in direzione nord
- Asse X, parallelo all'asse di elevazione dell'antenna, positivo in direzione est
- Asse Z, perpendicolare al piano definito dai precedenti assi, positivo in direzione dello specchio secondario (M2)
- Rotazioni positive in senso antiorario (CCW) guardando dall'origine degli assi lungo la direzione positiva dell'asse.

Volendo riportare le misure al sistema di riferimento del subriflettore riportato nel paragrafo 2 occorrerà:

- 1. Cambiare di segno alle traslazioni X
- 2. Mantenere inalterate le traslazioni Y
- 3. Cambiare di segno le traslazioni Z
- 4. Mantenere inalterate le rotazioni X
- 5. Cambiare di segno le rotazioni Y

#### 3.2 Asse di best fit di M2

L'ultima iterazione di fotogrammetria riporta un valore di rms di 176  $\mu$ m che viene però migliorato applicando un algoritmo di best fit ai dati. I parametri del best fit sono riportati in Tabella 1 e consentono di ottenere un rms di 57  $\mu$ m muovendo il subriflettore come corpo rigido secondo tali parametri.

Allo stato attuale questa ottimizzazione non è applicata dal sistema di controllo Nuraghe, per cui si dovrà supporre 176 µm come valore di RMS dello specchio secondario.

Tabella 1 - Parametri del best fit di M2, sistema di coordinate subriflettore.

| Elevazione | Traslazione | Traslazione | Traslazione | Rotazione X | Rotazione Y | Rotazione Z |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| (°)        | X (mm)      | Y (mm)      | Z (mm)      | (arc sec)   | (arc sec)   | (arc sec)   |
| 45°        | 0.19        | 0.52        | 0.03        | 14.8        | 9.8         | ND          |

#### 3.3 Correzioni di M2 per effetto gravitazionale

La Tabella 2 riporta, a step di 15° di elevazione, i valori delle correzioni da apportare per mantenere allineato l'asse di best fit di M2 con l'asse di M1. I valori sono da intendere come differenze rispetto alla posizione nominale

| Elevazione | Traslazione | Traslazione | Traslazione | Rotazione X | Rotazione Y | Rotazione Z |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| (°)        | X (mm)      | Y (mm)      | Z (mm)      | (arc sec)   | (arc sec)   | (arc sec)   |
| 90°        | 1,82        | -40,25      | 2,90        | 636         | 127         | -316        |
| 75°        | 1,42        | -25,62      | 2,61        | 442         | 132         | -303        |
| 60°        | 1,40        | -11,98      | 1,79        | 252         | 125         | -294        |
| 45°        | 1,38        | -0,26       | 0,30        | 96          | 130         | -277        |
| 30°        | 1,45        | 8,65        | -2,07       | -24         | 129         | -254        |
| 15°        | 1,51        | 14,70       | -4,19       | -100        | 131         | -250        |
| 5°         | 1,50        | 16,62       | -5,86       | -125        | 132         | -244        |

| Tabella 2 | - Correzione | della | posizione d | i M2, | rispetto | all'asse | di M1, | sistema | di riferiment | o MTM |
|-----------|--------------|-------|-------------|-------|----------|----------|--------|---------|---------------|-------|
|-----------|--------------|-------|-------------|-------|----------|----------|--------|---------|---------------|-------|

Dalla Tabella 2 si ricavano i valori per posizionare il subriflettore allo scopo di allineare gli assi di M1 e M2 per una elevazione di 45°. Tali valori sono elencati in Tabella 3.

Tabella 3 - Correzione della posizione di M2 per i 45°, rispetto all'asse di M1, sistema di riferimento subriflettore

| Elevazione | Traslazione | Traslazione | Traslazione | Rotazione X | Rotazione Y | Rotazione Z |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| (°)        | X (mm)      | Y (mm)      | Z (mm)      | (arc sec)   | (arc sec)   | (arc sec)   |
| 45°        | -1,50       | -0,26       | -0,30       | 96          | -130        | NU          |

Una volta che M2 è nella posizione ottimale per i 45°, vanno applicate le correzioni in funzione dell'elevazione. Tali valori, riferiti al sistema subriflettore, sono sempre ricavati dalla Tabella 2 e raccolti in Tabella 4. Si riportano solo gli assi che manifestano effetti dovuti al variare dell'elevazione.

Tabella 4 - Correzione della posizione di M2 in funzione dell'elevazione, sistema di riferimento subriflettore

| Elevazione<br>(°) | Traslazione Y<br>(mm) | Traslazione Z<br>(mm) | Rotazione X<br>(arc sec) |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| 90°               | -39,99                | -2,60                 | 540                      |
| 75°               | -25,36                | -2,31                 | 346                      |
| 60°               | -11,72                | -1,49                 | 156                      |
| 45°               | 0,00                  | -0,00                 | 0                        |
| 30°               | 8,91                  | 1,77                  | -120                     |
| 15°               | 14,96                 | 3,89                  | -196                     |
| 5°                | 16,88                 | 5,56                  | -221                     |

Le tre curve di Tabella 4 sono ben approssimate da dei polinomi del terzo ordine che facilitano anche la correzione per le elevazioni interpolate:

Tra-Y(el)=0,000031617958\*el<sup>3</sup>-0,009870218853\*el<sup>2</sup>-0,002707044952\*el+17,117487139874

 $\Omega ) \qquad Tra-Z(el)=0,000003985237*el3+0,000419997047*el^2-0,169826241752*el+6,374633191475$ 

Rot-X(el)=-0,000471636035\*el<sup>3</sup>+0,142231841278\*el<sup>2</sup>-0,513429659793\*el-220,632145346211

#### 3.4 Correzione di M2 con superficie attiva

Per mettere in funzione la superficie attiva occorre considerare che, in fase di analisi della fotogrammetria di M1, l'interpolazione svolta sui dati ha di fatto definito un asse di best fit di M1 diverso da quello usato per l'allineamento reciproco dell'asse di M1 con quello di best fit di M2 (vedi Paragrafo 3.2). Anche le misure su M1 sono state fatte ad intervalli di 15°, la Tabella 5 riassume i parametri di best fit per ciascun set di misure.

| Elevazione | Traslazione Z | Rotazione X | <b>Rotazione Y</b> |
|------------|---------------|-------------|--------------------|
| (°)        | (mm)          | (arc sec)   | (arc sec)          |
| 90°        | 4554,8        | -9          | 0                  |
| 75°        | 4555,0        | 22          | 6                  |
| 60°        | 4555,2        | 58          | -1                 |
| 45°        | 4555,7        | 75          | 7                  |
| 30°        | 4555,4        | 110         | 4                  |
| 15°        | 4557,4        | 107         | 14                 |

Tabella 5 - Parametri di best fit di M1 al variare dell'elevazione, sistema di coordinate MTM

Combinando la Tabella 4 con la Tabella 5 e trascurando gli effetti della superficie attiva sulla traslazione Z si possono ricavare le correzioni da applicare a M2 quando le ottiche dello specchio primario sono in funzione. La Tabella 6 riporta il risultato di questa operazione riferita al sistema di coordinate del subriflettore. La traslazione in Z non viene inclusa perché molto limitata e perché il corretto posizionamento dell'asse può essere facilmente determinato con misure astronomiche durante il "fine tuning".

| Elevazione<br>(°) | Traslazione Y<br>(mm) | Traslazione Z<br>(mm) | Rotazione X<br>(arc sec) |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| 90°               | -41,23                | -2,60                 | 531                      |
| 75°               | -22,33                | -2,31                 | 368                      |
| 60°               | -3,73                 | -1,49                 | 214                      |
| 45°               | 10,34                 | 0,00                  | 75                       |
| 30°               | 24,07                 | 1,77                  | -10                      |
| 15°               | 29,71                 | 3,89                  | -89                      |

 Tabella 6 - Correzione della posizione di M2 con superficie attiva, in funzione dell'elevazione, sistema di riferimento subriflettore

Anche in questo caso la Tabella 6 può essere approssimata da dei polinomi del terzo ordine:

Tra-Y(el)=0,000072373113855\*el<sup>3</sup>-0,018206701940039\*el<sup>2</sup>+0,263472663139432\*el+29,81666666666666

 $\Psi ) \qquad {\it Tra-Z(el)=0,000003985237184^*el^3+0,000419997047419^*el^2-0,169826241751738^*el+6,37463319147492}$ 

Rot-X(el)=-0,000279835390946\*el<sup>3</sup>+0,099312169312164\*el<sup>2</sup>+0,5335978835977\*el-116,00000000005

#### 3.5 Posizionamento del subriflettore tramite il software di controllo

Osservando con i ricevitori nei fuochi gregoriano e BWG, il software di controllo consente tre modalità:

- a) Superficie attiva abilitata (attuatori in inseguimento in funzione dell'elevazione), posizione di M2 corretta per gravità.
- b) Superficie attiva disabilitata (attuatori comandati alla posizione prevista dalla tabella di compensazione per i 45°), posizione di M2 corretta per la gravità.
- c) Superficie attiva disabilitata (attuatori comandati alla posizione prevista dalla tabella di compensazione per i 45°), posizione di M2 fissa e ottimizzata per i 45°.

La configurazione precedente al "fine tuning", con superficie attiva allineata meccanicamente a 45° (attuatori a metà corsa) e subriflettore anch'esso allineato meccanicamente, non è più supportata.

Indicando con  $\varphi$  i parametri di Tabella 1, con  $\rho$  i parametri di Tabella 3 e con  $\vartheta = \rho + \varphi$ si può riassumere facilmente come il software di controllo calcola c(el) per correggere la posizione del subriflettore nei tre casi. Ricordiamo che al momento  $\varphi$ non è considerato e che quindi  $\vartheta = \rho$ :

- a) c(el)=Ψ(el)+ϑ
- b) c(el)= $\Omega(el)$ +  $\Psi(45)$  +  $\vartheta$
- c) c(el)=Ψ(45) + ϑ

## **4** Beam deviation factor

Le traslazioni e le rotazioni degli assi di M2 hanno degli effetti sul puntamento d'antenna: traslazione in X e rotazione in Y modificano l'azimuth, mentre traslazione in Y e rotazione in X agiscono sull'elevazione.

Durante le misure di "fine tuning", si è cercato di quantificare quale sia il rapporto tra lo spostamento effettuato sull'asse e l'offset introdotto sul puntamento (Beam Deviation Factor). Le misure sono state fatte con il subriflettore e la superficie attiva in funzione e applicando il nuovo modello di puntamento, quindi con le correzioni descritte nel paragrafo 3 già compensate nel modello stesso. Si è focalizzata l'attenzione su un asse alla volta; ad ogni spostamento comandato sull'asse stesso, si è valutato l'offset di puntamento con la tecnica del cross scan.

I valori riportati in Figura 2 sintetizzano queste misure, eseguite in fuoco gregoriano (a 24 GHz).

Nella prima colonna si trova lo spostamento sull'asse (la posizione uguale a zero corrisponde a quella nominale), la settima colonna riporta il BDF - l'offset in azimuth è scalato per il coseno dell'elevazione. Infine l'ultima colonna elenca i valori attesi come da simulazioni ottiche.

| Rotation      | 1 Y (All | subreflector axis in tra | acking mode, A   | ctive Surface Ti     | acking)                |                       |                |                       |
|---------------|----------|--------------------------|------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Position (°)  | Source   | Elevation FWHM (°)       | Azimuth FWHM (') | Elevation Offset (°) | sky Azimuth Offset (°) | Daz/Dry (arcsec/mdeg) | Daz/Dry (°/°)  | teorico (arcsec/mdeg) |
|               | 0 dr21   | 0,0136                   | 0,0135           | 0,00160              | -0,00080               |                       |                |                       |
| C             | ),1 dr21 | 0,0135                   | 0,0135           | 0,00091              | 0,02439                | 0,87804               | 0,2439         | 0,871                 |
| 0,            | 15 dr21  | 0,0139                   | 0,0137           | 0,00680              | 0,03608                | 0,86592               | 0,240533333    | 0,871                 |
| -0,           | 15 dr21  | 0,0138                   | 0,0134           | 0,00145              | -0,03672               | 0,88116               | 0,244766667    | 0,871                 |
|               |          |                          |                  |                      |                        | 0,87504               | 0,243066667    |                       |
| Traclari      | ono V    |                          |                  |                      | T 1: )                 |                       |                |                       |
| Tasiazi       | onex     | All subreflector axis i  | n tracking mod   | e, Active Surfac     | e Tracking)            |                       |                |                       |
| Position (mm) | Source   | Elevation FWHM (°)       | Azimuth FWHM (°) | Elevation Offset (*) | sky Azimuth Offset (°) | Daz/Dtx (arcsec/mm)   | Daz/Dtx (°/mm) | teorico (arcsec/mm)   |
|               | 0 dr21   | 0,0138                   | 0,0133           | -0,0022              | -0,0002                |                       |                |                       |
|               | 10 dr21  | 0,0138                   | 0,0139           | -0,0014              | 0,0247                 | 8,87652               | 0,0024657      | 8,87                  |
|               | 20 dr21  | 0,0135                   | 0,0160           | -0,0008              | 0,0500                 | 9,00828               | 0,0025023      | 8,87                  |
| -             | 20 dr21  | 0,0141                   | 0,0149           | -0,0042              | -0,0502                | 9,02952               | 0,0025082      | 8,87                  |
| -             | 10 dr21  | 0,0138                   | 0,0135           | -0,0037              | -0,0253                | 9,1242                | 0,0025345      | 8,87                  |
|               |          |                          |                  |                      |                        | 9,054                 | 0,002515       |                       |
|               |          |                          |                  |                      |                        |                       |                |                       |
| Rotation      | ı X (Al  | l subreflector axis      | in tracking      | mode, Activ          | e Surface Tra          |                       |                |                       |
| Position (°)  | Source   | Elevation FWHM (°)       | Azimuth FWHM (°) | Elevation Offset (°) | sky Azimuth Offset (°) | Del/Drx (arcsec/mdeg) | Del/Drx (°/°)  | teorico (arcsec/mdeg) |
|               | 0 dr21   | 0,0137                   | 0,0134           | 0,0005               | -0,0001                |                       |                |                       |
| C             | ),1 dr21 | 0,0139                   | 0,0135           | -0,0239              | 0,0000                 | -0,85932              | -0,2387        | 0,871                 |
| -C            | ),1 dr21 | 0,0136                   | 0,0134           | 0,0231               | -0,0001                | -0,832896             | -0,23136       | 0,871                 |
|               |          |                          |                  |                      |                        | -0,846108             | -0,23503       |                       |
|               |          |                          |                  |                      |                        |                       |                |                       |
| Traslazi      | one Y    | (All subreflector axis i | n tracking mod   | e, Active Surfac     | e Tracking)            |                       |                |                       |
| Position (mm) | Source   | Elevation FWHM (°)       | Azimuth FWHM (°) | Elevation Offset (°) | sky Azimuth Offset (°) | Del/Dty (arcsec/mm)   | Del/Dty (°/mm) | teorico (arcsec/mm)   |
|               | 0 dr21   | 0,0136                   | 0,0136           | -0,0008              | 0,0008                 |                       |                |                       |
|               | 10 dr21  | 0,0138                   | 0,0135           | 0,0250               | -0,0058                | 8,98236               | 0,0024951      | 8,87                  |
|               | 20 dr21  | 0,0148                   | 0,0133           | 0,0500               | -0,0013                | 9,00828               | 0,0025023      | 8,87                  |
| -             | 20 dr21  | 0,0154                   | 0,0135           | -0,0542              | 0,0018                 | 9,75024               | 0,0027084      | 8,87                  |
| -             | 10 dr21  | 0,0143                   | 0,0135           | -0,0277              | 0,0008                 | 9,97272               | 0,0027702      | 8,87                  |
|               |          |                          |                  |                      |                        | 9,86148               | 0,0027393      |                       |

Figura 2 - Valori di Beam Deviation Factor (7<sup>a</sup> colonna) in funzione di spostamenti fissi sugli assi del subriflettore: dall'alto rotazione in Y, traslazione in X, rotazione in X e traslazione in Y

## 5 Prove funzionali

In questo paragrafo si presenta una sintesi di tutti i test condotti per validare le parti del software che controllano i servo minori e quindi il subriflettore.

In tutti i casi presentati, le modalità con cui si è eseguito il test sono le medesime. Attraverso una marca di tempo si è associata l'elevazione d'antenna alle posizioni del subriflettore, i dati, raccolti con un intervallo di campionamento di 40 ms, sono stati immagazzinati in file FITS sui dischi del sistema di controllo. La visualizzazione e l'analisi sono state eseguite con un semplice programma sviluppato in IDL. La Figura 3 ne mostra un esempio; per ogni grado di libertà di M2 sono riportati la traiettoria effettuata dall'asse, l'errore di posizione (scostamento rispetto alla posizione attesa) e l'RMS della traiettoria stessa.



Figura 3 - On-The-Fly scan con SA e SRP abilitati, in blu le traiettorie aspettate, in arancione quelle effettivamente eseguite dal servo sistema

### 5.1 Focusing

Il non corretto posizionamento del subriflettore, dovuto a deformazioni della struttura, può essere in gran parte recuperato agendo sul puntamento del telescopio, se lo spostamento o la rotazione riguarda gli assi X ed Y. Nel caso della traslazione Z, la perdita di efficienza può essere consistente anche con pochi mm di de-focusing (vedi Figura 4) ed il recupero della corretta posizione richiede una procedura particolare implementata nel software di controllo, detta appunto di focusing.

Il focusing consiste nell'inseguimento siderale di una sorgente di calibrazione mentre il subriflettore (o il ricevitore) viene spostato lungo l'asse ottico, contemporaneamente vengono acquisiti dati di total power. Si misura in pratica l'intensità del segnale verso lo scostamento in Z.

Sui dati acquisiti viene poi effettuato un fit gaussiano, che consente di individuare il picco dell'intensità, e la posizione in Z cui esso corrisponde. Un esempio di questa procedura è in Figura 5; si noti l'ottima corrispondenza con la curva simulata di Figura 4 e come le due curve si sovrappongano molto fedelmente se in ordinata si sostituisce il parametro lambda con il valore di 13 mm (che corrisponde alla lunghezza d'onda utilizzata).

Delle prove funzionali svolte per il focusing diamo conto nei paragrafi successivi.

In questo paragrafo ci limitiamo a riportare una piccola anomalia rilevata sull'asse di traslazione in X durante questa procedura. L'asse in questione, infatti, dovrebbe

rimanere costante a -1,5 mm invece è evidente uno spostamento lineare in funzione dell'elevazione, che ha la stessa pendenza della curva eseguita in Z (Figura 6). Sebbene lo spostamento totale sia nell'ordine dei centesimi di millimetro, quindi sostanzialmente ininfluente, ci riserviamo di effettuare ulteriori controlli. Una delle ipotesi è che nelle equazioni del moto ci possa essere qualche errore di arrotondamento, tale per cui il calcolo della posizione di TX risenta della movimentazione comandata in TZ.



Figura 4 - Perdita di efficienza in funzione del de-focusing, simulazione ottica nel caso del ricevitore 22 GHz in fuoco gregoriano



Figura 5 - Scan di fuoco fatto a 22 GHz, in tratteggio arancione le misure eseguite col backend total power, in nero la gaussiana risultante del fitting dei dati.



Figura 6 – Comportamento degli assi di M2 durante il focusing, che richiede uno spostamento lungo l'asse Z mentre TY e RX inseguono secondo i polinomi di correzione. In arancione le traiettorie effettivamente percorse dagli assi.

#### 5.2 Errore di posizione rispetto alle curve di compensazione

Come detto al paragrafo 3.5, sono supportate tre modalità:

- a) SA abilitata, SRP abilitato
- b) SA disabilitata, SRP abilitato
- c) SA disabilitata, SPR disabilitato

Per ognuna di queste si è controllato il comportamento del subriflettore durante il normale tracking siderale, durante scansioni On-The-Fly e durante il focusing.

In Tabella 7 si riportano gli errori di posizione misurati in tutti i casi sopra menzionati. L'errore di posizione è calcolato come differenza media tra la traiettoria percorsa e quella teorica e risulta maggiormente significativo in quei casi in cui è richiesta la movimentazione dell'asse in funzione dell'elevazione (caselle in azzurro della tabella). Si nota la presenza di un errore d'inseguimento (ritardo), trascurabile in prima approssimazione - ad esempio la traslazione in Y è dell'ordine del decimo di millimetro a confronto con una lambda che al momento è, nel caso peggiore, di 11 mm - ma in assoluto non compatibile con quanto era atteso dalle caratteristiche del servo sistema e della linea di comando.

Al fine di investigare meglio l'effetto appena descritto, in Tabella 8 sono riportati altri risultati cercando di mettere in evidenza la velocità effettiva dell'asse del subriflettore, ci si riferisce alla modalità (a) limitatamente ai casi TY e RX durante skydip, tracking siderale e scansione On-The-Fly. Si osserva come i due assi siano assolutamente in accordo in tutti i casi, quindi si può escludere qualsiasi problema la cui natura è legata all'asse (equazioni del moto, MSCU, azionamenti). Nel caso degli skydip con velocità in elevazione negativa, si nota come l'errore cresca con l'aumentare della velocità dell'asse, il rapporto tra i due valori rimane sempre attorno agli 0.5 sec che è

un valore di "ritardo" dentro le attese. Analizzando invece il caso degli OTF, l'errore è pressoché costante ma troppo elevato per le velocità sostenute: il confronto tra l'ultima riga e la seconda (OTF a 0.046 °/sec e skydip a 0.04 °sec) è emblematico in tal senso, l'errore nel primo caso è 5 volte maggiore. Quest'ultima osservazione è drasticamente più evidente se si considera il caso del tracking siderale. Apparentemente sembra esserci una dipendenza dal tipo di osservazione effettuata il che implicherebbe un qualche problema nel software di controllo che andrà certamente investigato. Un'altra osservazione che si può fare è legata alle Figure 8 e 9 che mostrano il comportamento della traslazione in Y durante un tracking siderale. nel primo caso con sorgente verso il culmine (elevazione crescente), nel secondo verso il tramonto (elevazione decrescente). Nei due casi non si apprezzano sostanziali differenze sia nel modulo sia nel segno dell'errore di posizione. Si esclude, pertanto, una dipendenza dal verso con cui il subriflettore si muove lungo l'asse. Va sottolineato infine che, nel caso di beam park (antenna ferma ad una determinata posizione azimuth-elevazione), il sistema di controllo ed il servo sistema posizionano correttamente gli assi; la Figura 7 mostra la traslazione in Y in questo caso.

| Modalità | Trajettoria        | Errore di posizione del servo |        |       |        |        |  |  |
|----------|--------------------|-------------------------------|--------|-------|--------|--------|--|--|
|          | Tratettoria        | TY(mm)                        | RY(")  | RX(") | TX(mm) | TZ(mm) |  |  |
| (a)      | OTF, 0.75 °/min    | -0.068                        | -0.001 | 0.650 | 0.0    | -0.018 |  |  |
| (b)      | OTF, 0.75 °/min    | -0.050                        | 0.0    | 0.647 | 0.0    | -0.019 |  |  |
| (c)      | OTF, 0.75 °/min    | 0.0                           | 0.0    | 0.0   | 0.0    | 0.0    |  |  |
| (a)      | Focus, 1.25 mm/sec | -0.157                        | -0.005 | 1.368 | 0.0    | N.P.   |  |  |
| (b)      | Focus, 1.25 mm/sec | -0.122                        | -0.011 | 1.656 | 0.0    | N.P.   |  |  |
| (c)      | Focus, 1.25 mm/sec | 0.0                           | 0.0    | 0.007 | 0.0    | N.P.   |  |  |
| (a)      | Tracking siderale  | -0.119                        | 0.0    | 1.088 | 0.0    | 0.275  |  |  |
| (b)      | Tracking siderale  | -0.108                        | 0.0    | 0.987 | 0.0    | 0.125  |  |  |
| (c)      | Tracking siderale  | 0.0                           | 0.0    | 0.0   | 0.0    | 0.0    |  |  |

# Tabella 7 - Errore di posizione del servo, variando la modalità e il tipo di osservazione; in azzurro sono evidenziati gli assi che richiedono la correzione in funzione dell'elevazione.



Figura 7 – Andamento della traslazione in Y nel caso di beam park dell'antenna (primo grafico), quando l'elevazione non cambia (secondo grafico): il servo raggiunge la posizione corretta e non si apprezza errore di posizione.



Figura 8 – Andamento della traslazione in Y nel caso di tracking siderale con elevazione crescente.



Figura 9 - Andamento della traslazione in Y nel caso di tracking siderale con elevazione decrescente.

Tabella 8 – Riepilogo errore di posizione degli assi TY e RX durante skydip, OTF e tracking siderale. In questo caso si mette in evidenza l'effettiva velocità di movimento dell'asse nei vari modi ed il conseguente "ritardo/anticipo" sulla linea di comando (ultima colonna) che sarebbe la causa dell'errore rilevato.

|    |                           | Vel (°/sec)   | RMS (mm)  | Error (mm)  | speed (mm/sec)   | time (sec)   | Error/speed (sec)   |
|----|---------------------------|---|---|---|--|--|---|
|    |                           | -0,002  | 0,000   | 0,000   | -0,003   | 479,320  | 0,074   |
|    |                           | -0,004  | 0,002   | -0,003  | -0,005   | 469,440  | 0,647   |
|    |                           | -0,04   | 0,008   | -0,026  | -0,050   | 249,440  | 0,511   |
|    | SKYDIP                    | -0,08   | 0,058   | -0,051  | -0,099   | 249,480  | 0,519   |
|    |                           | -0,16   | 0,059   | -0,114  | -0,206   | 119,400  | 0,550   |
|    |                           | -0,25   | 0,060   | -0,175  | -0,310   | 79,280   | 0,564   |
|    |                           | -0,31   | 0,068   | -0,238  | -0,412   | 59,360   | 0,577   |
| TY |                           | -0,4  | 0,070   | -0,300  | -0,517   | 47,400   | 0,581   |
|    |                           | 0,08  | 0,021   | -0,148  | 0,103  | 119,760  | -1,436  |
|    |                           | 0,25  | 0,051   | -0,098  | 0,312  | 79,440   | -0,313  |
|    |                           | 0,4   | 0,062   | -0,058  | 0,498  | 49,440   | -0,116  |
|    | Siderale                  |   | 0,000   | -0,119  | -0,002   | 31,400   | 62,574  |
|    |                           | 0,017   | 0,002   | -0,153  | 0,023  | 39,120   | -6,769  |
|    | OTF                       | 0,023   | 0,003   | -0,150  | 0,029  | 29,440   | -5,096  |
|    |                           | 0,046   | 0,005   | -0,134  | 0,058  | 14,440   | -2,309  |
|    |                           |   |   |   |  |  |   |
|    |                           | Vel (°/sec)   | RMS (")   | Error (")   | speed ("/sec)  | time (sec)   | Error/speed (sec)   |
|    |                           | Vel (°/sec)<br>-0,002   | RMS (")<br>0,004  | Error (")<br>0,002  | speed ("/sec)<br>0,024   | time (sec)<br>479,320  | Error/speed (sec)<br>0,072  |
|    |                           | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004   | RMS (")<br>0,004<br>0,015   | Error (")<br>0,002<br>0,027   | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040  | time (sec)<br>479,320<br>469,440   | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656   |
|    |                           | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04  | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242  | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219  | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441   | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440  | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497  |
|    |                           | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08   | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082   | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422   | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855  | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480   | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494   |
|    |                           | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16  | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091  | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907  | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782   | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400  | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509  |
|    | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25   | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092   | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381   | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673  | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280  | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517   |
|    | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31  | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150   | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866  | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557   | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360  | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,497<br>0,509<br>0,517<br>0,525  |
| RX | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,4  | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>1,180   | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351   | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464  | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400  | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,527   |
| RX | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,08<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,4<br>0,08                                  | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>1,150<br>1,180<br>0,299  | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351<br>1,296  | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464<br>-0,879  | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400<br>119,760   | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,525<br>-1,473   |
| RX | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,4<br>0,08<br>0,25                          | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>1,180<br>0,299<br>1,009                                     | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351<br>1,296<br>0,959                                     | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464<br>-0,879<br>-2,718  | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400<br>119,760<br>79,440   | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,525<br>-1,473<br>-0,353   |
| RX | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,31<br>-0,31<br>0,08<br>0,25<br>0,4         | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>0,299<br>1,009<br>1,009                                     | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351<br>1,296<br>0,959<br>0,739                            | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464<br>-0,879<br>-2,718<br>-4,338                              | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400<br>119,760<br>79,440   | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,527<br>-1,473<br>-0,353<br>-0,170                               |
| RX | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,4<br>0,08<br>0,25<br>0,4                   | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>0,299<br>1,009<br>1,009<br>1,085<br>0,002                   | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351<br>1,296<br>0,959<br>0,739<br>1,088                   | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464<br>-0,879<br>-2,718<br>-4,338<br>0,017                     | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400<br>119,760<br>79,440<br>49,440<br>31,400                     | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,527<br>-1,473<br>-0,353<br>-0,170<br>62,739                     |
| RX | SKYDIP                    | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,4<br>0,08<br>0,25<br>0,4<br>0,017          | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>1,180<br>0,299<br>1,009<br>1,085<br>0,002<br>0,021          | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351<br>1,296<br>0,959<br>0,739<br>1,088<br>1,285          | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464<br>-0,879<br>-2,718<br>-4,338<br>0,017<br>-0,190           | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400<br>119,760<br>79,440<br>49,440<br>31,400<br>39,120           | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,527<br>-1,473<br>-0,353<br>-0,170<br>62,739<br>-6,763           |
| RX | SKYDIP<br>Siderale<br>OTF | Vel (°/sec)<br>-0,002<br>-0,004<br>-0,04<br>-0,08<br>-0,16<br>-0,25<br>-0,31<br>-0,4<br>0,08<br>0,25<br>0,4<br>0,017<br>0,023 | RMS (")<br>0,004<br>0,015<br>0,242<br>1,082<br>1,091<br>1,092<br>1,150<br>1,180<br>0,299<br>1,009<br>1,085<br>0,002<br>0,021<br>0,027 | Error (")<br>0,002<br>0,027<br>0,219<br>0,422<br>0,907<br>1,381<br>1,866<br>2,351<br>1,296<br>0,559<br>0,739<br>1,088<br>1,285<br>1,258 | speed ("/sec)<br>0,024<br>0,040<br>0,441<br>0,855<br>1,782<br>2,673<br>3,557<br>4,464<br>-0,879<br>-2,718<br>-4,338<br>0,017<br>-0,190<br>-0,247 | time (sec)<br>479,320<br>469,440<br>249,440<br>249,480<br>119,400<br>79,280<br>59,360<br>47,400<br>119,760<br>79,440<br>49,440<br>31,400<br>39,120<br>29,440 | Error/speed (sec)<br>0,072<br>0,656<br>0,497<br>0,494<br>0,509<br>0,517<br>0,525<br>0,527<br>-1,473<br>-0,353<br>-0,170<br>62,739<br>-6,763<br>-5,091 |

#### 5.3 Precisione dell'inseguimento

Per come è progettato, il servo sistema non esegue movimenti "integrati" degli assi, ma consente di spostarli a posizioni fisse, in maniera indipendente. Al tempo stabilito dal sistema di controllo, i singoli assi meccanici si posizionano sfruttando la massima accelerazione e velocità. Questo implica che, secondo la distanza da percorrere, i tempi di arrivo possano essere differenti e quindi che il movimento complessivo di M2, secondo le equazioni del moto, possa leggermente differire da quello aspettato. Quest'aspetto può essere certamente controllato agendo su alcuni parametri del servo, della MSCU e del software di controllo come la frequenza con cui vengono comandati i punti, l'accelerazione e la velocità massima dei motori. Sistemati questi parametri, occorre valutare la precisione d'inseguimento del servo. In questo contesto la velocità complessiva con cui M2 si sposta è una delle variabili che influiscono maggiormente.

A questo scopo si è controllato il comportamento del sistema in alcune fasi di operatività dell'antenna: focusing, tracking siderale e On-The-fly scan, variando, dove possibile, le velocità coinvolte. Nel caso degli OTF la variazione di velocità di scansione si riflette sulla velocità di inseguimento cui è costretto il servo sistema del subriflettore. In Tabella 9, si trovano i valori riscontrati durante questo test. L'RMS riportato nella seconda sezione della tabella è calcolato come scarto quadratico medio rispetto alla traiettoria "ideale" del servo. Attraverso il BDF di Figura 2, la terza sezione, mostra come l'RMS si traduce in errore di puntamento in cielo del telescopio.

Durante le scansioni di fuoco non si evidenziano particolari problemi, tutti i valori rimangono al disotto della soglia fino alla velocità massima testata (2.5 mm/sec), non si evidenzia nemmeno un incremento dell'RMS in funzione della velocità.

Per quanto riguarda le scansioni OTF, si apprezza un incremento dell'RMS di tutti gli assi, in dipendenza dalla velocità di scansione; in più, a partire dalla velocità (in elevazione) di 0.04 °/sec, emerge un salto nel valore dell'RMS. Tale salto è molto più evidente in rotazione lungo l'asse X dove raggiunge circa 1 secondo d'arco. Anche se al momento questo comportamento può essere tollerato, essendo in termini assoluti abbondantemente sotto il decimo del beam più stretto disponibile, ci si riserva di investigare ulteriormente il problema.

Tabella 9 – Test di precisione di inseguimento del servo al variare della velocità. Per ogni traiettoria si riporta l'RMS (rispetto alla traiettoria ideale) misurato sull'asse e quindi il corrispondente errore di puntamento generato. Sono evidenziati in azzurro i valori relativi agli assi che richiedono lo spostamento in funzione dell'elevazione.

|             | Precisione del tracking (RMS) |        |        |        |        | Errore di puntamento(RMS) |         |         |               |         |
|-------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|---------|---------|---------------|---------|
| Traiettori  | TY                            | RY     | RX     | ΤХ     | Т      | RZ                        | El per  | Az per  | Az per        | El per  |
| а           | (mm)                          | (")    | (")    | (mm)   | Z(mm)  | (")                       | TY(")   | RY(")   | RX(")         | TX(")   |
| BDF         |                               |        |        |        |        |                           | 9.60984 | 0.87504 | -<br>0.846108 | 9.054   |
| Focus,      | 0.0013                        | 0.2062 | 0.1270 | 0.0019 | 0.0085 | 0.0093                    | 0.01278 | 0.18049 | -             | 0.01792 |
| 1mm/sec     | 3                             | 7      | 1      | 8      | 2      | 5                         | 1       | 5       | 0.107464      | 7       |
| Focus, 1.25 | 0.0029                        | 0.0659 | 0.3102 | 0.0011 | 0.0328 | 0.0085                    | 0.02873 | 0.05771 | -             | 0.01005 |
| mm/sec      | 9                             | 6      | 9      | 1      | 7      | 9                         | 3       | 8       | 0.262539      | 0       |
| Focus, 1,66 | 0.0030                        | 0.1378 | 0.3247 | 0.0015 | 0.0155 | 0.0093                    | 0.02902 | 0.12063 | -             | 0.01376 |
| mm/sec      | 2                             | 6      | 1      | 2      | 2      | 9                         | 2       | 3       | 0.274740      | 2       |
| Focus, 2,5  | 0.0037                        | 0.1069 | 0.3625 | 0.0017 | 0.0352 | 0.0118                    | 0.03594 | 0.09355 | -             | 0.01620 |
| mm/sec      | 4                             | 2      | 7      | 9      | 2      | 5                         | 1       | 9       | 0.306773      | 7       |
| Tracking    | 0.0002                        | 0.0010 | 0.0023 | 0.0001 | 0.0005 | 0.0050                    | 0.00211 | 0.00088 | -             | 0.00090 |
| siderale    | 2                             | 1      | 2      | 0      | 0      | 0                         | 4       | 4       | 0.001963      | 5       |
| OTF, 0.002  | 0.0002                        | 0.0030 | 0.0037 | 0.0001 | 0.0012 | 0.0062                    | 0.00201 | 0.00265 | -             |         |
| °/sec       | 1                             | 3      | 3      | 2      |        |                           | 7       | 1       | 0.003155      | 0.00108 |
| OTF, 0.04   | 0.0075                        | 0.0098 | 0.2481 | 0.0001 | 0.0905 | 0.0092                    | 0.07245 | 0.00857 | -             | 0.00090 |
| °/sec       | 4                             | 0      | 4      | 0      | 0      | 4                         | 8       | 5       | 0.209953      | 5       |
| OTF, 0.08   | 0.0580                        | 0.0092 | 1.0820 | 0.0001 | 0.2815 | 0.1123                    | 0.55747 | 0.00808 | -             | 0.00099 |
| °/sec       | 7                             | 4      | 6      | 1      | 9      |                           | 2       | 5       | 0.923315      | 5       |
| OTF, 0.16   | 0.0594                        | 0.0095 | 1.0912 | 0.0001 | 0.2812 | 0.0364                    | 0.57101 | 0.00835 | -             | 0.00153 |
| °/sec       | 2                             | 5      | 5      | 7      | 2      | 6                         | 7       | 7       | 0.923315      | 9       |
| OTF, 0.25   | 0.0601                        | 0.0011 | 1.0918 | 0.0002 | 0.2804 | 0.0644                    | 0.57832 | 0.00099 | -             | 0.00217 |
| °/sec       | 8                             | 3      | 8      | 4      | 0      | 1                         | 0       | 1       | 0.923848      | 3       |
| OTF, 0.33   | 0.0678                        | 0.0119 | 1.1496 | 0.0003 | 0.2810 | 0.0863                    | 0.65193 | 0.01041 | -             | 0.00307 |
| °/sec       | 4                             | 0      | 3      | 4      | 6      | 3                         | 2       | 3       | 0.972711      | 8       |
| OTF, 0.40   | 0.0699                        | 0.0116 | 1.1796 | 0.0004 | 0.2818 | 0.1290                    | 0.67230 | 0.01020 | -             | 0.00371 |
| °/sec       | 6                             | 6      | 1      | 1      | 2      | 0                         | 4       | 3       | 0.998077      | 2       |