

Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Corso di Laurea in Astronomia

Dipartimento di Astronomia dell'Università di Bologna

Lo specchio secondario adattivo dell'LBT: calibrazione del prototipo P45

Tesi di Laurea

di:

Davide Ricci

Relatore:

Chiar.mo Prof.

Bruno Marano

Co-Relatore:

Dott.

Armando Riccardi

Parole chiave: ottica adattiva, correttore di fronte d'onda,
secondario adattivo, specchio deformabile, LBT

Sessione III - Anno Accademico 2004–2005

“Mi piace stare a guardare le stelle.”
“Io non ci ho mai prestato molta attenzione.
Perché poi avrei dovuto?
Cos’hanno fatto loro per me?”

Indice

Elenco delle figure	6
Introduzione	7
1 L'atmosfera	9
1.1 Immagini limitate solo dalla diffrazione ed affette da perturbazioni	9
1.2 Parametri fondamentali per la descrizione dell'atmosfera	12
1.2.1 Indice di rifrazione dell'atmosfera n	13
1.2.2 diametro di Fried r_0	13
1.2.3 Tempo di coerenza t_0	14
1.2.4 Angolo isoplanatico θ_0	14
1.3 Il rapporto di Strehl e gli errori di fronte d'onda	15
2 Ottica adattiva	17
2.1 Elementi essenziali di un sistema adattivo	17
2.2 Gli specchi correttori	19
2.2.1 Specchi ad attuatori piezoelettrici	19
2.2.2 Specchi piezoelettrici bimorfi	20
2.2.3 Specchi secondari adattivi	21
2.3 Sensori di fronte d'onda	21
2.3.1 Sensore Shack Hartmann	22
2.3.2 Sensore di curvatura	24
2.3.3 Sensore a piramide	24
2.4 L'elettronica di controllo e di ricostruzione	25
2.4.1 Misura della matrice di ricostruzione	26
2.5 Principali contributi all'errore di fronte d'onda per sistemi adattivi	27
2.5.1 Fit del fronte d'onda	27
2.5.2 Decorrelazione temporale e frequenza di Greenwood	28

2.5.3	Anisoplanatismo per ordini superiori	29
2.5.4	Rumore di rilevazione del fronte d'onda	29
2.5.5	Effetto cono dell'eventuale stella laser ed errore di ricostruzione	30
3	Il Secondario adattivo	31
3.1	Il corredo di strumenti scientifici dell'LBT	32
3.2	Il progetto dell'unità LBT672a	35
3.2.1	Elenco dei componenti significativi	35
3.2.2	I sensori capacitivi	38
3.2.3	Lo specchio	40
3.2.4	Breve descrizione del ciclo esterno	41
3.2.5	Breve descrizione del ciclo interno a $70kHz$	42
3.3	Il prototipo P45	44
3.3.1	Assemblaggio in laboratorio	46
3.3.2	Interfaccia di controllo	46
3.3.3	Numerazione degli attuatori	48
4	Calibrazioni di forza	51
4.1	Necessità delle calibrazioni ed impostazione del sistema	51
4.2	Sistema per trovare anche la forza di controllo e i momenti	53
4.3	Il codice di prova	55
4.4	La "prova del bicchierino"	56
4.5	Risultati dei dati di laboratorio	56
5	Calibrazioni locali di posizione	61
5.1	Necessità delle calibrazioni	61
5.2	Misure differenziali	62
5.3	Tecnica di elaborazione dell'immagine	64
5.4	Il codice al calcolatore	66
5.5	Risultati dei dati di laboratorio	67
6	Conclusioni e prospettive	71
A	Scomposizione in valori singolari	73

B	Funzioni di trasferimento	75
B.1	Funzione di trasferimento ad anello aperto	76
B.2	Funzione di trasferimento ad anello chiuso	77
B.3	Funzione di trasferimento d'errore	78
B.4	Confronto fra le ω trovate	79
C	Funzioni di Bessel	81
	Bibliografia	83

Elenco delle figure

1.1	Fronte d'onda ideale $WF_0(x, y)$ e fronte d'onda distorto $WF_d(x, y)$	11
1.2	Prodotto di due OTF	12
1.3	Modello di atmosfera secondo l'ipotesi di Taylor	14
2.1	Schema generale di un sistema adattivo	18
2.2	Esempio di specchio ad attuatori piezoelettrici	19
2.3	Esempio di specchio bimorfo	20
2.4	Esempio di specchio a levitazione magnetica, come il secondario adattivo.	21
2.5	Sensore Shack Hartmann	23
2.6	Schema del sensore di curvatura.	24
2.7	Sensore a piramide	25
3.1	Disegno dell'LBT	31
3.2	Posizione del secondario nel complesso dell'LBT	34
3.3	Esplosione del secondario a 672 attuatori.	37
3.4	Due diversi attuatori per il secondario	37
3.5	Aree anulari dei sensori capacitivi sotto il disco di riferimento del prototipo P45.	39
3.6	Retro dello specchio sottile del prototipo P45. Si vedono i 45 magneti disposti su tre anelli concentrici.	39
3.7	Schema del sensore capacitivo e disegno che mostra le due armature del condensatore.	40
3.8	Magneti del prototipo	40
3.9	Membrana dell'LBT672a	41
3.10	Schema complessivo delle operazioni	43
3.11	Specchio alluminato del P45.	45

3.12	Montatura del P45	45
3.13	Schede DSP nel telaio	47
3.14	Una scheda DSP	47
3.15	Finestra di interfaccia per il controllo del P45	48
3.16	Numerazione dello specchio o numerazione <i>mirror</i> nel P45	49
3.17	Numerazione a schede o numerazione <i>DSP</i> nel P45	49
4.1	Il “bicchierino”	56
4.2	Costanti calibrative di forza	57
4.3	Mappatura delle costanti calibrative di forza	59
4.4	Errore sulle costanti calibrative di forza	59
5.1	Misure interferometriche e capacitive	62
5.2	Dondolamento in due fasi	63
5.3	Esempio di figura pentagonale	65
5.4	Figura triangolare così come viene rilevata dall’interferometro	65
5.5	Come il sistema ritrova gli anelli	66
5.6	Risultati delle posizioni ottenute con il primo movimento di tilt	68
5.7	Risultati delle posizioni ottenute con il secondo movimento di tilt	68
5.8	Calibrazioni locali di posizione. La distribuzione del valore delle β lungo i tre anelli dipende dalla diversità delle componenti elettroniche degli attuatori	69
5.9	Errori assoluti in “nanometri interferometrici/nanometri capacitivi” sulle calibrazioni di posizione.	70
5.10	In questa immagine sono stati saturati i valori degli attuatori disposti sul diametro più rumoroso, per far risaltare le caratteristiche sottostanti.	70

Introduzione

L'atmosfera terrestre presenta uno strato compreso tra il livello del suolo e i 25–30 chilometri d'altezza caratterizzato da un regime di turbolenza con variazione casuale dell'indice di rifrazione. La propagazione del fronte d'onda in un tale mezzo determina deformazioni dello stesso, “deteriorando” le informazioni spaziali trasportate. Per questa ragione la struttura dell'immagine di una stella, ottenuta con un telescopio astronomico anche nel caso di ottiche perfette, differisce dalla figura di diffrazione prevista teoricamente, e muta rapidamente con tempi scala di 1–15 millisecondi.

Con tempi d'esposizione così brevi possiamo “congelare” gli effetti della turbolenza, evidenziando due contributi principali: una diffusione dell'immagine (spesso in una struttura a macchie) e un moto casuale del baricentro dell'intera figura. Le esposizioni a scopo astronomico sono generalmente molto più lunghe e le strutture osservate vengono integrate nel tempo, generando una tipica figura simmetrica, detta figura di seeing, il cui diametro corrisponde ad un angolo in cielo di circa 0,5–2,0 secondi d'arco. In assenza di atmosfera questa dimensione è equivalente alla risoluzione angolare di un telescopio di circa 90–20cm nel vicino infrarosso ($2,2\mu\text{m}$). Un telescopio astronomico di ultima generazione (8 metri di diametro), ad esempio, sarebbe invece in grado di raggiungere una risoluzione angolare teorica di 13 millesimi di secondo d'arco nel visibile ($0,55\mu\text{m}$) e 50 nell'infrarosso.

La presenza della turbolenza atmosferica degrada il potere risolutivo angolare di un tale strumento di 10–150 volte. Costruire telescopi sempre più grandi è utile a raccogliere sempre più radiazione ma senza migliorare il potere risolutivo angolare. In particolare, nell'infrarosso, la perdita della risoluzione angolare corrisponde ad una perdita di sensibilità, poiché all'allargamento della figura di seeing corrisponde un aumento del rumore di fondo che viene integrato con essa.

Negli ultimi decenni, però, è maturata una tecnica che si basa su sistemi capaci di rilevare istante per istante l'entità della deformazione del fronte d'onda dovuto alla turbolenza: le informazioni elaborate vengono immediatamente inviate ad uno specchio capace di deformarsi in "tempo reale" per correggere le perturbazioni dell'atmosfera. Questa è l'*ottica adattiva*.

Un sistema adattivo può essere schematizzato semplicemente come l'insieme di tre componenti: uno capace di rilevare gli effetti della turbolenza nel fronte d'onda (il *sensore di fronte d'onda*), uno adatto ad analizzarli (l'*elettronica di controllo*), e uno in grado di correggerli (lo *specchio deformabile*).

L'oggetto di studio di questa tesi sarà appunto un particolare tipo di specchio deformabile: il secondario adattivo.

Esso è un dispositivo innovativo che permette di sostituire il tradizionale specchio secondario di un telescopio con un sottile (1,6mm) specchio che viene deformato da attuatori elettromagnetici. Tali attuatori provvederanno, tramite un sistema di metrologia interna basato su sensori capacitivi, a variare continuamente la forma della superficie ottica per correggere, in tempo reale, gli effetti della turbolenza atmosferica.

In particolare, il secondario adattivo oggetto del nostro studio è destinato al Grande Telescopio Binoculare (*Large Binocular Telescope*, LBT).

La costruzione dell'LBT, che prevede due specchi di 8,4m di diametro, è un progetto a partecipazione italiana di priorità nazionale.

Nel primo capitolo della tesi verrà descritta la perdita di informazione, in termini di risoluzione spaziale, che peggiora la qualità iniziale dell'immagine a causa dell'atmosfera, e si modellerà la turbolenza tramite alcuni parametri tipici. Il secondo capitolo tratterà l'ottica adattiva come mezzo per ripristinare l'informazione spaziale, e si indicheranno le sorgenti d'errore utili per un'accurata stima dell'efficienza del sistema stesso. Il terzo capitolo descriverà il telescopio LBT focalizzando l'attenzione sul secondario adattivo e sul suo prototipo, il P45, attualmente in fase di prova presso i laboratori di Arcetri. Il miglioramento delle prestazioni del P45, tramite opportune calibrazioni di forza degli attuatori elettromagnetici, saranno l'oggetto del quarto capitolo, mentre il quinto capitolo si occuperà delle calibrazioni di posizione, effettuate tramite il confronto tra le posizioni rilevate dai sensori capacitivi e quelle date dalle immagini interferometriche.

Capitolo 1

L'atmosfera

In condizioni ideali, una sorgente puntiforme posta all'infinito emetterebbe radiazione il cui fronte d'onda sarebbe in grado di percorrere imperturbato la distanza che lo separa dal telescopio, essere riflesso dallo specchio primario e dal secondario, attraversare la serie di eventuali specchi e lenti per formare l'immagine della sorgente sul rivelatore scientifico secondo i criteri della diffrazione.

In questo capitolo verrà descritta la perdita di informazione in termini di risoluzione spaziale, causata dalla turbolenza atmosferica, che peggiora la qualità teorica dell'immagine limitata dalla sola diffrazione. Essa verrà quantificata tramite la risposta impulsiva (dell'immagine di una sorgente puntiforme) e le corrispondenti funzioni ottiche di trasferimento (della turbolenza e limitata solo dalla diffrazione), per arrivare a definire lo Strehl quale misura di quanto l'immagine perfetta venga degradata.

Si schematizzerà inoltre la turbolenza, descrivendola tramite la definizione di parametri che caratterizzano il comportamento stocastico delle fluttuazioni del fronte d'onda, quali il diametro di Fried, il tempo di coerenza e l'angolo isoplanatico.

1.1 Immagini limitate solo dalla diffrazione ed affette da perturbazioni

A causa della dimensione finita della pupilla¹ di un telescopio, la radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente puntiforme non viene riprodotta dal

¹Determinato il diametro che maggiormente limita il fascio che si propaga in un sistema ottico, la *pupilla d'ingresso* è data dall'immagine del diaframma prodotto dagli elementi ottici che lo precedono; la *pupilla d'uscita* è fornita dall'immagine del diaframma prodotto dagli elementi ottici che lo seguono.

sistema ottico (anche se privo di difetti) in un'immagine puntiforme.

Il fenomeno della diffrazione fa sì che l'intensità del fascio, emesso dalla sorgente sopra descritta, non si concentri tutta in un unico punto del rivelatore, ma abbia una sua larghezza intrinseca formando così una figura caratteristica con un luminoso picco centrale ed anelli concentrici sempre più deboli, detta *figura di diffrazione*.

Immagini limitate solo dalla diffrazione

Per capire come la luce si distribuisca sulla camera scientifica, introduciamo la risposta impulsiva (*Point Spread Function*, PSF) come l'intensità nella generica direzione (α', β') [Goodman, 1985]

$$PSF(\alpha', \beta') \propto \left| \iint_{-\infty}^{\infty} W(\lambda\alpha, \lambda\beta) \exp[-2\pi i(\alpha'\alpha + \beta'\beta)] d\alpha d\beta \right|^2, \quad (1.1)$$

dove λ è la lunghezza d'onda alla quale si osserva, e W indica la funzione della pupilla del telescopio, definita come

$$W(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \vec{r} \text{ è un punto della pupilla,} \\ 0 & \text{se } \vec{r} \text{ è un punto } \textit{esterno}. \end{cases} \quad (1.2)$$

La PSF è dunque data dal modulo quadro della trasformata di Fourier della pupilla [Goodman, 1968].

Nel caso di una pupilla circolare, l'equazione 1.1 ha una soluzione analitica, e si ottiene la funzione di distribuzione dell'intensità limitata solo dalla diffrazione, $I_{dl}(\theta)$, chiamata funzione di Airy:

$$I_{dl}(\theta) = \frac{\pi D^2}{4\lambda^2} \left[\frac{2J_1\left(\pi D \frac{\theta}{\lambda}\right)}{\pi D \frac{\theta}{\lambda}} \right]^2, \quad (1.3)$$

dove $\theta = (\alpha', \beta')$ identifica la posizione sul rivelatore, D è il diametro del telescopio, λ la lunghezza d'onda della luce e J_1 è la cosiddetta *funzione di Bessel* di ordine 1 (Appendice C).

La larghezza a mezza altezza (*Full Width Half Maximum*, FWHM) dell'intensità limitata solo dalla diffrazione è

$$\vartheta = 1,03 \frac{\lambda}{D}. \quad (1.4)$$

La trasformata di Fourier della risposta impulsiva è chiamata *funzione ottica di trasferimento* (*Optical Transfer Function*, OTF). Sfruttando il teorema

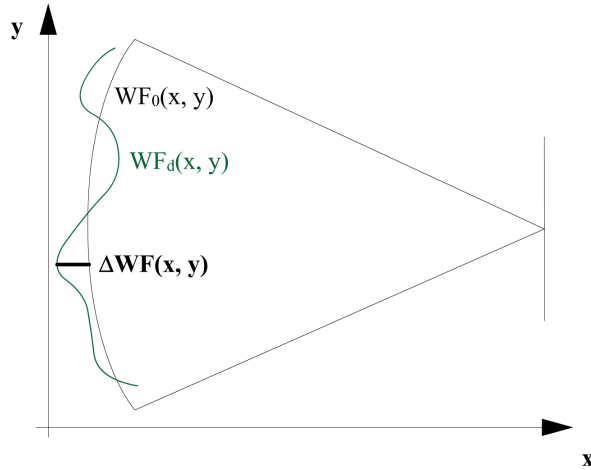


Figura 1.1: Fronte d'onda ideale $WF_0(x, y)$ e fronte d'onda distorto $WF_d(x, y)$.

dell'autocorrelazione della teoria delle trasformate di Fourier [Goodman, 1968] e normalizzando il risultato al valore nell'origine, si ottiene la funzione ottica di trasferimento nel caso limitato solo dalla diffrazione

$$OTF_{dl} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} W(x, y)W^*(x - \omega_1\lambda, y - \omega_2\lambda)dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} |W(x, y)|^2 dx dy} , \quad (1.5)$$

dove ω_1 e ω_2 sono una coppia di frequenze spaziali e λ è la lunghezza d'onda alla quale si osserva.

Immagini affette da perturbazioni del fronte d'onda

Se è presente un'aberrazione (vedi figura 1.1), cioè se il fronte d'onda sulla pupilla devia dalla sua forma ideale secondo un profilo $\Delta WF(x, y)$, a cui corrisponde un errore di fase

$$\psi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta WF(x, y) , \quad (1.6)$$

si può dimostrare che la funzione ottica di trasferimento di tale sistema ammette la stessa forma dell'equazione 1.5, purché si introduca per la funzione della pupilla il corrispondente errore di fase [Goodman, 1985]

$$W(x, y) \longrightarrow W(x, y)e^{i\psi(x, y)} . \quad (1.7)$$

Nel caso di perturbazioni di fase casuali, come quelle introdotte dalla turbolenza atmosferica, l'errore di fase deve essere descritto in termini statistici.

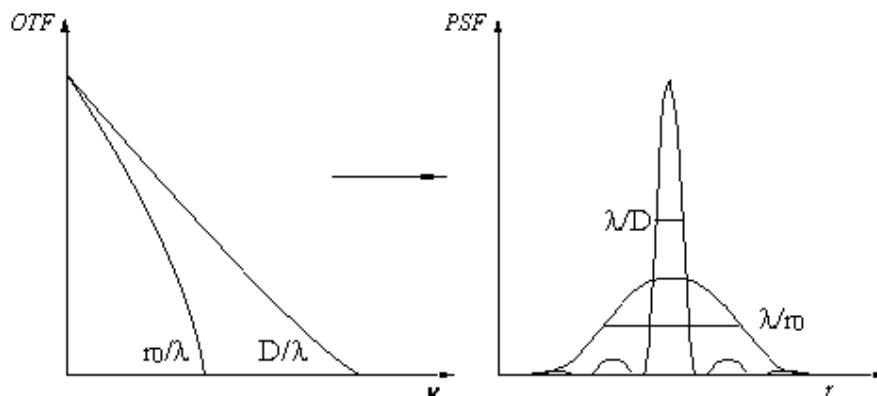


Figura 1.2: Il prodotto delle due OTF forma una figura con un nucleo limitato dalla diffrazione ed un alone limitato dalla turbolenza (o seeing).

In particolare si definisce funzione di struttura dell'errore di fase casuale $\psi(\vec{r})$ la quantità

$$D_\psi(\Delta r) = \langle (\psi(\vec{r}) - \psi(\vec{r}'))^2 \rangle, \quad (1.8)$$

dove con $\langle \dots \rangle$ abbiamo identificato la media statistica; con \vec{r} e \vec{r}' due punti sul piano della pupilla. Dalle equazioni 1.5 e 1.7 si può dimostrare che [Goodman, 1985] l'OTF del sistema diventa

$$\langle OTF \rangle = OTF_T \cdot OTF_{al}, \quad (1.9)$$

dove OTF_{al} è la funzione ottica di trasferimento limitata solo dalla diffrazione; e il contributo della perturbazione casuale è dato da

$$\langle OTF_T \rangle = \exp -\frac{1}{2} D_\psi(\Delta r). \quad (1.10)$$

1.2 Parametri fondamentali per la descrizione dell'atmosfera

L'insieme dei fattori che determinano la qualità delle immagini astronomiche viene indicato in genere con la parola inglese *seeing*.

Il seeing è completamente definito da alcune grandezze tipiche, brevemente elencate in questa sezione.

1.2.1 Indice di rifrazione dell'atmosfera n

La variazione di indice di rifrazione dell'atmosfera, a lunghezze d'onda tipiche della banda ottica, è dato da [Goodman, 1985, pag. 388]

$$\Delta n = -\frac{79P}{T^2} 10^{-6} (1 + 7 \cdot 10^{-3} \lambda - 2) dT \quad , \quad (1.11)$$

con λ espresso in μm , P pressione atmosferica in millibar e T temperatura in gradi kelvin. Come si può notare, le fluttuazioni dell'indice di rifrazione sono pressoché indipendenti dalla lunghezza d'onda e dominate dalle fluttuazioni della temperatura T . Come mostrato anche da Kolmogorov [Goodman, 1985, pag. 392], nel caso dell'atmosfera la funzione di struttura definita dall'equazione 1.8 assume la forma

$$D_n(\Delta r) = C_n^2 r^{2/3} \quad , \quad (1.12)$$

con $C_n^2 = C_n^2(h)$ chiamata *costante di struttura dell'indice di rifrazione n* , che dipende dalle condizioni atmosferiche locali e varia con l'altezza h dal livello del suolo.

1.2.2 diametro di Fried r_0

Fried ha mostrato che, a partire dall'equazione 1.12, è possibile determinare la funzione di struttura dell'errore di fase introdotto dall'atmosfera. Tale funzione ha la seguente forma:

$$D_\psi = 6,88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3} \quad , \quad (1.13)$$

dove r_0 è chiamato parametro di Fried e corrisponde al diametro entro cui la distorsione ha uno scarto quadratico medio di 1rad^2 di fase:

$$r_0 = \left[0,423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sec z \int_0^{20\text{Km}} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \propto \lambda^{6/5} \quad , \quad (1.14)$$

dove z è la distanza zenitale. Grazie alla trasformata di Fourier dell'equazione 1.10, in cui si è tenuto conto dell'equazione 1.13, si ha che nel caso in cui $r_0 \ll D$, la risposta impulsiva ha una larghezza a mezza altezza confrontabile con λ/r_0 contro il risultato di λ/D ottenuto nel caso limitato solo dalla diffrazione. Per dare un'idea di come l'atmosfera degradi la qualità dell'immagine, basti pensare che si parla di *buon seeing* quando il valore di r_0 è superiore ai 15–18cm a $\lambda = 0,5\mu\text{m}$.

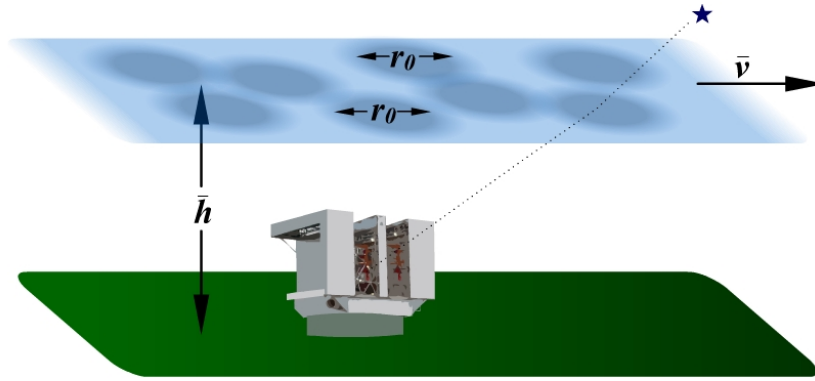


Figura 1.3: Modello semplificato di atmosfera secondo l'ipotesi di Taylor della "turbolenza congelata".

1.2.3 Tempo di coerenza t_0

Secondo l'ipotesi di Taylor, detta della "turbolenza congelata" (*frozen turbulence*), essendo la velocità del vento molto maggiore della velocità tipica di evoluzione della turbolenza, si assume l'atmosfera come un piano posto ad un'altezza media \bar{h} , composto di "cellette" statiche di diametro r_0 , che trasla orizzontalmente alla velocità media del vento \bar{v} (figura 1.3).

A partire da questa ipotesi definiamo il tempo di coerenza come

$$t_0 = 0,31 \frac{r_0}{\bar{v}} . \quad (1.15)$$

Dunque t_0 ci dà una misura del tempo durante il quale le condizioni dell'atmosfera restano costanti (1 – 15ms), ed è in pratica il tempo necessario affinché su un determinato punto del cielo, posto all'altezza h , transiti un'intera cella di diametro r_0 . La velocità media del vento \bar{v} viene stimata con palloni sonda, ed un valore tipico è 20 – 30m/s.

1.2.4 Angolo isoplanatico θ_0

L'*angolo isoplanatico* è la distanza (angolare) entro la quale la fase di due sorgenti differisce di meno di un radiante. In pratica è l'angolo sotteso da r_0 se si trova ad altezza \bar{h} (altezza media della turbolenza)

$$\theta_0 = 0,31 \frac{r_0}{\bar{h}} . \quad (1.16)$$

Normalmente il valore di \bar{h} è di 5 – 10km. Valori tipici del parametro di Fried, dell'angolo isoplanatico e del tempo di coerenza sono mostrati nella tabella 1.1.

		V	J	K
Lunghezza d'onda	λ [μm]	0,55	1,6	2,2
Parametro di Fried alla λ fissata	r_0 [cm]	17,4	62,7	91,8
Angolo isoplanatico	θ_0 [arcsec]	1,1	4,0	5,87
Tempo di coerenza	t_0 [ms]	2,7	9,7	14,2

Tabella 1.1: Valori dei parametri tipici di descrizione dell'atmosfera alle lunghezze d'onda delle bande V, J, K con una velocità del vento di 20m/s.

1.3 Il rapporto di Strehl e gli errori di fronte d'onda

La risposta impulsiva introdotta nell'equazione 1.1 è molto utile anche per fornire un'idea di quanto l'immagine limitata dalla turbolenza si avvicini a quella limitata solo dalla diffrazione. Questa idea trova una formulazione matematica nel *rapporto di Strehl*. Se indichiamo semplicemente con \vec{r}_c la posizione del pixel che contiene il massimo della figura di Airy, e con $\langle I(\vec{r}_c) \rangle$ una media di assieme per lunghe esposizioni dell'intensità centrale della PSF, possiamo definire il rapporto di Strehl come

$$S = \frac{\langle I(\vec{r}_c) \rangle}{I_{dt}(\vec{r}_c)} . \quad (1.17)$$

Quindi S sarà in generale inferiore all'unità, ed uguale ad 1 in condizioni ideali. Si può dimostrare che per valori dell'RMS di fase sulla pupilla del telescopio vale [Sandler, 1993]

$$S_\psi = e^{-\sigma_\psi^2} . \quad (1.18)$$

Capitolo 2

Ottica adattiva

Nel capitolo 1 è stato descritto il processo di formazione dell'immagine di un oggetto astronomico attraverso le ottiche di un telescopio, il modo in cui l'immagine viene deteriorata a causa della presenza dell'atmosfera, ed infine i parametri fondamentali che permettono di modellizzare la turbolenza atmosferica e caratterizzare il *seeing*.

In questo capitolo verrà descritta una tecnica per correggere in tempo reale gli effetti della turbolenza atmosferica: l'ottica adattiva.

Inoltre, analizzeremo le sorgenti di errore che limitano le prestazioni di un sistema adattivo in termini di residuo del fronte d'onda, e la relativa degenerazione dell'immagine limitata solo dalla diffrazione. Tali informazioni sono indispensabili per un'accurata stima dell'efficienza del sistema stesso.

2.1 Elementi essenziali di un sistema adattivo

Un tipico sistema di ottica adattiva è un complesso di strumenti che si può schematizzare in tre componenti principali:

- uno specchio correttore;
- un sensore di fronte d'onda;
- un sistema di controllo e ricostruzione.

Il funzionamento avviene come dalla figura 2.1: il fronte d'onda proveniente da una stella di riferimento (stella guida) viene distorto per effetto della turbolenza atmosferica, si riflette sullo specchio correttore e giunge al sensore di fronte d'onda. Esso rileva l'aberrazione, invia le informazioni all'elettronica di ricostruzione che calcola le deformazioni da applicare allo specchio correttore.

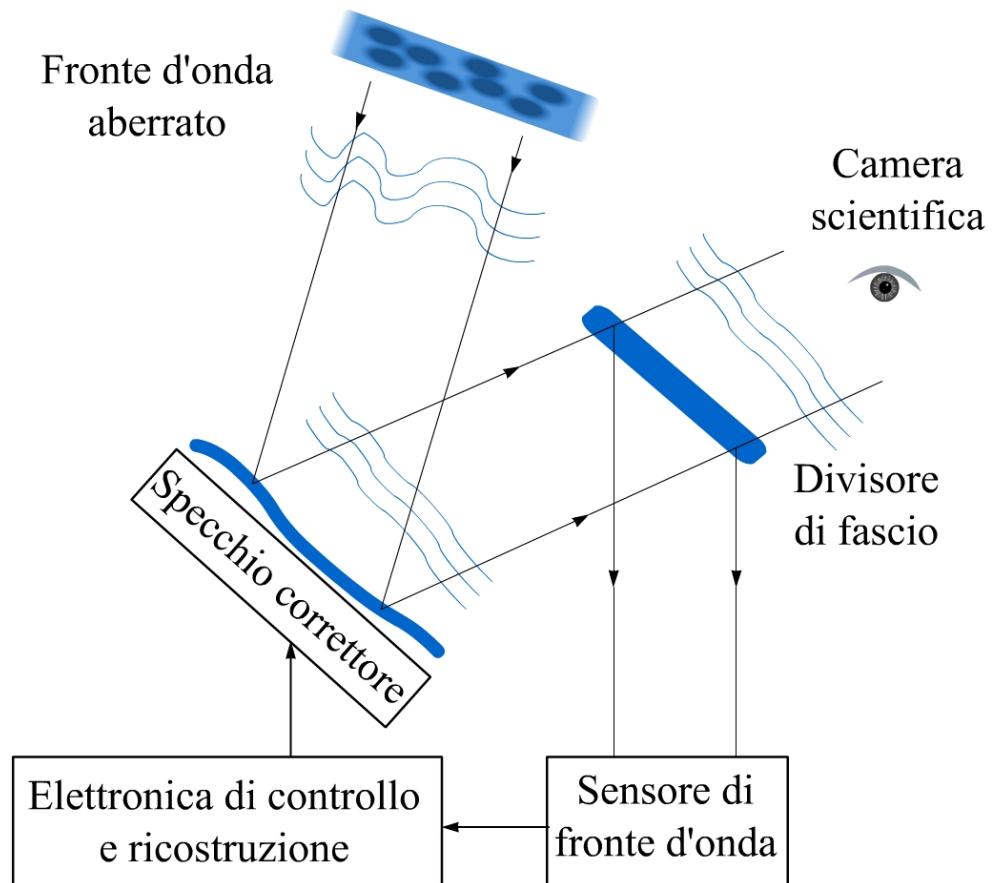
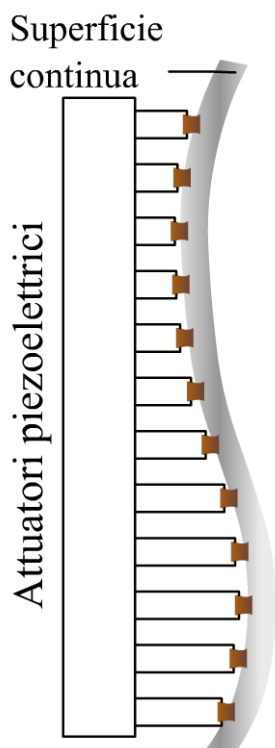


Figura 2.1: Schema generale di un sistema adattivo. il fronte d'onda viene distorto per effetto della turbolenza atmosferica, riflesso dallo specchio correttore e giunge al sensore di fronte d'onda che rileva l'aberrazione, invia le informazioni all'elettronica di ricostruzione che calcola le deformazioni da applicare allo specchio correttore.

Le deformazioni del successivo fronte d'onda, incidente sullo specchio, verranno in tal modo compensate. La distorsione residua sarà rilevata nuovamente dal sensore di fronte d'onda dando così il via ad un successivo ciclo d'operazioni. Dal momento che si tratta di un sistema a retroazione (quello che il sensore rileva sono i *residui* della correzione), si parlerà di sistema ad anello chiuso (*closed loop*).

2.2 Gli specchi correttori

Esistono diversi tipi di specchi correttori, ognuno di essi ha caratteristiche diverse come il numero di attuatori e la tecnologia di realizzazione. In questa sezione esamineremo brevemente i più comuni:



- gli specchi ad attuatori piezoelettrici,
- gli specchi piezoelettrici bimorfi,
- i secondari adattivi.

Per quanto riguarda il numero di attuatori, in prima approssimazione ne è richiesto *uno per cella di coerenza* della turbolenza atmosferica. Come è stato detto, tale cella ha dimensione r_0 , per cui il numero di attuatori richiesti è

$$n_{att} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \quad (2.1)$$

Per un telescopio da 8m, per esempio, il valore che si ottiene dall'equazione 2.1 alla lunghezza d'onda nel visibile (banda V, $0,55\mu\text{m}$) è di 1600 attuatori, mentre nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso (banda K, $2,2\mu\text{m}$) sono necessari 60 attuatori.

Figura 2.2: Esempio di specchio ad attuatori piezoelettrici

2.2.1 Specchi ad attuatori piezoelettrici

I materiali piezoelettrici sono materiali che subiscono una deformazione meccanica se sottoposti ad un campo elettrico. Questa caratteristica è stata osservata per la prima volta nei cristalli di quarzo. Attualmente il materiale

utilizzato per gli attuatori piezoelettrici degli specchi deformabili è *lo zirconato titanato di piombo* ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$), noto comunemente con la sigla PZT, costruito sottoforma di ceramica isotropica.

Gli specchi ad attuatori piezoelettrici sono strumenti dotati di una superficie continua riflettente dietro alla quale sono fissati un certo numero di attuatori che permettono di variarne la forma agendo sui punti di contatto. questi sistemi sono limitati in corsa degli attuatori a pochi micron ($\approx 5\mu\text{m}$). La piccola corsa richiede di correggere l'errore di piano (tip-tilt) con un correttore separato.

2.2.2 Specchi piezoelettrici bimorfi

Questo tipo di specchi prevede due superfici piezoelettriche incollate fra loro e collegate a massa, con un determinato numero di elettrodi-attuatori posti fra uno strato e l'altro, e disposti radialmente.

Dal momento che le superfici sono polarizzate in maniera diversa, applicando una

differenza di potenziale in un punto (tramite l'elettrodo), si ottiene la contrazione di uno dei due strati e la dilatazione dell'altro.

Questo effetto produrrà localmente una curvatura della struttura, dal momento che le due superfici incollate sono a contatto, come si vede dalla figura 2.3.

Il voltaggio di questo tipo di strumenti, tipicamente 100V, è proporzionale alla curvatura e può essere ridotto sfruttando connessioni in parallelo fra gli elettrodi

[Hardy, 1998]. Correttori di fronte d'onda di questo tipo sono disponibili con un numero di attuatori che varia dai 15 agli 80 a seconda della soluzione adottata.

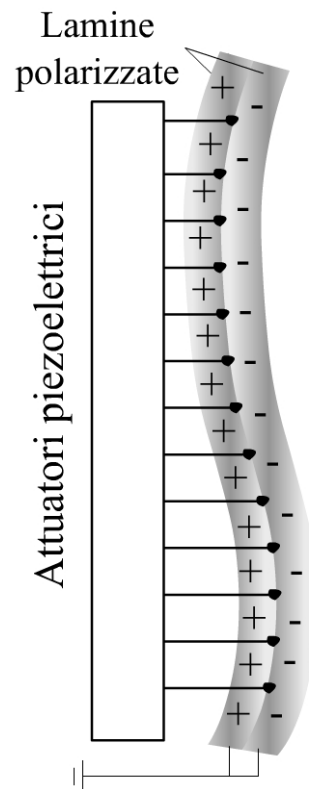


Figura 2.3: Esempio di specchio bimorfo

2.2.3 Specchi secondari adattivi

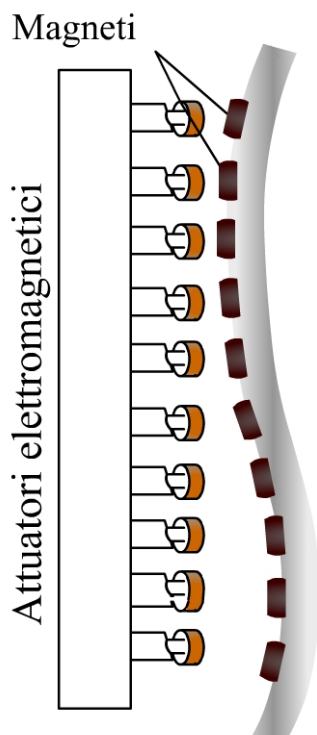


Figura 2.4: Esempio di specchio a levitazione magnetica, come il secondario adattivo.

Un particolare tipo di specchio correttore è il secondario adattivo, di cui presentiamo solo le caratteristiche essenziali in quanto verrà trattato dettagliatamente nel capitolo 3. Fra le peculiarità di questo strumento c'è il fatto di essere un sistema di correzione pre-focale (il tradizionale secondario del telescopio viene rimosso e sostituito con il secondario adattivo). Attuatori elettromagnetici (bobina-magnete), ricevuta una determinata corrente, creano un campo magnetico che muove un ugual numero di magneti incollati sul retro dello specchio in modo da variarne la forma (vedi figura 2.4). Grazie a questa assenza di contatto questo correttore di fronte d'onda ha limiti di posizione meno stringenti rispetto ai due strumenti descritti in precedenza, e permette di integrare in un'unica unità il correttore di

tip-tilt e quello di alti ordini.

2.3 Sensori di fronte d'onda

L'immagine della pupilla del telescopio, passata attraverso le ottiche collimatrici, giunge ad un dicroico. Questo elemento è in grado di rifrangere diversamente la luce a seconda della lunghezza d'onda. La parte di radiazione la cui λ è utile all'osservazione viene inviata direttamente alla camera scientifica; la porzione rimanente può essere dedicata alla rilevazione del fronte d'onda. La debole dipendenza della lunghezza d'onda dalle fluttuazioni dell'indice di rifrazione (equazione 1.11) permettono di effettuare la rilevazione nel visibile (sfruttando il basso rumore dei CCD ottici) ed eseguire la correzione per la camera scientifica nell'infrarosso.

I più comuni tipi di sensori a cui spetta il compito di rilevare le distorsioni del fronte d'onda sono

- il sensore Shack Hartmann,

- il sensore di curvatura,
- il sensore a piramide.

Il numero di punti di campionamento del fronte d'onda nel sensore dovrà essere dello stesso ordine del numero di attuatori per garantire un efficace uso dello specchio adattivo.

2.3.1 Sensore Shack Hartmann

Sviluppato a partire dal test di Hartmann [Shack and Platt, 1971], il Sensore Shack Hartmann si basa sul concetto che una superficie ondulata può essere ben approssimata da un certo numero di aree piane tangenti ad essa. L'immagine della pupilla (vedi sez. 1.1) viene riprodotta su una griglia di lenti. Ogni lente della griglia produce un'immagine dell'oggetto osservato sul CCD, come si vede nella figura 2.5.

Il CCD è suddiviso in tante sotto-pupille quadrate, costituite da almeno 4 pixel l'una¹, tante quante le lentine che costituiscono la griglia. In presenza di un fronte d'onda non aberrato, il baricentro delle immagini prodotte dalle singole lentine cade al centro di una sottoapertura. In presenza di un fronte d'onda aberrato, il baricentro dell'immagine sarà spostato angularmente rispetto a quello prodotto dal fronte d'onda piano in una posizione $(\vartheta_x, \vartheta_y)$.

Se ci si riferisce alle dimensioni angolari dello spot in cielo, allora lo spostamento angolare dal baricentro del punto in $(\vartheta_x, \vartheta_y)$ si può scrivere come

$$\vartheta_x = \frac{\vartheta_s}{2} \frac{n_a + n_c - n_b - n_d}{n_a + n_b + n_c + n_d} \quad (2.2)$$

$$\vartheta_y = \frac{\vartheta_s}{2} \frac{n_a + n_b - n_c - n_d}{n_a + n_b + n_c + n_d} \quad (2.3)$$

con n_a, n_b, n_c, n_d numero di fotoni incidenti rispettivamente sui quadranti a, b, c, d , in analogia alla figura 2.5. Ora, l'inclinazione del fronte d'onda consente di calcolarne la derivata prima:

$$(\vartheta_x, \vartheta_y) = \left(\frac{\partial \text{WF}}{\partial x}, \frac{\partial \text{WF}}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

Quindi, integrando in x ed y si ottiene il fronte d'onda a meno di una costante, cioè il termine di pistone².

¹Si usano minimo 4 pixel per valutare la posizione di uno spot incidente lungo le due dimensioni.

²Il pistone rappresenta il ritardo medio della fase dell'onda, mentre il tip-tilt l'inclinazione media del piano dell'onda. Il pistone è tuttavia ininfluente nella formazione dell'immagine.

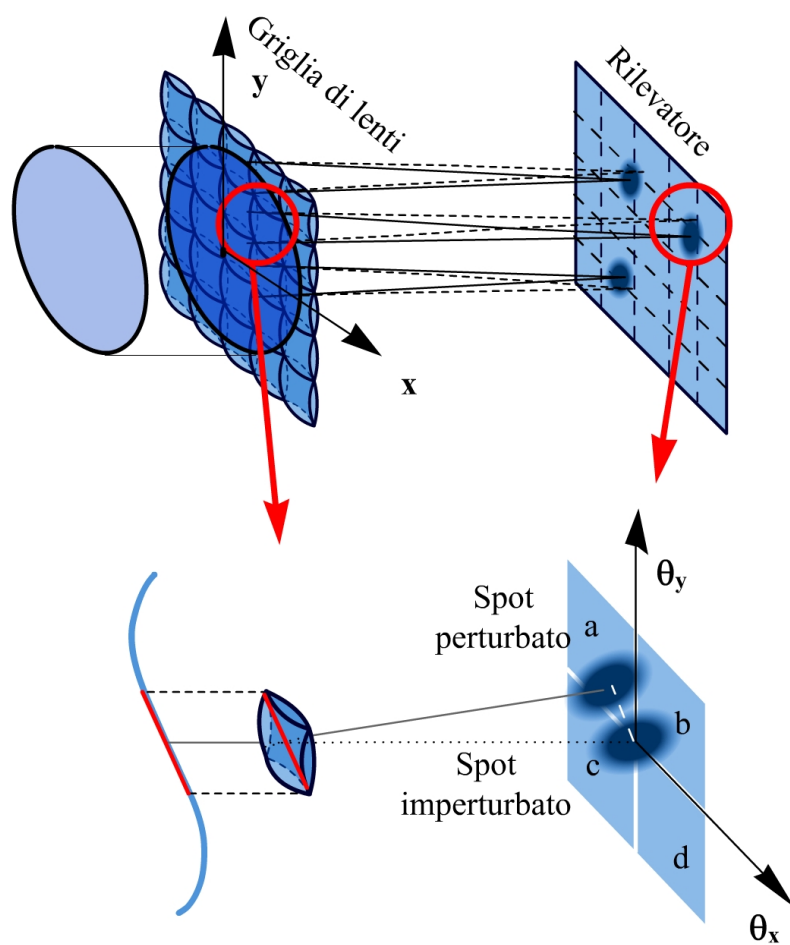


Figura 2.5: Il sensore Shack Hartmann è composto da una griglia di lenti che divide l'immagine sul CCD in numerose "sottopupille".

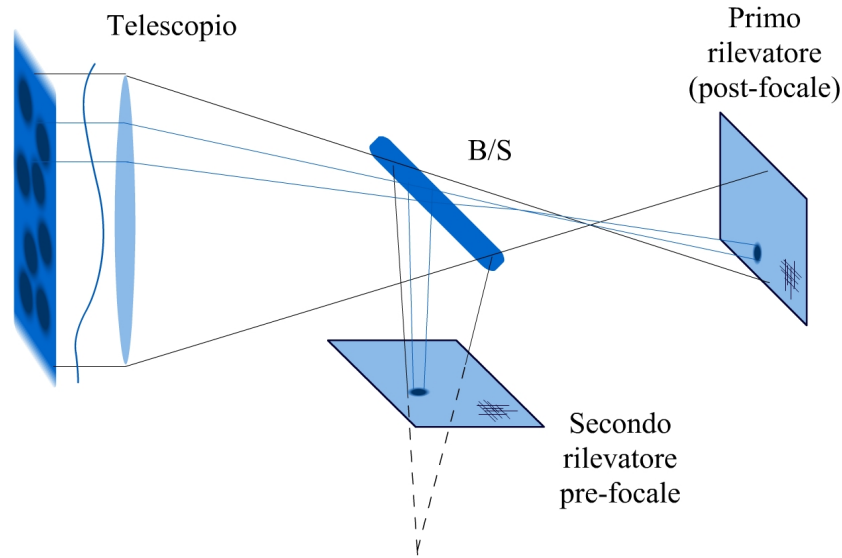


Figura 2.6: Schema del sensore di curvatura.

2.3.2 Sensore di curvatura

Il sensore di curvatura è un sistema capace di misurare la curvatura del fronte d'onda anziché la sua inclinazione (figura 2.6). Un divisore di fascio intercetta la luce prima del piano focale, deviandone ogni porzione su un diverso rivelatore. Il primo riceverà un'immagine "pre-focale", il secondo "post-focale". La differenza tra la distribuzione di luminosità sui due piani fornirà una misura della curvatura locale del fronte d'onda. Questo tipo di sensore misura perciò la derivata seconda del fronte d'onda, e non più la derivata prima come nel caso dello Shack Hartmann, per cui la curvatura nelle direzioni x ed y è data da

$$\mathcal{C}(x, y) = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \quad (2.5)$$

Integrando *due* volte si ottiene il fronte d'onda a meno di *due* costanti: tilt e pistone. Il tilt è rilevato nel sensore dalle zone di bordo della pupilla. Questa tecnica è stata sviluppata negli anni ottanta [Roddi, 1981] per essere accoppiata, in quanto sensore di curvatura, agli specchi bimorfi, correttori di curvatura.

2.3.3 Sensore a piramide

L'ottica adattiva mette a disposizione altre tecniche per rilevare la distorsione del fronte d'onda dovuta alla turbolenza atmosferica. Una di esse è il *sensore a*

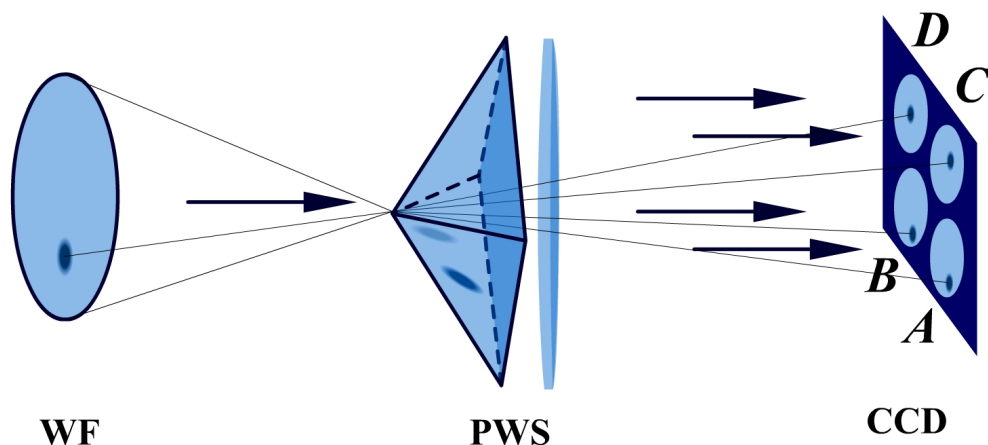


Figura 2.7: Proiezione dell'immagine della pupilla sul CCD tramite un sensore a piramide

piramide (Pyramid Wavefront Sensor, PWS), un sensore di fronte d'onda che consiste in un piccolo blocco di vetro piramidale a base quadrata accoppiato ad una lente obiettivo ed un rivelatore (figura 2.7). Il prisma devia la radiazione incidente in modo da formare quattro immagini separate della pupilla del telescopio sul rivelatore. Dalla distribuzione della luce sulle immagini della pupilla si può risalire alla derivata del fronte d'onda in maniera analoga a quanto descritto per il sensore Shack Hartmann [Ragazzoni, 1995].

Il sensore a piramide è una delle soluzioni adottate per i sistemi, basati sul secondario adattivo come specchio correttore, che riguardano il Grande Telescopio Binoculare.

2.4 L'elettronica di controllo e di ricostruzione

Il procedimento di ricostruzione, comune a tutti i sistemi adattivi, si basa su un sistema di calcolo computerizzato che fornisce le entità delle deformazioni da applicare allo specchio correttore. Poiché il sistema adattivo è a ciclo chiuso, il sensore di fronte d'onda rileva i residui della correzione che fluttuano attorno al segnale di zero. Per tale motivo il processo di ricostruzione può essere linearizzato ed implementato dunque come un prodotto matriciale. Le inclinazioni rilevate dal fronte d'onda vengono moltiplicate per una matrice, detta appunto *matrice di ricostruzione* ed indicata con R , ottenendo così una serie di comandi correttivi.

La matrice di ricostruzione è profondamente legata ad un'altra, detta

matrice d'interazione, che si misura fornendo deformazioni note allo specchio correttore, ed andando a rilevare le corrispondenti informazioni ricevute dal sensore di fronte d'onda.

Il sensore di fronte d'onda compie una misura dell'entità della perturbazione e ordina il tutto in un vettore di dimensione N , che è il numero di campionamenti effettuati dal rilevatore.

La matrice di ricostruzione moltiplica tali valori di inclinazione e li trasforma in un vettore di *comandi* di lunghezza pari a P , numero di attuatori dello specchio correttore. Quindi $R \in \mathbb{R}^{P \times N}$:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_P \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_N \end{pmatrix}$$

o più brevemente $c = RS$.

2.4.1 Misura della matrice di ricostruzione

Per ottenere la matrice di ricostruzione si usa una tecnica di algebra lineare detta "scomposizione in valori singolari" (*Singular Value Decomposition*, SVD), che permette di calcolare una matrice, detta *pseudoinversa* e indicata con $(+)$, da usare al posto dell'inversa nelle operazioni tra matrici singolari o non quadrate. La tecnica della SVD è descritta nell'appendice A.

Se si forniscono agli attuatori comandi tali da riprodurre un insieme di forme $c^{(k)}$ (con $k = 1 \dots M$) linearmente indipendenti sullo specchio, e si registrano i corrispondenti vettori $s^{(k)}$ dei segnali, allora possiamo scrivere

$$A \begin{pmatrix} c_1^{(1)} & \dots & c_1^{(M)} \\ \vdots & & \vdots \\ c_P^{(1)} & \dots & c_P^{(M)} \end{pmatrix} = \cdot \begin{pmatrix} s_1^{(1)} & \dots & s_1^{(M)} \\ \vdots & & \vdots \\ s_P^{(1)} & \dots & s_P^{(M)} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

o più brevemente

$$A \cdot C = S \quad (2.7)$$

dove A è la matrice d'interazione da calibrare. La matrice dei comandi, che in questo caso è un dato e non l'incognita, si può creare come base ortogonale di vettori di posizione in diversi modi. Una tecnica utile è quella di alzare un attuatore alla volta tenendo gli altri fermi, in modo tale da ottenere la matrice

identità:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & & & 0 \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \end{pmatrix} = \mathbb{I}$$

Quindi $A \cdot C = S \Rightarrow A \cdot \mathbb{I} = S \Rightarrow A = S$, cioè la matrice d'interazione A è data direttamente dalle misure dei segnali del sensore.

Passando alla matrice di ricostruzione, deve valere

$$C = RS \quad (2.8)$$

$$CS^+ = RSS^+ \quad (2.9)$$

$$R \approx CS^+ = S^+ \quad (2.10)$$

Ma in questo caso $A = S$, perciò $R = A^+$, cioè la pseudoinversa di A . In altri casi, cioè con differenti matrici dei comandi, il calcolo non è così immediato, ma la linea base è quella appena descritta.

2.5 Principali contributi all'errore di fronte d'onda per sistemi adattivi

Nei sistemi adattivi, più ci si avvicina alla correzione completa, tanto minori diventano gli errori residui di fase che abbassano il fattore di Strehl (equazione 1.17). Ne vengono elencati brevemente i maggiori contributi.

2.5.1 Fit del fronte d'onda

Come si vedrà nel prossimo capitolo, lo strumento in grado di correggere la turbolenza è uno specchio deformabile munito di un certo numero di attuatori elettromagnetici.

Naturalmente lo specchio non riuscirà ad adattarsi in modo infinitamente preciso alla forma del fronte d'onda perturbato. La disposizione geometrica degli attuatori e il loro numero definiscono il coefficiente c_{fit} ed il conseguente errore di fit

$$\sigma_{\phi_{fit}}^2 = c_{fit} \left(\frac{d}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (2.11)$$

dove d è la distanza fra gli attuatori proiettata sullo strato turbolento e $c_{fit} \approx 0,3$.

2.5.2 Decorrelazione temporale e frequenza di Greenwood

Precedentemente è stato introdotto il diametro di Fried r_0 , come la larghezza di “cellette” entro cui il ritardo di fase è minore di un radiante. A partire da r_0 è stato poi definito il tempo di coerenza t_0 (vedi eq. 1.15), entro il quale il profilo di turbolenza rimane sostanzialmente uguale. In un sistema a ciclo aperto viene stimata ogni certo tempo Δt l’entità della turbolenza atmosferica e viene apportata una correzione il cui errore è

$$\sigma_{\theta time}^2 = \left(\frac{\Delta T}{t_0} \right)^{\frac{5}{3}} . \quad (2.12)$$

Lavorando a ciclo chiuso, invece, quello che viene stimato e corretto è l’errore residuo. I sistemi ad anello chiuso vengono caratterizzati da una frequenza a -3db che definisce la larghezza di banda a -3dB tramite la frequenza di Greenwood f_G . La **frequenza di Greenwood** è una grandezza legata all’inverso del tempo di coerenza:

$$f_G = 0,1 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \sec(z) \int_0^\infty C_n^2(h) v^{5/3}(h) dh , \quad (2.13)$$

e numericamente la si può scrivere tramite i parametri fondamentali \bar{v} ed r_0 come

$$f_G = 0,43 \frac{\bar{v}}{r_0} = 0,43 \frac{0,31}{t_0} = 0,13 \frac{1}{t_0} . \quad (2.14)$$

L’errore di decorrelazione temporale per alti ordini, nel caso di un sistema ad anello chiuso, è sempre in funzione della frequenza di Greenwood:

$$\sigma_{\phi time}^2 = \left(\frac{f_G}{f_{-3\text{dB}}} \right)^{\frac{5}{3}} . \quad (2.15)$$

	$\lambda = 0,55\mu m$	$\lambda = 1,6\mu m$	$\lambda = 2,2\mu m$
r_0	f_G	f_G	f_G
10cm	3100Hz	860Hz	587Hz
15cm	2066Hz	573Hz	391Hz
18cm	1722Hz	478Hz	326Hz

Tabella 2.1: Valori della frequenza di Greenwood a vari λ ed r_0 con velocità del vento pari a 15m/s . La lunghezza d’onda alla quale si vuole osservare ha una grande importanza sulla progettazione del sistema di ottiche adattive, poiché a lunghezze d’onda più grandi (per esempio nell’infrarosso) la f_G è minore e quindi il fronte d’onda può venire corretto con maggior precisione.

La f_G è infatti la larghezza di banda a -3dB del sistema (come si può leggere più approfonditamente in appendice B), che dà una misura del tempo di campionamento.

Essa quindi è una misura di quanto debba essere veloce il sistema nel

- rilevare il fronte d'onda distorto;
- calcolare per ogni punto del rilevatore l'entità della turbolenza;
- calcolare i comandi da fornire ad ognuno dei punti dello specchio correttore (che non coincidono necessariamente con i punti del rilevatore);
- farsi trovare "pronto" a rilevare nuovamente il fronte d'onda distorto per ricominciare daccapo tutto il processo.

2.5.3 Anisoplanatismo per ordini superiori

Nel caso in cui la sorgente scientifica non sia sufficientemente brillante, la stella di guida per il sistema adattivo deve essere ricercata nei pressi di essa. A causa della decorrelazione angolare delle perturbazioni del fronte d'onda (vedi equazione 1.16), utilizzare una sorgente ad un angolo θ dall'oggetto scientifico comporta un contributo alla varianza di fase

$$\sigma_{\phi iso}^2 = \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{\frac{5}{3}} . \quad (2.16)$$

2.5.4 Rumore di rilevazione del fronte d'onda

La luminosità fornita dalla stella di guida introduce un errore fotonico nella misura dei segnali del sensore di fronte d'onda. Anche il rumore di lettura del rilevatore del sensore contribuisce a tale errore. Nel caso dello Shack-Hartmann, ad esempio, il centroide di ogni spot fornito da ciascuna lentina è determinato con un errore

$$\sigma_{\theta noise}^2 \propto w \frac{1}{\sqrt{N}} \left(1 + \frac{4n^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} , \quad (2.17)$$

dove w è la larghezza a mezza altezza dello spot, N è il numero di fotoni provenienti dalla stella di guida per tempo d'integrazione e per sottoapertura, e n è il rumore di lettura (*Read Out Noise*, RON).

2.5.5 Effetto cono dell'eventuale stella laser ed errore di ricostruzione

A 90km d'altezza dal suolo si trova un sottile strato di sodio spesso qualche chilometro. Una "stella artificiale" è l'effetto di un raggio laser, tipicamente alla lunghezza d'onda del doppietto del sodio, che viene puntato dal telescopio vicino alla sorgente luminosa che si vuole studiare (sempre che tale oggetto non abbia una stella naturale vicina e brillante da usare come guida del sistema adattivo). Il fascio di radiazione coerente eccita gli elettroni del sodio che, tornando nello stato fondamentale, emettono fotoni "accendendo" una piccola stella di riferimento vicina all'oggetto di studio. Poiché la stella laser non è all'infinito, il fronte d'onda propagato verso il telescopio "esplora" gli strati turbolenti dell'atmosfera in un cono e non in un cilindro come per l'oggetto scientifico osservato. Questo determina un errore nella rilevazione del fronte d'onda della sorgente scientifica che è valutato come

$$\sigma_{\phi_{cone}}^2 = \left(\frac{D}{d_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (2.18)$$

dove d_0 è una dimensione che varia come $\lambda^{6/5}$, e vale $\approx 4 - 5$ m in banda V. Purtroppo, a causa del fatto che il fascio della stella laser sale attraversando gli strati inferiori dell'atmosfera, e la sua luce viene rilevata a terra dopo che essa ha nuovamente attraversato gli stessi strati per giungere sul rilevatore, non si è grado di distinguere i due contributi di tip-tilt. La misura del termine di tip-tilt della sorgente luminosa, non essendo permessa dalla stella laser, dovrà essere effettuata tramite una stella naturale.

Concludendo, l'errore totale del residuo di fase sarà la somma dei vari contributi:

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_{\phi_{cone}}^2 + \sigma_{\phi_{rec}}^2 + \sigma_{\phi_{time}}^2 + \sigma_{\phi_{iso}}^2 + \sigma_{noise}^2$$

Questo valore verrà sostituito nell'equazione 1.18 per ottenere il valore del Rapporto di Strehl per ordini superiori.

Capitolo 3

Il Secondario adattivo

Nel capitolo precedente abbiamo mostrato che uno dei componenti principali di un sistema ottico adattivo è il correttore di fronte d'onda. Abbiamo introdotto, inoltre, una tecnologia innovativa per implementare tale componente: il secondario adattivo. La possibilità di usare i secondari come specchi deformabili di un sistema di ottica adattiva ha numerosi vantaggi, sia dal punto di vista delle soluzioni tecniche, sia come possibilità di configurazione

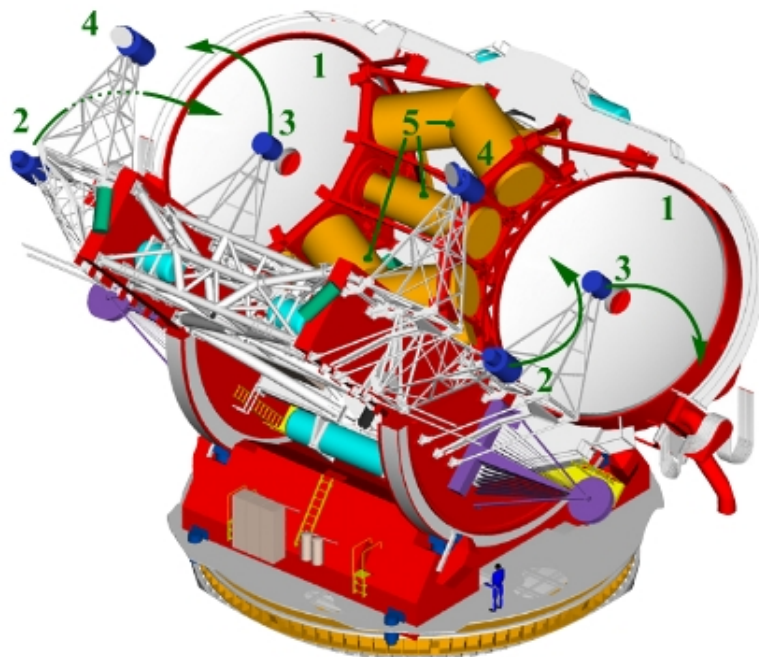


Figura 3.1: Disegno dell'LBT. Si vedono nell'ordine: gli specchi primari (1), le camere a grande campo LBC (2), gli specchi di ripiegamento del fuoco gregoriano sopra alla posizione dei MODS (3), i secondari adattivi (4), la posizione degli strumenti LUCIFER, LINC-NIRVANA E LBTI (5).

nel complesso del Grande Telescopio Binoculare (*Large Binocular Telescope*, LBT), che prevede ben dieci stazioni focali: due ai primi fuochi, due ai fuochi gregoriani e sei ai fuochi gregoriani ripiegati. In questo capitolo, dopo una panoramica sulle caratteristiche dell'LBT e su tali strumenti, verrà studiato in dettaglio il progetto del secondario adattivo, con una speciale attenzione ai sensori capacitivi quale sistema di metrologia interna. Infine sarà descritto il prototipo P45, in fase di prova presso i laboratori di Arcetri, le cui calibrazioni sono l'oggetto di questa Tesi.

3.1 Il corredo di strumenti scientifici dell'LBT

L'LBT, collocato sul monte Graham in Arizona, è un telescopio a doppia pupilla a montatura altazimutale in configurazione gregoriana, ottimizzato per interferometria e osservazione a grande campo. L'informazione viene raccolta da due grandi specchi primari parabolici di 8,4m ciascuno. Ognuno di questi specchi produce un fuoco primario $F/1,14$. Il fascio è poi riflesso dal secondario concavo ellissoidale in configurazione gregoriana che fornisce un fuoco $F/15$ agli strumenti scientifici. Il secondario è sottodimensionato in modo da utilizzare solo la parte riflessa dalla porzione interna di 8,22m del primario. In questo modo si garantisce che solo la luce proveniente dal cielo giunga al rilevatore scientifico, e non la radiazione proveniente dall'ambiente. Ciò è fondamentale per le osservazioni infrarosse, per le quali l'ambiente ($\approx 300^\circ\text{K}$) ha il suo picco di emissione ad una lunghezza d'onda di $\approx 10\mu\text{m}$. Se questa radiazione venisse riflessa verso il rilevatore scientifico, introdurrebbe un fondo le cui fluttuazioni potrebbero essere più grandi dei segnali delle sorgenti astronomiche osservate rendendole non rilevabili.

Strumenti collegati ai due primi fuochi

I due fasci ottici, una volta incontrato il primario, procedono il loro cammino concentrandosi nei *primi fuochi*, dove possono essere rilevati dalle camere a grande campo (*Large Binocular Camera*, LBC). I due canali sono ottimizzati per due diverse bande di osservazione: U e B per il canale blu, V, R, I, Z per il canale rosso. In questo modo è possibile osservare contemporaneamente lo stesso oggetto usando diversi filtri. Le LBC sono in grado di coprire un campo di vista di ben 30 minuti d'arco dopo che una serie di sei lenti ha corretto le principali aberrazioni ottiche.

I fuochi gregoriani diretti e gli strumenti MODS

Quando gli astronomi non utilizzano il primo fuoco, i bracci meccanici su cui le camere a grande campo sono montate ruotano verso l'esterno permettendo alla luce di proseguire oltre il fuoco fino ad arrivare ai secondari. La luce riflessa giunge fin sotto il primario (forato), al fuoco gregoriano diretto. Qui si trovano i doppi spettrografi multi-oggetto (*Multi-Object Double Spectrograph*, MODS), capaci di misurare più spettri grazie ad una fenditura multipla. Anche questi strumenti, come le LBC, sono ottimizzati per due diverse bande di osservazione.

Le sei stazioni focali dei fuochi gregoriani ripiegati

Grazie a bracci meccanici semovibili analoghi a quelli che sorreggono le camere a grande campo, due specchi terziari piani a 45° possono intercettare la luce prima che questa superi il primario. I due fasci vengono così ripiegati verso la parte interna del telescopio, dove sono sistemate tre coppie di strumenti in corrispondenza dei fuochi gregoriani. Ogni terziario potrà, quindi, mandare la luce ora ad uno strumento, ora ad un altro ruotando semplicemente attorno all'asse ottico del primario.

Concludendo, l'unico specchio secondario deformabile sarà utilizzato sia dagli spettrografi che da tutte le stazioni focali interne [Carbillet et Al, 2004]:

- lo spettrometro e camera **LUCIFER**, con correzione adattiva delle immagini nelle bande J, H e K. Esso sarà il primo strumento ad utilizzare la correzione adattiva fornita dal secondario e del sensore di fronte d'onda a piramide posto all'interno del suo derotatore.
- L'interferometro **LBTI**, che lavora alle lunghezze d'onda $8,0 - 9,5\mu\text{m}$ e $10,0 - 12,4\mu\text{m}$, composto da:
 - un combinatore di fasci;
 - un interferometro di annullamento;
 - una camera di annullamento.

Questi strumenti servono a formare immagini del campo nelle vicinanze della stella, escludendone la luce sfruttando l'interferenza distruttiva, per cercare oggetti deboli come dischi di polveri e

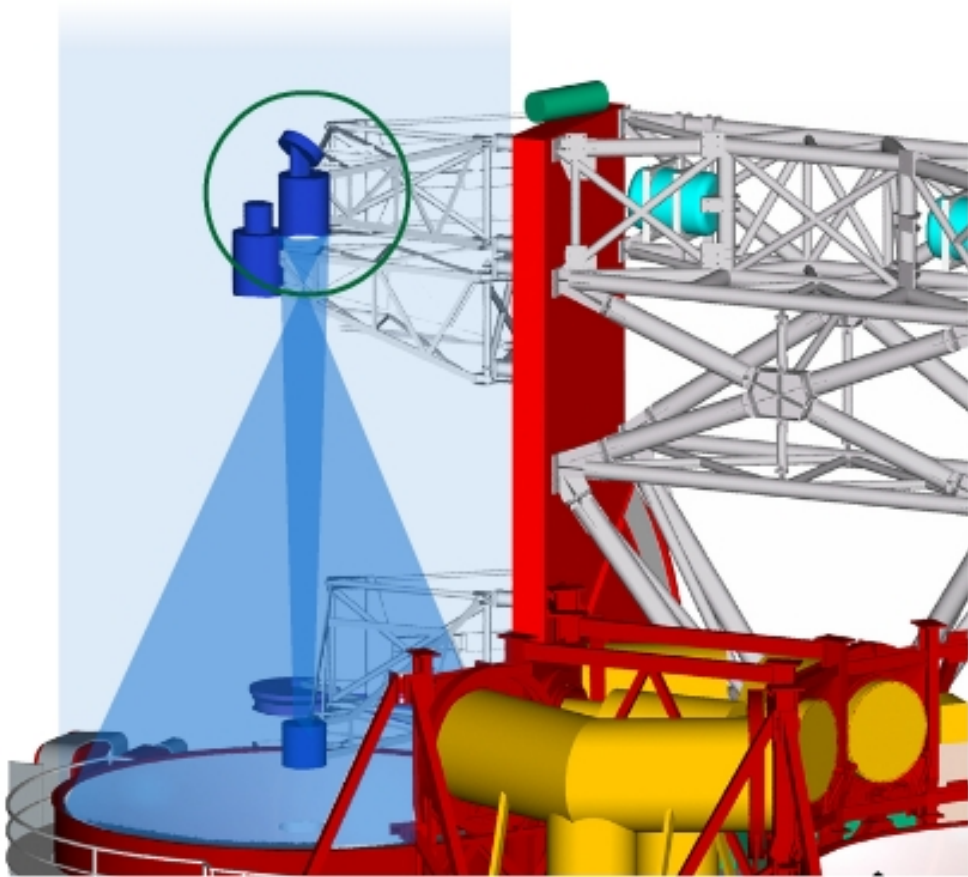


Figura 3.2: Posizione del secondario nel complesso dell'LBT

pianeti extrasolari. Per un efficace livello d'annullamento è richiesto l'uso dell'ottica adattiva.

- Il sistema interferometrico multi-coniugato **LINC-NIRVANA**, che lavora alle lunghezze d'onda del visibile e del vicino infrarosso, con integrato un sofisticato sistema di ottica adattiva multi-coniugata [Gaessler et Al, 2004] che sfrutta la tecnica dell'ottica adattiva “*layer oriented*”. In questo sistema il secondario fornisce la correzione adattiva delle perturbazioni di fronte d'onda, introdotti dagli strati bassi dell'atmosfera (*ground layer*).

3.2 Il progetto dell'unità LBT672a

Così come per le camere a grande campo e gli specchi di ripiegamento del fuoco gregoriano, altri bracci meccanici possono ruotare per introdurre i due specchi secondari adattivi che sostengono (vedi figura 3.2). Ognuna di queste due unità è costituita da uno specchio concavo del diametro di 911mm e spesso 1,6mm per renderlo deformabile, montato su un corpo di riferimento spesso 50mm munito di 672 attuatri elettromagnetici, controllati da una serie di 168 schede DSP ed associati ad un circuito analogico basato su sensori capacitivi per la guida e la rilevazione della posizione. Il secondario adattivo per l'LBT è stato sviluppato dall'INAF – Osservatorio astronomico di Arcetri. La fase di ingegnerizzazione è stata affidata a due ditte italiane: la *Microgate* di Bolzano per l'elettronica e la *ADS* per la meccanica. La caratterizzazione elettromagnetica ed ottica, nonché la produzione del codice di gestione e diagnostica è gestita direttamente dall'INAF (Arcetri). La produzione delle parti in vetro è stata affidata alla *Mirror Lab* dello Steward Observatory (USA).

3.2.1 Elenco dei componenti significativi

Come mostrato dalla figura 3.3, il collegamento meccanico fra i sostegni strutturali e ogni unità LBT672¹ è fornito da un **esapodo (1)**, che permette di allineare il secondario con primario e strumenti. Collegato alla flangia mobile dell'esapodo è fissato un supporto strutturale per l'unità e l'elettronica, al quale sono fissate le **scatole raffreddate a liquido (2)**. Ognuna

¹I suffissi “a” e “b” dopo la sigla “LBT672” distinguono ognuno dei due secondari adattivi. D'ora in poi ci si riferirà al primo dei due.

delle scatole conterrà due telai contenenti 28 **schede DSP**² più altre 4 per il controllo e la diagnostica dei 672 **attuatori** [Riccardi et Al, 2003]. All'interno di ogni telaio, le DSP sono disposte in due diverse pile tramite apposite guide, ognuna in grado di contenere 14 schede e provvista di un cablaggio indipendente, così come indipendenti sono i cavi di comunicazione e i segnali di riferimento. L'estrema potenza di calcolo parallelo di questo sistema (121Gflop/s) consente di usare l'elettronica stessa di controllo del secondario come ricostruttore in "tempo reale" del fronte d'onda. Un supporto in alluminio chiamato **piastra di raffreddamento (3)** (o *cold plate*) assicura la dispersione di calore degli attuatori, ed è collegato al sostegno strutturale da un esapodo fisso. Tubicini in rame, che percorrono le cavità della piastra, veicolano la circolazione del liquido di raffreddamento. Collegati alla piastra vi sono i 672 **attuatori elettromagnetici** (figura 3.4), disposti in 14 anelli concentrici con simmetria a 120°, composti da:

- una barretta di raffreddamento (o *cold finger*) a contatto con la piastra di alluminio. Essa servirà, oltre che come perno di aggancio alla piastra, a disperdere il calore prodotto dalla schedina di pre-amplificazione e della bobina descritti in seguito;
- una bobina che fronteggia il corrispondente magnete incollato sul retro dello specchio. Immediatamente dietro alla bobina e all'interno della barretta di raffreddamento è sistemato un

²Microprocessori utilizzati per il trattamento di segnali digitali (*Digital Signal Processors*).

	Unità di misura	Valore
Diametro dello specchio	[mm]	911
Spessore dello specchio	[mm]	1,6
Forma dello specchio		Concava/Ellissoide
Massa del disco più i magneti	[Kg]	4,37
Numero di attuatori		672
Massa totale della struttura	[Kg]	254
Numero di attuatori per DSP		2
Numero totale di schede DSP		336
Potenza di calcolo delle DSP	[Mop/s]	360
Potenza di calcolo complessiva	[Gop/s]	121
Velocità di comunicazione	[Mbit/s]	2900
Velocità della diagnostica	[Mbit/s]	400

Tabella 3.1: Alcune caratteristiche dell'LBT672a

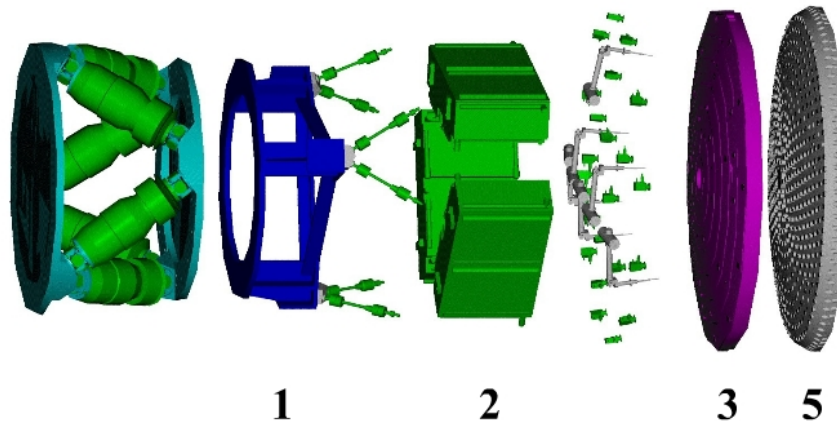


Figura 3.3: Esploso del secondario a 672 attuatori. Si vedono la struttura di supporto (1), i telai raffreddati a liquido per l'elettronica (2), la piastra di raffreddamento (3) e il piatto di riferimento (5)

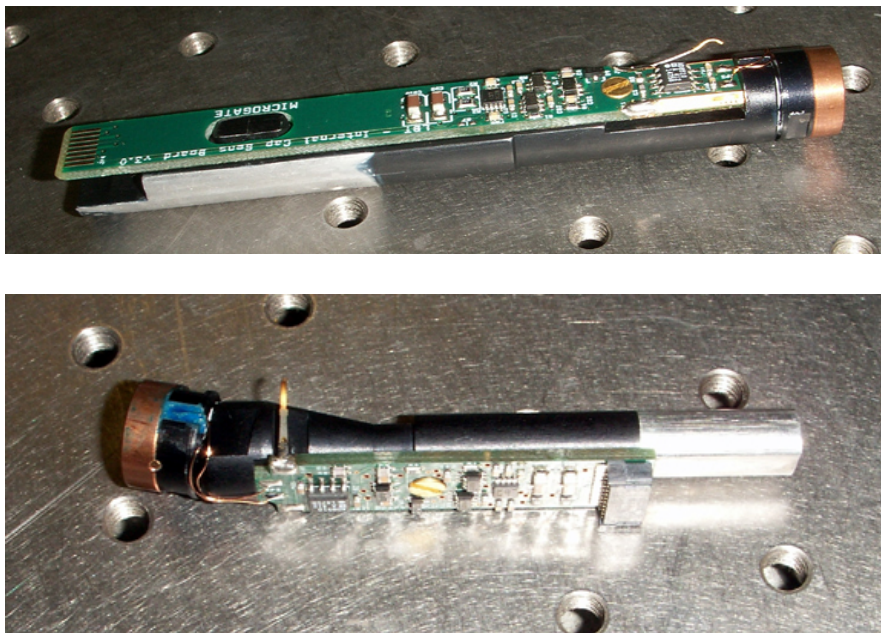


Figura 3.4: Due diversi tipi di attuatori per l'LBT672: il primo è quello usato anche nel prototipo P45, il secondo è piegato per adattarsi alla quattordicesima ed ultima cerchia di attuatori.

magnete di sicurezza (*bias magnet*), per non permettere al disco di cadere qualora mancasse la corrente, il tutto protetto da una copertura in rame;

- una schedina di pre-amplificazione del segnale del sensore capacitivo, che sarà digitalizzato nelle schede DSP per rilevare ad una frequenza di 70Hz la posizione dello specchio sottile rispetto al disco di riferimento;
- due contatti per raccogliere il segnale analogico di posizione che mettono in contatto il bordo interno dorato del foro con la schedina.

Il **disco di riferimento (5)** (o *reference plate*) è in vetro Zerodur³, spesso 50mm e provvisto di fori *alesati*⁴ dentro i quali sono infilati (dal basso) gli attuatori.

Tale supporto è usato come riferimento per la posizione dello specchio deformabile grazie ai sensori capacitivi accoppiati ad ogni attuatore.

3.2.2 I sensori capacitivi

I sensori capacitivi sono uno degli elementi che contraddistinguono l'idea del secondario adattivo. Sulla superficie interna di ogni foro del disco di riferimento, e su un anello che circonda il foro di ogni attuatore, viene depositato un leggero strato di oro 3.5. L'anello formerà un capacitore anulare con la superficie posteriore alluminata dello specchio deformabile (figura 3.2.2). Il funzionamento del sensore è il seguente: un voltaggio di riferimento V_{rif} è iniettato sulla superficie posteriore dello specchio sottile, e l'amplificatore produce un voltaggio V_u proporzionale al segnale d'ingresso. C_{stra} schematizza le capacità parassite del circuito. Se indichiamo con S e δ rispettivamente l'area e la distanza fra le armature della capacità C_{mis} , allora si ha [Brusa et Al, 1998]

$$\delta = \frac{\delta_0}{v - c} , \quad (3.1)$$

dove

$$\delta_0 = \frac{\epsilon_0 S}{C_{rif}} ; \quad c = \frac{C_{stra}}{C_{rif}} ;$$

$$v = \frac{V_u}{V_{rif}} ; \quad C_{mis} = \frac{\epsilon_0 S}{\delta} .$$

³Particolare tipo di vetro ceramico a bassissimo coefficiente di dilatazione termica $\approx 2 \times 10^{-8} K^{-1}$.

⁴*Alesare*: levigare, rifinire un foro per regolarne il diametro.

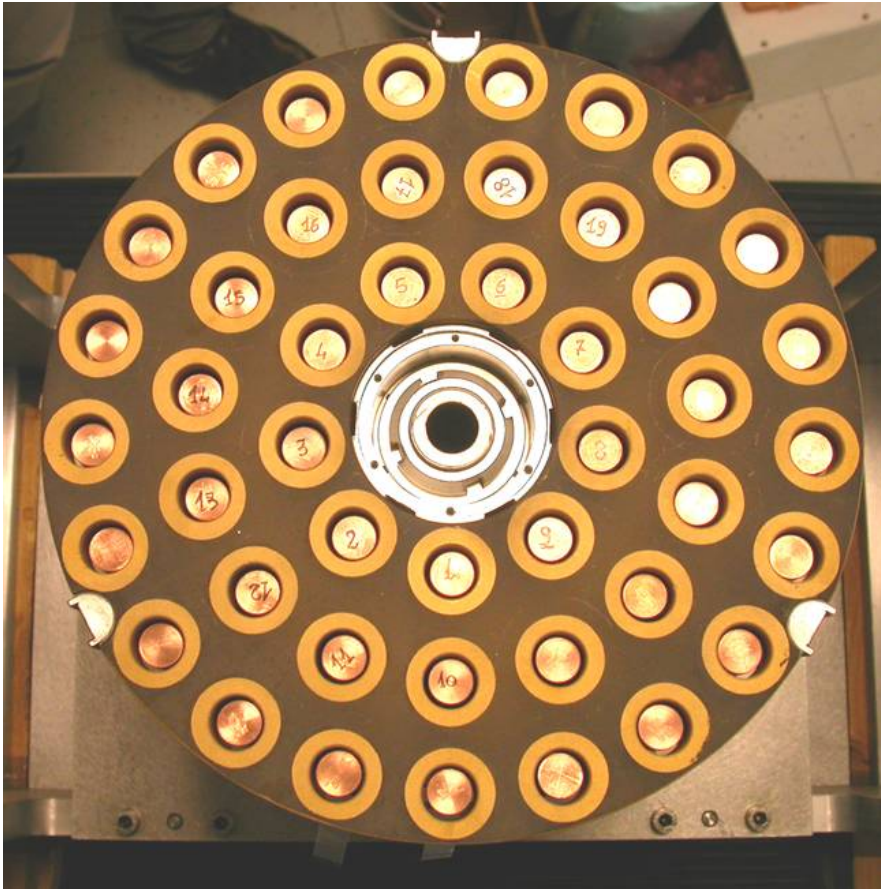


Figura 3.5: Aree anulari dei sensori capacitivi sotto il disco di riferimento del prototipo P45.

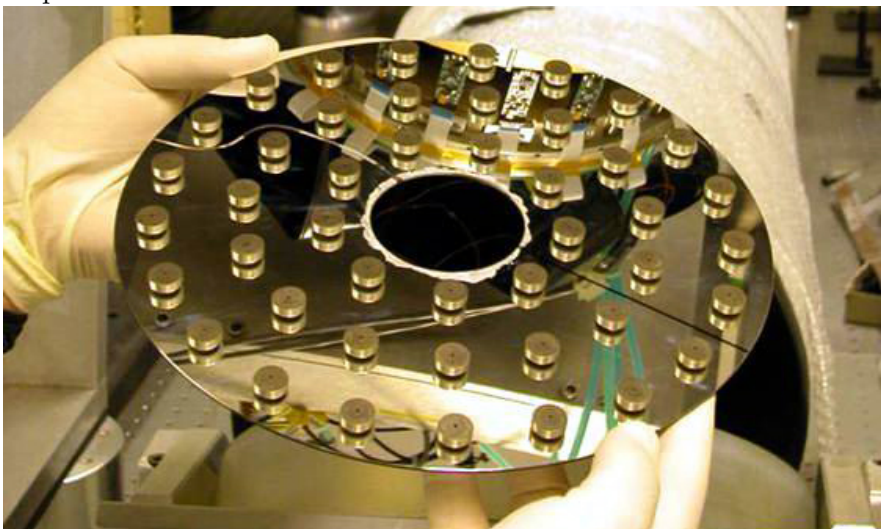


Figura 3.6: Retro dello specchio sottile del prototipo P45. Si vedono i 45 magneti disposti su tre anelli concentrici.

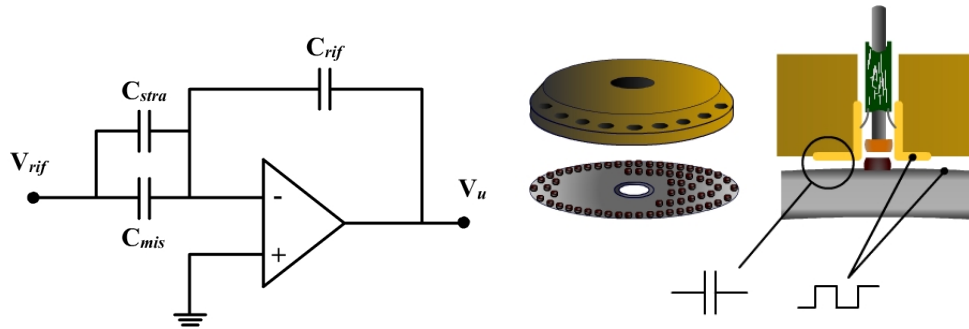


Figura 3.7: Schema del sensore capacitivo e disegno che mostra le due armature del condensatore.

Questo risultato permette di ottenere la distanza locale δ dello specchio sottile dal disco di riferimento misurando V_u . Tale misura richiede **calibrazione dei parametri** δ_o e c .

Valori tipici per C_{stra} sono dell'ordine di qualche pF, contro i ≈ 55 pF di C_{rif} .

3.2.3 Lo specchio

Lo specchio è un sottile disco in vetro Zerodur spesso 1,6mm provvisto di piccoli magneti (figure 3.8) incollati sul retro. Il disco è alluminato su ambo i lati: la superficie convessa funge da una delle armature del condensatore sopra descritto, quella concava rifletterà la luce proveniente dal primario. La forma dello specchio è una porzione di ellissoide di rotazione, con l'asse minore di circa un metro (distanza dal fuoco primario). Lo specchio sottile è fissato al resto dell'unità tramite una **membrana** centrale (figura 3.9), un anello di titanio

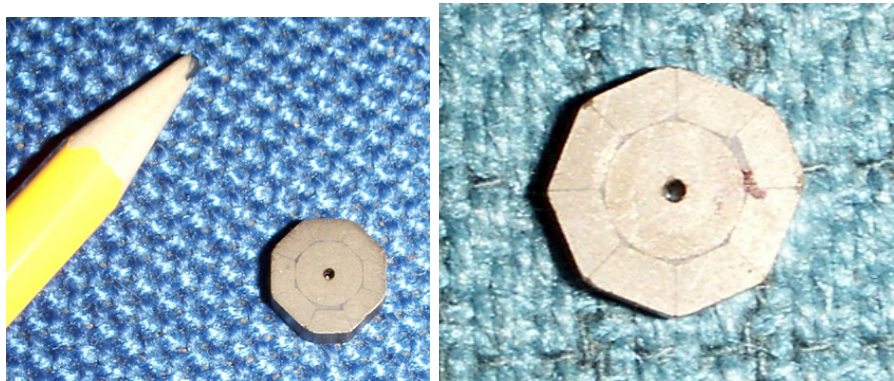


Figura 3.8: Magneti del prototipo che saranno usati anche nel modello definitivo. la forma ottagonale e l'assemblaggio a più segmenti permettono di ottimizzare la direzione delle linee di flusso del campo magnetico.

reso flessibile grazie a degli intagli fatti in modo da permettere allo specchio di compiere senza impedimenti i movimenti di pistone e tilt, ma bloccare quelli di rotazione attorno all'asse ottico e di slittamento sul piano dello specchio. Questi movimenti non sono controllati dagli attuatori, che assicurano solo forze di controllo assiali. Inoltre la membrana integrerà la forza di richiamo propria

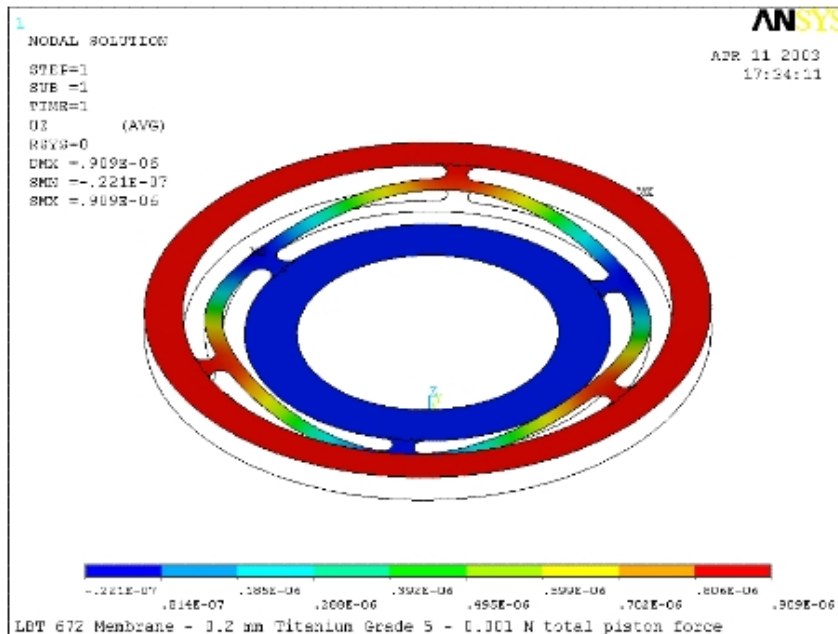


Figura 3.9: Disegno progettuale della flessibile membrana interna per l'LBT672a.

della geometria quando il telescopio sarà inclinato a grandi angoli zenitali. Vale la pena ricordare che, quando lo strumento non è in uso, lo specchio *non è sorretto dalla membrana*, ma dai magneti di sicurezza degli attuatori. Sono poi gli attuatori che forniscono il campo magnetico necessario per spingere verso il basso lo specchio fino alla distanza di lavoro $\approx 70\mu\text{m}$ e lo mantengono stabilmente in posizione.

3.2.4 Breve descrizione del ciclo esterno

Come è stato spiegato in precedenza (sezione 2.4), la forma del fronte d'onda rilevata dal sensore di fronte d'onda è rappresentata da un vettore, chiamato vettore delle inclinazioni (o delle *slope*), che verrà elaborata per estrarne dapprima i comandi e poi le correnti appropriate da fornire agli attuatori

del secondario adattivo. Il procedimento è molto articolato, e viene diviso in due diversi *cicli* di operazioni. Il primo, detto ciclo esterno e articolato come nella parte verde della figura 3.10, è svolto dall'elettronica del secondario, e trasforma il vettore delle inclinazioni in comandi modali tramite il processo di ricostruzione descritto nella sezione 2.4.1.

3.2.5 Breve descrizione del ciclo interno a $70kHz$

Il secondo ciclo (ciclo interno) è una caratteristica di questo secondario adattivo. Esso calcola, a partire dai comandi, le forze e le corrispondenti correnti degli attuatori per agire sulla forma dello specchio, ad una frequenza di $70kHz$. Si può seguire il procedimento nello schema particolareggiato del ciclo interno della parte arancione in figura 3.10).

Il guadagno proporzionale

L'errore di posizione e (comando - posizione) viene amplificato da una costante G di guadagno proporzionale, che si comporterà come costante elastica di un sistema massa-molla del tipo " $F = Ge$ ". Le dimensioni di G sono infatti $[N/\mu m]$. In assenza di smorzamento, il sistema comincerebbe ad oscillare indefinitamente. Tale guadagno, da solo, non è sufficiente a fornire un controllo soddisfacente delle operazioni. Un aiuto viene dalla piccola distanza fra la superficie posteriore dello specchio e il disco di riferimento. Lavorando alla distanza ottimale di $42 - 45\mu m$, l'aria intrappolata fra i due oggetti fornirà lo

Anello	n° attuatori	Angolo	R sen Angolo
1	9	1,2614	0,308193267
2	15	2,1498	0,52517199
3	21	3,0382	0,742024453
4	27	3,9266	0,958698521
5	33	4,815	1,175142104
6	39	5,7034	1,391303163
7	45	6,5918	1,607129731
8	51	7,4802	1,82256992
9	57	8,3686	2,037571933
10	63	9,257	2,252084083
11	69	10,1454	2,466054795
12	75	11,0338	2,679432629
13	81	11,9222	2,892166284
14	87	12,8106	3,104204617

Tabella 3.2: Distribuzione degli attuatori sui diversi anelli

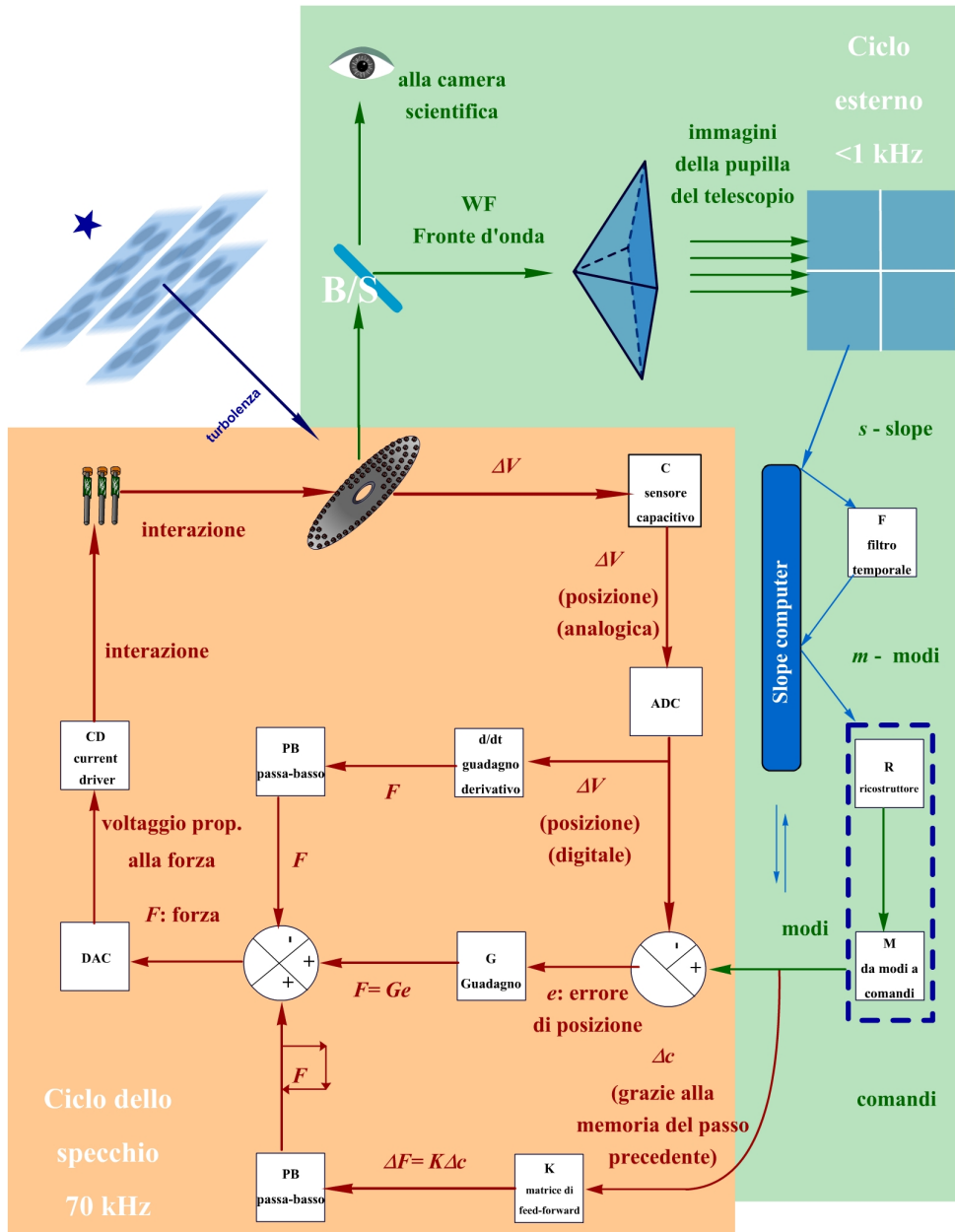


Figura 3.10: Schema complessivo delle operazioni nei due cicli. Non descritti nel testo si notano i driver di corrente (*current driver*), i convertitori da analogico a digitale e viceversa (DAC e ADC)

smorzamento viscoso necessario a smorzare l'oscillazione [Brusa et Al, 1999] e rendere il sistema controllabile.

Il guadagno derivativo

Lavorare con le due componenti così vicine fra loro, però, limita l'ampiezza dei movimenti dello specchio. Per ovviare a questo problema è stato introdotto il guadagno derivativo, una forza applicata dagli attuatori proporzionale ed opposta alla derivata della posizione rilevata dai sensori capacitivi. Si tratta di un vero e proprio smorzamento viscoso elettronico grazie al quale si può allargare fino ad una distanza di $100\mu\text{m}$ il divario fra lo specchio ed il disco di riferimento [Riccardi et Al, 2003]. Naturalmente alzare i guadagni derivativi migliora il tempo di risposta ma introduce anche un'amplificazione del rumore elettronico, che cresce linearmente con la frequenza, e perciò limitata grazie ad un opportuno filtro passa-basso PB.

La spinta aggiuntiva a ciclo aperto (o *Feed forward*)

Purtroppo, per effetto del ritardo all'interno del *loop* e le limitazioni della componente derivativa, il guadagno applicabile ha un limite superiore. Superata tale soglia il sistema inizia ad oscillare e non è più controllabile. Quando la rigidità dei modi è maggiore del guadagno impostato, il controllo non riesce ad applicarli con l'ampiezza richiesta. Per permettere al modo di raggiungere tale ampiezza si aggiunge a *loop* aperto un'ulteriore componente di forza che è uguale alla forza statica necessaria ad ottenere la deformazione richiesta. Tale forza è chiamata *Feed Forward*. Il legame tra forze comandate c e posizioni raggiunte x rilevate dai sensori capacitivi è dato dalla *matrice di feed forward* K , che lega queste due quantità tramite la relazione

$$c = Kx \quad . \quad (3.2)$$

3.3 Il prototipo P45

I progressi continui nel campo della tecnologia, e l'esperienza accumulata durante la costruzione del secondario a 336 attuatori del telescopio MMT, hanno reso possibile progettare i secondari del Grande Telescopio Binoculare in modo da aggiornare le caratteristiche obsolete, consolidare quelle redditizie e sperimentare nuove soluzioni. La complessità di questi strumenti ha reso

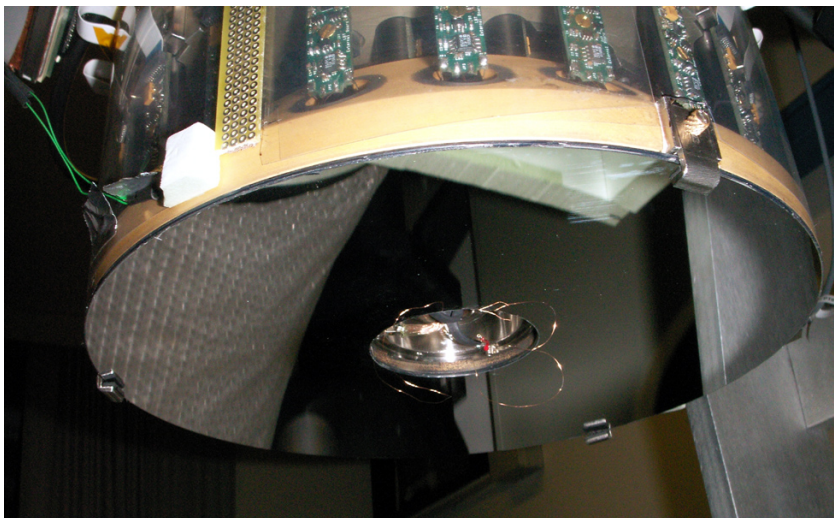


Figura 3.11: Specchio alluminato del P45. In prossimità del foro centrale si vedono i fili di rame che iniettano l'onda quadra sul retro alluminato dello specchio.

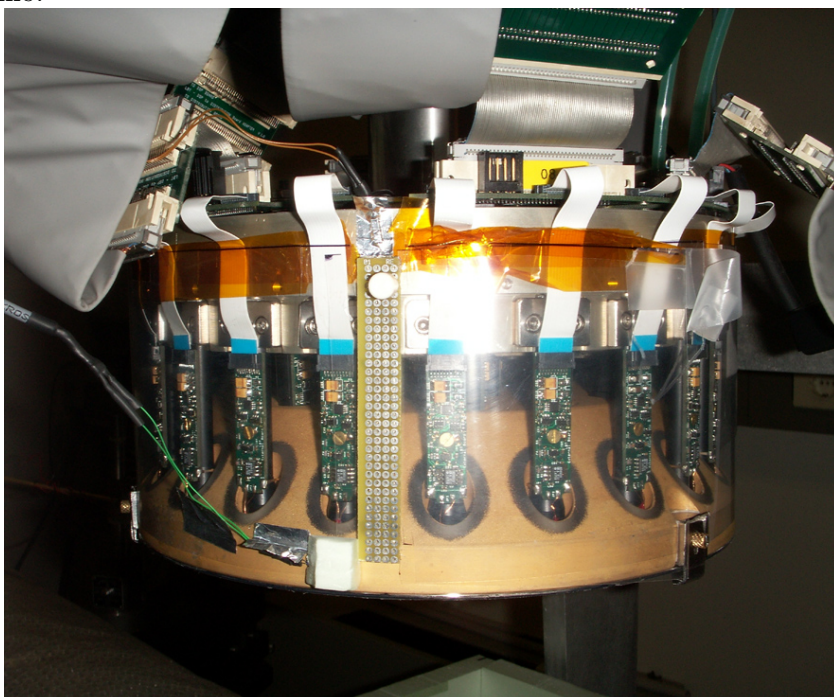


Figura 3.12: Montatura del P45. Sopra la shell si vede il piatto di riferimento, di colore dorato, e alcuni attuatori della cerchia più esterna. Sopra si nota il disco di raffreddamento in alluminio. Le fasce grigie sono i cablaggi che collegano le schede DSP con le schede di distribuzione.

necessaria la costruzione di due diversi prototipi: il P1 ad un solo attuatore ed il P45 a quarantacinque. Il P45 monta la stessa elettronica di controllo, lo stesso cablaggio, gli stessi telai, magneti ed attuatori dell'unità finale. Il suo funzionamento è controllato al calcolatore dai medesimi programmi che gestiranno l'LBT672a. È nel P45 che sono stati introdotti per la prima volta i magneti di sicurezza, stimandone approssimativamente la forza come $1,5 - 2,0$ volte il peso dello specchio più quello dei magneti.

Tali calamite non sono state misurate in prima istanza con un'accuratezza adeguata, in quanto il ciclo chiuso avrebbe comunque assicurato la stabilità al sistema a prescindere dalla loro presenza. Avendo dato ottimi risultati in termini di sicurezza, questa tecnica sarà adottata anche nel modello finale LBT672, ed allora i magneti saranno misurati con maggiore precisione prima del montaggio.

La procedura operativa per la misura di questa forza è descritto nel capitolo 4.

3.3.1 Assemblaggio in laboratorio

Lo specchio, gli attuatori, il disco di riferimento e quello di raffreddamento, le schede DSP ed il supporto strutturale per l'elettronica sono le parti più importanti del prototipo in fase di prova presso i laboratori di Arcetri. Nella descrizione delle figure 3.13, 3.14, 3.12, 3.11 si può avere un'idea d'insieme degli elementi costituenti il prototipo, descritti in questa sezione e nelle precedenti.

3.3.2 Interfaccia di controllo

L'utente interagisce con il prototipo tramite alcune interfacce grafiche al calcolatore, grazie alle quali è possibile effettuare i controlli basilari di diagnostica e compiere le operazioni più comuni come l'analisi temporale o il monitoraggio continuo, oltre naturalmente all'avvio e chiusura della comunicazione.

Esse sono state create per avere un riscontro immediato della situazione e nell'ottica di essere abbastanza familiari all'utente, in prospettiva di usare un sistema analogo sul modello finale, che dovrà essere utilizzato da un vasto numero di tecnici.

Per esempio, nell'interfaccia in figura 3.15 è possibile tenere sotto controllo contemporaneamente posizioni capacitive e correnti di forza.

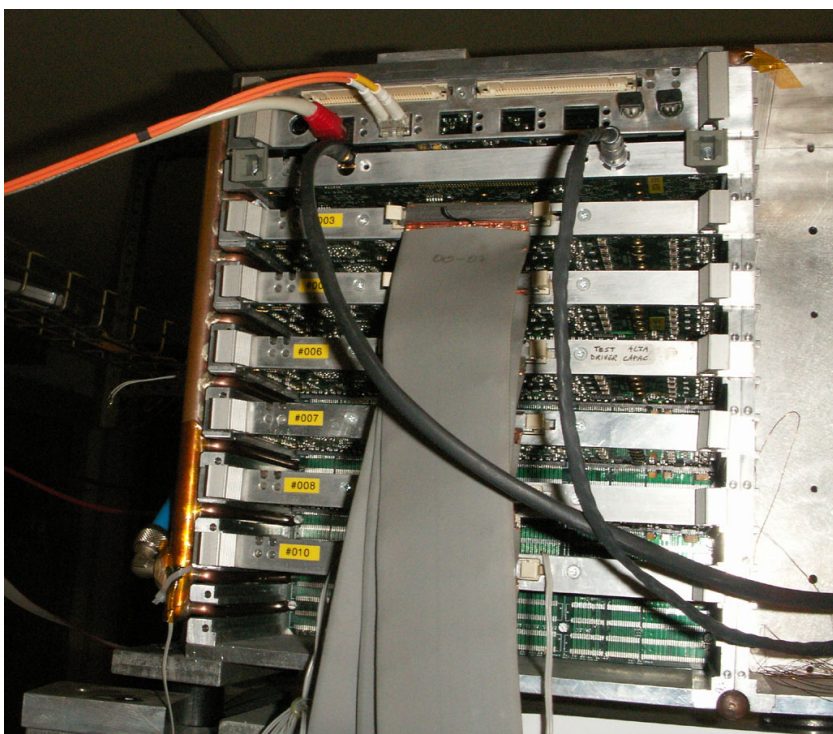


Figura 3.13: Schede DSP alloggiate nel telaio raffreddato a liquido. Il raffreddamento è assicurato tramite il tubo di rame sulla sinistra. In basso a sinistra si può notare il tubo flessibile di colore blu proveniente dal compressore. I cablaggi in alto permettono al secondario di comunicare col sensore di fronte d'onda per provare le prestazioni del sistema a ciclo chiuso, i cavi neri trasportano il segnale proveniente dal generatore di onda quadra, e le fasce grigie sono collegate ai pannelli di distribuzione in prossimità del disco di raffreddamento.

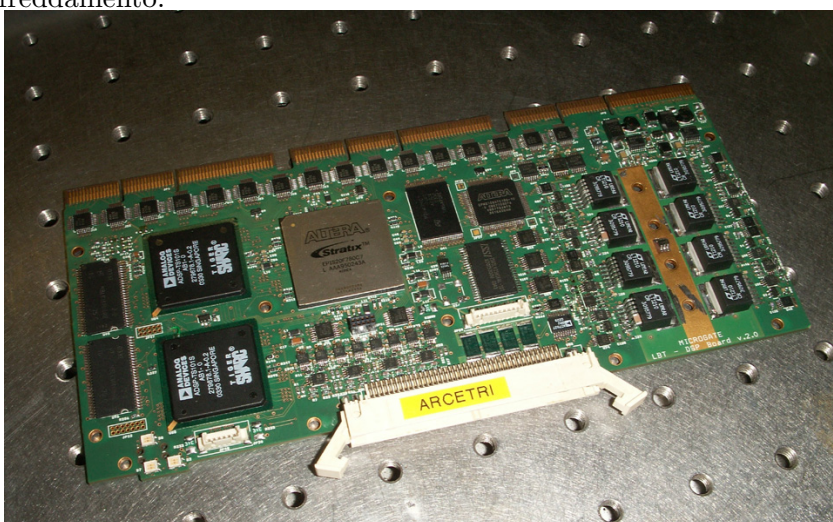


Figura 3.14: Una delle scheda DSP che gestiscono la comunicazione con gli attuatori attraverso le schede di distribuzione. Lo stesso tipo di schede sarà usato nell'unità finale a 672 attuatori.

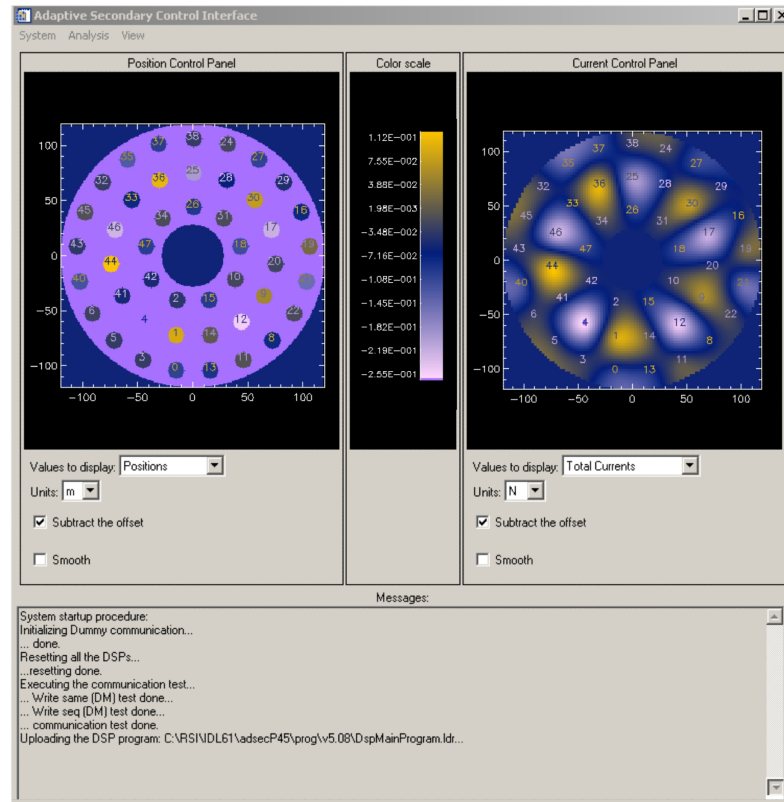


Figura 3.15: Finestra di interfaccia per il controllo del P45

3.3.3 Numerazione degli attuatori

Gli attuatori hanno due numerazioni diverse: una è quella propria dello specchio (numerazione *mirror*), che incrementa regolarmente lungo gli anelli; la seconda è quella relativa alle schede (*numerazione* DSP), che si basa su ragioni pratiche.

Il P45 ha bisogno, in numerazione DSP, di tre attuatori fittizi (i cosiddetti *dummy* 7, 23 e 39) per rendere il codice compatibile sia col prototipo che con il modello definitivo, dal momento che ogni DSP controlla 4 attuatori. La discussione circa la numerazione degli attuatori ha una certa importanza in quanto, tramite le visualizzazioni grafiche, permette agli utenti di individuare a colpo d'occhio se la causa di un eventuale problema è da ricercarsi nella geometria dello specchio o nelle componenti elettroniche. Per esempio, nel P45, una zona dello specchio che presenta caratteristiche marcate potrebbe indicare allo stesso modo: una contaminazione di polvere nella fessura fra lo specchio sottile ed il disco di riferimento; un malfunzionamento di uno o più attuatori; un problema nella scheda DSP; una perdita di efficienza nel pannello

di distribuzione (che controlla due schede). Un confronto grafico e numerico fra i valori nelle diverse numerazioni può portare per esclusione alla soluzione del problema.

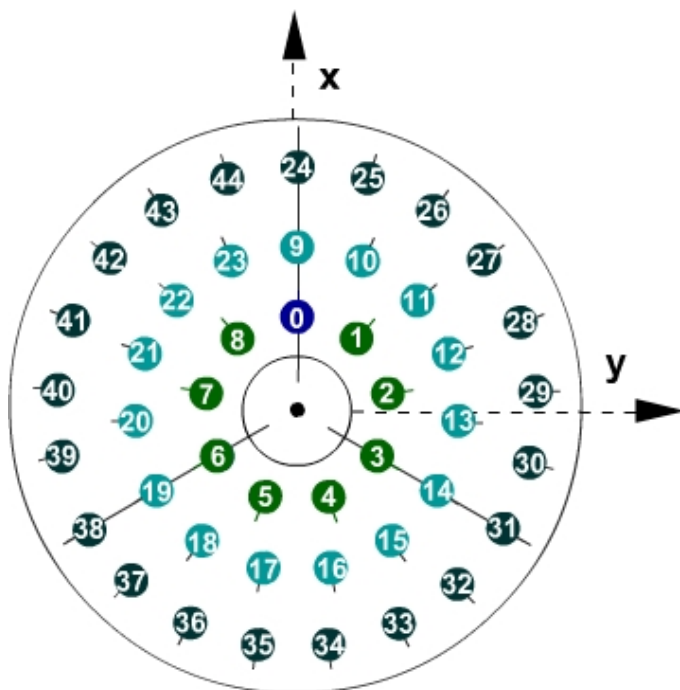


Figura 3.16: Numerazione dello specchio o numerazione *mirror* nel P45

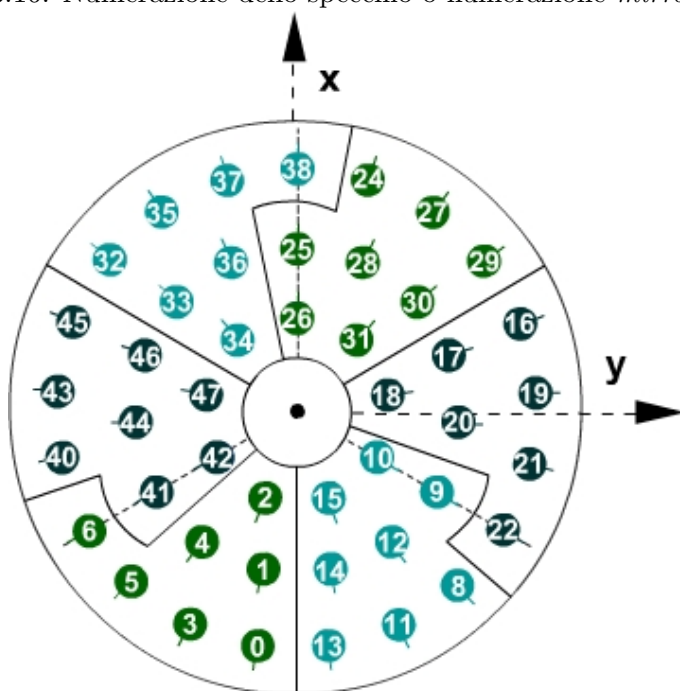


Figura 3.17: Numerazione a schede o numerazione *DSP* nel P45

Capitolo 4

Calibrazioni di forza

4.1 Necessità delle calibrazioni ed impostazione del sistema

Gli attuatori del P45 forniscono le correnti necessarie per muovere lo specchio agendo sui magneti, introducendo forze ortogonali alla sua superficie. Affinché lo specchio sia in equilibrio ad una data distanza dal disco di riferimento, la somma dei momenti e delle forze fornite ai singoli attuatori dovrà essere eguale e contraria alla somma delle altre forze e momenti agenti sullo specchio. Queste ultime sono la forza peso e la forza dei magneti di sicurezza. Considereremo come centro di risoluzione dei momenti il vertice dello specchio sottile, cioè il centro di simmetria individuato dall'intersezione del piano dello specchio e l'asse ottico. Si può trascurare il momento ruotante lungo l'asse dello specchio, dato che la forza applicata dagli attuatori è ortogonale alla superficie e non ne permette l'applicazione. Quindi i momenti considerati sono quelli lungo i due assi x ed y dello specchio, fissati come in figura 3.16. È necessario che queste tre condizioni (bilanciamento della forza in direzione della gravità e dei due momenti lungo gli assi x ed y) siano soddisfatte contemporaneamente per ogni posizione e forma che si vorrà far assumere allo specchio. Indichiamo tali forme con N ($N \geq 45$), mentre con $i = 1 \dots 45$ rappresentiamo gli attuatori del P45. Allora, se le f sono le forze in gioco, possiamo scrivere

$$\begin{aligned} \sum_i f_1^i = P + B & \quad \dots \quad \sum_i f_N^i = P + B \\ \sum_i x^i f_1^i = M_y & \quad \dots \quad \sum_i x^i f_N^i = M_y \\ \sum_i y^i f_1^i = -M_x & \quad \dots \quad \sum_i y^i f_N^i = -M_x \end{aligned} \quad (4.1)$$

dove P è il peso dello specchio più quello dei magneti, B è la forza totale esercitata dai magneti di sicurezza ed M_x e M_y sono i momenti lungo i due assi. Per quanto riguarda la forza peso, dai dati in tabella 3.1 si ha che la massa dello specchio più quella dei magneti è

$$M_{P45} = (298.0 \pm 0.5)\text{g}$$

pari ad un peso di

$$P_{P45} = M_{P45} \cdot \vec{g} = (-2.920 \pm 0.005)\text{N}$$

La forza dei magneti di sicurezza sarà invece positiva perché diretta in verso contrario alla forza peso. Per imprimere le forze che risolvano il sistema 4.1 è necessario fornire all'attuatore una determinata corrente, moltiplicata per una opportuna costante calibrativa α , presumibilmente diversa per ogni attuatore:

$$f_N^i = \alpha^i c_N^i \quad . \quad (4.2)$$

In pratica le c^i sono le forze comandate all'attuatore, mentre le f^i sono le forze realmente misurate. Per questo motivo le costanti alfa saranno sì adimensionali, ma è meglio pensarle come "Newton misurati / Newton comandati". Dal momento che le alfa non sono conosciute, non è possibile comandare un set di forze che garantiscano l'equilibrio. I set richiesti di forza comandata sono ottenuti indirettamente come segue: lo specchio viene deformato comandando ad ogni attuatore una determinata posizione, la forma desiderata viene applicata grazie al *sistema di controllo interno a ciclo chiuso*, che regola automaticamente le forze comandate per mantenere stabile (in equilibrio) lo specchio. Tali forze sono registrate dall'elettronica di controllo e sono utilizzate per la costruzione dei vettori c^i . Imporre la stabilità significa quindi trovare le α^i , cioè le soluzioni del seguente sistema lineare:

$$\begin{pmatrix} c_1^1 & c_1^2 & \cdots & c_1^{45} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_N^1 & c_N^2 & \cdots & c_N^{45} \\ \hline x^1 c_1^1 & x^2 c_1^2 & \cdots & x^{45} c_1^{45} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^1 c_N^1 & x^2 c_N^2 & \cdots & x^{45} c_N^{45} \\ \hline y^1 c_1^1 & y^2 c_1^2 & \cdots & y^{45} c_1^{45} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y^1 c_N^1 & y^2 c_N^2 & \cdots & y^{45} c_N^{45} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \alpha_{45} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P + B \\ \vdots \\ P + B \\ \hline M_y \\ \vdots \\ M_y \\ \hline -M_x \\ \vdots \\ -M_x \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Il sistema è diviso in tre blocchi. Le prime N equazioni impongono il bilanciamento della forza peso in ogni posizione, le N seguenti bilanciano il momento lungo l'asse x , le ultime N si riferiscono al momento lungo l'asse y . Questo è perciò un sistema a $3N$ equazioni e 45 incognite. Il sistema 4.3 verrà indicato in forma compatta come

$$C\alpha = p \quad . \quad (4.4)$$

Non disponendo però di informazioni relative all'entità dei momenti e alla forza dei magneti di sicurezza, è stato necessario introdurre ulteriori set di misure indipendenti per eliminare ogni ambiguità.

4.2 Sistema per trovare anche la forza di controllo e i momenti

Un modo per incrementare il numero di equazioni indipendenti nel sistema precedente è variare il peso dello specchio di una quantità nota. Una volta effettuata questa operazione, si ottiene un sistema analogo a quello descritto nell'espressione 4.3. Le forze comandate saranno differenti e verranno indicate con d anziché con c ; Q rappresenterà il peso aggiunto; i momenti, anch'essi diversi, verranno indicati con N_x ed N_y .

$$\begin{pmatrix} d_1^1 & d_1^2 & \cdots & d_1^{45} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_N^1 & d_N^2 & \cdots & d_N^{45} \\ \hline x^1 d_1^1 & x^2 d_1^2 & \cdots & x^{45} d_1^{45} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^1 d_N^1 & x^2 d_N^2 & \cdots & x^{45} d_N^{45} \\ \hline y^1 d_1^1 & y^2 d_1^2 & \cdots & y^{45} d_1^{45} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y^1 d_N^1 & y^2 d_N^2 & \cdots & y^{45} d_N^{45} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \alpha_{45} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P + B + Q \\ \vdots \\ P + B + Q \\ \hline N_y \\ \vdots \\ N_y \\ \hline -N_x \\ \vdots \\ -N_x \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Anche questo sistema verrà indicato in forma compatta come

$$D\alpha = q \quad . \quad (4.6)$$

A questo punto è possibile trovare B , M_x , M_y , N_x ed N_y e le stesse costanti calibrative di forza α^i incolonnando le misure *senza* e *con* variazione al peso, e

modificando come segue i sistemi 4.3 e 4.5 in modo da aggiungere le quantità ignote al vettore delle soluzioni:

$$\begin{pmatrix} c_1^1 & c_1^2 & \dots & c_1^{45} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_N^1 & c_N^2 & \dots & c_N^{45} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline x^1 c_1^1 & x^2 c_1^2 & \dots & x^{45} c_1^{45} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^1 c_N^1 & x^2 c_N^2 & \dots & x^{45} c_N^{45} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline y^1 c_1^1 & y^2 c_1^2 & \dots & y^{45} c_1^{45} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y^1 c_N^1 & y^2 c_N^2 & \dots & y^{45} c_N^{45} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \hline d_1^1 & d_1^2 & \dots & d_1^{45} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_N^1 & d_N^2 & \dots & d_N^{45} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline x^1 d_1^1 & x^2 d_1^2 & \dots & x^{45} d_1^{45} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^1 d_N^1 & x^2 d_N^2 & \dots & x^{45} d_N^{45} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline y^1 d_1^1 & y^2 d_1^2 & \dots & y^{45} d_1^{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y^1 d_N^1 & y^2 d_N^2 & \dots & y^{45} d_N^{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \alpha_{45} \\ B \\ M_y \\ M_x \\ N_y \\ N_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P \\ \vdots \\ P \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ P+Q \\ \vdots \\ P+Q \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Questo sistema verrà indicato compattamente come

$$E\alpha' = r \quad (4.8)$$

Quindi, riassumendo, la soluzione sarà un vettore di 50 elementi così composto:

- 45 costanti calibrative, una per ogni attuatore
- 1 forza totale dei magneti di sicurezza B
- 2 Momenti in assenza del peso aggiuntivo M_x ed M_y
- 2 Momenti in presenza del peso aggiuntivo N_x ed N_y

È bene a questo punto chiarire un aspetto fondamentale: se il sistema $E\alpha' = r$, combinando misure con e senza peso aggiuntivo, è tale per cui la matrice E ha rango massimo, siamo in grado di trovare sia le calibrazioni di forza che momenti e forza di sicurezza.

4.3 Il codice di prova

Il codice di prova è una simulazione al calcolatore per dimostrare la risolubilità dei sistemi 4.3 e 4.5.

Esso prevede la costruzione a priori di una matrice di forze che chiameremo F_f , ed un set di alfa fittizie, che chiameremo α_f .

Dividendo le righe di F_f per il vettore delle α_f , otterremo una matrice analoga alla matrice C , che chiameremo C_f . Il vettore dei termini noti p_f conterrà P nelle equazioni del peso e 0 nelle equazioni dei momenti. Si vuole dimostrare che, risolvendo il sistema

$$C_f \alpha = p_f \quad , \quad (4.9)$$

si ottiene come risultato un set di α uguale alle α_f a meno della precisione di macchina¹. Il procedimento prevede diversi passaggi, e tiene conto che il sistema ha tre vincoli, dati dal fatto che i due momenti e la forza di sicurezza sono imposti uguali a zero. Tali vincoli non permettono di trovare più di $45 - 3 = 42$ colonne linearmente indipendenti per la costruzione di F_f . Le ultime tre colonne della matrice sono calcolate autonomamente dal sistema che risolve per ogni riga le equazioni 4.1. Per le prime 42 colonne sono stati scelti vettori di forze linearmente indipendenti, costruendoli sia mediante l'utilizzo della matrice identità di ordine 42, che con la generazione di numeri casuali. Il vettore delle 45 alfa fittizie è stato generato tramite il linguaggio di programmazione IDL², supponendo una dispersione normale del 10% attorno al valore 1. Questo tipo di approccio ha dato buoni frutti in quanto il codice ha riprodotto le costanti di calibrazione iniziali senza che le differenze fossero mai superiori all'errore di macchina, perciò si può concludere che è verificata la risolubilità dei sistemi $C\alpha = p$ e $D\alpha = q$. Analogamente è stata ampiamente verificata la riproducibilità delle alfa fittizie in un sistema, che chiamiamo

$$E_f \alpha = r_f \quad , \quad (4.10)$$

che grazie allo stesso procedimento basato sui tre vincoli verifica sperimentalmente la risolubilità dell'equazione 4.7. Essendo i sistemi 4.3, 4.5 e 4.7 sovradimensionati, è stata usata la tecnica della scomposizione in valori singolari descritta nell'appendice A per ottenere una soluzione numerica.

¹Si definisce precisione di macchina la massima precisione di calcolo raggiungibile su un dato calcolatore. Si indica con ε ed è il più piccolo numero tale che $1 + \varepsilon \neq 1$

²Tutti i codici sono stati scritti in linguaggio dati interattivo (*Interactive Data Language*, IDL), lo stesso usato per i codici di funzionamento del P45.

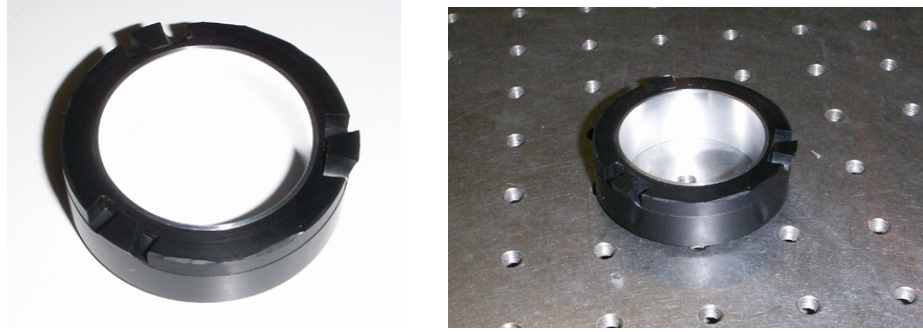


Figura 4.1: Il “Bicchierino”: supporto anulare in PVC con un rinforzo di alluminio. Si possono vedere le tre zeppe simmetriche a 120 gradi che permettono all’oggetto di incastrarsi dall’alto al foro centrale dello specchio

4.4 La “prova del bicchierino”

Il secondario a 672 attuatori avrà nella membrana dei punti d’appoggio ideali per l’aggancio di ulteriori masse campione, qualora fosse necessario compiere una simile operazione. Al P45, invece, la membrana non è stata ancora incollata, per cui è stato necessario pensare ad un’idea differente. Sono state ipotizzate diverse soluzioni per variare il peso dello specchio, dal diminuirlo appoggiandoci delicatamente dal basso un palloncino pieno di elio³ ad agganciare un peso al bordo interno tramite piccolissimi uncini allargati da una vite⁴. Alla fine si è optato per qualcosa di facilmente controllabile e che non sottoponesse il bordo interno a sforzi laterali, ed è stato realizzato un supporto anulare in PVC del peso di $Q = (-0,289 \pm 0.005)\text{N}$, equivalente ad una massa di 28,55g con tre piccole zeppe simmetriche a 120°. In tal modo il “bicchierino”, grazie a queste zone inclinate verso l’esterno, può essere introdotto dall’alto una volta rimosso lo specchio (figura 4.1).

Il “bicchierino” ha il problema di dover essere centrato perfettamente parallelo al piano che contiene il bordo interno dello specchio, per non fare in modo che una delle zeppe tocchi il disco di riferimento.

4.5 Risultati dei dati di laboratorio

In laboratorio abbiamo ottenuto i vettori c e d registrando le forze applicate dal sistema di controllo dopo aver comandato, in sequenza, le 45 forze linearmente

³La “prova del palloncino” è stata scartata perché ritenuta incapace di non introdurre ulteriori momenti variabili durante la misura.

⁴Lo spazio “arpionabile” sarebbe stato potenzialmente un anello di 1mm, troppo piccolo per garantire la stabilità del peso senza introdurre sforzi eccessivi sul bordo del vetro.

indipendenti dello specchio corrispondenti ai modi della matrice di feed forward [Brusa et Al, 1999]. Le misure usate per ricavare le α^i , la forza di sicurezza e i momenti sono state effettuate nell'arco di un'unica giornata il giorno 4 gennaio 2006. Il ciclo di 45 misure è stato ripetuto 100 volte senza il peso aggiuntivo, 100 con il peso aggiuntivo, e ancora 100 volte nuovamente senza peso, come forma di controllo di eventuali variazioni subite dal sistema, e dovute alle operazioni di smontaggio e montaggio dello specchio per l'inserimento del "bicchierino". Le basi fornite per costruire la matrice E (equazione 4.8) sono basi di posizioni ortogonali di tipo *modale*, cioè basi che riproducono i modi di propri dello specchio [Brusa et Al, 1999]. Questa soluzione è stata preferita a quella della sezione 4.3 poiché i modi dello specchio producono set di correnti più omogenee e simmetriche rispetto al centro. Il codice di prova resta comunque valido dal momento che in entrambi i casi si tratta di una base ortogonale di vettori.

I risultati sono mostrati nella figura 4.2: i valori delle calibrazioni oscillano tra 0,70 e 1,1 Newton misurati/Newton comandati con errori compresi tra $1,6 \cdot 10^{-2}$ e $6,6 \cdot 10^{-4}$ Newton misurati/Newton comandati.

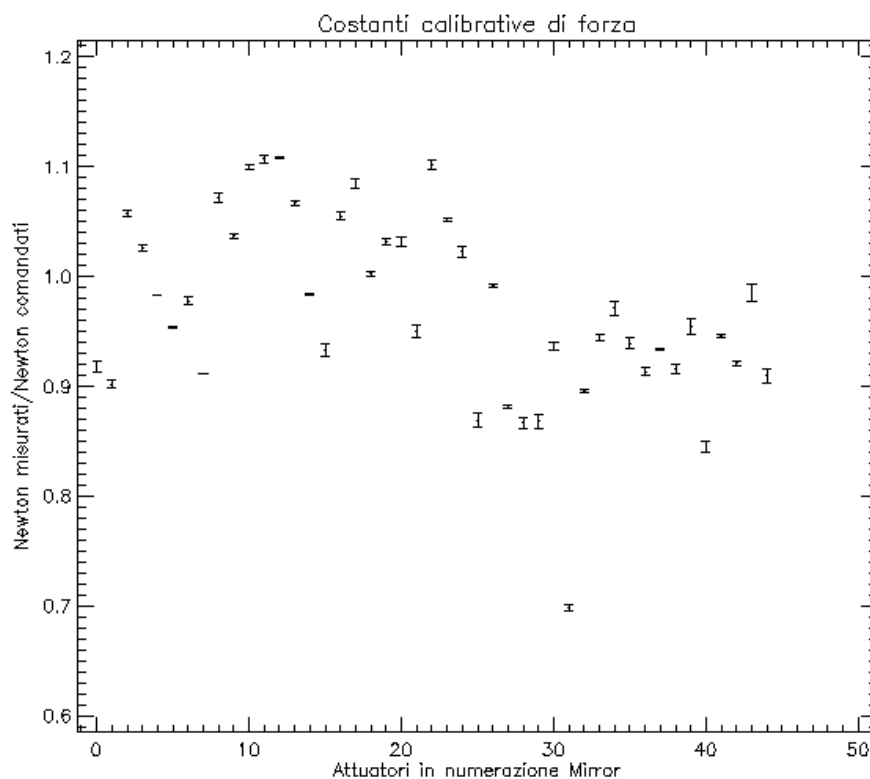


Figura 4.2: Costanti calibrative di forza

L'errore è stato stimato tramite l'RMS della media sulle misure a 3σ . La forza totale dei magneti di sicurezza risulta uguale a 5,59N pari ad 1,91 volte il peso dello specchio in valore assoluto. Osservando l'immagine 4.3 si può notare che gli attuatori che presentano una maggiore differenza tra valori comandati e valori misurati sono quelli degli anelli periferici, mentre i valori delle calibrazioni sull'anello centrale sono più vicini a 1,0. Questo effetto è dovuto al fatto che, al momento dell'incollaggio, i magneti del P45 erano stati fissati sul retro secondo una precisa logica: quelli ritenuti più efficienti erano stati scelti per l'anello mediano (dov'è necessaria più forza per deformarlo), gli altri erano stati posizionati sui rimanenti due anelli.

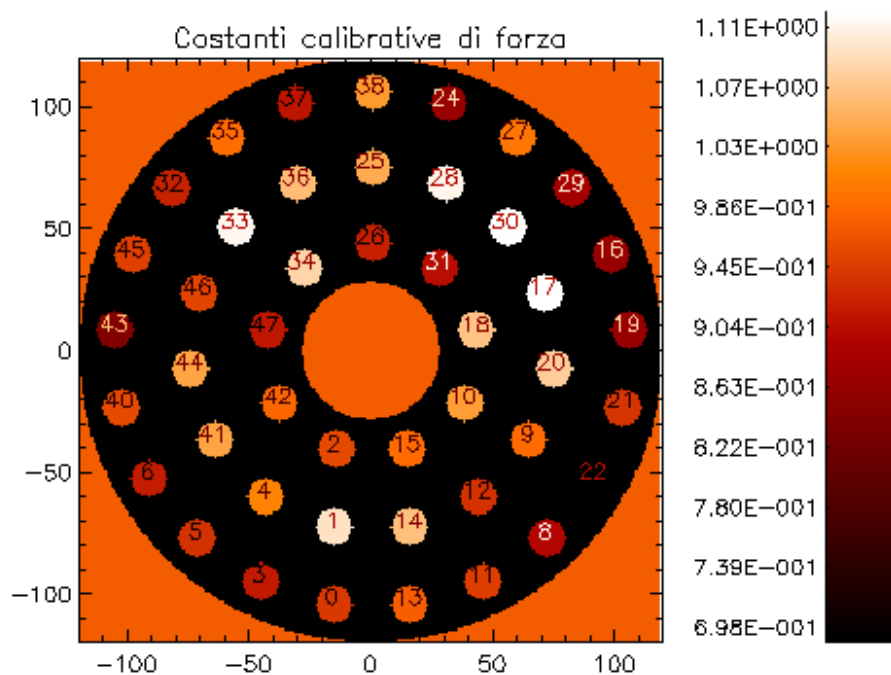


Figura 4.3: Mappatura dei valori delle costanti calibrative di forza, in Newton misurati / Newton comandati, tramite un programma che riproduce le posizioni degli attuatori.

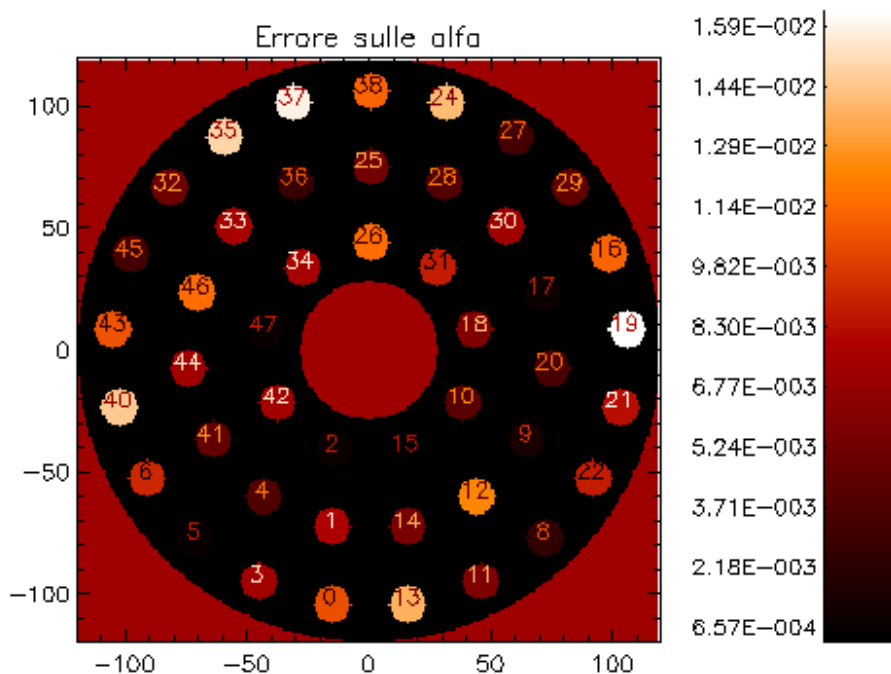


Figura 4.4: Mappatura dei valori dell'errore sulle alfa (Newton misurati / Newton comandati).

Capitolo 5

Calibrazioni locali di posizione

La posizione di ognuna delle zone controllate dagli attuatori è rilevata dal sensore capacitivo. Esso produce un segnale proporzionale alla media della distanza tra lo specchio e il disco di riferimento in una corona circolare nell'immediato intorno del magnete.

Una misura dello spostamento effettivamente compiuto dallo specchio può essere invece rilevata tramite un interferometro.

Questo capitolo mostrerà la relazione fra le posizioni capacitive e quelle interferometriche ed una procedura operativa per caratterizzare tale relazione basata su tecniche di elaborazione dell'immagine interferometrica.

5.1 Necessità delle calibrazioni

Ricordiamo che la relazione che lega il segnale di posizione al voltaggio nel sensore capacitivo è data dall'equazione 3.1

$$\delta = \frac{\delta_0}{v - c} . \quad (5.1)$$

Se indichiamo la distanza reale alla quale si lavora con δ_L e il voltaggio corrispondente con v_L , allora si ha

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_L + \Delta\delta \\ v &= v_L + \Delta v \end{aligned}$$

e la variazione di distanza è legata alla variazione di voltaggio dalla relazione

$$\Delta\delta \approx -\frac{\delta_0}{(v_L - c)^2} \Delta V , \quad (5.2)$$

$$\Delta\delta_s = -\frac{\delta_{0s}}{(v_L - c_s)^2} \Delta V , \quad (5.3)$$

e dividendo membro a membro si ha

$$\begin{aligned}\Delta\delta &= \frac{\delta_0}{\delta_{0s}} \left(\frac{v_L - c_s}{v_L - c} \right)^2 \Delta\delta_s \\ \Delta\delta &= \beta \Delta\delta_s\end{aligned}$$

che è la relazione che lega posizioni interferometriche con posizioni stimate dai sensori capacitivi. Come si vede, poiché la costante di calibrazione dipende anche da c_s , essa sarà valida solo alla distanza di lavoro considerata. Per questo motivo si parla di calibrazioni *locali* di posizione.

5.2 Misure differenziali

Dal momento che quello che si vuole calcolare è una differenza di posizione interferometrica, da confrontare con una differenza di posizione capacitiva, basterebbe comandare allo specchio di assumere in una posizione diversa muovendo tutti gli attuatori, per esempio comandando un movimento di pistone, e misurare le variazioni sui sensori e all'interferometro.

Purtroppo l'interferometro è insensibile proprio a questo tipo di movimento, poiché ricostruisce sempre un'immagine a media nulla della forma dello specchio. L'idea, allora, è stata quella di tenere un attuatore fissato in una posizione, e muovere tutti gli altri con un movimento di tilt. Conoscendo l'attuatore tenuto fermo, (indicato con d nella figura 5.1), siamo in grado di sottrarre dall'immagine all'interferometro a media nulla il valore interferometrico del punto d per riscalarlo la posizione di tutti gli attuatori. In questo modo si ottengono le variazioni di posizione interferometrica di tutti gli attuatori meno quello fissato. Se si ripete questa procedura fissando un altro attuatore, si ottiene un risultato analogo. I due movimenti di tilt sono schematizzati nelle figure 5.2. Per filtrare l'effetto ottico della convezione

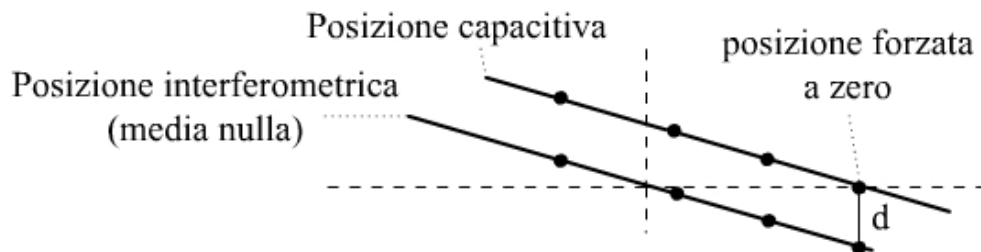


Figura 5.1: La distanza del punto d va sottratta a tutti i valori interferometrici per riscalarlo la posizione capacitiva su quella interferometrica

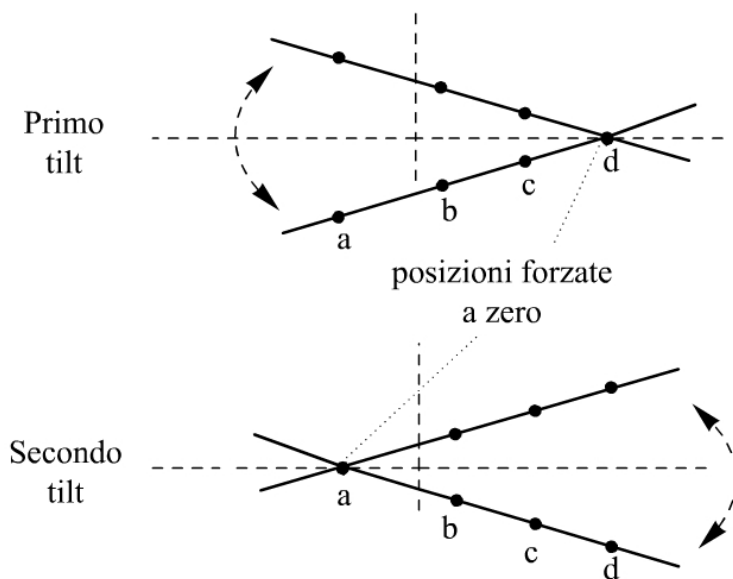


Figura 5.2: Il tilt in due fasi, fissando come perni due attuatori opposti, ha permesso di muovere tutti gli attuatori eliminando l'incognita del pistone

presente in laboratorio e gli effetti di deriva dell'allineamento, le misure sono state sommate e sottratte usando una tecnica di media usata spesso quando l'evoluzione del disturbo ha un tempo tipico confrontabile o maggiore di quello della misura. Si schematizzi la misura interferometrica come il valore vero a_s (ampiezza del tilt di un determinato punto dello specchio) più il valore iniziale a_0 . Si aggiunga poi un contributo che dipenda linearmente dal tempo $a_t t$. In pratica

$$a(t) = a_s + a_0 + a_t t \quad . \quad (5.4)$$

Allora, se si comanda allo specchio un movimento di tilt negativo, uno simmetricamente positivo ed uno nuovamente negativo, si avrà (vedi figura 5.2)

$$(1) \quad -a_s + a_t t + a_0$$

$$(2) \quad +a_s + a_t(t + \Delta t) + a_0$$

$$(3) \quad -a_s + a_t(t + 2\Delta t) + a_0$$

I disturbi dipendenti dal tempo ed il valore iniziale a_0 si possono eliminare sommando algebricamente in questo modo le tre equazioni:

$$a_s = \frac{(2) - (1) + (2) - (3)}{4} \quad (5.5)$$

5.3 Tecnica di elaborazione dell'immagine

In questa sezione si descriverà la procedura usata per estrarre dall'immagine interferometrica (736×480 valori, uno per ogni pixel del CCD) quarantacinque valori corrispondenti alla posizione dello specchio.

Il prototipo P45 è montato in laboratorio su un banco ottico, provvisto di un interferometro¹ per rilevare con estrema precisione la posizione di ogni punto dello specchio a meno di un valor medio. L'interferometro è provvisto di un CCD di 736×480 pixel e l'immagine dello specchio non sarà necessariamente centrata né orientata lungo gli assi. Sarà necessario trovare il modo di sapere con la massima precisione possibile *dove si troverebbero le aree anulari a cui sono sensibili i sensori capacitivi se fossero proiettate sul CCD*.

L'idea utilizzata e implementata al calcolatore si basa sul fatto che sollecitando un attuatore della cerchia più esterna lo specchio si deformerà in modo tale che il massimo sia su un punto del bordo. Se si procede alzando cinque attuatori sul bordo di cui uno posto su uno degli assi di simmetria, si otterranno cinque massimi in configurazione pentagonale (irregolare perché lo specchio è simmetrico a 120° e non a 72°). Ognuno di questi massimi si troverà, a meno del rumore di posizione, su un pixel corrispondente alla posizione di un punto del bordo dello specchio. L'immagine del CCD così ottenuta verrà chiamata *figura pentagonale* (figura 5.3). Si ripeta in maniera analoga il procedimento alzando tre attuatori sul bordo esterno e lungo gli assi di simmetria: questa volta i tre pixel, contenenti i massimi, saranno disposti a meno del rumore a forma di triangolo. Si indicherà in seguito l'immagine relativa come *figura triangolare* (figura 5.3). A questo punto, con questi tre pixel, si fa una prima stima del raggio e del centro della circonferenza dello specchio proiettata sul CCD. La stima viene raffinata grazie ad un fit degli altri cinque punti per ottenere la miglior stima del raggio e delle coordinate del centro. date le condizioni iniziali x_c , y_c e R . stimate con la figura triangolare. Uno dei tre vertici del triangolo, però, era stato ottenuto alzando lo stesso attuatore che aveva fornito uno dei massimi della figura pentagonale. Un veloce confronto fra l'immagine a cinque vertici e quella a tre consente di individuare le sue coordinate.

Conoscendo la sua ascissa e l'ordinata, e sapendo anche quelle del centro della

¹L'interferometro in dotazione al laboratorio del prototipo P45 è un Wyko RT4100

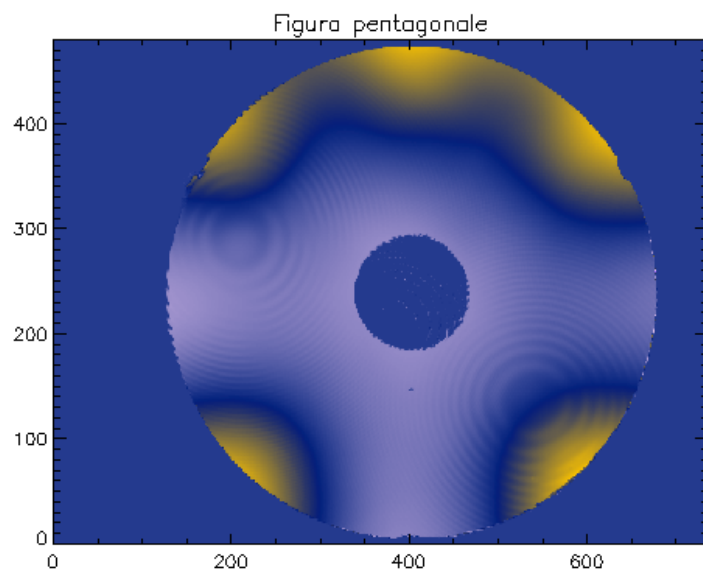


Figura 5.3: Una figura pentagonale così come viene rilevata dall'interferometro. I disturbi sulla figura sono dovuti alla presenza di uno specchio divisore di fascio nel sistema ottico

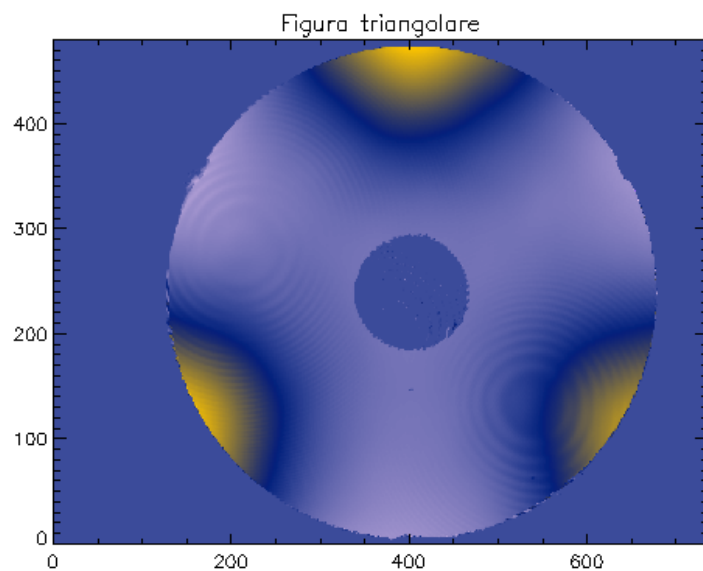


Figura 5.4: Una figura triangolare così come viene rilevata dall'interferometro. I tre massimi si trovano a 120° poiché sono stati azionati tre attuatori sugli assi di simmetria

circonferenza, si può trovare l'angolo fra gli assi di dello specchio (figura 3.16) e il "sistema di riferimento del CCD".

Dunque, con l'orientazione e il raggio si sa dove si troverebbero le zone anulari sensibili ai sensori capacitivi se fossero proiettate sul CCD (figura 5.5).

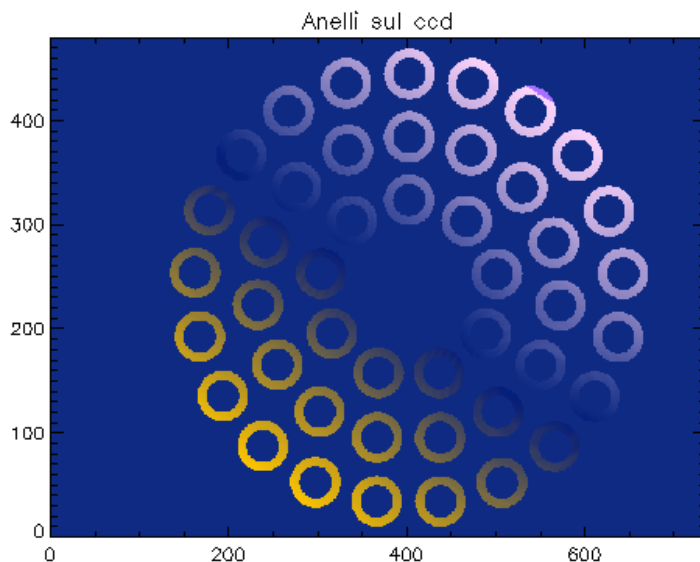


Figura 5.5: In questa figura viene mostrato come il sistema trova le corone circolari sensibili al sensore capacitivo come se fossero proiettate sul CCD. Una media di ogni corona darà un valore di posizione interferometrica.

Mediando sulla superficie si ottiene il valore della posizione rilevata all'interferometro, per ognuno degli attuatori, cioè un vettore di 45 elementi da confrontare con la posizione sondata tramite i sensori capacitivi.

5.4 Il codice al calcolatore

Il linguaggio dati interattivo IDL ha permesso piuttosto agevolmente di svolgere questo compito grazie a tre particolari procedure:

- **search2d**: grazie a questa funzione il programma è stato in grado di trovare, fissata una soglia di tolleranza, una regione di valori in un intorno del massimo locale nella matrice bidimensionale che rappresentava il CCD. Poi, registrato il punto di massimo e avendo provveduto ad eliminare tali valori, si è iterato il calcolo per trovare tutti gli altri massimi, escludendo automaticamente quelli non

idonei (e ottenendo così un totale di cinque nella figura pentagonale e tre in quella triangolare).

- **distance_measure**: tale procedura consente di calcolare la distanza fra tutti i punti le cui coordinate sono contenute in una matrice $n \times m$ (in uno spazio n -dimensionale, nel nostro caso bidimensionale). Raggruppando le coordinate dei massimi della figura pentagonale e di quella triangolare e calcolando la distanza reciproca fra tutti i punti, si trova che la minima distanza è quella che separa i due massimi ottenuti alzando lo stesso attuatore.
- **amoeba**: per interpolare i punti di massimo, in una circonferenza che rappresenti il bordo dello specchio, si è ricorsi a questa procedura IDL che restituisce i valori minimi di una funzione entro una soglia di tolleranza scelta a piacere. Essendo una procedura non lineare, essa ha bisogno di una stima iniziale di centro e raggio (data dalla circonferenza che passa per i tre punti della figura triangolare).

Impostazione delle soglie

L'unica parte del processo che necessita di un controllo manuale è l'impostazione delle due soglie per facilitare l'uso della procedura `search2d`. La prima soglia forza a zero i valori più bassi del massimo di una data percentuale in modo da isolare bene i massimi; la seconda si occupa di scartare valori non validi.

5.5 Risultati dei dati di laboratorio

Nelle misure di laboratorio sono state rilevate 100 misure per il primo tilt e altre 100 per il secondo ad una distanza dello specchio sottile dal disco di riferimento di $68\mu\text{m}$. I risultati si possono osservare nelle figure 5.6 e 5.7.

- Il sensore capacitivo misura le posizioni dello specchio con errori compresi tra 0,013nm e 0,019nm.
- La posizione interferometrica dà una misura con errori compresi tra 0,10nm e 0,18nm.

Conoscendo posizione capacitiva e posizione interferometrica, e scegliendo dai ognuno dei due tilt gli attuatori con l'elongazione maggiore, è stato

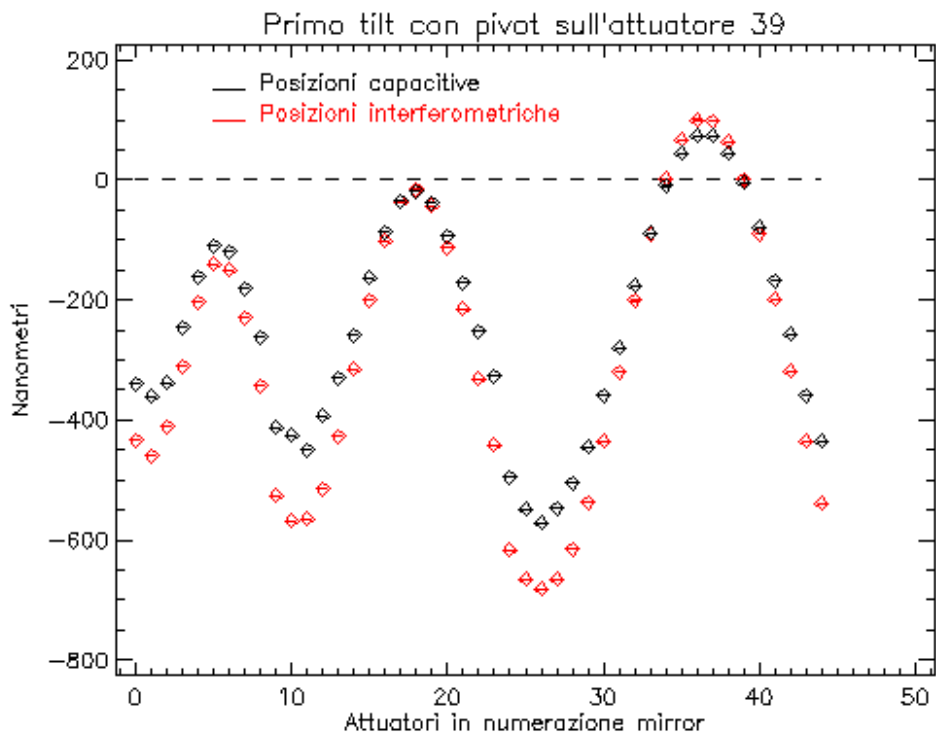


Figura 5.6: Risultati delle posizioni ottenute con il primo movimento di tilt

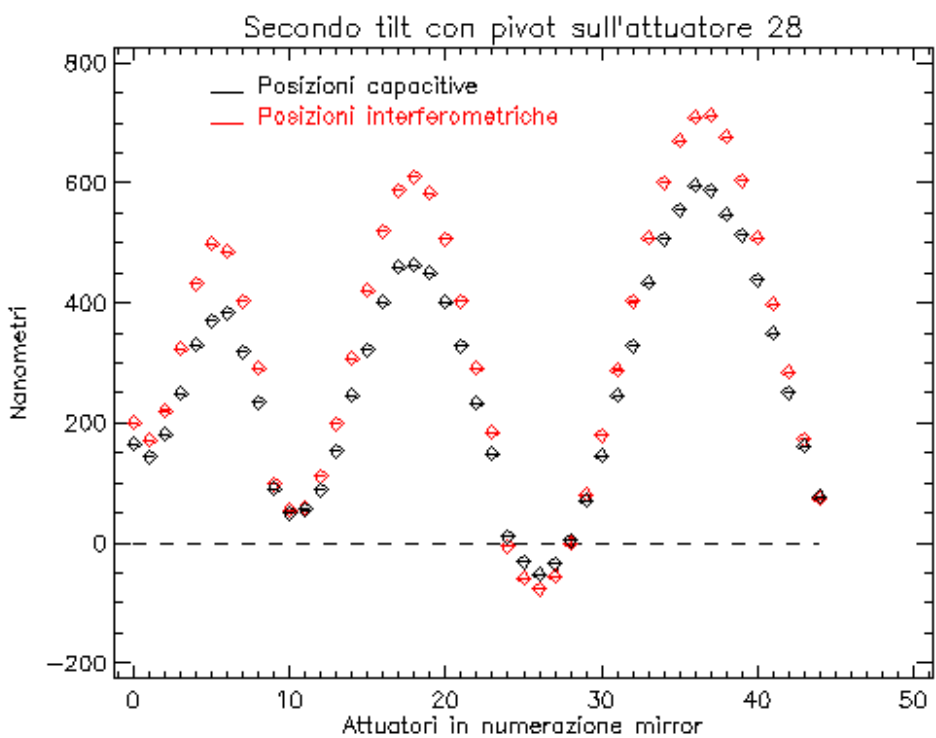


Figura 5.7: Risultati delle posizioni ottenute con il secondo movimento di tilt

possibile ricavare le calibrazioni β di posizione, mostrate in figura 5.8. Come si può notare, dalla figura risulta una maggiore differenza tra le misure interferometriche e quelle capacitive nei due anelli interni. Questo dipende dal fatto che le componenti elettroniche dei sensori capacitivi interni sono diverse da quelle degli attuatori esterni, per i quali il valore capacitivo si avvicina maggiormente a quello interferometrico.

Le beta, costanti adimensionali (anche se è meglio pensarle come “nanometri interferometrici / nanometri capacitivi”) sono comprese fra 1,16 e 1,37. Stesso discorso vale per l’unità di misura degli errori sulle beta, compresi fra 0,0002 e lo 0,001 (figura 5.9) . Sebbene gli errori siano molto bassi, si vede che quelli più grandi sono concentrati intorno a specifici attuatori. Confrontando le misure degli errori in figura 5.9 con le immagini all’interferometro (figure 5.3 e 5.4), si può notare che i massimi errori si trovano in corrispondenza dei disturbi causati dal divisore di fascio presente nel sistema ottico. Per cercare di visualizzare le caratteristiche dell’errore a prescindere dalla presenza di tali attuatori particolarmente rumorosi, è stato fissato un limite superiore nella figura 5.10 per far emergere le caratteristiche sottostanti: anche in questo caso l’errore maggiore è localizzato sugli anelli interni.

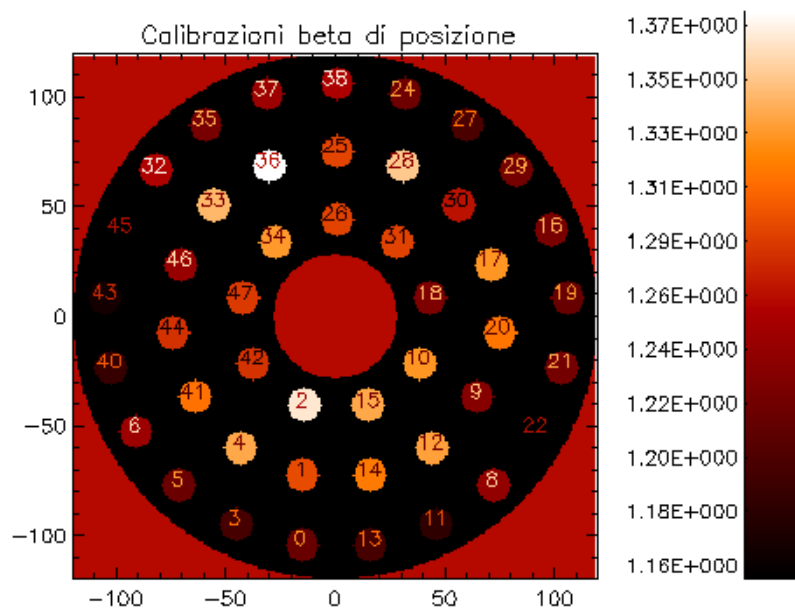


Figura 5.8: Calibrazioni locali di posizione. La distribuzione del valore delle β lungo i tre anelli dipende dalla diversità delle componenti elettroniche degli attuatori

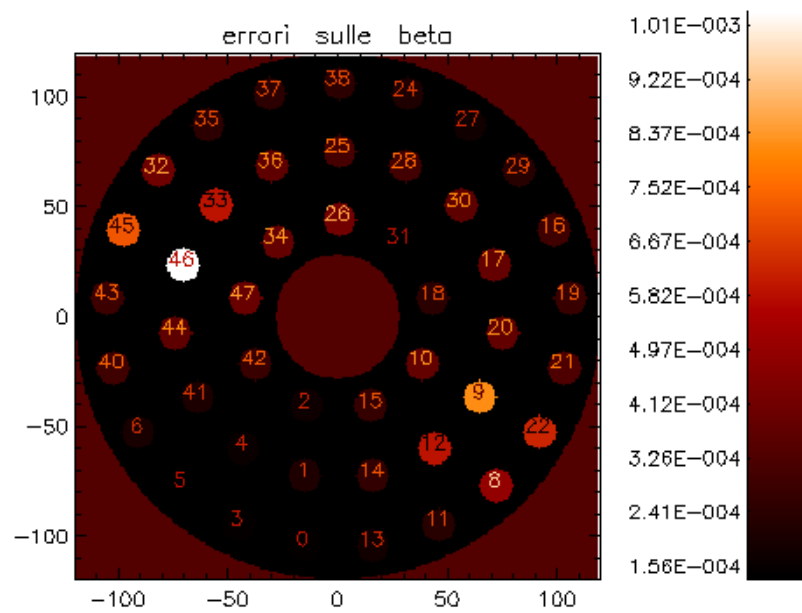


Figura 5.9: Errori assoluti in “nanometri interferometrici/nanometri capacitivi” sulle calibrazioni di posizione.

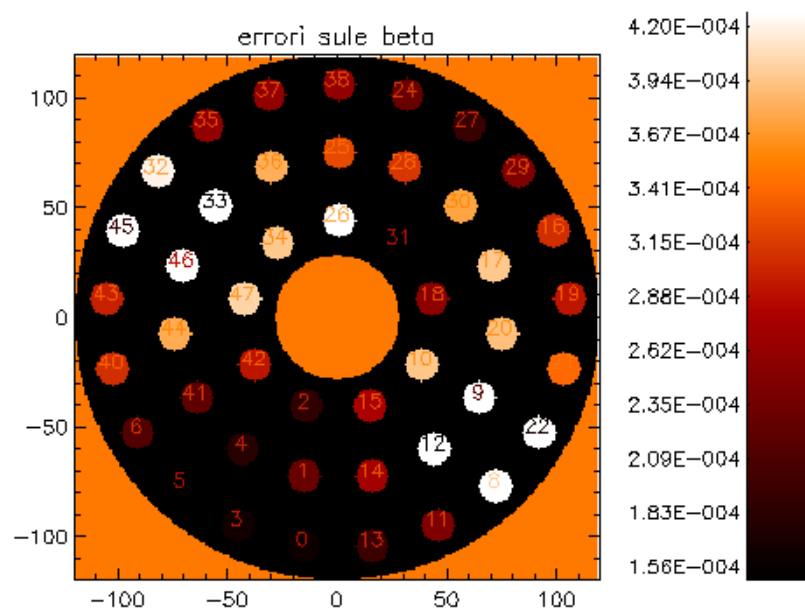


Figura 5.10: In questa immagine sono stati saturati i valori degli attuatori disposti sul diametro più rumoroso, per far risaltare le caratteristiche sottostanti.

Capitolo 6

Conclusioni e prospettive

Il presente lavoro di Tesi ha avuto come oggetto le calibrazioni di forza e di posizione del prototipo P45 per il secondario adattivo del Grande Telescopio Binoculare.

I dati sperimentali sulle **calibrazioni di forza** α hanno evidenziato che è possibile calibrare il sistema grazie ad un codice che acquisisce le misure di corrente applicate agli attuatori.

Le alfa son determinate con un errore minore dell'1,5%. Inoltre, qualora venisse sostituito un attuatore, un magnete o la sola bobina di un attuatore, è possibile procedere ad una nuova calibrazione delle nuove α , della forza dei magneti di sicurezza mediante la procedura sviluppata.

Le prove di laboratorio sulle **calibrazioni di posizione** β hanno evidenziato l'esistenza di una discrepanza maggiore del 20% fra posizioni rilevate utilizzando le calibrazioni nominali dei sensori capacitivi e posizioni interferometriche.

Grazie ad una procedura semiautomatica basata su tecniche di elaborazione dell'immagine, è possibile mettere in corrispondenza l'area sensibile ai sensori capacitivi con l'immagine interferometrica, per calcolare le β con le quali ricalibrare i sensori capacitivi per un migliore controllo di posizione dello specchio secondario adattivo anche in assenza di un ciclo ottico di retroazione.

Se le α e le β consentiranno di migliorare la gestione e le prestazioni del P45, lo scopo finale è quello di applicare con successo queste procedure di calibrazione al modello definitivo LBT672. In questo senso andranno implementati i codici per gestire più efficacemente la maggior mole di dati.

Un primo passo consisterà nel valutare la costanza delle calibrazioni di forza

su periodi di tempo più lunghi, ripetendo le misure in tempi diversi, e andando a verificare l'effetto della temperatura sul sistema.

Per quanto riguarda la posizione, un passo fondamentale sarà ripetere la calibrazione locale per varie (> 2) distanze tra lo specchio e il disco di riferimento per poter separare i contributi di δ_0 (legata alle capacità di riferimento) dai contributi di c (legata alle capacità parassite). Inoltre sarà utile completare l'automatizzazione del processo ed introdurre modifiche allo schema ottico capaci di correggere i disturbi che degradano la qualità dell'immagine all'interferometro, come quelli causati dalla presenza di un divisore di fascio nel sistema.

Appendice A

Scomposizione in valori singolari

Secondo la tecnica della scomposizione in valori singolari, si può scrivere un sistema $y = Bx$ (con B matrice $n \times m$) come:

$$y = \underbrace{UWV^T}_B \cdot x \quad ,$$

dove U è una matrice ortogonale $n \times m$, V è una matrice ortogonale quadrata di ordine n e W è una matrice diagonale ad elementi positivi detti *valori singolari*. Per trovare x , dal momento che U è ortogonale, si inizia moltiplicando a sinistra per U^T :

$$U^T y = \underbrace{U^T U}_I W V^T x$$
$$U^T y = W V^T x$$

Ora bisognerebbe moltiplicare a sinistra per W^{-1} , ma se alcuni elementi w di W (che è diagonale), sono troppo piccoli, o comunque sotto l'errore di macchina, gli elementi di W^{-1} ($1/w$) andrebbero all'infinito, infatti

$$W = \begin{pmatrix} w_1 & & & 0 \\ & w_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & w_n \end{pmatrix}; \quad W^{-1} = \begin{pmatrix} 1/w_1 & & & 0 \\ & 1/w_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & 1/w_n \end{pmatrix}$$

Ecco perché invece della matrice inversa W^{-1} si usa la *pseudoinversa* W^+ , dove si sostituiscono con zero gli quegli elementi per i quali $1/w \rightarrow \infty$.

$$W^+ = \begin{pmatrix} 1/w_1 & & & 0 \\ & 1/w_2 & & \\ & & \mathbf{0} & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & 1/w_n \end{pmatrix}$$

La relazione diventa:

$$W^+U^T y = \underbrace{W^+W}_{\approx \mathbb{I}} V^T$$

W^+W non è proprio la matrice unità: ha sulla diagonale principale degli *zeri* in corrispondenza di quegli elementi $1/w$ che si era deciso di sostituire. Moltiplicando ancora per $(V^T)^T = V$ si ottiene:

$$x \approx \underbrace{VW^+U^T}_{B^+} y$$

Questo vuole dire che $x \approx B^+y$, dove B^+ è la pseudoinversa di B .

Appendice B

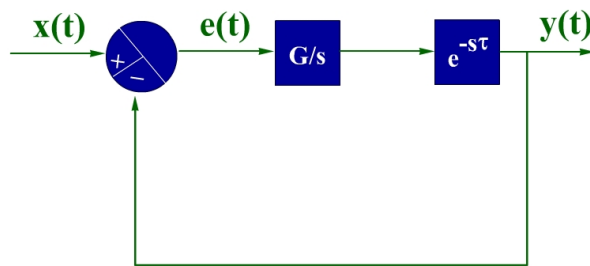
Funzioni di trasferimento

La funzione di trasferimento è una funzione della variabile s nel dominio della trasformata di Laplace. Sia $x(t)$ l'ingresso del sistema, $y(t)$ l'uscita e $X(s)$ e $Y(s)$ le relative trasformate di Laplace; allora, la funzione di trasferimento è data dal rapporto tra la trasformata dell'uscita e quella dell'ingresso:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}.$$

La funzione di trasferimento può anche essere vista come trasformata di Laplace della risposta all'impulso dello stesso sistema.

Si può schematizzare il sistema adattivo come una componente la cui funzione di trasferimento è G/s , dove G è una costante di guadagno che non dipende da s ; più una parte in $e^{-s\tau}$, funzione di trasferimento del ritardo.



In questo caso la funzione di trasferimento ad anello aperto, od *open loop transfer function*, è data dal prodotto dei due “blocchi”:

$$H(s) = \frac{G}{s} \cdot e^{-s\tau}$$

mentre la funzione di trasferimento ad anello chiuso, o *closed loop transfer*

function, è data dal rapporto delle trasformate del segnale d'uscita e quello d'ingresso:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H(s)}{1 + H(s)} = \frac{\frac{G}{s} \cdot e^{-s\tau}}{1 + \frac{G}{s} \cdot e^{-s\tau}}$$

La funzione di trasferimento d'errore, infine, è data dal rapporto tra le trasformate dell'errore residuo e dell'ingresso. È una misura di quanto errore rimanga dopo la correzione.

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + H(s)} = \frac{1}{1 + \frac{G}{s} \cdot e^{-s\tau}}$$

Riepilogando:

$x(t), X(s)$	→	Segnale d'ingresso e sua trasformata
$e(t), E(s)$	→	Errore residuo e sua trasformata
$y(t), Y(s)$	→	Segnale d'uscita e sua trasformata
$H(s)$	→	Funzione di trasferimento ad anello aperto
$Y(s)/X(s)$	→	Funzione di trasferimento ad anello chiuso
$E(s)/X(s)$	→	Funzione di trasferimento d'errore

B.1 Funzione di trasferimento ad anello aperto

Verranno ora calcolati il modulo e la fase della *open loop transfer function*. Il modulo dev'essere minore od uguale a 1, per non correggere più del valore d'ingresso. Se $s = i\omega$, la fase critica φ_c è la fase alla cui frequenza la mia funzione ha il massimo

$$\varphi_c = \angle(G/i\omega_c) + \angle(e^{-i\omega_c\tau})$$

Il margine di fase invece è dato dalla relazione

$$\varphi_m = \left| \angle \frac{G}{s} - \omega_c\tau \right| < \pi$$

In particolare, si usa porre il margine di fase uguale a

$$\pi - \frac{\pi}{4} = -\frac{3}{4}\pi = -135^\circ$$

, e prendere il segno negativo poiché ci si occupa di un ritardo. Al momento di sciogliere i moduli si effettueranno scelte coerenti con il fatto che sia G che ω_c devono essere positivi.

$$\begin{cases} \left| \frac{G}{i\omega_c} e^{-i\omega_c \tau} \right| \leq 1 \\ \angle G - \frac{\pi}{2} - \omega_c \tau = -\frac{3}{4} \pi \end{cases} ; \begin{cases} \left| \frac{G}{i\omega_c} e^{-i\omega_c \tau} \right| \leq 1 \\ 0 - \omega_c \tau = -\frac{3}{4} \pi + \frac{\pi}{2} \end{cases} ; \\
\begin{cases} \left| \frac{G}{i\omega_c} e^{-i\omega_c \tau} \right| \leq 1 \\ +\omega_c = +\frac{2\pi}{8\tau} \end{cases} ; \begin{cases} \left| \frac{G}{i\pi/4\tau} e^{-i\omega_c \tau} \right| \leq 1 \\ +\omega_c = +\frac{2\pi}{8\tau} \end{cases} ; \\
\begin{cases} \frac{G^2}{1\pi^2/16\tau^2} \cdot 1 \leq 1^2 \\ +\omega_c = +\frac{2\pi}{8\tau} \end{cases} ; \begin{cases} G^2 \leq \frac{1\pi^2}{16\tau^2} \\ +\omega_c = +\frac{2\pi}{8\tau} \end{cases} ; \\
\begin{cases} 0 \leq G \leq \frac{\pi}{4\tau} \\ \omega_c = \frac{2\pi}{8\tau} \end{cases}
\end{cases}$$

B.2 Funzione di trasferimento ad anello chiuso

Trovato il valore massimo di G , e cioè $\pi/4\tau$, lo si sostituisce nell'espressione del modulo della *closed loop transfer function* (CLTF), e si guarda quanto vale ω a -3dB , trovando così la larghezza di banda che sarà confrontata con il valore di ω_c precedentemente ottenuto.

$$\begin{aligned}
|CLTF| &= \left| \frac{\frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau}}{1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau}} \right| \\
20 \log \left| \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \cdot 1 / \left(1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right) \right| &= -3 \\
\log \left| \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \cdot 1 / \left(1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right) \right| &= -3/20 \\
\left| \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \cdot 1 / \left(1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right) \right| &= 10^{-3/20} \\
\left| \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \cdot 1 / \left(1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right) \right|^2 &= 10^{(-3/20)^2}
\end{aligned}$$

Ora, $10^{(-3/20)^2} = 10^{-3/10} \approx 1/2$. Quindi, sostituendo,

$$\left| \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \cdot 1 / \left(1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right) \right|^2 = \frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right|^2 &= \frac{1}{2} \cdot \left| 1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right|^2 \\ \frac{G^2}{\omega^2} &= \frac{1}{2} \cdot \left| 1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau} \right|^2 \\ \frac{\pi^2}{16\omega^2\tau^2} &= \frac{1}{2} \cdot \left| 1 + \frac{\pi}{4i\omega\tau} e^{-i\omega\tau} \right|^2 \\ \frac{\pi^2}{16\omega^2\tau^2} &= \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{4i\omega\tau + \pi e^{-i\omega\tau}}{4i\omega\tau} \right|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2\pi^2 &= |4i\omega\tau + \pi e^{-i\omega\tau}|^2 \\ 2\pi^2 &= |4i\omega\tau + \pi \cos(\omega\tau) - \pi i \sin(\omega\tau)|^2 \\ 2\pi^2 &= |\pi \cos(\omega\tau) + i(4\omega\tau - \pi \sin(\omega\tau))|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2\pi^2 &= \pi^2 \cos^2(\omega\tau) + (16\omega^2\tau^2 + \pi^2 \sin^2(\omega\tau) - 8\pi\omega\tau \sin(\omega\tau)) \\ 16\omega^2\tau^2 - 8\pi\omega\tau \sin(\omega\tau) + \pi^2(\cos^2(\omega\tau) + \sin^2(\omega\tau)) - 2\pi^2 &= 0 \end{aligned}$$

$$16\omega^2\tau^2 - 8\pi\omega\tau \sin(\omega\tau) - \pi^2 = 0$$

Si può risolvere questa equazione in $\omega\tau$ graficamente. Ora, per completezza di notazione, si indicherà ω (valore che assume la funzione in -3dB) con $\omega_{-3\text{dB}}$. Tra 0 e 2π , si ha una soluzione per

$$\omega_{-3\text{dB}}\tau = 1,84$$

cioè, isolando $\omega_{-3\text{dB}}$ e moltiplicando numeratore e denominatore per 2π ,

$$\omega_{-3\text{dB}} = \frac{2\pi}{3,41\tau}$$

B.3 Funzione di trasferimento d'errore

Lo stesso procedimento usato per trovare $\omega_{-3\text{dB}}$ verrà ripetuto con la *error transfer function* (*ETF*), ma si troverà la $\omega = \omega_{0\text{dB}}$

$$\begin{aligned}
|ETF| &= \left| \frac{1}{1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau}} \right| \\
&= \left| \frac{1}{1 + \frac{G}{s} e^{-s\tau}} \right| = 10^0 \\
&= \left| \frac{1}{1 + \frac{G}{i\omega} e^{-i\omega\tau}} \right| = 1 \\
1 \cdot \left| 1 + \frac{\pi}{4i\omega\tau} e^{-i\omega\tau} \right| &= |1| \\
\left| \frac{4i\omega\tau + \pi e^{-i\omega\tau}}{4i\omega\tau} \right|^2 &= 1^2 \\
\frac{16\omega^2\tau^2 + \pi^2 - 8\pi\omega\tau \sin(\omega\tau)}{16\omega^2\tau^2} &= 1 \\
16\omega^2\tau^2 - 8\pi\omega\tau \sin(\omega\tau) + \pi^2 &= 16\omega^2\tau^2
\end{aligned}$$

Si arriva così all'equazione

$$8\omega\tau \sin(\omega\tau) - \pi = 0$$

Risolvendo graficamente in $\omega\tau$ tra 0 e 2π , si trova una prima soluzione per

$$\omega_{0dB}\tau = 0,648$$

Isolando ω_{0dB} e mettendo in evidenza 2π si ha

$$\omega_{0dB} = \frac{2\pi}{9,7\tau}$$

B.4 Confronto fra le ω trovate

Riepilogando, per un sistema come quello schematizzato nella figura B, è stata ottenuta la frequenza di overshoot ω_c . Essa corrisponde ad un dato valore di G .

A tale valore, la *closed loop transfer function* è tale da avere una larghezza di banda definita dal valore di ω_{-3dB} ; mentre la larghezza di banda della *error transfer function* è data dal valore di ω_{0dB} :

$$\omega_{-3dB} = \frac{2\pi}{3.41\tau}; \quad \omega_c = \frac{2\pi}{8\tau}; \quad \omega_{0dB} = \frac{2\pi}{9.7\tau}$$

Da queste tre espressioni si possono trovare le seguenti relazioni, fra gli ω , legate tra loro dal tempo di campionamento τ .

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{\tau} &= 3,41 \omega_{-3\text{dB}} = 8 \omega_c = 9,7 \omega_{0\text{dB}} \\ \omega_{-3\text{dB}} &= 2,35 \omega_c = 2,84 \omega_{0\text{dB}} \\ \omega_c &= 0,42 \omega_{-3\text{dB}} = 1,21 \omega_{0\text{dB}} \\ \omega_{0\text{dB}} &= 0,35 \omega_{-3\text{dB}} = 0,82 \omega_c \end{aligned}$$

Se, per esempio, il tempo di campionamento è di 1ms , i corrispondenti valori degli ω saranno:

$$\begin{aligned} \omega_{-3\text{dB}} &= \frac{2\pi}{3,41\tau} = 1843 \text{ rad/s} = 293 \text{ Hz} \\ \omega_c &= \frac{2\pi}{8\tau} = 785 \text{ rad/s} = 125 \text{ Hz} \\ \omega_{0\text{dB}} &= \frac{2\pi}{9,7\tau} = 648 \text{ rad/s} = 163 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Appendice C

Funzioni di Bessel

Le funzioni di Bessel di ordine intero sono le soluzioni dell'equazione differenziale

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} - \left(1 + \frac{n^2}{x^2}\right) y = 0$$

e sono date dalla somma della serie:

$$J_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \cdot (n+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k}$$

che definisce la funzione di Bessel di ordine n .

Bibliografia

- [Brusa et Al, 1998] G. Brusa, A. Riccardi. *Adaptive secondary P30 prototype: laboratory results*, 1998.
- [Brusa et Al, 1999] G. Brusa, A. Riccardi. *From adaptive secondary mirrors to extra-thin extra-large adaptive primary mirrors*, 1999.
- [Brusa et Al, 1999] G. Brusa, A. Riccardi. *The adaptive secondary mirror for the 6.5m conversion of the Multiple Mirror Telescope*, 1999.
- [Carbillet et Al, 2004] M. Carbillet, A. Riccardi, S. Esposito. *Numerical simulation studies for the first-light adaptive optics system of the Large Binocular Telescope*, 2004.
- [Gaessler et Al, 2004] W. Gaessler, R. Ragazzoni *LINC-NIRVANA: how to get a 23-m wavefront nearly flat*, 2004.
- [Cambridge U.P, 1988] Cambridge University press. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing (Sezioni 2.6 e 15.4)*, 1988.
- [Carrol, 1996] B. W. Carrol, D. A. Ostlie. *An introduction to modern astrophysics, (Capitolo 6)*, 1996.
- [Demerlé, 1996] M. Demerlé, *Introduction to automatic control*,
- [Del Vecchio et Al, 2001] C. Del Vecchio, C. Gallieni. *Design improvements of the LBT adaptive*, 2001.
- [Esposito, Riccardi, 2001] S. Esposito, A. Riccardi. *A&A 369, L9*, 2001.
- [Fried, 1966] Fried, D. L. *Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures*, J. Opt. Soc. Am., 56, 1372-1379; 1966.

- [Gallieni et Al, 2003] D. Gallieni, E. Anaclerio. *Adaptive secondary units final design and construction*, 2003.
- [Goodman, 1985] J. W. Goodman. *Statistical Optics*, 1985.
- [Goodman, 1968] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* 1968.
- [Hardy, 1998] J. W. Hardy. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*, 1998.
- [Microgate srl, 2003] Microgate Srl. *Technical Report – f/15 Adaptive Secondary mechanical design*, 2003.
- [Nelder, 1965] Nelder e Mead. *Computer Journal, Vol 7, pp 308-313*, 1965.
- [Ragazzoni, 1995] R. Ragazzoni. *Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism. Taylor and Francis Ltd, 2, 289-293* 2005.
- [Riccardi, et Al, 2000] A. Riccardi, G. Brusa. *The Adaptive secondary mirror for the 6.5 conversion of the Multiple Mirror Telescope: latest laboratory results of the P36 prototype*, 2000.
- [Riccardi et Al, 2003] A. Riccardi, G. Brusa. *Adaptive secondary mirror for the Large Binocular Telescope*, 2003.
- [Riccardi et Al, 2001] A. Riccardi, G. Brusa. *The adaptive secondary mirror for the 6.5m conversion of the Multiple Mirror Telescope*, 2001.
- [Roddier, 1981] F. Roddier. *Computer Journal, Vol 7, pp 308-313*, 1981.
- [Sandler, 1993] D. Sandler, S. Stahl. *Adaptive optics for diffraction-limited infrared imaging with 8m telescopes*, 1993.
- [Shack and Platt, 1971] R. V. Shack, B. C.Platt. *Infrared Smartt interferometer, J. Opt. Soc. Am., 61, 656*, 1971.
- [Trumper, 2003] D. L. Trumper. *Second order step response*, 2003.
- [Wildi et Al, 2003] F. Wildi et Al. *Towards 1st light of the 6.5m MMT adaptive optics system with deformable secondary mirror*, 2004.

Ringraziamenti

Siccome sappiamo bene tutti quanti, e non neghiamo, che quello che la gente guarda in una Tesi è la pagina dei ringraziamenti, allora è meglio spenderci qualche minuto in più per renderla speciale. Siccome sappiamo altrettanto bene, e non neghiamo, che normalmente si arriva con l'acqua alla gola all'ultimo giorno disponibile per la consegna, allora si capisce perché anche questa pagina dei ringraziamenti sarà un casino pazzesco.

Innanzitutto ringrazio tutta la mia famiglia al completo, nessuno escluso, per l'appoggio affettivo-morale-finanziario-psicologico in tutti questi anni mentre ero sparso per le varie città d'Italia (che poi sono state solo Bologna e Firenze).

Poi vorrei ringraziare il mio mondo più vicino: il famoso "Tigullio e Golfo Paradiso", dove non vedo l'ora di ritornare (continuare?) a nullafacere. Quindi grazie ad Emi e Gigi: il primo sempre incazzato per motivi che vanno dalla pena di morte alle partite e ai lavori stradali... abbiamo passato anni di demenza intelligente (che figura retorica è?); il secondo sempre in viaggio in giro per il mondo, "perso dentro ai fatti suoi", o a propormi qualche assurda idea irrealizzabile tipo comprare in comproprietà un masterizzatore audio nel 1997. Grazie a Giulia con la quale ho condiviso un anno irripetibile, questa tesi è anche un po' sua; a Sara per i corsi di genovese e il polpo con le patate, a Marghe per l'amicizia d'infanzia sempre citata, Gabriele e La Superba, in attesa che La Bionda ci suoni insieme a Niasca.

Non posso non ricordare l'Abruzzo con Flavia ursus speleus, la migliore amica sempre troppo poco *live* e sempre troppo telefonica; sua cugina Francesca, che si fa bella e diventerà una missionaria comboniana stupenda;

Roberta per gli “eja sà” e gli altri intercalare tipici.

Un grazie alla marea di coinquilini che si sono alternati nel sopportarmi, in particolare a Carlo ö spézìn; Pietro il lucano mentore informatico; Claudio per il 5 maggio e per avermi fatto conoscere un universo di musica incredibile; Nicola per la moderazione ed i bellissimi dibattiti politici; Andrea, il vecchio bresciano dal cuore adolescente, per i programmi di disegno 3D e le partite a FIFA; Matheus e Manu, anche se non la leggeranno mai, per l’arroz e feijões e l’accento familiare.

Comincerò a ringraziare gli astronomi da quelli che sono stati anche miei coinquilini: Daniele per le migliori pastasciutte e le gite sulle montagne di Itri con Rosa e famiglie; Laura, per avermi trasmesso mille interessi, per l’attenzione e l’appoggio speciale volontario e involontario; Giorgia, che il primo anno non ricordavo mai come si chiamava e la indicavo come “quella così gentile e sorridente con tutti”... soppa che coincidenza! Ringrazio Claudia per le gite alla coop e i film d’autore; Chiara l’astronoma onoraria (che con Laura completa la casa dello schema di beautiful); Davide MP per il maschilismo difeso a spada tratta e l’italiano di Petrarca; Francesco il Rapper per il corso di giapponese iniziato e mai finito; Annamaria per aver ispirato una canzone di grande successo; Daria per il primo giorno di scuola con la maglietta di Stonehenge e Amalia per i gatti umani in preda allo stress da convivenza; Giovi & Nico per aver reso la nostra classe ancora più unica e per aver contribuito con tutti a creare, davvero, un’atmosfera di persone che condividevano una passione, senza la quale saremmo stati solo compagni di corso di una facoltà qualsiasi.

Ed ora i Cinesi e dintorni: un grazie a Sara per la grinta alla guida della sua Panda, per i Queen e il femminismo difeso a spada tratta (dovrei farti conoscere Davide MP); Eleonora la sposa del Palio; Marco crudelissimo maestro di pianoforte; Francesco che impara \LaTeX lo mette da parte; Cecilia che vuole il caffè fatto da me; Antonietta che il caffè lo fa molto meglio di me; Francesca, adattiva novella che fa rima con Codella e la sua simpatia; la Stefi a Trieste; tutto il gruppo del calcetto, in particolare Enrico e il suo miele, i portoghesi João e Zè sempre in squadra con me per motivi di accento, Tommi e Jacopo Chelazzo. Avete interrotto il mio digiuno da gol che durava dal 1998.

transpose(A Daniela per l'aiuto veronese e a Marco per l'aiuto all'inglese)[clact] per IDL va un ringraziamento speciale, così come ad Armando per il metodo scientifico [Galileo, 1580].

Non posso poi non citare Roberta e Patti, un'astronoma e una regista, per le ospitalità e il sostegno di sempre. Alla prima do un bacio e prometto di regalare un Panda vero a costo di clonarlo, alla seconda do un abbraccio e un buono per supporto informatico perpetuo in caso di montaggi video.