

Caratterizzazione del campo di vista dello spettroradiometro a trasformata di Fourier REFIR-PAD

Gianluca Di Natale ⁽¹⁾, Luca Palchetti ⁽¹⁾,
Giovanni Bianchini ⁽¹⁾, Francesco Castagnoli ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Istituto Fisica Applicata "Nello Carrara" del CNR (IFAC-CNR)

Sommario

In questo report è descritto il procedimento utilizzato per caratterizzare il campo di vista dello spettrometro a trasformata di Fourier REFIR-PAD (Radiation Explorer in Far Infrared - Prototype for Applications and Development), ed il confronto delle misure con un modello di ray-tracing implementato in linguaggio C, che simula il percorso della radiazione all'interno dello strumento e nei coni di Winston utilizzati nel piano focale per la raccolta del segnale. Il procedimento ha permesso di dare una stima dell'efficienza di accoppiamento rivelatore-cono, del guadagno di segnale prodotto dal cono e di ottimizzare la distanza cono-paraboloide del disegno ottico.

1 Introduzione

REFIR-PAD è uno spettrometro a trasformata di Fourier [1] progettato per eseguire misure spettralmente risolte della radiazione termica emessa dall'atmosfera e caratterizzare il bilancio radiativo terrestre nel medio e lontano infrarosso nell'intervallo spettrale $100\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ($6.2\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$), con una risoluzione massima di 0.25 cm^{-1} .

In questo report è descritto il procedimento utilizzato per caratterizzare il campo di vista (field of view, FOV), procedimento necessario per l'analisi del segnale in presenza di scene disomogenee, ad esempio quando si osserva il cielo con nubi. Sono state realizzate sia una misura che un modello di ray-tracing con il quale sono stati confrontati i dati sperimentali.

Le dimensioni e la geometria del campo di vista dello strumento dipendono dalla configurazione ottica dell'interferometro e dall'accoppiamento delle ottiche di raccolta del segnale (coni di Winston) con i rivelatori, infatti, essendo quest'ultimi igroscopici, sono muniti di una finestra di CsI che ne evita il deterioramento ma ne impedisce anche il perfetto contatto con l'uscita del cono di Winston causando una parziale perdita del segnale.

Un'evidenza di questo effetto può essere osservata facendo un tracciamento inverso del campo di vista. Ciò può essere ottenuto sostituendo i rivelatori con una sorgente LED posta all'uscita del cono. In pratica viene fatto ripercorrere alla luce il cammino inverso all'interno dello strumento, partendo dal rivelatore fino all'ingresso. Così facendo il campo di vista viene proiettato all'esterno su di un pannello posto appositamente ad una certa distanza dall'ingresso dello strumento. In figura (1) sono riportate le foto per diverse posizioni del LED, la prima alla minima distanza dal cono (l'involucro esterno del LED è stato in parte rimosso per avvicinare il più possibile la regione di emissione all'uscita del cono), la seconda a 0.7 mm e l'ultima a 2.7 mm corrispondente alla distanza a cui si trova il rivelatore dal cono a causa della presenza della finestra di CsI.

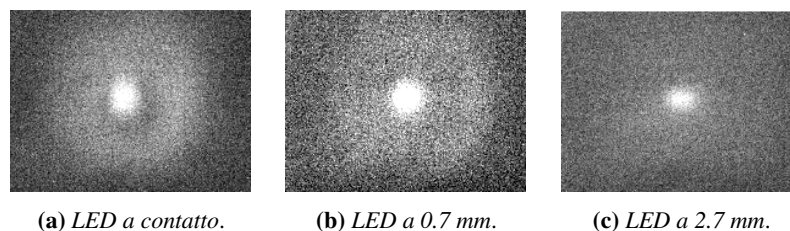


Figura 1: Foto delle misure fatte col LED: proiezione del FOV per diverse distanze LED-cono di Winston.

La prova rappresenta solamente uno studio qualitativo e le misure fatte alla distanza cono-rivelatore non sono quantitativamente confrontabili con quelle della sorgente ottenute grazie all'impiego dei rivelatori piroelettrici. Il motivo è che il LED è composto da una sorgente avente dimensioni relativamente piccole rispetto al materiale diffusore con cui è stato coperto, il quale diffonde la luce in maniera non definita e non perfettamente isotropa, quindi presenta un comportamento diverso da quello della sorgente. Tuttavia la prova mostra, anche se solo qualitativamente, che l'intensità del segnale esterno meno intenso del campo di vista diminuisce quando viene allontanata la sorgente dall'uscita del cono. Ciò permette di fare una stima preliminare, se pur approssimativa, delle dimensioni del FOV, che risultano uguali a quelle della superficie illuminata, avente diametro pari a circa 130 mm (misurato alla distanza di osservazione di 1250 mm), corrispondente ad un FOV pari a circa 105 mrad. La prova svolta mette quindi in evidenza la forte dipendenza del campo di vista dall'accoppiamento cono-rivelatore e proprio questo effetto sarà caratterizzato quantitativamente nei paragrafi successivi.

2 Disegno ottico di REFIR-PAD

In figura (2) è mostrato lo schema ottico concettuale dello strumento, dove PO e PI indicano rispettivamente i paraboloidi d'uscita e d'ingresso, BS (Beam-Splitter) è l'unità beam-splitter, CBB, HBB e RBB (Cold, Hot e Reference Black Body) sono i corpi neri, rispettivamente freddo, caldo e di riferimento utilizzati per la calibrazione radiometrica. Alle uscite, indicate con canale 1 e 2, sono posizionati i coni di Winston con i rivelatori.

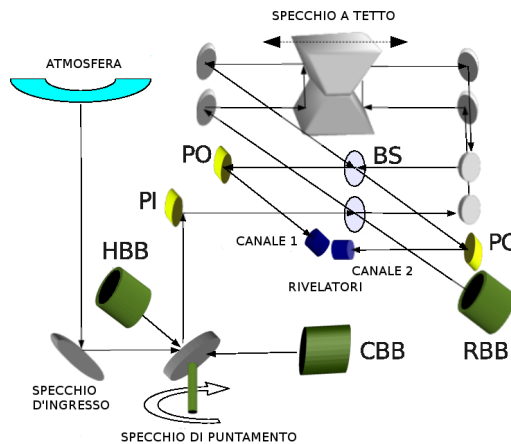
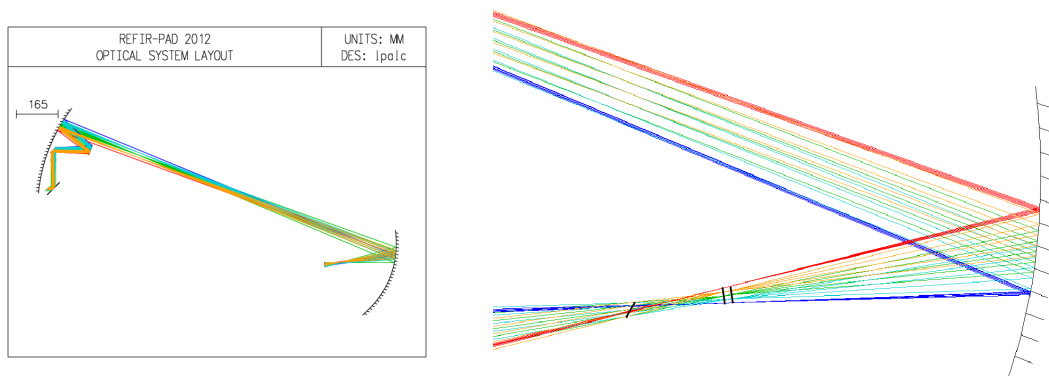


Figura 2: Schema ottico di REFIR-PAD: si possono distinguere gli specchi d'ingresso e di puntamento (in grigio) e i corpi neri per la calibrazione radiometrica (in verde), si distinguono poi (in giallo) i paraboloidi per la collimazione del fascio e l'interferometro composto dagli specchi piani, dallo specchio a tetto e dai beam-splitters; alle due uscite sono riportati (in blu) i rivelatori piroelettrici.

Il progetto ottico è stato messo a punto tramite il programma di ray-tracing OSLO¹ col quale è stato simulato il fascio che arriva all'ingresso dei coni.



(a) ray-tracing del percorso della luce dagli specchi d'ingresso al rivelatore passando per i paraboloidi intermedi.

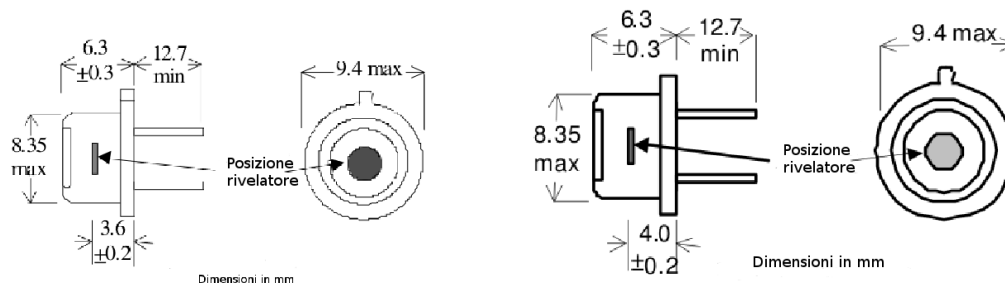
(b) dettaglio del piano focale del sistema.

Figura 3: Nelle due figure sopra sono mostrati i ray-tracing fatti con il programma OSLO: a sinistra è riportato il percorso completo della radiazione dallo specchio di puntamento al rivelatore trascurando i componenti intermedi dell'interferometro che hanno solo funzione di ripiegamento, a destra è mostrato il dettaglio del piano focale in cui le tre barre nere indicano in ordine a partire da destra la posizione del cono ottico, il piano focale e la pupilla del sistema.

La simulazione è stata fatta quindi trascurando la propagazione all'interno dei coni, utilizzando lo sviluppo semplificato riportato nelle figure (23) e (24) in appendice, senza ripiegamenti interni, del percorso ottico comune ai due bracci dell'interferometro, dall'ingresso fino all'uscita sui coni di Winston. I componenti ottici che compaiono nello sviluppo sono dunque lo specchio e il diaframma d'ingresso, i due paraboloidi e la pupilla. Sempre in appendice le figure (25) e (26) mostrano il disegno opto-meccanico completo dello strumento con tutti i sottosistemi. In appendice le dimensioni dello strumento sono riportate nella figura (27), mentre tutte le specifiche ottiche inerenti ad esso, che verranno utilizzate per sviluppare il modello di simulazione, sono riportate in tabella (1).

¹Optics Software for Layout and Optimization (OSLO), software per disegno ottico prodotto dalla Sinclair Optics

I risultati del ray-tracing fatto con OSLO sono mostrati nelle figure (3a) e (3b). In queste figure sono visibili in verde il percorso dei raggi centrali e in blu e rosso quello dei raggi laterali. Le tre barre nere in figura (3b) indicano in ordine a partire da destra la posizione del cono ottico, il piano focale e la pupilla del sistema. In figura (4) sono mostrate le specifiche meccaniche dei rivelatori piroelettrici, le quali serviranno successivamente per sviluppare il modello di simulazione del campo di vista tramite un ray-tracing all'interno dei coni di Winston, in particolare le dimensioni dei rivelatori e le loro distanze dalla finestra di CsI verranno utilizzate come parametri del software.



(a) rivelatore 2 mm di diametro serie P5315 (canale 1). (b) rivelatore 1.5 mm di diametro serie P5541 (canale 2).

Figura 4: Rivelatori piroelettrici SELEX-Galileo in materiale DLATGS igroscopici muniti di finestra di CsI, intervallo spettrale finestra CsI 0.25-50 μm .

Il campo di vista calcolato con OSLO risulta essere di 115 mrad, che è molto vicino a quello misurato nella prova col LED. Queste considerazioni suggeriscono all'incirca quali dimensioni dovranno essere riprodotte dal modello che sarà necessario sviluppare per simulare il campo di vista dello strumento.

3 Metodologia

L'obiettivo dell'esperimento è di mappare il campo di vista dello strumento analizzando il segnale dai rivelatori in funzione della posizione di una sorgente puntiforme posta all'interno di esso e confrontare i risultati con le previsioni di un modello di simulazione di ray-tracing sviluppato appositamente per simulare il comportamento ottico all'interno dei coni di Winston.

Per eseguire la mappatura completa è stato utilizzato un metodo interferometrico, misurando lo spettro al variare della posizione della sorgente nel campo di vista e integrandolo su un'opportuna banda spettrale; è stata eseguita anche una misura non interferometrica modulando la sorgente con un chopper, in quanto i rivelatori piroelettrici sono in grado di rivelare solo un segnale variabile, e misurando l'ampiezza picco-picco del segnale sull'uscita dei rivelatori.

Per quanto riguarda la misura interferometrica, l'espressione dell'intensità $I_\nu(x, y)$ generata dall'interferenza del campo E_0 in ingresso nell'interferometro risulta essere la somma di un termine costante e uno modulato:

$$I_\nu(x, y) = 2\epsilon(x, y)|E_0|^2[1 + \cos(2\pi\nu\Delta l)] \quad (1)$$

dove $\epsilon(x, y)$ è la risposta strumentale che tiene conto della trasmittanza e della riflettanza dei beam-splitters e della dipendenza dalla posizione della sorgente nel campo di vista, ν è la frequenza ottica e Δl è la differenza di cammino ottico prodotta dal movimento dello specchio a tetto dell'interferometro nell'ipotesi che il termine costante e quello modulato abbiano la stessa dipendenza dal campo $\epsilon(x, y)$. Le considerazioni fatte ovviamente sono valide solo assicurandoci di poter assumere costanti i parametri interferometrici (che tengono conto di assorbimento, riflessione e allineamento ottico) contenuti nelle funzioni di trasferimento dell'interferometro.

Al fine di verificare che non vi fossero effetti interferometrici dovuti alla non perfetta planarità delle ottiche o al non perfetto allineamento in grado di modificare in maniera non trascurabile la misura del campo di vista, è stata fatta anche la misura col chopper, in modo da poter confrontare le misure interferometriche con quelle non interferometriche. L'utilizzo del chopper permette infatti di misurare il termine costante di equazione (1) considerando il segnale derivante da tutta la banda spettrale in cui si estende l'emissione della sorgente; al contrario la misura interferometrica permette di misurare il termine di modulazione (termine in coseno di equazione (1)) con la possibilità di selezionare il segnale proveniente da una banda spettrale ben definita. Per effettuare la caratterizzazione è stata utilizzata una sorgente calda posta a 1250 mm dallo specchio d'ingresso dello strumento e schermata in modo da permettere alla radiazione di passare solo attraverso un foro di 3.5 mm di diametro, figura (5), rendendola il più puntiforme possibile. La distanza è stata scelta in maniera tale che il diametro della sorgente risultasse trascurabile

rispetto al campo di vista di circa 130 mm di diametro alla distanza di misura e che il segnale fosse sufficientemente intenso.

Per ridurre al minimo tutte le eventuali riflessioni esterne e l'emissione di fondo dovuta al riscaldamento dello schermo della sorgente è stato introdotto un pannello di alluminio con al centro un foro di 10 mm di diametro che è stato posto a 185 mm dallo schermo in modo da indirizzare tutta la radiazione esattamente all'interno dell'apertura d'ingresso dello strumento.

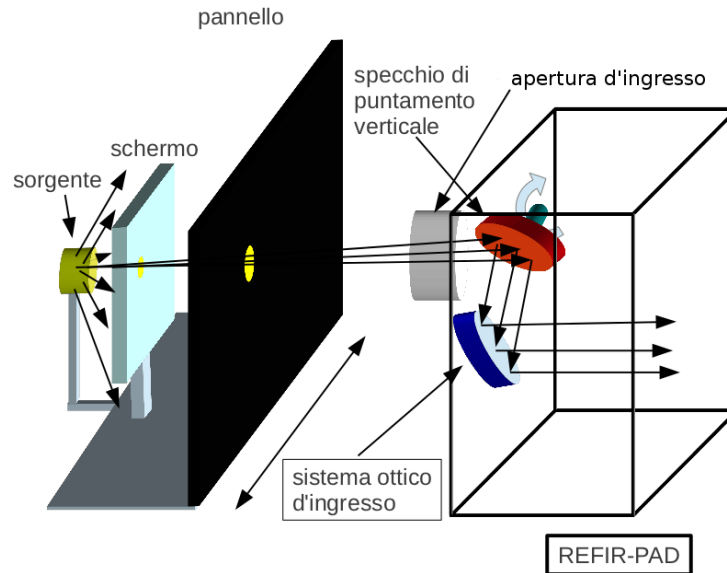


Figura 5: Schema dell'esperimento di misura del FOV: partendo da sinistra troviamo la sorgente (in giallo) seguita da uno schermo introdotto per renderla il più puntiforme possibile e da un pannello per attenuare l'emissione dovuta al riscaldamento dello schermo stesso e ridurre tutte le riflessioni esterne; sul lato destro invece è posto lo spettrometro REFIR-PAD.

Nel caso delle misure interferometriche la posizione della sorgente nel campo di vista è stata fatta variare verticalmente facendo ruotare lo specchio di puntamento dello strumento, figura (5), e orizzontalmente traslando la sorgente, mentre nel caso delle misure col chopper la posizione della sorgente è stata fatta variare solo verticalmente mantenendo fissa al centro la posizione della sorgente lungo l'asse orizzontale; questo perchè, ai fini del confronto, è sufficiente la misura di una sezione del FOV. In figura (6) è mostrato lo spettro non calibrato della sorgente posta al centro del campo di vista con una risoluzione spettrale pari a 0.5 cm^{-1} , corrispondente ad una differenza massima di cammino ottico di 1 cm. Dallo spettro si nota che alla modulazione dovuta al materiale dielettrico che compone i beam-splitters si sovrappongono le bande di assorbimento dei gas atmosferici. In particolare sono visibili le righe di assorbimento della banda rotazionale pura dell'acqua sotto i 600 cm^{-1} e il picco centrale a 667 cm^{-1} della prima banda vibrazionale della CO_2 . A 1100 e 1250 cm^{-1} sono presenti le righe di assorbimento del substrato in Mylar dei beam-splitters, a 1600 cm^{-1} e a 3800 cm^{-1} sono visibili le due bande vibrazionali dell'acqua mentre a 1400 cm^{-1} è presente la seconda banda vibrazionale della CO_2 .

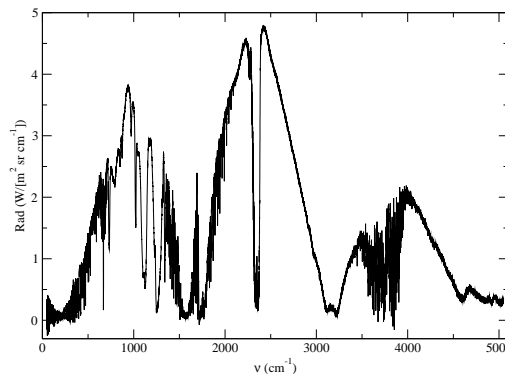


Figura 6: Spettro non calibrato della sorgente posta al centro del campo di vista.

Poichè il segnale atmosferico proviene da una superficie estesa è necessario imporre la condizione di Jacquinot che lega il potere risolutivo e le dimensioni dell'angolo solido interno (Ω^{int}) dell'interferometro, pari a 0.00238

sr, e che, alla risoluzione da noi utilizzata per le misure, determina un limite superiore delle frequenze ottiche da considerare a circa 2600 cm^{-1} , infatti:

$$\frac{P_\nu \Omega^{int}}{4\pi \Delta\nu} = \frac{\nu \Omega^{int}}{4\pi \Delta\nu} < 1 \Rightarrow \nu < \frac{4\pi \Delta\nu}{\Omega^{int}} = 2638 \text{ cm}^{-1} \quad (2)$$

dove P_ν è il potere risolutivo dato da $\frac{\nu}{\Delta\nu}$ con $\Delta\nu$ risoluzione spettrale (0.5 cm^{-1} nel nostro caso). In pratica questa condizione seleziona la parte positiva del massimo centrale della figura di Airy prodotta dall'interferenza della radiazione emessa da una sorgente estesa e permette di evitare gli effetti di campo dovuti al contributo radiativo proveniente da direzioni lontane dall'asse ottico.

Per verificare l'indipendenza del campo di vista dalla frequenza, almeno all'interno della banda determinata dalla condizione di Jacquinot, è stata effettuata l'integrazione degli spettri in due bande distinte dello spettro, tra 1800 e 2500 cm^{-1} e tra 700 e 1000 cm^{-1} . La banda $700\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$ è stata scelta perchè all'interno di essa l'andamento della deviazione standard risulta essere minimo ed è massimo il rapporto segnale-rumore, come si deduce da figura (7).

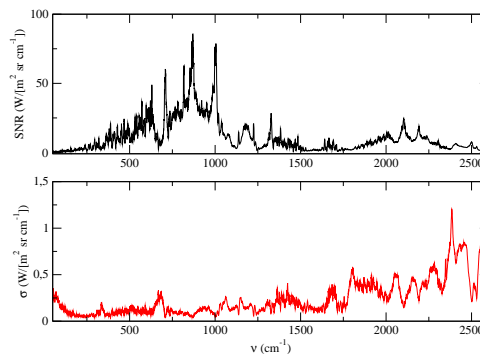


Figura 7: In alto: andamento del rapporto segnale-rumore di un insieme di misure della sorgente al centro del campo di vista, in basso: andamento della deviazione standard.

Dalla figura (8) si può verificare che tra la misura a banda piena e quella a banda stretta la distribuzione del segnale non varia, ciò assicura che è possibile studiare l'andamento del segnale in funzione solamente della posizione della sorgente all'interno del FOV, indipendentemente dal metodo usato e dalla componente spettrale considerata, come ipotizzato introducendo l'equazione (1).

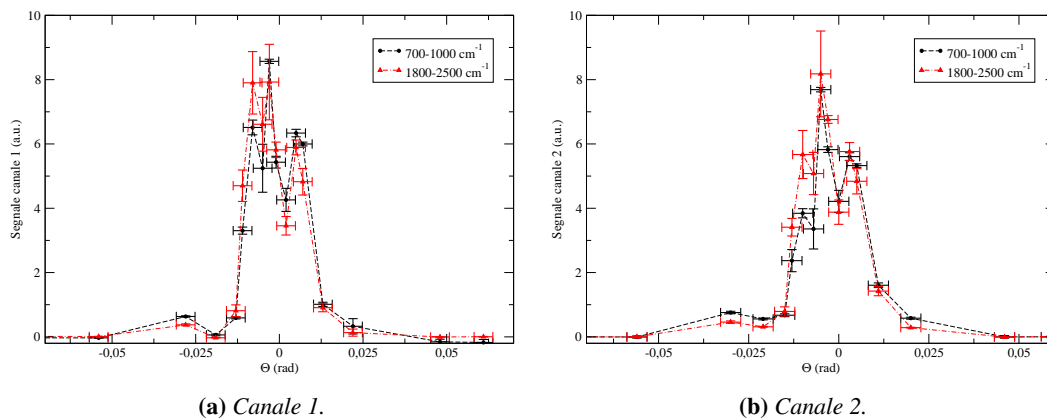


Figura 8: Confronto del segnale integrato nella banda $700\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$ in nero e nella banda $1850\text{-}2500 \text{ cm}^{-1}$ in rosso per il canale 1 (a sinistra) e il canale 2 (a destra). In entrambi i casi il segnale è stato normalizzato all'area della curva.

Lo studio dell'andamento del campo di vista viene fatto quindi misurando la distribuzione del segnale $S(x, y)$ in funzione della posizione (x, y) della sorgente, in cui, nella misura col chopper $S(x, y)$ è dato dal valore picco-picco del segnale, mentre nel caso interferometrico abbiamo che $S(x, y) = \int_{700}^{1000} S(\nu, x, y) d\nu$, dove $S(x, y)$ è lo spettro misurato con la sorgente nella posizione (x, y) .

Lo spettro non calibrato è soggetto anche a variazioni dovute al possibile cambiamento della temperatura dell'ambiente circostante e all'instabilità della sorgente. Per tale motivo sono state eseguite delle prove di stabilità prima di effettuare la mappatura del campo di vista, studiando le variazioni del segnale integrato con la sorgente fissa al

centro del FOV in funzione del tempo, figura (9). Dal grafico si deduce che la deviazione standard, pari a circa al 2.7%, è trascurabile rispetto all'errore sulle misure, dell'ordine del 20%, e per questo motivo la sorgente può essere assunta stabile.

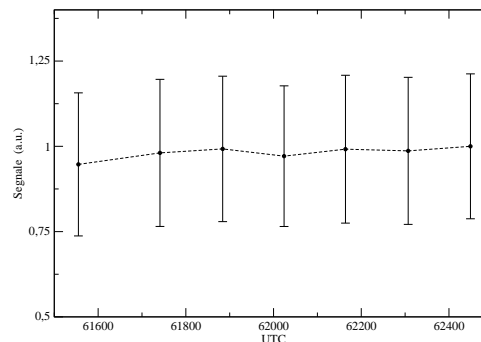


Figura 9: Variabilità del segnale integrato della sorgente: il grafico mostra che la sorgente può essere assunta stabile nel tempo di misura ($\sigma_{sorgente}/\sigma_{misura} \simeq 13\%$).

Per effettuare le misure non interferometriche si è proceduto ponendo un chopper tra la sorgente e lo strumento in modo da modulare la parte costante del segnale che compare in equazione (1). In questo caso, come già accennato, è stato scelto di considerare il valore picco-picco del segnale e, come nel caso interferometrico, sono stati considerati i valori normalizzati all'area della curva del segnale in funzione della posizione della sorgente nel campo di vista. In figura (10) è mostrato il segnale rilevato introducendo il chopper con la sorgente posta al centro del campo di vista.

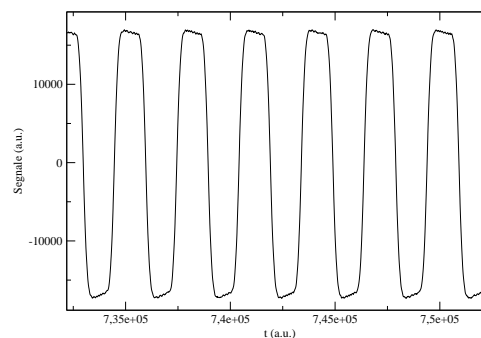


Figura 10: Segnale della sorgente posta al centro del campo di vista rilevato introducendo il chopper.

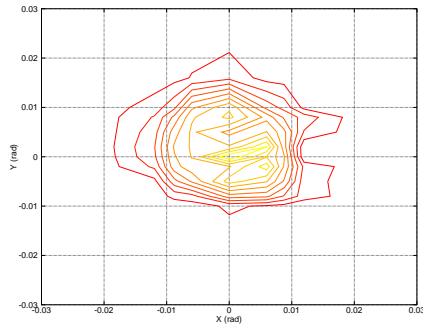
4 Mappatura del campo di vista

La mappatura in tre dimensioni del FOV è stata effettuata col metodo interferometrico. Il risultato finale è stato ottenuto sottraendo il contributo medio in radianza introdotto dall'emissione di fondo del pannello posto davanti alla sorgente, che è stato verificato essere omogeneo grazie all'impiego di una camera termica.

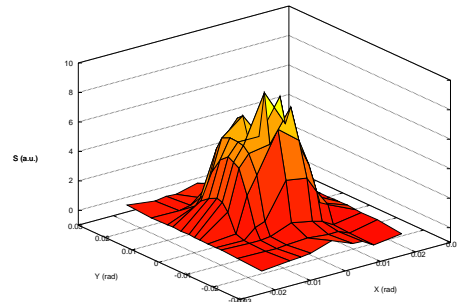
In questo modo è stata ottenuta la mappatura dell'efficienza interferometrica in funzione della posizione della sorgente nel campo di vista. Le figure (11a÷11d) mostrano i plot 2D e 3D sia per il canale 1 che per il canale 2 con x, y coordinate angolari in radianti e z segnale in unità arbitrarie normalizzato all'area della curva del FOV in due dimensioni ottenuta mantenendo la coordinata x fissa al centro (figura 8a in rosso).

Tra i due canali esistono delle differenze anche se minime dovute al fatto che i rivelatori usati presentano dimensioni diverse, infatti, come si vede nelle figure (4a) e (4b), il rivelatore posto all'uscita del canale 1 presenta un diametro pari a 2 mm mentre quello all'uscita del canale 2 ha un diametro pari a 1.5 mm.

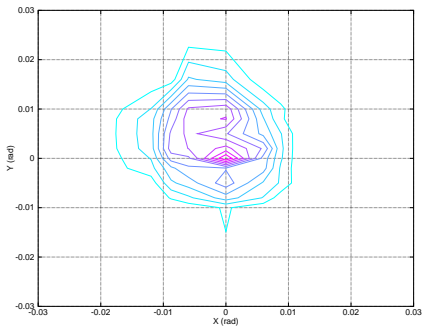
Dai grafici si nota che l'andamento dell'efficienza non è perfettamente simmetrico ma presenta un picco centrale e un contributo più esterno dovuto principalmente, come si vedrà in seguito, alle riflessioni all'interno del cono di Winston. Se si considera il campo di vista totale includendo anche il contributo meno intenso le dimensioni totali, definite dai punti corrispondenti ad un segnale maggiore dello 0.7%, risultano pari a circa 105 mrad, che è circa la dimensione ottenuta nella prova con il LED. Dal confronto delle misure ottenute col metodo interferometrico e quelle ottenute utilizzando il chopper possiamo affermare che non vi sono differenze sostanziali tra i due casi e che quindi non vi sono effetti interferometrici che modificano il campo di vista dello strumento; per questo motivo



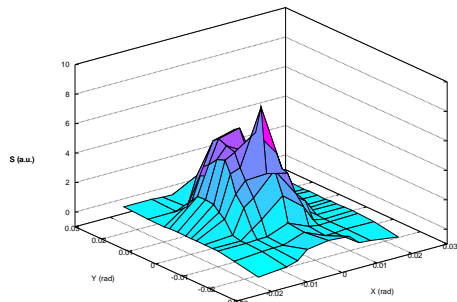
(a) Campo di vista 2D REFIR-PAD canale 1.



(b) Campo di vista 3D REFIR-PAD canale 1.



(c) Campo di vista 2D REFIR-PAD canale 2.



(d) Campo di vista 3D REFIR-PAD canale 2.

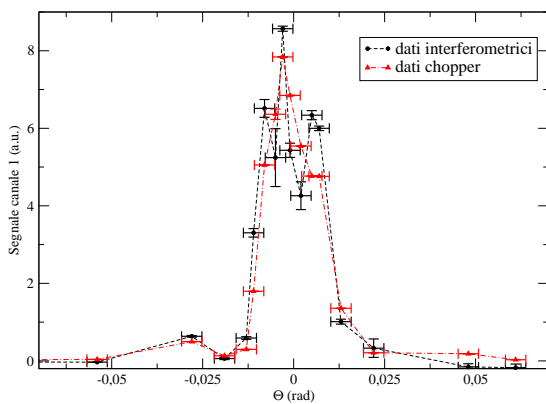
Figura 11: Immagini 2-3D del campo di vista misurato di REFIR-PAD per entrambi i canali.

tale confronto rappresenta un'ulteriore dimostrazione dell'indipendenza del FOV dalla frequenza.

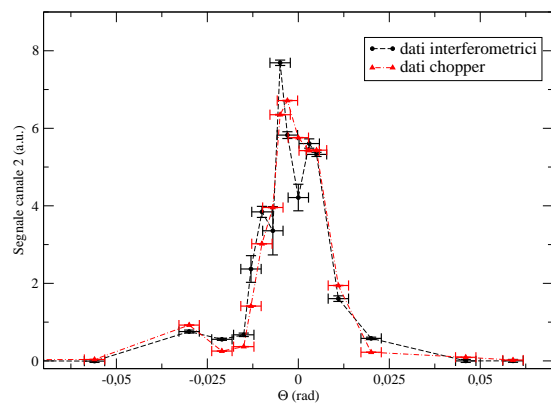
Nelle figure (12a) e (12b) è mostrato il confronto tra le due misure, l'errore lungo Θ deriva dal fatto che la sorgente non è perfettamente puntiforme ma presenta un'estensione, mentre l'errore totale sul segnale è dato da:

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{sign}^2 + \sigma_{bias}^2 \quad (3)$$

dove σ_{tot} è la deviazione standard sul segnale derivante dalla media delle scansioni in andata e in ritorno, mentre σ_{bias} è la deviazione standard sul contributo introdotto dall'emissione di fondo, ottenuta da un'interpolazione lineare delle medie dei valori appena al di fuori delle dimensioni del campo di vista.



(a) Canale 1



(b) Canale 2

Figura 12: Confronto tra i dati interferometrici e quelli ottenuti col chopper per entrambi i canali: i risultati mostrano che non vi sono differenze sostanziali tra le due misure, quindi non vi sono effetti interferometrici rilevanti che modificano il FOV.

5 Sviluppo di un modello di ray-tracing per la simulazione del segnale all'interno dei coni di Winston

Per descrivere l'andamento dei dati sperimentali e poter dare una stima dell'efficienza di accoppiamento cono-rivelatore, è stato sviluppato un modello di ray-tracing che simula il percorso dei raggi dalla sorgente al rivelatore considerando anche i coni di Winston.

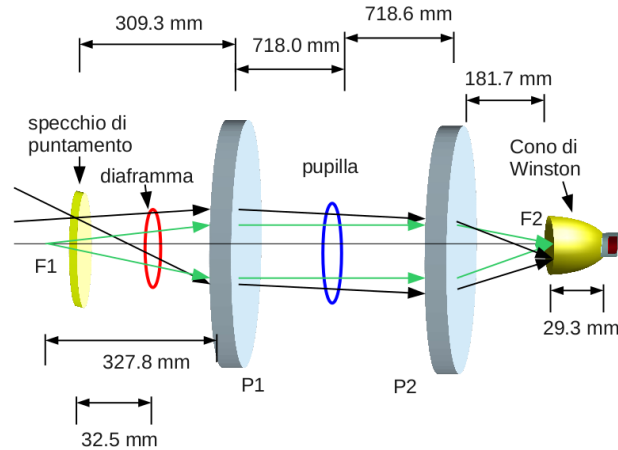


Figura 13: Disegno ottico REFIR-PAD, le specifiche complete sono riportate in tabella (1) in appendice.

Per sviluppare il modello è stato implementato un programma in C che simula il percorso di tutto il fascio di raggi, all'interno del sistema ottico. Il programma calcola il punto e l'angolo d'incidenza sul cono seguendo lo schema semplificato di figura (13). Il fascio è stato ricostruito tracciando tutti i raggi che dalla sorgente, assunta puntiforme, posta ad una data distanza ρ dallo specchio pari a 1250 mm e una data posizione sull'asse y incidono su quest'ultimo nella griglia di punti che copre tutta la superficie dello specchio di ripiegamento. I punti risultano equidistanti di un passo scelto sufficientemente piccolo da permettere al programma di effettuare un'integrazione sullo specchio di ripiegamento il più precisa possibile e allo stesso tempo tale da mantenere dei tempi di calcolo accettabili. Il numero di raggi considerati è tale da mantenere stabile il risultato della simulazione ad ogni ulteriore incremento, nel nostro caso ne sono stati considerati 150000. Infine il programma simula la propagazione del fascio all'interno del cono di Winston fino al rivelatore.

Dalla posizione e dall'angolo d'incidenza dei raggi sul piano focale, all'ingresso del cono, considerando il sistema a simmetria cilindrica nello spazio, è stato possibile propagare i raggi conoscendo l'equazione parametrica delle parabole che generano la sezione del cono di Winston.

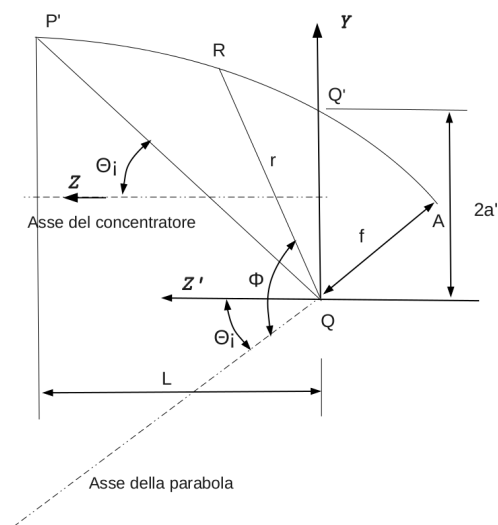


Figura 14: Sezione del cono di Winston

La figura (14) rappresenta la sezione di un paraboloide con asse di simmetria inclinato dell'angolo θ_i rispetto all'asse z e traslato di a' lungo l'asse y . Il cono di Winston si ottiene dalla rotazione di questa sezione intorno

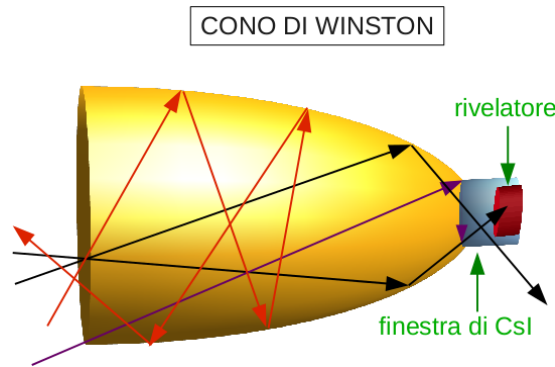


Figura 15: Propagazione dei raggi all'interno del cono di Winston.

all'asse z' di figura (14). L'equazioni parametriche della sezione del paraboloide risultano essere:

$$\begin{cases} y = \frac{2f \sin(\phi - \theta_i)}{1 - \cos \phi} - a' \\ z = r \cos(\phi - \theta_i) \end{cases} \quad (4)$$

dove $r = \frac{2f}{(1 - \cos \phi)}$ è il modulo del raggio vettore, $f = a'(1 + \sin \theta_i)$ è il fuoco del paraboloide e a' la distanza del fuoco dall'origine degli assi che coincide con il raggio d'uscita del cono di Winston.

Secondo le leggi della riflessione i raggi riflessi avranno un angolo rispetto alla tangente alla curva nel punto d'incidenza uguale a quelli incidenti, inoltre il coefficiente angolare della retta tangente alla parabola nel punto d'incidenza è data dalla derivata della curva nel punto d'incidenza. E' necessario tener conto del fatto che se l'angolo di incidenza del raggio sul piano focale è maggiore di zero l'intersezione avviene con il ramo inferiore, quindi con la parabola che ha asse di simmetria nel semipiano positivo mentre al contrario se l'angolo è negativo l'intersezione è con il ramo superiore, corrispondente alla parabola con asse di simmetria nel semipiano negativo, ma fortunatamente il problema è semplificato dalla simmetria del sistema.

Il programma calcola innanzitutto il numero di raggi che arrivano direttamente o per riflessione singola sul cono al rivelatore.

Il fatto che l'elemento sensibile dei rivelatori si trovi ad una distanza dall'uscita del cono pari a 2.7 mm e 2.3 mm rispettivamente per il canale 1 e 2 a causa della presenza della finestra di CsI, determina la perdita di alcuni dei raggi che fuoriescono dal cono, che non raggiungono il rivelatore. Altri raggi subiscono riflessione all'interno del cono senza fuoriuscire dal foro d'uscita, figura (15). Dato che il sistema è a simmetria cilindrica, introducendo un nuovo ciclo esterno si fa variare la posizione della sorgente lungo la direzione radiale y all'interno di un intervallo maggiore o uguale delle dimensioni del FOV. Il programma dunque simula la distribuzione della quantità di raggi che giungono direttamente e per riflessione al rivelatore in funzione della posizione della sorgente.

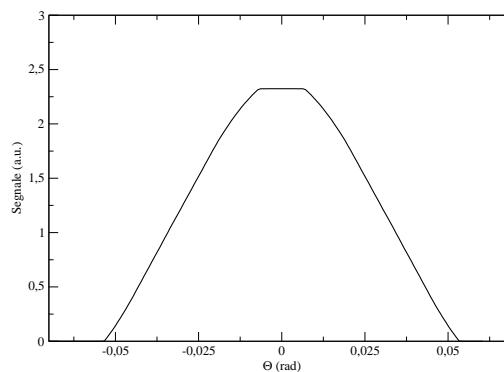


Figura 16: Segnale simulato nel fuoco della parabola.

6 Confronto del modello con i dati sperimentali

La simulazione è stata fatta inizialmente con il cono posto nel fuoco della parabola, trascurando la propagazione del fascio all'interno dei coni ottenendo una curva a campana delle dimensioni totali di circa 106 mrad, figura (16),

che risulta in ottimo accordo col valore del campo di vista ottenuto con la prova del LED (≈ 105 mrad) e a quello simulato con OSLO, figure (3a) e (3b). La simulazione è stata poi ripetuta introducendo l'effetto dei coni ottici per poter fare un confronto con le misure, ottenendo un campo di vista totale delle stesse dimensioni di quello ottenuto con la simulazione in assenza dei coni, ma caratterizzato da una regione di massimo centrale delle dimensioni piene (full width), definite per un segnale superiore all'1%, di circa 40 mrad. Sono state quindi confrontate le curve simulate con i punti sperimentali ottenuti con l'utilizzo del chopper insieme a quelli interferometrici lungo l'asse y per $x = 0$ per entrambi i canali e i risultati sono mostrati nelle figure (17a) e (17b) per il canale 1 e 2 rispettivamente; in entrambi i casi, per fare il confronto con il modello, è stato scelto di normalizzare i dati sperimentali alle aree delle curve.

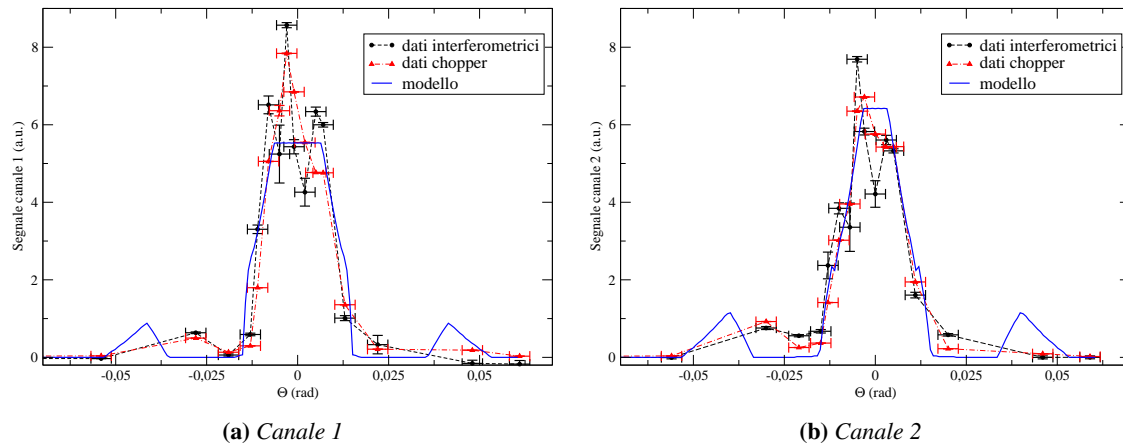


Figura 17: Confronto dei dati con il modello per entrambi i canali.

Dai risultati si deduce che il modello riproduce piuttosto bene le dimensioni totali del campo di vista e la larghezza del massimo centrale, inoltre riproduce il segnale dei lobi esterni anche se in simulazione esso risulta più intenso di quello misurato per il canale 1 oltre che leggermente spostato. Sussiste poi il problema dei picchi centrali presenti nelle misure che di fatto non sono riprodotte dal modello e che potrebbero essere dovuti a effetti non controllabili o eventuali riflessioni multiple all'interno del cono.

7 Studio di sensibilità

Il modello di ray-tracing realizzato è stato utilizzato per effettuare uno studio di sensibilità del segnale al fine di ottenere una stima dell'efficienza di accoppiamento cono-rivelatore e ottimizzare i parametri del disegno ottico, come la distanza cono-parabola. Nei grafici (18a) e (18b) sono mostrate le simulazioni dell'andamento del campo di vista al variare rispettivamente delle distanze cono-rivelatore e cono-parabola per entrambi i canali.

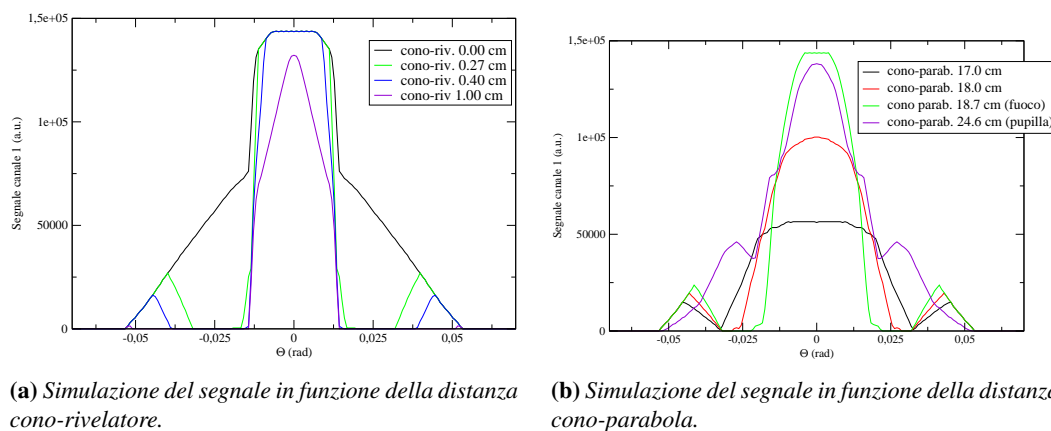
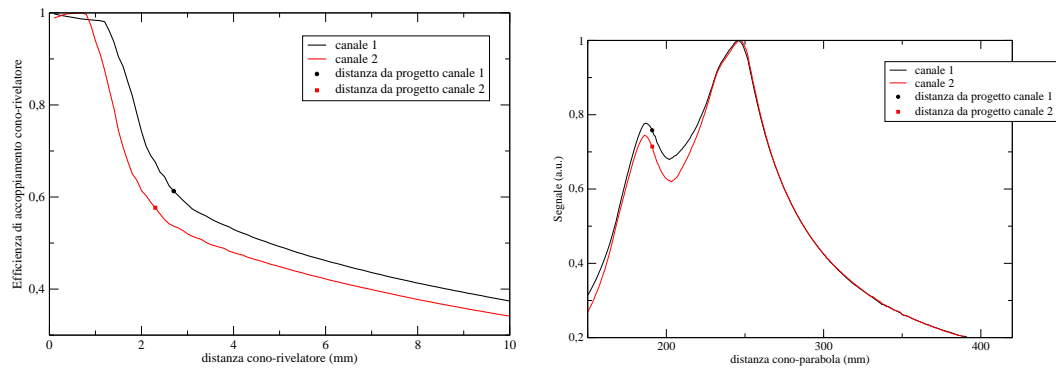


Figura 18: Simulazioni del FOV in funzione delle distanze cono-rivelatore e cono-parabola.

E' stato possibile poi simulare l'andamento del segnale integrato sempre per diverse distanze cono-rivelatore e cono-parabola ottenendo nel primo caso una stima dell'efficienza di accoppiamento cono-rivelatore, figura (19a),

e nel secondo caso una stima delle posizioni in cui il sistema cono-rivelatore raccoglie il massimo del segnale, figura (19b). Dal grafico di figura (19a) si nota che alle distanze da progetto, pari a 2.7 mm per il canale 1 e 2.3 mm per il canale 2, l'efficienza di accoppiamento risulta circa il 60% mentre dal grafico (19b) si notano i due punti di massimo del segnale corrispondenti alla distanza del fuoco (primo massimo) a 187 mm, vicino al valore da progetto (181.7 mm) e all'immagine della pupilla (secondo massimo) a 246 mm; nel punto d'immagine della pupilla parte del segnale che nel caso del cono posizionato nel fuoco giungeva al rivelatore per riflessione, adesso arriva direttamente senza subire riflessione, mentre è comunque presente, e con intensità maggiore, il contributo rappresentato dai lobi esterni dovuto alla riflessione nel cono.

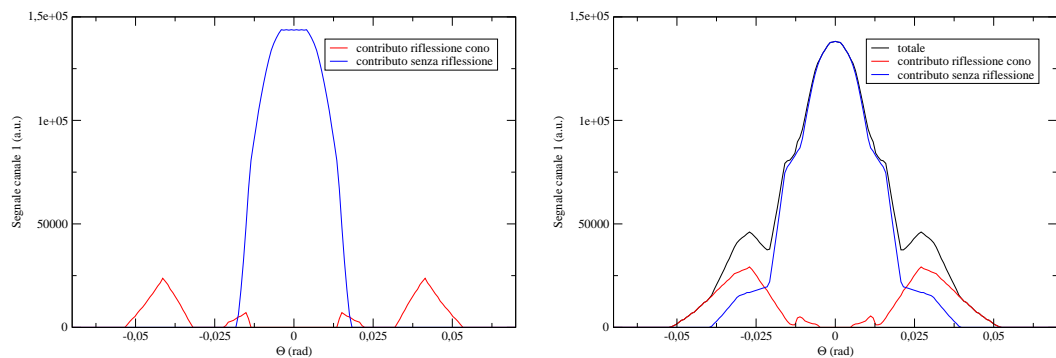


(a) Andamento dell'efficienza di accoppiamento al variare della distanza cono-rivelatore.

(b) Andamento del segnale integrato al variare della distanza cono-parabola.

Figura 19: Grafici dell'efficienza di accoppiamento cono-rivelatore e del segnale integrato in funzione della distanza cono-parabola.

Le figure (20a) e (20b) evidenziano chiaramente come il contributo del cono sia rappresentato dal segnale più esterno e meno intenso del campo di vista; nelle figure si può notare che nel fuoco il segnale dato dal cono risulta quasi completamente separato da quello centrale prodotto dal fascio di radiazione diretto, mentre in pupilla i due contributi si sommano con il contributo dei coni che si estende fino alla regione centrale producendo un aumento del segnale totale, proprio come si deduceva dalla figura (19b).



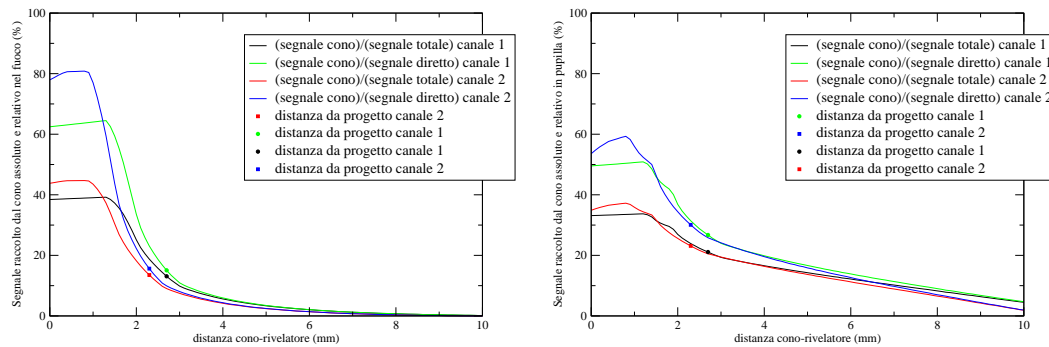
(a) Contributo di segnale dovuto alla riflessione nel cono (segnale laterale) e contributo diretto (segnale centrale) con il cono posizionato nel fuoco.

(b) Contributo di segnale dovuto alla riflessione nel cono (segnale laterale) e contributo diretto (segnale centrale) con il cono posizionato nell'immagine della pupilla.

Figura 20: Simulazioni del FOV con il cono posto nel fuoco e nell'immagine della pupilla.

E' stato possibile anche simulare il valore percentuale di segnale integrato che raccoglie il cono di Winston nei due punti di massimo in funzione della distanza cono-rivelatore. E' stato calcolato sia il contributo totale, rispetto alla quantità complessiva di segnale che entra nel cono, che quello relativo, rispetto al contributo diretto che incide sul rivelatore. I risultati della simulazione sono riportati nelle figure (21a) e (21b) dove si può notare che nel caso del cono posizionato nel fuoco il guadagno prodotto dal cono alle distanze da progetto dei rivelatori, pari a 2.7 mm per il canale 1 e 2.3 mm per il canale 2, risulta decisamente basso: quello totale risulta infatti pari a circa il 13% per entrambi i canali, mentre quello relativo poco maggiore, circa il 15%, sempre per entrambi i canali, figura (21a). Ciò significa che la quantità di segnale che raccoglie il cono di Winston è bassa se confrontata con la quantità di segnale che il rivelatore sarebbe comunque in grado di rilevare anche senza l'impiego di quest'ultimo.

Nel caso del cono posizionato nel punto d'immagine della pupilla, figura (21b), il guadagno totale risulta essere superiore rispetto a quello che si ottiene nel fuoco, risultando pari a circa il 21% per il canale 1 e il 23% per il canale 2, con un aumento massimo rispetto alla posizione nel fuoco, che si ha per il canale 2, di circa il 10%. Nel punto d'immagine della pupilla il segnale raccolto dal cono risulta quindi essere maggiore che non nel fuoco, tuttavia il valore che si ottiene è ancora piuttosto basso, o comunque lontano da quanto ci si proponeva. Infine, sempre dalla figura (21b), si deduce che il guadagno relativo in pupilla raggiunge il 26% per il canale 1 e il 30% per il canale 2; ciò significa che in tale posizione l'effetto del cono è aumentato maggiormente rispetto al contributo derivante dalla componente diretta del fascio.



(a) Andamento del segnale integrato percentuale totale e relativo raccolto dal cono di Winston nella posizione del fuoco per entrambi i canali.

(b) Andamento del segnale integrato percentuale totale e relativo raccolto dal cono di Winston nella posizione d'immagine della pupilla per entrambi i canali.

Figura 21: Simulazioni del segnale integrato raccolto dal cono di Winston nel fuoco e nell'immagine della pupilla.

Poichè dalle simulazioni si deduce che la posizione in cui si ha maggior guadagno di segnale col cono ottico risulta essere quella d'immagine della pupilla, è stato simulato anche l'andamento del segnale integrato senza il cono di Winston, considerando quindi solo il rivelatore, in modo da poter quantificare il reale guadagno totale che se ne trae dall'utilizzo di quest'ultimo, figura (22).

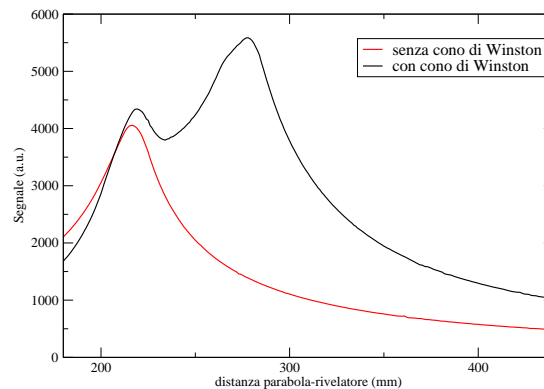


Figura 22: Segnale integrato con e senza cono di Winston in funzione della distanza del rivelatore dalla parabola.

Il grafico mostra chiaramente che la quantità massima di segnale rilevabile si ha in presenza del cono di Winston posizionato nel punto d'immagine della pupilla, come si era già dedotto, in cui si avrebbe un aumento del segnale pari a circa il 28% rispetto alla posizione nel fuoco. Dalla simulazione risulta poi che con il cono nella posizione d'immagine della pupilla si determinerebbe un aumento del segnale totale di circa il 37% rispetto al caso senza cono, utilizzando solo il rivelatore, per questo motivo il cono di Winston portato in tale posizione potrebbe rappresentare un'ottimizzazione della configurazione ottica dello strumento. In realtà un aumento del 37% del segnale risulta essere troppo basso rispetto all'obiettivo per il quale era stato introdotto, per questo motivo sarà necessario studiare la possibilità di introdurre dei rivelatori con dimensioni maggiori aumentando al capacità di raccolta del segnale mantenendo sempre il rapporto segnale-rumore sopra una certa soglia.

8 Conclusioni

E' stata effettuata una caratterizzazione del campo di vista dello spettrometro a trasformata di Fourier REFIR-PAD operante nella banda spettrale $100\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ($6.2\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$) andando a misurare l'intensità del segnale in risposta alla variazione della posizione di una sorgente incandescente posta all'interno del campo di vista dello strumento.

La mappatura è stata eseguita sia in maniera interferometrica che non interferometrica tramite modulazione con chopper. Nel caso interferometrico le misure sono state fatte integrando gli spettri non calibrati nell'intervallo spettrale $700\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ in cui era massimo il rapporto segnale-rumore. Nel caso non interferometrico invece le misure sono state fatte modulando il segnale in continua con un chopper e considerando l'ampiezza picco-picco del segnale in funzione della posizione della sorgente.

E' stato infine realizzato un modello di ray-tracing che simula il percorso della radiazione all'interno dello strumento e nei coni ottici al fine di poter verificare e riprodurre a livello teorico i dati ottenuti con le misure.

La misura della dimensione totale del campo di vista dello strumento fornisce un valore prossimo a circa 105 mrad mentre la regione di massimo centrale (full width), corrispondente a valori di segnale superiori all'1%, risulta avere le dimensioni pari a circa 40 mrad e risultano ben riprodotte dal modello di ray-tracing, il quale ha permesso di simulare indipendentemente sia il contributo dato dal cono di Winston, che si manifesta soprattutto nei lobi laterali, sia quello diretto che si manifesta con la zona di massimo centrale. Inoltre è stato verificato che le misure con e senza chopper forniscono le stesse dimensioni del campo di vista per entrambi i canali.

La caratterizzazione del FOV così effettuata permetterà di stabilire dei criteri di soglia per l'analisi del segnale in caso di scene disomogenee, come quelle in presenza di nubi o cirri.

Il modello realizzato ha permesso poi di effettuare uno studio di sensibilità ottenendo una stima dell'efficienza di accoppiamento cono-rivelatore pari a circa il 60% e di ottimizzare i parametri del disegno ottico quali la distanza cono-parabola, identificando i due punti di massimo del segnale corrispondenti alla posizione del fuoco a 187 mm e dell'immagine della pupilla a 246 mm.

E' stato simulato poi, in funzione della distanza cono-rivelatore, l'andamento del valore percentuale di segnale raccolto dal cono di Winston, sia totale, calcolato rispetto al segnale complessivo che entra nell'imboccatura, che relativo, calcolato rispetto alla componente diretta del segnale, nei due punti di massimo. I valori ottenuti sono circa il 13% e il 15% per entrambi i canali nel caso del cono posizionato nel fuoco; nel caso invece del cono nell'immagine della pupilla, in cui il guadagno è risultato essere maggiore, i valori ottenuti sono circa il 21% e il 26% per il canale 1 e il 23% e il 30% per il canale 2.

E' stato possibile infine stimare il guadagno totale di segnale dato dal cono di Winston nei due punti di massimo, risultando pari a circa il 13% nel fuoco e circa il 37% nell'immagine della pupilla.

Poichè il guadagno massimo portato dal cono di Winston risulta essere basso sarà necessario fare uno studio sulla possibilità di utilizzare rivelatori di dimensioni maggiori per aumentare la capacità di raccolta del segnale.

Ringraziamenti

Parte del lavoro descritto in questo report è stata supportata dal progetto CTOTUS (Capacità Tecnologica e Operativa della Toscana per l'esplorazione dello Spazio) co-finanziato dalla regione Toscana nel programma POR-CReO FESR 2007-2013.

Un particolare ringraziamento a Flavio Barbara per il suo prezioso supporto nello sviluppo della parte grafica.

A APPENDICE

SISTEMA OTTICO IN-OUT	
campo di vista (OSLO)	117 mrad
focale parabola 1 (in asse)	319.0 mm
focale parabola 1 (fuori asse)	327.8 mm
fuori asse parabola 1	106.0 mm
focale parabola 2 (in asse)	170.7 mm
focale parabola 2 (fuori asse)	181.7 mm
fuori asse parabola 2	86.4 mm
distanza specchio di puntamento - parabola1	309.3 mm
diametro diaframma	20.0 mm
distanza specchio di puntamento - diaframma	32.5 mm
INTERFEROMETRO	
distanza parabola1 - pupilla	718.0 mm
distanza pupilla-parabola2	718.6 mm
diametro pupilla	23.0 mm
diametro specchio d'ingresso	30.0 mm
distanza parabola2 - cono ottico	181.0 mm
SISTEMA OTTICO RIVELATORI	
diametro ingresso cono ottico	10.0 mm
diametro foro d'uscita cono ottico	1.0 mm
lunghezza cono ottico	29.3 mm
diametro rivelatore 1	2.0 mm
diametro rivelatore 2	1.5 mm
distanza cono ottico-rivelatore 1	2.7 mm
distanza cono ottico-rivelatore 2	2.3 mm

Tabella 1: Specifiche ottiche REFIR-PAD

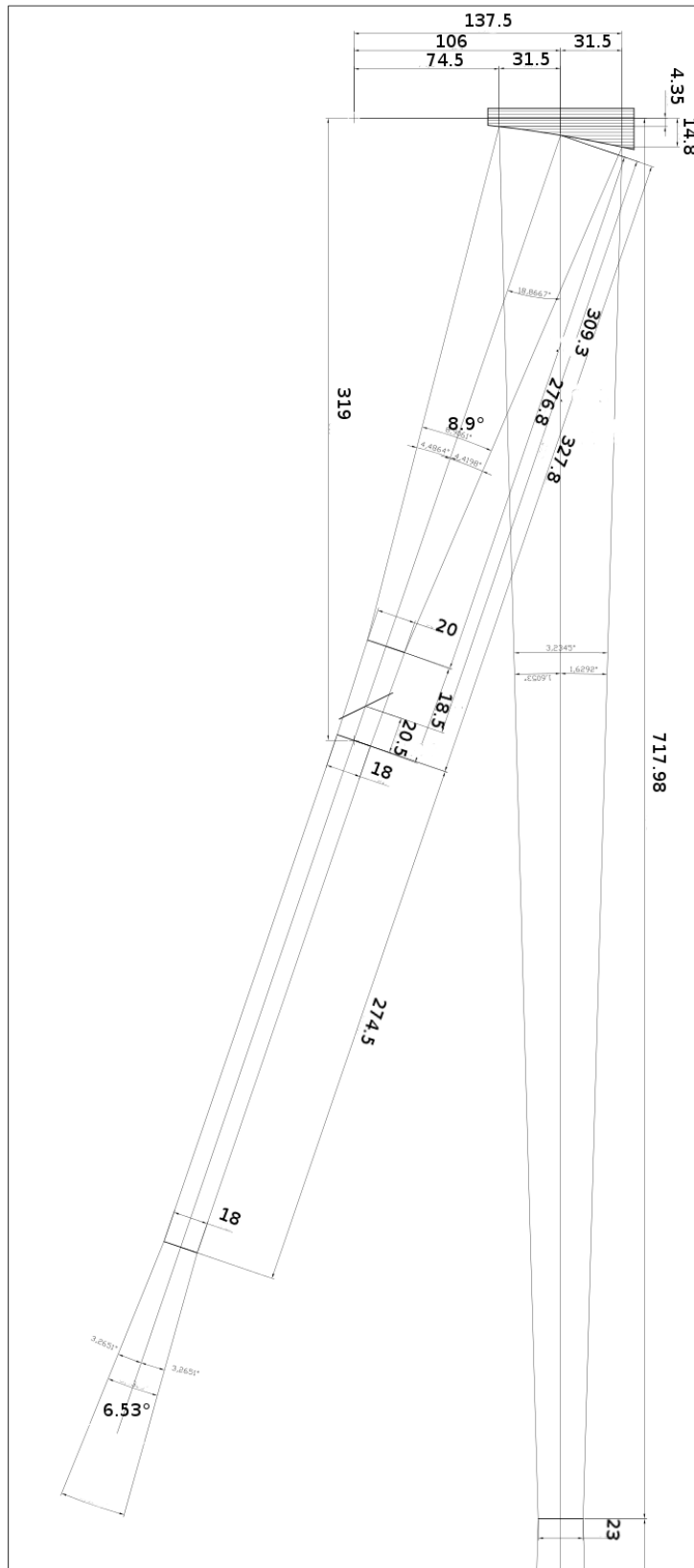


Figura 23: Schema del percorso della radiazione all'interno dello strumento dallo specchio d'ingresso fino alla pupilla intermedia

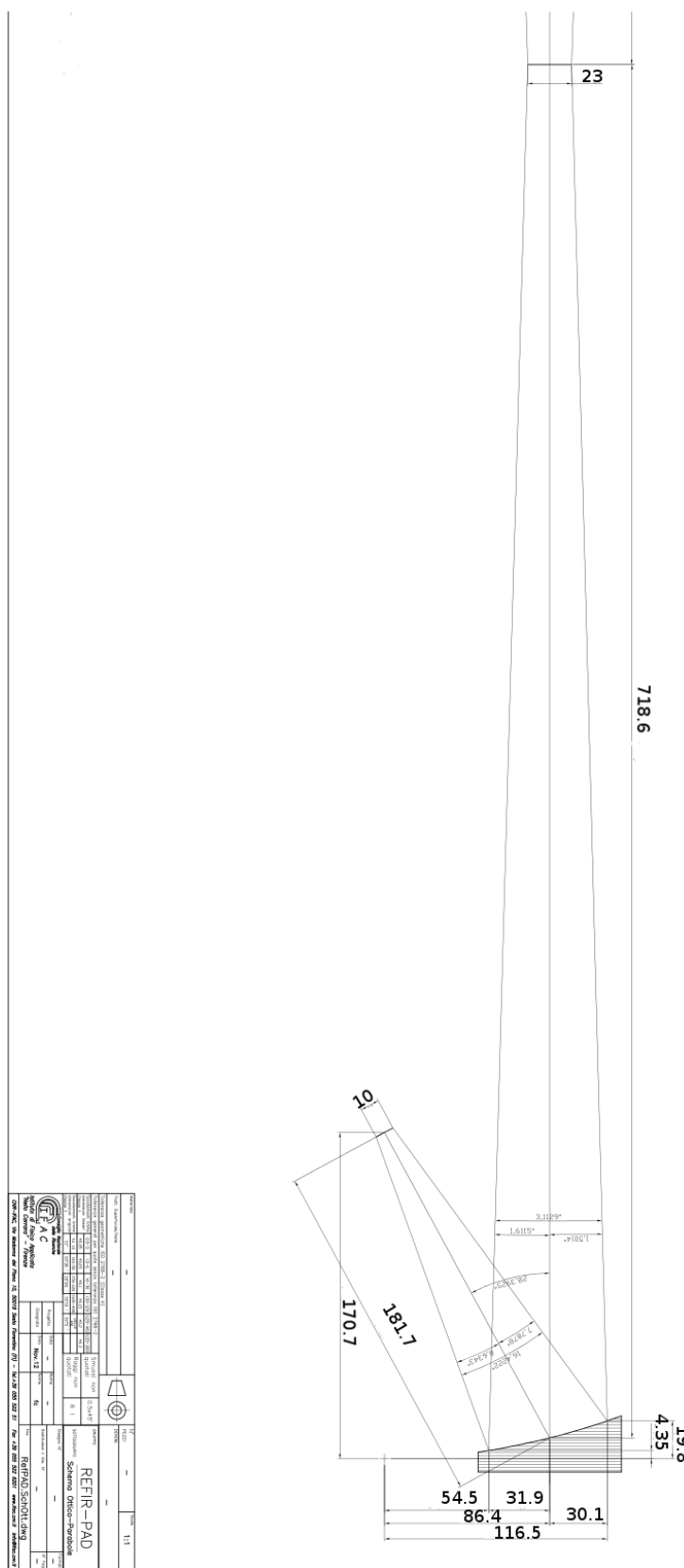


Figura 24: Schema del percorso della radiazione all'interno dello strumento dalla pupilla intermedia al rivelatore

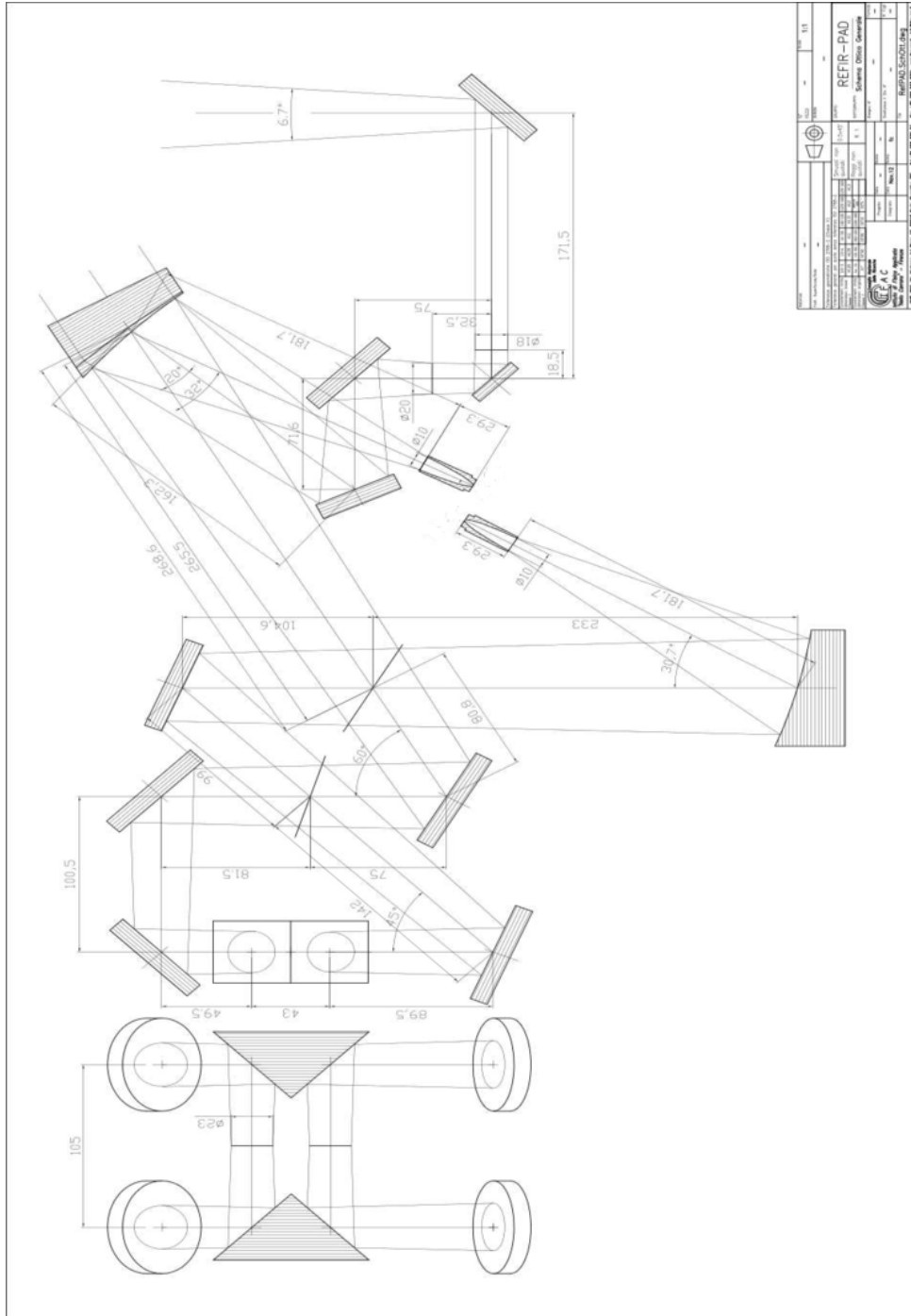
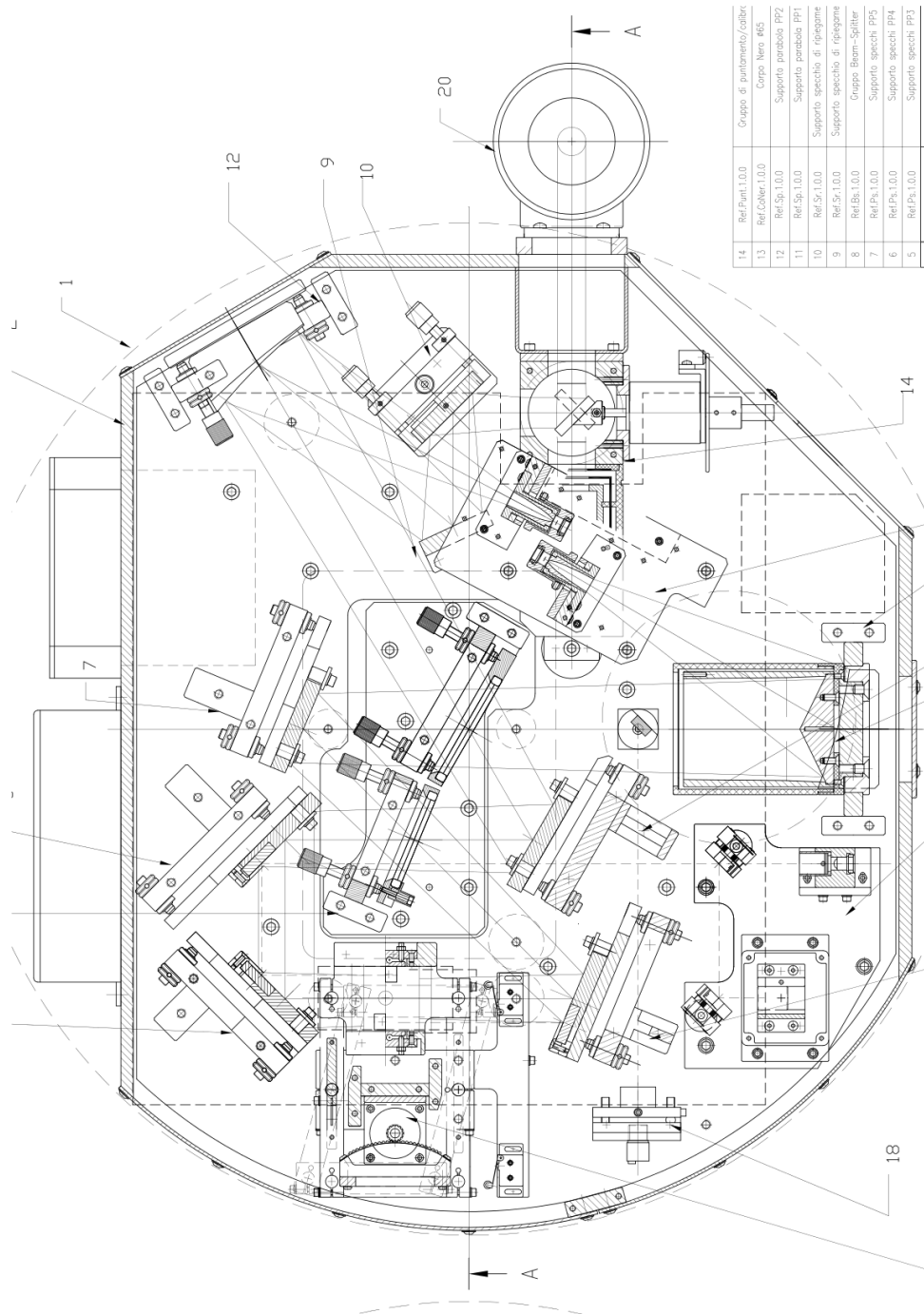


Figura 25: Disegno ottico REFIR-PAD



14	Ref.Pant.1.0.0	Gruppo di puntamento/collic
13	Ref.CoNeri.1.0.0	Corpo Neri #65
12	Ref.Sp.1.0.0	Supporto parabole PP2
11	Ref.Sp.1.0.0	Supporto parabole PP1
10	Ref.Sp.1.0.0	Supporto specchio di ripiegame
9	Ref.Sp.1.0.0	Supporto specchio di ripiegame
8	Ref.Bs.1.0.0	Gruppo Beam-Splitter
7	Ref.Ps.1.0.0	Supporto specchi PP5
6	Ref.Ps.1.0.0	Supporto specchi PP4
5	Ref.Ps.1.0.0	Supporto specchi PP1
A	Ref.Ds.1.0.0	Supporto specchi PP2

Figura 26: Disegno opto-meccanico REFIR-PAD (vista dall'alto)

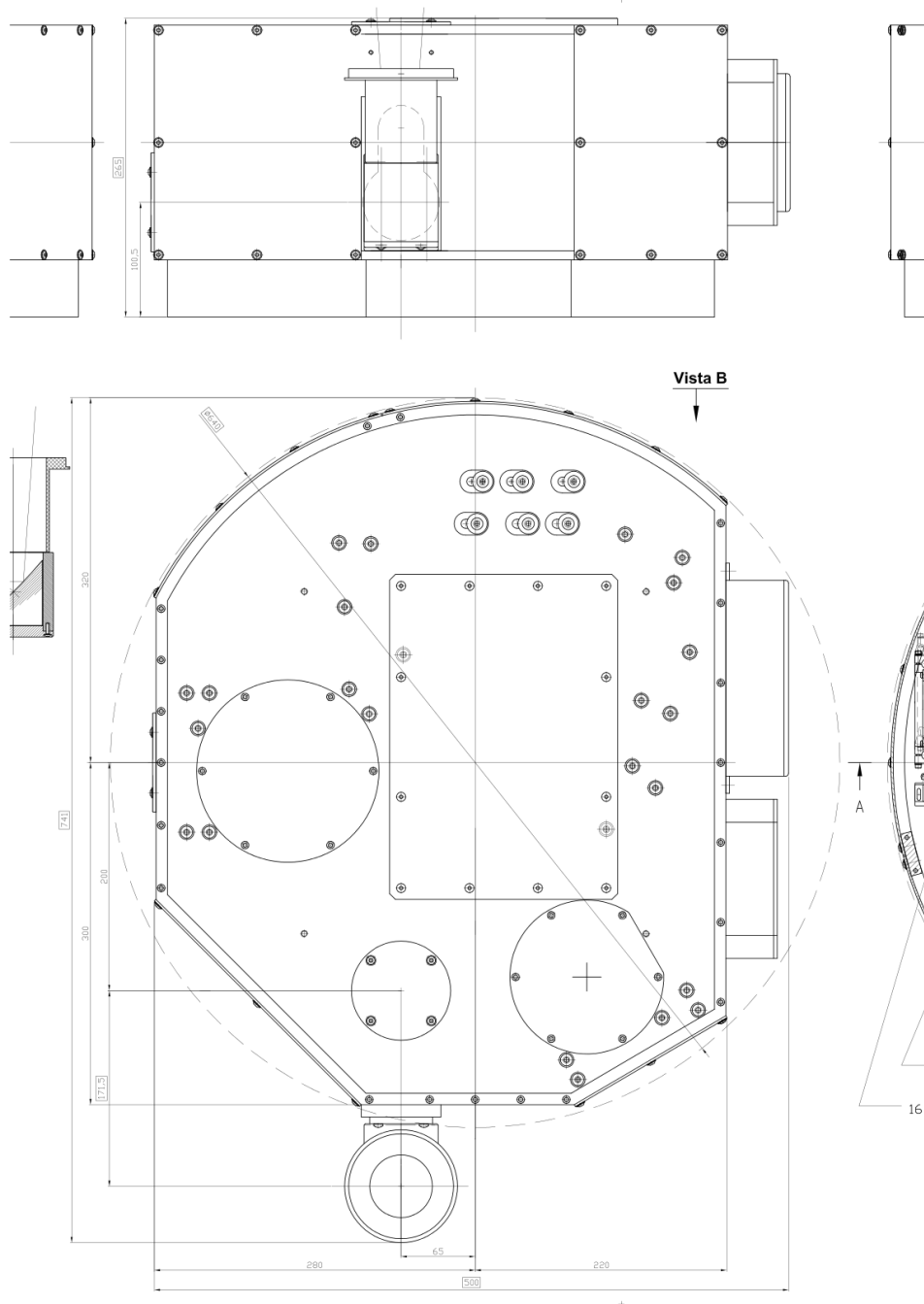


Figura 27: Vista esterna laterale e dall'alto di REFIR-PAD

Riferimenti bibliografici

- [1] G.Bianchini, L. Palchetti, 2008, Technical Note: REFIR-PAD level 1 data analysis and performance characterization, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3817–3826.
- [2] PROGETTO: ASI-I/R/27/00 R& D bread-board for a Fourier Transform Spectrometer to remotely sense the rotational water vapour band (10-1000 cm⁻¹) - Rapporto tecnico.
- [3] G.Bianchini, L. Palchetti, F. Castagnoli, 2007, Design and characterization of black-body sources for infrared wide-band Fourier transform spectroscopy *Infrared Phys. Techn.*, 51, 207-215
- [4] Bruno Carli, Alessandra Barbis, John E. Harries, and Luca Palchetti, Design of an efficient broadband far-infrared Fourier-transform spectrometer, 1999, *APPLIED OPTICS*, Vol. 38, No. 18
- [5] L. Palchetti, C. Belotti, G. Bianchini, F. Castagnoli, B. Carli, U. Cortesi, M. Pellegrini, C. Camy-Peyret, P. Jeseck and Y. Te, Technical note: First spectral measurement of the Earth's upwelling emission using an uncooled wideband Fourier transform spectrometer, 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 5025–5030
- [6] Bianchini G., Carli B., Palchetti L., Vectorial combination of signals in Fourier transform spectroscopy, *Infr. Phys. & Tech* 52(1), 19-21, 2009.
- [7] L.Palchetti, G.Bianchini, F.Castagnoli, Design and characterisation of black-body sources for infrared wide-band Fourier transform spectroscopy, *Infrar. Phys. Tech.* 51, pp. 207-215, 2008.
- [8] G.Bianchini, F. Castagnoli, M. Pellegrini, and L.Palchetti, Frictionless mirror drive for intermediate resolution infrared Fourier transform spectroscopy, *Infr. Phys. & Tech.* 48/3, pp. 217-222, Aug 2006
- [9] L.Palchetti, A.Barbis, J.E.Harries, D.Lastrucci, Design and mathematical modelling of the space-borne far-infrared Fourier transform spectrometer for REFIR experiment, *Infrared Physics & Technology* Vol. 40, pp. 367-377, 1999
- [10] Principles of Optics - Max Born & Emil Wolf
- [11] High Collection Nonimaging Optics - W.T. Welford, R Winston