

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Tesi di Laurea Specialistica in Astrofisica

**Filtro sintonizzabile a cristalli  
liquidi: un esperimento per il  
phasing di un ELT.**

*Candidato:* Marco Bonaglia

*Relatore:* Prof. Bruno Marano

*Correlatore:* Dott. Simone Esposito

Anno Accademico 2006-2007



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione.</b>	<b>1</b>
1.1	ELTs: <i>Extremely Large Telescopes</i> . . . . .	1
1.1.1	Processo di phasing. . . . .	4
1.2	APE: <i>Active Phasing Experiment</i> . . . . .	7
1.3	PYPS: <i>PYramid Phasing Sensor</i> . . . . .	12
1.3.1	Sensore a piramide. . . . .	12
1.3.2	Modulazione di tip-tilt globale. . . . .	15
1.3.3	SP con fronte d'onda discontinuo. . . . .	17
1.3.4	Analisi dei segnali ottenuti da PYPS. . . . .	18
1.4	Soluzione dell'ambiguità di fase. . . . .	21
1.4.1	WST: <i>Wavelength Sweeping Technique</i> . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Algoritmo di phasing.</b>	<b>29</b>
2.1	Procedura di acquisizione dei segnali. . . . .	30
2.2	Procedura di identificazione delle sottoaperture. . . . .	32
2.3	Procedura di fitting. . . . .	33
2.4	Procedura di calcolo dei gradini. . . . .	42
2.5	Procedura di phasing dello specchio. . . . .	45

<b>3</b>	<b>Simulazione numerica.</b>	<b>51</b>
3.1	Simulatore del sensore a piramide. . . . .	53
3.2	Verifica della WST. . . . .	55
3.2.1	Analisi con un segmento defasato. . . . .	55
3.2.2	Analisi con uno specchio defasato. . . . .	61
3.3	Risultato del phasing tramite il WPA. . . . .	69
<b>4</b>	<b>Apparato sperimentale.</b>	<b>75</b>
4.1	Ottiche di ingresso. . . . .	77
4.1.1	Specchio deformabile . . . . .	80
4.2	Sensore di fronte d'onda per il phasing. . . . .	82
4.3	Filtro sintonizzabile a cristalli liquidi. . . . .	86
<b>5</b>	<b>Misure sperimentali.</b>	<b>91</b>
5.1	Calibrazione del MEMS-DM. . . . .	92
5.2	Misura dei gradini con la WST. . . . .	99
5.3	Analisi dei risultati sperimentali. . . . .	101
5.4	Sviluppi futuri. . . . .	105
<b>6</b>	<b>Conclusioni.</b>	<b>107</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>I</b>

# Capitolo 1

## Introduzione.

### 1.1 ELTs: *Extremely Large Telescopes*.

Attualmente i maggiori telescopi ottici e infrarossi terrestri hanno specchi principali di  $8 \div 10m$  di diametro. Gli specchi monolitici, come quelli del *Large Binocular Telescope* (LBT), hanno un limite costruttivo di  $8.4m$  [1]. Per ottenere specchi principali di diametro maggiore è necessario segmentarli come i due telescopi Keck. Questi hanno  $10m$  di diametro e sono costituiti da 36 segmenti esagonali con lato di  $0.9m$  [2].

La nuova generazione di telescopi in progettazione prevede l'impiego di specchi primari segmentati al di sopra dei  $20m$  di diametro, i cosiddetti *Extremely Large Telescopes* (ELTs). Uno schema riassuntivo dello stato attuale della realizzazione di questi strumenti è dato in Tabella 1.1.

La risoluzione angolare massima ottenibile da un telescopio nel caso sia unicamente limitato dalla diffrazione è  $\lambda/D$ , dove  $\lambda$  indica la lunghezza d'onda di osservazione e  $D$  il diametro dello specchio primario dello strumento. Nel caso di uno specchio segmentato questo limite può non essere raggiunto a

Nome dello strumento	$D_{tot}$ [m]	$D_{seg}$ [m]	$N_{seg}$	Prima luce
European ELT (E-ELT) [3]	42	1.45	902	2017
Thirty Meter Telescope (TMT) [4]	30	1.2	738	2015
Giant Magellan Telescope (GMT) [5]	24.5	8.4	7	2016

Tabella 1.1: Situazione attuale dei progetti ELT attivi, caratteristiche della realizzazione degli specchi principali e data prevista per l'ultimazione del telescopio. Con  $D_{tot}$  si indica il diametro totale dello specchio principale, con  $D_{seg}$  quello di un singolo segmento e con  $N_{seg}$  il numero di segmenti di cui è composto.

causa degli errori associati al posizionamento dei segmenti. Questi sono di due tipi (vedi Figura 1.1):

1. errori di *tip-tilt* ( $\delta_T$ ), rappresentano l'errore nell'allineamento della superficie del segmento parallelamente al piano ideale dello specchio;
2. errori di *pistone* ( $\delta$ ), indicano la traslazione del segmento lungo l'asse ottico del sistema.

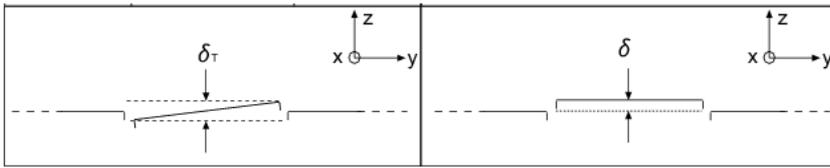


Figura 1.1: Principali tipi di errore nel posizionamento dei segmenti risolvibili rispettivamente con l'allineamento ed il phasing dello specchio. Con  $\delta_T$  si indica un errore di puro tilt del segmento, mentre con  $\delta$  uno di puro pistone.

I primi vengono eliminati tramite le procedure di *allineamento* dello specchio, mentre la riduzione degli errori di pistone è lo scopo del processo di *phasing*.

Considerando in prima analisi uno specchio segmentato perfettamente allineato e con segmenti ideali (intersegmento infinitesimo e bordo a profilo retto) la discontinuità introdotta dalla segmentazione comporta effetti diffrattivi aggiuntivi sulla PSF<sup>1</sup> del telescopio rispetto alla diffrazione generata dall'equivalente specchio monolitico. E' stato infatti dimostrato [7] che si ottiene:

$$PSF(\vec{\omega}) = \left( \frac{AN}{\lambda z} \right)^2 GF(\vec{\omega}) PSF_s(\vec{\omega}), \quad (1.1)$$

dove  $A$  è la superficie del singolo segmento,  $N$  il numero totale degli elementi,  $z$  la distanza focale,  $\lambda$  la lunghezza d'onda della radiazione considerata,  $PSF_s$  è la PSF del singolo segmento e  $\vec{\omega}$  è il vettore posizione sul piano focale. In sostanza l'effetto diffrattivo della segmentazione ideale è tutto contenuto nel fattore di griglia  $GF(\vec{\omega})$ , che risulta essere la trasformata di Fourier della griglia di segmentazione.

Si può stimare che un errore di pistone sul fronte d'onda distribuito sugli  $N$  segmenti aventi un RMS pari a  $\delta$  dia un *rapporto di Strehl*<sup>2</sup> [8]:

$$SR = \frac{1 + (N - 1)e^{-\sigma^2}}{N}, \quad (1.2)$$

dove  $\sigma^2$  è la varianza della fase sugli  $N$  segmenti.

Dall'equazione 1.2 è evidente come, per telescopi ad alto grado di segmen-

---

<sup>1</sup>Con PSF si indica la *Point Spread Function* che rappresenta la risposta impulsiva del sistema ottico [6], ovvero in altri termini l'immagine di una sorgente puntiforme creata dal sistema.

<sup>2</sup>Il *rapporto di Strehl* (SR) è definito come il rapporto fra il picco della PSF in presenza di aberrazioni e della PSF limitata solo dalla diffrazione. Un sistema aberrato distribuisce l'energia su di una superficie maggiore, riducendo quindi il valore del picco centrale e ottenendo  $SR < 1$ . Questo rapporto è un utile parametro per quantificare la qualità di un'immagine prodotta da un sistema ottico.

tazione, considerando lo specchio non fasato ( $\sigma \rightarrow \infty$ ), la sovrapposizione incoerente delle immagini prodotte dagli  $N$  segmenti degradi le prestazioni dello strumento rispetto al suo utilizzo dopo aver eseguito il phasing.

L'andamento dell'equazione 1.2 è riportato in Figura 1.2 dalla quale è evidente come una RMS di residui di pistone dell'ordine di  $\lambda/3$ , considerando  $\lambda = 650nm$ , comprometta drasticamente la qualità del sistema ( $SR < 0.1$ ), mentre per ottenere prestazioni comparabili a quelle di uno specchio monolitico sia necessario avere una correzione del pistone con un RMS residuo dell'ordine di  $\lambda/20$  ( $SR > 0.9$ ).

### 1.1.1 Processo di phasing.

È stata quindi dimostrata la necessità di controllare la posizione dei segmenti di uno specchio composito al fine di raggiungere il limite diffrattivo dello strumento. Bisogna quindi ricordare che ogni segmento, durante il normale utilizzo del telescopio, è soggetto a sollecitazioni gravitazionali variabili e alla pressione del vento. Risulta quindi necessario eseguire delle correzioni attive a bassa frequenza ( $\nu < 0.1Hz$ ) che permettano di compensare le aberrazioni degli specchi derivanti da questi fenomeni (Ottica Attiva) oltre che controllare i tre gradi di libertà associati al posizionamento di ogni segmento al di fuori del piano del supporto.

Il controllo attivo che effettua l'allineamento e il phasing si compone di:

- attuatori meccanici, in genere tre disposti sulla faccia posteriore del segmento;
- sensori di posizione, tipicamente capacitivi, in grado di misurare la posizione relativa dei bordi tra segmenti adiacenti;

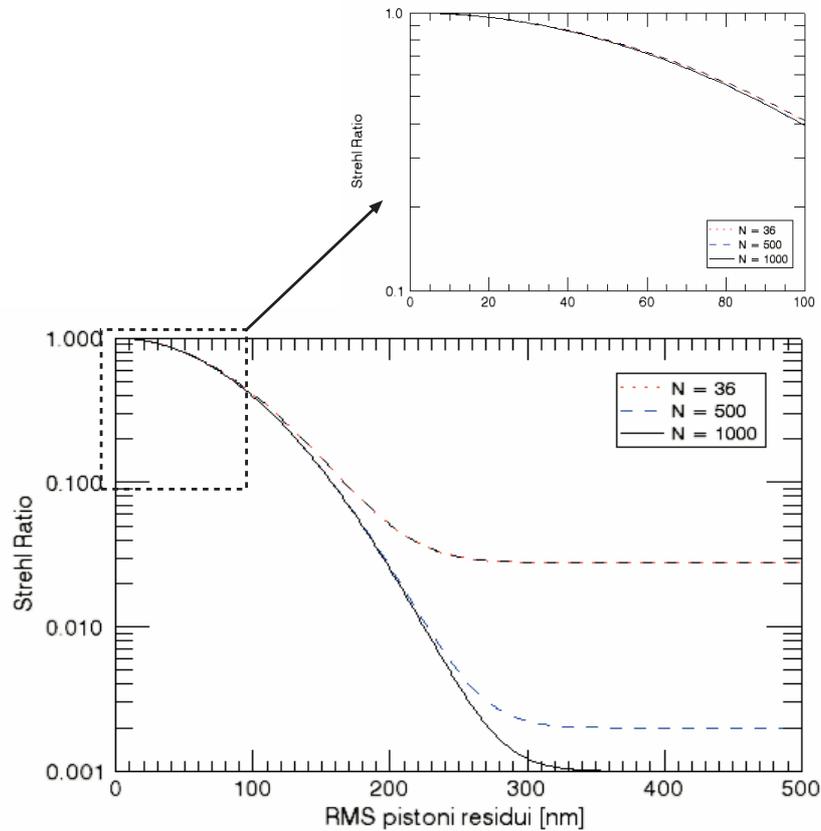


Figura 1.2: Andamento del rapporto di Strehl in funzione della deviazione standard degli errori di pistone riferiti al fronte d'onda. In colori diversi sono evidenziati diversi gradi di segmentazione, partendo dai 36 segmenti che compongono i telescopi Keck fino ai circa 1000 del futuro E-ELT.

- un sensore di phasing (PWFS), cioè un sensore di fronte d'onda che misura otticamente la posizione relativa dei segmenti.

Questa strumentazione interagisce in due cicli separati: un primo ciclo interno tra i sensori di bordo e gli attuatori ed un secondo ciclo esterno tra il sensore di phasing e quelli di bordo.

Il primo serve alla correzione veloce della posizione dei segmenti tramite la

misura della capacità dei sensori di bordo e funziona con una frequenza di campionamento  $\nu = 10Hz$  [9] durante tutto il tempo di osservazione. Questo consente di mantenere costanti le posizioni dei bordi tra due segmenti adiacenti, essendo sensibile soltanto agli spostamenti relativi. Poichè queste misure sono soggette ad una lenta variazione dovuta all'umidità, alle fluttuazioni termiche della strumentazione, oltre che alle deformazioni gravitazionali dello specchio, è necessario eseguire una calibrazione indipendente che definisca le corrette posizioni dei segmenti al fine di ottenere la migliore approssimazione alla superficie continua.

Il secondo ciclo serve quindi a verificare l'effettiva posizione dei segmenti che verrà corretta col ciclo interno: le misure vengono eseguite su tutta la superficie segmentata attraverso il sensore di phasing. Questa tecnica viene chiamata *phasing ottico*. Questa necessita che l'intera superficie dello specchio primario sia illuminata con un'onda piana così, analizzando il fronte d'onda riflesso attraverso il PWFS, è possibile determinare le aberrazioni introdotte dal sistema. L'utilizzo di una stella naturale comporta l'introduzione sul fronte d'onda in arrivo nel telescopio degli effetti di turbolenza dovuti all'atmosfera. Queste perturbazioni seguono una statistica gaussiana a media nulla, quindi senza disporre di correttori di Ottica Adattiva si selezionano tempi di integrazione tali che gli effetti casuali introdotti possano essere trascurati.

Al phasing ottico per gli ELTs vengono richiesti principalmente due differenti compiti:

1. il primo phasing, ovvero la messa in fase di un segmento appena integrato nello specchio. Questa applicazione richiede intervalli di lavoro

molto estesi dei i sensori di fronte d'onda.

2. il phasing durante le osservazioni ad alta risoluzione spaziale per rendere massima la risoluzione angolare dello strumento.

## 1.2 APE: *Active Phasing Experiment*.

L'*Active Phasing Experiment* (APE) è stato finanziato dalla Comunità Europea e coordinato dall'*European Southern Observatory* (ESO) nell'ambito del programma FP6 come workpackage inserito nello studio di fattibilità di un ELT europeo. Gli obiettivi dell'esperimento possono essere riassunti nei seguenti livelli principali:

1. verifica e test di diversi sensori ottici e algoritmi correlati per il phasing;
2. determinazione della migliore tecnica di phasing per l'applicazione al progetto E-ELT;
3. studio dell'effetto del phasing sulle immagini ottenute da un telescopio.

Negli ultimi anni sono stati proposti 4 tipi di sensori di fronte d'onda in grado di rilevare gli errori dovuti alla segmentazione di uno specchio, APE si propone di testarne le prestazioni e di comparare i risultati ottenuti sia in ciclo aperto che in ciclo chiuso di misura. La differenza tra queste due modalità di misura consiste nel fatto che il ciclo aperto è dato dalla rilevazione tramite il PWFS della posizione dei segmenti dello specchio, mentre il ciclo chiuso comporta anche l'iterazione tra il PWFS e gli attuatori dello specchio in quanto si correggono gli errori rilevati, come nel caso reale dell'ELT.

L'esperimento prevede una prima fase di test in laboratorio utilizzando una

sorgente policromatica con e senza turbolenza atmosferica, ottenuta grazie all'impiego di schermi di fase. Successivamente saranno eseguiti dei test collegando APE all'UT3 del *Very Large Telescope* (VLT) [10] a Paranal in Cile.

Il progetto ottico di APE prevede l'impiego di uno specchio attivo (ASM) [11] [12], composto da 61 segmenti esagonali per un diametro totale di circa  $15\text{cm}$  mostrato in Figura 1.3, di un'unità di metrologia interna (IM) [13] e di quattro diversi sensori di fronte d'onda (PWFS) per la misura del pistone, tip e tilt dei segmenti e delle aberrazioni del VLT .

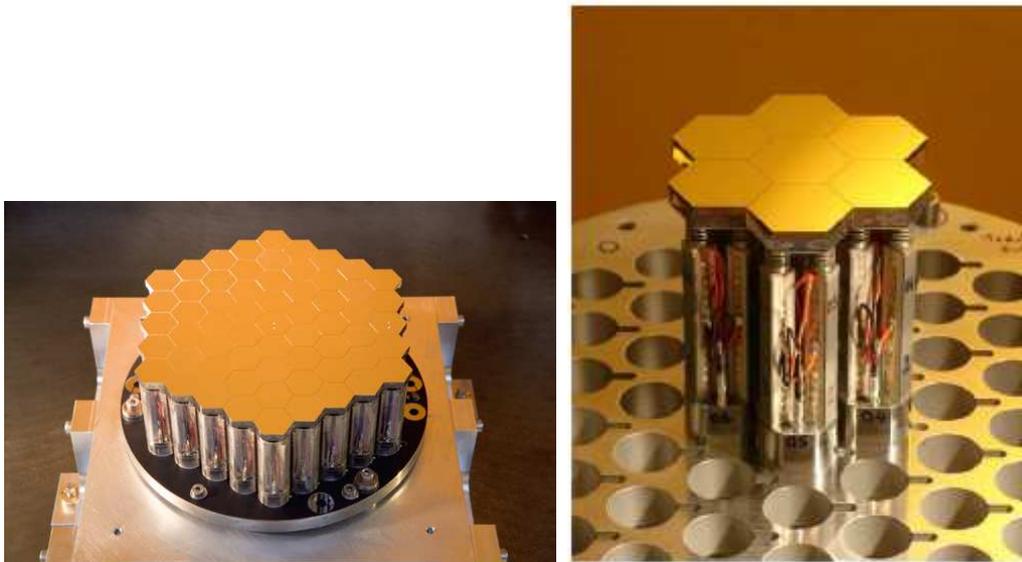


Figura 1.3: A sinistra: immagine dell'*Active Segmented Mirror* (ASM), composto da 61 segmenti esagonali per un diametro totale di  $15\text{cm}$ . La pupilla proiettata del VLT ha una dimensione di  $13\text{cm}$ . A destra: particolare degli attuatori del prototipo realizzato, ognuno di questi è controllato elettronicamente per ottenere una risoluzione dell'ordine del  $\text{nm}$  con una frequenza di  $10\text{Hz}$ . Questi hanno associata un'ampiezza lineare di  $30\mu\text{m}$ .

Lo schema ottico di APE è mostrato in Figura 1.4, dalla quale si nota come

i PWFS condividano lo stesso fascio in arrivo dal telescopio allo scopo di ottenere in ingresso la stessa qualità ottica facilitando così il confronto delle loro prestazioni. L'unità di IM invece è posta lungo un differente cammino ottico ed è costituita da un interferometro a doppia lunghezza d'onda (835 – 850nm con una FWHM di 15nm) che prende il posto dei sensori di bordo nei progetti degli ELT. L'IM è in grado di controllare in un ciclo chiuso interno pistone, tip e tilt di ogni segmento dell'ASM con un'accuratezza dell'ordine del nanometro ed una frequenza di 10Hz.

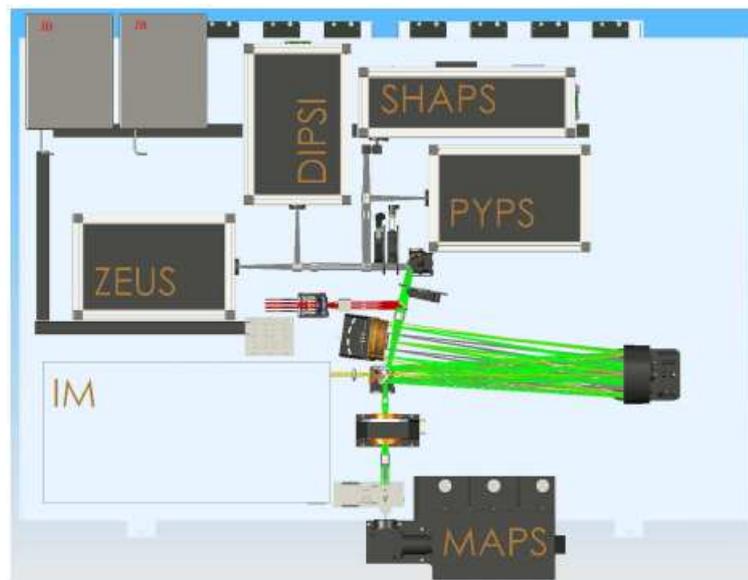


Figura 1.4: Schema ottico di APE. L'unità *Multi Atmospheric Phase Screen and Stars* (MAPS) è utilizzata come sorgente di riferimento per i test di laboratorio e viene rimossa durante le operazioni all'UT del VLT. Sono rappresentati i 4 PWFS e lo specchio attivo ASM posto al centro del banco ottico.

I quattro sensori di fronte d'onda studiati per il phasing sono:

- DIPS: *Diffraction Image Phase Sensing Instrument* [14], realizzato dall'Istituto de Astrofisica de Canarias, si basa sul sensore a curvatura;

- PYPS: *PYramid Phasing Sensor* [15], cioè il sensore a piramide realizzato dall'Osservatorio Astrofisico di Arcetri,
- ZEUS: *Zernike Unit for Segmented phasing* [16], realizzato dal Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, si basa sulla tecnica del contrasto di fase;
- SHAPS: *Shack-Hartmann Phasing Sensor* [17], realizzato dall'European Southern Observatory, utilizza il sensore di Shack-Hartman

Questi sensori sono impiegati in un ciclo chiuso esterno per determinare la posizione dei segmenti dell'ASM con tempi di misura maggiori,  $\nu \simeq 0.03Hz$ , rispetto all'IM. L'alto tempo di integrazione per i PWFS è dato dal fatto che il fascio in ingresso nei vari sensori è distorto non solo dallo specchio segmentato ma anche dagli effetti dell'atmosfera. In laboratorio questa è simulata utilizzando l'unità *Multi Atmospheric Phase Screen and Stars* (MAPS) [18] che permette l'introduzione di un seeing variabile tra 0.4 e 0.85 $arcsec$  (vedi Figura 1.4), mentre al VLT i sensori verranno testati in presenza dell'atmosfera reale.

Gli effetti della turbolenza atmosferica possono essere visti come delle aberrazioni casuali di fase associate al fascio raccolto dal telescopio. Si può assumere [19] che queste aberrazioni seguano una statistica gaussiana. Per cui selezionando un tempo di integrazione di 30s è possibile mediare questi effetti casuali, ottenendo al limite (per un tempo di integrazione infinito) un valore nullo di aberrazione della fase.

Le prestazioni dei quattro sensori di fronte d'onda integrati in APE verranno valutate in base ai parametri:

1. accuratezza finale,
2. intervallo di cattura,
3. tempo di funzionamento,
4. magnitudine limite della stella di riferimento.

L'accuratezza finale è espressa dagli errori residui sullo specchio dopo aver eseguito il phasing, mentre l'intervallo di cattura indica il massimo errore di pistone che il PWFS può misurare. Il tempo di funzionamento dei PWFS tiene conto del tempo richiesto per la calibrazione del sensore di phasing e di quello per chiudere il ciclo di correzione dei pistoni dei segmenti. La calibrazione iniziale consiste nell'acquisizione degli *zeri del segnale* e della *matrice di interazione*. Questi sono necessari in quanto registrano la risposta del sensore in caso di differenza di fase nulla e unitaria rispettivamente. Il ciclo di correzione con un sensore di phasing è l'interazione della sequenza di misura dei segnali del sensore, stima della posizione dei segmenti e di correzione.

Poichè si vuole utilizzare una stella naturale per l'illuminazione dello specchio è indispensabile chiedersi la magnitudine limite necessaria a raggiungere la precisione richiesta. Nel caso del phasing ad alta risoluzione spaziale utilizzato durante il periodo di osservazione del telescopio (vedi paragrafo 1.1.1) la magnitudine limite è un parametro critico. Infatti la stella di riferimento deve essere nel campo di vista (FoV) dello strumento puntato in una direzione casuale. La probabilità che una tale stella sia osservabile all'interno del FoV dipende dalla sua magnitudine e dalla larghezza della banda utilizzata. La magnitudine limite per un PWFS quindi è data dalla possibilità di chiudere un ciclo con una determinata stella ad una determinata frequenza e dalla

precisione finale raggiunta. Nel caso si consideri l'applicazione di primo phasing questo parametro non è fondamentale in quanto con questa procedura si riducono gli errori di posizionamento iniziali dei segmenti prima della fase di osservazione. Questo processo può essere eseguito puntando ad una qualsiasi stella in cielo.

### 1.3 PYPS: *PYramid Phasing Sensor*.

PYPS è un sensore di fronte d'onda a piramide (SP) con modulazione di tilt per il phasing e l'allineamento di specchi segmentati. Il SP è nato come sensore di Ottica Adattiva<sup>3</sup> (OA) [20] [21] [22] e la possibilità dell'impiego per il phasing è stata dimostrata sia attraverso simulazioni numeriche [23] che sperimentalmente [24] [25] al *William Herschel Telescope* (WHT). Inizialmente verrà descritto il SP come strumento per l'analisi di fronti d'onda continui e poi verrà descritto il suo utilizzo nell'ambito del phasing ottico.

#### 1.3.1 Sensore a piramide.

La configurazione del SP utilizzato per il phasing è la stessa che si ha per l'Ottica Adattiva [26], mostrata in Figura 1.5, e consiste di quattro elementi principali:

1. una lente d'ingresso, che generi l'immagine della pupilla in corrispon-

---

<sup>3</sup>L'ottica adattiva è una tecnica per compensare in tempo reale le deformazioni del fronte d'onda introdotte dall'atmosfera terrestre. Questo è possibile inserendo nel fascio un dispositivo, di solito uno specchio deformabile, che sia capace di introdurre una distorsione di fronte d'onda uguale e contraria a quella generata dalla turbolenza atmosferica.

- denza del piano in cui è posto lo specchio di tip-tilt e che focalizzi il fascio sul vertice della piramide;
2. specchio di *tip-tilt*: coniugato alla pupilla del sistema ottico, introduce la modulazione di tilt globale (vedi paragrafo 1.3.2);
  3. piramide di vetro a base quadrata: posta col vertice nel fuoco nominale del sistema, introduce un filtraggio spaziale nel piano focale del sistema;
  4. lente di camera: necessaria a formare le quattro immagini della pupilla d'uscita sul CCD.

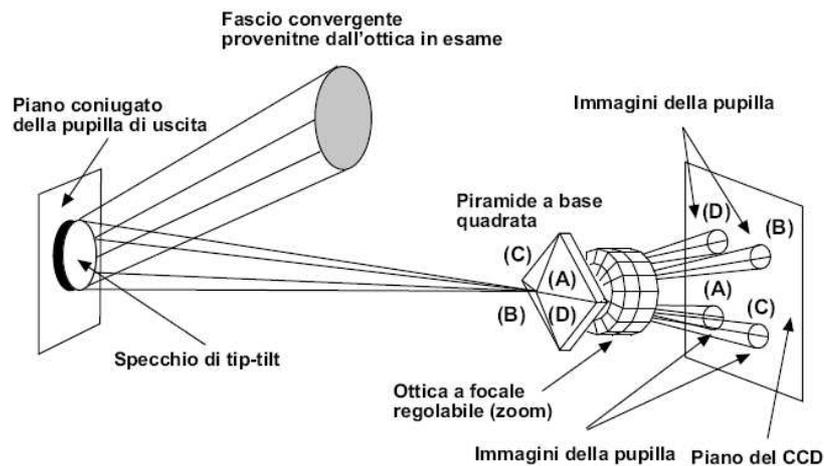


Figura 1.5: Schema ottico del sensore a piramide con modulazione di tilt globale, in questo caso si considera un fronte d'onda perfetto in ingresso del sistema.

Il compito della piramide è quello di deflettere il fascio incidente su di essa in quattro direzioni diverse in relazione all'inclinazione delle sue facce. Nel caso in cui in ingresso si abbia un fronte d'onda perfetto  $W(x, y)$  le immagini delle quattro pupille sul CCD avranno la stessa intensità, mentre quando si introduce un'aberrazione nel fronte d'onda  $W_0(x, y)$  queste ultime variano

luminosità. Infatti, come risulta evidente dalla Figura 1.6, i raggi provenienti dalla regione  $P(x, y)$  della pupilla affetta da aberrazioni non verranno più focalizzati sul vertice della piramide ma ad una distanza  $\Delta\eta$  da esso. Questo

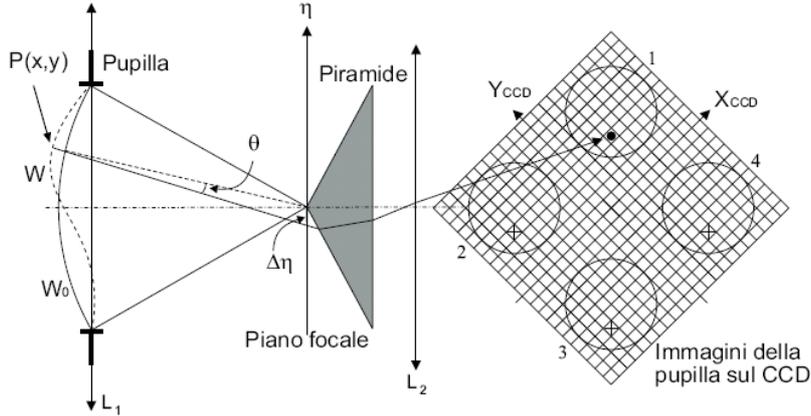


Figura 1.6: Schema funzionamento del sensore a piramide in caso di fronte d'onda perfetto ( $W$ ) e aberrato ( $W_0$ ).  $L_1$  indica la posizione della pupilla,  $L_2$  quella della lente di camera.

implica che i raggi provenienti da  $P(x, y)$  incideranno soltanto su una delle quattro facce della piramide e quindi  $P(x, y)$  verrà visualizzato solamente in una delle quattro immagini della pupilla. Lo sbilanciamento di intensità tra le quattro immagini corrispondenti a  $P(x, y)$  rivela il segno della pendenza del fronte d'onda incidente in quel punto misurata lungo la direzione di  $\Delta\eta$ , infatti vale la relazione:

$$\Delta\eta = f \cdot \frac{\partial W(x, y)}{\partial y}, \quad (1.3)$$

dove  $f$  indica la distanza tra la pupilla di uscita del sistema e il piano nominale del fuoco e considerando  $\Delta\eta$  diretta solo lungo  $y$ .

### 1.3.2 Modulazione di tip-tilt globale.

Lo specchio di tip-tilt è uno specchio piano in grado di oscillare lungo i due assi della sua superficie. In questo modo è possibile variare la posizione del fuoco sul piano della piramide, introducendo una traslazione rigida del punto di fuoco. Affinchè la modulazione introdotta sullo specchio ruoti il fuoco senza variare la posizione delle quattro pupille sul sensore è necessario porre lo specchio in corrispondenza del piano della pupilla, in questo modo i punti sullo specchio e sul CCD sono otticamente coniugati. Quindi introducendo un'opportuna modulazione periodica nel segnale di guida dello specchio il fascio compirà una circonferenza a velocità costante attorno al vertice della piramide, come mostrato a sinistra di Figura 1.7, nel caso di fronte d'onda non aberrato. Si formano in questo caso quattro immagini della pupilla con

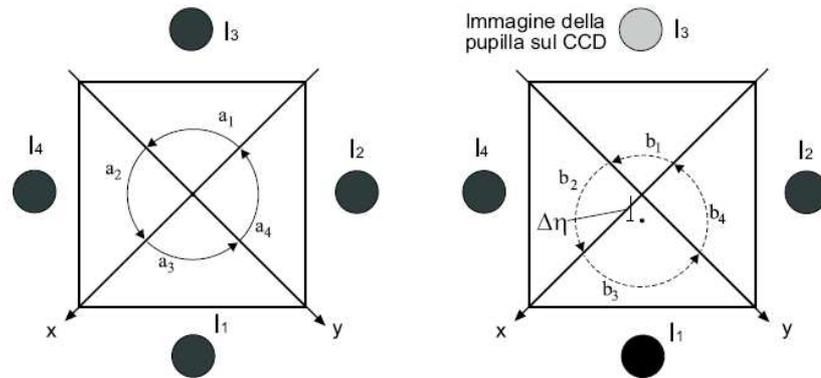


Figura 1.7: Visione schematica della piramide presa lungo l'asse ottico. A sinistra è mostrato il cammino dei raggi provenienti da una pupilla priva di aberrazioni sul piano focale quando è introdotta la modulazione di tilt. A destra: i raggi provenienti dalla regione  $P(x,y)$  della pupilla affetta da aberrazioni (vedi Figura 1.6) non verranno più focalizzati sul vertice della piramide ma ad una distanza  $\Delta\eta$  da esso.

la medesima intensità, infatti il tempo di illuminazione delle varie facce della

piramide è il medesimo, essendo uguali gli archi  $a_i$ .

Introducendo un'aberrazione nel fronte d'onda il raggio corrispondente al punto  $P(x, y)$  descriverà sul piano della piramide una circonferenza non più centrata sul vertice ma spostata di un valore  $\Delta\eta$  da esso. Infatti dall'equazione 1.3 si ricava la relazione:

$$\Delta\eta = \frac{\theta}{f}, \quad (1.4)$$

dove con  $\theta$  si indica l'angolo formato tra i raggi che si propagano da  $P(x, y)$  del fronte d'onda  $W_0$  e quelli di  $W$ , e con  $f$  la distanza focale del sistema (vedi Figura 1.6). In questo caso gli archi  $b_i$  hanno lunghezze differenti e dunque le immagini della pupilla avranno intensità diverse. Infatti i valori delle intensità delle immagini sul CCD relative alla posizione del punto  $P(x, y)$  sono direttamente proporzionali al tempo speso dal raggio passante per  $P(x, y)$  su ogni faccia.

Il meccanismo di modulazione del tilt permette di stimare la pendenza del fronte d'onda in un punto conoscendo l'intensità delle quattro pupille, infatti da calcoli di ottica geometrica [27] si ricava che:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} &= \frac{R}{f} \sin\left(\frac{\pi}{2} S_x(x, y)\right) \\ \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} &= \frac{R}{f} \sin\left(\frac{\pi}{2} S_y(x, y)\right), \end{aligned} \quad (1.5)$$

dove  $R$  è la modulazione lineare di tip-tilt sul piano focale (corrispondente al raggio della circonferenza descritta dal fascio sulla piramide) ed  $S_x$  e  $S_y$  sono i *segnali* del sensore, definiti come:

$$\begin{aligned} S_x(x, y) &= \frac{[I_1(x, y) + I_4(x, y)] - [I_2(x, y) + I_3(x, y)]}{\bar{I}} \\ S_y(x, y) &= \frac{[I_1(x, y) + I_2(x, y)] - [I_3(x, y) + I_4(x, y)]}{\bar{I}}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

con  $I_i$  si sono indicati i valori delle intensità rispettivi alle quattro immagini della pupilla misurate sul CCD e con  $\bar{I}$  il valore medio dell'intensità in una singola sottoapertura<sup>4</sup>:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{x,y}^{N_s} \sum_{i=1}^4 I_i(x,y)}{N_s}. \quad (1.7)$$

Considerando aberrazioni piccole, cioè attorno agli zeri dei segnali, si possono linearizzare le equazioni precedenti, in questo modo i segnali del sensore sono ottenuti come combinazione lineare delle perturbazioni di fase. Questo permette di utilizzare la teoria dei sistemi lineari per descrivere le operazioni del sensore. Inoltre le due equazioni (1.5) diventano:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} &= \frac{R}{f} \frac{\pi}{2} S_x(x,y) \\ \frac{\partial W(x,y)}{\partial y} &= \frac{R}{f} \frac{\pi}{2} S_y(x,y). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Dunque attraverso il fattore  $R$  è possibile variare la sensibilità del sistema in quanto  $S_i \propto 1/R$ , questo permette di ottimizzare il funzionamento del SP in base all'ampiezza delle aberrazioni del fronte d'onda in ingresso.

### 1.3.3 SP con fronte d'onda discontinuo.

Quanto detto finora è valido in regime di ottica geometrica e quindi per fronti d'onda continui. Per descrivere il funzionamento del SP come rilevatore di discontinuità del fronte d'onda bisogna considerare il caso in regime di ottica diffrattiva. Ipotizzando la piramide posizionata con i bordi allineati perpendicolarmente alla direzione di osservazione e introducendo una modulazione

<sup>4</sup>La sottoapertura di un sensore di fronte d'onda è l'area che definisce il campionamento spaziale compiuto dal sensore. Nel caso del SP il campionamento spaziale viene effettuato dai pixels del CCD sulle quattro immagini di pupilla.

di tilt su un fronte d'onda con una fase  $\phi(x, y)$  in pupilla, i segnali integrali ricavati in corrispondenza di un punto  $(x_1, y_1)$  si può dimostrare che sono [20]:

$$\begin{aligned} S_x(x_1, y_1) &\propto |A_0| \int_{-B(y_1)}^{B(y_1)} \frac{\sin[\phi(x, y_1) - \phi(x_1, y_1)]}{2\pi(x - x_1)} \frac{\sin[R(x - x_1)]}{x - x_1} dx \\ S_y(x_1, y_1) &\propto |A_0| \int_{-B(x_1)}^{B(x_1)} \frac{\sin[\phi(x_1, y) - \phi(x_1, y_1)]}{2\pi(y - y_1)} \frac{\sin[R(y - y_1)]}{y - y_1} dy, \end{aligned} \quad (1.9)$$

dove si è indicato con  $R$  l'ampiezza di modulazione di tilt, con  $B(x_1)$  e  $B(y_1)$  rispettivamente i valori  $y$  ed  $x$  dei bordi della pupilla in  $x = x_1$  ed  $y = y_1$ . Il termine destro dell'integrale in (1.9) tiene conto dell'effetto della modulazione, quello sinistro mostra il segnale del SP generato dalla variazione di fase, questo contributo è pesato dal fattore  $1/(x - x_1)$  che corrisponde all'inverso della distanza dalla sottoapertura considerata. È di semplice verifica che, considerando una discontinuità di fase parallela all'asse  $y$ , questa genererà un segnale  $S_x \neq 0$ .

### 1.3.4 Analisi dei segnali ottenuti da PYPS.

Come suggerito nella sezione precedente il SP può essere utilizzato per misurare la discontinuità di fase in un fronte d'onda. Questa può essere dovuta all'incidenza del fronte d'onda considerato su una superficie discontinua come quella di uno specchio segmentato. Dalla 1.9 si può facilmente ricavare la dipendenza del segnale del SP dalla variazione di fase ( $\Delta\phi = 2\pi\frac{2\delta}{\lambda}$ ) introdotta da un singolo gradino  $\delta$  nel fronte d'onda come:

$$S(\delta) \propto A \sin \left[ 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right] + C, \quad (1.10)$$

dove  $A$  e  $C$  sono due costanti. Infatti il parametro  $A$  è definito durante il processo di acquisizione della matrice di interazione, infatti dipende da svariati

fattori: la possibile normalizzazione del segnale, l'intensità della radiazione utilizzata, il seeing atmosferico, che sono comuni a tutte le sottoaperture del sensore e che quindi vengono stimati solamente una volta se la configurazione del SP non viene variata. Il parametro  $C$  invece è dato dalle aberrazioni statiche del sistema composto da telescopio e sensore.  $C$  quindi indica il valore del segnale nella sottoapertura nel caso il segmento sia nella posizione di zero nominale.

È possibile ricostruire i valori di pistone, tip e tilt di tutti i segmenti in pupilla in seguito alla registrazione della matrice di interazione  $\mathcal{M}$  del sistema. Questo tipo di analisi dei segnali è tipico dei sistemi di OA. L'acquisizione di  $\mathcal{M}$  fa parte delle procedure di calibrazione del sensore e consiste nel muovere uno ad uno tutti i gradi di libertà dello specchio e misurando il segnale prodotto dal SP. Si ottiene quindi una matrice  $n \times m$  con  $n = 3N_{seg}$  che rappresenta il numero di gradi di libertà dello specchio in quanto ogni segmento può essere mosso in tip, tilt e pistone, e  $m = 2N_{s.a.}$  poichè in ogni sottoapertura del SP vengono registrati contemporaneamente i segnali  $S_x$  ed  $S_y$ .

La pseudo inversa  $\mathcal{R} = \mathcal{M}^T$  è ottenuta generalmente con la *Singular Value Decomposition* (SVD), ed è detta matrice di ricostruzione. Supponendo il sistema lineare,  $\mathcal{C} = \mathcal{R} \times \mathcal{S}$  è il vettore che fornisce la stima dei valori dei gradi di libertà del sistema che hanno generato i segnali  $\mathcal{S}$ . Dalla 1.10 si vede che il sistema non è lineare, ma è tanto meglio approssimato quanto più  $\delta \rightarrow 0$ . Iterando le correzioni il sistema lavora effettivamente in regime lineare.

Il processo di misura correzione detto di *ciclo chiuso*, per valori di differenza di fase  $\Delta\phi > \pi/2$ , è affetto dall'ambiguità di fase della funzione seno [28].

Come mostrato in Figura 1.8 in corrispondenza di differenze di fase pari a  $\Delta\phi \pm 2k\pi$ , con  $k = 0, 1, 2, \dots$ , il SP rileva lo stesso segnale. Questo fatto comporta che al termine di una serie di interazioni di ciclo chiuso i segmenti siano posti in corrispondenza di  $\delta(k) = \pm 2k\pi$ . Questo equivale a dire che l'intervallo di cattura del sensore in ciclo chiuso corrisponde a  $\pm\lambda/2$ .

Da quest'analisi, considerando una  $\lambda$  centrata su  $650nm$ , si deduce che l'intervallo di misura dei pistonni differenziali del ciclo chiuso di correzione attraverso il SP è inferiore ai  $300nm$ . Per estendere l'intervallo di misura di PYPS è necessario risolvere il problema di ambiguità di fase appena mostrato.

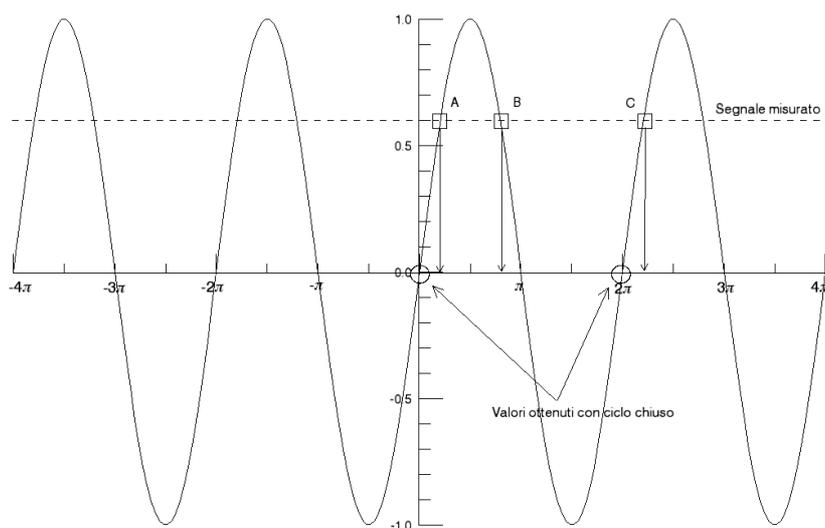


Figura 1.8: Grafico del segnale e delle correzioni di ciclo chiuso per vari valori di pistone differenziale. Si noti come per  $\Delta\phi > 2\pi$  (C) il sistema raggiunga la situazione di stabilità per un pistone differenziale pari a  $2\pi$ .

## 1.4 Soluzione dell'ambiguità di fase.

Il problema dell'estensione dell'intervallo di cattura dei sensori ottici costituisce una tappa importante per il phasing degli ELTs [29].

Attualmente gli unici telescopi in cui è possibile eseguire procedure di phasing sono i Keck I e II alle Hawaii, dove sono state sperimentate varie tecniche per mettere in fase lo specchio principale. Quelle attualmente in uso sono la *Phasing Camera System* (PCS), che sfrutta un sensore di Shack-Hartman, e la *Phasing Discontinuity Sensing* (PDS) che non necessita di strumentazione dedicata.

Entrambe queste tecniche sono composte da due algoritmi: uno a banda larga per determinare la posizione iniziale dei segmenti e correggere gli errori maggiori, eseguito solamente come primo phasing (vedi paragrafo 1.1) e uno a banda stretta per eseguire il phasing finale. Infatti sia la PCS che la PDS sfruttando gli algoritmi a banda stretta incorrono in situazione di ambiguità di fase al di sotto dei  $0.5\mu m$ , vedi Tabella 1.2.

Nome della procedura	NPCS	BPCS			NPDS	BPDS	
Strumentazione ad-hoc	si	si			no	no	
Registrazione pupille	si	si			no	no	
Spostamento segmenti	no	no			si	si	
Intervallo di cattura [ $\mu m$ ]	0.1	60	6	2	0.4	87	4
Accuratezza [ $nm$ ]	6	1000	100	30	40	800	70

Tabella 1.2: Schema riassuntivo delle tecniche di phasing utilizzate presso i telescopi Keck. Con la lettera N sono indicate le prestazioni degli algoritmi a banda stretta, mentre con la B quelle degli algoritmi a banda larga.

Come già accennato nel paragrafo 1.3.4 anche il SP incorre in problemi di ambiguità di fase nella misura di pistonni differenziali  $|\delta| > \lambda/2$ . Sono state proposte tre differenti tecniche per risolvere questo problema con PYPS [30]: la *MultiWavelength Closed Loop* (MWCL), la *Segment Sweeping Technique* (SST) e la *Wavelength Sweeping Technique* (WST).

Il MWCL prevede l'iterazione di due fasi: un ciclo chiuso di misura correzione ed uno aperto di sola misura. Il primo è effettuato selezionando una lunghezza d'onda  $\lambda_{CL}$  e viene iterato finchè tutti i segmenti non raggiungono le posizioni corrispondenti a  $\delta(k) = \pm 2k\pi$  (con  $k = 0, 1, 2, \dots$ ). A questo punto viene eseguita una misura in ciclo aperto ad una lunghezza d'onda  $\lambda_{OL} = \lambda_{CL} + \Delta\lambda$ . Questo permette di stimare se la posizione dei segmenti è positiva o negativa rispetto a quella di riferimento desiderata. In questo modo dunque si corregge di un valore  $\lambda_{CL}$  la loro posizione nel verso indicato dall'acquisizione a ciclo aperto. La MWCL permette di estendere l'intervallo di cattura di PYPS da  $\pm\lambda/2$  a  $\pm 10\lambda$ , considerando  $\lambda_{CL} = 800nm$  e  $\lambda_{OL} = 900nm$ .

La SST prevede lo sweep della posizione dei segmenti e si basa sulla dipendenza dei segnali di PYPS dai gradini di fase quando il sistema utilizza una sorgente con banda finita  $\Delta\lambda$ . In questo caso ogni infinitesima  $d\lambda$  da un contributo sinusoidale ai segnali con fase  $\phi(\lambda) = 2\pi\delta/\lambda$ , riferita al fronte d'onda. L'ambiguità di fase è risolta considerando una  $\Delta\lambda$  tale da assicurare uno smorzamento dell'ampiezza del segnale tra due massimi consecutivi maggiore dell'indeterminazione associata al segnale stesso. Questa tecnica quindi non ha un proprio limite di misura, infatti permette di misurare, senza alcuna calibrazione iniziale, la posizione dei segmenti entro tutto l'intervallo di

movimento degli attuatori dello specchio. L'unico limite associato alla SST è dovuto al fatto di dover muovere tutti i segmenti singolarmente del minimo comando selezionabile entro tutto l'intervallo di movimento degli attuatori. Questo comporta una scarsa velocità di esecuzione della tecnica nel caso del phasing di un ELT.

Ognuna di queste tecniche è caratterizzata dunque da diversi intervalli di cattura, tempi di funzionamento e accuratèzze finali, il che le rende più adatte a diverse fasi del processo di phasing ottico di uno specchio di un ELT.

Tecnica	Vantaggi	Svantaggi
MWCL	veloce, accuratezza alta	necessita calibrazione, int. cattura $\pm 4\mu m$
SST	no calibrazione, int. cattura infinito, accuratezza alta	lenta
WST	no calibrazione, veloce int. cattura $\pm 50\mu m$	accuratezza bassa ( $< 500nm$ )

Tabella 1.3: Principali vantaggi e svantaggi delle tre tecniche proposte per risolvere il problema di ambiguità di fase riscontrato nella misura di pistoni differenziali  $|\delta| > \lambda/2$  con PYPS in ciclo chiuso. I valori di accuratezza e dell'intervallo di cattura sono riferiti al fronte d'onda. Con *veloce* si intende che la tecnica permette misure di più gradini di fase in parallelo, e dunque il tempo di esecuzione non dipende dal numero di segmenti dello specchio.

### 1.4.1 WST: *Wavelength Sweeping Technique*.

In questo paragrafo viene analizzata in dettaglio la *Wavelength Sweeping Technique* (WST), una tecnica di soluzione dell'ambiguità di fase con PYPS, proposta nel 2006 [30], ma sviluppata e provata all'interno di questo lavoro di tesi. Questa tecnica si basa sulla dipendenza del segnale ( $S$ ) generato dal pistone differenziale ( $\delta$ ) dalla lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) considerata. Infatti, come si può notare dalla 1.10, il segnale calcolato in una determinata sottoapertura ha una dipendenza dal seno di  $1/\lambda$ . Il periodo di  $1/\lambda$  è  $1/\delta$ , per cui misurando il segnale  $S(\lambda^{-1})$  per diversi valori di  $\lambda$  si possono cercare di fittare i dati sperimentali con la relazione:

$$S(x) = A_f \sin[T_f x + P_f] + C_f, \quad (1.11)$$

stimando così i parametri  $A_f, T_f, P_f$  e  $C_f$ . Nel caso gli errori di tip-tilt siano trascurabili è quindi possibile misurare il pistone differenziale tra i due segmenti corrispondenti alla sottoapertura considerata, poichè confrontando la 1.11 con la 1.10 si ottiene:

$$\delta = \frac{T_f}{2\pi}, \quad (1.12)$$

considerando  $T_f$  espresso in fronte d'onda.

Per poter determinare il segno di  $\delta$  non è sufficiente considerare il segno del parametro  $T_f$ , infatti nel caso  $\delta$  sia negativo l'equazione 1.10 diventa:

$$S(-|\delta|) = A_f \sin\left(-2\pi \frac{|\delta|}{\lambda}\right) = A_f \sin\left(2\pi \frac{|\delta|}{\lambda} + \pi\right), \quad (1.13)$$

il che comporta un valore  $P_f = \pi$ .

Un altro fattore da considerare per determinare correttamente il segno di  $\delta$  è  $A_f$ , infatti mantenendo costanti gli altri parametri si avrà l'inversione del

valore del segnale considerando rispettivamente  $A_f$  positivo o negativo. In totale si ha che il segno del gradino considerato è dato dal prodotto dei segni delle quantità  $A_f$ ,  $T_f$  e  $P_f$ , assegnando a quest'ultima un valore positivo o negativo nel caso la fase dedotta dal fit fosse un multiplo pari o dispari di  $\pi$  rispettivamente.

Questa tecnica ha associati dei limiti dati dal minimo e massimo gradino misurabili. Questi dipendono sia dall'intervallo di lunghezza d'onda utilizzato che dalla larghezza della banda passante selezionata.

Il minimo gradino riscontrabile  $\delta_m$  è definito dagli estremi dell'intervallo di lunghezza d'onda utilizzato per lo sweep. Considerando  $\lambda_s$  la lunghezza d'onda minore e  $\lambda_e$  quella maggiore, si ottiene che:

$$\Delta\phi = 2\pi \delta_m \left( \frac{\lambda_e - \lambda_s}{\lambda_e \lambda_s} \right), \quad (1.14)$$

dove  $\delta_m$  è il gradino che introduce una variazione di fase  $\Delta\phi_m$  nel fronte d'onda:

$$\delta_m = \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} \frac{\lambda_e \lambda_s}{\lambda_e - \lambda_s}. \quad (1.15)$$

Imponendo quindi che  $\Delta\phi_m = \pi/2$  si ottiene:

$$\delta_m = \frac{\lambda_e \lambda_s}{4(\lambda_e - \lambda_s)}. \quad (1.16)$$

Il massimo gradino misurabile dalla WST è definito dalla minore variazione di lunghezza d'onda  $\Delta\lambda_m = \lambda_{i+1} - \lambda_i$  che può essere applicata tra due passi successivi dello sweep. Infatti per evitare errori nel fit della funzione 1.11 bisogna che la variazione massima della fase  $\Delta\phi_M$  dovuta alla variazione  $\Delta\lambda_m$  in lunghezza d'onda non introduca errori di aliasing. Si ha quindi che:

$$\delta_M = \frac{\Delta\phi_M}{2\pi} \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{\Delta\lambda_m}. \quad (1.17)$$

Un valore abbastanza conservativo per evitare l'aliasing è porre  $\Delta\phi_M = \pi/4$ , ottenendo così:

$$\delta_M = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{8\Delta\lambda_m}. \quad (1.18)$$

Uno dei maggiori vantaggi introdotti dall'utilizzo della WST è che questa permette di stimare simultaneamente, con un solo processo di sweep della lunghezza d'onda e senza muovere nessun attuatore dello specchio, i pistoncini differenziali tra tutti i segmenti. Una volta ottenute queste informazioni poi è possibile ricostruire la posizione di tutti gli elementi dello specchio tramite un algoritmo di analisi dati, che può essere eseguito off-line (vedi capitolo 2). Inoltre la WST non richiede alcun processo di calibrazione iniziale per acquisire le informazioni sui valori dei pistoncini differenziali.

I limiti di misura della procedura inoltre sono fissati dalle caratteristiche tecniche della strumentazione disponibile. L'intervallo di cattura è limitato dalla risoluzione del filtro impiegato nel selezionare una determinata lunghezza d'onda, mentre l'accuratezza dalla variazione massima nelle  $\lambda$  selezionate, che generalmente viene ottimizzata tenendo conto sia dell'intervallo di maggiore efficienza quantica del CCD che di quello di funzionamento del filtro. Per esempio nel caso di utilizzo di un filtro sintonizzabile a cristalli liquidi commerciale (tipo VariSpec SNIR, vedi capitolo 5), con un  $\Delta\lambda_m \sim 0.5\mu m$ , ed effettuando lo sweep tra 650 e 950nm si ottengono dei valori  $\delta_m \simeq 1\mu m$  e  $\delta_M \simeq 100\mu m$  in fronte d'onda.

Alla luce di quanto discusso finora e dei dati riportati in Tabella 1.2 si può ipotizzare un uso di questa tecnica nel campo degli algoritmi a banda larga, cioè dell'applicazione di *primo phasing*. Con questo termine si indica il

primo ciclo di phasing ottico più grossolano, necessario una volta terminata l'installazione iniziale dei segmenti e periodicamente quando questi vengono rimossi per motivi tecnici come in caso di rinnovo dell'alluminatura.



## Capitolo 2

### Algoritmo di phasing.

In questo capitolo si descrive il *WST Phasing Algorithm* (WPA) realizzato in questo lavoro di tesi. Il WPA è uno strumento che permette di eseguire il phasing di uno specchio segmentato utilizzando la WST con il SP. Considerando i segnali misurati applicando la WST a PYPS è possibile fittare su di essi una funzione sinusoidale del tipo 2.1, ricavando i parametri liberi necessari al calcolo dei gradini di fase che hanno generato i segnali. Ottenuti questi valori per tutti i bordi dei segmenti dello specchio è poi possibile propagare il phasing partendo da un segmento preso come riferimento.

Le procedure che compongono il WPA sono state implementate tramite un codice numerico in IDL (*Interactive Data Language* [31] della *Research Systems Inc.*).

L'algoritmo è stato realizzato sia per essere utilizzato durante gli esperimenti di laboratorio che successivamente al telescopio. Durante il lavoro di tesi il WPA è stato utilizzato con il simulatore del sensore a piramide disponibile presso il gruppo di Ottica Adattiva dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (vedi paragrafo 3.1) e successivamente nei test di laboratorio (vedi capitolo

5).

Uno schema della struttura logica dell'algoritmo è mostrato in Figura 2.1, dalla quale si riconoscono le principali procedure che lo compongono:

1. un programma di acquisizione dei segnali del sensore al variare della lunghezza d'onda;
2. un programma di analisi della pupilla del sistema per determinare le sottoaperture poste al centro dei bordi tra i segmenti;
3. un programma che esegua il fit del segnale in una determinata sottoapertura per determinare il valore del gradino di fase sul bordo;
4. un programma che esegua automaticamente i fit dei segnali richiamando la procedura del punto precedente in ogni sottoapertura selezionata;
5. un programma che esegua il phasing di tutto lo specchio partendo da un segmento preso come riferimento.

Il WPA dunque ha tre funzioni principali: serve come connessione tra la strumentazione di laboratorio e la parte di analisi dati (vedi paragrafo 2.1), misura le posizioni relative di tutti i segmenti (vedi paragrafi 2.2, 2.3 e 2.4), esegue il phasing dello specchio segmentato (vedi paragrafo 2.5).

## **2.1 Procedura di acquisizione dei segnali.**

Questo programma permette di acquisire i segnali di PYPS variando la lunghezza d'onda di lavoro del filtro sintonizzabile a cristalli liquidi (vedi paragrafo 4.3). In questa fase si selezionano quei parametri che determinano

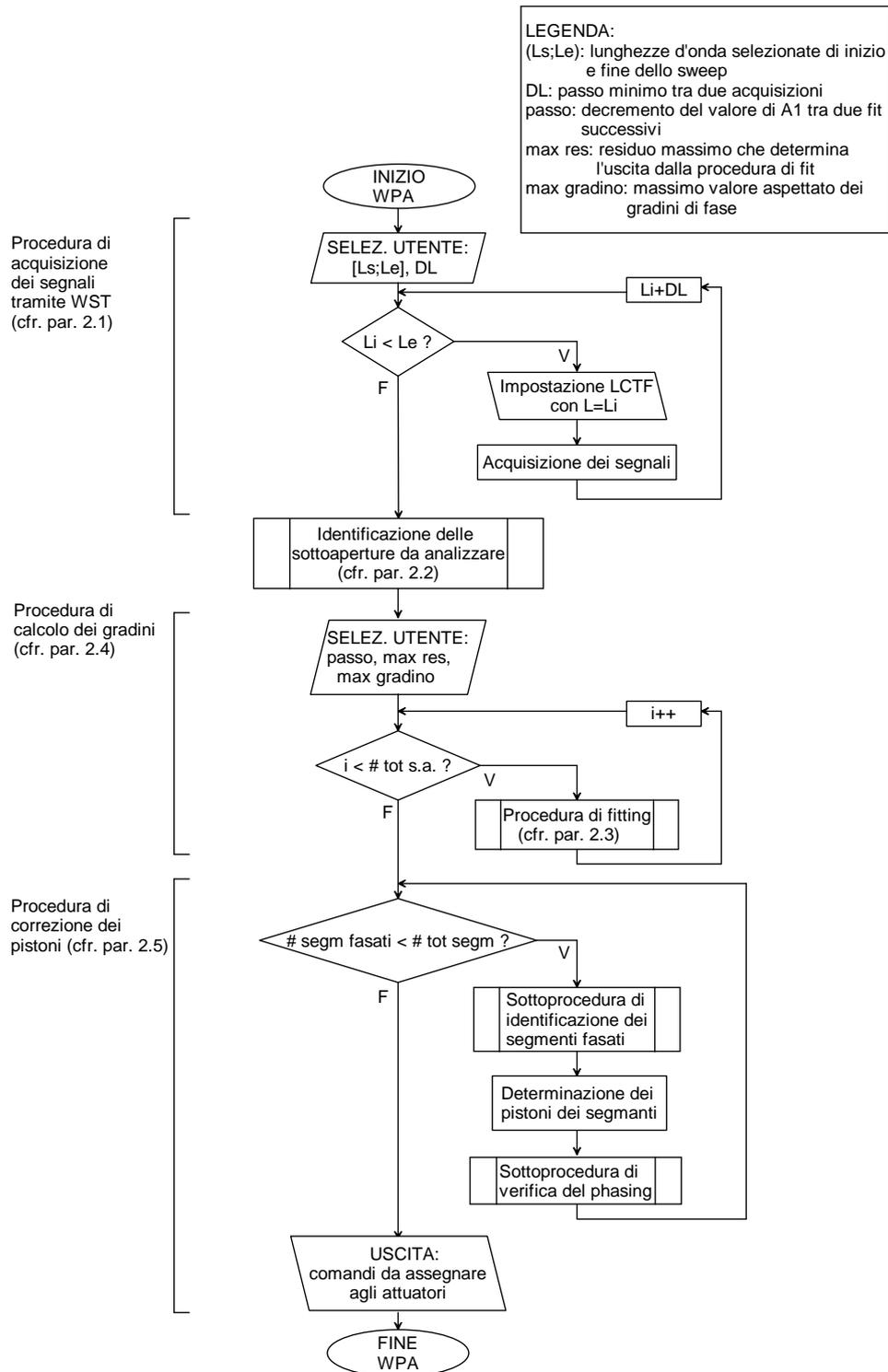


Figura 2.1: Diagramma di flusso del WPA.

l'intervallo di cattura della tecnica, vedi paragrafo 1.4.1, cioè la lunghezza d'onda minima e massima  $[\lambda_s; \lambda_e]$  dello sweep e il passo minimo  $\Delta\lambda_m$  tra due acquisizioni.

Vengono qui registrati anche le informazioni sulla struttura dello specchio, cioè la geometria della segmentazione, il numero di segmenti e di sottoaperture per ogni bordo.

Una volta fissati questi parametri la procedura esegue un numero  $N_c = (\lambda_e - \lambda_s)/\Delta\lambda_m$  di cicli selezionando ogni volta il filtro su una lunghezza d'onda  $\lambda_i = \lambda_s + i \cdot \Delta\lambda_m$ . Per ognuno di questi cicli calcola poi i valori dei segnali  $S_x$  ed  $S_y$  in tutte le sottoaperture di PYPS.

Dalla descrizione di questa procedura si può notare come l'applicazione della WST richieda come unici dati di ingresso i valori dei segnali e le lunghezze d'onda a cui sono stati calcolati, oltre che alle informazioni sulla geometria dello specchio. Questo rappresenta un notevole vantaggio rispetto alle tecniche di ciclo chiuso (vedi paragrafo 1.4) dove sono necessarie calibrazioni del sistema che richiedono un phasing preliminare per essere eseguite.

## 2.2 Procedura di identificazione delle sottoaperture.

In vista della possibile applicazione della tecnica della WST su specchi ad alto grado di segmentazione, come nel caso degli ELT (vedi capitolo 1), è stata necessaria realizzare una procedura per determinare automaticamente le sottoaperture del SP in cui eseguire il fit.

Questa procedura richiama i valori dei centri delle quattro pupille sul CCD,

calcolati da una procedura indipendente di calibrazione del SP nel momento di acquisizione delle pupille. Conoscendo il numero di sottoaperture lungo il bordo di ogni segmento questa procedura ricostruisce geometricamente una griglia di punti corrispondenti alle sottoaperture poste al centro del bordo tra i segmenti (vedi Figura 2.2).

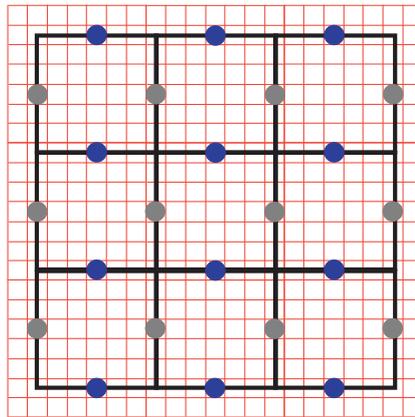


Figura 2.2: Esempio schematizzato della disposizione della sottoaperture del SP (in rosso) su 9 segmenti dello specchio (in nero). I punti blu e grigi indicano rispettivamente le griglie  $x$  e  $y$  di sottoaperture poste al centro dei bordi dei segmenti generate automaticamente attraverso la procedura descritta nel paragrafo 2.2.

## 2.3 Procedura di fitting.

In questo paragrafo verrà descritto il funzionamento della procedura di *fitting*, lo strumento principale del WPA. Questa infatti permette di stimare i valori dei gradini su un bordo fittando i valori dei segnali  $S_x$  o  $S_y$  calcolati in una sottoapertura. Come mostrato nel capitolo 1 i segnali rilevati in una determinata sottoapertura dipendono sinusoidalmente dal valore della discontinuità di fase  $\Delta\phi = 2\pi\delta/\lambda$ , vedi equazione 1.10. Variando la lunghez-

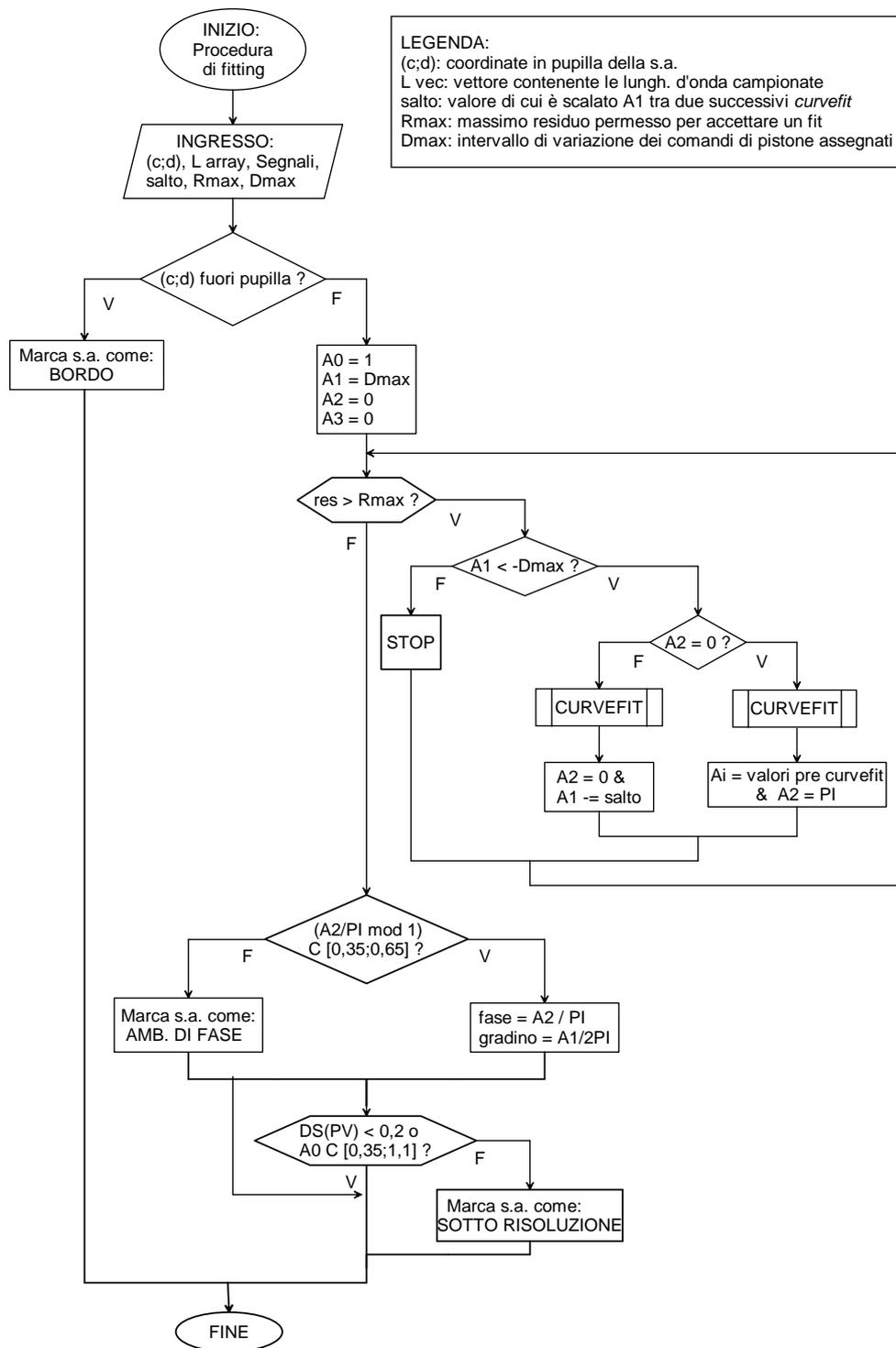


Figura 2.3: Diagramma di flusso della procedura di fitting.

za d'onda quindi il segnale oscillerà con periodi sempre minori all'aumentare del modulo del pistone differenziale  $\delta$  che lo genera. Per poter determinare il valore di  $\delta$  è necessario quindi fittare la funzione di ingresso  $S(\lambda^{-1})$  con una generica:

$$Y = A_0 \sin(A_1 X + A_2) + A_3, \quad (2.1)$$

in modo da ottenere una stima dei parametri  $A_i$ , e da questi calcolare il modulo ed il segno del gradino corrispondente alla sottoapertura considerata. Uno schema dei processi logici svolti dalla procedura è riportato in Figura 2.3 dalla quale si nota innanzitutto la necessità che l'utente specifichi alcuni valori:

1.  $\delta_{max}$ , il modulo massimo dei gradini da identificare
2.  $\Delta\delta$ , che indica, a meno di un fattore  $2\pi$ , di quanto si scala il parametro  $A_1$  tra un ciclo di fit ed il successivo nella stessa sottoapertura;
3.  $r_{max}$ , il massimo valore del residuo del fit accettato, superato il quale, il fit viene ripetuto nella stessa sottoapertura.

Per eseguire il fit si utilizza la procedura *curvefit* di IDL. Questa sfrutta un algoritmo ad espansione di gradiente per calcolare un fit non lineare che minimizzi gli scarti con la funzione specificata dall'utente con parametri  $A_i$  arbitrari. I valori di partenza dei parametri sono stati ricavati attraverso una prima analisi del segnale ottenuta statisticamente considerando diversi casi.

- $A_0$ : indica l'ampiezza dell'oscillazione del segnale, è fissata inizialmente al valore unitario poichè i segnali sono normalizzati, vedi paragrafo 1.3 da cui  $A_0 = A_f$ .

- $A_1$ : è il parametro proporzionale al valore dei gradini campionati poichè  $A_1 = 2\pi\delta$  ed ha un valore iniziale pari all'intervallo di variazione dei comandi assegnati ai segmenti ( $A_1(0) = 2\pi\delta_{max}$ ).
- $A_2$ : indica il valore della fase ( $A_2 = P_f$ ) nella procedura assume ciclicamente i valori 0 e  $\pi$ .
- $A_3$ : indica l'offset della funzione 2.1 in quanto  $A_3 = C_f$ , è posto uguale a 0 per rispecchiare la situazione ideale.

La procedura di fitting è iterativa, si basa principalmente sull'esecuzione di due curvefit per ogni valore  $\delta_i = \delta_{max} - i \cdot \Delta\delta$ . Il primo è eseguito considerando  $A_2 = 0$  il secondo con  $A_2 = \pi$ . Questo perchè bisogna identificare il segno del gradino analizzato che, come dimostrato nel paragrafo 1.4.1, dipende dalla combinazione logica dei segni dei parametri  $A_0, A_1$  ed  $A_2$ . Per verificare se sia positivo o negativo quindi vengono eseguiti due fit assegnando segni opposti al pistone differenziale  $\delta_i$  fittato e viene scelto quello a cui è associato il  $\sigma_2$  minore, che corrisponde all'errore statistico nella stima del parametro  $A_2$ .

Si verifica il risultato dei fit attraverso il calcolo dei residui, cioè dello scarto quadratico medio tra i valori della funzione di fit e i dati in ingresso. Se in un caso il residuo è inferiore alla quantità  $r_{max}$  definita dall'utente il fit è considerato valido e i parametri  $A_i$  corrispondenti sono utilizzati per calcolare il gradino  $\delta$ . In caso contrario viene ripetuto il ciclo precedente diminuendo il valore di  $A_1$  di un fattore  $\Delta\delta$ .

In Figura 2.4 è mostrato a titolo esemplificativo un fit eseguito sul segnale  $S_x$  ottenuto grazie all'impiego del simulatore del SP (vedi paragrafo 3.1). La

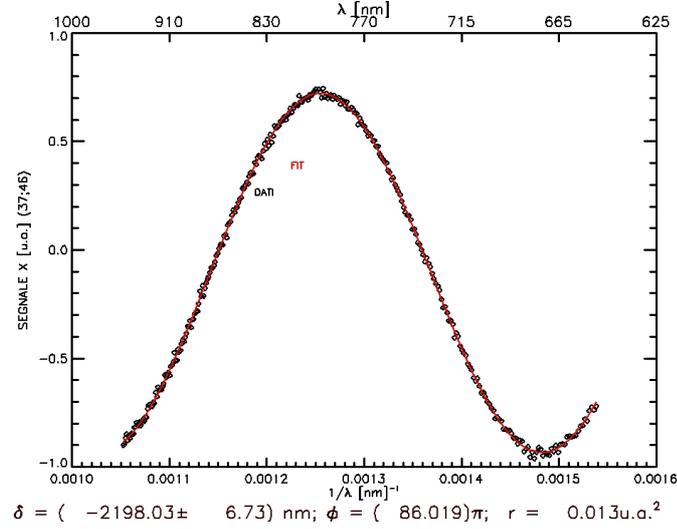


Figura 2.4: Esempio di fit eseguito sul segnale  $S_x$  ricavato attraverso l'uso del simulatore del SP. È stato considerato uno specchio quadrato formato da  $9 \times 9$  segmenti di cui ne è stato mosso solo uno con un comando di  $2200 \text{ nm}$ . Il fit è eseguito su una sottoapertura in corrispondenza del bordo inferiore di questo segmento.

sottoapertura analizzata è posta in corrispondenza del bordo inferiore dell'unico segmento mosso. Il comando di pistone assegnato a questo segmento è di  $2200 \text{ nm}$ . La scelta di questo valore è stata dettata dal fatto che, per avere un'oscillazione di un periodo intero del segnale, considerando l'intervallo di sweep  $[\lambda_s; \lambda_e]$ , si ha:

$$\Delta\phi = \phi_e - \phi_s = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_e} - 2\pi \frac{\delta}{\lambda_s} = 2\pi\delta \left( \frac{\lambda_e - \lambda_s}{\lambda_e \lambda_s} \right). \quad (2.2)$$

Sostituendo nell'equazione precedente  $\Delta\phi = 2\pi, \lambda_s = 650 \text{ nm}, \lambda_e = 950 \text{ nm}$  si ottiene un valore del gradino di fase  $\delta$  pari a:

$$\delta = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \left( \frac{\lambda_e \lambda_s}{\Delta\lambda} \right) \simeq 2050 \text{ nm} \quad (2.3)$$

Fissare un valore di soglia massima sui residui però non è sufficiente ad

identificare tutti i casi in cui il fit fallisce. Per questo motivo nel programma si sono inserite delle sottoprocedure che, calcolati i valori del gradino, della fase e del residuo, li analizzano per identificare i casi affetti da errori. Questi errori sono di due tipi principali:

1. errore di *sotto-risoluzione*: quando il gradino tra i segmenti è inferiore alla risoluzione minima della tecnica (vedi paragrafo 3.2);
2. errore di *ambiguità di fase*: si ha quando la fase determinata non identifica chiaramente il valore 0 o  $\pi$ .

In queste situazioni la procedura di fitting deve segnalare l'esistenza dell'errore anzichè considerare valido un valore sbagliato del gradino.

Dall'equazione 2.2 si nota che l'oscillazione dei segnali è direttamente proporzionale al gradino di fase che li genera. In corrispondenza di un  $\delta \lesssim \delta_m$  si misurerà quindi un segnale simile a quello riportato in Figura 2.5, che ha una differenza picco-valle inferiore a  $0.2u.a.$ . Un primo metodo per rilevare gli errori di sotto-risoluzione dunque si basa sul calcolo di questa differenza per ogni segnale analizzato. Nelle sottoaperture a cui corrispondono dei segnali con  $\Delta S_{PV} < 0.2u.a.$  il valore del gradino  $\delta$  stimato è posto pari a  $0nm$ .

Un secondo test dei segnali è previsto quando  $\Delta S_{PV} \geq 0.2u.a.$ . In questo caso si analizzano i parametri  $A_i$  ricavati dai fit. È possibile infatti che, considerando valori di  $\delta \simeq \delta_m$ , i segnali misurati nell'intervallo di lunghezza d'onda selezionato campionino la parte lineare del seno vicino ad un punto di zero (vedi Figura 2.6). Eseguendo fit in casi simili si ottengono dei valori per l'ampiezza della funzione fittata  $A_0 > 1u.a.$ . Poichè i segnali del SP sono normalizzati, come mostrato dalle 1.6, questo evento può essere sfruttato per identificare dei fit erronei. Si è quindi deciso di controllare il valore stimato

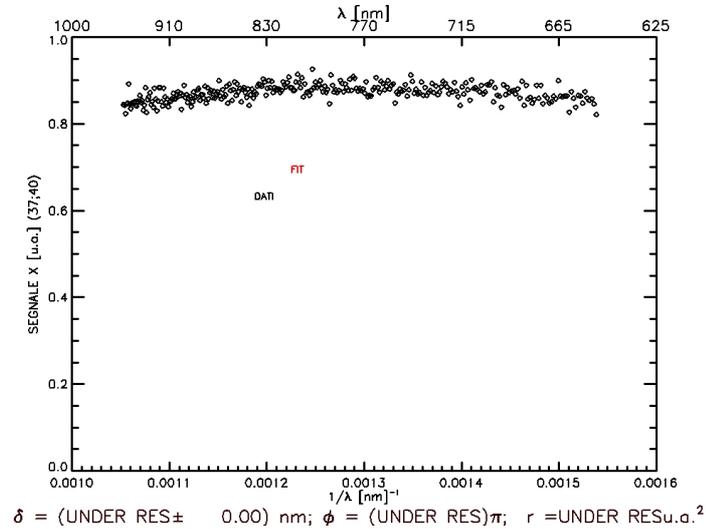


Figura 2.5: Esempio di fit eseguito sul segnale  $S_x$  misurato in corrispondenza di un gradino di  $200\text{nm}$ . Si nota che l'oscillazione del segnale avviene su un lungo intervallo di lunghezze d'onda.

del parametro  $A_0$ , ponendo un limite massimo di validità pari a  $A_0 \leq 1.1u.a.$  oltre il quale viene segnalato un errore di sotto-risoluzione.

Dall'equazione 1.9 risulta che i segnali del SP dipendono dall'inverso della distanza tra la sottoapertura analizzata e il gradino di fase che li genera. Se si considera uno specchio completamente defasato è possibile che attorno ad un gradino  $\delta_1 \lesssim \delta_m$  ve ne sia uno con associato un  $\delta_2 \gg \delta_m$  (vedi Figura 2.7). Per esempio misurando il segnale  $S_y$  in corrispondenza della sottoapertura marcata in blu si avrà la sovrapposizione del segnale dovuto al gradino adiacente, marcato in rosso. Quest'ultimo ha una frequenza di oscillazione maggiore ma in corrispondenza della sottoapertura blu ha ampiezza smorzata a causa della distanza. L'effetto di questo fenomeno è ben evidenziato dai fit riportati in Figura 2.7, si nota infatti che all'andamento tipico di un segnale

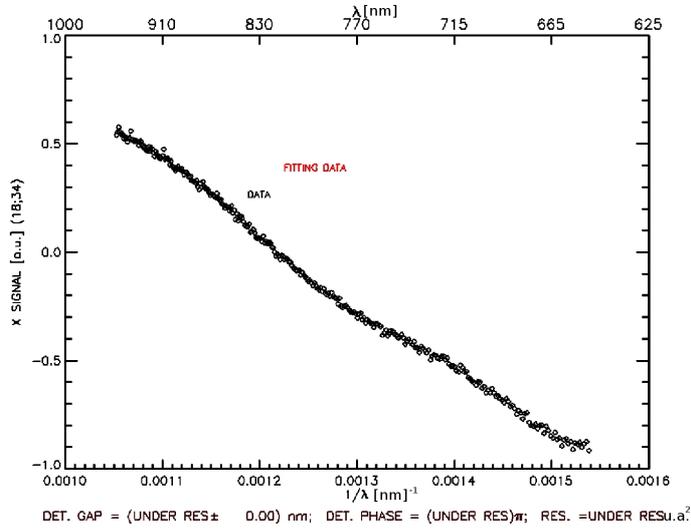


Figura 2.6: Segnale  $S_x$  ottenuto attraverso il simulatore considerando uno specchio completamente defasato. La misura è stata eseguita in corrispondenza di un gradino  $\delta = 600nm$ .

$S_y$  registrato in corrispondenza di un gradino di fase di  $350nm$ , sottoapertura verde, si sovrappone quello dovuto ad un gradino di  $5\mu m$ , sottoapertura rossa. I fit eseguiti in casi simili danno valori di  $A_0 < 0.35u.a.$  in quanto la funzione fittata segue l'oscillazione dovuta al segnale del gradino maggiore. È quindi possibile scartare queste stime ponendo un vincolo sull'ampiezza minima del fit eseguito, come nel caso della sottoapertura blu.

Nel caso in cui la fase determinata sia troppo vicina alla metà dell'intervallo  $[0; \pi]$ , è stato scelto l'intervallo  $[0.35; 0.65]\pi$  (vedi Figura 2.8), è possibile che la stima del segno del gradino sia errata. Il valore del gradino calcolato dal fit deve dunque essere trascurato e viene segnalato un errore di *ambiguità di fase*.

Si è deciso che nel caso di sotto-risoluzione la misura del gradino fosse posta

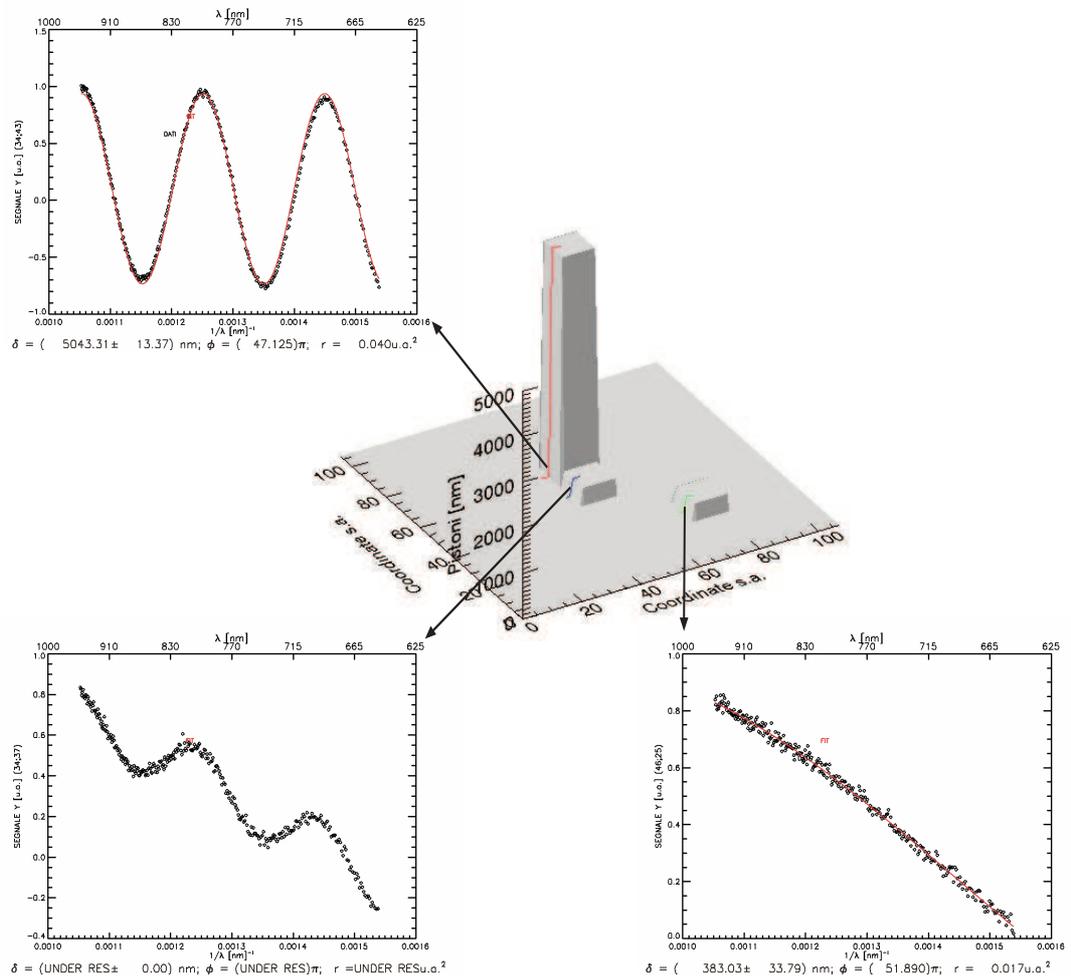


Figura 2.7: Specchio simulato di  $9 \times 9$  segmenti quadrati. Il segmento marcato in rosso ha associato un comando di  $5 \mu\text{m}$  mentre quello blu e verde di  $350 \text{nm}$ . I grafici mostrano i fit eseguiti in corrispondenza dei bordi dei segmenti. In corrispondenza della sottoapertura blu sono ben visibili le oscillazioni ad alta frequenza e bassa ampiezza generate dalla sovrapposizione del segnale dovuto al gradino rosso.

pari a  $0 \text{nm}$ . Nel caso di ambiguità di fase invece si è cercata una tecnica che permettesse di avere possibilità di stimare il gradino utilizzando le sottoaperture adiacenti quella considerata come verrà mostrato nel prossimo

paragrafo.

Nel caso particolare in cui il fit eseguito sia affetto da entrambe le categorie di errore qui illustrate (vedi Figura 2.8) è stato scelto di dare la priorità all'errore di ambiguità di fase in quanto è possibile effettuare più stime dello stesso gradino in questo caso.

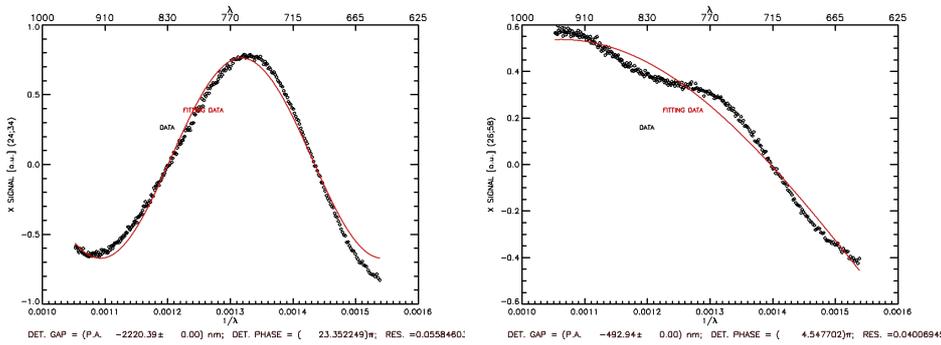


Figura 2.8: A sinistra: risultato di un fit in caso di errore di ambiguità di fase, la stima del gradino è scartata. A destra: fit che presenta sia errori di sotto risoluzione che di ambiguità di fase.

## 2.4 Procedura di calcolo dei gradini.

In questa procedura sono previsti due cicli principali separati per eseguire il fit dei segnali  $S_x$  e  $S_y$  (vedi Figura 2.9) in tutti i punti indicati dalla griglia mostrata in Figura 2.2.

Per poter risolvere i casi di errore di ambiguità di fase, descritti nel paragrafo 2.3, senza scartare totalmente la stima del gradino la procedura esegue il fit in tre sottoaperture per bordo. Queste corrispondono a quella identificata dal punto di griglia ed a quelle adiacenti, come mostrato in Figura 2.10. I risultati vengono poi confrontati e, nel caso non siano rilevate incongruenze

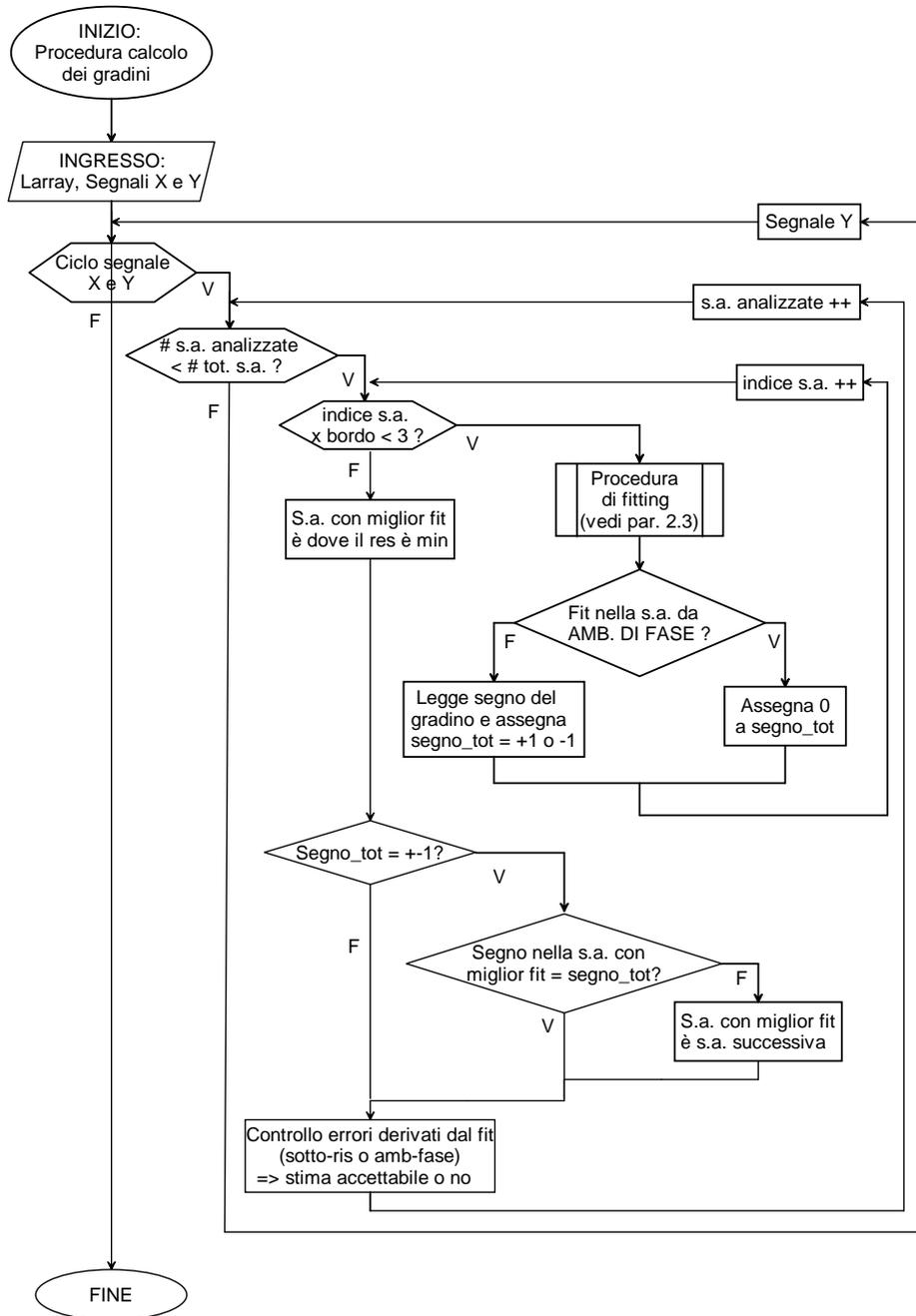


Figura 2.9: Diagramma di flusso della procedura di calcolo dei gradini.

nel segno delle tre stime dei gradini, viene scelto il fit migliore da cui ricavare la stima del gradino.

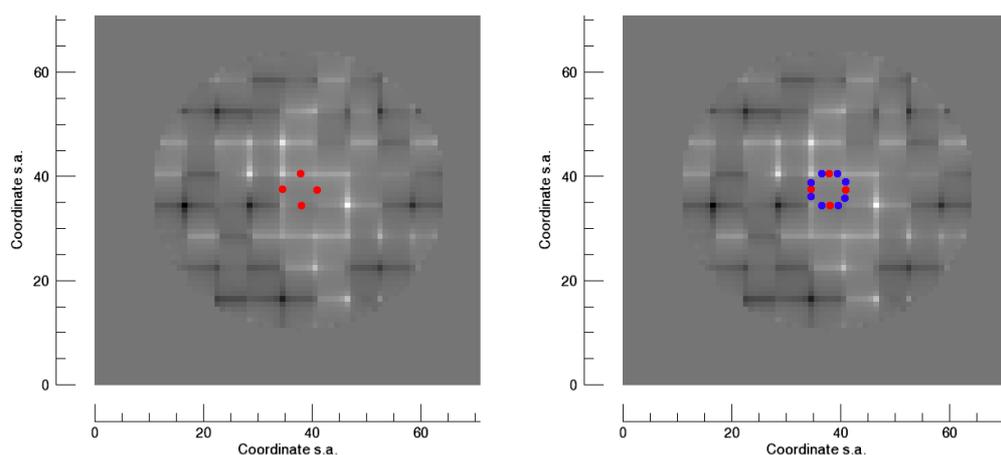


Figura 2.10: A sinistra: sottoaperture identificate dalla procedura del paragrafo 2.2 per l'analisi dei segnali  $S_x$  ed  $S_y$ , ricavati dal simulatore, ai bordi del segmento centrale. A destra: sottoaperture considerate per cercare di eliminare gli errori di ambiguità di fase.

Il metodo applicato per determinare la sottoapertura con la miglior stima si basa sul residuo del fit. Infatti si è notato che, soprattutto considerando uno specchio completamente defasato, la qualità del fit migliora col numero di periodi campionati e quindi col valore assoluto dei gradini (vedi equazione 2.2) fino all'insorgere dei problemi di aliasing.

Un esempio degli accorgimenti presi per implementare la procedura di calcolo dei gradini è riportato in Figura 2.11. Si notano bene due effetti: la rimozione di gran parte degli errori di ambiguità di fase eseguendo il fitting in tre sottoaperture anziché una sola, e l'aumento dei casi di errore nel fitting dovuti alla diminuzione dell'intervallo di variazione dei comandi assegnati ai segmenti.

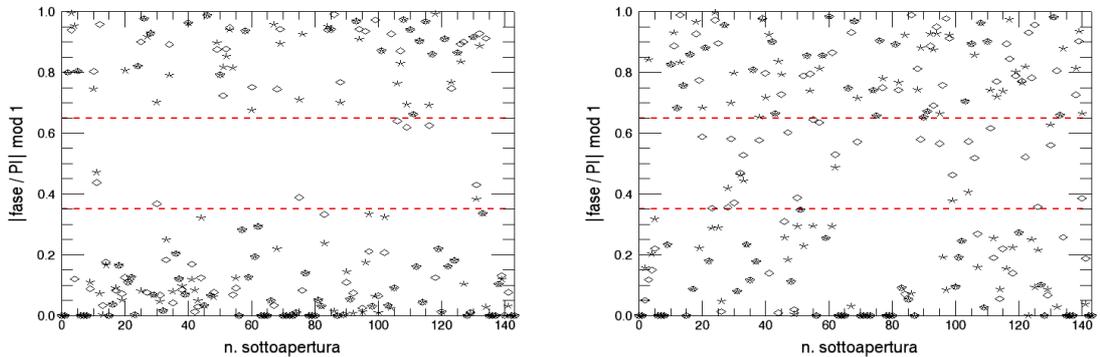


Figura 2.11: Valori del resto della divisione per 1 della fase dell'equazione 2.1 in unità di  $\pi$  dedotti dai fit dei segnali  $S_x$  ed  $S_y$  eseguiti in tutte le sottoaperture centrali di ogni segmento ( $\diamond$ ) e pesando tre stime per bordo (\*). I dati graficati sono stati ricavati grazie all'uso del simulatore. A sinistra: gli attuatori dello specchio sono stati mossi casualmente in un intervallo di  $\pm 15\mu m$ , a destra invece l'intervallo è stato ridotto a  $\pm 5\mu m$ . È ben evidente l'aumento dei casi di errore nel fit e la maggiore difficoltà nella loro soluzione corrispondente alla diminuzione del modulo dei gradini.

## 2.5 Procedura di phasing dello specchio.

Una volta determinati i pistoncini differenziali tra tutti i segmenti dello specchio e scartati i fit affetti da errori è necessaria una procedura che ricostruisca la posizione assoluta dei segmenti a meno di un pistone globale. Per far questo bisogna conoscere la posizione relativa di ogni segmento rispetto quelli adiacenti. La procedure del paragrafo 2.4 (vedi Figura 2.12) servono appunto a questo scopo. Innanzitutto bisogna considerare un segmento come riferimento, in questo caso si è scelto quello centrale, e propagare a quelli adiacenti i valori dei gradini ottenuti dai fit.

L'ordine in cui i segmenti vengono fasati dipende dalla loro distanza da quello scelto come riferimento. In questo modo si assicura che la procedura trovi il massimo numero di segmenti già fasati, risparmiando tempo di calcolo nel



caso di alto grado di segmentazione.

Una volta determinate tutte le distanze e scartate quelle corrispondenti ad eventuali segmenti al di fuori della pupilla del sistema si procede a fasare lo specchio per anelli. Si eseguono quindi vari cicli per cercare di fasare tutti i segmenti posti ad una determinata distanza dal segmento centrale. A questo scopo si richiama una sottoprocedura che per ogni segmento controlla se attorno ad esso ve ne sia uno che è già stato fasato. Lo schema di propagazione del primo processo di phasing è mostrato in Figura 2.13.

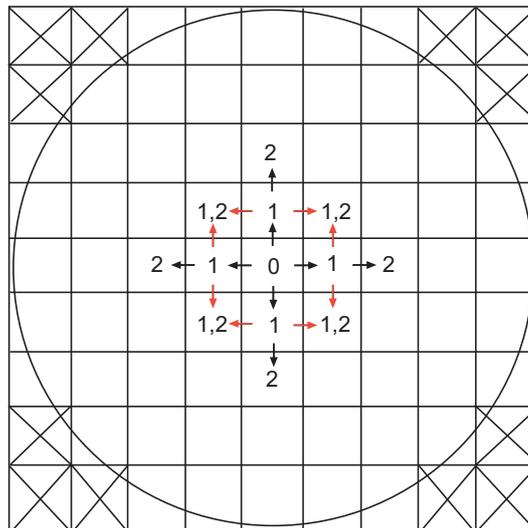


Figura 2.13: Schema di uno specchio quadrato di 9 segmenti di lato a cui è sovrapposta una pupilla circolare. I numeri al centro dei segmenti sono le distanze calcolate rispetto al riferimento iniziale. Le frecce indicano i versi di propagazione del primo ciclo di allineamento dei segmenti. In nero sono indicati i casi in cui un solo riferimento è disponibile, in rosso quelli che possono contare su due riferimenti. In questo caso le stime dei gradini vengono pesate sui residui del fit. Infine i segmenti barrati sono quelli di bordo, al di fuori della pupilla, che non vengono considerati nel processo di phasing.

Una volta identificate le direzioni in cui propagare il phasing questa sotto-

procedura calcola il valore del pistone da assegnare al segmento considerato facendo la differenza tra il gradino misurato e il valore di pistone del riferimento.

A questo punto bisogna richiamare una seconda sottoprocedura che esegua l'analisi del valore di pistone appena determinato e, nel caso sia disponibile più di una stima dei gradini, ne calcoli la media pesata sul residuo del fit eseguito. Prima però bisogna controllare che la differenza tra queste due stime non sia troppo larga. Per far questo si calcola la differenza tra i dati e la si divide per la loro media pesata sul residuo dei fit. Se il valore ottenuto supera un valore di soglia del 20% allora il segmento non viene mosso in quanto potrebbe esserci un eventuale errore nella stima del segno del gradino non rilevato dalla procedura di fitting (paragrafo 2.3). Questo tipo di errore, detto di *determinazione del segno*, è indipendente dai parametri  $A_i$  del fit.

Una volta raggiunto l'ultimo anello dello specchio la procedura conclude il primo ciclo di allineamento dei segmenti e controlla se vi siano dei segmenti che non sono stati fasati. In caso positivo vengono registrate le posizioni di questi segmenti e viene eseguito un secondo ciclo della prima sottoprocedura per identificare tra quelli ancora da fasare il segmento che ha il massimo numero di riferimenti attorno a se.

Attraverso la seconda sottoprocedura poi vengono prima fasati uno ad uno quelli col maggior numero di riferimenti. Questi passi, di controllo e di phasing, sono eseguiti finchè il numero di segmenti che si riescono a fasare in un ciclo completo non è nullo. In questo caso si chiama una funzione di uscita e il processo di determinazione dei comandi assegnati ai pistoni dei segmenti termina.

A questo punto viene quindi ricostruito l'insieme di comandi da passare agli attuatori dello specchio e il processo di phasing ha termine.



# Capitolo 3

## Simulazione numerica.

In questo capitolo vengono riassunti i risultati ottenuti da una prima fase di test della tecnica attraverso l'utilizzo di simulazioni numeriche. Queste sfruttano il simulatore del sensore a piramide, sviluppato durante il lavoro di tesi di E. Pinna [22] e successivamente completato dal gruppo di Ottica Adattiva dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Questo software, descritto nel paragrafo 3.1, permette di simulare l'acquisizione di dati con il SP e di indagare situazioni diverse in maniera rapida solamente variando i parametri di ingresso del codice. Il vantaggio principale dell'impiego del simulatore consiste nel fatto che si può indagare uno spazio dei parametri più ampio di quanto si possa fare in laboratorio senza dover sostituire le componenti ottiche e ricalibrare il sistema.

I principali obiettivi di uno studio della tecnica attraverso le simulazioni numeriche sono:

- verifica dei limiti della procedura di fitting (vedi paragrafo 2.3);
- valutazione dell'accuratezza;

- verifica del WPA (vedi capitolo 2);

Innanzitutto bisogna sottolineare che nell'esecuzione delle simulazioni si è voluto rispettare il più possibile le condizioni di lavoro previste per il successivo esperimento in laboratorio. Questo ha fissato la scelta di alcuni parametri necessari al funzionamento del WPA:

1. L'intervallo di lunghezze d'onda utili all'acquisizione dei segnali applicando la WST a PYPS  $[\lambda_s; \lambda_e]$ : la prima è determinata dalla minima lunghezza d'onda selezionabile dal filtro a cristalli liquidi, cioè  $650nm$ , mentre  $\lambda_e$  è stata scelta pari a  $950nm$  perchè considerando lunghezze d'onda maggiori l'efficienza quantica del CCD è inferiore al 20%.
2. Il numero di misure effettuate nello sweep è dato dalla differenza tra due successive lunghezze d'onda selezionabili dal filtro, cioè  $\Delta\lambda_m = 1nm$ .
3. Il flusso fotonico selezionato per ogni sottoapertura del sensore simulato è di  $\Phi_{s.a.} = 10^4\gamma$ . Questo corrisponde ad un rumore fotonico per pixel del CCD di  $PN_{pixel} = \sqrt{\Phi_{s.a.}/4} = 50\gamma$ , dove il fattore 4 tiene conto che  $N_{pixels} = 4N_{s.a.}$  come descritto nel paragrafo 1.3.2. Al telescopio si ha lo stesso rumore fotonico puntando una stella di flusso:

$$\Phi_{\star} = \frac{\Phi_{s.a.} N_{s.a.}}{A_{seg} \Delta\lambda \Delta t} \simeq 1.2 \cdot 10^6 \left[ \frac{\gamma}{m^2 \mu m s} \right], \quad (3.1)$$

dove  $A_{seg}$  è l'area in  $m^2$  di un segmento dello specchio (mediamente attorno ad  $1m^2$  per gli ELT progettati),  $\Delta\lambda$  la banda passante del filtro impiegato ( $0.01\mu m$ ),  $\Delta t$  il tempo di integrazione (si è posto pari a  $30s$ ) e  $N_{s.a.}$  il numero di sottoaperture su cui è riscalata l'immagine di un segmento (pari a 36). Questo valore di  $\Phi_{\star}$  può essere confrontato con

quello di una stella di magnitudine  $m_R = 0$  per ricavare la magnitudine della stella scelta come riferimento:

$$m_R = -2.5 \log \frac{\Phi_{\star}}{\Phi_0} \simeq 12. \quad (3.2)$$

4. Gli attuatori dello specchio sono stati mossi casualmente in diversi intervalli di pistone, identificati con  $\pm\delta_{max}/2$ , ma senza mai introdurre tip o tilt. Questo perchè, se lo specchio segmentato può essere controllato in tip e tilt, attraverso il SP è possibile rimuovere efficacemente questi errori per un ampio intervallo [25]. Considerando un ELT quindi ci si aspetta di poter eliminare questi contributi ai segnali prima di effettuare le misure in modalità WST.
5. I valori dei parametri d'ingresso necessari al funzionamento della procedura di fitting (vedi paragrafo 2.3) sono stati mantenuti costanti per tutti i test e posti pari a  $\Delta\delta = 300nm$  e  $r_{max} = 0.2u.a.$ . Questi valori sono stati dedotti da un'analisi statistica iniziale, volta a stabilire la massima efficienza della procedura di fitting rispetto ai tempi di calcolo. Al fine di minimizzare i tempi di esecuzione della procedura di fitting il valore iniziale di  $A_1$  è stato mantenuto libero ed ogni volta è stato posto pari al doppio del massimo comando assegnato agli attuatori ( $A_1 = \delta_{max}$ ).

### 3.1 Simulatore del sensore a piramide.

La logica delle procedure che compongono il simulatore del sensore a piramide è di rappresentare tutte le componenti del sistema mostrato in Figura

1.5.

Inizialmente si definisce un fronte d'onda piano a cui è associato un fasore di campo elettrico. La riflessione del fronte d'onda sullo specchio è vista come una deformazione nel fronte d'onda utilizzato. I comandi di pistone, tip e tilt dei segmenti assegnati dall'utente allo specchio sono tradotti in variazioni della fase sulle varie porzioni del fronte d'onda che incidono sui vari segmenti. A questo punto viene introdotta la pupilla definendo una circonferenza e ponendo nullo il campo elettrico al di fuori di essa. Sempre sul piano della pupilla al fronte d'onda considerato è poi associato un tilt globale variabile periodicamente nel tempo che rappresenti la modulazione di tip-tilt utilizzata per il corretto funzionamento del SP.

Il fascio è propagato lungo il cammino ottico eseguendo l'algoritmo FFT. Questo propaga il campo elettrico sul piano focale del sistema, punto in cui è posto il vertice della piramide di vetro. L'effetto della piramide è riprodotto inserendo sul piano focale uno schermo di fase tale che introduca la variazione di cammino ottico del fascio corrispondente all'attraversamento del solido. In questo modo si ottengono allo stesso tempo entrambi gli effetti della piramide: filtraggio spaziale introdotto dalla derivata discontinua sugli spigoli e traslazione delle immagini generate dalla lente di camera a causa della differente direzione del tilt presente sulle quattro facce.

Applicato questo ritardo di fase al campo sul piano focale, si opera una antitrasformata ( $\text{FFT}^{-1}$ ) per ottenere le quattro immagini della pupilla sul sensore. Quest'ultimo inoltre ha associato un rumore fotonico generato attraverso una distribuzione poissoniana attorno ad un valore di flusso fotonico per pixel specificato dall'utente (vedi punto 3 capitolo 3).

In conclusione questa parte di software svolge il compito di simulare tutta la strumentazione utilizzata in laboratorio: lo specchio deformabile, le ottiche ed il CCD che compongono il SP oltre che l'effetto del filtro sintonizzabile.

## 3.2 Verifica della WST.

In questo paragrafo si riassumono i risultati ottenuti attraverso l'impiego del simulatore appena descritto. In tutte queste prove si è considerato uno specchio quadrato composto da  $9 \times 9$  segmenti. Bisogna anche sottolineare che in questo capitolo e in seguito all'interno di questo lavoro di tesi tutti i valori dei pistoni differenziali sono riferiti al fronte d'onda.

Inizialmente si è voluto verificare il funzionamento delle procedure che compongono il WPA (vedi capitolo 2) analizzando i quattro gradini ai bordi di un singolo segmento defasato. Si sono poi determinati i limiti di misura e l'accuratezza raggiungibile dalla WST per confrontarli coi valori teorici espressi nel paragrafo 1.4.1. Infine sono stati mossi contemporaneamente tutti i segmenti dello specchio per simulare l'applicazione della WST al phasing di un ELT.

### 3.2.1 Analisi con un segmento defasato.

In queste prove è stato mosso solo il segmento adiacente a quello centrale. In primo luogo è stato applicato un comando di puro pistone pari a  $10\mu m$  (vedi Figura 3.1) per verificare le proprietà della WST nel suo intervallo di lavoro ottimale.

È stata eseguita prima la procedura per identificare le sottoaperture al centro dei bordi del segmento defasato (vedi paragrafo 2.2) e poi quella di fitting per

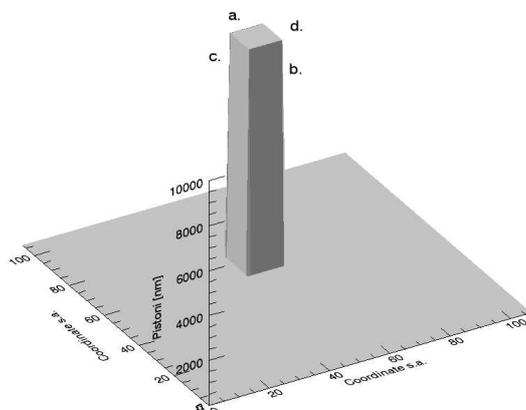


Figura 3.1: Specchio a geometria quadrata formato da  $9 \times 9$  segmenti. Nella presente analisi è stato mosso solo un segmento adiacente quello centrale. Nel caso specifico qui riportato è stato assegnato un comando di puro pistone pari a  $10\mu m$ . Le lettere indicano l'ordine dei bordi dove sono stati eseguiti i successivi fit.

ottenere la stima dei gradini nei punti indicati (vedi Figura 3.1). I risultati dei fit sono riportati in Figura 3.2.

Dai grafici di Figura 3.2 è evidente che la procedura di fitting è in grado di identificare il segno del gradino analizzato. Infatti confrontando i grafici in Figura 3.2 si vede che le funzioni fittate hanno fasi opposte e quindi i gradini misurati hanno segno opposto.

In fondo ad ogni grafico sono riportati i dati ricavati dal fit: la stima del gradino  $\delta$  ed il relativo errore  $E_\delta$ , la fase  $\phi$  ed il residuo  $r$  del fit.  $E_\delta$  è dato da:

$$E_\delta = \delta \frac{3\sigma_1}{A_1},$$

dove  $\delta$  è la stima del gradino ottenuta dalla WST,  $\sigma_1$  la deviazione standard associata dalla procedura di fitting alla determinazione del parametro  $A_1$  (vedi equazione 2.1) ed il fattore 3 rende conto che  $\sigma_1$  è un'errore di tipo

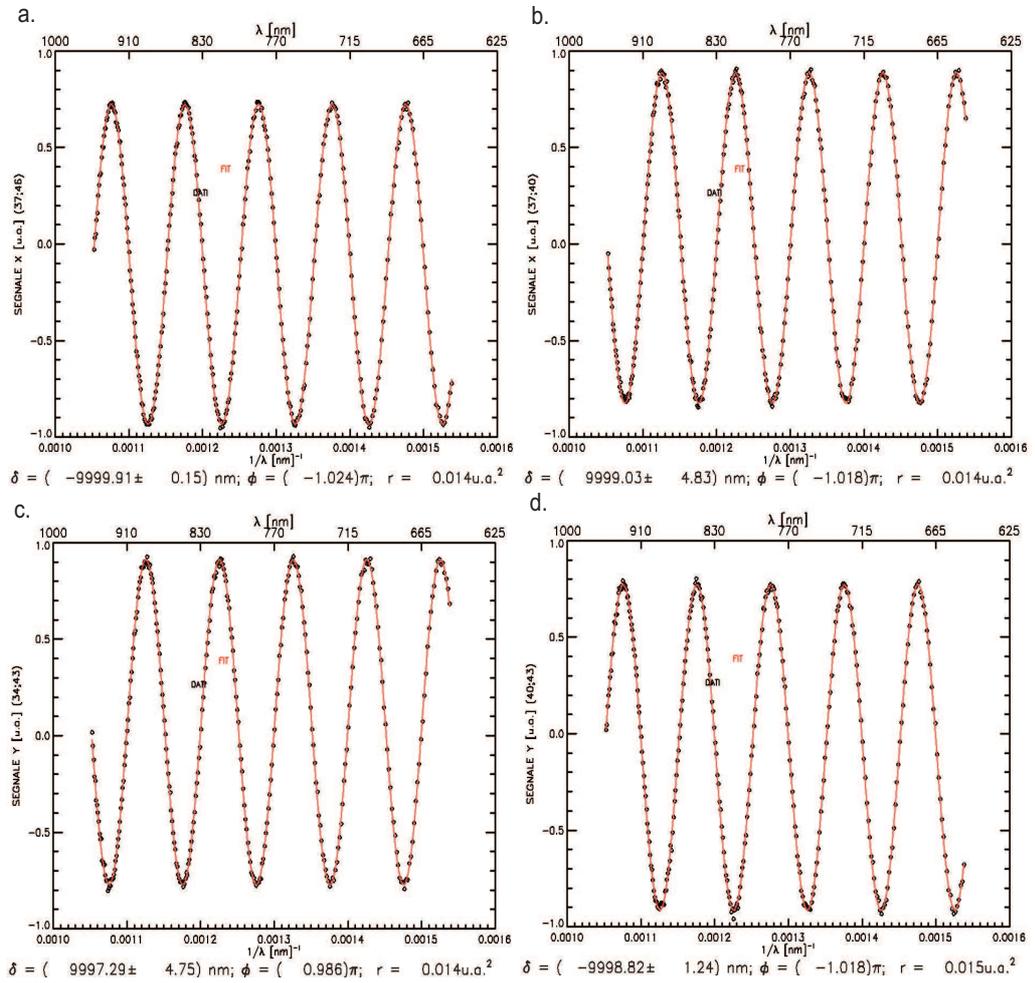


Figura 3.2: Risultati dei fit eseguiti ai bordi del segmento mostrato in Figura 3.1. I quattro valori dei gradini di fase, della fase e del residuo del fit sono riportati sotto grafici.

statistico.

Il valore della fase da il livello di affidabilità della stima del segno del gradino.

Infatti come già introdotto nel paragrafo 2.4 nel caso il in cui:

$$(\phi \text{ mod } 1) \in [0.35; 0.65]\pi,$$

la stima del segno non è considerata affidabile. Nei casi riportati in Figura 3.2 si può notare come i valori dedotti delle fasi rimangano entro un 2% dall'intero più vicino, dunque la stima del segno di  $\delta$  è considerata affidabile.

I residui dei fit sono calcolati attraverso lo scarto quadratico medio tra il valori assunti dalla funzione di fit e quelli dei segnali in ingresso, vedi paragrafo 2.3 e indicano quando un fit può essere accettato dalla procedura. È facile verificare che tutti i valori riportati in Figura 3.2 sono inferiori al limite  $r_{max}$  fissato al punto 5 all'inizio del capitolo.

Le stime dei quattro gradini riportate in Figura 3.2 hanno errori relativi inferiori allo 0.1% che corrisponde ad un'accuratezza di  $3nm$ .

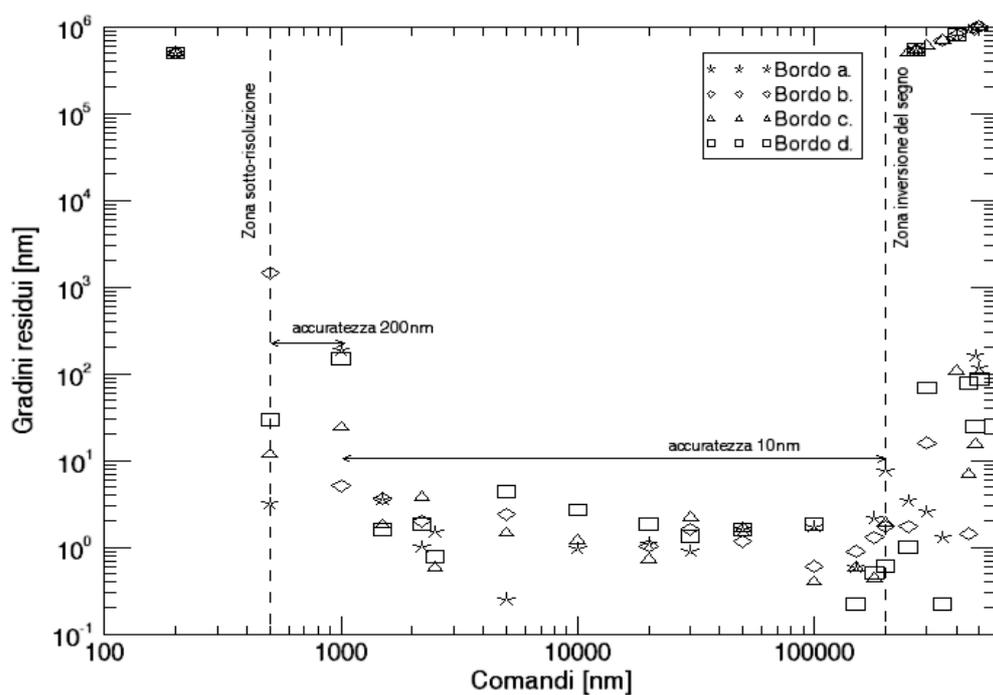


Figura 3.3: Risultati dell'analisi statistica eseguita muovendo il segmento di Figura 3.1 con comandi di puro pistone entro l'intervallo  $[0.2; 500]\mu m$ . In ordinata sono riportate le differenze tra i valori stimati dei gradini e i comandi di pistone assegnati al segmento.

Per determinare l'intervallo di cattura dei gradini tramite la WST si sono eseguite diverse simulazioni numeriche assegnando al segmento defasato comandi di puro pistone compresi nell'intervallo  $[0.2; 500]\mu m$ . I dati ottenuti da quest'analisi possono essere confrontati con i limiti teorici della tecnica (vedi paragrafo 1.4.1). In Figura 3.3 è riportato l'andamento dei gradini residui, ottenuti dalla differenza tra il gradino misurato dalla procedura di fitting ed il comando di pistone selezionato nel simulatore, in funzione di quest'ultimo. Dal grafico si nota che la procedura non è in grado di misurare i gradini inferiori a  $0.5\mu m$ , dunque questo valore è scelto come limite inferiore della tecnica. Considerando gradini maggiori di  $200\mu m$  invece la fase varia troppo rapidamente ed i dati iniziano a presentare errori nella determinazione del segno a causa dell'insorgere di situazioni di aliasing. Questo fatto fissa a  $200\mu m$  il limite superiore all'intervallo di cattura. Si nota inoltre che nell'intervallo di  $[0.5; 200]\mu m$  possono essere associati alla tecnica due diversi gradi di accuratezza. Infatti, mentre per gradini compresi tra circa  $[0.5; 1]\mu m$  le misure hanno un'accuratezza di  $200nm$ , i dati compresi nell'intervallo  $[1; 200]\mu m$  hanno accuratezza inferiore a  $10nm$ . Gli estremi di quest'ultimo intervallo sono dunque stati scelti come limiti all'intervallo di cattura ottimale della WST applicata a PYPS. Tali limiti dipendono dalla banda passante del filtro  $\Delta\lambda$  e dall'estensione dell'intervallo di lunghezze d'onda  $[\lambda_s; \lambda_e]$  selezionate nello sweep. Sono quindi determinati dalla strumentazione utilizzata in laboratorio.

A questo punto si richiamano per comodità le relazioni introdotte nel pa-

ragrafo 1.4.1 che fissano i valori teorici del minimo e massimo gradino di fase misurabile tramite la WST:

$$\delta_m = \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} \frac{\lambda_e \lambda_s}{\lambda_e - \lambda_s}, \quad (3.3)$$

$$\delta_M = \frac{\Delta\phi_M}{2\pi} \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{\Delta\lambda_m}. \quad (3.4)$$

Considerando i valori introdotti all'inizio del capitolo 3 e  $\Delta\phi_m = \pi/2$ , vedi paragrafo 1.4.1, si ottiene un valore di  $\delta_m \simeq 0.5\mu m$ . In Figura 3.4 sono riportati i fit eseguiti ai bordi del segmento defasato quando è stato assegnato un comando di  $0.5\mu m$ . Si nota che i valori dei gradini dedotti dai fit hanno un'accuratezza tra  $70$  e  $100nm$  ed hanno associati degli errori percentuali maggiori del  $10\%$ . Il valore teorico  $\delta_m$  è dunque compatibile con quello dedotto attraverso le simulazioni.

Dalla seconda equazione in 3.3 assegnando a  $\Delta\phi_M$  un valore di  $\pi/4$  (vedi paragrafo 1.4.1) e per  $\lambda_{i+1} = \lambda_e$ ,  $\lambda_i = \lambda_e - \Delta\lambda_m$  si ottiene:  $\delta_M \simeq 100\mu m$ . Questo valore coincide con il massimo gradino rilevabile dalla tecnica. Le simulazioni numeriche eseguite hanno mostrato che questo valore teorico è piuttosto conservativo (vedi i risultati in Figura 3.3). Infatti per evitare l'aliasing occorre che  $f_c \geq 2f_M$ , dove  $f_c$  indica la frequenza del campionamento e  $f_M$  la frequenza massima del segnale. Considerando dunque un valore di  $\Delta\phi'_M \lesssim \pi/2$  si ottiene  $\delta'_M \lesssim 225\mu m$ . In Figura 3.5 sono riportati i fit eseguiti in corrispondenza dei quattro bordi del segmento defasato quando è stato assegnato un comando di  $200\mu m$ . È evidente la capacità della procedura di fitting di acquisire il valore dei gradini corrispondenti ad un comando di  $200\mu m$  con un'accuratezza inferiore ai  $5nm$ .

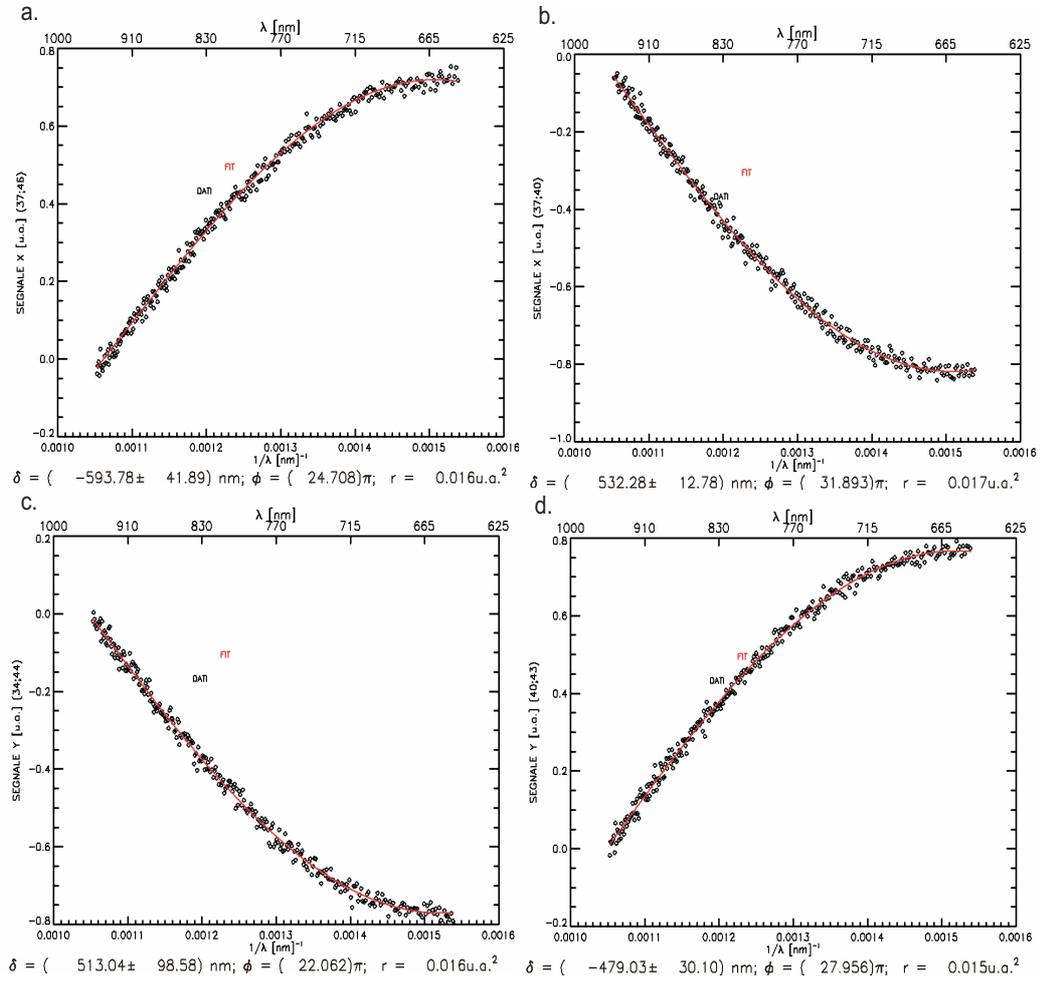


Figura 3.4: Risultato dei fit eseguiti ai bordi del segmento defasato quando è stato assegnato un comando di  $0.5\mu\text{m}$ .

### 3.2.2 Analisi con uno specchio defasato.

L'analisi statistica che viene eseguita in questo paragrafo ha lo scopo di identificare l'accuratezza associata alle misure eseguite con la WST su specchi completamente non fasati.

In queste simulazioni si è considerato come sempre uno specchio composto da  $9 \times 9$  segmenti quadrati. Questi sono stati mossi con comandi casuali

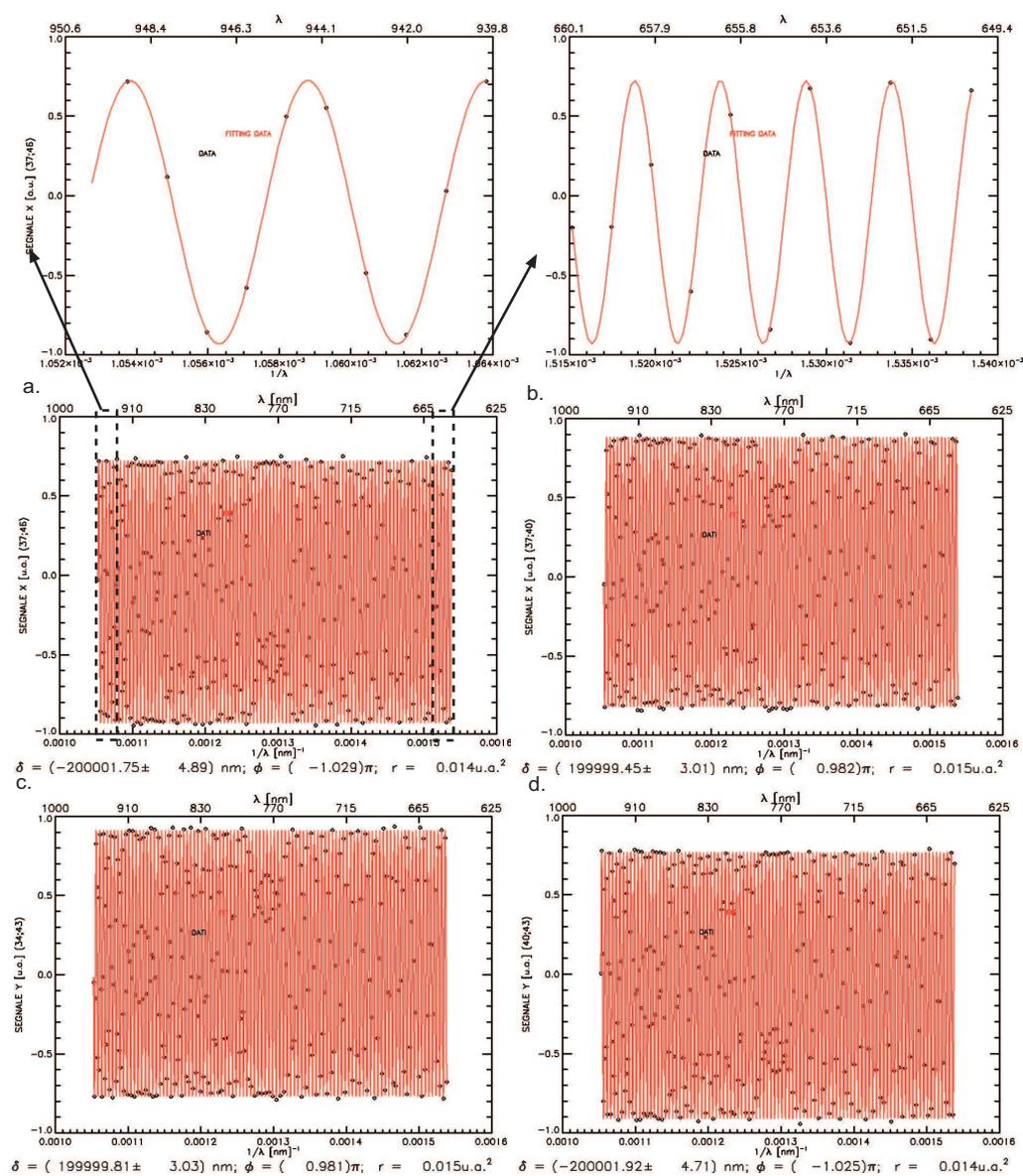


Figura 3.5: Risultato dei fit eseguiti ai bordi del segmento defasato quando è stato assegnato un comando di  $200\mu\text{m}$ . In alto sono mostrati due particolari del primo fit, rispettivamente per gli intervalli di lunghezza d'onda  $[940; 950]\text{nm}$  e  $[650; 660]\text{nm}$ .

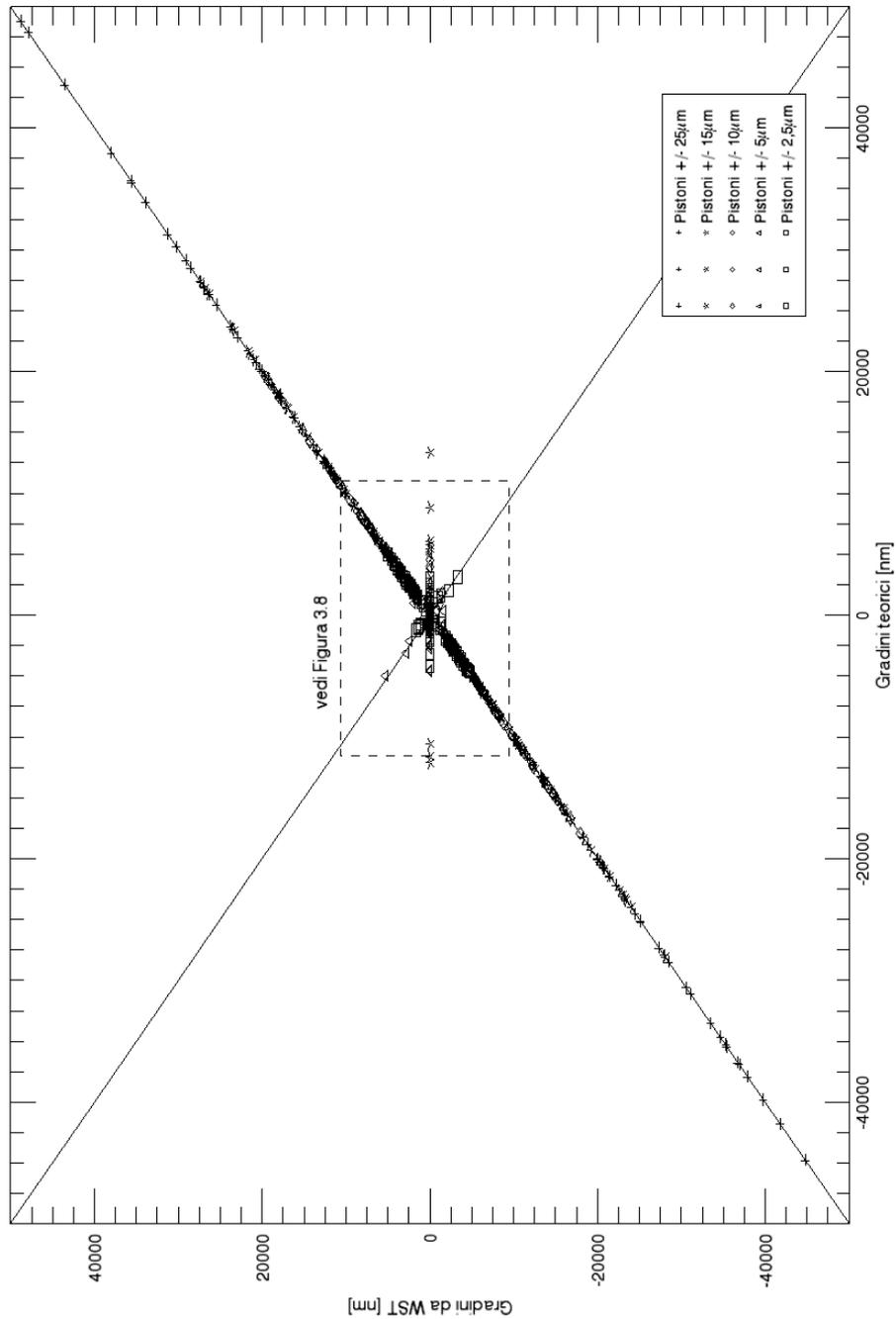


Figura 3.6: Il grafico evidenzia la correlazione tra le stime effettuate attraverso la procedura di fitting descritta nel paragrafo 2.3 e il valore teorico dedotto dalla differenza dei comandi assegnati ai segmenti che formano il gradino analizzato.

di puro pistone compresi in intervalli di  $\pm 25\mu m$ ,  $\pm 15\mu m$ ,  $\pm 10\mu m$ ,  $\pm 5\mu m$  e  $\pm 2.5\mu m$ , ottenendo così un campione di gradini tra  $\pm 50\mu m$ . Per ognuno di questi intervalli sono state eseguite 5 diverse simulazioni utilizzando differenti distribuzioni iniziali dei pistoni differenziali. Per ogni singola simulazione infine sono state richiamate la procedura di identificazione delle sottoaperture (paragrafo 2.2) e quella di calcolo dei gradini (paragrafo 2.4).

A livello esemplificativo in Figura 3.6 è riportato il grafico dedotto dalle prime simulazioni eseguite. In ascissa è riportato il valore teorico del gradino ricavato dalla differenza tra i dati ottenuti della WST e i valori di pistone assegnati ai segmenti corrispondenti al bordo analizzato. In ordinata sono riportati i valori degli stessi gradini misurati col metodo sopra citato.

Per ogni singola simulazione il numero di sottoaperture utili in cui stimare i  $\delta$  è pari al doppio del numero dei bordi tra i segmenti, ovviamente tralasciando i  $N_{out} = 12$  fuori pupilla, cioè:

$$N = 2[\sqrt{N_{seg}}(\sqrt{N_{seg}} - 1) - N_{out}] - 4(\sqrt{N_{seg}} - 4) = 72. \quad (3.5)$$

Da Figura 3.6 è evidente la correlazione esistente tra le due grandezze graficate. I punti che mostrano un'anticorrelazione corrispondono alle stime affette da errori di inversione di segno (vedi paragrafo 2.4), mentre i punti posti lungo l'asse delle ascisse corrispondono alle stime affette dagli errori di sotto-risoluzione e di ambiguità di fase (vedi paragrafo 2.3), che vengono imposte uguali a zero durante l'analisi. L'incidenza di entrambe queste classi di errori diminuisce coll'aumentare del modulo dei gradini misurati.

In Figura 3.7 sono riportati i residui dedotti dalla differenza tra il gradino misurato e quello teorico per i casi sopra analizzati. Dal primo grafico è evidente come gli errori di inversione del segno siano tutti localizzati entro

un'intervallo di  $\pm 5\mu m$ . Questo fatto implica che la tecnica abbia un livello di accuratezza minore nella detezione di gradini entro  $\pm 5\mu m$  rispetto all'intervallo  $[5; 50]\mu m$  dove tutte le stime sono in accordo coi valori teorici entro  $\pm 150nm$ .

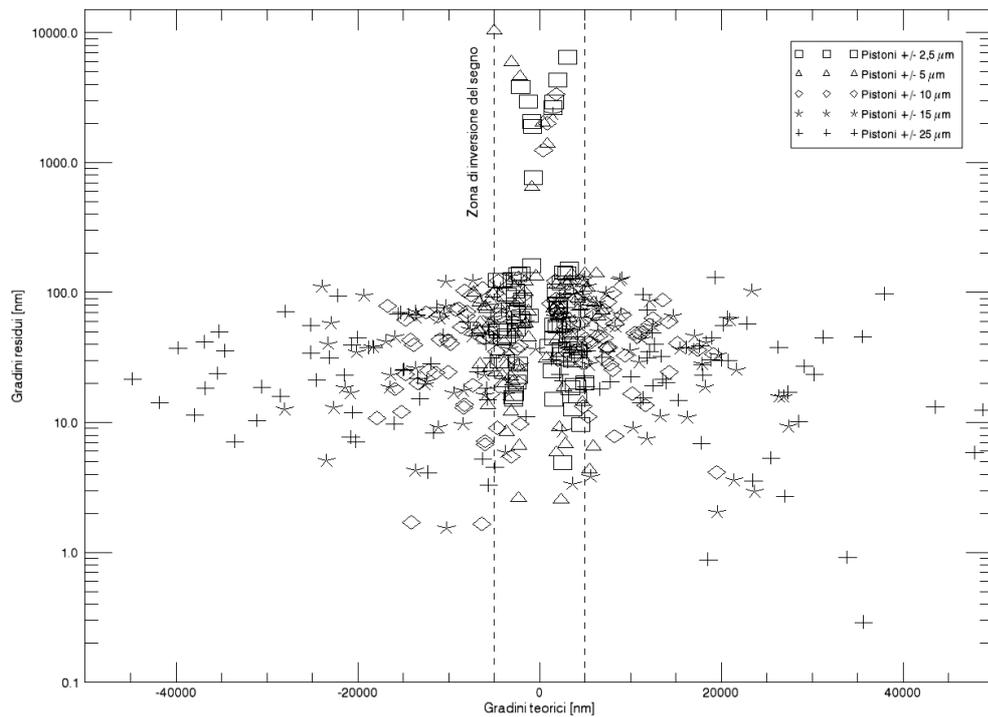


Figura 3.7: Gradini residui ottenuti dalla differenza tra le misure della WST e i valori teorici in funzione di questi ultimi. La zona tratteggiata indica l'intervallo in cui sono stati rilevati errori di inversione di segno del gradino.

Volendo determinare le caratteristiche della WST vicino al limite inferiore del suo intervallo di cattura sono stati considerati solamente i risultati delle simulazioni in cui i segmenti sono stati mossi entro gli intervalli di pistone tra  $\pm 5\mu m$  e  $\pm 2.5\mu m$ . È stata svolta un'analisi statistica di questi risultati

per determinare l'accuratezza associata alle misure ricavate dalla WST (vedi Figura 3.8).

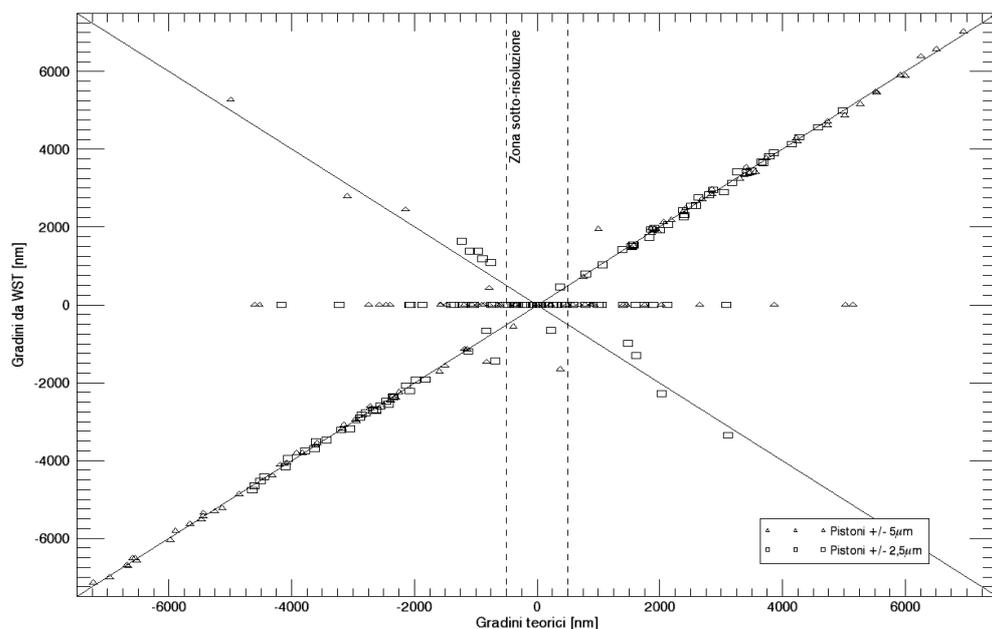


Figura 3.8: Ingrandimento corrispondente alla zona tratteggiata nel grafico di Figura 3.6, la parte di dati compresa tra le due linee verticali tratteggiate è al di sotto del limite inferiore  $\delta_m$  fissato per la tecnica e dunque non è stato considerato ai fini della statistica riportata in Tabella 3.1.

L'analisi è stata svolta scartando inizialmente i dati affetti da errori di sotto-risoluzione e di ambiguità di fase, al fine di determinarne la frequenza.

Successivamente è stata ripetuto lo stesso tipo di analisi eliminando anche i dati che presentavano errori nella determinazione del segno del gradino (vedi paragrafo 2.5).

I dati sono stati ordinati in base al valore assoluto del gradino teorico associato, raggruppandoli in intervalli di  $1\mu\text{m}$  attorno al valore centrale. Conside-

Gradini [nm]	RMS [nm]	RMS <sub>1</sub> [nm]	RMS <sub>2</sub> [nm]	A.F.[%]	I.S.[%]
500 ÷ 1500	$1.27 \cdot 10^3$	$3.1 \cdot 10^2$	$2.0 \cdot 10^2$	66	49
1000 ÷ 2000	$1.43 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^2$	$6.5 \cdot 10^1$	42	23
1500 ÷ 2500	$1.44 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^2$	$6.6 \cdot 10^1$	18	10
2000 ÷ 3000	$1.31 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^2$	$7.0 \cdot 10^1$	9	6
2500 ÷ 3500	$1.21 \cdot 10^3$	$7.2 \cdot 10^1$	$7.1 \cdot 10^1$	12	1
3000 ÷ 4000	$1.40 \cdot 10^3$	$6.7 \cdot 10^1$	$1.8 \cdot 10^1$	21	3
3500 ÷ 4500	$1.05 \cdot 10^3$	$6.2 \cdot 10^1$	$5.8 \cdot 10^1$	16	2
4000 ÷ 5000	$1.26 \cdot 10^3$	$5.9 \cdot 10^1$	$5.9 \cdot 10^1$	9	0
500 ÷ 3000	$1.40 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^2$	32	13
1000 ÷ 3000	$1.43 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^2$	$7.3 \cdot 10^1$	22	13

Tabella 3.1: RMS e percentuale di errori riscontrati dalla procedura di fitting considerando diversi intervalli di valori dei gradini. Con RMS<sub>1</sub> è indicata la RMS calcolata non considerando le stime affette da errori di ambiguità di fase, mentre con RMS<sub>2</sub> quella calcolata tralasciando anche le stime che hanno il segno del gradino invertito. I termini A.F. e I.S. indicano le frequenze percentuali di comparsa degli errori di ambiguità di fase e inversione del segno. Gli ultimi due casi sono quelli utili al confronto successivo con i dati ricavati dall'esperienza di laboratorio.

Quando le 72 sottoaperture utili per ognuna delle 5 diverse disposizioni casuali dello specchio per ogni intervallo è stata calcolata la media delle 5 RMS dei gradini residui, dati dalla differenza tra i valori teorici e quelli misurati, e delle frequenze di comparsa degli errori sopra citati.

In queste analisi il numero totale di stime utili alla statistica riportata in Figura 3.9 è inferiore a  $N' \leq 2 \cdot 5 \cdot N = 720$ , con  $N$  dato dalla 3.5. In Tabella 3.1 sono stati riportati i valori corrispondenti ai gradini più bassi utilizzati per disegnare il grafico di Figura 3.9.

% Amb. Fase	66	42	18	9	12	21	16	9	10	19	13	5	3	0	3	0	0	0
% Inv. Segno	49	23	10	6	1	3	2	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0

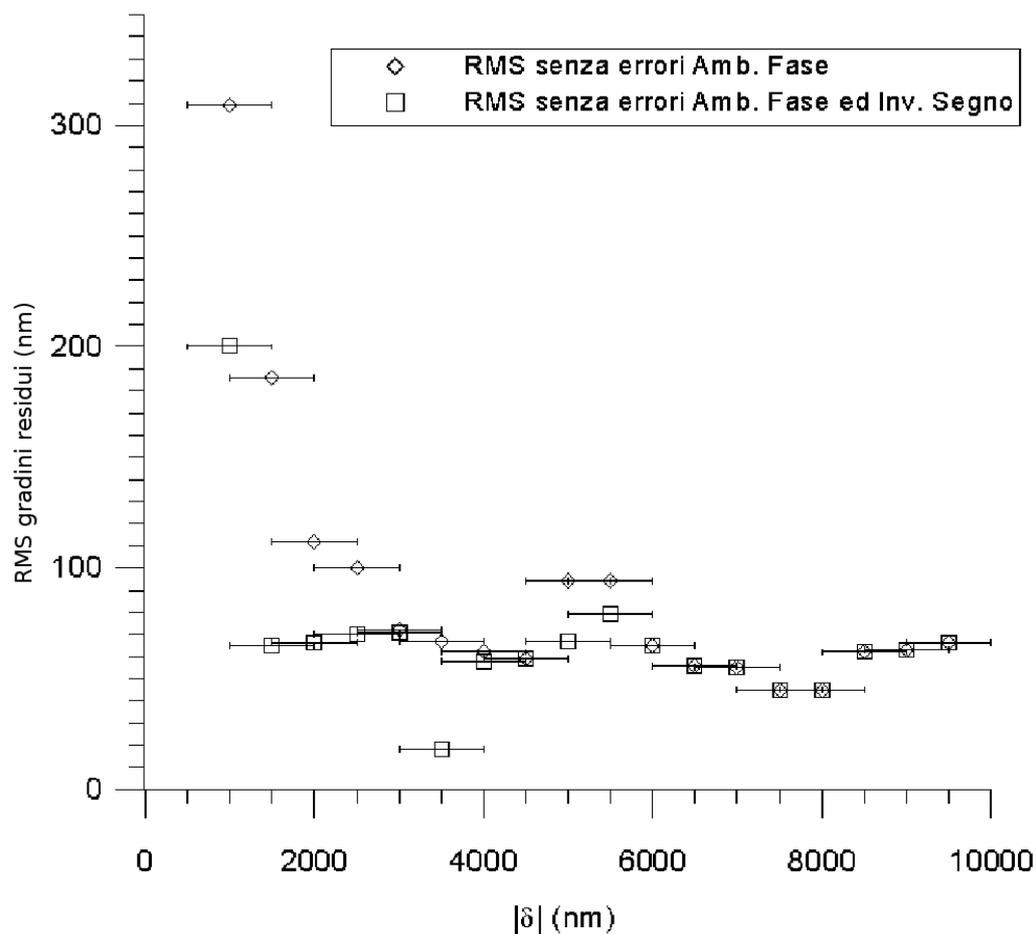


Figura 3.9: Il grafico riporta i risultati dall'analisi statistica di 5 diverse simulazioni numeriche per gli intervalli di pistone  $\pm 5\mu m$  e  $\pm 2.5\mu m$ . In ascissa sono riportati i moduli dei gradini teorici ( $|\delta|$ ) ed in ordinata la RMS dei residui dei gradini. Le barre orizzontali identificano l'intervallo di  $|\delta|$  impiegati per la statistica.

Da quest'analisi risulta evidente come l'incidenza di tutti i tipi di errore diminuisca per valori crescenti di  $|\delta|$ . In particolare gli errori di segno del gradino sono presenti nell'intervallo  $0.5 < |\delta| < 5\mu m$  (vedi Figura 3.8).

L'accuratezza della WST nella misura di gradini di fase corrispondenti ai bordi dei segmenti di uno specchio completamente non fasato è quindi di  $300nm$  per  $0.5 < |\delta| < 2\mu m$  e di  $150nm$  per  $|\delta| > 2\mu m$  (vedi Tabella 3.1).

### 3.3 Risultato del phasing tramite il WPA.

L'obiettivo principale di questo studio è stato verificare la possibilità di eseguire il phasing di uno specchio segmentato attraverso le misure dei segnali ottenuti applicando la WST a PYPS. Infatti, partendo dai segnali ricavati da alcune simulazioni numeriche eseguite, si è sfruttato il WPA al fine di capire la propagazione degli errori durante il phasing dello specchio.

In questa analisi lo specchio  $9 \times 9$  simulato è stato mosso con dei comandi di puro pistone oltre i limiti di misura della WST discussi nel paragrafo 3.2. In ogni simulazione i segmenti sono stati mossi casualmente con comandi di puro pistone in modo che introducano sul fronte d'onda dei pistoni differenziali compresi tra  $\pm\delta_{max}/2$  (vedi inizio del capitolo 3). Sono state eseguite 5 diverse prove variando i semi della distribuzione casuale dei comandi al fine di minimizzare l'influenza della scelta di questi semi sull'esito delle prove.

I dati contenuti in Tabella 3.2 sono stati ordinati in base al massimo gradino riscontrabile nel gruppo di simulazioni analizzate ( $\delta_{max}$ ). Per ogni valore di  $\delta_{max}$  è stata calcolata la media delle 5 RMS dei pistoni residui dello specchio, cioè i valori di pistone dei segmenti dopo aver eseguito un solo ciclo di misura correzione con il WPA. Inoltre sono state riportate per ogni valore di  $\delta_{max}$  la percentuale media dei segmenti non fasati dal WPA e quella dei segmenti erroneamente fasati, in quanto i gradini misurati ai loro bordi erano affetti

$\delta_{max}[\mu m]$	% Segm. Non Fasati	% Inv. Segno	RMS [ $nm$ ]	RMS <sub>2</sub> [ $nm$ ]
10	0	13	$7.5 \cdot 10^2$	$5.2 \cdot 10^2$
20	1	1	$4.5 \cdot 10^2$	$4.5 \cdot 10^2$
30	1	0	$3.1 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^2$
50	1	0	$1.7 \cdot 10^2$	$1.5 \cdot 10^2$
100	1	0	$2.6 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^2$
150	1	0	$3.3 \cdot 10^1$	$3.3 \cdot 10^1$
200	1	0	$3.7 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^1$
250	1	1	$9.0 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$
300	1	0	$2.1 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^1$
320	1	5	$5.7 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^3$
340	1	0	$2.2 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^1$
360	3	6	$5.0 \cdot 10^4$	$4.7 \cdot 10^3$
400	1	6	$1.0 \cdot 10^5$	$3.4 \cdot 10^3$
450	1	4	$1.2 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^3$
500	5	9	$1.2 \cdot 10^5$	$3.6 \cdot 10^3$

Tabella 3.2: Statistica ricavata dall'applicazione del WPA al phasing di specchi con diversi valori iniziali di pistone. Le RMS dei pistoncini residui sono calcolate mediando i risultati di 5 diverse simulazioni numeriche. I valori di RMS<sub>2</sub> invece sono calcolati trascurando i segmenti che non sono stati fasati dal WPA, ai cui bordi sono stati rilevati gli errori descritti nel paragrafo 2.3.

da errori di inversione di segno.

Analizzando i dati riportati in Tabella 3.2 si riscontra un andamento nei valori di RMS per valori di  $\delta < 10\mu m$  simile a quello mostrato dal grafico di Figura 3.7. Infatti in queste simulazioni i gradini di fase hanno valori com-

presi tra  $\pm 5\mu m$  e si nota che l'incidenza degli errori di inversione del segno è  $> 10\%$ . Per gradini maggiori questi errori sono meno frequenti, è per questo che si è indicato l'intervallo  $\pm 5\mu m$  come zona critica di inversione del segno dei gradini nel grafico di Figura 3.7.

Entro l'intervallo ottimale di misura di gradini tramite la WST, corrispondente a  $[2; 200]\mu m$  in questo caso, il WPA permette di fasare completamente specchi segmentati a geometria quadrata con accuratezze inferiori ai  $500nm$ . La disposizione iniziale dei segmenti di uno specchio con associato un valore  $\delta_{max} = 200\mu m$  è riportata a sinistra di Figura 3.10. A destra è mostrata la conformazione dello stesso specchio una volta eseguito il WPA. La RMS calcolata sui residui di tutti i valori di pistone dopo la correzione in questo caso è di  $42nm$ . Questo valore è in accordo con i dati contenuti in Tabella 3.2.

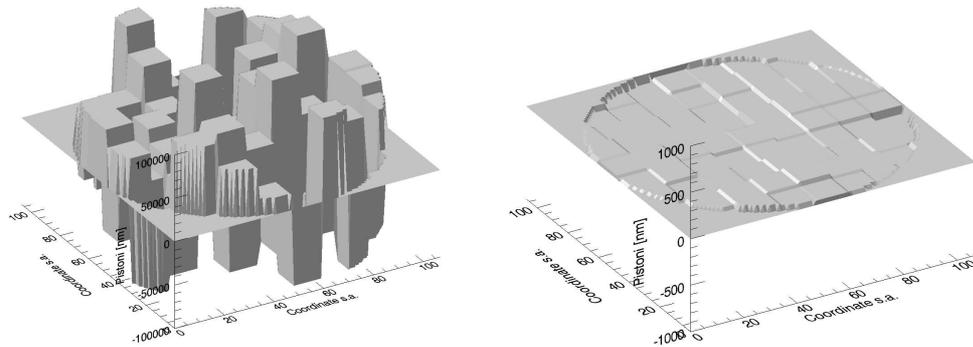


Figura 3.10: A sinistra: immagine di uno specchio quadrato di  $9 \times 9$  segmenti a cui sono stati associati dei comandi casuali di puro pistone nell'intervallo  $\pm 100\mu m$ . A destra: stesso specchio dopo aver applicato il WPA, la RMS dei residui dei valori di pistone associata a questa situazione è di  $42nm$  e tutti i segmenti dello specchio sono stati fasati tramite l'algoritmo.

Considerando valori  $\delta_{max} > 200\mu m$  l'algoritmo è ancora in grado di eseguire il phasing, ma aumentano i casi in cui i segmenti dell'ultimo anello, specialmente quelli posti agli angoli dello specchio, non possono essere fasati. Questo è dovuto al fatto che le stime dei gradini ai loro bordi sono affette da errori di ambiguità di fase causati dall'aliasing dei segnali. In questo caso le procedure che compongono il WPA riconoscono che la stima non è affidabile ed i segmenti interessati non vengono mossi (vedi Figura 3.11 a sinistra).

Nel caso le misure dei gradini per un segmento di bordo siano affette da errori di inversione di segno (vedi Figura 3.11 a destra) quelli che non vengono riconosciuti sono mossi del corretto valore di pistone, ma nella direzione opposta. In questo caso il WPA non riesce a riconoscere la presenza di un errore ed il valore dell'accuratezza finale del phasing eseguito supera i  $500nm$ .

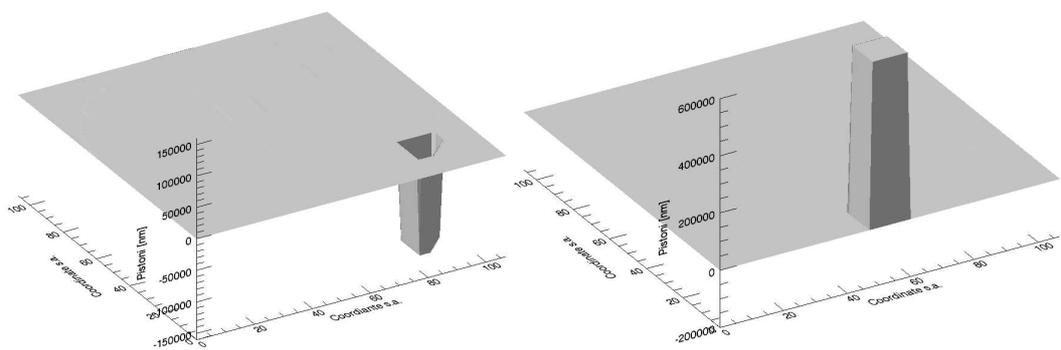


Figura 3.11: Due esempi di specchi fasati tramite il WPA che hanno riportato valori di RMS dei residui della correzione dei pistoni superiori a  $500\text{nm}$ . A sinistra: lo specchio nella posizione iniziale aveva associati dei comandi nell'intervallo  $\pm\delta_{max}/2 = \pm 160\mu\text{m}$  ed il segmento posto al bordo inferiore destro non è stato fasato dalla procedura. A destra: stesso specchio con segmenti mossi tra  $\pm\delta_{max}/2 = \pm 250\mu\text{m}$ . Il segmento non fasato è stato mosso nella posizione corrispondente ad un pistone di poco inferiore ai  $600\mu\text{m}$  in quanto l'unico gradino misurato non affetto da errori di ambiguità di fase ha associato un segno errato.



# Capitolo 4

## Apparato sperimentale.

In questo capitolo vengono introdotte le componenti ottiche che formano il sistema di misura ideato per lo studio dell'applicazione della WST a PYPS. In Figura 4.1 è riportata la configurazione della strumentazione sul banco ottico, la quale può essere schematizzata in tre gruppi:

1. le ottiche di ingresso,
2. il *PYramid Phasing Sensor* (PYPS);
3. il *Liquid Crystal Tunable Filter* (LCTF).

Bisogna precisare che questo apparato è stato progettato e realizzato innanzitutto per eseguire i test di PYPS presso l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (OAA) richiesti per la calibrazione del sensore e l'acceptance test del progetto APE [32], svoltasi a metà aprile 2007. In questa occasione PYPS è stato impiegato per chiudere il ciclo di misura-correzione della posizione dei segmenti di uno specchio deformabile, in condizioni di osservazioni limitate dal seeing.

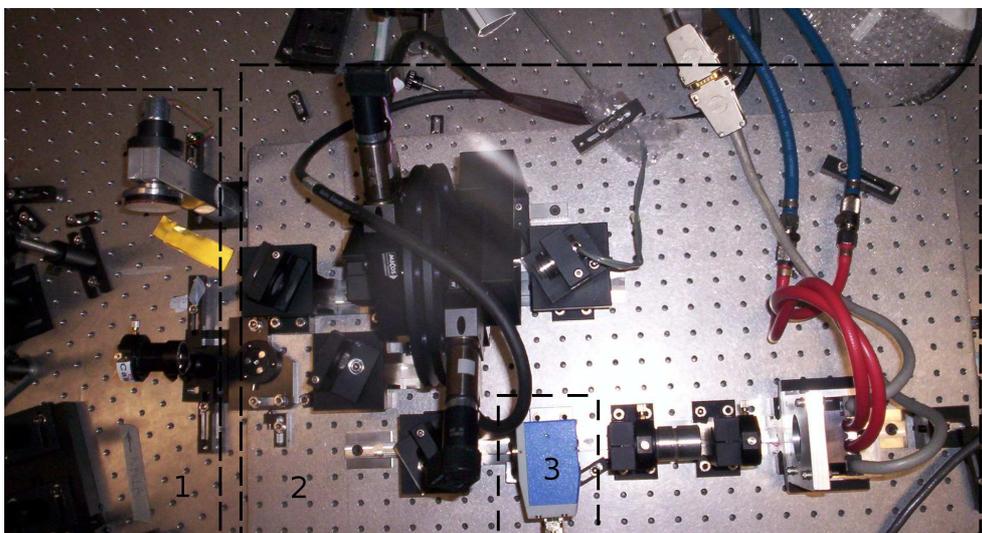


Figura 4.1: Fotografia del banco ottico su cui è stato montato PYPS per eseguire i test presso l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. In figura sono visibili le tre principali componenti del sistema di misura: le ottiche preposte al sensore (1) e PYPS (2) con il filtro sintonizzabile montato (3) per la fase di studio della WST.

Come verrà mostrato nel paragrafo 4.1 le ottiche di ingresso tengono conto di queste richieste, essendo state montate in modo da introdurre nel sistema di misura tre elementi principali: una sorgente puntiforme, che simuli un oggetto celeste puntato dal telescopio, una fonte di turbolenza, che simuli gli effetti di degradazione dell'immagine provocati dall'atmosfera e che sarà successivamente rimossa per i test della WST, uno specchio segmentato, che rappresenta su scala del laboratorio il primario di un futuro ELT.

Nel paragrafo 4.2 è analizzata la struttura di PYPS, la cui fisica come sensore di fronte d'onda è stata introdotta nel paragrafo 1.3. Inoltre vengono spiegate le differenze tra il sistema di misura adottato per l'acceptance test di APE e quello per la prova della WST.

Il filtro sintonizzabile a cristalli liquidi è l'argomento del paragrafo 4.3, in cui

è spiegato il suo funzionamento come selettore rapido di lunghezza d'onda. Sono qui riportate anche le specifiche tecniche dello strumento che fisseranno i limiti di misura per l'esperimento svolto.

## 4.1 Ottiche di ingresso.

In questo paragrafo si analizzano le componenti ottiche preposte a PYPS. Queste servono a simulare l'osservazione di un oggetto celeste tramite un telescopio dotato di pupilla segmentata e dunque permettono di provare in laboratorio le proprietà di PYPS come strumento per eseguire il phasing ottico. Tutte queste componenti sono state montate ed allineate all'interno di questo lavoro di tesi.

Procedendo per ordine questa parte della strumentazione prevede l'impiego di (confronta Figura 4.2):

- 1.a. una sorgente luminosa;
- 1.b. una lente per collimare il fascio;
- 1.c. un divisore di fascio;
- 1.d. un turbolentatore;
- 1.e. una lamina semitrasparente;
- 1.f. un riduttore del diametro del fascio;
- 1.g. un diaframma di metallo;
- 1.h. uno specchio deformabile tipo *Micro Electro Mechanical System* (MEMS-DM);

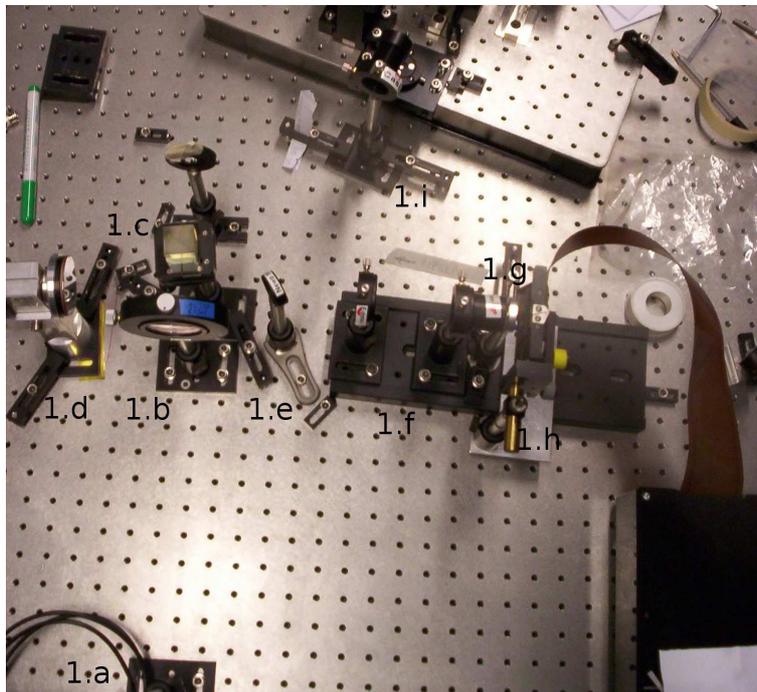
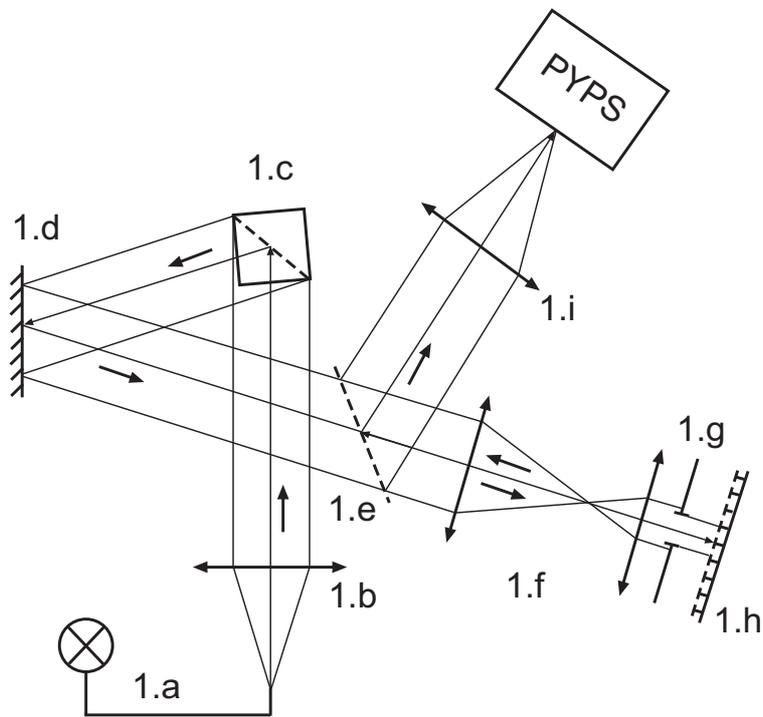


Figura 4.2: In alto: schema delle componenti ottiche poste prima della border di PYPS.

In basso: particolare della Figura 4.1, mostra in dettaglio il sistema delle ottiche d'ingresso.

1.i. una lente di raccordo con PYPS.

La sorgente è una lampada ad incandescenza ad intensità regolabile a cui è connessa una fibra ottica del diametro di  $10\mu m$ . Ad una distanza di  $360mm$  da essa è posta una lente (1.b) da  $300mm$  per collimare il fascio. Questo viene poi deviato da un cubo divisore di fascio che ad ogni passaggio della luce ne trasmette e riflette il 50%. Il fascio dunque è diviso in due parti: la prima procede indisturbata in linea retta ed è stata utilizzata per la calibrazione in altezza delle altre componenti ottiche, la seconda viene riflessa di  $90^\circ$  ed illumina il turbolentatore. Il cubo è inclinato rispetto all'asse della prima lente, in questo modo il fascio attraversa il cubo una volta soltanto evitando un'ulteriore riduzione della sua intensità.

Il turbolentatore è lo strumento che deve simulare l'atmosfera generando il seeing in laboratorio. È costituito da un supporto di metallo provvisto di un motore elettrico, su cui è stato fissato un *phase screen* fornito dall'ESO [33]. Il motore permette al *phase screen* di ruotare attorno al suo asse di simmetria e di introdurre nel fascio delle aberrazioni casuali del tutto simili a quelle introdotte dall'atmosfera.

Va sottolineato che questo strumento è stato introdotto in quanto i test di PYPS eseguiti ad Arcetri all'interno del progetto APE prevedevano l'utilizzo del sensore in condizione limitata dal seeing. Per quanto riguarda lo studio effettuato in questo lavoro di tesi utilizzando PYPS in modalità WST si è preferito lavorare in condizioni limitate dalla diffrazione<sup>1</sup> e dunque il turbolentatore è stato sostituito da uno specchio piano circolare.

---

<sup>1</sup>Per eseguire una prima fase di test della tecnica si è deciso di lavorare in condizioni limitate dalla diffrazione in quanto si vogliono indagare i limiti sperimentali della WST in assenza di atmosfera.

Il fascio collimato riflesso dallo specchio piano passa poi attraverso una lamina al 50%, grazie alla quale il fascio in arrivo è prima diretto su una coppia di lenti che ne riduce il diametro, viene riflesso dal MEMS-DM e tornando lungo lo stesso cammino viene deviato verso il banco secondario su cui è montato PYPS.

Lungo il cammino ottico, prima di PYPS, è posta una lente da  $120\text{mm}$  affinché il fascio in uscita abbia  $f_{\#} = f/d = 15$ , caratteristico dell'uscita degli UT del VLT. Inoltre porre questa lente col fuoco sul piano dell'immagine della pupilla prodotta dalle lenti 1.f, che corrisponde al diaframma posto davanti al MEMS-DM, rende il fascio telecentrico come richiesto dalla conformazione ottica di PYPS.

#### 4.1.1 Specchio deformabile

Lo specchio utilizzato in questo esperimento è un MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) prodotto dalla *Boston Micromachines Corporation*. Questo genere di dispositivi integra in sé diversi elementi grazie alla tecnologia di microfabbricazione, la stessa utilizzata per realizzare i circuiti integrati. Nel caso specifico di specchi deformabili microelettromeccanici (MEMS-DM) attuatori ed elementi meccanici sono posti sullo stesso wafer di silicio senza bisogno di assemblarli [34]. Il MEMS-DM utilizzato in questo esperimento è costituito da una matrice di attuatori a lamine parallele elettrostatiche (vedi Figura 4.3) sulle quali sono posti  $12 \times 12$  specchi piani quadrati di  $300\mu\text{m}$  di lato, per un'apertura complessiva di  $3.6 \times 3.6\text{mm}$ . Le principali caratteristiche tecniche di questo strumento sono riportate in Tabella 4.1.

Il dispositivo può essere controllato remotamente attraverso la workstation

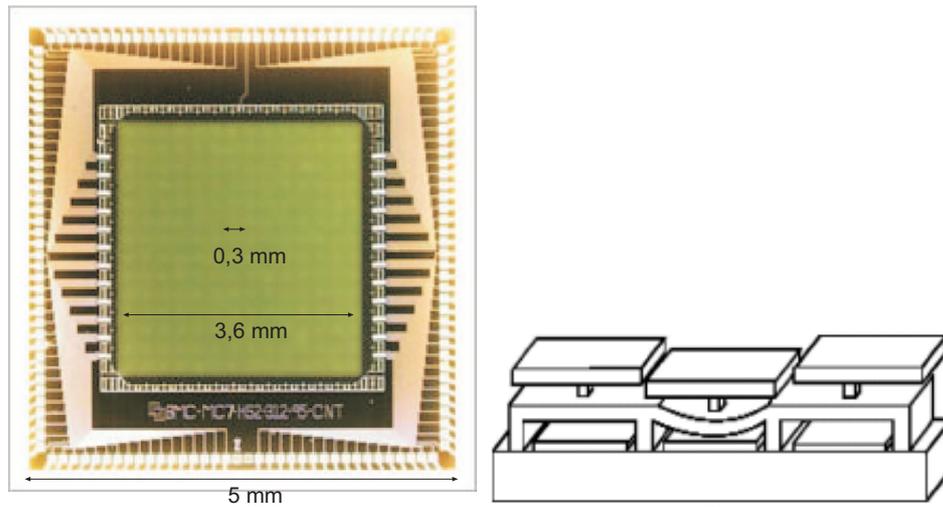


Figura 4.3: A sinistra: immagine di un MEMS-DM realizzato dalla *Boston Micromachines Corporation* in tutto simile a quello utilizzato per l'esperimento in laboratorio. A destra: struttura ideale delle lamine che compongono il MEMS-DM, in realtà un attuatore eccitato (quello al centro) introduce anche un tilt nel segmento oltre che il movimento in pistone.

Caratteristiche	Valore
Fill-factor	$> 98\%$
Corsa	$< 3\mu m$
Ripetibilità	$2nm$
Banda passante	$7kHz$
Durata	$5 \cdot 10^8$ cicli a 1/2 corsa

Tabella 4.1: Principali caratteristiche tecniche del MEMS-DM impiegato.

di laboratorio avendo così il controllo di ogni singolo attuatore. In realtà la struttura stessa del MEMS-DM impedisce di muovere singoli segmenti in puro pistone: infatti un attuatore eccitato associa al segmento corrispondente un tilt oltre che il pistone desiderato.

Il fascio collimato che incide sullo specchio piano (1.d) deve essere ridotto in diametro per poter essere riflesso interamente dal MEMS-DM. A questo scopo sono state introdotte delle ottiche di raccordo (1.f) costituite da due lenti da 85 e 30mm rispettivamente posizionate in maniera confocale. In questo modo si ottiene un fascio di diametro  $d'$  pari a [35]:

$$d' = d \frac{f_1}{f_2} = 8mm \frac{30mm}{85mm} \simeq 2.82mm, \quad (4.1)$$

dove  $d \simeq 8mm$  è il diametro del fascio che si vuole utilizzare sullo schermo di fase. Il diaframma 1.g è lo stop di pupilla del sistema ed ha un'apertura  $d_s < d'$  ed è inserito tra la seconda lente 1.f ed il MEMS-DM a 15mm da quest'ultimo. La piccola distanza tra lo specchio segmentato e lo stop assicura che il sistema abbia associata una pupilla segmentata come sarà per gli ELT.

## 4.2 Sensore di fronte d'onda per il phasing.

Come già anticipato nel paragrafo 1.3 PYPS si basa sull'impiego del SP (1.3) per il phasing. Inizialmente si analizzeranno le varie componenti ottiche che compongono PYPS, poste su un banco secondario separato dal resto del sistema dato che verranno poi trasportate presso i laboratori dell'ESO a Garching e al VLT per svolgere l'esperimento APE.

Le componenti principali di PYPS possono essere riassunte in (confronta Figura 4.4):

- 2.a. una lente di ingresso;
- 2.b. le due ruote portafiltri;

2.c. uno specchio di tip-tilt;

2.d. una piramide di vetro a base quadrata;

2.e. una lente di camera.

2.f. il CCD.

Le ruote portafiltri servono a selezionare in maniera rapida, e senza dover intervenire manualmente sul sistema ottico, i filtri cromatici interposti al fascio. Questi sono montati su due dischi con 8 fori ciascuno e sono mossi da due rotatori. Le due ruote portafiltri sono essenziali per poter chiudere il ciclo di misura-correzione con PYPS a diverse lunghezze d'onda e risolvere quindi il problema dell'ambiguità di fase descritta nel paragrafo 1.3.

Nel caso specifico di impiego di PYPS in modalità di WST le due ruote sono state posizionate su un'apertura senza filtro in quanto la lunghezza d'onda desiderata è selezionata tramite l'LCTF (vedi paragrafo 4.3).

La lente 2.a permette di creare un'immagine della pupilla in corrispondenza del piano dello specchio di tip-tilt. Inoltre questa rende convergente il fascio in modo che il suo punto di fuoco coincida col vertice della piramide 2.d.

L'elemento 2.c, indicato in Figura 4.4, è uno specchio piano circolare attuato piezoelettricamente che oscilla attorno ai due assi del piano di sostegno. Utilizzando in ingresso due tensioni sinusoidali sfasate di  $\pi/2$  è possibile far sì che la normale dello specchio descriva un cono attorno all'asse ottico del sistema alla frequenza delle sinusoidi considerate. Questo specchio è posto nell'immagine della pupilla del sistema, cosicchè tip e tilt introdotti si traducano in traslazioni della PSF nel piano focale senza produrre movimenti della pupilla di uscita nel sistema.

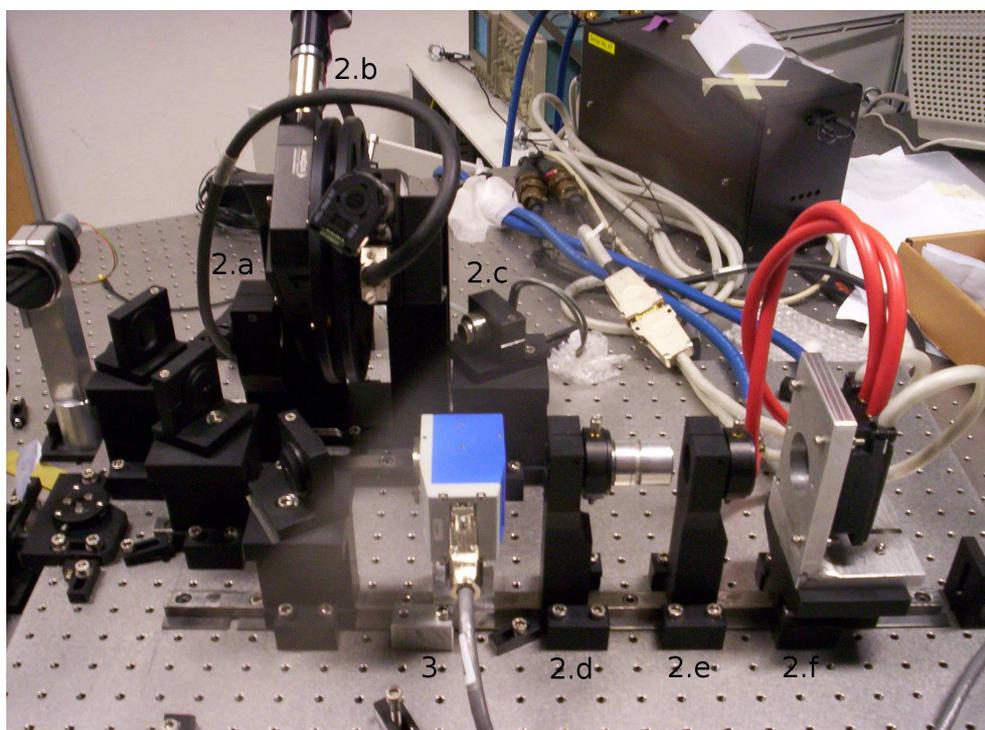


Figura 4.4: Particolare del sistema rappresentato in Figura 4.1 presa in laboratorio durante la fase di test di PYPS in modalità WST. Sono evidenti le componenti caratteristiche del SP: la lente d'ingresso (2.a), le due ruote portafiltri (2.b), lo specchio di tip-tilt (2.c), la doppia piramide montata sul suo supporto (2.d) e la lente di camera (2.e) e il sensore CCD (2.f). Inoltre si nota anche l'unità di raffreddamento del CCD, il box nero sullo sfondo, oltre che l'LCTF (3) in primo piano.

PYPS utilizza una doppia piramide la cui efficacia è pari a quella di una piramide singola di angolo circa uguale alla differenza degli angoli della coppia [36]. La scelta di avere una piramide doppia porta due vantaggi poichè si guadagnano due parametri liberi: un indice di rifrazione e la somma degli angoli. Quindi è possibile utilizzare il primo per correggere cromaticamente l'elemento, il secondo per aumentare gli angoli delle singole piramidi in modo da migliorarne le caratteristiche costruttive a vantaggio della qualità ottica.

La caratteristica più critica di una piramide infatti è la dimensione degli spigoli che separano le quattro facce superiori del solido. Lavorare otticamente le facce di una piramide con un angolo di pochi gradi porta ad avere degli spigoli con larghezza non trascurabile rispetto alle dimensioni della PSF, mentre per angoli intorno ai  $30^\circ$  è possibile ottenere delle larghezze di spigolo di un ordine di grandezza inferiori alle dimensioni della PSF del sistema. Infine la lente di camera serve a generare, per ognuno dei quattro fasci uscenti dalla piramide, un'immagine della pupilla sul sensore di immagine.

Il CCD utilizzato in questo esperimento è il TCCD fornito per APE, cioè un *New Generation Technical CCD* (NGTCCD), vedi Figura 4.5. Il chip

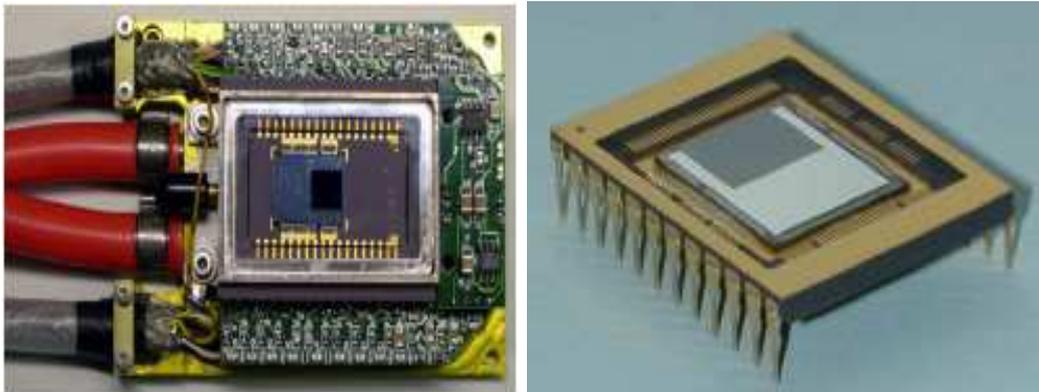


Figura 4.5: A sinistra: immagine del montaggio del TCCD aperto, oltre al chip E2V 57-10 è visibile il Peltier utilizzato per il raffreddamento. A destra: particolare del CCD 57-10 della E2V.

57-10 prodotto dalla E2V ha architettura a trasferimento di immagine (vedi Figura 4.5) ed è retroilluminato al fine di aumentarne l'efficienza quantica. Questo chip inoltre sfrutta la tecnologia *Advanced Inverted Mode Operation* (AIMO) [37] che permette di ottenere correnti di buio  $20 \div 100$  volte inferiori

ai normali CCD (tipo NIMO), il che equivale ad un guadagno di  $15 \div 30^\circ C$  nel suo raffreddamento. Il chip infatti è montato su di un Peltier di raffreddamento anch'esso prodotto dalla E2V. L'elettronica di controllo di questo sensore è stata realizzata presso i laboratori dell'ESO.

Le caratteristiche tecniche del TCCD, in particolare del chip, sono riportate in Tabella 4.2. Il TCCD è stato fornito anche di un'unità di raffreddamento a

Tipo del chip	CCD E2V 57-10
Dimensione attiva in pixels	$512 \times 512$
Dimensione singolo pixel	$13\mu m$
Area di immagine	$44.3mm^2$
Segnale di buio	$0.1e^-pixel^{-1}s^{-1}$ a $-35^\circ C$
Rumore equivalente	$10e^-$ a $1MHz$
Efficienza quantica	$> 85\%$ a $650nm$

Tabella 4.2: Riassunto delle caratteristiche tecniche del chip integrato nel TCCD.

liquido e di un'unità di controllo dell'elettronica indipendenti dal resto della strumentazione. Quest'ultima è stata programmata per poter essere comandata, durante la fase di test ad Arcetri, tramite la workstation di laboratorio ed eseguire acquisizioni utilizzando il software standard già sviluppato per il SP in codice IDL.

### 4.3 Filtro sintonizzabile a cristalli liquidi.

I *Liquid Crystal Tunable Filters* (LCTF) sono già stati impiegati in svariati campi [38] [39] per la loro rapidità di selezione della lunghezza d'onda, do-

vuta al sistema di controllo elettronico che impiega cristalli ferromagnetici o nematici come elementi ritardanti.

L'LCTF funziona come un filtro di tipo Lyot [40] con l'introduzione di cristalli liquidi come strumento per selezionare l'intervallo di lunghezza d'onda desiderato. Essenzialmente l'LCTF è costituito da una cascata di più filtri birifrangenti associati ad elementi a cristalli liquidi secondo lo schema mostrato in Figura 4.6.

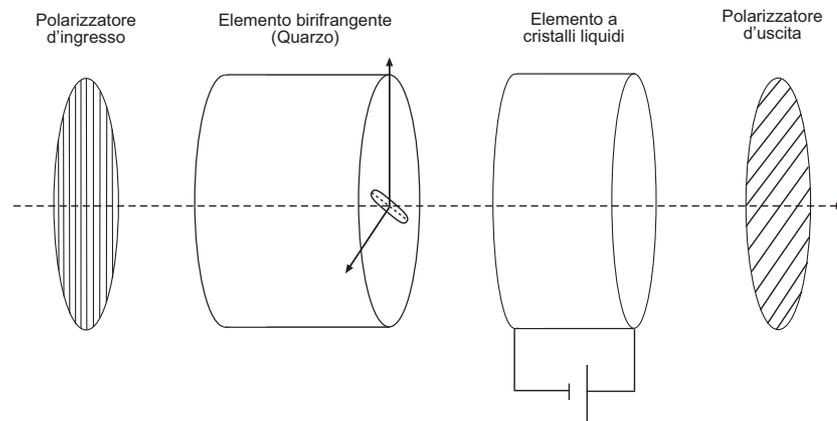


Figura 4.6: Schema di un singolo stadio dell'LCTF.

Come detto la caratteristica innovativa di questo dispositivo è l'introduzione di una lamina di ritardo a cristalli liquidi costituita da due elettrodi ( $In_2O_3$ ) trasparenti e da una cella di cristalli liquidi nematici. Questi hanno simmetria cilindrica e sono inizialmente disposti coll'asse maggiore parallelo al piano del polarizzatore di ingresso.

In assenza di campo elettrico le molecole sono orientate dunque parallelamente alla superficie della cella. Applicando un voltaggio agli elettrodi si produce un campo elettrico diretto lungo il cammino ottico che induce un momento torcente sulle molecole polari dei cristalli liquidi, ruotandole nella

direzione del campo elettrico come mostrato in Figura 4.7.

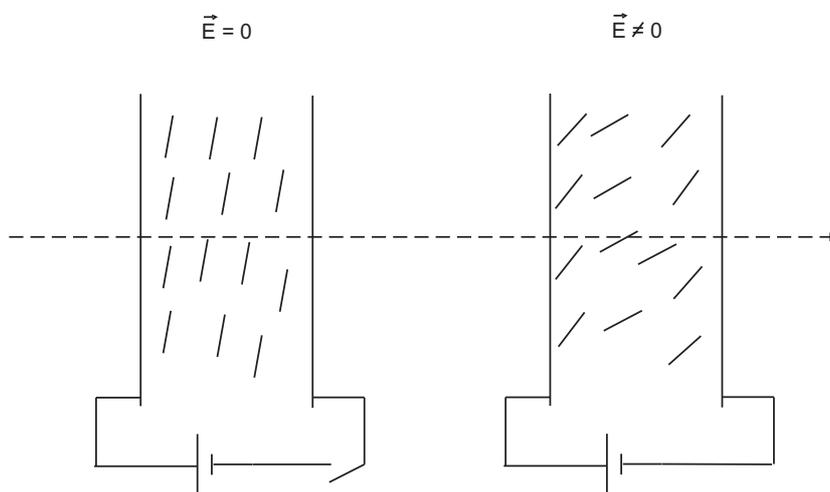


Figura 4.7: Allineamento dei cristalli liquidi dipende dall'intensità del campo elettrico applicato e dalla loro posizione lungo l'asse ottico.

In questo caso si ha anche una forza di legame del lattice cristallino che agisce contro il momento torcente e che tende a riportare le molecole nella posizione di riposo. Si ha quindi che l'angolo di torsione è proporzionale alla forza del campo. Questo rende possibile il controllo del ritardo di fase che si vuole assegnare alla luce trasmessa attraverso la modulazione del voltaggio applicato. Infatti quando le molecole dei cristalli liquidi sono allineate lungo la direzione del cammino ottico i due indici di rifrazione percepiti dalla componente ordinaria e straordinaria della radiazione sono gli stessi ed il cristallo si comporta come monorifrangente, non introducendo alcun ritardo di fase. Diminuendo il voltaggio applicato le molecole tendono a riallinearsi alla posizione di riposo in cui l'asse di simmetria molecolare è perpendicolare al cammino ottico, in questo modo si va a selezionare lo sfasamento desiderato

per ottenere una certa lunghezza d'onda in uscita dal dispositivo<sup>2</sup>.

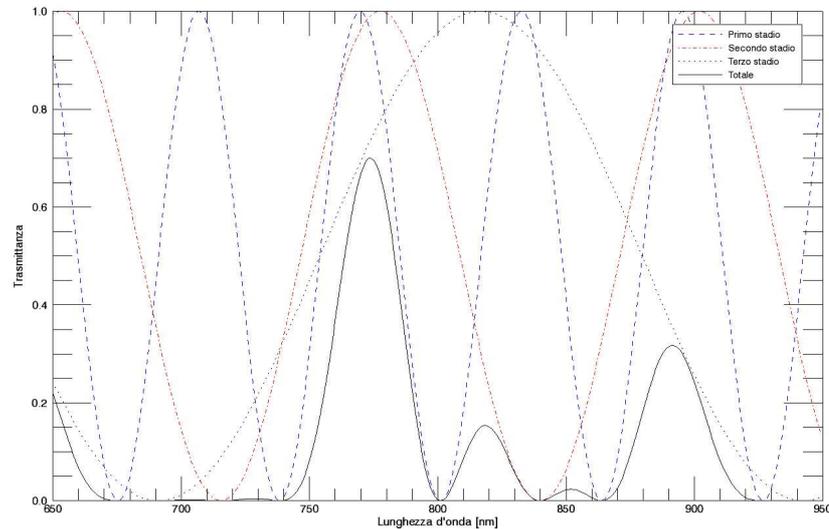


Figura 4.8: Trasmittanza ideale di un filtro Lyot a 3 stadi. La linea tratteggiata blu indica la trasmissione dello stadio piú sottile, quella mista rossa si riferisce al secondo stadio e quella punteggiata nera al terzo. La linea continua è data dal prodotto delle altre ed indica la trasmittanza totale del filtro a 3 stadi.

Per stringere la banda passante del filtro sono necessari piú stadi posti in serie proprio come succede per il filtro Lyot, ognuno dei quali deve avere associata una ritardanza crescente con un fattore 2, ottenuta raddoppiando lo spessore di ogni stadio successivo dell'LCTF. In questo modo l'intervallo di lunghezze d'onda trasmesse da ogni singolo stadio si allarga ed è tale che permette di annullare i picchi laterali trasmessi dall'elemento piú stretto come mostrato in Figura 4.8.

<sup>2</sup>In realtà la risposta dei cristalli liquidi all'applicazione di una differenza di potenziale alle lamine di ritardo è molto piú complessa. Infatti esiste uno specifico tempo di rilassamento del dispositivo dipendente da vari fattori: temperatura di lavoro, spessore, superficie, intensità del campo elettrico, effetti di bordo.

Infine in Tabella 4.3 sono riassunte le caratteristiche tecniche dell'LCTF utilizzato in laboratorio.

Parametri	Varispec SNIR
Banda passante	$(650 \div 1100)$ nm
$\Delta\lambda$	$(7 \div 10)$ nm
Apertura	20 mm
Campo di vista	$7.5^\circ$
$\lambda_{sel}$	$\Delta\lambda/8$
Tempo di risposta	150 ms
Soglia danneggiamento	$500 \text{ mW/cm}^2$
Temperatura utilizzo	$(10 \div 40)^\circ\text{C}$
Temperatura mantenimento	$(-15 \div 55)^\circ\text{C}$
Alimentazione	via USB

Tabella 4.3: Caratteristiche tecniche del filtro sintonizzabile a cristalli liquidi utilizzato nell'esperimento.

# Capitolo 5

## Misure sperimentali.

In questo capitolo vengono riportati i risultati sperimentali della misura di gradini ai bordi dei segmenti di uno specchio composito tramite l'applicazione della WST a PYPS.

Il sistema di misura impiegato è descritto nel capitolo 4. In particolare nel paragrafo 4.1.1 sono state introdotte le caratteristiche del MEMS-DM utilizzato per simulare la pupilla segmentata di un ELT. Come già evidenziato gli attuatori associati alle lamine riflettenti sono mossi attraverso l'applicazione di una differenza di potenziale. Questi tipi di dispositivi quindi sono caratterizzati da una risposta di tipo quadratico tra il voltaggio applicato e la corsa dei segmenti. Bisogna inoltre tenere conto che l'elevato tempo di utilizzo del MEMS-DM ha fatto perdere la linearità fra la radice della differenza di potenziale applicata agli attuatori e lo spostamento fisico del segmento con comportamenti differenti per i diversi attuatori. E' stata così necessaria una fase di calibrazione iniziale dello strumento.

Una volta ottenuta una relazione tra i valori dei gradini ai bordi dei segmenti e i comandi loro assegnati si è passati alla verifica sperimentale delle misure

degli stessi gradini ottenute tramite la WST.

## 5.1 Calibrazione del MEMS-DM.

La calibrazione dello specchio consiste nel valutare la posizione dei bordi dei suoi segmenti quando sono sottoposti ad un determinato comando. A questo scopo è stato sfruttato PYPS applicando una tecnica di misura dei gradini indipendente da quella studiata, di cui è già stata sperimentata la validità [41]. Questa tecnica sfrutta la dipendenza sinusoidale dei segnali di PYPS dal gradino di fase  $\delta$  (vedi 1.10). Se si incrementa a piccoli passi il valore di  $\delta$  si può stimare il gradino corrispondente alla sottoapertura in cui si è misurato il segnale analizzato invertendo la relazione 1.10 attorno ai suoi punti di zero. Gli zeri inoltre individuano gli intervalli di  $\lambda/2$  del gradino di fase  $\delta$  analizzato.

In laboratorio le acquisizioni dei segnali di PYPS sono state eseguite muovendo alcuni dei segmenti del MEMS-DM a passi di  $1V$ , che corrisponde alla massima risoluzione permessa dall'elettronica di controllo dello specchio. L'intervallo di valori di pistone, riferiti al fronte d'onda, in cui possono essere mossi gli attuatori è di  $[0; 2500]nm$  (vedi Tabella 4.1) che corrisponde ai comandi compresi tra  $[0; 200]V$ .

I segmenti del MEMS-DM sono stati suddivisi in 4 gruppi in modo che muovendo gli attuatori corrispondenti ad uno di questi i segmenti selezionati abbiano sempre tutti quelli adiacenti fissi nella posizione di riposo (vedi Figura 5.1). Questa scelta è stata dettata dal fatto che, oltre al movimento in pistone, gli attuatori associano anche un tilt ai segmenti mobili. Con questo accorgimento è possibile avere tutte le stime dei gradini attorno ad un

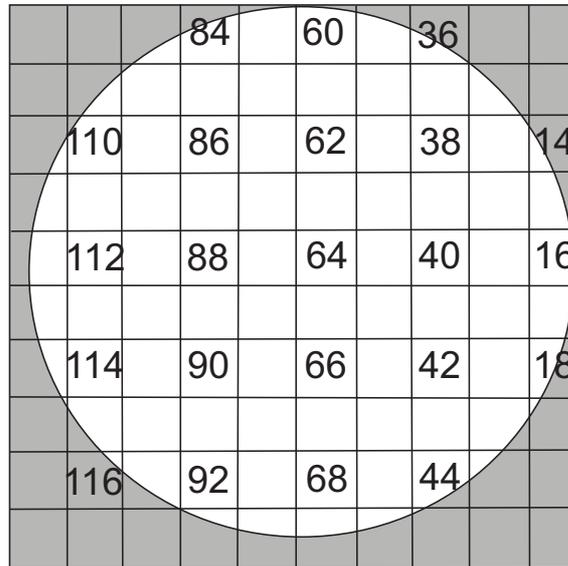


Figura 5.1: Schema dei segmenti che compongono il MEMS-DM a cui è sovrapposta la pupilla del sistema (zona chiara). I numeri seguono l'indicizzazione del gruppo di segmenti utilizzati nella prova di laboratorio.

segmento espresse in riferimento a quelli vicini che non hanno tilt associati. Inoltre non vengono introdotti effetti di sovrapposizione tra segnali dovuti a diversi gradini che degraderebbero la qualità dei dati ottenuti (vedi paragrafo 2.3).

Attraverso il filtro a cristalli liquidi è stata selezionata una lunghezza d'onda centrale  $\lambda = 650nm$ . Questo valore coincide col picco dell'efficienza quantica del CCD disponibile, dunque minimizza il contributo del rumore fotonico. Data la dipendenza della fase dei segnali di PYPS da  $1/\lambda$  (vedi 1.10) la scelta della minima lunghezza d'onda selezionabile massimizza la frequenza dei segnali e dunque la sensibilità della tecnica di calibrazione.

In Figura 5.2 è riportato a titolo esemplificativo l'andamento del segnale  $S_x(\Delta V)$  rilevato al bordo superiore del segmento numero 64 di Figura 5.1 in

funzione del comando di pistone assegnato espresso in  $V$ .

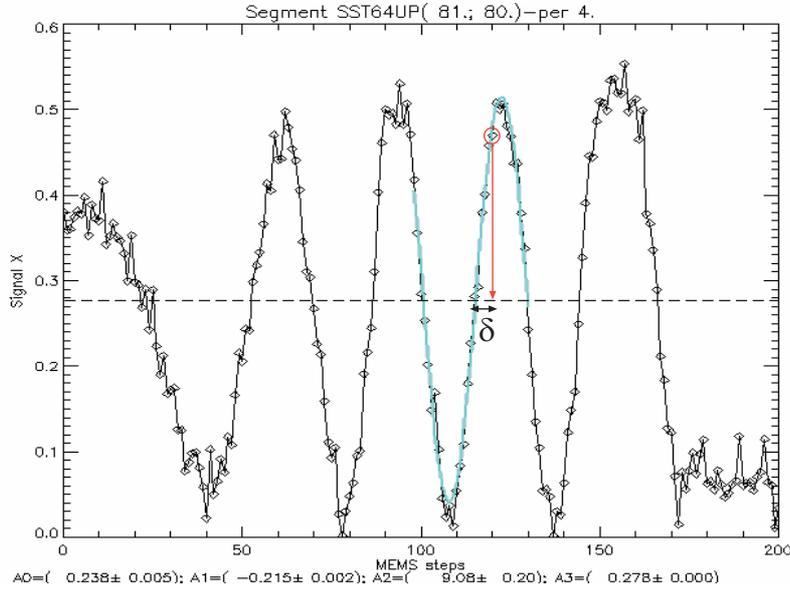


Figura 5.2: Grafico dell'andamento del segnale  $S_x(\Delta V)$  in funzione del comando di pistone assegnato al segmento 64 di Figura 5.1. La linea tratteggiata indica il valore di  $S_x$  corrispondente agli zeri del segnale. In azzurro è riportato il fit eseguito sui dati di un singolo periodo ed in fondo al grafico sono riportati i parametri  $A_i$  ed i relativi errori  $\Delta A_i$  ottenuti da questo fit. Il cerchio rosso evidenzia il valore  $S_x(120V)$ . Il valore di  $\delta$ , a meno di un numero intero di lunghezze d'onda (vedi equazione 5.6), associato a questo punto è dato dalla distanza lungo l'asse  $x$  tra  $S_x(120V)$  e lo zero più vicino.

Nel paragrafo 1.3 è stato dimostrato analiticamente che la dipendenza del segnale  $S(\delta)$  di PYPS dal gradino fisico  $\delta$  introdotto sul fronte d'onda può essere espressa come:

$$S(\delta) = A \sin \left[ 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right] + C, \quad (5.1)$$

in cui  $A$  e  $C$  sono delle costanti e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda selezionata.

Da Figura 5.2 è evidente che l'andamento del segnale  $S_x$  in funzione di  $\Delta V$  non è rappresentabile attraverso una normale funzione sinusoidale poichè il

periodo di oscillazione del segnale non è costante. Questo fatto è dovuto alla non linearità tra la posizione dei segmenti ed i comandi loro assegnati oltre che all'usura dello strumento.

È possibile comunque linearizzare la dipendenza di  $\delta$  da  $\Delta V$  su un intervallo ristretto dei dati riportati in Figura 5.2, sui quali si può fittare una funzione del tipo 2.1:

$$S(\Delta V) = A_0 \sin(A_1 \Delta V + A_2) + A_3. \quad (5.2)$$

In particolare il parametro  $A_3$ , che da il valore dei segnali in corrispondenza di un gradino di fase nullo, è stato dedotto da un fit eseguito sui dati corrispondenti all'intervallo di comandi tra circa  $[50; 150]V$ . La scelta di questo intervallo è stata guidata dal fatto che bisogna considerare solamente la parte di segnale che comprende i picchi dell'oscillazione e trascurare quella dove il segnale è quasi costante al fine di valutare l'offset intrinseco del segnale misurato. Al fine di minimizzare gli errori dovuti alla linearizzazione i restanti parametri  $A_i$  sono stati ottenuti attraverso dei fit eseguiti sui singoli periodi dei segnali, mantenendo  $A_3$  fissato al valore trovato in precedenza (vedi Figura 5.2).

Eguagliando membro a membro i termini delle due equazioni 5.1 e 5.2 si ottiene:

$$\begin{aligned} A &= A_0 \\ \frac{2\pi}{\lambda} \delta &= A_1 \delta_V + A_2 \\ C &= A_3, \end{aligned} \quad (5.3)$$

dunque sostituendo la seconda espressione della 5.3 nella 5.2 si ottiene:

$$S(\Delta V) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta\right) + A_3, \quad (5.4)$$

dalla quale si esplicita il valore del gradino fisico  $\delta$  in dipendenza del segnale  $S(\Delta V)$  misurato in  $V$ :

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \arcsin \left( \frac{S(\Delta V) - A_3}{A_0} \right). \quad (5.5)$$

La 5.5 da un valore del gradino  $\delta$  a meno di un numero intero  $k$  di lunghezze d'onda. È stato dunque necessario valutare il numero  $k$  di periodi del segnale compresi tra  $0V$  e il valore di pistone assegnato al segmento e sommarlo al dato ricavato dalla 5.5 ottenendo:

$$\delta' = \delta_k + \delta = k\lambda + \delta. \quad (5.6)$$

In Figura 5.2 è mostrato a titolo esemplificativo la misura del gradino al bordo superiore del segmento 64. Volendo misurare il gradino quando è assegnato un comando di  $120V$  agli attuatori bisogna sommare  $3\lambda = 1950nm$  al valore  $\delta \simeq 70nm$  calcolato dalla 5.5, ottenendo  $\delta' \simeq 2020nm$ .

Gli errori  $E_\delta$  associati alla calibrazione dei segmenti del MEMS-DM sono stati calcolati considerando la dipendenza  $\delta(\lambda, S, A_0, A_3)$  (vedi equazione 5.5). Gli errori  $\Delta A_i$  sono dati dalle deviazioni standard  $\sigma_i$  associate dalla procedura di fitting alla stima di questi parametri. Il fattore 3 introdotto tiene conto del fatto che i  $\sigma_i$  sono errori statistici e che i dati seguono una distribuzione di tipo gaussiano. Considerando un intervallo di  $\pm 3\sigma$  si assicura la consistenza del 98% dei dati. Gli errori  $\Delta S$  nella misura dei segnali di PYPS sono dati dalla deviazione standard delle differenze tra i punti dei fit ed i dati. Anche in questo caso si è introdotto un fattore 3 che tiene conto della statistica associata a questo errore. Nella selezione della lunghezza d'onda invece si è considerato un errore  $\Delta\lambda$  pari alla risoluzione massima dello strumento  $\Delta\lambda_m$

(vedi paragrafo 4.3).

È stato dimostrato [22] che il SP ha una sensibilità maggiore quando  $\phi = 2\pi\delta/\lambda \simeq 0$ . Per questo motivo nella successiva acquisizione di segnali con la WST si è deciso di porre i segmenti in posizioni tali che ai gradini ottenuti dalla calibrazione corrispondessero delle fasi comprese in intervalli di  $\Delta\phi = \pm\pi/4$  attorno ai punti in cui la fase si annulla (vedi paragrafo 5.2). In questo modo si è anche facilitata l'analisi degli errori da associare al valore di  $\delta$  ottenuto dalla 5.5, infatti si è potuto linearizzare quest'ultima equazione ottenendo un valore di  $E_\delta$  dato da:

$$E_\delta = \delta \left( \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta A_0}{A_0} + \frac{\Delta A_3 + \Delta S}{S - A_3} \right). \quad (5.7)$$

Poichè il valore del gradino  $\delta'$  differisce da quello  $\delta$  per un numero intero  $k$  di lunghezze d'onda si è deciso di associare al valore di calibrazione un errore dato da:

$$E_{\delta'} = \delta \left( \frac{k\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{3\sigma_0}{A_0} + \frac{3\sigma_3 + \Delta S}{S - A_3} \right), \quad (5.8)$$

dove ad  $A_3$  è stato sostituito il valore  $3\sigma_3$  discusso in precedenza.

Il contributo più importante all'errore  $E_{\delta'}$  è dato dai fit eseguiti sui segnali per determinare i parametri  $A_i$  e dallo scostamento tra i valori fittati ed i dati. Per questi parametri si hanno infatti degli errori relativi percentuali attorno al 6%, mentre la selezione della lunghezza d'onda comporta un errore trascurabile ( $\Delta\lambda/\lambda < 0.5\%$ ). Come già accennato nel paragrafo 4.1.1 le lamine riflettenti che compongono i segmenti del MEMS-DM, quando sono eccitate elettrostaticamente, vengono attratte verso la membrana sottostante. Per questo fatto i comandi di pistone assegnati ai segmenti possono essere sempre considerati negativi. Dai grafici di Figura 5.3 risulta evidente che quando i comandi assegnati agli attuatori superano un certo valore, solitamente per

$\Delta V > 150V$ , i segnali hanno un andamento circa costante. Questo è giustificato dal fatto che il segmento è giunto a fine corsa e incrementando la differenza di potenziale applicata agli attuatori non si ottiene un suo ulteriore spostamento.

Per determinare correttamente il valore  $k$  è necessario stabilire una convenzione che stabilisca i segni dei gradini misurati. Infatti il segno dei gradini dipende dal segno della derivata iniziale dei segnali analizzati. Da Figura 5.3 si nota che in corrispondenza di bordi opposti dello stesso segmento si hanno segni opposti per la derivata iniziale del segnale. Dunque per rispettare la convenzione già utilizzata nel capitolo 3 si è quindi deciso di considerare negativi i gradini in corrispondenza dei bordi superiori e a destra dei segmenti di Figura 5.1, positivi quelli inferiori e a sinistra (confronta Figura 3.2).

Dai grafici riportati in Figura 5.3 è evidente che i segnali  $S_x$  e  $S_y$  misurati in questo esperimento sono inizialmente costanti all'incremento del comando assegnato. Questo fatto è giustificato dalla meccanica di funzionamento del MEMS-DM: ogni segmento infatti oppone una certa resistenza al suo movimento, dunque finché non si raggiunge una differenza di potenziale minima non si risconterà alcuna variazione nei segnali misurati.

Con questa tecnica è stato quindi possibile misurare in maniera indipendente i valori dei gradini selezionati per la prova sperimentale della WST. I risultati ottenuti da queste misure sono riportati nel paragrafo 5.3.

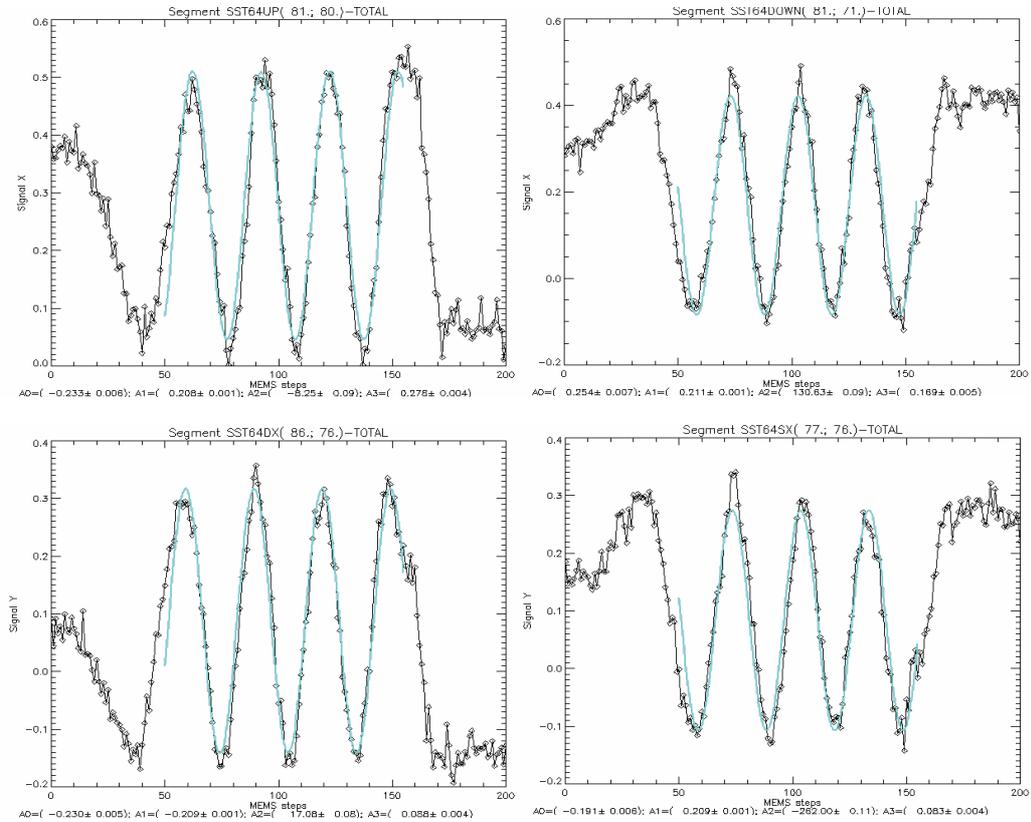


Figura 5.3: Segnali rilevati ai bordi del segmento 64 di Figura 5.1. In azzurro sono riportati i fit eseguiti per ottenere la stima del parametro  $A_3$ .

## 5.2 Misura dei gradini con la WST.

L'acquisizione dei segnali di PYPS è stata effettuata utilizzando la prima procedura del WPA descritta nel paragrafo 2.1.

Inizialmente sono stati mossi tutti i segmenti del MEMS-DM indicati in Figura 5.1 con un comando di pistone pari a  $145V$ . Questo valore di pistone è stato scelto in quanto dai grafici di Figura 5.3 risulta essere compreso entro gli ultimi due picchi dei segnali. Per questo valore si hanno quindi due vantaggi: i gradini associati ai bordi dei segmenti sono dell'ordine di  $2500nm$  e

le derivate parziali  $\partial S_i / \partial \delta_V$  dei segnali in corrispondenza di  $\delta_V = 145V$  sono massime (vedi Figura 5.2) e per questo la sensibilità della tecnica di calibrazione è maggiore. I parametri di ingresso della procedura di acquisizione dei segnali sono:  $\lambda_s = 650nm$ ,  $\lambda_e = 950nm$  e  $\Delta\lambda_m = 5nm$ . Questo livello di campionamento permette infatti di ottenere una buona copertura dei segnali e di velocizzare i tempi di acquisizione<sup>1</sup>.

In seguito è stata eseguita un'altra misura ponendo gli stessi segmenti in posizioni diverse. I valori di pistone assegnati infatti sono nuovamente stati scelti in modo da massimizzare le derivate parziali dei segnali. Più precisamente questi corrispondono a 130, 115, 100 e 85V. In questo caso inoltre le lunghezze d'onda sono state variate di  $\Delta\lambda_m = 1nm$  affinché i segnali rilevati avessero un campionamento maggiore.

Si è applicato il secondo blocco di procedure del WPA (vedi capitolo 2) per ottenere le griglie di sottoaperture ai bordi dei segmenti e eseguire i fit sui dati ottenuti in questi due esperimenti. Si sono così ottenute le misure di tutti i gradini attorno ai segmenti centrali di Figura 5.1 con la WST. Nell'analisi infatti sono stati tralasciati i segmenti posti lungo i bordi dello specchio, per i quali non è possibile confrontare le stime dei gradini lungo i bordi opposti. Il numero di stime utili  $N$  è di  $N = 2N_{bordi}N_{seg} = 2 \cdot 4 \cdot 9 = 72$  casi, dove il fattore 2 tiene conto dell'esistenza dei segnali  $S_x$  e  $S_y$ ,  $N_{bordi}$  è dato dalla geometria dello specchio e  $N_{seg}$  indica il numero di segmenti defasati. L'intervallo di gradini campionato è compreso in  $[500; 3000]nm$ . In Figura

---

<sup>1</sup>A causa della banda passante molto stretta dell'LCTF ( $\sim 10nm$ ) e della scarsa intensità della sorgente luminosa i tempi di integrazione del sensore sono stati fissati a 10s. Inoltre per avere un basso livello di rumore sono state mediate tre immagini per ogni lunghezza d'onda selezionata.

5.4 sono riportati a livello esemplificativo i fit eseguiti in corrispondenza dei bordi inferiore e superiore del segmento 62 posto rispettivamente a 145 e 115V nelle due acquisizioni effettuate in laboratorio.

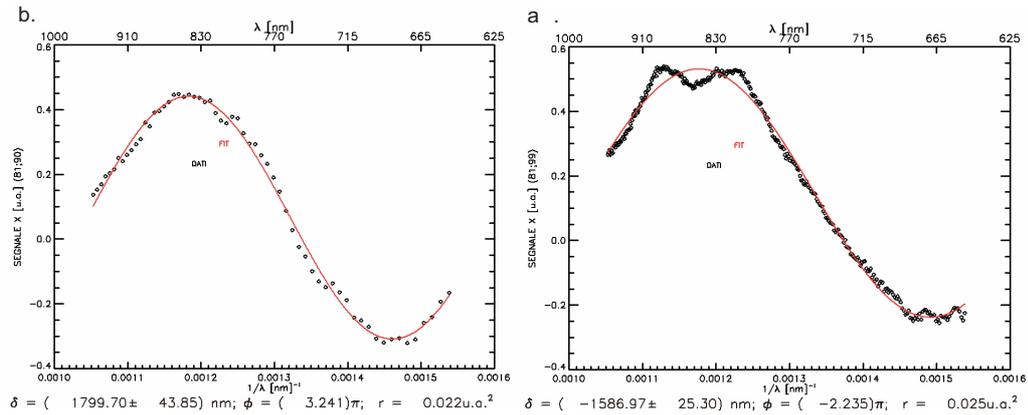


Figura 5.4: Due fit eseguiti sui segnali  $S_x$  in corrispondenza dei bordi del segmento 62 di Figura 5.1, posto rispettivamente nelle posizioni di 145 e 115V. La procedura di calibrazione ha dato per questi gradini dei valori di  $(2030 \pm 100) \text{ nm}$  e  $-(1460 \pm 80) \text{ nm}$ , mentre dall'analisi con la WST si sono ricavati i valori  $(1800 \pm 40) \text{ nm}$  e  $-(1590 \pm 30) \text{ nm}$  rispettivamente.

### 5.3 Analisi dei risultati sperimentali.

Confrontando i valori dei gradini calcolati con l'applicazione della WST con quelli ottenuti dalla calibrazione del MEMS-DM descritta nel paragrafo 5.1 si è disegnato il grafico riportato in Figura 5.5.

In prima analisi risulta evidente la mancanza di stime affette da errori di inversione del segno. Questo fatto è giustificato dal modo in cui sono stati mossi i segmenti. Infatti anche se i comandi assegnati sono compresi nell'intervallo critico di inversione del segno (vedi Figura 3.7), tenendo fissi nella

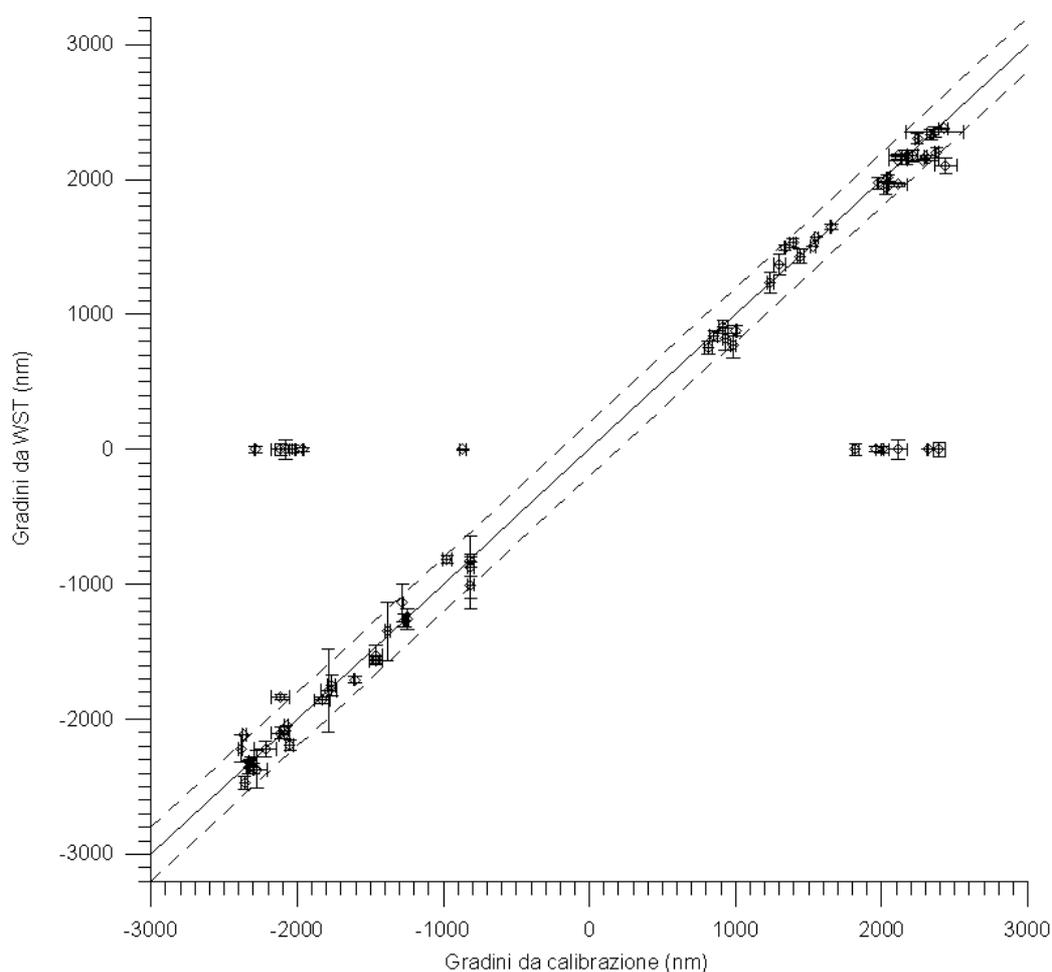


Figura 5.5: Il grafico riassume i risultati dell'applicazione del WPA alle misure effettuate in laboratorio. I valori di riferimento per i gradini sono quelli dedotti dalla calibrazione dei pistoni del MEMS-DM descritta nel paragrafo 5.1. Le linee tratteggiate corrispondono ad uno scarto di  $\pm 200nm$  rispetto la bisettrice.

posizione di zero i segmenti attorno a quelli mobili non vengono introdotti effetti di sovrapposizione dei segnali che risultano essere la principale causa degli errori nella stima dei segni dei gradini. I dati che hanno associato un valore nullo del gradino dedotto dalla WST sono affetti da errori di ambiguità di fase. In questo caso comunque il WPA è stato utilizzato solamente

per dedurre i valori dei gradini ai bordi dei segmenti e dunque queste stime sono semplicemente state scartate al fine della statistica di Tabella 5.1.

Le due linee tratteggiate parallele alle bisettrici evidenziano uno scarto di  $\pm 200nm$  rispetto la relazione lineare. Questo valore è tale da comprendere tutti i dati riportati in Figura 5.5 non considerando quelli posti lungo l'asse  $x$ , affetti da errori di ambiguità di fase, riconosciuti e forzati a valore nullo dal WPA. Considerando i valori riportati in Tabella 3.1 si nota che in corrispondenza dell'intervallo  $[500; 3000]nm$  e in assenza di errori di inversione di segno ci si aspetta una RMS associata ai residui della stima dei gradini tramite la WST dell'ordine di  $100nm$ .

La statistica completa delle misurazioni effettuate è riportata in Tabella 5.1. Confrontando questa Tabella con la 3.1 si nota subito che i valori delle RMS

Pistoni [V]	‡ Stime	RMS [nm]	RMS <sub>2</sub> [nm]	% Amb. Fase
145	36	970	120	20
130	12	1960	74	30
115	8	90	88	0
100	8	260	86	13
85	8	80	77	0
MEDIA	72	840	105	17

Tabella 5.1: Statistica completa dei dati ottenuti dagli esperimenti in laboratorio. Con RMS si indica lo scarto quadratico medio dei residui, ottenuti dalle differenze tra le misure effettuate con la WST e i dati della calibrazione. RMS<sub>2</sub> indica invece la RMS calcolata trascurando le stime affette da errori di ambiguità di fase.

dei residui calcolati su un campione di gradini compreso in  $[500; 3000]nm$ , senza contare le stime affette da inversione di segno, coincidono entro il 5%.

Si può dunque dire che da queste prove emerge un valore per l'accuratezza della WST provata in laboratorio di circa  $200nm$  (vedi Figura 5.6).

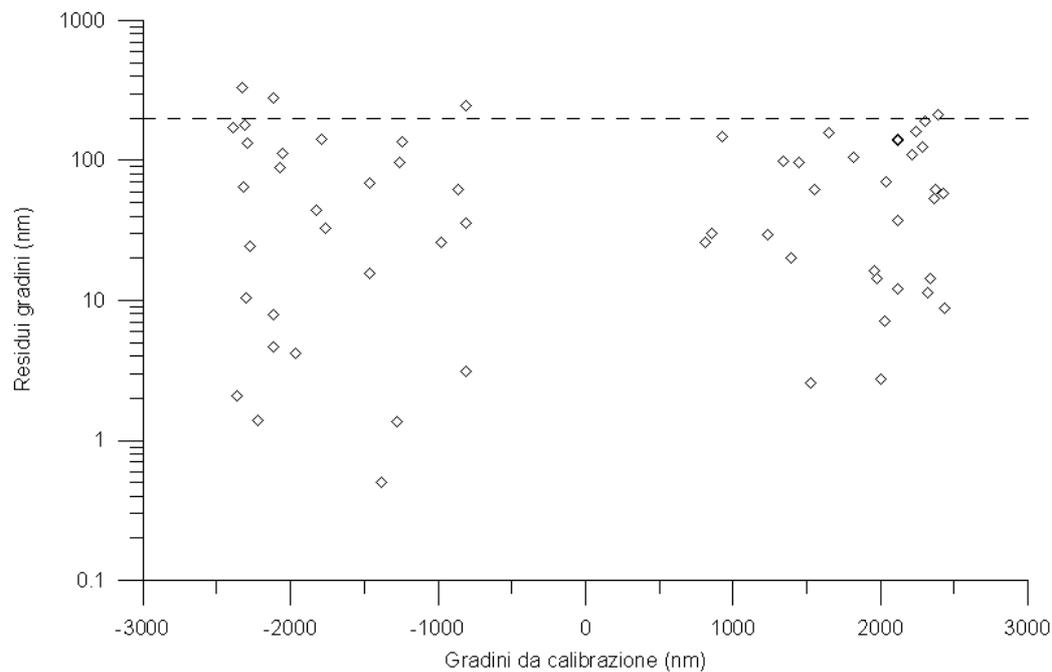


Figura 5.6: Grafico dei residui dei gradini misurati con la WST in funzione dei valori di calibrazione. La linea tratteggiata è posta a  $200nm$ .

Guardando alla statistica degli errori di ambiguità di fase si ha una percentuale più bassa per l'esperimento di laboratorio che quella ricavata dall'analisi compiuta con il simulatore. Questo fatto è dovuto alle ottimali condizioni di misura volute per la prova di laboratorio, in cui i segnali dovuti ad un gradino non sono disturbati da quelli dei vicini.

## 5.4 Sviluppi futuri.

I maggiori sviluppi di questo studio vi è una fase di prova dell'LCTF presso i laboratori dell'ESO a Garching, durante il periodo dedicato ai test di APE. Entro la fine di ottobre del 2007 è prevista l'integrazione nel sistema di misura di APE (vedi Figura 1.4) di PYPS. In seguito, nel gennaio 2008, sarà possibile sfruttare questo sistema per dei test della WST. Nel paragrafo 1.2 sono riportati le specifiche tecniche della strumentazione dedicata a questo esperimento.

Lo specchio segmentato di APE (ASM) è composto da 61 segmenti a geometria esagonale per un diametro complessivo di circa 15cm. Questi segmenti possono essere controllati in tip, tilt e pistone entro un'intervallo di  $\pm 8\mu m$ , il che permetterà di testare la WST nel suo intervallo di misura ottimale. Inoltre la geometria esagonale dello strumento permette di eseguire un controllo incrociato della posizione relativa dei segmenti una volta fasato ogni anello. Sarà dunque possibile studiare anche l'influenza della geometria dello specchio sul phasing eseguito attraverso la WST.

APE dispone anche di un'unità di metrologia interna (IM) che esegue automaticamente misure interferometriche della posizione dei segmenti. Questo permette di avere valori di riferimento dei gradini molto accurati da confrontare con quelli dedotti dalla WST.

Nello schema ottico di Figura 1.4 si nota anche la presenza di una sorgente di turbolenza (MAPS) che potrà essere sfruttata per studiare gli effetti dell'atmosfera sull'accuratezza delle misure dei gradini di fase con la WST.

I 4 PWFS impiegati in APE (vedi paragrafo 1.2) sono tutti caratterizzati da segnali dipendenti sinusoidalmente dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  impiegata.

Per questo motivo i vari gruppi di ricerca stanno valutando la possibilità di impiegare il filtro sintonizzabile a cristalli liquidi per poter risolvere i problemi di aliasing dei segnali riscontrati nella misura di gradini di fase maggiori di  $|\lambda/2|$ . Con questo strumento infatti si è dimostrato possibile estendere l'intervallo di misura di PYPS sfruttando la modalità WST.

Una ulteriore fase sperimentale è stata programmata al *William Herschel Telescope* per la fine del gennaio 2008 in collaborazione con l'*Isaac Newton Group* di la Palma (E) e la *University of Durham* (UK). Questo strumento di 4.2m di diametro è dotato di un sistema di ottica adattiva chiamato *Nasmyth Adaptive Optics for Multi-purpose Instrumentation* (NAOMI) [42], il cui correttore è costituito da uno specchio segmentato composto da 76 elementi quadrati di 7.6mm di lato. Ognuno di questi è provvisto di tre attuatori che ne permettono il movimento in tip, tilt e pistone.

A questo scopo è previsto il trasporto al WHT di PYPS e la sua sostituzione al posto dell'usuale sensore SH di NAOMI. Poichè lo specchio segmentato di NAOMI è coniugato alla pupilla del telescopio, la pupilla immaginata da PYPS sarà del tutto equivalente a quella di uno specchio primario segmentato di 4.2m di diametro. Durante le 4 notti di osservazione previste parte del tempo sarà riservato all'impiego dell'LCTF per lo studio della WST sia con sorgenti artificiali che puntando direttamente una stella per verificare gli effetti della turbolenza atmosferica sui segnali rilevati utilizzando PYPS in modalità WST.

Bisogna anche sottolineare che è in fase di verifica la possibilità di dedicare anche parte del tempo riservato allo studio di APE all'UT3 del VLT a Paranal per un eventuale studio dell'applicazione dell'LCTF per il phasing.

# Capitolo 6

## Conclusioni.

Un punto chiave nella realizzazione degli ELT è lo sviluppo di nuove tecniche per il phasing che permettano di estendere gli intervalli di cattura dei PWFS, risolvendo il problema di ambiguità di fase riscontrato nella misura di pistoni differenziali  $|\delta| > \lambda/2$  (vedi paragrafo 1.3.4). A questo scopo sono state proposte varie tecniche [43] [29] [30]. In questo lavoro di tesi si è approfondito lo studio di una di queste particolari tecniche: la *Wavelength Sweeping Technique* (WST) (vedi paragrafo 1.4.1). Le prove sperimentali di questa tecnica sono state permesse dall'impiego di un filtro sintonizzabile a cristalli liquidi (LCTF) (vedi paragrafo 4.3). Al fine di verificare l'effettiva possibilità di misurare gradini di fase con la WST e valutare l'accuratezza associata a questo genere di misure è stato necessario disporre anche di un sensore di fronte d'onda, in questo caso PYPS (vedi paragrafo 4.2), e di uno specchio segmentato, il MEMS-DM (vedi paragrafo 4.1.1).

È stata necessaria una fase iniziale di prova della WST attraverso il simulatore del SP (vedi paragrafo 3.1) che ha permesso di realizzare un algoritmo di riduzione dati, il *WST Phasing Algorithm* (WPA) (vedi capitolo 2). Con

questo strumento è stato possibile ottenere sia la misura di gradini di fase in laboratorio, sfruttando la WST ed il sistema di misura illustrato nel capitolo 4, che studiare la possibilità di fasare un intero specchio segmentato attraverso l'impiego del simulatore.

I risultati ottenuti in questo lavoro possono essere suddivisi in:

- Risultati delle simulazioni numeriche (esposti nel capitolo 3). Si è dimostrata l'efficacia della WST nel misurare singoli gradini di fase nell'intervallo  $[1; 200]\mu m$  con accuratezze di  $10nm$  e nell'intervallo  $[0.5; 1]\mu m$  con accuratezze di  $200nm$ , riferiti al fronte d'onda (vedi paragrafo 3.2.1). Nel caso di uno specchio completamente defasato la stessa stima dei gradini di fase associati ai bordi dei segmenti ha dato valori di accuratezza, dedotta dalla RMS della differenza tra i gradini stimati e quelli teorici, di  $300nm$  per l'intervallo  $[0.5; 2]\mu m$  e di  $150nm$  per  $[2; 200]\mu m$  (vedi paragrafo 3.2.2). Inoltre l'applicazione della WST al phasing di uno specchio segmentato i cui attuatori sono stati mossi in puro pistone entro l'intervallo di  $[1; 200]\mu m$  ha dato dei valori di RMS sui residui dei pistoni inferiori ai  $500nm$  (vedi paragrafo 3.3).
- Risultati di laboratorio (vedi capitolo 5). Si è verificato che in laboratorio l'accuratezza associata alla misura di gradini di fase compresi in  $[0.5; 3]\mu m$  con la WST applicata a PYPS è dell'ordine di  $200nm$  (vedi capitolo 5). Questa tecnica inoltre si è dimostrata particolarmente veloce in quanto non necessita di alcuna calibrazione iniziale del sensore per l'acquisizione dei segnali con lo sweep della lunghezza d'onda.

I risultati di questo lavoro sperimentale stabiliscono che è possibile l'impiego della WST come strumento per eseguire il phasing di un futuro ELT (vedi paragrafo 1.1.1). Infatti, una volta ridotti gli errori di tip e tilt associati al posizionamento dei segmenti di questi telescopi [25], si è dimostrato che il restante errore di pistone può essere velocemente ridotto con la WST da valori  $\delta \gg \mu m$  all'intervallo di cattura del sensore ottico utilizzato in modalità di ciclo chiuso a singola lunghezza d'onda. Inoltre poichè negli ELT è necessaria la sostituzione ciclica di alcuni segmenti per i lavori di alluminatura e manutenzione, la WST può essere utilizzata all'inizio di ogni notte di osservazione come parte delle procedure di phasing dello specchio.

# Bibliografia

- [1] H. M. Martin, R. G. Allen, J. H. Burge, L. R. Dettmann, D. A. Kettelsen, S. M. Miller, III, and J. M. Sasian, “Fabrication of mirrors for the Magellan Telescopes and the Large Binocular Telescope,” in *Large Ground-based Telescopes. Edited by Oschmann, Jacobus M.; Stepp, Larry M. Proceedings of the SPIE, Volume 4837, pp. 609-618 (2003).*, J. M. Oschmann and L. M. Stepp, eds., vol. 4837 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 609–618 (2003).
  
- [2] R. W. Sinnott, “The Keck Telescope’s giant eye,” *Sky and Telescope* **80**, 15–18 (1990).
  
- [3] R. Gilmozzi and J. Spyromilio, “The European Extremely Large Telescope (E-ELT),” *The Messenger* **127**, 11–+ (2007).
  
- [4] J. Nelson and G. H. Sanders, “TMT status report,” in *Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626728 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference* (2006).

- [5] M. Johns, “The Giant Magellan Telescope (GMT),” in *Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626729 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.
- [6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics* (Introduction to Fourier optics, 2nd ed., Publisher: New York, NY: McGraw-Hill, 1996. Series: McGraw-Hill series in electrical and computer engineering ; Electromagnetics. ISBN: 0070242542, 1995).
- [7] N. Yaitskova, K. Dohlen, and P. Dierickx, “Analytical study of diffraction effects in extremely large segmented telescopes,” *Journal of the Optical Society of America A* **20**, 1563–1575 (2003).
- [8] G. Chanan and M. Troy, “Strehl Ratio and Modulation Transfer Function for Segmented Mirror Telescopes as Functions of Segment Phase Error,” *Applied Optics* **38**, 6642–6647 (1999).
- [9] F. Gonte, N. Yaitskova, F. Derie, C. Araujo, R. Brast, B. Delabre, P. Dierickx, C. Dupuy, C. Frank, S. Guisard, R. Karban, L. Noethe, B. Sedghi, I. Surdej, R. Wilhelm, M. Reyes, S. Esposito, and M. Langlois, “The active phasing experiment: Part II. Design and developments,” in *Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626730 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.

- 
- [10] J. Spyromilio, “The Largest Optical Telescopes: Today VLT; Tomorrow OWL,” in *The Tenth Marcel Grossmann Meeting. On recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation and relativistic field theories*, M. Novello, S. Perez Bergliaffa, and R. Ruffini, eds., pp. 815–+ (2005).
- [11] C. Dupuy, C. Frank, F. Gonté, C. Araujo Hauck, R. Brast, R. Esteves, M. Nylund, B. Sedghi, and F. Derie, “ASM: scaled down active segmented mirror developed to simulate a segmented primary mirror,” in *Optomechanical Technologies for Astronomy. Edited by Atad-Ettedgui, Eli; Antebi, Joseph; Lemke, Dietrich. Proceedings of the SPIE, Volume 6273, pp. 62733E (2006).*, vol. 6273 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.
- [12] F. Gonté, C. Dupuy, C. Frank, C. Araujo, R. Brast, R. Frahm, R. Karban, L. Andolfato, R. Esteves, M. Nylund, B. Sedghi, G. Fischer, L. Noethe, and F. Derie, “The First Active Segmented Mirror at ESO,” *The Messenger* **128**, 2 (2007).
- [13] R. Wilhelm, A. Courteville, S. Estival, A. Bietti, V. Seiller, and F. Gonté, “Shape measurements of a segmented mirror with nanometer accuracy: the APE internal metrology,” in *Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626731 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.
- [14] L. Montoya-Martínez, M. Reyes, A. Schumacher, and E. Hernández, “DIPSI: the diffraction image phase sensing instrument for APE,” in

- Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626732 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.
- [15] S. Esposito, A. Tozzi, A. Puglisi, E. Pinna, A. Riccardi, S. Busoni, L. Busoni, P. Stefanini, M. Xompero, D. Zanotti, and F. Pieralli, “First light AO system for LBT: toward on-sky operation,” in *Proceedings of the SPIE, Volume 6272, pp. (2006)*. (2006).
- [16] K. Dohlen, M. Langlois, P. Lanzoni, S. Mazzanti, A. Vigan, L. Montoya, E. Hernandez, M. Reyes, I. Surdej, and N. Yaitskova, “ZEUS: a cophasing sensor based on the Zernike phase contrast method,” in *Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626734 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.
- [17] F. Gonte, L. Noethe, C. Araujo, R. Brast, C. Dupuy, C. Frank, and F. Derie, “Shack-Hartmann sensor for the active phasing experiment,” in *Ground-based and Airborne Telescopes. Edited by Stepp, Larry M.. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. 626733 (2006).*, vol. 6267 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference (2006)*.
- [18] J. Kolb, E. Marchetti, S. Tisserand, F. Franza, B. Delabre, F. Gonte, R. Brast, S. Jacob, and F. Reversat, “MAPS: a turbulence simulator for MCAO,” in *Advancements in Adaptive Optics. Edited by Domenico*

- B. Calia, Brent L. Ellerbroek, and Roberto Ragazzoni. Proceedings of the SPIE, Volume 5490, pp. 794-804 (2004).*, D. Bonaccini Calia, B. L. Ellerbroek, and R. Ragazzoni, eds., vol. 5490 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 794–804 (2004).
- [19] F. Roddier, “The Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy,” *Prog. Optics*, Volume 19, p. 281-376 **19**, 281–376 (1981).
- [20] R. Ragazzoni, “Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism,” *Journal of Modern Optics* **43**, 289–293 (1996).
- [21] R. Ragazzoni and D. Bonaccini, “The adaptive optics system for the Telescopio Nazionale Galileo,” in *Adaptive Optics*, M. Cullum, ed., pp. 17–+ (1996).
- [22] E. Pinna, “Applicazione del sensore a piramide alla misura di discontinuità del fronte d’onda,” *Tesi di Laurea in Fisica*, Università degli Studi di Firenze (2003).
- [23] S. Esposito and N. Devaney, “Segmented telescopes co-phasing using Pyramid Sensor,” in *Beyond conventional adaptive optics : a conference devoted to the development of adaptive optics for extremely large telescopes. Proceedings of the Topical Meeting held May 7-10, 2001, Venice, Italy. Edited by E. Vernet, R. Ragazzoni, S. Esposito, and N. Hubin. Garching, Germany: European Southern Observatory, 2002 ESO Conference and Workshop Proceedings, Vol. 58, ISBN 3923524617, p. 161*, E. Vernet, R. Ragazzoni, S. Esposito, and N. Hubin, eds., pp. 161–+ (2002).

- [24] S. Esposito, E. Pinna, A. Tozzi, A. Puglisi, and P. Stefanini, “Pyramid Wavefront Sensor at the William Herschel Telescope: Towards Extremely Large Telescopes,” *The Newsletter of the Isaac Newton Group of Telescopes (ING Newsl.)*, issue no. 10, p. 17. **10**, 17–+ (2005).
- [25] S. Esposito, E. Pinna, A. Puglisi, A. Tozzi, and P. Stefanini, “Pyramid sensor for segmented mirror alignment,” *Optics Letters* **30**, 2572–2574 (2005).
- [26] S. Esposito, A. Tozzi, A. T. Puglisi, E. Pinna, P. Stefanini, G. Giorgetti, F. Camiciottoli, P. Salinari, P. Bianchi, and J. Storm, “Integration and test of the first light AO system for LBT,” in *Advancements in Adaptive Optics. Edited by Domenico B. Calia, Brent L. Ellerbroek, and Roberto Ragazzoni. Proceedings of the SPIE, Volume 5490, pp. 228-235 (2004).*, D. Bonaccini Calia, B. L. Ellerbroek, and R. Ragazzoni, eds., pp. 228–235 (2004).
- [27] S. Esposito and A. Riccardi, “Pyramid Wavefront Sensor behavior in partial correction Adaptive Optic systems,” *Astronomy and Astrophysics* **369**, L9–L12 (2001).
- [28] S. Esposito, A. Riccardi, and O. Feeney, “Closed-loop performance of pyramid wavefront sensor,” in *Proc. SPIE Vol. 4034, p. 184-189, Laser Weapons Technology, Todd D. Steiner; Paul H. Merritt; Eds.*, T. D. Steiner and P. H. Merritt, eds., vol. 4034 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 184–189 (2000).

- [29] G. A. Chanan and A. Pinto, “Efficient method for the reduction of large piston errors in segmented-mirror telescopes,” in *Second Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes. Edited by Ardeberg, Arne L.; Andersen, Torben. Proceedings of the SPIE, Volume 5382, pp. 422-430 (2004).*, A. L. Ardeberg and T. Andersen, eds., vol. 5382 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 422–430 (2004).
- [30] E. Pinna, S. Esposito, A. Puglisi, F. Pieralli, R. M. Myers, L. Busoni, A. Tozzi, and P. Stefanini, “Phase ambiguity solution with the Pyramid Phasing Sensor,” in *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Turner, Martin J. L.; Hasinger, Günther. Proceedings of the SPIE, Volume 6267, pp. (2006).* (2006).
- [31] D. J. Fanning, *IDL programming techniques – 2nd ed.* (IDL programming techniques – 2nd ed. /David W. Fanning. Fort Collins, Co. Fanning Software Consulting, 2000, 2003, 2003).
- [32] F. Gonte, N. Yaitskova, F. Derie, A. Constanza, R. Brast, B. Buzzoni, B. Delabre, P. Dierickx, C. Dupuy, R. Esteves, C. Frank, S. Guisard, R. Karban, E. Koenig, J. Kolb, M. Nylund, L. Noethe, I. Surdej, A. Courteville, R. Wilhelm, L. Montoya, M. Reyes, S. Esposito, E. Pinna, K. Dohlen, M. Ferrari, and M. Langlois, “APE: the Active Phasing Experiment to test new control system and phasing technology for a European Extremely Large Optical Telescope,” in *Quantum Communications and Quantum Imaging III. Edited by Meyers, Ronald E.; Shih, Yanhua. Proceedings of the SPIE, Volume 5894, pp. 306-317 (2005).*,

- M. T. Gruneisen, J. D. Gonglewski, and M. K. Giles, eds., pp. 306–317 (2005).
- [33] J. Kolb, S. Oberti, E. Marchetti, and F. Quirós-Pacheco, “Full characterization of the turbulence generator MAPS for MCAO,” in *Advances in Adaptive Optics II. Edited by Ellerbroek, Brent L.; Bonaccini Calia, Domenico. Proceedings of the SPIE, Volume 6272, pp. 627258 (2006).*, vol. 6272 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference* (2006).
- [34] T. Bifano, P. Bierden, and J. Perreault, “Micromachined deformable mirrors for dynamic wavefront control,” in *Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications II. Edited by Gonglewski, John D.; Gruneisen, Mark T.; Giles, Michael K. Proceedings of the SPIE, Volume 5553, pp. 1-16 (2004).*, J. D. Gonglewski, M. T. Gruneisen, and M. K. Giles, eds., vol. 5553 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 1–16 (2004).
- [35] F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics 4th edition* (Fundamentals of Optics 4th edition by Francis A. Jenkins, Harvey E. White New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1976, 1976).
- [36] A. Tozzi, “Studio e progettazione di un nuovo sensore di fronte d’onda per il Large Binocular Telescope,” Tesi di Scuola di Specializzazione in Ottica, Università degli Studi di Firenze (2001).
- [37] P. R. Jordan, P. Pool, and S. M. Tulloch, “Secrets of E2V Technologies CCDs,” in *Scientific Detectors for Astronomy, The Beginning of a*

- New Era*, P. Amico, J. W. Beletic, and J. E. Beletic, eds., vol. 300 of *Astrophysics and Space Science Library*, pp. 115–122 (2004).
- [38] H. R. Morris, C. C. Hoyt, P. Miller, and P. J. Treado, “Liquid crystal tunable filter Raman chemical imaging,” *Applied Spectroscopy* **50**, 805–811 (1996).
- [39] R. W. Slawson, Z. Ninkov, and E. P. Horch, “Hyperspectral Imaging: Wide-Area Spectrophotometry Using a Liquid-Crystal Tunable Filter,” *Publications of the ASP* **111**, 621–626 (1999).
- [40] G. Shabtay, E. Eidingler, Z. Zalevsky, D. Mendlovic, and E. Marom, “Tunable birefringent filters - optimal iterative design,” *Optics Express* **10**, 1534–+ (2002).
- [41] S. Esposito, E. Pinna, A. Tozzi, P. Stefanini, and N. Devaney, “Cophasing of segmented mirrors using the pyramid sensor,” in *Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications. Edited by Tyson, Robert K.; Lloyd-Hart, Michael. Proceedings of the SPIE, Volume 5169, pp. 72-78 (2003).*, R. K. Tyson and M. Lloyd-Hart, eds., pp. 72–78 (2003).
- [42] R. M. Myers, A. J. Longmore, C. R. Benn, D. F. Buscher, P. Clark, N. A. Dipper, N. Doble, A. P. Doel, C. N. Dunlop, X. Gao, T. Gregory, R. A. Humphreys, D. J. Ives, R. Øestensen, P. T. Peacocke, R. G. Rutten, C. J. Tierney, A. J. A. Vick, M. R. Wells, R. W. Wilson, S. P. Worwick, and A. Zadrozny, “NAOMI adaptive optics system for the 4.2m William Herschel telescope,” in *Adaptive Optical System Technologies II. Edited by Wizinowich, Peter L.; Bonaccini, Domenico. Proceedings of the SPIE, Volume 4839, pp. 647-658 (2003).*, P. L. Wizinowich and

D. Bonaccini, eds., vol. 4839 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 647–658 (2003).

- [43] G. Chanan, M. Troy, F. Dekens, S. Michaels, J. Nelson, T. Mast, and D. Kirkman, “Phasing the Mirror Segments of the Keck Telescopes: The Broadband Phasing Algorithm,” *Applied Optics* **37**, 140–155 (1998).