



Universita' degli Studi di Padova

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni

**Riduzione dello speckle noise con specchi
deformabili**

Reduction of speckle noise with deformable mirrors

Relatore

Prof. Maria Guglielmina Pelizzo

Laureando

Chiara Castellaro

Co-relatore

Prof. Stefano Bonora

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

Indice

Ringraziamenti	1
Introduzione	2
1 Lo speckle Noise	3
1.1 Introduzione al fenomeno	3
1.2 Proprietà fondamentali dello Speckle	4
1.3 Speckle oggettivo e Speckle soggettivo	6
1.3.1 Speckle Oggettivo	6
1.3.2 Speckle Soggettivo	7
1.4 Speckle nel campo immagine	7
1.5 Stato dell'arte	8
2 Esperienze per l'individuazione dello Speckle	9
2.1 Speckle soggettivo	9
2.2 Speckle oggettivo	10
3 Studio statistico del fenomeno	12
3.1 Speckle come fenomeno di random walk	12
3.2 Risultati negativi della ricerca	14
4 Metodi di riduzione	15
4.1 Introduzione	15
4.2 Riduzione tramite uso di cristalli piezoelettrici (Cf. [1])	16
4.3 Riduzione nei laser projection system	18
4.4 Riduzione tramite la variazione dei parametri della luce	22
4.4.1 Variazione dell' angolo	22
4.4.2 Variazione di polarizzazione	22
4.4.3 Variazione di lunghezza d'onda	23
4.4.4 Diffusore Ottimo	23
4.5 Riduzione tramite l' utilizzo di matrici di Hadamard	25
4.6 Trasmissive Laser Speckle Reducer LSR	27

5	Applicazioni legate allo Speckle Noise	30
5.1	Interferometria Speckle	30
5.1.1	E.S.P.I	31
5.2	Monitoraggio del flusso sanguigno	32
5.3	Holographic laser projection technology	33
5.3.1	La tecnologia LBO	33
5.3.2	Vantaggi	34
6	Riduzione dello Speckle con ottiche adattive	37
6.1	Misura del contrasto	37
6.1.1	Prove di Filtraggio	38
6.1.2	Simulazione del rumore su onda quadra	38
6.1.3	Simulazione del confronto tra onde quadre con diversi SNR	39
6.2	Prove pratiche principali	40
6.2.1	Riduzione dell'apertura numerica della videocamera	40
6.2.2	Variazione della frequenza e dell'ampiezza picco picco del segnale	44
7	Conclusioni	49
	Appendice A - Principio di Huygens Fresnel	50
	Appendice B - Codice usato nelle simulazioni Matlab	52
7.1	Confronto tra due onde quadre	52
7.2	ImCrop	52
7.3	Prova della funzione Wiener2	53
7.4	Elaborazione di immagine parziale	53
7.5	Elaborazione finale	53
	Appendice C - Specchi deformabili e ottica adattiva	55
	Elenco delle figure	58
	Bibliografia	59

Ringraziamenti

“Alla resa dei conti, non ha avuto importanza che tu non riuscissi a chiudere la tua mente. E’ stato il tuo cuore a salvarti”

Ho sempre pensato che mi sarei laureata il lettere, ed eccomi qui a diventare ingegnere. Il pensiero più importante va ai miei genitori Barbara e Giuseppe e alla mia famiglia, Alessandro, Nicola e Melissa per la pazienza e per il sostegno che mi hanno permesso di raggiungere questo importantissimo obiettivo. Grazie per avermi convinta a non mollare mai. Ringrazio anche la mia migliore amica Daniela, la mia sorellina acquisita, che mi ha sopportato e supportato nei momenti più difficili, comprese le mie crisi pre-esame, che mi ha interrogata in materie che non le interessano e di cui non sapeva niente solo per farmi stare più tranquilla. Questa laurea é anche un po’ tua! Un grazie anche alla mia Alice, che sta crescendo con me da dieci anni e che spero continuerà a farlo, e alla mitica Annarita, compagna di avventure e di sventure in questi anni ingegneristici. Non é un caso che ci laureiamo insieme. Ringrazio Giulia che in questi quattro anni ha ascoltato con pazienza le mie preoccupazioni e le mie nevrosi, sempre pronta ad andare a prendere una coppa gelato o una pizza nei momenti di crisi. Un grazie di cuore a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso, grazie per aver creduto in me, e grazie ai miei parenti più stretti che hanno sempre mostrato per quello che faccio una fiducia cieca e priva di incertezze, spronandomi sempre ad andare avanti per la mia strada.

Un ringraziamento va in particolare alla Professoressa Maria Guglielmina Pelizzo e al Dottor Stefano Bonora, per la pazienza con cui mi hanno seguita nella realizzazione della tesi e per avermi proposto un argomento così affascinante e appassionante.

Ed infine un grazie ed un augurio a me stessa... “Non é mai troppo tardi per essere ciò che avresti voluto essere”

Introduzione

L'utilizzo di luce coerente nei sistemi informativi e nelle telecomunicazioni nasce dall'esigenza di produrre immagini nitide e brillanti e di velocizzare i tempi di acquisizione. Si presentano, però, alcuni inconvenienti fastidiosi, quali interferenza e Speckle noise, che è oggetto di studio per questa tesi. Questo lavoro si colloca nel contesto dell'acquisizione immagini.

In particolare, con riferimento a quanto sopra accennato, l'esigenza di utilizzare immagini nitide e prive di disturbi porta come conseguenza una ricerca nei metodi di eliminazione del rumore. La tesi è strutturata come segue: nel primo capitolo, dopo una breve introduzione, si trattano le proprietà fondamentali dello speckle, e si distinguono speckle oggettivo e speckle soggettivo. Nel secondo capitolo vengono spiegati in dettaglio alcuni semplici esperimenti da effettuare in laboratorio per prendere confidenza con questo tipo di disturbo. Nel terzo capitolo, si effettua una spiegazione statistica del fenomeno, considerandolo al pari di un random walk nel piano. Nel quarto capitolo si introducono i principali metodi di riduzione, di cui alcuni sono stati poi sperimentati in modo pratico in laboratorio. Nel quinto capitolo si effettua una panoramica delle eventuali applicazioni. Nel sesto, vengono presentate le tecniche di riduzione testate in laboratorio e tramite software. Verrà poi effettuata una breve conclusione, comprendente i possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

Lo speckle Noise

Breve introduzione al fenomeno e elenco delle proprietà fondamentali dello stesso: distinzioni tra speckle oggettivo e soggettivo.

1.1 Introduzione al fenomeno

L'uso delle sorgenti laser ha prodotto, fin dai primi anni sessanta, un sostanziale miglioramento nell'ambito dell'elaborazione di informazioni ottiche. Laser é l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Si tratta di un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce coerente e monocromatica, avente quindi lunghezza d'onda costante, concentrata nella maggior parte dei casi in un raggio rettilineo estremamente collimato. L'utilizzo di luce coerente ha permesso di ottimizzare fattori quali la versatilità, la capacità di memorizzazione dell'informazione, la velocità e, nel caso di utilizzo nei display, ha portato alla creazione di immagini a colori vivaci, impossibili da realizzare con fonti convenzionali. Questi sistemi hanno però degli inconvenienti sostanziali: questa modalità d'uso prevede che ogni piccola imperfezione si manifesti in modo fastidioso, rendendo impossibile preservare la qualità dall'immagine.

Il fenomeno macroscopico più noto dovuto alla coerenza é l'interferenza, scoperta grazie agli esperimenti condotti da Young nel 1801¹, che hanno rivoluzionato le teorie precedenti basate solamente sull'ottica geometrica. Questo fenomeno é dovuto alla sovrapposizione in un punto dello spazio, di due o più onde. Quello che si osserva é che l'intensità dell'onda risultante in quel punto può essere diversa rispetto alla

¹Gli esperimenti di Young dimostrarono la natura ondulatoria della luce: una singola sorgente illumina due fenditure parallele in uno schermo opaco, di larghezza sufficientemente piccola in confronto alla lunghezza d'onda della luce incidente. In tal modo le fenditure diventano due sorgenti lineari di luce coerente che generano, su uno schermo a distanza, una figura di interferenza formata da bande alternativamente scure e luminose.

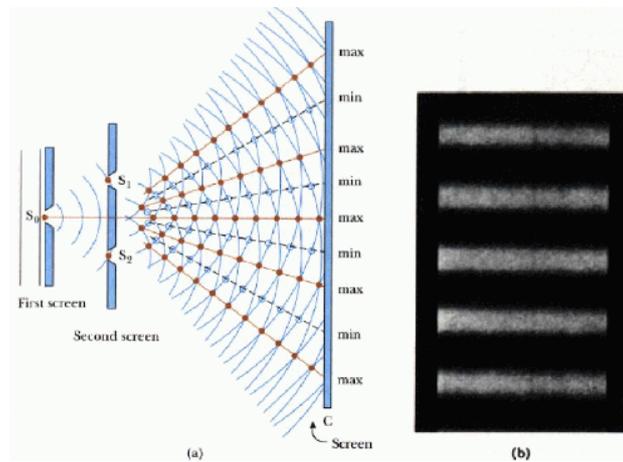


Figura 1.1: Frange d'interferenza

somma delle intensità associate ad ogni singola onda di partenza; in particolare, essa può variare tra un minimo, in corrispondenza del quale non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, ed un massimo coincidente con la somma delle intensità. In generale, si dice che l'interferenza è costruttiva quando l'intensità risultante è maggiore rispetto a quella di ogni singola intensità originaria, e distruttiva in caso contrario. Un fenomeno di natura meno nota ma che crea ugualmente disturbo è conosciuto come Speckle Noise.

1.2 Proprietà fondamentali dello Speckle

Lo Speckle Noise è un pattern, ovvero una distribuzione, che sorge quando la luce monocromatica viene distribuita su una superficie ruvida (come uno schermo) e, diffusa in direzioni casuali, viene acquisita da un rilevatore con apertura finita (come l'occhio di un osservatore). L'unica condizione per la nascita di questo disturbo è che la rugosità della superficie sia dello stesso ordine della lunghezza d'onda del laser utilizzato. ([3]).

Visivamente, si tratta di una distribuzione di macchioline formate dall'interferenza del componente riflesso nella zona circostante al punto incidente del raggio sulla superficie. Queste speckle appaiono dovunque nello spazio, ma il nostro interesse è focalizzato al piano immagine (IP) e al piano di diffrazione (DP).

L'effetto di questo disturbo è il risultato dell'interferenza di molte onde elettromagnetiche aventi diversa fase, i cui contributi vengono sommati dando come risultato un'onda la cui ampiezza, (e di conseguenza intensità) variano in maniera casuale. Si produce dunque per alcune direzioni interferenza costruttiva, per altre interferenza distruttiva.

Ogni tipo di superficie, sintetica o naturale, presenta delle irregolarità; quando viene illuminata da una sorgente di luce, in accordo con la teoria della diffrazione e con il

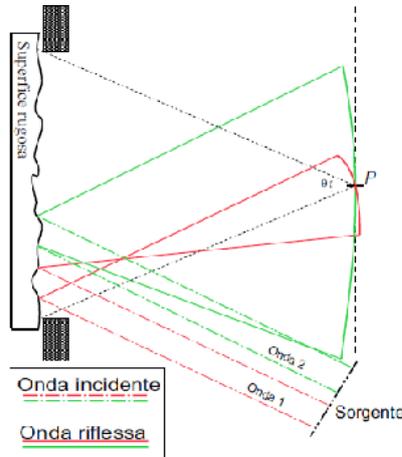


Figura 1.2: Formazione dello Speckle

principio di Huygens-Fresnell (Appendice A), ogni elemento infinitesimo di un fronte d'onda incidente la superficie stessa si può considerare come una sorgente secondaria di onde sferiche.

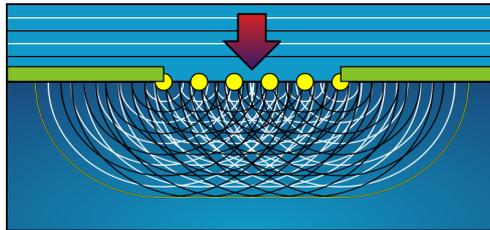


Figura 1.3: Principio di Huygens Fresnell

La perturbazione prodotta in ogni punto si può ottenere come sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie che raggiungono quel punto. L'interferenza tra queste onde sfasate ma coerenti risulta nel disturbo granulare che chiamiamo Speckle Noise. E' da sottolineare che, se il punto di osservazione si sposta, la lunghezza del percorso compiuto dalla componente diffusa cambia, e dal processo di interferenza può risultare un nuovo valore di intensità indipendente. Lo speckle pattern consiste di una moltitudine di punti luminosi dove l'interferenza è fortemente costruttiva, punti scuri dove l'interferenza è altamente distruttiva e livelli di irradianza tra questi due estremi. Per lo speckle pattern non vale il classico modello additivo in cui $u(t) = s(t) + n(t)$, ma bensì un modello moltiplicativo, per cui $u(t) = s(t) * n(t)$. Si distinguono diversi tipi di speckle ([10]):

1. Fully Formed Speckle (FFS): nel caso di scatterers fini e distribuiti casualmente; in questa situazione, l'ampiezza del segnale riflesso può essere modellata come una variabile aleatoria di Rayleigh con un SNR costante di 1,92. Gli eritrociti (cellule del sangue) sono tipici esempi di questo tipo di scatter.

2. No Randomly Distributed with Long-Range order (NRLR): esempi di questo tipo di scatter si possono trovare nei lobuli del parenchima epatico (tessuti di riempimento del fegato). A causa della correlazione tra scatterers, il loro numero effettivo é finito. Questa situazione può essere modellata tramite la distribuzione K, e l'SNR di riferimento é inferiore a 1,92.
3. No Randomly Distributed with Short-Range order (NRSR): esempi di questo tipo si trovano nelle superfici di organi e vasi sanguigni. Il valore di SNR associato é superiore a 1,92.

1.3 Speckle oggettivo e Speckle soggettivo

1.3.1 Speckle Oggettivo

Quando la luce laser che si é dispersa su una superficie ruvida cade su un'altra superficie, forma un pattern speckle oggettivo. Se una lastra fotografica o un altro sensore ottico 2-D si trova all'interno del campo di luce diffusa, senza un obiettivo, si ottiene un pattern speckle le cui caratteristiche dipendono dalla geometria del sistema e dalla lunghezza d'onda del laser. La dimensione media σ dello speckle, é una funzione della lunghezza d'onda della luce, della dimensione del raggio laser che illumina la prima superficie, e della distanza tra questa superficie e la superficie dove si forma il pattern speckle.

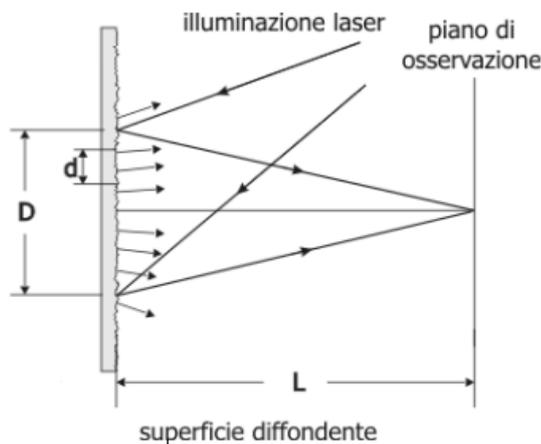


Figura 1.4: Speckle oggettivo

Consideriamo il caso rappresentato in figura: in questa é indicata con D la dimensione della zona della superficie che viene illuminata dalla luce laser, con d la distanza tra una generica coppia di punti che diffondono la luce. Sul piano di osservazione queste due sorgenti elementari danno origine a frange d'interferenza con passo $\lambda * \frac{L}{d}$, variabile quindi da un valore teoricamente infinito (illuminazione uniforme) per punti

tra di loro molto vicini, fino a un minimo di $\lambda * \frac{L}{D}$ per punti che stanno in prossimità del bordo della zona illuminata. Facendo alcune considerazioni di tipo statistico ed assumendo come diametro σ dello speckle la distanza tra i punti sullo schermo nei quali l'intensità si riduce a $\frac{1}{\sqrt{2}}$ del suo valore massimo, si ottiene:

$$\sigma = 1,22\lambda \frac{L}{D} \quad (1.3.1)$$

cioè una dimensione media uguale a quella del disco di Airy ² equivalente della zona illuminata.

1.3.2 Speckle Soggettivo

Notiamo che un qualunque piano “virtuale” posto tra l’oggetto riflettente e lo schermo può essere a sua volta considerato come una sorgente di un campo speckle a cui si possono applicare le considerazioni precedenti; questo in particolare vale per una lente che focalizza sullo schermo la luce diffusa dall’oggetto. Si può quindi scrivere :

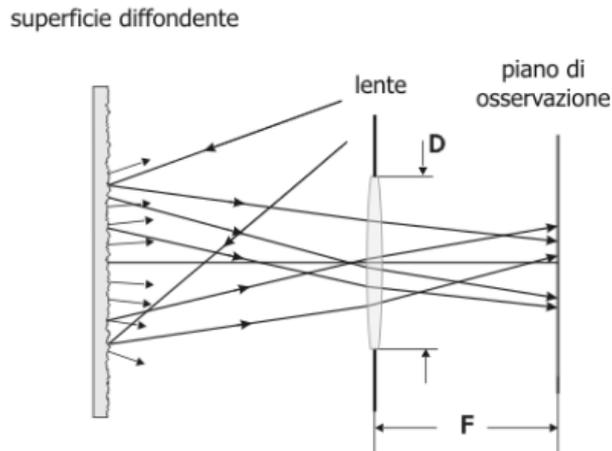
$$\sigma = 1,22\lambda * \frac{F}{D} = 1,22\lambda * f_{numero} = 1,22 \frac{\lambda}{N.A} \frac{M+1}{M} \quad (1.3.2)$$

M é il fattore di ingrandimento del sistema ottico . Se il piano della superficie é nel piano focale delle lente, l’immagine si forma all’infinito $M \rightarrow \infty$. La dimensione minima dello speckle vale $1,22 \frac{\lambda}{N.A}$. Ad es., per la luce di un laser He-Ne ($\lambda = 633nm$) e per un sistema ottico reale, in cui l’ f_{numero} può variare da circa 1,4 a circa 32, la dimensione degli speckle varia da circa 1 a circa 24 μm Si chiama soggettivo, perché la struttura dettagliata del pattern speckle dipende dai parametri del sistema di visualizzazione, per esempio, se viene dimensionata l’apertura dell’obiettivo, cambia la dimensione dello speckle. Se la posizione del sistema di imaging é alterata, il pattern cambierà gradualmente e alla fine non sarà più in rapporto al modello originale .

1.4 Speckle nel campo immagine

Mentre l’origine dello speckle é facile da discutere nella geometria dello spazio libero, risulta più difficile spiegare il suo aspetto nella geometria dello spazio immagine. L’immagine formata su un punto dato dello spazio d’osservazione, consiste in una sovrapposizione di funzioni di ampiezza complessa ognuna risultante da un diverso punto di diffusione sulla superficie dell’oggetto. Come conseguenza dell’asperità della superficie, le funzioni di propagazione aventi ampiezze varie, sommate con fasi diverse, risultano in un pattern complesso di interferenza o un pattern speckle sovrapposto all’immagine presa in considerazione.

²Regione luminosa centrale del modello di diffrazione che risulta da un’apertura circolare uniformemente illuminata. $1,22 * \frac{\lambda}{D}$ esprime la larghezza angolare a mezzo massimo, ovvero il bordo del massimo centrale



1.5 Stato dell'arte

Mentre un'analisi dettagliata delle proprietà delle distribuzioni di Speckle prodotto da luci laser é iniziata nei primi anni sessanta, gli studi relativi a questo fenomeno si trovano nella letteratura fisica e ingegneristica di molti anni prima. Tra questi, gli studi sugli anelli di Fraunhofer a cura di Verdet e Lord Rayleigh e, in seguito, una serie di articoli di von Laue sulle proprietà di base dei fenomeni simili allo Speckle. ([5]) Sono stati scritti centinaia di trattati e proposte più di una dozzina di soluzioni. Tuttavia, gran parte degli studiosi aveva un punto di vista molto pessimistico in merito. Il Dr. Nicholas George del Californian Institute of Technology, ad esempio, ha affermato "Still there is no simple, direct cure for speckle, and logically, no hope for one" (Optical News, Gennaio 1976, pag 14), ed anche il dr. Dennis Gabor (Nobel Prize Laureate, physics, 1971) pensava non fosse possibile trovare una soluzione al problema dello speckle. ([1]) Si pensava allora che per "curare" lo speckle, fosse necessario sovrapporre 10000 immagini, necessarie per portare a 100 il rapporto segnale rumore (SNR). Oggigiorno lo studio dello speckle é un importante campo di indagine ed ha molteplici applicazioni, dall'analisi delle vibrazioni di un campione allo studio di deformazioni superficiali. Si trovano analogie dirette a questo tipo di disturbo in tutti i tipi di immagini coerenti, radar astronomici, radar ad apertura sintetica, immagini acustiche. Fenomeni analoghi vengono riscontrati nei seguenti studi:

1. Propagazione delle onde radio
2. Statistica temporale della luce incoerente
3. Teoria del rumore elettrico in narrowband
4. Teoria generale dell'analisi spettrale dei processi casuali.

Capitolo 2

Esperienze per l'individuazione dello Speckle

Esperienze utili per l'individuazione dello speckle

Le prime esperienze di introduzione allo speckle sono semplici da effettuare, in quanto questo tipo di difetto é facilmente individuabile. Montando il laser su un banco ottico e facendo in modo che il fascio venga allargato e orientato attraverso un obiettivo con breve lunghezza focale (ad esempio, un microscopio obiettivo), si possono effettuare diversi esperimenti, suddivisi in azioni per individuare lo speckle oggettivo ed azioni per individuare lo speckle soggettivo. (Cf. [2])

2.1 Speckle soggettivo

1. Si realizzano schermi con materiali di diversa struttura superficiale, ad esempio cartoncino bianco (grosso e fine), carta vetrata, alluminio opaco. L'aspetto dello speckle é quello indicato in precedenza, una distribuzione di piccole macchie attorno al punto di incidenza del fascio. A parte differenze di luminosità non dovrebbe comparire alcun cambiamento di rilievo mostrando che un pattern speckle é generato indipendentemente dalla rugosità della superficie, a condizione che questa sia superiore alla lunghezza d'onda del laser.
2. Con l'osservatore fermo, lo schermo viene spostato da un lato all'altro. Il movimento sembra far scomparire lo speckle.
3. La natura polarizzata dello speckle viene investigata illuminando lo schermo con luce polarizzata (s'inscrive un polarizzatore se il laser é polarizzato casualmente) e osservando il tutto attraverso un secondo polarizzatore. La differenza tra scattering su carta bianca e alluminio é facilmente osservabile; questo si spiega nel fatto che il foglio di carta produce scattering multiplo e questo distrugge la

polarizzazione, mentre nell'alluminio lo scattering é singolo e la polarizzazione rimane.

4. La forte dipendenza dello speckle dall'apertura della lente (in questo caso l'occhio) é dimostrata guardando lo schermo attraverso un cartoncino nero in cui vengono realizzati piccoli fori. Più piccolo é il foro meno accurata sembrerà la distribuzione. Quando lo schermo é visto attraverso una serie di fori di diametro variabile lo speckle si distribuisce lateralmente assumendo la forma di striature, aventi larghezza direttamente proporzionale al diametro dei fori. Questi esperimenti dimostrano lo stretto rapporto dello speckle con la diffrazione.
5. Guardando ancora attraverso il foro, il laser diretto su una mano tenuta il più stabile possibile, il disturbo dello speckle che si osserva é dovuto ai continui movimenti della pelle e dei vasi sanguigni sottocutanei. Un movimento simile può essere osservato sotto la superficie di frutta matura, in particolare quella a buccia rossa, come i pomodori, dove la luce penetra e viene diffusa internamente dalle cellule viventi.
6. Quando lo schermo viene sostituito da un vetro o da una cella di plastica contenente una sospensione di talco in acqua, e la distribuzione speckle viene osservata guardando alla luce trasmessa attraverso la cella, usando un foro tenuto fermo vicino all'occhio per osservare il disturbo aumentandone le dimensioni. All'inizio lo speckle osservato é al suo apice, a causa dello scattering multiplo delle particelle di talco in movimento. Lasciando riposare la sospensione per un po' lo speckle non viene completamente eliminato a causa del moto Browniano delle microparticelle.

2.2 Speckle oggettivo

1. Senza lenti di messa a fuoco, il laser é diretto su una lastra di vetro smerigliato, e i raggi vengono distribuiti su uno schermo, dove appaiono come uno speckle di aspetto granuloso. Muovendo lo schermo vicino e lontano da terra, il vetro cambia la misura del pattern come se fosse proiettato. Si può verificare ciò misurando la distanza tra due speckle adiacenti sullo schermo a diverse distanze di proiezione. Un secondo vetro smerigliato portato vicino al primo non distrugge il pattern previsto, ma riduce semplicemente la dimensione dello stesso.
2. Successivamente, il raggio laser é focalizzato su un vetro smerigliato con varie lenti o obiettivi. Quando avviene la messa a fuoco, lo speckle pattern cresce molto grossolanamente. Al fuoco, l'obiettivo di massima potenza (diciamo 320) dà uno speckle molto più grande di quello più basso (diciamo 33). Questo accade perché esso si concentra in un fascio di diametro più piccolo. Il diametro approssimativo D può essere calcolato dalla dimensione dello speckle s e dalla

distanza tra lo schermo e il diffusore L , usando la formula $D = 1.22 L/\lambda$. A tale scopo, si considera attendibile che il diametro dello speckle sia pari alla metà della distanza tra due speckle adiacenti. I punti focali piccolissimi misurati in questo modo servono ad illustrare l'impiego del laser nella registrazione ad alta densità (stampanti laser e compact disc). Essi dimostrano anche il pericolo che comporta guardare direttamente un raggio laser non espanso, dato che tutta la potenza del laser si concentra su una piccola area della retina.

Capitolo 3

Studio statistico del fenomeno

Proprietà statistiche dello speckle pattern

3.1 Speckle come fenomeno di random walk

In accordo con le lacune in merito alla conoscenza dei dettagli microscopici della struttura della materia da cui la luce é riflessa, é necessario discutere le proprietà dello Speckle in termini statistici. La statistica d'interesse é definita come un insieme di "oggetti", tutti con le stesse proprietà macroscopiche ma differenti nel dettaglio microscopico. Se posizioniamo un detector nel punto (x,y,z) del piano d'osservazione, l'irradianza misurata non é esattamente prevedibile ma si possono descrivere le sue proprietà statistiche su un insieme di superfici ruvide. Per aiutare nello sviluppo di un modello statistico per lo speckle, si fanno delle valutazioni:

1. Il campo incidente in (x,y,z) é perfettamente polarizzato
2. Il campo incidente in (x,y,z) é perfettamente monocromatico

sotto queste ipotesi si può rappresentare il campo come un segnale analitico complesso :

$$u(x, y, z; t) = A(x, y, z) \exp^{i2\pi\nu t} \quad (3.1.1)$$

con ν frequenza ottica, $A(x,y,z)$ fasore complesso di ampiezza. La quantità direttamente osservabile é l'irradianza in (x,y,z) , data da:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(x, y, z)|^2 dt = |A(x, y, z)|^2 \quad (3.1.2)$$

La caratteristica più importante é indubbiamente la distribuzione statistica dell'irradianza o intensità I , ovvero il flusso di radiazione elettromagnetica che investe una

superficie per unità di area $[\frac{W}{m^2}]$. Il nostro problema, con alcune assunzioni, diventa del tutto simile a quello del cammino casuale su un piano, il “random walk”. ([5])

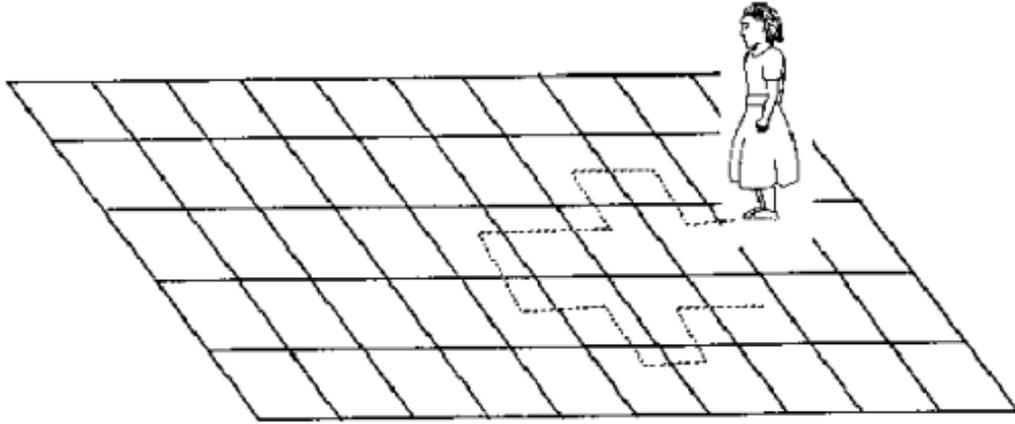


Figura 3.1: Il random walk nel piano

L'ampiezza complessa del campo in (x,y,z) può essere considerata come il risultato della somma di contributi di molte aree di dispersione elementari sulla superficie ruvida. Il fasore di ampiezza del campo può essere rappresentato come:

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N |a_k| \exp^{i\Phi_k} \tag{3.1.3}$$

dove a_k e Φ_k rappresentano ampiezza e fase del k -simo contributo e N è il numero totale di contributi. Si fanno due ipotesi fondamentali:

1. L'ampiezza a_k e la fase Φ_k del k -simo fasore elementare sono statisticamente indipendenti l'una dall'altra e dalle fasi e ampiezze degli altri fasori elementari, ovvero, le aree di diffusione elementari non sono correlate.
2. La fase Φ_k del k -simo contributo elementare giace sul piano $(-\pi, \pi)$, l'escursione di fase di multipli di 2π produce una distribuzione di probabilità uniforme.

Se il numero N di contributi è abbastanza grande, allora:

1. La parte reale e la parte immaginaria del campo complesso in (x,y,z) sono indipendenti, a media nulla, identicamente distribuite con legge Gaussiana
2. L'irradianza segue una legge esponenziale negativa, con densità di probabilità pari a :

$$p(I) = \begin{cases} \frac{1}{I_M} \exp^{-I/I_M} & \text{se } I \geq 0, \\ 0 & \text{se } I < 0. \end{cases} \tag{3.1.4}$$

con I_M intensità media o aspettazione. Le zone scure hanno maggiore intensità rispetto a quelle di qualsiasi altra gradazione di brillantezza. La probabilità che l'irradianza ecceda oltre un valore I_T é :

$$P(I > I_T) = \exp^{-I_T/I_M} \quad (3.1.5)$$

Una proprietà fondamentale della variabile casuale esponenziale negativa, é che la sua deviazione standard (radice della varianza) é uguale alla media. Detto ciò, si definisce contrasto di una distribuzione speckle polarizzata, il valore $C = \sigma_I/I_M$. Questo valore é compreso tra 0 e 1, e caratterizza completamente la distribuzione dello Speckle: definisce la variazione media dell'intensità. Si é dimostrato che quando la superficie presenta un'asperità tale da produrre un'escursione di fase di 2π , l'irradianza si distribuisce effettivamente come una funzione esponenziale negativa, e un ulteriore aumento delle asperità non produce cambiamenti percettibili nella sua distribuzione statistica.

3.2 Risultati negativi della ricerca

Si supponga di illuminare due regioni separate con un raggio laser. La distanza di separazione é ampia, in modo tale da poter considerare indipendenti le due strutture. Ognuna di queste due aree illuminate indipendentemente presenta speckle pattern con contrasto unitario. Se le aree vengono illuminate contemporaneamente dalla stessa sorgente monocromatica, la sovrapposizione dei due speckle pattern NON riduce il contrasto dello speckle risultante. Questo importante risultato negativo é la conseguenza del fatto che la somma di due random walk risulta essere un terzo random walk con più passi. Si conclude quindi, che la somma di speckle pattern sulla base di ampiezze complesse non riduce il contrasto.

Capitolo 4

Metodi di riduzione

Principali tecniche di riduzione dello speckle

4.1 Introduzione

Anche se si possono trarre numerosi benefici dall'esistenza dello speckle, é più spesso un disturbo che un aiuto. La presenza dello speckle in un'immagine impedisce infatti all'osservatore di cogliere i dettagli più fini, e nel caso dei radar, può causare perdita di traccia e riduzione della probabilità di acquisizione dell'obiettivo. Quindi, in molti casi si aspira all'eliminazione totale o parziale di questo disturbo. Si sfruttano i risultati fondamentali della teoria della probabilità, secondo cui, la somma di M variabili aleatorie indipendenti identicamente distribuite é a sua volta una variabile aleatoria avente media pari a M volte la media di ciascun componente elementare, e deviazione standard pari a \sqrt{M} volte la deviazione standard di ogni componente. Allora, il contrasto risultante é pari a :

$$C = \frac{\sigma_I}{I_M} = \frac{\sqrt{M}}{M} = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (4.1.1)$$

La riduzione dello speckle si basa quindi sul costruire una media di M distribuzioni indipendenti all'interno della risoluzione temporale e spaziale del rivelatore (se l'illuminazione fosse fatta con luce bianca, l'effetto dello speckle non sarebbe facilmente osservabile appunto perché mancherebbe coerenza spaziale e temporale). ([5])

Il termine indipendenti significa che le distribuzioni NON sono correlate e non interferiscono l'una con l'altra. Questa seconda condizione é verificata quando le distribuzioni sono generate da fonti non coerentemente correlate o, nel caso di due distribuzioni, quando esse sono ortogonalmente polarizzate. Sono diversi i metodi che permettono di ridurre il contrasto, alcuni si basano sulle variazioni dei parametri fondamentali delle onde elettromagnetiche, altri invece su metodi matematici che comprendono

l'uso di matrici di Hadamard. Dal punto di vista pratico, ci si può servire di cristalli piezoelettrici per annullare lo Speckle operando su specchi e diaframmi. Questi metodi verranno esaminati nello specifico, considerando pregi e difetti di ognuno e possibili applicazioni pratiche. Tutti questi metodi correttivi sono sviluppati per un osservatore situato nel near field. Infatti, se l'osservatore si trova a una distanza d , piccola rispetto al piano immagine, il diametro degli speckle è molto piccolo e le correzioni risultano quasi immediate, operando con modulazioni di fase o di ampiezza. È importante sottolineare che se la riduzione non è effettuata correttamente, si può incorrere in degenerazioni, che si verificano soprattutto quando si applicano diversi metodi non indipendentemente.

4.2 Riduzione tramite uso di cristalli piezoelettrici (Cf. [1])

Obiettivi:

1. Creare un sistema per rimuovere lo speckle, cosicché non ci sia differenza percettibile tra immagini ottenute con l'uso di luce laser e immagini ottenute con luce bianca
2. La determinazione di un metodo per produrre Random Spatial Phase Modulation (RSPM) tramite cui lo speckle viene totalmente soppresso. Immagini ottenute con RSPM laser sono totalmente indistinguibili da quelle ottenute con luce bianca.

In questo metodo di riduzione, la luce diffusa del laser è diretta su uno specchio in movimento, il che provoca una scansione del fascio di un'area bi-dimensionale e una focalizzazione del raggio riflesso attraverso un diffusore, prima della collimazione.

Tutto ciò può essere ottenuto interponendo nel cammino del laser, tra il diffusore iniziale e la lente collimatrice, uno specchio montato su tre cristalli piezoelettrici indipendenti a cui viene applicato un voltaggio in modo tale da far "dondolare" lo specchio in 3 dimensioni. Uno dei metodi per arrivare a simili risultati è usare due diffusori, due lenti e uno specchio montato su un traslatore tilter piezoelettrico prima della lente collimatrice finale. Il primo diffusore crea un'immagine sul secondo attraverso la lente e lo specchio. Lo specchio può essere traslato o ribaltato, facendo in modo che il fascio passi attraverso il secondo diffusore in ogni modo possibile. Questo simula il movimento diffuso necessario per generare l'RSPM. In questo sistema il fascio laser passa attraverso un diffusore e una lente collimata per poi arrivare allo specchio. Il movimento dello specchio è controllato da traslatore tilter piezoelettrico con 3 cristalli indipendenti traslati tra loro di $\frac{2\pi}{3}$, a cui vengono applicate tensioni appropriate. Il sistema RSPM può essere modificato rimpiazzando le due lenti tra i diffusori con una singola lente fissata o appoggiata allo specchio, o con uno specchio concavo.

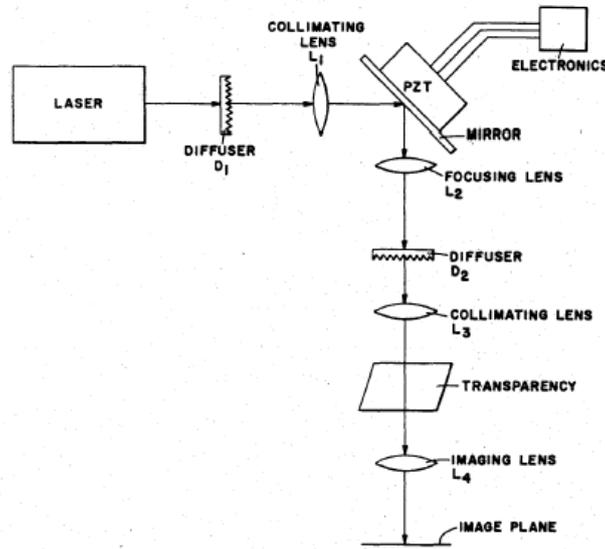


Figura 4.1: Schema ottico utilizzato per la riduzione tramite cristalli piezoelettrici

Una modalità per incrementare il SNR é far muovere il fascio laser in maniera circolare sul secondo diffusore. Questo si ottiene facilmente applicando ai cristalli una tensione trifase sinusoidale. Eccetto l'isteresi, i cristalli rispondono approssimativamente in modo lineare alla tensione applicata con un'espansione o una compressione a seconda della polarità. L'espansione o compressione causano un ribaltamento del piano individuato dai cristalli. E' stato scoperto che il modo migliore per incrementare l'SNR é variare linearmente la tensione applicata, cosicché sul secondo diffusore il fascio crei delle spirali. Il numero di involuzioni é riferito al numero di scansioni. Per esempio, con l'uso di una tensione trifase a 60Hz si ottengono 600 spire, e un SNR di circa 1000, con un tempo di integrazione di 10 secondi.

Con 3 kHz, il tempo di integrazione é di soli 0,2 secondi, ma il SNR relativo non é sfruttabile praticamente. Nella pratica é sufficiente un SNR di circa 100, e questo richiede, a 3kHz, 10 scansioni per un tempo di integrazione di 3,3msec. Quando cresce il numero delle scansioni, le spire diventano più vicine tra loro, finché gli speckle pattern ottenuti da spirali adiacenti non sono più incorrelati. Se lo scan bi-dimensionale copre un area A, il massimo SNR ottenibile é :

$$SNR_{MAX} = \sqrt{\frac{A}{L^2}} \quad (4.2.1)$$

Se l'area é un cerchio di raggio r, allora

$$SNR_{MAX} = \frac{r}{L} \sqrt{\pi} \quad (4.2.2)$$

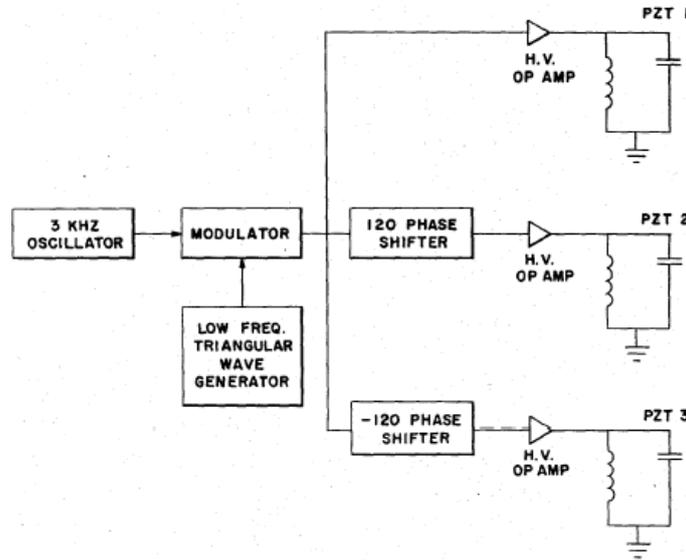


Figura 4.2: Schema logico del traslatore-tilter piezoelettrico

4.3 Riduzione nei laser projection system

Nei sistemi di proiezione laser, come ad esempio i sistemi televisivi laser, un fascio parallelo e coerente scansiona uno schermo per costruire l'immagine pixel per pixel. L'osservatore sarà disturbato da un fastidioso speckle pattern, che compromette la qualità dell'immagine drasticamente. Questo problema non è stato risolto, e questo è uno dei motivi per il quale i sistemi TV laser non sono ancora sviluppati con successo ¹. Nei sistemi di proiezione con scansione laser, l'osservatore si trova nel far field del pixel individuale sullo schermo. Qui, a causa della necessaria estrema collimazione del fascio laser, è molto complicato variare le proprietà di coerenza spaziale e temporale della sorgente per ridurre lo speckle senza una massiccia perdita di energia e una perdita di qualità del fascio. Nel metodo di riduzione proposto, l'osservatore farà scivolare "fuori" lo speckle dai suoi occhi attraverso la media temporale di una sequenza veloce di speckle pattern modulati in fase. Il contrasto residuo è in percentuale molto basso e non è più riconoscibile dall'osservatore. ([7]) Nei sistemi di proiezione laser lo speckle è causato principalmente dalla superficie ruvida del piano immagine.

Se, come in figura, l'occhio dell'osservatore è a una distanza breve dal pixel proiettato sullo schermo, il diametro del singolo speckle è tipicamente piccolo, ed è sufficiente introdurre un piccolo cambiamento di fase oltre il fascio luminoso proiettato, attraverso una modulazione spaziale della luce per muovere lo speckle casualmente su una distanza comparabile con il suo diametro. Se questa modulazione di fase è più veloce

¹Implementare il laser su un TV significa ridurre notevolmente i consumi, gli ingombri, avere una maggiore durata della vita del televisore e non andare incontro a nessuna perdita di qualità nel corso degli anni, tuttavia un solo modello è stato prodotto fin'ora da Mitsubishi ed è entrato da poco nel mercato americano

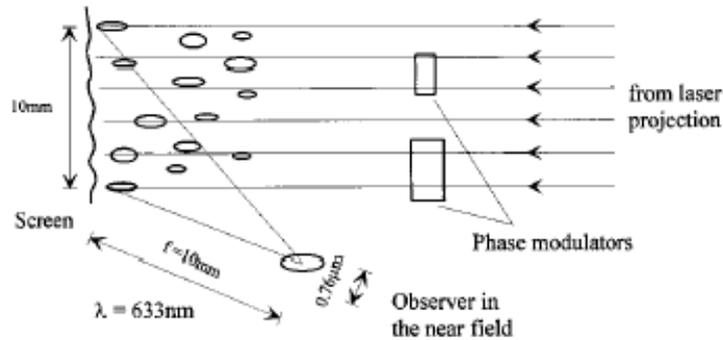


Figura 4.3: Osservatore situato nel near field.

del tempo di integrazione dell'occhio, lo speckle non è più visibile. Un altro metodo per ridurre lo speckle è ridurre la lunghezza di coerenza della sorgente laser. Se la lunghezza della coerenza della sorgente è più corta della differenza di cammino ottico tra la luce diffusa dal lato superiore e inferiore del pixel illuminato, il contrasto speckle viene ridotto. Per il near field, questo risultato può essere raggiunto con l'utilizzo di un laser a pulsazione di picosecondo².

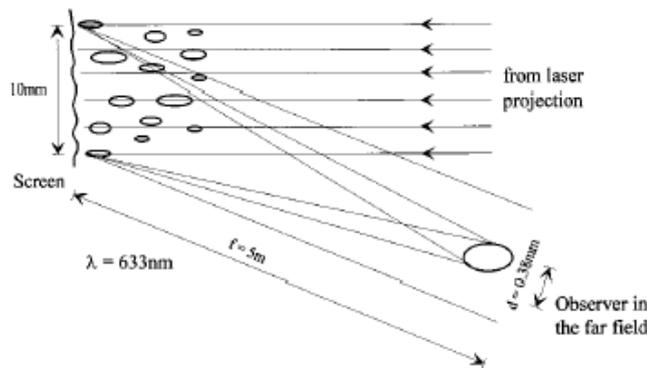


Figura 4.4: Osservatore situato nel far field.

Se l'osservatore è situato nel far field del pixel sullo schermo, la situazione cambia drasticamente. Ovviamente, la dimensione media dello speckle appare più larga all'occhio dell'osservatore. Un cambiamento nella distribuzione di fase del fascio laser proiettato non elimina più completamente lo speckle. Nei metodi più comuni di riduzione, molti speckle pattern vengono sovrapposti quando l'oggetto è illuminato. Una misura del contrasto risultante nel campo speckle residuo è una funzione di densità di probabilità. Per i proiettori TV a scansione laser questi metodi non sono abbastanza

²Con diverse tecniche è possibile costruire laser che emettano pacchetti di onde estremamente stretti nel dominio del tempo, attualmente si è giunti allo sviluppo di impulsi dell'ordine del femtosecondo. Questi laser hanno trovato impieghi in diversi ambiti di ricerca, hanno per esempio permesso la nascita di una nuova disciplina, che è stata chiamata femtochimica

efficienti. Inoltre, l'idea di usare una sorgente laser con una lunghezza di coerenza più piccola può essere molto più problematica nel caso del far field. Già a una distanza di pochi metri la differenza di cammino ottico tra i lati superiori e inferiori dei pixel sarà inferiore a una decina di micrometri. E' stato dimostrato che un laser a picosecondo riduce lo speckle nel far field, ma non del fattore necessario. Muovere lo schermo di proiezione con un qualche tipo di vibrazione porta a un movimento dello speckle pattern, ma un'idea di questo tipo non è praticabile. L'idea generale di questo metodo è quindi produrre uno speckle pattern in movimento variando nel tempo lo speckle prodotto dal pixel illuminato sullo schermo di proiezione. In questo nuovo metodo, lo speckle pattern è prodotto introducendo una modulazione di fase e ampiezza sul diametro del raggio di scansione non in fuoco. Sullo schermo, queste modulazioni sono introdotte utilizzando un elemento ottico diffrattivo (DOE). Questo elemento divide il fascio in un numero di fasci elementari con una distribuzione di fase casuale e un diametro più piccolo del fascio originario. I fasci elementari che arrivano dal DOE sono parzialmente focalizzati sullo schermo.

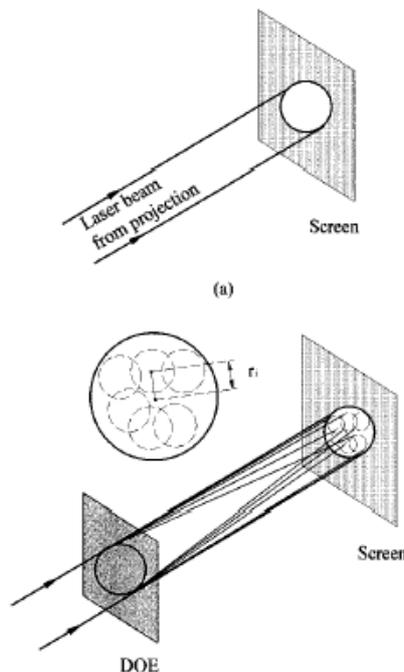


Figura 4.5: Utilizzo di un elemento ottico diffrattivo

Ci sono diverse tecniche iterative che si possono utilizzare per avere la struttura del DOE necessaria ad ottenere la distribuzione di ampiezza desiderata sullo schermo di proiezione. Nello studio di Lingli Wang, Theo Tschudi, Thorsteinn Halldórsson, e Pálmi R. Pétursson, "Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements", viene usato un algoritmo iterativo di trasformate di Fourier, basato sull'algoritmo di Gerchberg-Saxton ([11]), per ottenere la struttura DOE desiderata. Si usano i seguenti effetti:

1. Il fascio elementare illumina diverse aree in un pixel sullo schermo. Ad esempio, con N fasci elementari si ottengono N sovrapposizioni di speckle nell'occhio dell'osservatore
2. Si muovono gli N speckle pattern rotando il DOE o scansionando gli N fasci elementari sullo schermo. A causa dell'asperità della superficie, il movimento di queste aree sullo schermo produce uno speckle pattern che arriva all'occhio dell'osservatore mediato.

Il tempo minimo di rotazione del DOE é dato dal tempo di risposta dell'occhio. Nella modalità di scansione, la velocità dei pixel scansionati sullo schermo é alta abbastanza da eliminare il contrasto speckle.

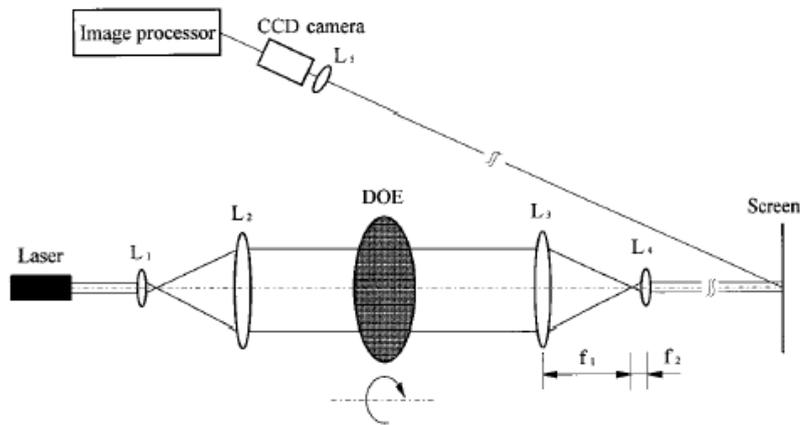


Figura 4.6: Schema di utilizzo di un DOE in rotazione

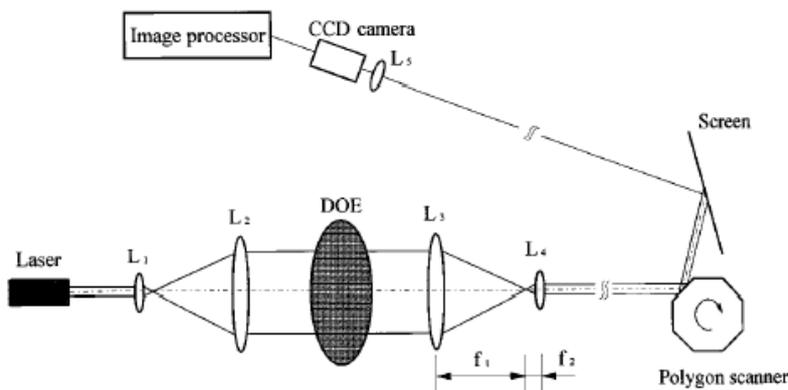


Figura 4.7: Scansione degli N fasci elementari con DOE non in movimento

Per i primi esperimenti, si usa un DOE che divide il fascio in 4, 16, 36, 64 e 144 fasci elementari con distribuzione di fase casuale e intensità uguale. Questi fasci

elementari vengono messi a fuoco dal sistema di immagine sullo schermo. Si trova sperimentalmente che con 16 raggi elementari la riduzione dello speckle risultante è ottimale e così pure il profilo di intensità dei pixel. Lo schermo di proiezione utilizzato può essere semplice carta bianca. Con questo metodo, il contrasto è ridotto a un valore molto più piccolo di quanto l'occhio dell'osservatore possa percepire.

4.4 Riduzione tramite la variazione dei parametri della luce

Lo speckle dipende essenzialmente dai tre parametri della luce: angolo, polarizzazione e lunghezza d'onda del fascio illuminante. Detto ciò, configurazioni speckle indipendenti possono essere generate attraverso la variazione di questi parametri. ([6]) Si considererà in seguito come R il fattore di riduzione del contrasto speckle.

4.4.1 Variazione dell' angolo

Chiamiamo Ω_{proj} e Ω_{det} gli angoli solidi sottesi dal sistema di proiezione e dal detector sullo schermo rispettivamente. Assumendo $\Omega_{proj} > \Omega_{det}$, l'ottica di proiezione è in grado di illuminare ognuna delle $N = \Omega_{proj} / \Omega_{det}$ aree incorrelate con un singolo punto di risoluzione sullo schermo. In linea di principio, l'ottica di proiezione può essere usata per illuminare le N aree di sub-risoluzione nel luogo di risoluzione del detector, all'interno del tempo di integrazione del detector (~ 50 ms per l'occhio umano), vale a dire entro la risoluzione spaziale e temporale del detector. Il contrasto speckle sarà ridotto di un fattore

$$R_{\Omega} = \sqrt{\frac{\Omega_{proj}}{\Omega_{det}}} \quad (4.4.1)$$

Un approccio comune che porta a questi risultati è utilizzare un diffusore temporale (v. 4.4.4, Diffusore ottimo).

4.4.2 Variazione di polarizzazione

Un raggio laser polarizzato incidente su una superficie depolarizzante presenterà depolarizzazione a causa dello scattering multiplo. Molti schermi commerciali con guadagno unitario (o anche un foglio di carta per fotocopiatrici) sono buone superfici depolarizzanti. Il pattern speckle risultante può sempre essere scomposto in due stati di polarizzazione ortogonali, indicati con σ_1 e σ_2 . I due speckle pattern ortogonalmente polarizzati sono indipendenti e automaticamente si avrà una riduzione di $\sqrt{2}$. Un'ulteriore ispezione però, rivela che gli speckle σ_i generati dalle sorgenti luminose σ_j ($i, j = 1, 2$) sono tutti incorrelati. Se gli speckle σ_1 , come pure gli speckle σ_2 sono incoerenti (come ad esempio accade se prodotti a partire da due laser diversi, o da

un singolo laser con un ritardo di cammino ottico che è più lungo della lunghezza di coerenza del laser), i quattro pattern speckle risultanti diventano indipendenti. Una completa variazione di polarizzazione quindi darà $R_\sigma = 2$, invece di $\sqrt{2}$.

4.4.3 Variazione di lunghezza d'onda

Come tutti i fenomeni di interferenza, un pattern speckle dipende dalla lunghezza d'onda della luce. Gli speckle pattern prodotti da due fasci con diverse lunghezze d'onda diventano incorrelati se la media relativa dello sfasamento creato dalla superficie è di circa 2π o più. Se la variazione dell'altezza del profilo della superficie è y , allora la differenza di lunghezza d'onda necessaria è $\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2y}$. Si verificano diverse situazioni:

1. Si utilizzano laser multipli, ciascuno con una lunghezza d'onda diversa di almeno $\delta\lambda$ dagli altri. Se ci sono $N\lambda$ laser (con colori percepiti indistinguibili) che soddisfano questa condizione, il fattore di riduzione è semplicemente $R_\lambda = \sqrt{N}$.
2. Si utilizza un laser a banda larga ($> 10nm$). Se la larghezza spettrale è $\Delta\lambda$, allora il fattore di riduzione è $R_\lambda = \sqrt{\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}}$
3. Si utilizza un laser a impulsi. La riduzione è espressa come $R_\lambda = \sqrt{\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}}$, dove $\Delta\lambda = \lambda^2/c\Delta\tau$, c è la velocità della luce e $\Delta\tau$ è l'ampiezza della pulsazione.

Le variazioni angolari di polarizzazione e di lunghezza d'onda sono indipendenti, pertanto, assumendo di usare uno schermo depolarizzante, la riduzione di speckle massima risulta essere :

$$R = R_\Omega R_\sigma R_\lambda = 2R_\lambda \sqrt{\frac{\Omega_{proj}}{\Omega_{det}}} \quad (4.4.2)$$

Per un laser singolo narrowband, non c'è variazione di lunghezza d'onda e $R_\lambda = 1$.

4.4.4 Diffusore Ottimo

Un approccio comune per ottenere la riduzione grazie alla variazione dell'angolo è l'uso di un diffusore tempo-variante. L'ampiezza dell'immagine viene sovrapposta con il pattern di fase del diffusore, normalmente posizionato in un piano immagine intermedio. Dal momento che il rivelatore square-law è sensibile solo all'intensità, tale modulazione di fase spaziale non influenzerà l'immagine rilevata, a condizione che il fascio non riempi troppo il diaframma di proiezione ottica. Il ruolo del diffusore è di partizionare ogni punto di risoluzione del detector in N celle più piccole, e di assegnare una fase ϕ_i , $i = 1, 2, \dots, N$ per ogni cella. Variare nel tempo il pattern di fase effettivamente distruggerà la coerenza spaziale tra le celle in fase, riducendo quindi il contrasto speckle. Si partiziona il campo di risoluzione di un quadrato (per

semplicità matematica) in $N=M \times M$ celle uguali con $M = \sqrt{\frac{\Omega_{proj}}{\Omega_{det}}}$. Senza il diffusore, tutti gli ϕ_i sono uguali a zero. Se il campo ottico rilevato dalla cella ij sullo schermo é E_{ij} , l'intensità dello speckle del punto di risoluzione é:

$$S_O = \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M E_{ij} \right|^2 \quad (4.4.3)$$

I campi vengono sommati su una base di ampiezza e di conseguenza, non risulta riduzione dello speckle. Supponiamo che un diffusore tracci $N = M \times M$ celle con la fase relativa ϕ_{ai} in ogni punto di risoluzione si sovrappone con l'immagine originale. Supponiamo inoltre che A diversi pattern in sequenza si presentino con uguale durata nel corso del tempo di integrazione del rivelatore, allora l'intensità dello speckle diventa:

$$S = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H_{ij}^a E_{ij} \right|^2 \quad (4.4.4)$$

con

$$H_{ij}^a = \exp^{i\phi_{ij}^a} \quad (4.4.5)$$

Se la somma degli H_{ij}^a su tutti i pattern di fase A soddisfa le condizioni di incorrelazione,

$$\sum_{a=1}^A H_{ij}^{a*} H_{kl}^a = A \delta_{ik} \delta_{jl} \quad (4.4.6)$$

Allora risulta

$$S = \frac{1}{A} \sum_i \sum_j |E_{ij}|^2 \quad (4.4.7)$$

Ovvero la media fa scomparire i termini intermedi, e le M^2 celle incorrelate l'una dall'altra e i loro contributi diventano indipendenti. Se, a questo punto, i campi vengono sommati su una base di intensità anziché di ampiezza, il contrasto speckle é ridotto di un fattore $R_\Omega = M$. Questa riduzione é massima per il caso $M \times M$, in quanto il limite superiore che può essere generato da questo tipo di distribuzione indipendente é M^2 . Il numero di pattern di fase necessari per ottenere M^2 speckles indipendenti non può essere inferiore a $A_{min} = M^2$. Per esempio, il tradizionale diffusore random necessita di un numero molto grande di pattern di fase (idealmente infinito) per raggiungere la riduzione xM . Se la riduzione massima é raggiunta con il minimo numero di pattern di fase, allora la riduzione é ottima. L'insieme di pattern di fase che verificano la condizione di incorrelazione ottima,

$$\sum_{a=1}^M H_{ij}^{a*} H_{kl}^a = M^2 \delta_{ik} \delta_{jl} \quad (4.4.8)$$

é considerata la famiglia di incorrelazione ottima. A priori, non é detto che una tale categoria esista, ma é stato individuato un insieme di matrici di Hadamard che soddisfano le condizioni sopra indicate.

4.5 Riduzione tramite l' utilizzo di matrici di Hadamard

Si é dimostrato che una famiglia di pattern di fase binari, derivata dalle righe e colonne di una matrice di Hadamard, può essere usata per ottenere un'equazione del tipo 4.4.8. I pattern di fase binari hanno il vantaggio di avere un'implementazione hardware molto semplice.

Una matrice di Hadamard di ordine M , che si denota come $H(M)$, é una matrice $M \times M$ con ingressi ± 1 che soddisfa:

$$H^T(M) * H(M) = M * I(M) \quad (4.5.1)$$

Dove $I(M)$ é la matrice identità $M \times M$. La matrice di Hadamard esiste per $M = 2^n$, con n intero, come anche per $M = 4n$ con n intero. Le matrici di Hadamard hanno le seguenti proprietà:

1. Le colonne e le righe sono ortogonali a due a due
2. La permutazione di righe e colonne preserva l'esattezza dell'eq 4.4.8
3. Cambiare il segno di una riga o di una colonna preserva l'esattezza dell'eq 4.4.8

Per $M = 2^n$, la matrice di Hadamard può essere ottenuta iterativamente sulla base della costruzione di Sylvester :

$$H(1) = 1 \quad (4.5.2)$$

$$H(2M) = \begin{pmatrix} H(M) & H(M) \\ H(M) & -H(M) \end{pmatrix} \quad (4.5.3)$$

Si considera h^a un pattern di fase $N_1 * N_2$ e H una matrice di Hadamard di ordine $M = N_1 * N_2$. Si considera la mappa associata che all'elemento ab -esimo di H , con $b = (i - 1)N_2 + j$ fa corrispondere l'elemento ij -esimo di h^a secondo la legge:

$$h_{ij}^a = H_{a,(i-1)N_2+j} \quad (4.5.4)$$

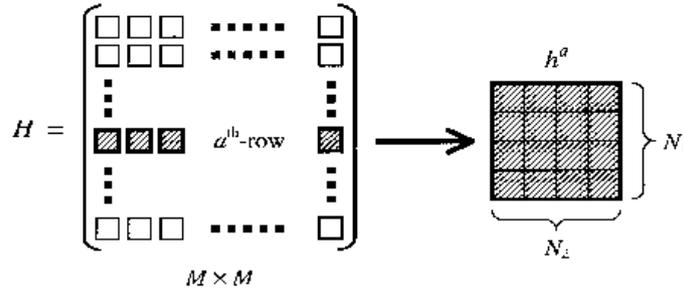


Figura 4.8: Matrici di Hadamard e relativo mapping

Il mapping delle colonne viene effettuato nello stesso modo. Le entrate +1 e -1 della matrice di Hadamard corrispondono alle celle $exp(i0) = +1$ e $exp(i\pi) = -1$ del pattern di fase. Utilizzando la proprietà di ortogonalità delle colonne,

$$\sum_a H_{ab}H_{ac} = M\delta_{bc} \tag{4.5.5}$$

e sfruttando il fatto che $(k - 1)N_2 + l = c = b$ se e solo se $k = i$ e $l = j$, ne segue che:

$$\sum_{a=1}^M h_{ij}^a h_{kl}^a = \sum_{a=1}^M H_{a,(i-1)N_2+j} H_{a,(k-1)N_2+l} = M\delta_{ik}\delta_{jl} \tag{4.5.6}$$

che prova il fatto che il set di pattern reali di fase $h_a, a = 1, 2, \dots, M$ soddisfano le condizioni di riduzione massima dello speckle. Il risultato non é unico, in quanto le proprietà (2) e (3) delle matrici di Hadamard possono essere sfruttate per creare diverse rappresentazioni. Questa libertà può essere spiegata in pratica per creare altri set di pattern di fase con criteri aggiuntivi (simmetria, specifica distribuzione della luce, ecc). Per illustrare i risultati fin'ora ottenuti, si considera il caso $N_1 = N_2 = 4$. La matrice risultante $H(16)$ é rappresentata in figura sottoforma di "batik pattern", in cui una cella bianca rappresenta un +1 e una cella nera un -1.



Figura 4.9: Batik pattern

Applicando le equazioni di mapping, si ottiene un pattern di fase 4x4 (figura a). Cambiando il segno alla sesta colonna della matrice H(16) si ottiene un altro pattern di fase 4x4 diverso dal precedente (figura b).

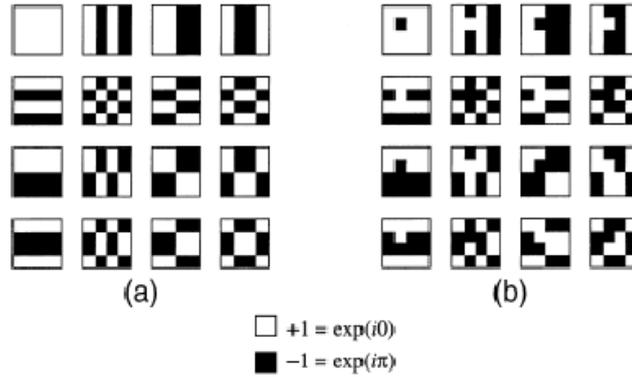


Figura 4.10: Batik pattern risultanti dalla stessa matrice con mapping diversi

La riduzione dello speckle attraverso matrici di Hadamard é stata testata nei display di proiezione laser GLV (Grating Light Valve), di cui parleremo in seguito. [3]

4.6 Trasmissive Laser Speckle Reducer LSR

A livello microscopico, il rapporto speckle dipende:

1. Dalla lunghezza d'onda della luce laser
2. Dallo stato di polarizzazione della luce laser

Questi due parametri contribuiscono, assieme alla qualità della superficie illuminata, al processo di creazione dello speckle. Determinati lunghezza d'onda e stato di polarizzazione, migliore é la qualità della superficie illuminata, più piccolo risulta il contrasto speckle. Alternativamente, per una superficie di qualità prefissata, più grande é la lunghezza d'onda più basso é il contrasto speckle.

A livello macroscopico, il rapporto speckle dipende:

1. Dall'angolo di diffusione dell'LSR
2. Dall'apertura numerica del sistema di rilevazione.

Per un sistema ottico di riferimento, il fattore di riduzione può essere descritto come il rapporto tra contrasto speckle senza LSR (S) e contrasto speckle con LSR S_{LRS} :

$$R_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{S_{LRS}} \tag{4.6.1}$$

Ad esempio, una riduzione del rapporto speckle 0,5-0,2 fornisce un fattore di riduzione di 4 dB.

Il sistema di riduzione LSR si basa su un processo dinamico ³. Muovendo il pattern speckle a una frequenza e con un'ampiezza sufficientemente alte, il sistema di riferimento integra il pattern come una distribuzione uniforme della luce. Il sistema principale si basa su un diffusore in movimento che é legato a una membrana di polimeri elettro-attivi che include due elettrodi nel piano x-y. Se viene applicata una tensione all'elettrodo x, viene generato una campo elettrico che provoca un movimento del diffusore centrale in una direzione x, perpendicolare al campo elettrico. Se viene applicata una tensione all'elettrodo y, il diffusore viene mosso nella direzione y. Viene applicata alternativamente la tensione agli elettrodi x e y, con una differenza di fase di $\frac{\pi}{2}$. La frequenza di movimento é ottimale quando si raggiunge la frequenza di risonanza del sistema, e questo comporta la riduzione speckle più alta. ([8])

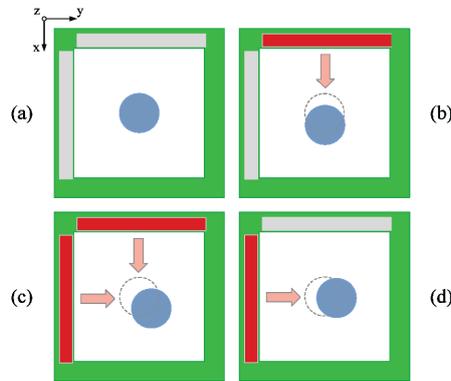


Figura 4.11: Movimenti relativi alle variazioni di tensione in x e in y

La luce laser ($P=5\text{mW}$, $\lambda=650\text{nm}$, linearmente polarizzata) viene espansa ad un fascio collimato di diametro di 4mm tramite una combinazione di lenti che formano un espansore di fascio. Un polarizzatore lineare viene posizionato in ingresso all'espansore di fascio per controllare la potenza del laser e per "pulire" lo stato di polarizzazione. Allo stesso modo, un'apertura é posizionata in uscita all'espansore di fascio per controllare con precisione la dimensione del raggio di illuminazione e ridurre al minimo la luce diffusa che entra nel blocco di rilevazione, che é posizionato alla fine del banco. Il LSR é posizionato nel fascio collimato dopo l'apertura, e un'immagine dell'output dell'LSR é prodotta dalla videocamera. Per avere una riduzione speckle efficiente, é necessario:

1. Posizionare l'LSR perpendicolarmente all'asse ottico
2. Illuminare l'LSR con un fascio collimato

³Sistema prodotto da Optotune, <http://www.optotune.com>

- Far corrispondere la dimensione del fascio entrante nel LSR e con la sua apertura (diametro maggiore di 4mm)

Viene di seguito rappresentato il profilo di intensità senza LRS (immagine a sinistra) e con LRS (immagine a destra) per diverse configurazioni di apertura e angolo di diffusione del dispositivo.

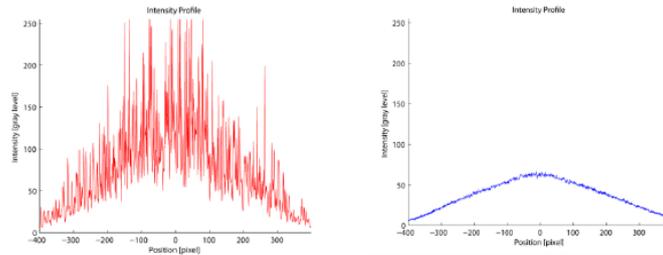


Figura 4.12: Risultati del LRS serie 3005-20, apertura 5mm, angolo di diffusione di 20°, efficienza di riduzione R=15dB

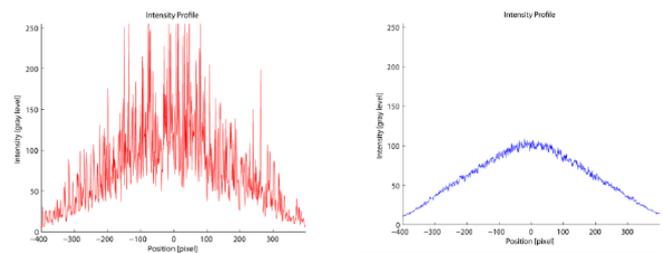


Figura 4.13: Risultati del LRS serie 3005-10, apertura 5mm, angolo di diffusione di 10°, efficienza di riduzione R=12dB

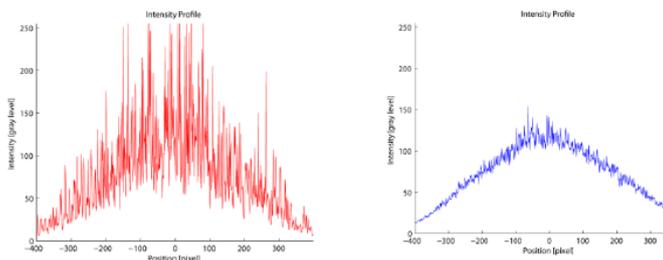


Figura 4.14: Risultati del LRS serie 3005-1, apertura 5mm, angolo di diffusione di 1°, efficienza di riduzione R=6dB

Capitolo 5

Applicazioni legate allo Speckle Noise

5.1 Interferometria Speckle

Lo speckle di una superficie illuminata con luce laser, poiché è un pattern di interferenza legato alla struttura della superficie, può essere sfruttato per fare analisi per quanto riguarda gli spostamenti o le deformazioni (comunque sempre confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione laser) della superficie. Per far ciò si sfrutta la sovrapposizione di due campi speckle prodotti dalla superficie, uno preso come riferimento e l'altro preso come campo oggetto, andando a vedere quanto sono tra loro correlati.

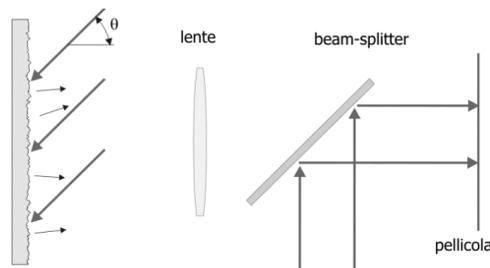


Figura 5.1: Interferometro speckle

La loro sovrapposizione risulta essere ancora un campo speckle, differente dai due campi componenti, ma statisticamente con le stesse caratteristiche di brillantezza e dimensione. Il più semplice interferometro speckle può essere schematizzato come un interferometro a divisione di ampiezza (tipo interferometro di Michelson ¹) dove

¹ Una figura d'interferenza è ottenuta suddividendo, indirizzando su percorsi diversi, e facendo convergere nuovamente un fascio di fotoni. I due percorsi devono avere lunghezze differenti, o avvenire in materiali diversi, in modo che sia notevole uno sfasamento nel cammino ottico dei due fasci suddivisi

uno specchio é stato sostituito dalla superficie da studiare (fascio oggetto). Se i due specchi sono fermi sullo schermo si osserva il campo speckle risultante, viceversa se lo specchio oggetto si muove si ha una sovrapposizione non più coerente (punto per punto le fasi delle due onde variano casualmente) e il contrasto dello speckle si riduce notevolmente. Un tale dispositivo permette di osservare per esempio le vibrazioni della superficie. In particolare mentre i nodi della vibrazione continuano ad apparire come un campo speckle ben contrastato, nelle altre zone questo contrasto diminuisce sensibilmente.

5.1.1 E.S.P.I

E.S.P.I é l'acronimo di Electronic Speckle Pattern Interferometry, una tecnica interferometrica particolarmente adatta ad applicazioni in ambiente industriale, in quanto non richiede necessariamente banchi antivibranti .

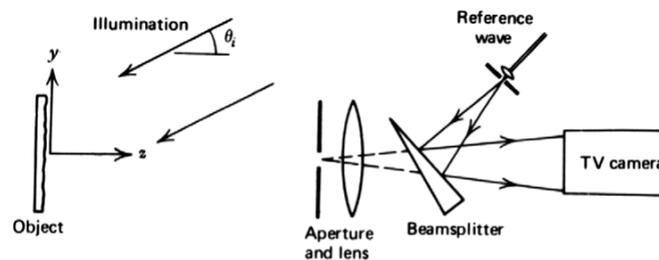


Figura 5.2: Schema di principio E.S.P.I.

L'immagine dell'oggetto in esame (fascio oggetto) illuminato con luce laser, viene raccolta mediante una telecamera sul cui CCD ² viene inviato anche un fascio di riferimento, ottenuto per divisione di ampiezza assieme al fascio oggetto, e osservato su un monitor TV. Il segnale dalla telecamera può passare ad una unità elettronica che memorizza l'immagine e la digitalizza. Questa operazione può essere fatta ripetutamente con la frequenza propria del tempo di formazione dell'immagine (generalmente 1/25 di sec). Se il sistema in esame evolve nel tempo, per esempio si deforma o vibra, con variazioni sempre paragonabili alle lunghezze d'onda, le immagini successive sono leggermente differenti. Se si memorizza un'immagine digitalizzata come immagine di riferimento (in realtà é diventata una matrice di numeri legati ai toni di grigio dell'immagine) e la si confronta (per esempio per differenza) con le immagini successive, si ottiene una interferenza elettronica tra le immagini. Quello che si osserva sul monitor sarà una immagine dell'oggetto con sovrapposto un apparente pattern di frange in corrispondenza di variazioni di cammino ottico tale da determinare uno sfasamento di $\frac{\pi}{2}$ nella fase del pattern speckle in quel punto.

²circuito integrato formato da una riga, o da una griglia, di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce

5.2 Monitoraggio del flusso sanguigno

La maggior parte delle tecniche ottiche per il monitoraggio del flusso sanguigno si basano su effetto Doppler o sulla distribuzione statistica dello Speckle laser. ([9]) A questo scopo, è stata inventata una tecnica chiamata single-exposure speckle photography, che consiste nello scattare una foto dell'area illuminata dal laser e usare un tempo di esposizione abbastanza lungo per permettere allo speckle con fluttuazione più veloce di scomparire.

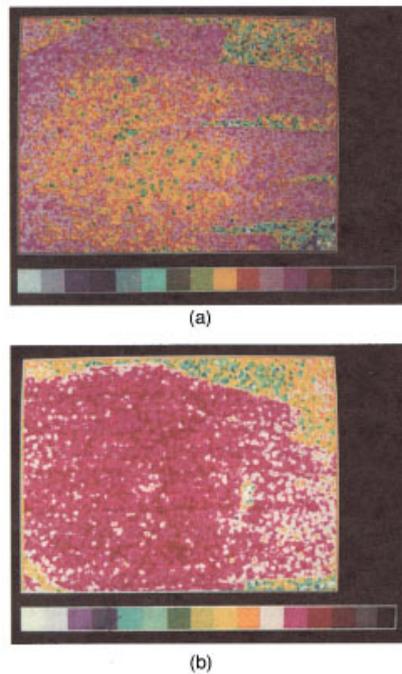


Figura 5.3: Immagini LASCA che mostrano l'effetto della temperatura su una mano, (a) dopo l'immersione in acqua fredda e (b) dopo immersione in acqua calda.

Questa tecnica è stata sviluppata per misurare il flusso sanguigno della retina, ma è subito risultato un serio svantaggio: il processo implica due step e quindi non può essere effettuato in tempo reale. Il film doveva essere prima trattato chimicamente, e in seguito il negativo risultante doveva essere trasformato tramite filtraggio spaziale. Trattandosi di una tecnica clinica, che quindi necessita di essere sviluppata in tempo reale, è stato eliminato lo stage della fotografia per sviluppare una tecnica digitale. Il primo tentativo comportò la lavorazione digitale delle fotografie, ma era ancora necessario applicare filtri. Una tecnica completamente digitale utilizza una macchina fotografica CCD e software in grado di calcolare il contrasto locale e convertirlo in una mappa di falso-colore del contrasto. Questa tecnica è stata chiamata LASCA (laser speckle contrast analysis).

5.3 Holographic laser projection technology

I proiettori di immagini convenzionali sono ampiamente utilizzati nei cinema e nelle case. Tuttavia, presentano forti limitazioni tecniche che ne impediscono la diffusione nel campo dell'elettronica di consumo (CE) e nel campo dell'automazione. La necessità di proiettori piccoli e efficienti dal punto di vista della potenza nel campo della CE é ampiamente dimostrata dall'avvento della mobile TV. E' chiaro che i contenuti ad alta definizione disponibili sono incompatibili con lo schermo di un telefono cellulare (2,5 pollici circa), il cui display non é adatto a condividere contenuti tra più spettatori. In aggiunta, il settore dell'automazione ha cominciato a richiedere sistemi di proiezione in miniatura. Come risultato, sono in sviluppo un gran numero di microproiettori LED-based (o laser-based), per soddisfare le richieste di dimensioni fisiche piccole, bassi costi, basso consumo di potenza, e implementazione robusta. In aggiunta, per motivi di commercializzazione, é necessario soddisfare altre richieste :

1. Alta risoluzione
2. Alta brillantezza
3. Basso speckle
4. Sicurezza visiva
5. Larga profondità di fuoco e angolo di proiezione piatto.

5.3.1 La tecnologia LBO

Light Blue Optics (LBO) sta sviluppando dal 2004 una tecnica di proiezione olografica laser che, a differenza della tecnologia di immagini scanned-beam, ha l'abilità di soddisfare tutte le richieste citate finora. La tecnologia LBO rappresenta un approccio rivoluzionario alla proiezione e visualizzazione dell'informazione. A differenza delle altre tecnologie di proiezione disponibili, questo meccanismo di proiezione sfrutta il processo della diffrazione bidimensionale per creare immagini video. Un tipico sistema di proiezione di immagini lavora mostrando un'immagine desiderata F_{xy} su un micro display, che é solitamente illuminato sequenzialmente da luce rossa, verde e blu per formare il colore. In questo caso, il micro display blocca selettivamente la luce incidente. Dopo il passaggio attraverso ottica di ingrandimento compare l'immagine proiettata F_{xy} . Al contrario, i proiettori olografici laser formano l'immagine F_{xy} illuminando un pattern di diffrazione (o olografico) h_{uv} con luce laser con lunghezza d'onda pari a λ . Se il pattern olografico é rappresentato da un elemento di un display con dimensione di pixel pari a Δ , allora l'immagine F_{xy} formata nel piano focale della lente é relazionata al pattern olografico h_{uv} dalla trasformata discreta di Fourier $\mathcal{F}[*]$:

$$F_{xy} = \mathcal{F}[h_{uv}] \quad (5.3.1)$$

L'obiettivo principale di un sistema di proiezione olografico é di computare l'ologramma h_{uv} . Un primo metodo é calcolare la trasformata di Fourier inversa dell'immagine F_{xy} . Tuttavia, ciò non é ragionevole in quanto il risultato di questo calcolo sarebbe complesso e non esiste materiale a cristalli liquidi (LC) in grado di modulare continuamente ed indipendentemente sia l'ampiezza A_{uv} che la fase ϕ_{uv} , che rendono valida la relazione $h_{uv} = A_{uv} \exp^{j\phi_{uv}}$. Anche se materiali di questo tipo si sono resi disponibili, il risultato contiene componenti di ampiezza che assorbono la luce incidente e riducono l'efficienza del sistema. Un approccio più efficace é limitare l'ologramma h_{uv} a un set di valori di fase ϕ_{uv} tali che $h_{uv} = \exp^{j\phi_{uv}}$. Come risultato, quando il pattern olografico é visualizzato su un microdisplay modulato in fase e seguitamente illuminato, la luce non viene bloccata. Il sistema LBO utilizza un prodotto di consumo a cristalli liquidi ferroelettrici su silicio (LcoS) prodotto da Displaytech, Inc. per visualizzare il pattern olografico, che richiede che la fase dell'ologramma ϕ_{uv} sia quantizzata a un set di valori binari. Questa procedura introduce inevitabilmente errori di quantizzazione nell'immagine risultante F_{xy} , che devono essere mitigati al fine di mantenere un'immagine di alta qualità. Il microdisplay é utilizzato per visualizzare N ologrammi indipendenti per video frame all'interno di una larghezza di banda temporale dell'occhio di 40msec, ognuna delle quali produce un subframe F_{xy} che presenta rumore di quantizzazione statisticamente indipendente. Se l'intensità della i-sima immagine visualizzata é $I = |F_{xy}|^2$, allora la media temporale percepita su N subframes é

$$V_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_{xy}^i|^2 \quad (5.3.2)$$

che risulta essere noise-free. La chiave di questa tecnologia olografica di proiezione laser non é nel design ottico ma nell'algoritmo usato per calcolare la fase dell'ologramma h_{uv} dall'immagine desiderata F_{xy} . LBO ha sviluppato e brevettato algoritmi per il calcolo della serie di N ologrammi per video frame, in modo efficiente e reale. Questo sistema di proiezione é di semplice realizzazione.

L'immagine desiderata é convertita in un set di ologrammi e visualizzata su un microdisplay a modulazione di fase che é sequenzialmente illuminato da luce laser rossa, verde e blu rispettivamente. Il pattern di diffrazione passa attraverso una coppia di lenti L1 e L2, scelte per fornire un angolo ultrapiatto al di sopra dei 100°. Come risultato del microdisplay la luce incidente é guidata nei pixel desiderati dell'immagine -senza blocchi- e a causa dell'ottica di Fourier, l'immagine resta in fuoco a tutte le distanze dalla lente L2 ([4]).

5.3.2 Vantaggi

1. Basso Contrasto Speckle: uno dei più grandi vantaggi della tecnologia LBO é l'abilità di ridurre sostanzialmente lo speckle laser. Sono state provate diverse soluzioni per ridurre lo speckle, ma solo LBO ha dimostrato la possibilità di

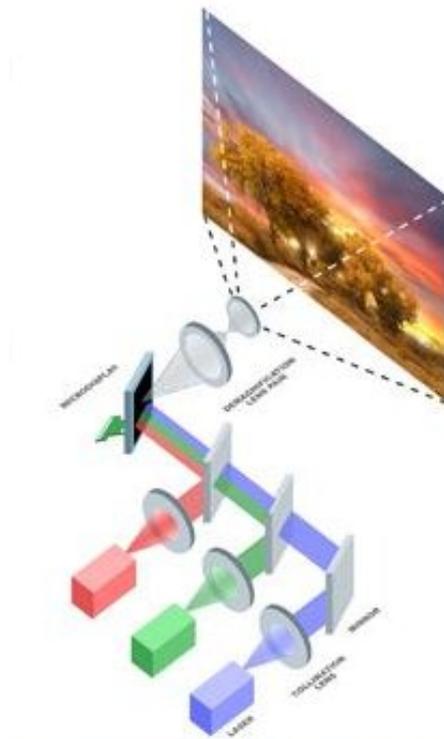


Figura 5.4: Sistema di proiezione LBO

riduzione dello speckle nell'ottica di proiezione per un proiettore laser in miniatura. Tre diversi metodi possono essere combinati nel proiettore LBO al fine di ridurre lo speckle. Poiché N subframe indipendenti in fase per video frame sono mostrati nel periodo in integrazione dell'occhio, allora l'occhio agisce per aggiungere N speckle pattern indipendenti su una base di intensità, e il contrasto delle componenti a bassa frequenza dello speckle si riduce a \sqrt{N} . Molti metodi si sono dimostrati efficaci per la riduzione dello Speckle, ma ognuno di essi richiede di essere eseguito ricorsivamente.

2. Alta brillantezza e efficienza: È stato dimostrato in precedenza che, a causa dell'approccio che implica una modulazione di fase per la formazione dell'immagine, un display olografico può proiettare immagini significativamente più brillanti rispetto ai sistemi di imaging che utilizzano scansioni a fasci (scanned-beam system) per la visualizzazione di video e contenuti fotografici. Inoltre, poiché i pixel dell'immagine sono formati usando un fascio esteso che ha un angolo di proiezione molto ampio, è possibile creare un sistema di proiezione laser più brillante di un display scanned-beam per l'equivalente classificazione di sicurezza laser. La stessa combinazione di laser e ologrammi modulati in fase fornisce un metodo di proiezione a grande efficienza, poiché, a differenza dei sistemi di imaging, la luce non è bloccata dal sistema. Inoltre, la natura a modulazione di

fase del micro- display, permette di non illuminare lo stesso continuamente. I laser vengono modulati in accordo alla luminosità del frame. Quindi, la potenza totale richiesta, é unicamente quella necessaria ad illuminare i pixel in funzione. Anche se la tecnologia LBO é sovraccaricata dal calcolo degli ologrammi, l'efficienza complessiva del sistema é paragonabile a quella dei sistemi scanned-beam. Ciò é dovuto principalmente al fatto che i laser dei sistemi LBO vengono modulati a frequenza bassa.

3. Alta risoluzione, alta qualità dell'immagine e ampia gamma di colori: nei sistemi di imaging é difficile ottenere alte risoluzioni mentre si mantiene un fattore di forma accettabile, poiché effetti diffrattivi, field-breakdown e étendue-matching settano la grandezza dei pixel del micro-display. La risoluzione dei sistemi scanned-beam, d'altro canto, é principalmente limitata alla frequenza di modulazione laser realizzabile. Nei sistemi LBO la risoluzione dell'immagine é indipendente da quella del micro-display ed é controllata principalmente dell'algoritmo di calcolo dell'ologramma. Questo permette alla risoluzione di essere completamente variabile fino ad un massimo di WVGA con soli 7mm x 7mm. Inoltre, il sistema olografico non ha una corrispondenza 1:1 tra i pixel del micro-display e i pixel dell'immagine proiettata, cosa che invece accade nei sistemi di imaging. Infatti, ogni pixel del micro-display contribuisce ad ogni pixel dell'immagine, rendendo il sistema vulnerabile ai difetti del micro-display. E' noto che le tecnologie basate su micro-display hanno la capacità di offrire qualità di immagine più alta rispetto ai sistemi scanned-beam. I sistemi scanned-beam tendono a soffrire di bassa definizione, a causa dell'alto contrasto speckle, di scanning artifacts e di distorsione dell'immagine, ciò comporta che questo tipo di tecnologia sia inutilizzabile in sistemi dove sono richieste immagini ad alta qualità. E' noto inoltre che le sorgenti laser possono fornire immagini con gamme di colori particolarmente ampie, grazie alla loro stretta banda spettrale.

La tecnologia di proiezione olografica LBO rappresenta un approccio rivoluzionario alla proiezione e alla visualizzazione di informazioni, sfruttando il processo fisico di diffrazione a due dimensioni per formare immagini video. Tale approccio simultaneo offre molti vantaggi interessanti rispetto ai concorrenti a LED e ai micro-display laser-based.

Capitolo 6

Riduzione dello Speckle con ottiche adattive

Esperienze pratiche e simulazioni per individuare e diminuire il contrasto speckle.

6.1 Misura del contrasto

Sono state svolte svariate esperienze atte all'individuazione ed eliminazione dello speckle, usando come supporto il software Matlab. Si é svolto un lavoro introduttivo per prendere confidenza con la strumentazione del laboratorio: si acquisivano immagini provenienti da un vetrino (tipicamente frammenti di piante o insetti) e si analizzavano i dati relativi alle varie aberrazioni, per poi graficarli e verificarne l'andamento in base a variazioni del guadagno e del tempo di esposizione dell'obiettivo.

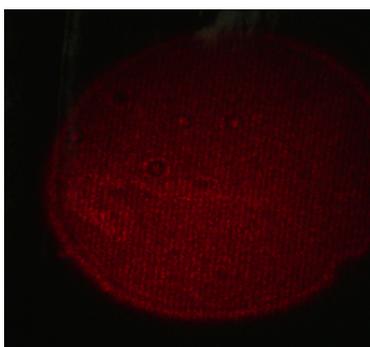


Figura 6.1: Immagine di partenza su cui sono state effettuate le simulazioni

6.1.1 Prove di Filtraggio

Utilizzando la prima immagine acquisita, quella cioè in cui allo specchio era stata applicata la tensione di partenza, sono state fatte delle simulazioni di filtraggio.

La prima tecnica di riduzione del rumore utilizzava la funzione `wiener2`, che applica un filtro passa basso Wiener bidimensionale su un'immagine degradata da rumore generico, basandosi sulla statistica dei pixel adiacenti ad ogni pixel in esame. La funzione `wiener2` stima media e varianza attorno ad ogni pixel :

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n1,n2} a(n1, n2)\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n1,n2} a^2(n1, n2) - \mu^2 \quad (6.1.1)$$

Con $n1$ e $n2$ appartenenti alla matrice $[N \times M]$ dei pixel adiacenti ad ogni pixel dell'immagine in esame. `wiener2` crea quindi un filtro Wiener usando il seguente stimatore:

$$b(n1, n2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(n1, n2) - \mu) \quad (6.1.2)$$

dove v^2 è la varianza del rumore (quando non è data, `wiener2` usa la media di tutte le varianze stimate).

Dopo aver effettuato qualche prova con la prima immagine, è stato creato un programma che processa anche tutte le altre e crea il grafico del contrasto speckle in funzione del passo d'ampiezza, e del relativo indice di riduzione, sempre in funzione del passo d'ampiezza. Anche questi grafici si sono dimostrati poco soddisfacenti, in quanto era prevista una decrescita lineare del contrasto che invece non c'è stata. Le ipotesi per il mancato funzionamento della simulazione possono essere le seguenti:

1. Le immagini considerate sono affette da ulteriori disturbi
2. Il filtro Wiener non è il più adatto per ridurre il contrasto Speckle
3. La variazione del passo d'ampiezza non è utile per ridurre sufficientemente il rumore
4. La variazione del passo d'ampiezza non è stata abbastanza significativa per ridurre il rumore

A fronte di queste ipotesi, il programma è stato modificato per considerare solo una parte delle immagini acquisite, come fatto in precedenza. Purtroppo però anche in questo caso non abbiamo ottenuto buoni risultati

6.1.2 Simulazione del rumore su onda quadra

In seguito, si è simulato il comportamento di segnale periodico corrotto da rumore.

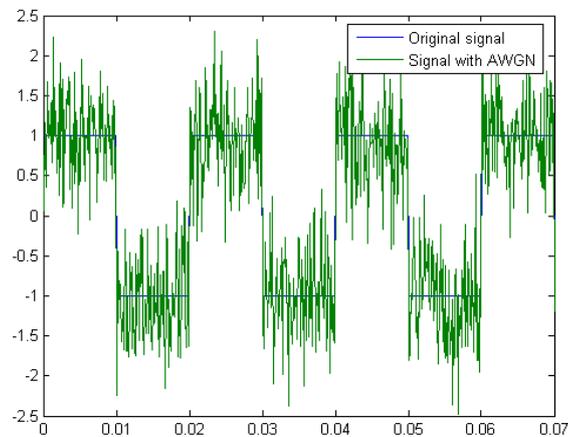


Figura 6.2: Simulazione di rumore su onda quadra

Il primo passo è stato creare un'onda quadra, ed in seguito tramite la funzione matlab `awgn` [sint. `y = awgn(x,snr,'measured')`] si è aggiunto rumore gaussiano bianco alla stessa. Il lavoro successivo consisteva nel quantificare i passi precedenti, ovvero creare il modello matematico per estrarre il rumore dall'onda corrotta.

6.1.3 Simulazione del confronto tra onde quadre con diversi SNR

L'ultima simulazione consiste in una modifica della simulazione precedente :

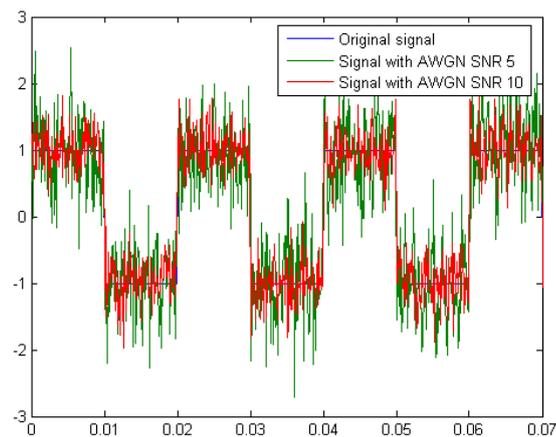


Figura 6.3: Simulazione di rumore e confronto tra due onde quadre

invece di considerare una sola onda, si considerano due onde con diversi rapporti SNR e si ripetono i calcoli effettuati in precedenza, per verificare infine come varia il contrasto speckle nelle due diverse situazioni.

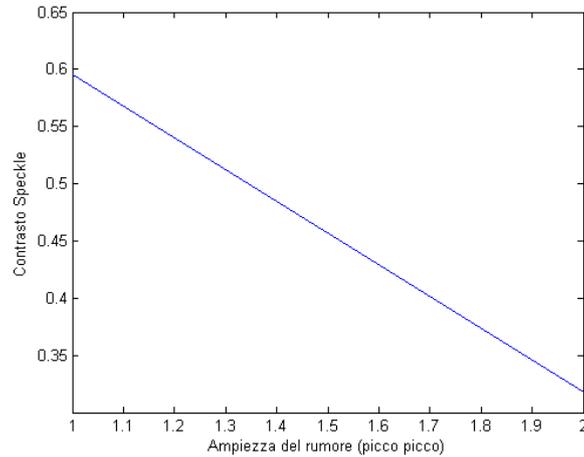


Figura 6.4: Grafico relativo al contrasto in funzione all'ampiezza picco- picco del segnale

Nella situazione esaminata, il grafico del contrasto ha effettivamente la distribuzione richiesta, ovvero decresce in maniera lineare.

6.2 Prove pratiche principali

6.2.1 Riduzione dell'apertura numerica della videocamera

Sulla base delle simulazioni precedenti, sfruttando le competenze acquisite sul calcolo del contrasto e sull'elaborazione di immagini, abbiamo effettuato due esperienze pratiche di riduzione utilizzando ottiche adattive.

Setup sperimentale

Questa esperienza consiste nel verificare il rapporto tra contrasto speckle e variazione dell' f numero della videocamera con cui vengono acquisite le immagini. L'attrezzatura utilizzata é quella rappresentata in figura :

il fascio laser viene fatto passare attraverso uno specchio deformabile e una lente collimatrice, infine viene raccolto da una videocamera, di cui man mano viene fatta variare l'apertura numerica. In questa prima esperienza l'ottica adattiva di fatto non viene utilizzata, ovvero non viene applicata alcuna tensione allo specchio deformabile.

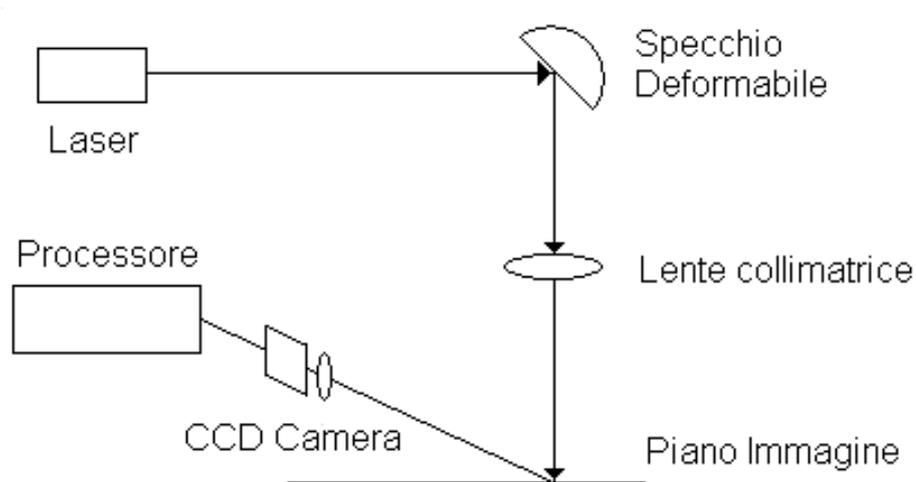


Figura 6.5: Schema relativo all'apparecchiatura utilizzata (exp1)

Descrizione del metodo di misura

Per effettuare le misure richieste, ci siamo attenuti ai seguenti passi:

1. Si acquisiscono 5 immagini: f numero pari a 1.4, 2, 4, 8, 16

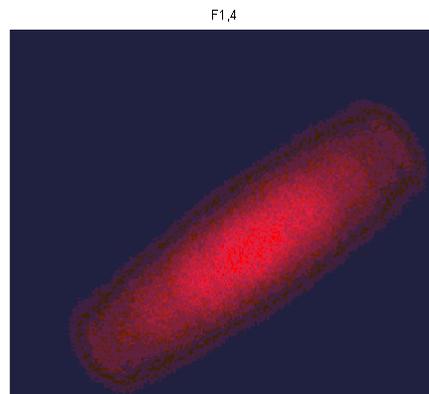


Figura 6.6: Esempio di immagine acquisita

2. Si calcola il contrasto speckle tramite software Matlab e si tracciano i relativi grafici

I grafici del contrasto risultanti non sono quelli desiderati: considerando aree troppo estese, vengono incluse nell'elaborazione anche le zone dell'immagine in cui lo speckle è assente (si manifesta soprattutto nelle zone di contorno), riducendo di molto il

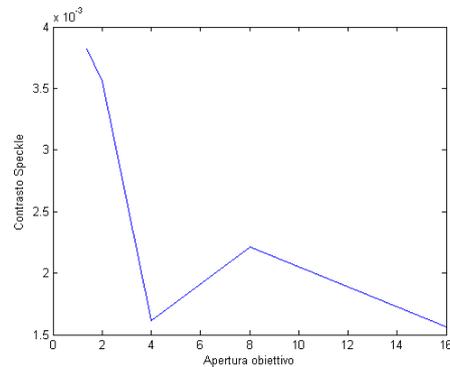


Figura 6.7: Grafico Contrasto - f numero

contrasto speckle totale, che non rispecchia la reale distribuzione dello speckle. Per questo motivo, sono stati aggiunti i seguenti punti:

1. Tramite la funzione pseudocolor, [sint. pcolor(C)], si crea una mappa del colore della matrice dell'immagine.
2. Specificando il tipo di interpolazione [sint. shading('interp')], si assegna a ogni cella il colore risultante dall'interpolazione lineare dei colori ai quattro vertici della cella stessa.

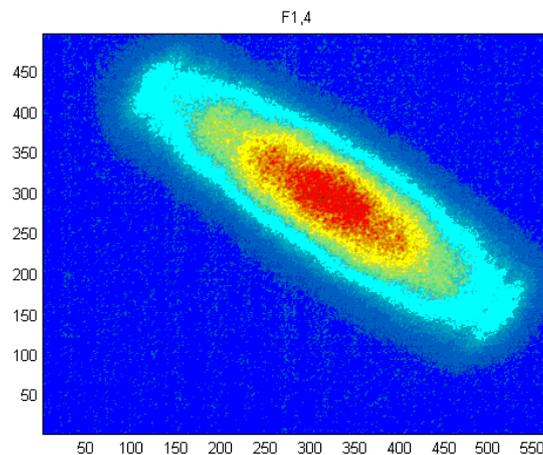


Figura 6.8: Mappa del colore e relativa interpolazione della matrice dell'immagine acquisita

3. Si considera solo un ritaglio di immagine, quello in cui si nota la maggior distribuzione di rosso.
4. Si calcolano media e deviazione standard nel rettangolo considerato, e da questi si calcola il contrasto speckle come $C = \frac{\text{deviazione standard}}{\text{media}}$

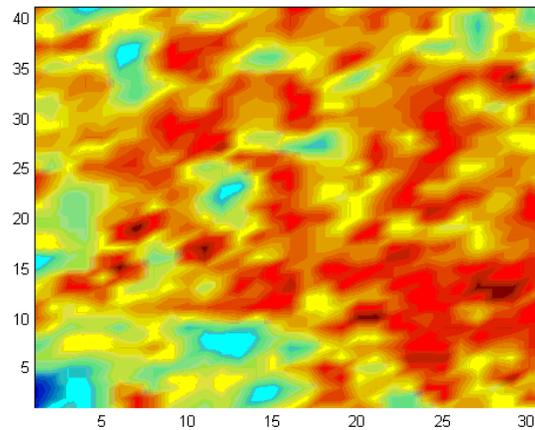


Figura 6.9: Ritaglio di immagine preso in considerazione

5. Si ricava il grafico del contrasto in funzione dell'f numero.

Risultati

I risultati ottenuti sono stati raccolti nelle seguenti tabelle :

(a) Immagine elaborata interamente		(b) Lavoro svolto su immagine parziale	
f- numero 1	Contrasto	f- numero 2	Contrasto
1.4	0,0038	1.4	0.0085
2.0	0,0036	2.0	0.0108
4.0	0,0016	4.0	0.0188
8.0	0,0022	8.0	0.0258
16.0	0,0016	16.0	0.0276

Tabella 6.1: Risultati dell'esperienza

Discussione dei risultati

Dal grafico risultante dalla seconda esperienza, quella che é stata considerata più significativa, si nota che c'è relazione tra la variazione dell'f numero e il contrasto speckle,

in particolare si può concludere che il contrasto si riduce al diminuire dell'f numero (migliore per $f=1.4$ e peggiore per $f=16$)

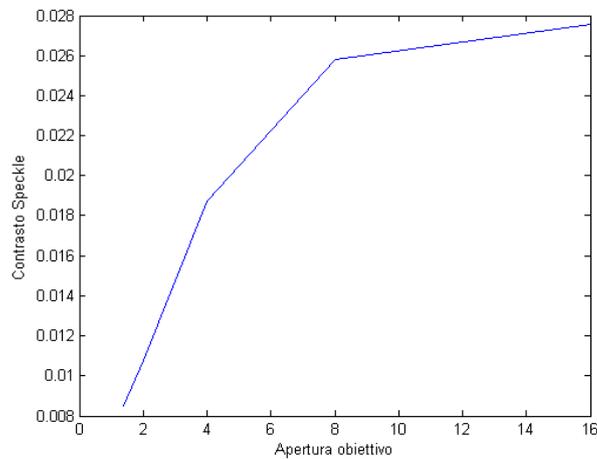


Figura 6.10: Grafico Contrasto - f numero con immagine parziale

6.2.2 Variazione della frequenza e dell'ampiezza picco picco del segnale

Setup sperimentale

L'ultima esperienza effettuata consiste nell'applicare un segnale sinusoidale allo specchio deformabile; l'apparecchiatura utilizzata é composta da uno specchio deformabile, due diffusori e una videocamera per acquisire le immagini. Sulla seconda lente é stato applicato un pezzo di materiale semi trasparente.

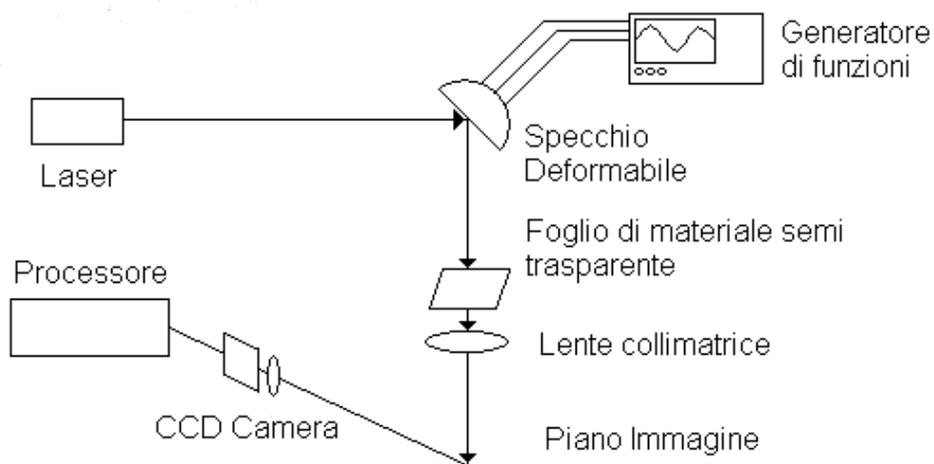


Figura 6.11: Schema relativo all'apparecchiatura utilizzata (exp2)

L'f numero della videocamera é stato impostato a 8.

Descrizione del metodo di misura

I passi seguiti sono stati i seguenti:

1. Si acquisisce un'immagine di partenza

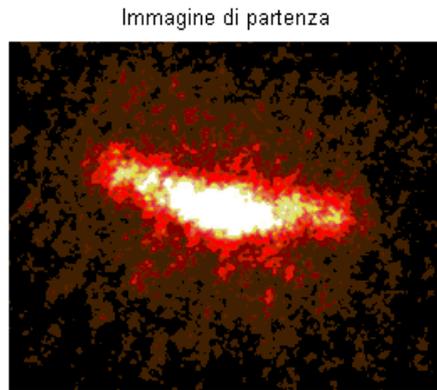


Figura 6.12: Immagine di partenza

2. Si varia la frequenza del segnale, tenendo fisso il valore dell'ampiezza picco: in questo modo si può trovare la frequenza ideale alla quale fermarci per poi variare i valori di ampiezza. Si acquisiscono in questo caso 11 immagini, con frequenze che variano da 1kHz a 3kHz.
3. Elaborazione delle immagini: si considera solo una riga della matrice immagine molto vicina al contorno, dove cioè è più presente lo speckle. Così facendo, si evitano le zone dove il colore rosso del laser è più saturo e il disturbo è meno definito.

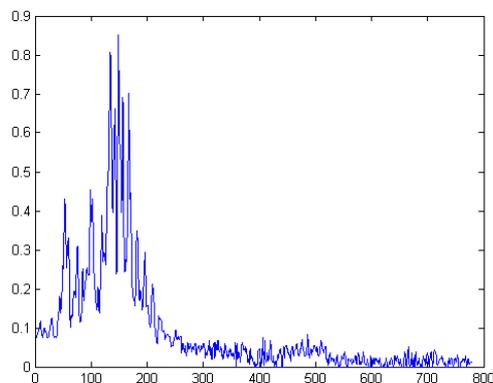


Figura 6.13: Intensità relativa alla riga di matrice considerata

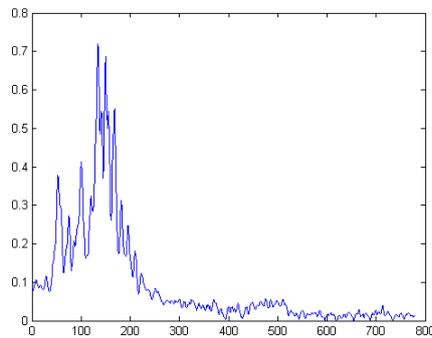


Figura 6.14: Applicazione del metodo 'smooth'

4. Si mediano i valori ottenuti tramite la funzione smooth
5. Si trova il vettore contenente i valori del rumore, sottraendo dalla riga della matrice precedentemente estratta il valore mediato.

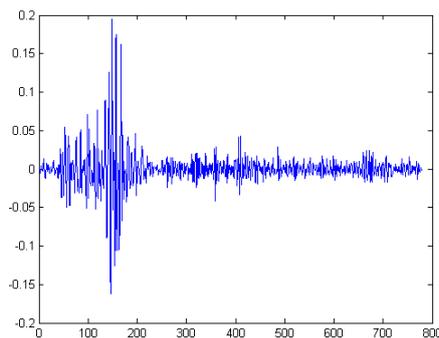


Figura 6.15: Grafico relativo al rumore

6. Si trova il valore del contrasto con la formula:

$$C = \frac{\sigma(\text{rumore})}{\mu(\text{riga matrice}) - (\text{rumore})} \quad (6.2.1)$$

7. Si costruisce il grafico contrasto/frequenza
8. Si varia il valore dell'ampiezza picco picco, tenendo come frequenza il valore di minimo del grafico contrasto/frequenza trovato in precedenza. Si acquisiscono 7 immagini
9. Si ripetono i punti 3,4,5 e 6
10. Si ricava il grafico contrasto/ampiezza

Risultati

I risultati ottenuti sono stati raccolti nelle seguenti tabelle :

(a) Frequenza/Contrasto		(b) Ampiezza/Contrasto	
Frequenza[KHz]	Contrasto	Ampiezza[V]	Contrasto
0,0	0,2812	0	0,2125
1,0	0,1174	30	0,1745
1,2	0,1034	80	0,1152
1,4	0,1010	122	0,0980
1,6	0,0946	156	0,0971
1,7	0,0946	200	0,0976
1,8	0,0950	248	0,0967
1,9	0,1028	268	0,1024
2,0	0,1024		
2,2	0,1157		
2,4	0,1308		
3,0	0,1457		

Tabella 6.2: Risultati dell'esperienza

Discussione dei risultati

I grafici risultanti, che mostrano in ordinata il valore del contrasto e in ascissa rispettivamente il valore di ampiezza e di frequenza, dimostrano che l'esperienza é effettivamente utile per l'eliminazione dello Speckle noise, in quanto l'andamento del contrasto presenta un'avvallamento, e quindi un minimo, alla frequenza $f=1,5$ kHz.

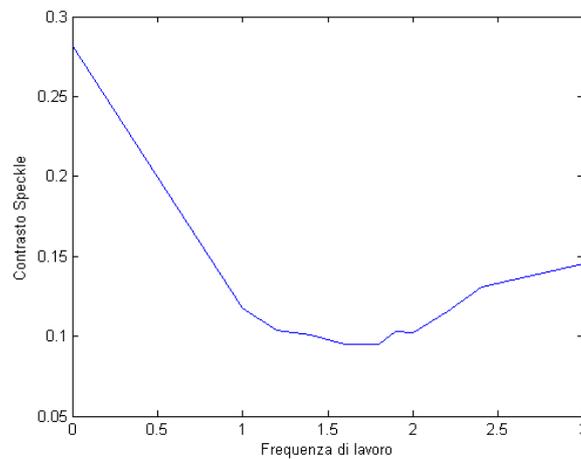


Figura 6.16: Andamento del contasto in funzione della frequenza

A questa frequenza, il grafico contrasto/ampiezza mostra il progressivo diminuire del contrasto all'aumentare dell'ampiezza del segnale, ed é esattamente il risultato che ci aspettavamo di ottenere.

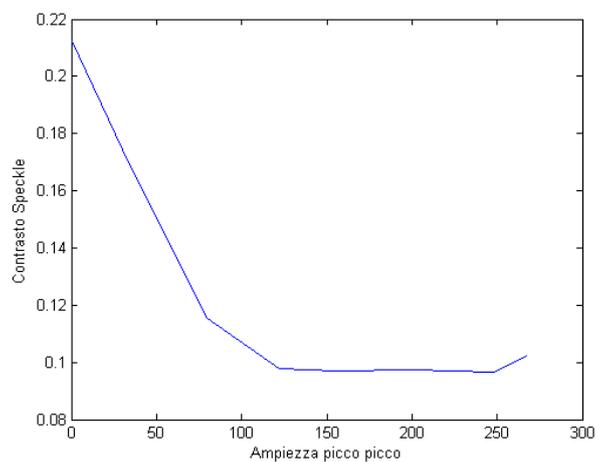


Figura 6.17: Andamento del contrasto in funzione all'ampiezza

Capitolo 7

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era offrire una panoramica sull'insieme dei disturbi dovuti alla coerenza della luce e, in particolare, approfondire il fenomeno dello speckle noise. Inoltre, lo scopo di questo lavoro, era offrire degli approfondimenti sui principali metodi di riduzione e introdurne alcuni di nuovi. Gli strumenti utilizzati sono stati principalmente sistemi di specchi deformabili e lenti, e videocamere per acquisire le immagini. Per quanto riguarda l'elaborazione e la creazione di grafici e tabelle, è stato utilizzato il software Matlab. Il metodo di riduzione più efficace è stato ideato utilizzando parti di metodi già brevettati, in particolare lo schema ottico è simile a quello esposto nel brevetto (Cf. [1]), Speckle elimination by random spatial phase modulation, la differenza sostanziale è nelle tensioni applicate allo specchio deformabile nel metodo generale di analisi. Si è inoltre verificato che il contrasto speckle è dipendente non solo da ampiezza e frequenza, ma anche da apertura numerica, ed in particolare esso è basso per f numeri piccoli, e tende a crescere al crescere dell' f numero. I risultati raggiunti risultano avvalorati dalla teoria di partenza, si è infatti dimostrato che lo speckle appare quando luce monocromatica viene distribuita su una superficie ruvida e raccolta da un rilevatore con apertura finita. Si è anche dimostrato che l'applicazione di una tensione di tipo trifase sinusoidale appropriata allo specchio deformabile è un buon metodo di riduzione quando la qualità dell'immagine è compromessa drasticamente. L'aspetto originale del metodo utilizzato è che viene effettuata prima una scansione per frequenza, per trovare a quali frequenze il contrasto risulta minimo, e questi valori corrispondono ad un punto critico di minimo nel grafico frequenza/contrasto; una volta trovato un valore ottimo di frequenza, si effettua una scansione per ampiezza e si costruisce un nuovo grafico per notare la dipendenza di quest'ultima dal contrasto.

Appendice A

Principio di Huygens Fresnel

Il principio di Huygens (dal nome del fisico olandese Christiaan Huygens), è un metodo di analisi applicato ai problemi di propagazione delle onde. Consiste nel pensare ogni punto di un fronte d'onda come sorgente secondaria di onde sferiche. L'involuppo dei fronti d'onda sferici ad un dato tempo t costituisce il nuovo fronte d'onda. La tecnica escogitata considera però soltanto alcuni fronti d'onda secondari, e per questo motivo non è in grado di dar spiegazione a tutte le caratteristiche dell'immagine ottenuta per diffrazione. Poichè il principio di Huygens risulta indipendente da ogni considerazione sulla lunghezza d'onda, con esso si può prevedere un fronte d'onda uguale per le perturbazioni sonora e luminosa.

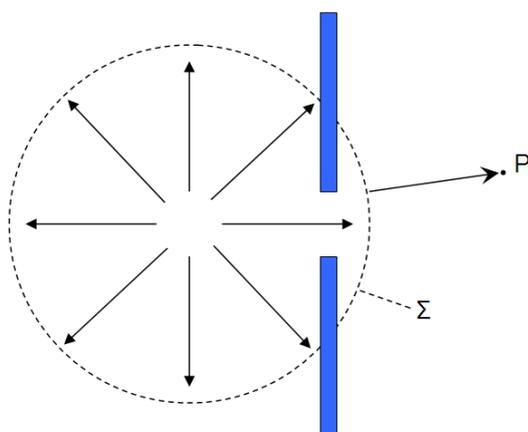


Figura 7.1: Frange d'interferenza

La difficoltà di questa impostazione fu risolta da Fresnel aggiungendo il concetto di interferenza. In ottica ondulatoria esso ha la seguente formulazione: Ogni elemento $d\Sigma$ di un fronte d'onda Σ si può considerare formalmente come una sorgente secondaria di onde sferiche in fase con la primaria e di ampiezza proporzionale a quella dell'onda primaria e all'area $d\Sigma$. La perturbazione prodotta in un punto dello spazio si può sempre ottenere come sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie che raggiungono quel punto. Il principio espresso costituisce uno strumento di calcolo

molto utile, in quanto consente di determinare direttamente il fronte d'onda ad un certo istante una volta noto quello ad un qualsiasi istante precedente (o successivo). Il calcolo della figura di interferenza prodotta dall'involuppo delle onde sferiche secondarie é possibile sia quando l'onda si propaga liberamente, sia quando essa viene limitata da un ostacolo impenetrabile ed é pertanto utilizzabile nella determinazione degli effetti di diffrazione prodotti da uno schermo su una radiazione.

Appendice B

Codice usato nelle simulazioni Matlab

Viene riportato in seguito il codice Matlab relativo alle esperienze più significative

7.1 Confronto tra due onde quadre

```
close all clear all inview close all
t = 0:.0001:.07;
Fs=50;
y = SQUARE(2*pi*50*t);
u = awgn(y,5,'measured'); w = awgn(y,10,'measured');
plot(t,y,t,u,t,w);
legend('Original signal','Signal with AWGN SNR 5','Signal with AWGN SNR 10');
figure(2); plot(t,u,t,w);axis([0 0.07 -2 2]);
noise1=mean((u-y)); noise2=mean((w-y));
sn1=double(u-y)-noise1; sn2=double(w-y)-noise2;
figure(3), plot(sn1,'r');axis([0 700 -2 2]); figure(4), plot(sn2,'b');axis([0 700 -2 2]);
S1=std(sn1) R1=20*log10(S1)
S2=std(sn2) R2=20*log10(S2)
H=[S1 S2]; J=[R1 R2];
figure;plot(H);xlabel('Ampiezza del rumore (picco picco)');ylabel('Contrasto Speckle');
figure;plot(J)
```

7.2 ImCrop

Funzione usata per lavorare solo su una parte dell'immagine acquisita. La funzione 'Contrasto' riceve in ingresso una matrice di intensità e ritorna media, varianza, e contrasto relativo

```
A=im2double(A);
```

```

A=imcrop(A,[80 80 160 160]);
figure, imshow(A);
[r, x, y] = profileP(A);
figure;improfile(r,x,y,25), grid on
[Amean, Atot, S] = Contrasto(A);
SC0 = (1/Amean) * sqrt((1/S) * Atot)

```

7.3 Prova della funzione Wiener2

```

RGB = imread('immagine_partenza.png');
I = rgb2gray(RGB);
r=I(100:300,200);
figure(1),plot(r)
K = wiener2(r,[3 3]);
figure(1),hold on,plot(K,'r')
plot(r-K,'g')
t=mean((r-K));
sn=double(r-K)-t;
figure(2), plot(sn,'r')
S=std(sn)

```

7.4 Elaborazione di immagine parziale

```

figure (1001), pcolor(Im1);title('F1,4');shading interp
latox=20;
latoy=15;
a=Im1(302-latox:302+latox,302-latoy:302+latoy);
figure, pcolor(a);shading interp
m=mean(mean(a));
s=std(std(a));
C1=s/m

```

7.5 Elaborazione finale

```

A = imread('f0.png');
A=im2double(A);
figure, imshow(A);title('Immagine di partenza');
[M,N]=size(A);
R=A(146,:);
Med=smooth(R);
R=R(:);

```

```
Noise=R-Med;  
C0=std(Noise)/mean(R(:)-Noise);
```

Appendice C

Specchi deformabili e ottica adattiva

L'Ottica Adattiva (AO) é una tecnologia utilizzata per migliorare la qualità di un sistema ottico, operando sul fronte d'onda del fascio luminoso. In particolare, per quanto riguarda il campo dell'astronomia, l'AO si pone il traguardo di eliminare la distorsione del fronte d'onda dovuta alla turbolenza atmosferica. Tramite queste tecniche si possono in generale correggere disturbi dovuti al sistema ottico (disallineamenti, ottiche non perfette), oppure per disturbi di altra natura (effetti di calore, o turbolenza atmosferica). L'AO é stata introdotta per la prima volta nel 1953 da un astronomo americano, Horace Babcock, secondo cui si potevano utilizzare componenti ottici appositamente non perfetti per correggere le degradazioni causate da elementi ottici imperfetti.

Se si osserva una stella con un telescopio, supposto costituito da uno specchio parabolico (oppure da una lente perfetta), il fronte d'onda che incide sul telescopio é piano e l'immagine praticamente puntiforme: la sua grandezza é limitata dalla diffrazione. Tale limite per telescopi di grande apertura é molto piccolo. A causa delle turbolenze dovute a moti convettivi dell'aria vi é una deformazione più o meno importante del fronte d'onda. Possiamo pensare di dividere la sezione del fronte d'onda in diverse porzioni più piccole e per ciascuna di esse assimilare il fronte d'onda ancora con un piano ma inclinato di $d \sigma$ rispetto al piano perpendicolare all'asse. Se ora il corrispondente elemento dello specchio si potesse inclinare di $d \sigma/2$ le varie sezioni inviano ora le immagini tutte insieme e la correzione per la turbolenza é realizzata. Per realizzare un sistema di ottica adattiva ho quindi bisogno di due sistemi:

1. uno strumento di misura del fronte d'onda perturbato;
2. uno specchio deformabile.

Il primo dispositivo si realizza ad esempio con un sensore di Shack-Hartmann, che opera un campionamento spaziale del fronte d'onda, per mezzo di un lenslet (array di microlenti). Le posizioni degli spot prodotti dalle lenti sul CCD rivelano l'informazione sulla fase locale del fronte d'onda. Quest'ultimo può essere ricostruito usando

questa informazione, o tramite una decomposizione modale. Altre tecniche sono il Sensore di Curvatura, l'Interferometria a Cammino Comune e il sensore di fronte d'onda a piramide.

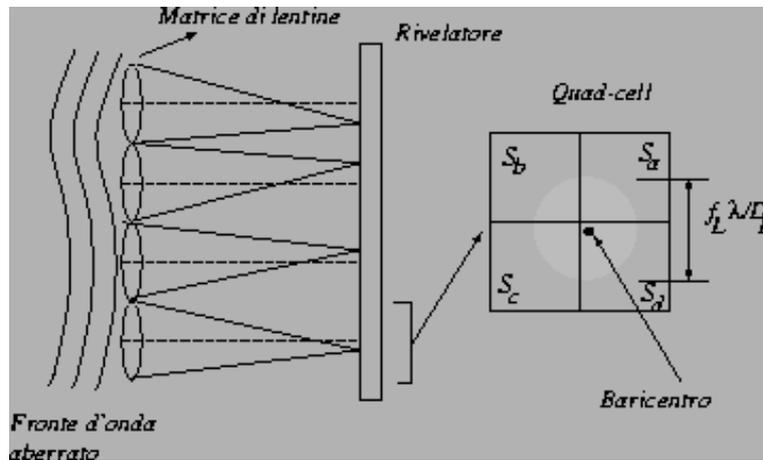


Figura 7.2: Schema d'uso dell'AO

I segnali delle singole celle servono per pilotare le corrispondenti celle dello specchio deformabile. Esistono diverse varietà di specchi deformabili: alcuni di essi sono costituiti da una sottile membrana che può essere spostata mediante trasduttori piezoelettrici oppure per attrazione elettrostatica da i elettrodi sottostanti.

Ci sono diversi tipi di specchi deformabili (DMs), alcuni sono già presenti nel mercato, altri sono ancora nei laboratori di ricerca. I parametri che caratterizzano uno specchio deformabile sono:

1. Tecnologia attuativa: meccanica, piezoelettrica, elettrostatica (membrana), magnetica, bimorfa, MEMS.
2. Qualità della Superficie: a) segmentata, fatta di piccole sezioni di specchio, ognuna mobile separatamente b) continuo, costituito da una singola superficie riflettente che può essere mossa in differenti punti. In ogni caso la qualità ottica deve garantire l'effettiva correzione desiderata.
3. Numero di attuatori: il numero di attuatori definisce la qualità e il numero di diverse forme che lo specchio può riprodurre
4. Dimensione: si può andare da DMs da alcuni millimetri, a specchi deformabili secondari per telescopi, da decine di centimetri.
5. Ogni combinazione ha vantaggi e svantaggi riguardanti i costi, consumo di potenza, soglia di danneggiamento, isteresi e ripetibilità.

Il particolare le specifiche degli specchi a membrana sono:

1. basso costo
2. ampia dinamica di comportamento
3. acromaticità
4. assenza di isteresi
5. soglia di danneggiamento relativamente alta
6. buone prestazioni nella generazione di aberrazioni
7. basso consumo di potenza.

Gli svantaggi di questi dispositivi sono la limitata quantità di massimo stroke (massima deformazione ..) e l'alta correlazione tra gli elettrodi. Per ovviare a questo problema si possono pensare altre soluzioni, come mettere gli attuatori nella parte superiore della struttura, così da essere in grado sia di tirare che spingere la membrana.

Elenco delle figure

1.1	Frangere d'interferenza	4
1.2	Formazione dello Speckle	5
1.3	Principio di Huygens Fresnell	5
1.4	Speckle oggettivo	6
3.1	Il random walk nel piano	13
4.1	Schema ottico utilizzato per la riduzione tramite cristalli piezoelettrici	17
4.2	Schema logico del traslatore-tilter piezoelettrico	18
4.3	Osservatore situato nel near field.	19
4.4	Osservatore situato nel far field.	19
4.5	Utilizzo di un elemento ottico diffrattivo	20
4.6	Schema di utilizzo di un DOE in rotazione	21
4.7	Scansione degli N fasci elementari con DOE non in movimento	21
4.8	Matrice di Hadamard e relativo mapping	26
4.9	Batik pattern	26
4.10	Batik pattern risultanti dalla stessa matrice con mapping diversi	27
4.11	Movimenti relativi alle variazioni di tensione in x e in y	28
4.12	Risultati del LRS serie 3005-20, apertura 5mm, angolo di diffusione di 20°, efficienza di riduzione R=15dB	29
4.13	Risultati del LRS serie 3005-10, apertura 5mm, angolo di diffusione di 10°, efficienza di riduzione R=12dB	29
4.14	Risultati del LRS serie 3005-1, apertura 5mm, angolo di diffusione di 1°, efficienza di riduzione R=6dB	29
5.1	Interferometro speckle	30
5.2	Schema di principio E.S.P.I.	31
5.3	Immagini LASCA che mostrano l'effetto della temperatura su una mano, (a) dopo l'immersione in acqua fredda e (b) dopo immersione in acqua calda.	32
5.4	Sistema di proiezione LBO	35
6.1	Immagine di partenza su cui sono state effettuate le simulazioni	37
6.2	Simulazione di rumore su onda quadra	39

6.3	Simulazione di rumore e confronto tra due onde quadre	39
6.4	Grafico relativo al contrasto in funzione all'ampiezza picco- picco del segnale	40
6.5	Schema relativo all'apparecchiatura utilizzata (exp1)	41
6.6	Esempio di immagine acquisita	41
6.7	Grafico Contrasto - f numero	42
6.8	Mappa del colore e relativa interpolazione della matrice dell'immagine acquisita	42
6.9	Ritaglio di immagine preso in considerazione	43
6.10	Grafico Contrasto - f numero con immagine parziale	44
6.11	Schema relativo all'apparecchiatura utilizzata (exp2)	44
6.12	Immagine di partenza	45
6.13	Intensità relativa alla riga di matrice considerata	45
6.14	Applicazione del metodo 'smooth'	46
6.15	Grafico relativo al rumore	46
6.16	Andamento del contrasto in funzione della frequenza	47
6.17	Andamento del contrasto in funzione all'ampiezza	48
7.1	Frange d'interferenza	50
7.2	Schema d'uso dell'AO	56

Bibliografia

- [1] Charles C. Ih, “*Speckle elimination by random spatial phase modulation*”, University of Delaware, 1979.
- [2] A. E. Ennos, “*Laser speckle experiments for students*”, University of Surrey, 1996.
- [3] Jahja I. Trisnadi, “*Hadamard speckle contrast reduction*”, Optics Letters, 1 Gennaio 2004.
- [4] Edward Buckley, “*Holographic Laser Projection Technology*”, Information Display, Dicembre 2008.
- [5] J. W. Goodman, “*Some fundamental properties of speckle*”, Journal of the Optical Society of America, Novembre 1976.
- [6] Jahja I. Trisnadi, “*Speckle contrast reduction in laser projection displays*”, http://www.siliconlight.com/webpdf/Speckle_SPIE.pdf, 2002
- [7] Lingli Wang, Theo Tschudi, Thorsteinn Halldorsson, and Palmi R. Petursson, “*Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements*”, Journal of the Optical Society of America, Novembre 1998.
- [8] Optotune AG “*Transmissive Laser Speckle Reducer*”, <http://www.optotune.com/images/products/Optotune%20application%20note%20LSR.pdf>
- [9] J. David Briers and Sian Webster “*Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow*”, Journal of biomedical optics, Aprile 1996
- [10] Chiara Olivieri “*Tecniche piramidali per l’elaborazione di immagini ecografiche*”, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Settembre 2007
- [11] Ivan Capraro “*Phase Diversity Phase Retrieval in ottica adattiva*”, Facoltà di Ingegneria, Settembre 2010