



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

“La tecnologia LiDAR: principi ed analisi comparativa dei sistemi di rilevamento”

Relatore: Prof. Corso Alain Jody

Laureando: Pescarolo Giulio

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 29/09/2023

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Cenni storici	1
1.2	Configurazione base del LiDAR	2
1.3	Equazione del LiDAR	3
2	Tipologie	5
2.1	Chiarimenti sulla metodologia di distinzione	5
2.2	Monostatico e Bistatico	5
2.3	Segnale discreto	6
2.3.1	Rilevamento Diretto	6
2.4	Segnale continuo	7
2.4.1	Modulazione in frequenza ed in ampiezza	7
2.4.2	Rilevamento coerente	8
2.4.3	Doppler LiDAR	9
2.5	High spectral resolution LiDAR	11
2.6	Raman LiDAR	11
2.6.1	Principi dello scattering di Raman	11
2.6.2	Errori	13
2.7	LiDAR ad assorbimento differenziale	14
2.7.1	Equazione del LiDAR ad assorbimento differenziale	14
2.8	Apertura Sintetica	16
2.8.1	LiDAR ad Apertura Sintetica (SAL)	16
2.8.2	SAL Inverso	17
2.9	Multiple input multiple output LiDAR	17
3	Sistemi di indirizzamento del fascio	19
3.1	Scanner meccanici	19
3.1.1	Gimbal	19
3.1.2	Fast steering mirror	20
3.1.3	Rotating polygonal mirrors	20
3.1.4	Sistemi micro elettro meccanici	23
3.2	Scanner non meccanici	26
3.2.1	Sistemi basati su “optical phase difference”	26

3.3	Modulo 2π	26
3.4	Cristalli liquidi	27
3.5	Ulteriori tecniche di indirizzamento del fascio	28
3.5.1	Electrowetting	28
3.5.2	Cristalli EO	30
4	Conclusione	33
	Bibliografia	37

Capitolo 1

Introduzione

Il LiDAR, insieme al RADAR, è una delle tecnologie fondamentali allo studio e ricerca dell'atmosfera. I due sistemi sono molto simili, il LIDAR tuttavia si distingue per l'impiego di radiazione luminosa, con lunghezze d'onda tipiche del visibile e vicino infrarosso. Il vantaggio di usare questo tipo di radiazione è che, oltre a fornire esso stesso l'illuminazione necessaria alla misura, e la lunghezza d'onda molto corta permette la rilevazione di oggetti o ostacoli di diametro minuto, come le particelle atmosferiche. Questa tipologia di sistemi offre un'alta risoluzione spaziale e temporale anche per grandi distanze. Il LiDAR utilizza onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra 380 nm e 1000 nm, ovvero rispettivamente, il campo del visibile e dell'infrarosso. Si tratta di sistemi attivi, dove viene quindi emessa un'onda mediante un trasmettitore e ne viene ricevuta una sua quota parte riflessa che passa attraverso un'ottica ricevente, la quale direziona il fascio di ritorno ad un rilevatore, solitamente un fotodiodo. Questo procedimento consente di ottenere una maggiore risoluzione angolare rispetto alla più convenzionale tecnologia RADAR. Un aspetto negativo dell'utilizzo di queste lunghezze d'onda è, nel caso di misurazioni atmosferiche, la difficoltà nell'attraversare elementi ad elevata concentrazione di particolato come nebbia o nubi. Se la lunghezza d'onda del fascio luminoso è significativamente più grande della dimensione della particella, l'onda elettromagnetica passa attraverso di questa senza fenomeni eccessivi di attenuazione o diffusione. Ad esempio, un segnale con lunghezza d'onda di 3cm non verrà attenuato da pioggia o nebbia; se invece si lavora con un segnale a 1.5 μm , questo verrà fortemente diffusa nell'atmosfera.

1.1 Cenni storici

La tecnologia LiDAR ha origini risalenti al 1930 quando cominciarono ad essere condotti i primi studi riguardanti la misurazione dei profili della densità dell'aria attraverso l'analisi dell'intensità della dispersione del fascio luminoso di potenti proiettori. Nel 1938 per la prima volta furono utilizzati impulsi luminosi per la misurazione dell'elevazione delle nubi, vengono così poste le basi della tecnologia che oggi conosciamo ed usiamo. Fu solamente attorno alla metà degli anni '50 che l'acronimo LiDAR venne cominciato ad essere riconosciuto ed utilizzato. Tuttavia, il successo di questa tecnologia strettamente

legata allo sviluppo in campo dell'ottica e dell'elettronica, si ebbe solamente nel 1960 con l'invenzione del laser. Inizialmente nei LiDAR erano utilizzati svariati tipi di laser, in particolare le tipologie a CO_2 con lunghezze d'onda dell'ordine di $10.6 \mu\text{m}$, usati principalmente nei sistemi coerenti, e Nd:YAG a $1064 \mu\text{m}$ [5]. Sempre nel 1960 furono sviluppate le prime applicazioni aeree facenti uso di tecnologia LiDAR per la misurazione del vento, navigazione, imaging 2D e 3D e rilevazione di velocità. Con lo sviluppo della tecnologia GPS e IMU negli anni '80 il LiDAR cominciò ad essere ampiamente utilizzato nell'uso comune. Negli anni '90 la tecnologia era capace di generare dai duemila ai venticinque mila impulsi al secondo, la NASA ne fece uso nel programma Shuttle con il fine di acquisizione di immagini in tre dimensioni della superficie terrestre per lo studio del clima e l'acquisizione di dati topografici. Oggi il LiDAR è una tecnologia consolidata ed utilizzata nei più svariati settori, come topografia, meteorologia, cartografia, agricoltura e ricerca.

1.2 Configurazione base del LiDAR

La configurazione più semplice di un sistema LiDAR consiste di un ricevitore ed un trasmettitore, possono essere due aperture fisicamente distinte o una unica, si parla nel primo caso di sistema bistatico, mentre nel secondo di sistema monostatico. Al trasmettitore, brevi impulsi luminosi generati da un laser attraversano l'apertura e, successivamente, al ricevitore, i fotoni che ritornano vengono captati dopo essere stati riflessi, questi sono poi indirizzati verso un analizzatore ottico il quale, a seconda del tipo di applicazione necessaria, isola una specifica lunghezza d'onda o un determinato stato di polarizzazione del fascio di ritorno. Successivamente il segnale analizzato raggiunge un rilevatore che si occupa di trasmutarlo in un segnale elettrico, l'intensità di quest'ultimo in funzione del tempo impiegato per compiere l'intero tragitto permette di determinare la distanza a cui si trova l'oggetto di interesse dal sistema. Dal punto di vista teorico i sistemi LiDAR possono utilizzare una qualsiasi fonte luminosa, come si faceva prima dell'invenzione del laser. A partire dal 1960 i laser sono diventati la scelta più comune in quanto consentono una maggiore intensità e direttività del segnale ed offrono la possibilità di selezionare la lunghezza d'onda ideale alle esigenze dell'applicazione. Le tipologie di laser più ampiamente utilizzate sono i laser ad eccimeri per la banda dell'ultravioletto e i laser Nd:YAG [6] per radiazioni nell'infrarosso. La rilevazione del segnale è compiuta attraverso l'uso di tubi fotomoltiplicatori (PMT) o di fotodiodi. Un altro metodo di rilevazione è realizzato tramite l'utilizzo di PMT in combinazione a fotodiodi a valanga (APD) in modalità Geiger, i quali consentono di individuare i singoli fotoni che arrivano verso il sistema, questa tecnica è altamente sensibile ed è usata in quegli scenari in cui il segnale di ritorno è molto debole o l'area che si intende analizzare è molto distante dal sistema. Il numero di fotoni rilevati nell'intervallo di tempo, quindi, viene successivamente utilizzato per determinare un valore di distanza.

1.3 Equazione del LiDAR

È importante conoscere che nella sua forma più semplice il segnale rilevato è identificato con il prodotto

$$P(R) = K \cdot G(R) \cdot \beta(R) \cdot T(R). \quad (1.1)$$

[10]

Ovvero, la potenza P [W] in funzione della distanza R [m] è il prodotto di quattro fattori. I primi due sono K e $G(R)$ e dipendono interamente dalla configurazione del sistema LiDAR, possono essere quindi regolati dall'operatore. Il fattore K indica le prestazioni del sistema LiDAR, $G(R)$ descrive invece il fattore geometrico. Gli altri due fattori $\beta(R)$ e $T(R)$ contengono le informazioni riguardanti i parametri atmosferici, il primo termine $\beta(R)$ è il coefficiente di backscatter ed esprime la capacità dell'atmosfera di disperdere la luce del segnale, $T(R)$ infine è il termine di trasmissione, esso descrive la quantità di luce che viene persa nel tragitto dal trasmettitore all'emettitore. Analizzando più in profondità, K può essere riscritto come

$$K = P_0 \cdot \frac{c\tau}{2} A\eta \quad (1.2)$$

con P_0 la potenza media di un singolo impulso luminoso, considerando τ il periodo di tempo di quest'ultimo, allora $c\tau$ è il volume illuminato dal fascio luminoso in un dato istante di tempo. Il termine A indica l'area dell'apertura dell'emettitore, mentre η è l'efficienza media del sistema. Successivamente, il fattore geometrico

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2} \quad (1.3)$$

descrive il rapporto della funzione di sovrapposizione del campo visivo tra il ricevitore e il fascio $O(R)$ con la distanza al quadrato, questo esplicita la dipendenza della potenza P dalla distanza della misura. Continuando ora con i coefficienti dipendenti dai parametri atmosferici, il coefficiente di backscatter $\beta(R, \lambda)$ descrive essenzialmente la potenza del segnale. Considerando N_j la concentrazione delle particelle di scattering presenti nel volume illuminato dal fascio, e $\frac{d\sigma_{j,sca}}{d\Omega}$ la sezione d'urto dello scattering differenziale delle particelle ad una determinata lunghezza d'onda, $\beta(R, \lambda)$ può essere riscritto come

$$\beta(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \frac{d\sigma_{j,sca}}{d\Omega}(\pi, \lambda) \quad (1.4)$$

Nell'atmosfera i fenomeni di scattering del fascio sono causati dalle molecole d'aria e particolato atmosferico; il coefficiente di backscatter, quindi, può essere riscritto come la somma dei coefficienti $\beta(R, \lambda)$ generati da questi due elementi

$$\beta(R, \lambda) = \beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda), \quad (1.5)$$

dove $\beta_{mol}(R, \lambda)$ rappresenta lo scattering causato da molecole di idrogeno o ossigeno e dipende principalmente dalla densità dell'aria, decrescendo quindi con l'aumentare

dell'altitudine; $\beta_{aer(R,\lambda)}$ rappresenta lo scattering provocato dal particolato atmosferico anche detto aerosol, questo fattore è altamente variabile. L'ultimo coefficiente è il termine di trasmissione $T(R)$, esso può assumere valori compresi tra 0 e 1, ed è determinato dalla relazione

$$T(R, \lambda) = e^{-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr}. \quad (1.6)$$

Il fattore due tiene in considerazione del numero di volte che il segnale deve compiere il percorso dal sistema LiDAR all'oggetto distante R . La somma di tutte le perdite di segnale dovute alla trasmissione per causa di assorbimento e scattering ad opera della materia è chiamata estinzione, il valore $\alpha(r, \lambda)$ all'interno dell'integrale rappresenta il coefficiente di estinzione. Questo valore è pari alla sommatoria delle concentrazioni di particelle di scattering moltiplicato per la sezione d'urto di estinzione di ogni particella

$$\alpha(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \sigma_{j,ext}(\lambda). \quad (1.7)$$

Il fenomeno di estinzione può accadere a causa di scattering e assorbimento di energia da parte delle molecole e delle particelle presenti nel mezzo in cui viaggia il fascio luminoso. Nell'atmosfera questo coefficiente può essere espanso come somma di quattro componenti

$$\alpha(r, \lambda) = \alpha_{mol,sca}(R, \lambda) + \alpha_{mol,abs}(R, \lambda) + \alpha_{aer,sca}(R, \lambda) + \alpha_{aer,abs}(R, \lambda) \quad (1.8)$$

dove gli indici "mol" e "aer" si riferiscono come precedentemente indicato alle componenti molecolari e dell'aerosol, mentre "sca" e "abs" rispettivamente fanno riferimento a scattering ed assorbimento. Considerando ora tutti i termini sopra riportati è possibile riscrivere l'equazione del LiDAR in una forma più comunemente conosciuta

$$P(R, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} A \eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R, \lambda) e^{-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr}. \quad (1.9)$$

Questa equazione viene adattata e riformulata in diverse varianti per adattarsi alle moltitudini di tipologie di sistemi LiDAR.

Capitolo 2

Tipologie

2.1 Chiarimenti sulla metodologia di distinzione

In base alle necessità dell'applicazione i sistemi LiDAR possono essere configurati in una moltitudine di modalità differenti, questo può portare ad avere una visione confusa sulle tipologie di sistemi attualmente esistenti. Un metodo di suddivisione efficace è di distinguere queste configurazioni in base ad una distinta caratteristica fisica, ovvero la quantità di aperture presenti, ogni sistema possiede infatti uno spazio necessario al transito del fascio luminoso, a seconda che quest'ultimo attraversi la medesima apertura sia all'andata che al ritorno allora si parla di struttura monostatica o bistatica. Questa distinzione si avvale quindi di differenze geometriche, tuttavia, esiste una differenza significativa anche per quanto riguarda la natura del segnale usato in ingresso al sistema. Conviene quindi porre una distinzione anche tra segnali discreti, i quali raccolgono informazioni riguardanti la distanza tra il sensore rilevatore e l'oggetto, un'esempio concreto sono i dispositivi LiDAR "Time of Flight", ed i segnali invece cosiddetti continui, mediante i quali è possibile effettuare operazioni di modulazione e di misura della fase.

2.2 Monostatico e Bistatico

La posizione del ricevitore e dell'emettitore genera altri tipi di categorie. Se questi sono posizionati in due aperture differenti si tratta di un LiDAR bistatico, questo comporta che non debbano avere necessariamente la stessa dimensione. Il LiDAR monostatico è una configurazione in cui emettitore e rilevatore sono posizionati nello stesso punto, questo consente di ottenere sistemi di dimensione contenuta ed economici. Il segnale trasmesso viene riflesso e passa attraverso la medesima apertura, questo presenta la possibilità che il segnale di ritorno proveniente dal trasmettitore provochi un'interferenza al ricevitore, questo fenomeno è detto "cross talking", alcuni metodi di prevenzione prevedono la modulazione del segnale in frequenza o in ampiezza oppure l'impiego di filtri, nel caso di un trasmettitore con basso duty-cycle, invece, è possibile mantenere spento il ricevitore mentre il segnale viene trasmesso, se invece è necessario l'uso di un alto duty-cycle o il segnale è una forma d'onda continua. Il LiDAR bistatico, invece, prevede l'uso di

due separate aperture per l'emettitore ed il rilevatore, questo consente anche l'utilizzo di dimensioni differenti delle due. L'uso di un'apertura dedicata per la trasmissione del segnale risulterà molto importante per il rilevamento coerente. È infine possibile avere più di due aperture separate come nel caso del MIMO (Multiple input multiple output) LiDAR. Questo tipo di sistema ha il vantaggio di offrire una maggiore precisione della misura, essendo meno affetto da interferenza e rumore.

2.3 Segnale discreto

Questa tipologia di rilevamento è progettata per acquisire dati in modo specifico e mirato, il segnale, infatti, modulato in modo tale da trasmettere singoli impulsi di breve durata.

2.3.1 Rilevamento Diretto

Una tipologia di rilevamento che sfrutta i segnali descritti nel paragrafo precedente sono i sistemi LiDAR a rilevamento diretto, questi catturano l'intensità del segnale luminoso di ritorno mediante un ricevitore che può essere composto anche da un singolo fotodiodo. Questa tipologia di sistema richiede meno componenti ed è quindi meno costosa rispetto al rilevamento coerente di cui tratteremo in seguito. Il sensore nel rilevatore cattura la parte del segnale che viene riflessa e ne viene misurato il tempo Δt impiegato fra trasmissione e ricezione [8]. Questo processo viene ripetuto più volte al secondo, generando in questo modo una successione di punti discreti che quando raccolti forniscono informazioni sull'oggetto che si intende misurare. Un utilizzo comune del rilevamento diretto sono i LiDAR ad una, due e tre dimensioni. Il LiDAR ad una dimensione fornisce solamente la misura della distanza da un oggetto, questo avviene grazie al calcolo dell'intervallo di tempo impiegato dal fascio a colpire tale oggetto e tornare indietro al ricevitore. Conoscendo la velocità del fascio luminoso, che corrisponde alla velocità della luce c , il tempo impiegato dal fascio per compiere la distanza, detto anche "time of flight" (ToF) [6], è possibile ricavare la distanza da

$$d = \frac{c \cdot ToF}{2} [m] \quad (2.1)$$

Il profilo di portata è una rappresentazione grafica dell'ampiezza dei segnali di ritorno catturati dal ricevitore. Questo fornisce la dimensione di un oggetto in una sola dimensione e inoltre fornisce gli i centri di scattering lungo l'orientazione di quel particolare profilo. Questo può essere inoltre usato finché è disponibile una potenza di segnale adeguata, ciò permette al rilevamento discreto di essere utilizzato anche per misurazioni a grande distanza, a patto che non siano presenti ostacoli nel cammino tra sistema e oggetto. Un segnale dipendente dal tempo quando viene rilevato fornisce un'immagine ad alta risoluzione del profilo di portata. Se ora l'oggetto o il modulo LiDAR cambiano orientazione, si possono ottenere diverse immagini dell'oggetto. Se si ottiene un numero sufficiente di queste immagini è possibile ricostruire un'immagine a due dimensioni contenente informazioni sulla distanza e l'angolazione rispetto il campo visivo del sensore, questo risulta

utile in svariate applicazioni, tra cui l'uso in veicoli autonomi o il "mapping".

Il LiDAR a due dimensioni utilizza fasci luminosi per misurare la distanza da un oggetto verticalmente e orizzontalmente. Per ottenere queste informazioni, quando il LiDAR emette il fascio luminoso, questo tiene conto sia del tempo impiegato per tornare, sia l'angolo a cui è stato emesso. Questo permette di calcolarne la distanza e l'angolazione rispetto al sensore. I sistemi LiDAR a tre dimensioni si possono distinguere tra sistemi di tipo "scanning", ovvero il raggio laser dell'emettitore viene puntato in diverse direzioni in modo meccanico col fine di coprire un'area il più vasta possibile, e sistemi di tipo flash, dove invece un laser molto potente viene emesso in modo da illuminare l'intera area circostante in un unico istante. Le due tipologie si differenziano quindi per il metodo in cui viene acquisita l'immagine, i LiDAR di tipo "scanning" inoltre sono più economici e hanno una disponibilità di rilevatori più alta rispetto l'altra tipologia.

Il LiDAR a tre dimensioni di tipo "scanning", oltre a fornire informazioni tridimensionali sulla forma dell'oggetto, porta con sé tutti i vantaggi del LiDAR a due dimensioni, come la possibilità di illuminare lo spazio circostante. Le informazioni riguardanti la forma dell'oggetto permettono di ottenere facilmente una buona risoluzione nella distinzione di forme differenti, questo perché, per questa tipologia di sistema la forma non dipende strettamente dal tipo di illuminazione che colpisce l'oggetto, come invece avviene per i LiDAR a due dimensioni. Ciò rende questo tipo di sistema utile per varie applicazioni.

Il LiDAR tridimensionale di tipo flash, invece, utilizza una matrice di rilevatori per sviluppare un'immagine. Nel "flash imaging" il segnale di ritorno colpisce un array di rilevatori, poiché l'energia viene suddivisa tra questi, per ottenere un'immagine con un numero adeguatamente elevato di pixel è richiesto un alto livello di illuminazione o altrimenti rilevatori molto sensibili. Un metodo per aumentare la sensibilità è amplificare il segnale di ritorno in modo tale che il livello sia superiore a quello del rumore di fondo.

2.4 Segnale continuo

Il LiDAR a tempo continuo, a differenza di quello discreto, emette un'onda continua e ne registra come segnale di ritorno una distribuzione dell'energia luminosa riflessa, estrapolando poi l'informazione utile alla determinazione dei parametri necessari dall'integrità di questa distribuzione. I dati estratti possono essere complessi da elaborare ma in compenso questa tecnologia offre maggiore precisione ed accuratezza.

2.4.1 Modulazione in frequenza ed in ampiezza

Sono due tecniche di rilevamento ad onda continua che sfruttano la frequenza o l'ampiezza del segnale luminoso generato dall'emettitore per calcolare proprietà dell'atmosfera, generalmente vengono indicate con l'acronimo AMCW e FMCW [6] rispettivamente per la modulazione in frequenza ed in ampiezza.

Il LiDAR AMCW utilizza una sorgente di segnale, tipicamente sinusoidale, modulata in ampiezza. Questo segnale viene misurato poi dal ricevitore ed elaborato, con la trasformata di Fourier, per estrarne frequenza e fase, la differenza tra l'ampiezza dell'onda di

ritorno con quella emessa produce informazioni riguardo alla distanza dall'ostacolo, la differenza di fase invece consente di determinarne la velocità. Una delle caratteristiche di questa tecnica è la sua semplicità, anche se è parecchio limitata per quanto riguarda la distinzione di segnali riflessi da ostacoli differenti in quanto la modulazione in ampiezza può generare sovrapposizioni di segnali difficilmente distinguibili.

Il LiDAR FMCW utilizza invece una tecnica di modulazione in frequenza. Il segnale trasmesso e poi ricevuto è soggetto ad uno sfasamento della frequenza, questa differenza è proporzionale alla distanza tra sensore e l'ostacolo.

AM e FM sono due tecniche molto simili ma si differenziano per degli aspetti importanti: in primo luogo, la modalità di rilevamento è diversa per ognuno, il rilevamento di ampiezza misura l'intensità del segnale mentre quello in frequenza la fase, in secondo luogo per quanto riguarda la prima tecnica i segnali sono elaborati mediante appositi strumenti mentre per la modulazione in frequenza possono essere direttamente sovrapposti sul fotodiodo. Infine, la tecnica AM è meno precisa della seconda, a causa dei rischi di sovrapposizione.

2.4.2 Rilevamento coerente

Il rilevamento coerente consente di compiere un rilevamento anche della fase del segnale, oltre all'ampiezza, ed offre una elevata sensibilità del ricevitore ed una migliore efficienza spettrale, il che rende questa tipologia di rilevamento più adatta per trasmissioni del segnale a lunga distanza. A differenza del rilevamento diretto, il segnale di ritorno non colpisce subito il fotodiodo ma viene prima combinato otticamente con un altro segnale a frequenza nota, detto oscillatore locale (LO), questa combinazione produce quindi un'ampiezza

$$I = 2 \cdot E_{segnale} \cdot E_{LO} \cdot e^{-j(\omega_{segnale} - \omega_{LO})t}. \quad (2.2)$$

[5]

Il rilevamento coerente è utile per il rilevamento di venti atmosferici, permette infatti di analizzare grossi volumi di venti ad alta risoluzione spaziale e temporale.

Il rilevamento omodino ed eterodino sono due sottocategorie del rilevamento coerente che consentono di misurare piccole variazioni di frequenza e di fase tra il segnale generato e quello riflesso.

Nel caso di rilevamento eterodino il segnale di ritorno è combinato con il segnale generato dall'LO, questo genera un nuovo segnale contenente la somma e la differenza delle due frequenze dei segnali, questa somma supera la massima frequenza rilevabile dal ricevitore LiDAR, la differenza invece corrisponde ad un segnale a bassa frequenza che può essere rilevato con precisione elevata. La rivelazione eterodina richiede dunque un trasmettitore ad impulsi con una frequenza di uscita f_0 ad alta stabilità e la frequenza dell'oscillatore locale f_{LO} che sia continua. Dopo avere combinato otticamente le frequenze si ottiene

$$f_{LO} = (f_0 + \Delta f) [Hz] \quad (2.3)$$

dove $f_0 + \Delta f$ è la frequenza che ritorna dopo essere stata riflessa e traslata per effetto Doppler. Esistono due tipi di rilevazione eterodina che si differenziano per la differenza di fase tra l'LO e il segnale di ritorno. Considerando i campi elettrici dei due tipi di segnali usati in questo tipo di rilevazione come

$$\begin{aligned}\vec{E}_{\text{segnale}} &= E_{\text{segnale}} \cdot e^{k_{\text{segnale}} \cdot \vec{r}_{\text{segnale}}} \cdot e^{-j\omega_{\text{segnale}} t} \\ \vec{E}_{\text{LO}} &= E_{\text{LO}} \cdot e^{k_{\text{LO}} \cdot \vec{r}_{\text{LO}}} \cdot e^{-j\omega_{\text{LO}} t}\end{aligned}\quad (2.4)$$

Di ampiezza:

$$I = \vec{E}_{\text{segnale}} \cdot \vec{E}_{\text{segnale}}^{\wedge} + \vec{E}_{\text{LO}} \cdot \vec{E}_{\text{LO}}^{\wedge} + \vec{E}_{\text{LO}} \cdot \vec{E}_{\text{segnale}}^{\wedge}\quad (2.5)$$

Nella rivelazione eterodina spaziale l'oscillatore locale ed il segnale di ritorno sono alla stessa frequenza ma il segnale dell'LO è sfasato in modo tale da creare delle frange quando i due segnali interferiscono prima di raggiungere il rivelatore, se questo sfasamento non è presente si parla di rivelamento omodino. In questo tipo di rivelazione spaziale, solamente i termini relativi allo spazio sono mantenuti dalle equazioni iniziali. Quindi

$$\begin{aligned}\vec{E}_{\text{segnale}} &= E_{\text{segnale}} \cdot e^{k_{\text{segnale}} \cdot \vec{r}_{\text{segnale}}} \\ \vec{E}_{\text{LO}} &= E_{\text{LO}} \cdot e^{k_{\text{LO}} \cdot \vec{r}_{\text{LO}}}\end{aligned}\quad (2.6)$$

$$I = 2 \cdot E_{\text{segnale}} \cdot E_{\text{LO}} \cdot e^{k_{\text{segnale}} \cdot \vec{r}_{\text{segnale}} - k_{\text{LO}} \cdot \vec{r}_{\text{LO}}}$$

Nella rivelazione eterodina temporale, invece, i due segnali sono disallineati spazialmente, ovvero hanno frequenze diverse, questo genera delle frange che vengono poi osservate. In questo tipo di rilevazione vengono mantenuti solamente i termini dipendenti dal tempo, si ottiene quindi

$$\begin{aligned}\vec{E}_{\text{segnale}} &= E_{\text{segnale}} \cdot e^{-j\omega_{\text{segnale}} t} \\ \vec{E}_{\text{LO}} &= E_{\text{LO}} \cdot e^{-j\omega_{\text{LO}} t}\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$I = 2 \cdot E_{\text{segnale}} \cdot E_{\text{LO}} \cdot e^{-j(\omega_{\text{segnale}} - \omega_{\text{LO}})t}$$

2.4.3 Doppler LiDAR

La rilevazione eterodina è una tecnica utile per calcolare la variazione di frequenza di un'onda causata dall'effetto Doppler, il quale si verifica quando una sorgente si muove rispetto all'osservatore. In questo modo è possibile ottenere misurazioni molto precise poiché permette di isolare la frequenza di interesse dalle altre componenti del segnale. L'effetto Doppler cambia la frequenza del segnale di ritorno secondo il rapporto

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}\quad (2.8)$$

[6]

dove v indica la velocità [m/s] e λ la lunghezza d'onda [m].

Quando un oggetto vibra genera delle variazioni di velocità verso e lontano dal sensore. Le vibrazioni vengono rilevate come una modulazione in frequenza del segnale di ritorno, con la frequenza di modulazione che è uguale alla frequenza della vibrazione e l'intensità della variazione di frequenza corrispondente alle variazioni causate dall'effetto Doppler. La variazione della posizione causata dalla vibrazione si calcola come

$$x = A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.9)$$

È possibile calcolare la velocità generata dalla vibrazione derivando rispetto al tempo l'equazione 2.9

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (2.10)$$

Per elevata sensibilità dell'effetto doppler viene spesso usato il rilevamento eterodino temporale., dove il segnale di ritorno è combinato con l'LO per generare un nuovo segnale a frequenza spostata verso il basso chiamata anche frequenza di battimento. Il Doppler LiDAR appartiene alla categoria dei LiDAR monostatici a rilevamento coerente. Il rilevatore sfrutta l'effetto Doppler del segnale di ritorno quando questo viene trasmesso nell'atmosfera. Esso viene usato principalmente per misurare la velocità di un oggetto grazie all'effetto Doppler, solitamente per questo tipo di misurazioni si intende il Doppler LiDAR ad impulsi. Un oggetto può muoversi verso o lontano il sistema e questo genera uno sfasamento positivo o negativo della luce rilevata, poiché lo spostamento Doppler dipende dalla velocità radiale delle dispersioni dei fotoni relativi al modulo LiDAR, si parla di "red shift" se l'oggetto, e quindi le dispersioni, si allontana dal modulo e "blue shift" quando si avvicinano. L'effetto Doppler del segnale di ritorno risulta essere relativamente inferiore della frequenza del segnale emesso dal trasmettitore, ciononostante è comunque possibile misurare questi sfasamenti con alta precisione utilizzando il rilevamento coerente. In generale l'effetto Doppler non differenzia tra i casi in cui a muoversi sia il ricevitore oppure il trasmettitore del modulo LiDAR, questo perché, a differenza delle onde sonore, la luce non viene trasportata da un mezzo. Considerando una lunghezza d'onda λ_0 , frequenza $f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$ e la velocità relativa v , la frequenza osservata risulta essere

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right). \quad (2.11)$$

Se la luce emessa dal modulo trasmettitore del LiDAR ha una frequenza f_0 , allora posso ricavare la frequenza di una particella di aerosol o dell'aria in movimento attraverso l'equazione precedente. Il segnale luminoso viene riflesso e torna quindi indietro alla frequenza f sfasata di

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 \left(1 + \frac{2v}{c} \right) \quad (2.12)$$

Un movimento della particella verso il LiDAR causa uno sfasamento positivo e quindi una velocità positiva. La radiazione di retrodiffusione viene combinata con il segnale dell'LO, il nuovo segnale presenta una modulazione ad ampiezza che oscilla ad una frequenza nota, la quale risulta indicare lo sfasamento dovuto all'effetto Doppler, ovvero la differenza delle frequenze dei due segnali. Il nuovo segnale ottenuto genera quindi un diverso pattern di interferenza che viene poi rilevato da un fotodiodo tramite rilevamento eterodino. La frequenza del pattern è proporzionale allo sfasamento dell'effetto Doppler della luce di ritorno.

2.5 High spectral resolution LiDAR

L'High Spectral Resolution LiDAR misura le componenti spettrali del segnale di ritorno mediante l'uso di un rivelatore in grado di separare il segnale luminoso nelle sue lunghezze d'onda individuali e ne misura l'intensità di ciascuna di queste, per fare ciò viene sfruttato l'effetto Doppler prodotto dai fotoni che vengono dispersi dalle molecole dell'atmosfera [10]. Uno dei vantaggi dell'HSLR è quello di essere in grado di distinguere tra la dispersione molecolare e quella dell'aerosol grazie all'utilizzo di due sorgenti laser a diversa lunghezza d'onda, similmente ai LiDAR di Raman. Questa distinzione permette di effettuare misurazioni molto accurate dei parametri atmosferici come ad esempio le dimensioni, la forma e la composizione delle particelle presenti.

2.6 Raman LiDAR

Il Raman lidar sfrutta l'effetto della dispersione inelastica della luce per effetto delle molecole dell'atmosfera. Questa tecnica di misurazione non richiede una purezza spettrale del fascio laser emesso, ma ha un SNR piuttosto basso a causa della sezione d'urto dello scattering di Raman, ovvero la probabilità di interazione tra la luce incidente e le molecole dell'atmosfera durante il processo di scattering. Lo sviluppo di trasmettitori ad alta potenza ha tuttavia alleviato questo problema permettendo una soppressione efficace del rumore di sottofondo. Questa tipologia di lidar non richiede l'utilizzo di una specifica lunghezza d'onda del fascio laser. Questo è dovuto dalla dipendenza dello scattering di Raman da λ^{-4} , tuttavia lunghezze d'onda corte, come 320-550 nm, sono preferibili poiché permette di evitare l'elevata attenuazione del laser dovuta all'assorbimento da parte di gas presenti nell'atmosfera. Inoltre, è richiesto l'uso di un rivelatore molto efficiente a causa della bassa intensità del segnale di Raman di ritorno.

2.6.1 Principi dello scattering di Raman

La dispersione della radiazione incidente di molecole atmosferiche riguarda sia processi inelastici che elastici. Si parla di scattering di Rayleigh o elastico se la frequenza del

fotone f_s [Hz] è la stessa del fotone incidente f_i [Hz], in questo caso la molecola nell'atmosfera contro cui il fotone urta mantiene la sua energia durante il processo di scattering. Lo scattering di Raman o inelastico, invece, provoca una modifica dello stato quantico della molecola e la frequenza del fotone risulta sfasata di una certa quantità $|\Delta f|$ dove Δf corrisponde alla differenza:

$$|\Delta f| = f_i - f_s = \frac{\Delta E}{hc} \quad (2.13)$$

[10]

Se la molecola nell'atmosfera assorbe energia, ne viene quindi eccitato un livello energetico superiore, la frequenza del fotone diminuisce di $f_s = f_i - \Delta f$. Questo processo è noto come scattering di Stokes-Raman. Se la molecola invece diminuisce la sua energia trasferendola al fotone, allora si sta parlando di anti-scattering di Stokes-Raman e quindi $f_s = f_i + \Delta f$. L'intensità di una linea osservabile di Rayleigh o di Raman dipende dalla sezione d'urto del corrispondente fenomeno di dispersione. Per le applicazioni lidar si considera la sezione d'urto differenziale $\frac{d\sigma}{d\Omega}$, ovvero la quantità di fotoni riflessi.

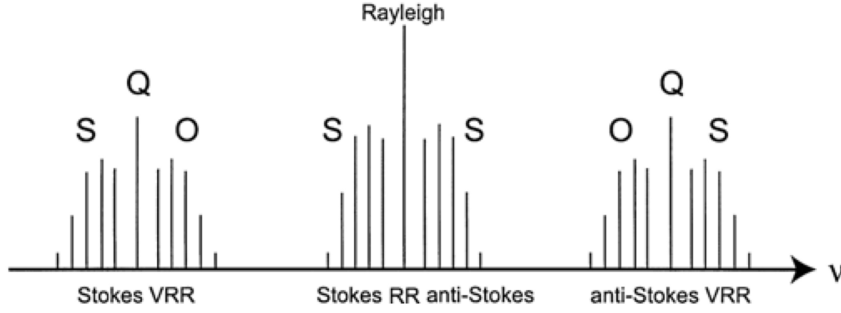


Figura 2.1: Spettro dell'energia vibro-rotazionale per una molecola di N_2 . v corrisponde alla frequenze f

I parametri molecolari che determinano la sezione d'urto in una molecola sono la polarizzabilità media a [cm^3] e l'anisotropia della polarizzabilità γ [cm^3] e le loro rispettive derivate a' e γ' alle coordinate normali di vibrazione nella posizione di equilibrio. Da questi parametri è possibile ottenere informazioni riguardo la sezione d'urto differenziale per il backscattering di Rayleigh

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rayleigh} = k_f f_i^4 \left(a^2 + \frac{7}{180}\gamma^2\right), \quad (2.14)$$

la sezione d'urto per il backscattering di Raman puramente rotazionale

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Raman} = k_f f_i^4 \left(\frac{7}{60}\gamma^2\right), \quad (2.15)$$

la sezione d'urto per il backscattering di Stokes-Raman della vibrazione-rotazione

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Raman}^{Stokes} = k_f (f_i + f_{vib})^4 \frac{b_f^2}{\left(1 - \exp\left(\frac{hc f_{vib}}{k_B T}\right)\right)} \cdot \left(a'^2 + \frac{7}{45} \gamma'^2\right), \quad (2.16)$$

la sezione d'urto per il backscattering di anti-Stokes-Raman della vibrazione-rotazione

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Raman}^{Stokes} = k_f (f_i + f_{vib})^4 \frac{b_f^2}{\left(\exp\left(\frac{hc f_{vib}}{k_B T}\right) - 1\right)} \cdot \left(a'^2 + \frac{7}{45} \gamma'^2\right), \quad (2.17)$$

con f_{vib} che corrisponde alla frequenza di oscillazione della molecola e

$$b_f^2 = \frac{h}{8\pi^2 c f_{vib}} \quad e \quad k_f = \frac{h}{\xi_0^2} \quad (2.18)$$

ξ_0 indica che le equazioni 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 sono tutte considerate nel vuoto, si possono ora effettuare alcune considerazioni. Innanzitutto, il rapporto di intensità tra lo scattering di Stokes-Raman e anti-stokes è

$$\frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Raman}^{Stokes}}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Raman}^{anti-Stokes}} = \frac{(f_i - f_{vib})^4}{(f_i + f_{vib})^4} \exp\left(\frac{hc f_{vib}}{k_B T}\right) \quad (2.19)$$

si può osservare che in condizioni atmosferiche le bande di Raman anti-Stokes sono minori di 3-6 ordini di intensità. Successivamente, le equazioni riguardanti le sezioni d'urto del backscattering di Rayleigh e dell'anti-Stokes-Raman sono impiegate per luce incidente linearmente polarizzata o meno, oppure per l'osservazione del segnale di ritorno. Le equazioni delle sezioni d'urto del backscattering di Raman puramente rotazionale e della vibrazione-rotazione invece forniscono l'informazione sulla sezione d'urto per le bande di Raman. Il contributo dei diversi rami è dato da

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{centro} \sim \left(a_l^2 + \frac{7}{180} \gamma_l^2\right) \quad e \quad \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{laterale} \sim \left(\frac{7}{60} \gamma_l^2\right) \quad (2.20)$$

Con $a_l^2 = a^2, a'^2$ e $\gamma_l^2 = \gamma^2, \gamma'^2$. Queste costanti sono determinate tramite metodi sperimentali e teorici. Il "centro" corrisponde alla linea di Rayleigh oppure alla banda Q, mentre "laterale" descrive le bande rotazionali (O ed S). È possibile ora osservare l'equivalenza tra scattering rotazionale di Rayleigh e di Raman e tra scattering della vibrazione-rotazione.

2.6.2 Errori

Questa tipologia di rilevamento spesso genera un relativamente elevato rumore statistico, al quale contribuiscono rumore di segnale e rumore di background. Ogni segnale è la somma del numero di fotoni ottenuti dal backscatter, quelli che arrivano al rivelatore

dal rumore proveniente dall'atmosfera e dal circuito. Altra causa di errori sono quelli sistematici, spesso generati da imprecisioni nella calibrazione della strumentazione.

2.7 LiDAR ad assorbimento differenziale

Il DIAL o lidar ad assorbimento differenziale viene usato principalmente per rilevare tracce di un gas come ozono, diossido di carbonio o vapore acqueo presente nell'atmosfera. Esso sfrutta il principio che i gas possiedono una o più linee di assorbimento. Questo sistema è in grado di trasmettere due lunghezze d'onda simultaneamente: una lunghezza d'onda online, centrata sulla linea di assorbimento del gas che si vuole rilevare, mentre l'altra, offline, fuori dalla riga stessa. La differenza di assorbimento tra le due lunghezze d'onda permette di misurare la concentrazione del gas, solitamente rispetto all'atmosfera. È possibile quindi ricavare il coefficiente di assorbimento molecolare differenziale, se questo è noto a priori per le due lunghezze d'onda emesse, allora è possibile calcolare direttamente la concentrazione degli atomi o delle molecole nel gas. Il DIAL risulta molto utile nell'osservazione del vapore acqueo, in quanto questo possiedono una ristretta banda di assorbimento. Questo tipo di misurazione richiede alta stabilità e purezza spettrale del laser emesso. Un altro ambito in cui questo sistema risulta molto utile è quello della misurazione dell'ozono, a causa dell'importanza di questo gas nel ruolo dell'assorbimento della radiazione ultravioletta. Qui le due lunghezze d'onda possiedono uno sfasamento di qualche nanometro e il segnale di ritorno differenziale diventa una fonte di errore non trascurabile. Alternativamente esiste il Raman-DIAL, dove le proprietà dello scattering di Raman, insieme all'uso di atomi di idrogeno e/o ossigeno vengono usati per determinare il coefficiente di assorbimento differenziale dell'ozono aggirando i limiti citati precedentemente.

2.7.1 Equazione del LiDAR ad assorbimento differenziale

L'equazione del LiDAR [10] nel caso di segnale di ritorno elastico è

$$P(R) = P_0 \eta \left(\frac{A}{R^2} \right) \left(\frac{c\tau}{2} \right) \beta(r) e^{[-2 \int_0^r \alpha(r) dr]}, \quad (2.21)$$

si considera ora un sistema LiDAR che lavora con due lunghezze d'onda diverse, una online e l'altra offline, rispettivamente λ_{on} e λ_{off} [m], P_{on} e P_{off} [W] invece le diverse potenze. Il gas che si intende rilevare possiede una sezione d'urto di assorbimento relativamente più larga per λ_{on} di λ_{off} . Si può assumere infine che la differenza nei coefficienti di estinzione atmosferici sia:

$$\Delta\alpha = N\Delta\sigma [m^{-1}] \quad (2.22)$$

dove $N [Kg/cm^3]$ è la densità molecolare del gas e $\sigma [cm^2]$ è la sezione d'urto di assorbimento molecolare, vale inoltre

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}). \quad (2.23)$$

Assumendo che i coefficienti di backscatter atmosferico siano identici per le due lunghezze d'onda considerate, possiamo ricavare dall'equazione di 2.22 la

$$N = \frac{1}{2\Delta\sigma} \left[\frac{d}{dR} \ln \left(\frac{P_{on}}{P_{off}} \right) \right]. \quad (2.24)$$

L'equazione appena trovata mostra che il DIAL è una tecnica di misurazione in grado di auto calibrarsi, non dipende infatti dalle costanti dello strumento

Nella pratica i segnali dei sistemi LiDAR non sono considerato come funzioni continue ma come valori discreti. Esprimendo l'equazione appena trovata in funzione della risoluzione ΔR si ottiene

$$N = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left(\frac{P_{off}(R + \Delta R)}{P_{off}(R)} \cdot \frac{P_{on}(R)}{P_{on}(R + \Delta R)} \right). \quad (2.25)$$

L'equazione 2.25 può essere usata nella progettazione di LiDAR utilizzati per calcolare la risoluzione minima ΔR_{min} per una data $\Delta\sigma$. Generalmente il coefficiente di backscatter atmosferico è diverso per le due lunghezze d'onda λ_{on} e λ_{off} , esiste inoltre estinzione differenziale dovuta alle molecole d'aria, aerosol o altri gas presenti oltre a quello di interesse per la misurazione. Questo causa che l'equazione sopra trovata debba essere riscritta con degli accorgimenti, quindi

$$N = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left[\ln \left(\frac{P_{off}(R + \Delta R)}{P_{off}(R)} \cdot \frac{P_{on}(R)}{P_{on}(R + \Delta R)} \right) - \ln \left(\frac{\beta_{off}(R + \Delta R)}{\beta_{off}(R)} \cdot \frac{\beta_{on}(R)}{\beta_{on}(R + \Delta R)} \right) - D - E - F \right] \quad (2.26)$$

dove

$$D = \frac{\Delta\alpha_{mol}}{\Delta\sigma} \quad (2.27)$$

descrive come la variazione della sezione d'urto di assorbimento molecolare $\Delta\sigma$ influisce sulla variazione di assorbimento molecolare $\Delta\alpha_{mol}$, questo coefficiente è causato dall'estinzione delle molecole d'aria dovuto alla lunghezza d'onda. D è sempre positivo quando λ_{on} e λ_{off} . Il coefficiente

$$E = \frac{\Delta\alpha_{aer}}{\Delta\sigma} \quad (2.28)$$

è dovuto invece all'estinzione delle particelle di aerosol. E può assumere valori che vanno

da 0 a 12 ppbv ("parts per billion by volume") e dipende dalle proprietà ottiche dell'aerosol, le quali sono solitamente poco conosciute, questo rende il parametro E una causa importante di incertezza. Infine

$$F = \frac{N_{IG}\Delta\sigma_{IG}}{\Delta\sigma} \quad (2.29)$$

È provocato dall'estinzione di gas causa di interferenza. Anche questo parametro, come E può essere relativamente elevato. Questi coefficienti sono tutti inversamente proporzionali a $\Delta\sigma$, quindi aumentano al diminuire di $\Delta\lambda$. I termini D, E ed F vengono sottratti dall'equazione principale, essi non dipendono dalla concentrazione del gas di interesse e sono generalmente valori positivi e non trascurabili. Il valore N corrispondente alla densità molecolare viene solitamente riscritto come concentrazione o densità di massa C, moltiplicando N per la massa di una singola molecola. Un sistema DIAL è solitamente molto sensibile ai valori N o C. L'Ottimizzazione della scelta di λ_{on} e λ_{off} richiede di conoscere alcuni parametri a priori, come la massima risoluzione del sistema, lo spettro del gas che si intende misurare, la presenza di eventuali gas di interferenza e le aspettative di concentrazioni dei gas.

2.8 Apertura Sintetica

Per le aperture a fascio reale la risoluzione aumenta proporzionalmente alla larghezza dell'ottica usata a causa del limite di diffrazione, ottiche molto grandi però sono spesso poco pratiche per questo tipo di sistemi di rilevamento. Un metodo più efficiente per ottenere alta risoluzione è quello di utilizzare aperture sintetiche, ovvero muovere un'apertura di diametro minore o usare una matrice di aperture più piccole per sintetizzarne una unica di diametro maggiore. L'equazione della risoluzione trasversale, ovvero la capacità del sistema di distinguere tra due oggetti posti in direzioni trasversali è

$$\delta = \frac{R \cdot \lambda}{D_{eff}} \quad (2.30)$$

Dove R [m] è la distanza dall'oggetto, λ [m] la lunghezza d'onda del segnale e D_{eff} [m] il diametro effettivo dell'apertura. Si può espandere l'equazione precedente riscrivendo il denominatore come somma del diametro dell'apertura reale e il doppio della distanza L da cui il sistema si trova rispetto all'oggetto ottenendo

$$D_{eff} = 2L + D_{reale}. \quad (2.31)$$

Questo indica come la risoluzione trasversale è proporzionale sia a λ che all'apertura reale del sistema

2.8.1 LiDAR ad Apertura Sintetica (SAL)

Questa tipologia di sistemi LiDAR sfrutta il metodo del movimento trasversale di un'apertura più piccola per sintetizzarne una a diametro due volte maggiore. la tecnologia

dell'apertura sintetica fu sviluppata inizialmente per la tecnologia Radar, i concetti fondamentali sono quindi identici, Il sistema viene spostato da una piattaforma che si muove ad una determinata velocità, i dati delle diverse posizioni dell'apertura vengono raccolti e successivamente uniti per generare un'unica immagine del piano [6]. Per evitare fenomeni di disturbo è inoltre importante che le immagini del piano raccolte durante lo spostamento dell'apertura siano ben allineate, questo diventa più facile con l'aumentare della lunghezza d'onda λ . I sistemi SAL sono in grado di fornire immagini ad elevata risoluzione in due dimensioni: profondità ed angolazione, anche per grandi distanze, questo è possibile perché la risoluzione di profondità è proporzionale a

$$\Delta R = \frac{c}{2B}, \quad (2.32)$$

con B la banda del segnale. Una maggiore larghezza di banda, quindi, corrisponde ad una minore risoluzione e viceversa. I sistemi ad apertura sintetica permettono di usare lunghezze d'onda molto minori di quelle del visibile, ma il movimento dell'apertura deve comunque controbilanciare un possibile sfasamento maggiore di una frazione della lunghezza d'onda. Se ad esempio la lunghezza d'onda usata è dell'ordine dell'unità di micrometro, il movimento dell'apertura dovrà compensare per cambi di fase minori di un micrometro. Le capacità di alta risoluzione del SAL possono essere utilizzate oltre per applicazioni a lungo raggio, come la cattura di immagini dallo spazio, ma anche a corto raggio se è richiesta una elevata precisione angolare.

2.8.2 SAL Inverso

Il concetto è identico a quello dei sistemi SAL, a differenza che, invece del sistema LiDAR a muoversi, qui si ha quest'ultimo fisso ed è l'oggetto a fornire diversità angolare. La risoluzione rimane identica al SAL poiché la diversità angolare rimane invariata.

2.9 Multiple input multiple output LiDAR

Il sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output) LiDAR ricade sotto la categoria ad apertura sintetica, il che lo rende quindi intrinsecamente bistatico. Esso utilizza N sotto aperture di diametro minore per sintetizzarne una unica più larga. Avere molteplici di queste aperture permette di raccogliere dati da differenti regioni angolari simultaneamente, è possibile generare un'apertura larga tanto quanto l'intera matrice di sotto-aperture se il campo attraverso la matrice è noto. I segnali poi ricevuti da ognuno di queste vengono poi combinati in modo da formare una completa raccolta di dati che rappresenta lo spazio attorno al sistema. Tipicamente ogni sotto apertura possiede il proprio ricevitore e trasmettitore, posizionati in modo adeguato in modo da ottenere i dati dall'angolazione desiderata. Il numero di sotto-aperture può variare in base al tipo di applicazione, solitamente un numero elevato di queste significa una maggiore risoluzione angolare.

Capitolo 3

Sistemi di indirizzamento del fascio

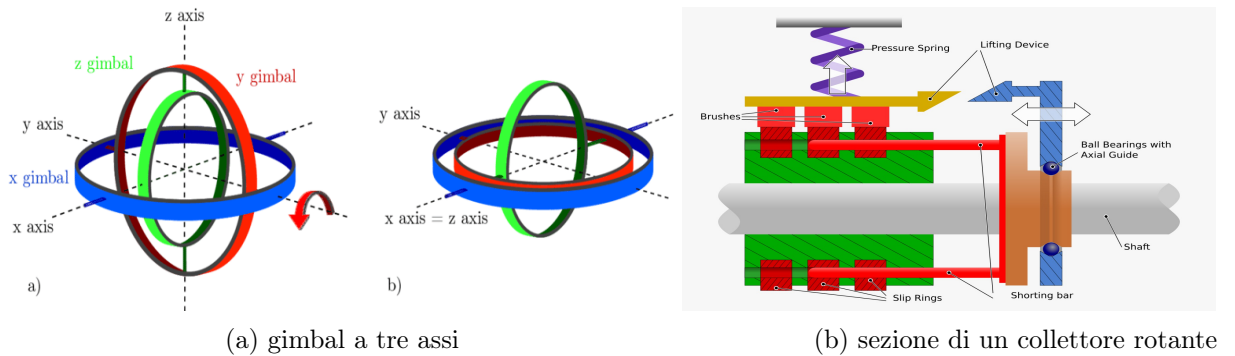
Questo capitolo vuole offrire una panoramica dei sistemi e tecniche che consentono di controllare direzione, fase e forma dei fasci luminosi. Per indirizzamento del fascio si intende il movimento di uno specchio o un elemento ottico trasmissivo con il fine di apportare un cambiamento alla traiettoria di un fascio luminoso. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati molteplici approcci di indirizzamento del fascio, è possibile suddividerli in due principali categorie: meccanici e non meccanici. Le due classificazioni presentano caratteristiche distintive, i sistemi meccanici richiedono una calibrazione regolare e possono essere soggetti a guasti ed usura, mentre quelli non meccanici offrono una maggiore velocità e precisione di scansione. Gli approcci non meccanici sono talvolta denominati “optical phased array” o OPA per via della loro caratteristica di cambiare l’angolo d’incidenza di un fascio ottico mediante la modifica del profilo di fase del fascio stesso [6].

3.1 Scanner meccanici

3.1.1 Gimbal

Il Gimbal o sospensione cardanica è un sistema meccanico complesso che consente un movimento accurato ed ampio lungo due o più assi distinti. Un gimbal a tre assi (vedi figura 3.1a), ad esempio, consente il movimento in qualsiasi direzione eccetto per le proprie zone di oscuramento, ovvero quelle aree del campo visivo parzialmente o completamente oscurate dalle componenti del sistema stesso.

Un problema fondamentale di questa tipologia di reindirizzamento del fascio è la difficoltà nell’avere collegamenti tra l’anello più interno e quello più esterno. Utilizzare un semplice cavo sarebbe inefficace, solitamente si opta quindi per sistemi “wireless” oppure attraverso l’impiego di collettori rotanti per ciascuno degli assi di rotazione del gimbal (vedi figura 3.1b) . Quest’ultima soluzione consente un collegamento costante attraverso due superfici conduttive, una statica ed una dinamica, che scorrono tra loro. Per concludere, quindi, i gimbal sono un eccellente metodo di indirizzamento quando si necessita di puntamento stabile e preciso ma non di tempi di risposta rapidi.



(a) gimbal a tre assi

(b) sezione di un collettore rotante

3.1.2 Fast steering mirror

Questi sistemi, solitamente denominati con l'acronimo FSM, sono dispositivi elettromeccanici utilizzati per regolare rapidamente l'orientazione del fascio luminoso. Essi sono o sostanzialmente costituiti da un piano di materiale riflettente che può essere spostato e ridirezionato lungo piccoli angoli mediante l'impiego di galvanometri, questi strumenti rilevano piccole variazioni di corrente elettrica e le traducono in momento magnetico attraverso l'impiego di spire conduttrici. Spesso questi strumenti possiedono una risposta in frequenza molto alta, fino ad 1 KHz, questo consente un puntamento rapido ed accurato. Il tempo di assestamento tra uno spostamento e l'altro è tipicamente della durata di 6 ms. Esiste un "trade-off" tra le dimensioni dello specchio e la velocità raggiunta, di fatto più questo è largo più tempo e potenza devono essere impiegati per muoverlo rapidamente.

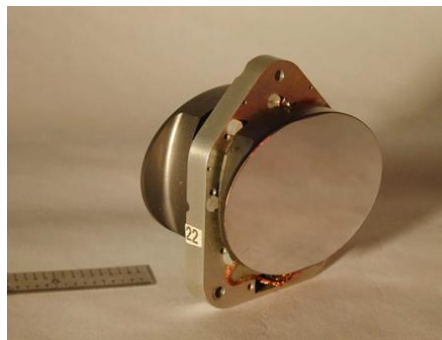


Figura 3.2: fotografia di un fast steering mirror

3.1.3 Rotating polygonal mirrors

Questa tipologia di dispositivi combina le proprietà riflettenti dei materiali con la dinamica di rotazione centrata lungo un asse. I poligoni utilizzati sono composti da materiale riflettente come vetro o metallo, in modo tale che il fascio luminoso che li colpisce venga

riflesso secondo la legge di Snell [7]. Una componente fondamentale di questi sistemi è il supporto rotante lungo l'asse centrale del poligono, questo deve consentire un movimento controllato e preciso soprattutto per elementi con un elevato numero di superfici riflettenti, quando queste sono numerose, infatti, la velocità ed il movimento necessario per passare da una faccia alla consecutiva diminuisce drasticamente. I vantaggi offerti da questa tecnica di indirizzamento sono molteplici, in particolar modo, la capacità di modificare l'angolo di incidenza del fascio in modo continuativo attraverso il movimento rotatorio. Un concetto da sottolineare quando si parla di questo tipo di sistemi è che l'angolo di deviazione del fascio, ovvero l'angolo attraverso il quale il fascio si sposta rispetto alla superficie dal quale è stato emesso, è sempre il doppio dell'angolo di rotazione meccanica del poligono.

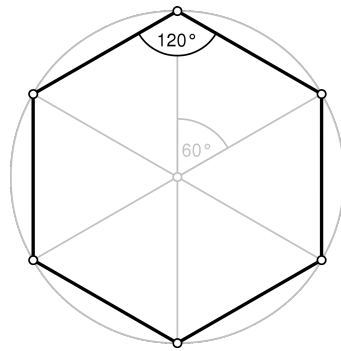


Figura 3.3: poligono a sei facce

Considerando un poligono a sei facce come quello in figura 3.3 composto da triangoli isosceli, è possibile notare come la lunghezza della base di ciascun triangolo equivale a $x = 360/\text{numero di lati}$, mentre l'altezza è data da

$$y = \frac{x}{\tan \theta}. \quad (3.1)$$

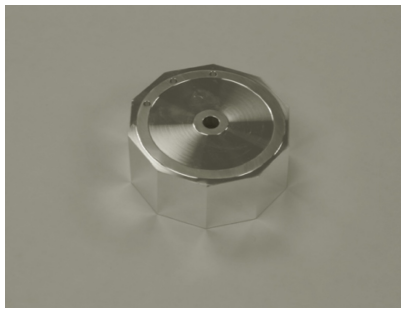
L'equazione descritta può essere utilizzata per determinare il diametro di un poligono data la lunghezza del suo lato $d_{\text{ lato}}$ [m]. È possibile ora definire N_{lati} come il numero totale di lati e $d_{\text{ fascio}}$ [m] il diametro del fascio luminoso. È possibile ora determinare l'efficienza come

$$S_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{side}}}{30} \cdot \frac{d_{\text{side}} - d_{\text{beam}}}{d_{\text{beam}}}. \quad (3.2)$$

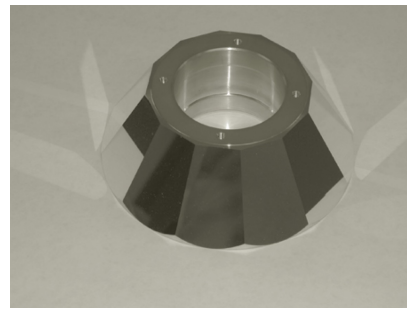
Utilizzando questa formula è possibile redigere una tabella (vedi figura 3.5) che mostra i vari valori di efficienza comparati ai diversi tipi di poligoni.

Esistono svariate tipologie di specchi poligonali, le quali si differenziano per la loro disposizione delle facce. Le categorie principali che verranno qui analizzate sono: prismatici, piramidali, monogoni e irregolari. Gli specchi prismatici possiedono un numero di facce equidistanti e parallele tra di loro e rispetto all'asse di rotazione, tra tutti sono

quelli con un rapporto costo efficienza maggiore. Per piramidali si intendono quei poligoni con facce piramidali regolari inclinate di 45 gradi rispetto all'asse di rotazione. Questo tipo di poligoni viene usato principalmente quando il fascio di ingresso è parallelo all'asse di rotazione. Per quanto riguarda la classe dei monogoni, anche denominati specchi troncati, sono costituiti da una sola faccia centrata all'asse di rotazione, il fascio che colpisce questi specchi viene ridiretto verso il monogono e lungo quindi l'asse di rotazione. Per via della loro conformazione questa categoria non si può definire effettivamente un poligono, tuttavia, essi costituiscono comunque un notevole sottoinsieme. I poligoni irregolari, infine, si caratterizzano per il fatto di possedere un numero di facce con angolazioni tutte differenti.



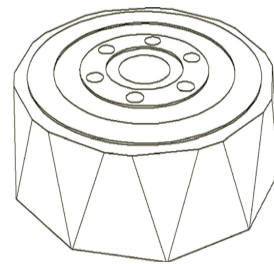
(a) poligono regolare



(b) poligono piramidale



(c) monogono



(d) poligono irregolare

Figura 3.4: diverse tipologie di poligoni rotanti

Side length (cm)	# of sides	Diameter (cm)	Scan efficiency for a 2-cm-diameter beam (full beam)	Scan efficiency for a 2-cm-diameter beam (half beam)	Scan efficiency for a 5-cm-diameter beam	Scan efficiency for a 5-cm-diameter beam (half beam)
5	12	37.32	8.00%	24.00%	0.00%	0.00%
5	18	56.72	12.00%	36.00%	0.00%	0.00%
5	24	75.96	16.00%	48.00%	0.00%	0.00%
5	30	95.14	20.00%	60.00%	0.00%	0.00%
10	12	74.64	24.00%	32.00%	0.00%	20.00%
10	18	113.42	36.00%	48.00%	0.00%	30.00%
10	24	151.92	48.00%	64.00%	0.00%	40.00%
10	30	190.28	60.00%	80.00%	0.00%	50.00%
15	12	111.96	29.33%	34.67%	13.33%	26.67%
15	18	170.14	44.00%	52.00%	20.00%	40.00%
15	24	227.88	58.67%	69.33%	26.67%	53.33%
15	30	285.44	73.33%	86.67%	33.33%	66.67%

Figura 3.5: rappresentazione dei diversi parametri di efficienza in correlazione a diversi poligoni

3.1.4 Sistemi micro elettro meccanici

I sistemi di specchi microelettromeccanici o MEMS sono un metodo di indirizzamento del fascio luminoso di tipo meccanico, ciò significa che essi sono costituiti da strutture meccaniche dell'ordine di micrometri integrate su una superficie di silicio. Questi sistemi sono in grado di compiere piccoli e precisi movimenti grazie all'azione di dispositivi, detti attuatori, capaci di generare una forza in risposta ad un segnale elettrico. I vantaggi che questi sistemi presentano sono molteplici, in particolare, grazie alla piccola massa ed inerzia dei singoli componenti, la manovrabilità è elevata, inoltre costituiscono una valida alternativa ad altri sistemi per via del loro relativo basso costo di produzione ed alta integrabilità.

I sistemi di specchi microelettromeccanici sono tipicamente disposti in una matrice, la dimensione di quest'ultima è un indicatore di come gli elementi riflettenti sono organizzati lungo questa stessa, una matrice bidimensionale, ad esempio, consiste nella disposizione lungo un'area, scendendo di dimensione, una matrice unidimensionale rappresenta una disposizione lineare ed infine, una matrice zero dimensionale consiste in un singolo specchio [9].

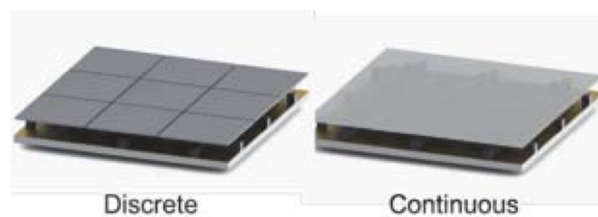


Figura 3.6: Specchio discreto e continuo

Esistono molteplici applicazioni di questa tecnologia, tutte hanno tuttavia in comune due elementi essenziali: una superficie riflettente, ed un sistema di attuazione. L'elemen-

to riflettente può essere realizzato in oro o alluminio e deve essere completamente piano, se questo è costituito da un singolo specchio si dice allora che è un sistema a superficie continua, se invece è realizzato dall'insieme di più superfici capaci di muoversi indipendentemente l'una dall'altra allora è detto discreto. La tipologia di attuazione, invece, può essere di diversa natura in base alle necessità dell'applicazione, i principali approcci sono: elettrostatico, elettromagnetico e piezoelettrico [9]. Per comprendere meglio il funzionamento dei MEMS è opportuno esaminare alcune delle tecniche di microfabbricazione maggiormente diffuse.

Tecniche di microfabbricazione

Esistono disparati metodi, infatti, attraverso i quali è possibile integrare le componenti meccaniche ed ottiche sul substrato di silicio, quello che verrà discusso in questa trattazione è la tecnica cosiddetta di "bulk micromachining", ossia la realizzazione di strutture attraverso un processo chiamato "etching", ovvero il deposito e rimozione selettiva di materiale su un substrato ("bulk") di una lastra di silicio. Esistono diverse tecniche di "etching", questa trattazione discuterà dell'approccio isotropico e quello anisotropico. Riguardo all'approccio isotropico, questo consiste nella rimozione uniforme del materiale in eccesso attraverso una reazione tra quest'ultimo e delle sostanze attaccanti. Questo metodo è utile alla creazione di strutture geometricamente arrotondate, tuttavia è possibile regolare la pendenza del profilo finale col controllo della velocità e la direzionalità di attacco.

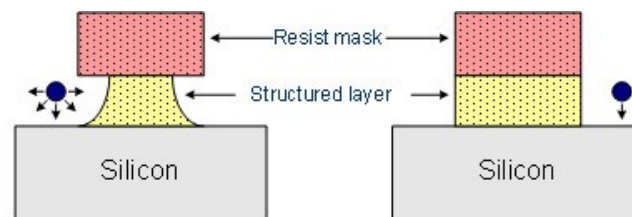


Figura 3.7: profili di etching, a sinistra il processo isotropico e a destra quello anisotropico

Gli agenti attaccanti usati in questo approccio sono tipicamente sostanze acide come l'acido nitrico (HNO_3) o acido fluoridrico (HF) diluiti in acqua, oppure l'acido acetico (CH_3COOH) [4]. Il processo si suddivide in quattro fasi: la preparazione della superficie di attacco attraverso l'applicazione di una maschera fotolitografica, il trasporto per diffusione dei reagenti alla superficie di silicio, la reazione chimica effettiva e l'allontanamento, sempre per diffusione, dei prodotti di reazione dalla superficie con conseguente pulizia del componente. Un'importante svantaggio di questa modalità di esecuzione è la forte dipendenza del processo dalle temperature e dell'agitazione dei reagenti che ne riduce di molto la precisione dell'incisione.

Passando ora invece a discutere dell'approccio anisotropico; questo sfrutta le proprietà cristallografiche del silicio per creare strutture con angoli precisi grazie all'utilizzo di reagenti alcalini come l'idrossido di potassio (KOH) in soluzione di acqua e alcol[4]. Anche

questa tecnica dipende fortemente dalla temperatura, nel senso però che più questa è elevata, minori saranno le imperfezioni lungo la superficie incisa, per questo il processo è compiuto a temperature elevate tra gli 80 ed 85 gradi centigradi.

Approcci di attuazione

Possiamo ora discutere dei diversi approcci di attuazione, ovvero le strategie e le metodologie utilizzate per controllare il movimento dei dispositivi MEMS. Quelli principali sono l'approccio quasi statico, analogico, digitale e a risonanza [2]. Per tutti questi casi la struttura dell'elemento riflettente rimane inalterata e si predilige l'uso di uno all'altro in base alle esigenze del progetto.

L'approccio a risonanza sfrutta un segnale di ingresso al sistema con frequenza vicina a quella naturale dell'elemento riflettente in modo da regolarne il movimento, il quale verrà fortemente amplificato. Le basse frequenze (minori di 5 kHz) consentono di raggiungere una larghezza di banda maggiore, è quindi possibile allontanarsi dalla specifica frequenza naturale a patto che abbastanza forza sia fornita dagli attuatori. Solitamente questi sistemi sono progettati per tipologie di "scanner" mono assiali come i LiDAR a rilevamento diretto. Gli specchi che lavorano invece ad alte frequenze (maggiori di 20 kHz) possiedono una banda più ristretta, il che li rende più delicati a variazioni nel sistema. È importante notare come la natura del movimento sarà sempre di tipo sinusoidale indipendentemente dal segnale di ingresso. Quando si parla invece di approccio quasi statico, si intende l'uso di una frequenza distante da quella naturale, la quale consente movimenti graduali e di natura non strettamente sinusoidale attraverso un uso maggiore degli attuatori. Altri approcci di attuazione sono quello analogico e digitale, il primo utilizza un segnale continuo variabile per effettuare spostamenti in qualsiasi direzione con un'ampia gamma di movimento, mentre il secondo, mediante un segnale discreto, consente di commutare tra un numero finito di posizioni, tipicamente queste sono lo stato di "on" e di "off".

Per quanto riguarda invece le modalità di attuazione, ovvero i diversi approcci tramite cui è possibile controllare un dispositivo MEMS col fine di eseguire specifici movimenti, queste si suddividono in varie categorie elencate precedentemente che verranno ora analizzate più approfonditamente.

La prima di queste è l'attuazione per via elettrostatica, questa si può suddividere a sua volta in due sotto categorie: gli attuatori a lamina sottile e gli attuatori a pettine. Entrambe generano una forza attrattiva tra due elementi conduttori nel momento in cui una tensione viene applicata, inoltre non è necessario che gli elementi dello specchio siano a contatto con la struttura per generare queste forze, infine, sono metodi di attuazione unipolari, ovvero respingono o attraggono solamente in una delle due direzioni. Queste due tipologie si differenziano oltre per i diversi vantaggi anche per la loro geometria: la prima di queste è costituita da due lastre conduttrici di dimensioni arbitrarie, queste lastre devono essere ad una distanza tale da consentire alle forze elettrostatiche di agire tra di loro, quest'ultime non possiedono inoltre un rapporto di dipendenza lineare con la distanza tra le placche sono inoltre linearmente dipendenti. Gli attuatori a pettine invece sono più facili da controllare grazie alla loro particolare struttura, anche se questa ne limita significativamente la gamma di movimento ed eleva la complessità di fabbrica-

zione.

Un'altra tipologia di attuazione è quella di origine elettromagnetica, questi tipi di attuatori detti anche attuatori di Lorentz sono costituiti da molteplici spire avvolte attorno ad un corpo, solitamente lo specchio. Queste spire sono percorse da corrente la quale genera un campo magnetico che a sua volta genera in maniera proporzionale delle forze maggiori rispetto agli attuatori elettrostatici. Questi attuatori presentano tuttavia alcuni svantaggi, come ad esempio limiti di costruzione oppure l'aumento esponenziale di energia dissipata in calore con la diminuzione del diametro del filamento, particolare attenzione va inoltre posta riguardo alle interferenze che i campi magnetici possono provocare al resto del circuito.

L'ultima categoria riguarda gli attuatori piezoelettrici, questi sfruttano le proprietà di materiali quali quarzo o il piombo-zirconato di titanio (PZT) di espandersi e contrarsi quando sottoposti ad una differenza di tensione [1]. Questi attuatori possono lavorare a tensioni molto basse e dissipano poco calore e grazie alla loro semplice struttura possono raggiungere dimensioni estremamente minute, tuttavia, il processo di polarizzazione risulta relativamente complesso.

3.2 Scanner non meccanici

I sistemi trattati precedentemente offrono ottime soluzioni per quanto riguarda l'indirizzamento del fascio, tuttavia, un problema ricorrente in questi metodi è la necessità di una frequente manutenzione dovuta alle molteplici parti in movimento. I sistemi non meccanici, anche conosciuti come "optical phased array" (OPA), sfruttano le proprietà elettro-ottiche dei materiali per generare una differenza di fase del fascio luminoso consentendo il reindirizzamento [6].

3.2.1 Sistemi basati su "optical phase difference"

In ottica, la lunghezza del percorso ottico (OPL) è la distanza che un fascio di luce deve percorrere attraverso l'aria per creare la stessa differenza di fase che avrebbe se attraversasse un mezzo omogeneo. La differenza dell'OPL tra due traiettorie che passano attraverso mezzi con indici di rifrazione diversi è denominata OPD o "optical phase difference". Le tecniche successive fanno riferimento a sistemi basati su OPD, in questi sistemi la differenza ottica viene alterata in modo controllato attraverso specchi, prismi o altri mezzi per deviarne il fascio luminoso, generalmente gli strumenti che ne fanno uso sono compatti, leggeri e facilmente integrabili.

3.3 Modulo 2π

Questa tecnica di indirizzamento del fascio sfrutta le proprietà periodiche di un'onda elettromagnetica sinusoidale per ottenere un'elevata precisione e controllo.

L'indice di rifrazione di un prisma di vetro è maggiore di quello dell'aria, questo implica che la luce viaggia più lentamente dentro al prisma e sarà quindi rallentata rispetto a

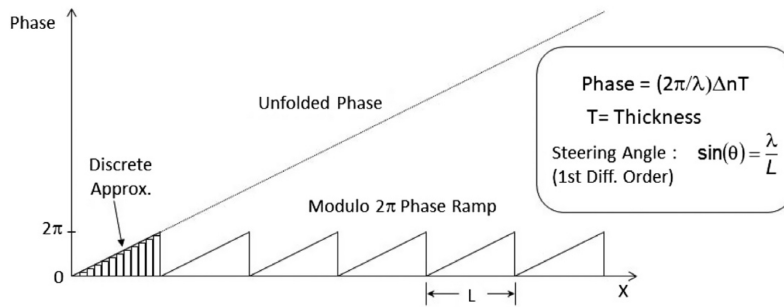


Figura 3.8: profilo di fase di un sistema basato sulla tecnica modulo 2π

quella che ne viaggia al di fuori, creando così una differenza di fase. Il fronte dell'onda uscente si trova quindi ad un angolo differente di quello entrante ed il fascio luminoso risulta così curvato, il grado di questa curvatura può essere determinato controllando lo spessore del prisma. Le onde sinusoidali hanno la seguente proprietà, moltiplicando la lunghezza d'onda per un numero intero si ottiene un'onda con le stesse caratteristiche di fase di quella originale. Quindi, all'interno prisma, ogni qual volta che la fase raggiunge un multiplo di 2π , è possibile sottrarre $2\pi n$, questo crea un profilo della fase a dente di sega (vedi figura 3.8) detto anche profilo di fase a modulo 2π che assomiglia al profilo che la fase avrebbe se la propagazione avvenisse attraverso un prisma con angolo di incidenza e d'uscita di 90° . Questa tecnica consente di utilizzare OPD a dimensioni molto ridotte, anche dell'ordine di una lunghezza d'onda. Tuttavia, il metodo con cui viene indirizzato il fascio è molto dipendente dalla lunghezza d'onda della luce incidente.

Il più grande angolo di indirizzamento possibile è determinato dalla dimensione della più piccola distanza di "reset" che può essere assunta dalla fase, ovvero la distanza tra due punti dopo la quale viene sottratto un multiplo di 2π dalla differenza di cammino ottico. Il seno dell'angolo è determinato dalla lunghezza d'onda diviso la distanza di "reset":

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{\Lambda}. \quad (3.3)$$

Questo indica che più Λ diminuisce più l'angolo massimo aumenta, ma il "reset" avviene sempre ogni $n\lambda$.

3.4 Cristalli liquidi

Questa modalità di indirizzamento del fascio sfrutta il fenomeno della birifrangenza applicato a cristalli liquidi nematici [6]. La birifrangenza è un fenomeno fisico che consiste nella scomposizione del raggio luminoso in due fasci, questo avviene quando un materiale presenta indici di rifrazione diversi lungo le differenti direzioni di propagazione del raggio.

Sono presenti elettrodi in cima e alla base della cella di cristalli liquidi, le molecole in assenza di campo elettrico sono orientate parallelamente a questo. Quando viene

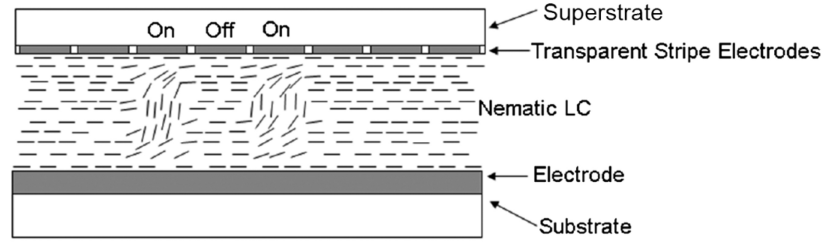


Figura 3.9: sezione laterale di un cristallo liquido che mostra l'orientazione delle molecole

applicato un certo livello di tensione si forma un campo elettrico interno alla cella che provoca la rotazione delle molecole, da qui segue una variazione dell'indice di rifrazione in funzione della posizione della luce polarizzata, il fascio luminoso quindi entra da un lato della cella e ne esce ridirezionato. La velocità di indirizzamento del fascio di questi sistemi dipende dalla rapidità delle molecole di cambiare orientazione. Il tempo necessario ad una cella per tornare al suo stato originale (in assenza di campo) è detto “turn-off relaxation time” ed equivale a

$$\tau_d = \frac{t^2 \gamma}{k \pi^2} [s], \quad (3.4)$$

nell'equazione 3.4 il valore t [m] corrisponde alla larghezza della cella, mentre k [N/m] alla costante elastica e γ [Pa · s] alla viscosità del materiale. Il “turn-on relaxation time” invece, è tipicamente minore del τ_d ed è determinato da

$$\tau_r = \frac{\tau_d}{\left[\left(\frac{V}{V_t} \right)^2 - 1 \right]} [s]. \quad (3.5)$$

È possibile notare come τ_r dipenda molto dal rapporto tra la tensione applicata e la tensione di soglia $\left(\frac{V}{V_t} \right)^2$, per tensioni elevate, infatti, il fattore -1 al denominatore diventa trascurabile. In sintesi, l'OPA a cristalli liquidi è un valido meccanismo di indirizzamento del fascio laser che offre tempi di risposta relativamente brevi e un'ottima precisione.

3.5 Ulteriori tecniche di indirizzamento del fascio

3.5.1 Electrowetting

L'electrowetting sfrutta l'applicazione di tensione attraverso un elettrodo per manipolare accuratamente piccole quantità di liquido [3]. Il campo elettrico generato provoca la redistribuzione delle cariche e dei dipoli nel liquido, tipicamente acqua, cambiandone la tensione superficiale e di conseguenza anche l'angolo di contatto con la superficie solida. Solitamente l'elettrodo ed il liquido sono divisi da una superficie di materiale dielettrico, questo per evitare che l'acqua venga elettrolizzata prima che avvenga una variazione

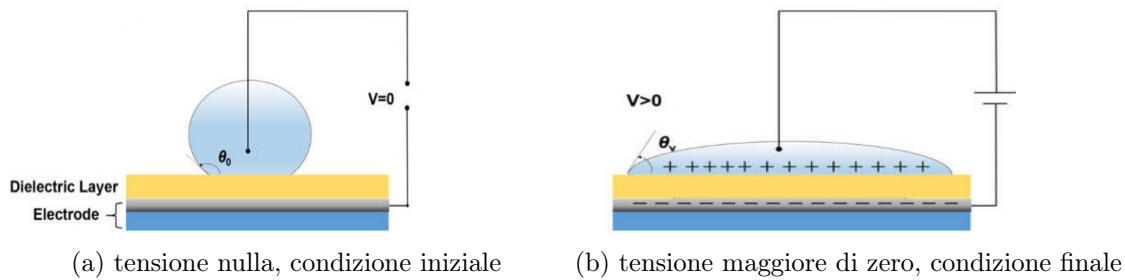


Figura 3.10: principio dell'electrowetting

dell'angolo di contatto e quindi eliminare fenomeni di elettrolisi non voluti. Uno schema del principio sopra citato è rappresentato in figura 3.10.

È possibile sfruttare questo fenomeno come tecnica di direzionamento del fascio nei sistemi di trasmissione LiDAR per ottenere velocità di risposta elevate per basse tensioni. Questa modalità prevede l'utilizzo di contenitori cubici di piccole dimensioni contenenti due liquidi differenti: il primo ha basso indice di rifrazione, come l'acqua, ed il secondo è un olio con indice di rifrazione maggiore, due dei lati opposti del cubo sono costituiti da degli elettrodi. Generando una differenza di tensione sufficientemente elevata tra le due superfici, è possibile utilizzare i liquidi come un prisma e modificarne la sua struttura variandone l'angolo di riflessione [6].

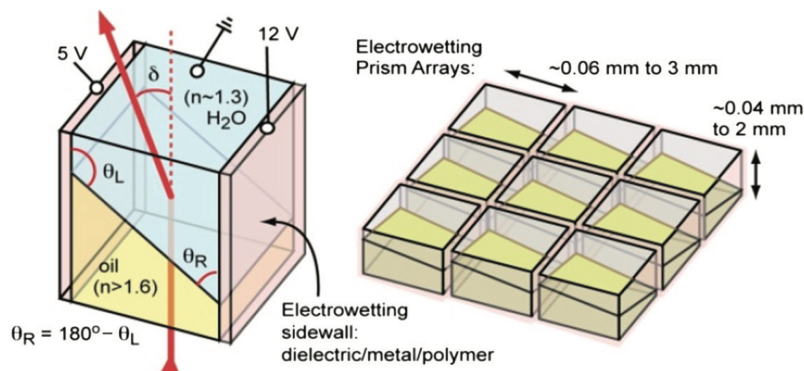


Figura 3.11: tecnica dell'electrowetting attraverso contenitori cubici

Attraverso questa tecnica è possibile modificare gli angoli al vertice del prisma di $\pm 45^\circ$, consentendo un massimo angolo di indirizzamento del fascio di $\pm 45^\circ$. Ciononostante, agli angoli massimi di deviazione, i rapporti di compressione e trasmissione causano una diminuzione non trascurabile dell'efficienza netta del dispositivo fino al 50%. Un secondo problema di questa tecnica è che per lunghezze d'onda dell'ordine di $2 \mu\text{m}$ l'acqua diventa un forte assorbitore ottico, per ovviare a questo problema è necessario sostituirla con un altro liquido, oppure diminuire le dimensioni del prisma.

3.5.2 Cristalli EO

I cristalli elettro ottici (EO) sono una tipologia di materiali con effetti molto particolari di manipolazione della luce. Quando questi cristalli sono sottoposti ad un campo elettrico, la loro struttura cristallina subisce una deformazione che altera, di conseguenza, la polarizzazione del fascio di luce che li attraversa. Grazie a questa loro importante proprietà i cristalli vengono utilizzati in molti campi dell'ottica e delle telecomunicazioni. Le tecniche di indirizzamento del fascio attraverso cristalli EO hanno la caratteristica di essere molto robuste ed affidabili. Un limite della tecnologia, tuttavia, è che risulta complesso ottenere un alto indice di deformazione con tensioni che stanno al di sotto della soglia di danneggiamento del cristallo. Tra i materiali più usati per la produzione di cristalli EO ci sono quelli lineari come il Litio Niobato (LiNbO₃), Arsenurio di Gallio (GaAs) e Titanato di Bario (BTO) e quelli con proprietà non lineari: KTN, PLZT e PMN-PT [6].

Cristalli EO basati su OPD

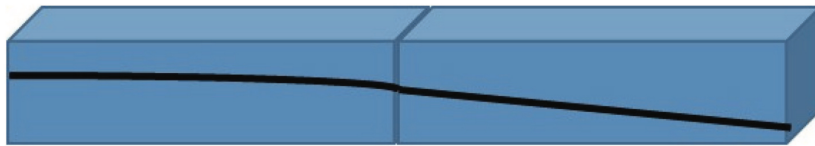


Figura 3.12: deflessione del fascio nel primo cristallo seguita da una seconda deflessione ulteriore nel cristallo successivo

Considerando un fascio laser che colpisce due cristalli EO posizionati in successione, entrambi con il medesimo indice di rifrazione, questo viene deflesso di un determinato angolo dal primo prisma per poi passare attraverso il secondo dove mantiene la stessa orientazione e direzione. Lo scopo di questa tecnica è quello di fornire il massimo indirizzamento possibile dato un certo angolo di deflessione, minimizzando al contempo il tempo di commutazione e le perdite dovute alle non idealità del prisma, inoltre, si vuole limitare il periodo di interazione tra il fascio ed il cristallo stesso, più questo aumenta, infatti, più l'angolo di curvatura sarà grande, aumentando la possibilità che il fascio colpisca un'altra delle superfici del prisma. Per evitare ciò è necessario mantenere l'angolo di deflessione entro un certo limite, per determinare il valore che questo angolo può raggiungere si usa la legge di Snell

$$\frac{\theta_0}{\theta_f} = \frac{n_f}{n_0}, \quad (3.6)$$

l'indice di rifrazione varia con la lunghezza d'onda ma, solitamente per il cristallo n_f È pari a 2.29 per i KTN, tra 2.45 e 2.5 per PMN-PT e 2.35 per SBN. n_0 invece è l'indice di rifrazione dell'aria [5]. Quando viene applicato un certo livello di tensione la struttura del prisma cambia secondo l'effetto EO, questo provoca che il fascio venga

reindirizzato. L'angolo di curvatura è proporzionale alla tensione applicata, per avere un certo livello di accuratezza è necessario possedere un elevato controllo della differenza di tensione fornita. Si può pensare il cristallo come un condensatore con capacità

$$C = \frac{\varepsilon_{r_{ij}} \varepsilon_0 L_0}{d} [F]. \quad (3.7)$$

Dove r_{ij} è una matrice che contiene le diverse costanti dielettriche ε_{ij} . La costante dielettrica può variare in base all'orientazione e al tipo di cristallo utilizzato. Si può osservare come per mantenere una bassa capacità sia necessario avere una bassa costante dielettrica, tuttavia, un'alta ε_{ij} consente un maggiore angolo di curvatura, il che è preferibile. Dall'equazione della capacità, infine,

$$C = \frac{q}{V} [F] \quad (3.8)$$

è possibile determinare la corrente necessaria per caricare il cristallo affinché avvenga l'effetto EO

$$I = \frac{CV}{t} [A]. \quad (3.9)$$

Capitolo 4

Conclusione

È stato osservato come la tecnologia LiDAR nel corso degli ultimi decenni ha avuto una notevole evoluzione esponenziale, soprattutto per quanto riguarda le tecniche di rilevamento e di direzionamento del fascio. Al giorno d'oggi, grazie alla sua versatilità ed accessibilità, i sistemi LiDAR si sono dimostrati strumenti fondamentali non solo nel campo della meteorologia, ma in una vasta gamma di settori che richiedono la raccolta di dati precisi ed affidabili. È stata esplorata una panoramica delle configurazioni principali dei sistemi LiDAR, partendo da una distinzione generale per poi addentrarsi sempre più nello specifico delle singole applicazioni. Sono state esplorate, infine, le molteplici tecniche di indirizzamento del fascio luminoso, ciascuna delle quali presenta caratteristiche uniche che le rendono distintive se applicate al giusto ambito. Guardando al futuro, questa tecnologia presenta numerose opportunità di sviluppo, grazie all'avanzamento nella ricerca scientifica questi sistemi diventeranno sempre più compatti ed accessibili, consentendo una loro crescita in settori dell'industria automobilistica, in particolare con la guida autonoma, o in quelli della robotica e della automazione.

Elenco delle figure

2.1	Spettro dell'energia vibro-rotazionale per una molecola di N_2 . v corrisponde alla frequenze f	12
3.2	fotografia di un fast steering mirror	20
3.3	poligono a sei facce	21
3.4	diverse tipologie di poligoni rotanti	22
3.5	rappresentazione dei diversi parametri di efficienza in correlazione a diversi poligoni	23
3.6	Specchio discreto e continuo	23
3.7	profili di etching, a sinistra il processo isotropico e a destra quello anisotropico	24
3.8	profilo di fase di un sistema basato sulla tecnica modulo 2π	27
3.9	sezione laterale di un cristallo liquido che mostra l'orientazione delle molecole	28
3.10	principio dell'electrowetting	29
3.11	tecnica dell'electrowetting attraverso contenitori cubici	29
3.12	deflessione del fascio nel primo cristallo seguita da una seconda deflessione ulteriore nel cristallo successivo	30

Bibliografia

- [1] Elena Aksel e Jacob L. Jones. «Advances in Lead-Free Piezoelectric Materials for Sensors and Actuators». In: *Sensors* 10.3 (mar. 2010), pp. 1935–1954. DOI: 10.3390/s100301935. URL: <https://doi.org/10.3390/s100301935>.
- [2] Guy Amor et al. «Multiple MEMS mirrors synchronization techniques, modeling, and applications». In: *MOEMS and Miniaturized Systems XX*. A cura di Wibool Piyawattanametha, Yong-Hwa Park e Hans Zappe. SPIE, mar. 2021. DOI: 10.1117/12.2577623. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2577623>.
- [3] Jae-Hun Kim et al. «Electrowetting-on-dielectric characteristics of ZnO nanorods». In: *Scientific Reports* 10.1 (ago. 2020). DOI: 10.1038/s41598-020-71017-7. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71017-7>.
- [4] G.T.A. Kovacs, N.I. Maluf e K.E. Petersen. «Bulk micromachining of silicon». In: *Proceedings of the IEEE* 86.8 (1998), pp. 1536–1551. DOI: 10.1109/5.704259. URL: <https://doi.org/10.1109/5.704259>.
- [5] Paul McManamon. *Field Guide to Lidar*. SPIE, mar. 2015. DOI: 10.1117/3.2186106. URL: <https://doi.org/10.1117/3.2186106>.
- [6] Paul F. McManamon. *LiDAR Technologies and Systems*. SPIE, lug. 2019. DOI: 10.1117/3.2518254. URL: <https://doi.org/10.1117/3.2518254>.
- [7] «Polygonal Scanners: Components, Performance, and Design». In: *Handbook of Optical and Laser Scanning*. CRC Press, lug. 2004, pp. 276–308. DOI: 10.1201/9780824759896-4. URL: <https://doi.org/10.1201/9780824759896-4>.
- [8] Phillip Sandborn. «FMCW Lidar: Scaling to the Chip-Level and Improving Phase-Noise-Limited Performance». Tesi di dott. EECS Department, University of California, Berkeley, dic. 2019. URL: <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2019/EECS-2019-148.html>.
- [9] Yuanping Song, Robert M. Panas e Jonathan B. Hopkins. «A review of micromirror arrays». In: *Precision Engineering* 51 (gen. 2018), pp. 729–761. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.08.012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.012>.
- [10] Claus Weitkamp, cur. *Lidar*. Springer-Verlag, 2005. DOI: 10.1007/b106786. URL: <https://doi.org/10.1007/b106786>.