

Holovideo (Elettro-olografia)

- Display 3-d
- Olografia
- Olografia elettronica
- CGH (Computer Generated Hologram)
- SLM (Spatial Light Modulator)
- DMD (Digital Micromirror Device)
- Televisione olografica

Display 3-D

➤ Stereoscopici

Elmetto
Anaglifi
Polarizzati
Shutter

Visione stereo
Un solo punto di vista
Indipendente dall'osservatore

➤ Autostereoscop.

multivisuale

Lenticolari
Barriera

volumetrici

Elicoidali
Lcd stack
Aerogel

olografici

Olografia vs Fotografia

- Fotografia: registrazione dell'intensità della luce, l'informazione di fase è persa
- Olografia: registrazione dell'interferenza della luce, l'ampiezza e la fase dei fronti d'onda non vengono perduti.

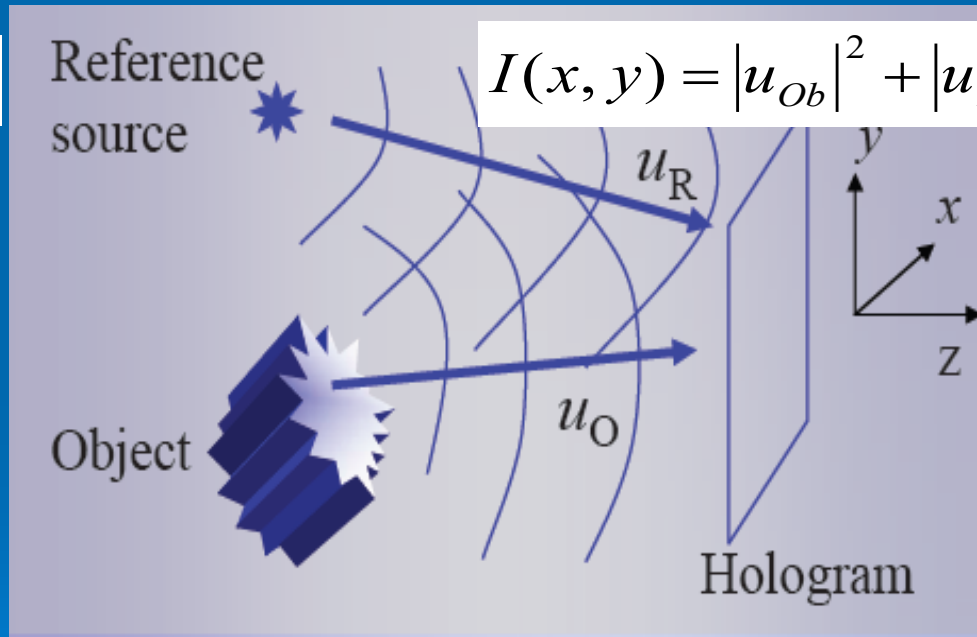


Olografia vs Fotografia

- Fotografia:
Registrazione dell'ampiezza
- Olografia:
Registrazione ampiezza e fase

$$u_R = u_0 e^{-j\psi(x,y)}$$

$$u_{Ob} = u_0 e^{-j\varphi(x,y)}$$



$$I(x, y) = |u_{Ob}|^2 + |u_R|^2 + u_{Ob}u_R^* + u_{Ob}^*u_R$$

$$I(x, y) = |u_{Ob}|^2 + |u_R|^2 + 2u_0u_{0R} \cos[\varphi(x, y) + \psi(x, y)]$$

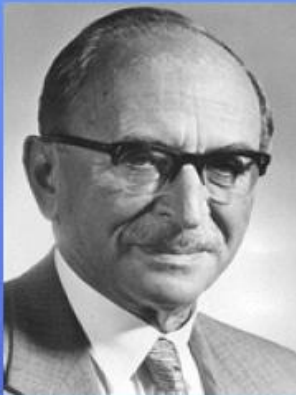
Termine che dipende dalla differenza di fase

Display olografici

- Unica tecnica di immagine che soddisfa tutte le esigenze della visione 3D
- Rispetto ai sistemi stereoscopici hanno tutte le visuali e non necessitano di occhiali
- Rispetto ai sistemi volumetrici permettono l'occlusione degli oggetti
- Sono una fedele riproduzione dei fronti d'onda luminosi riflessi dagli oggetti

Metodi di registrazione olografica

In-line
holography



Dennis Gabor

“A new microscope principle” *Nature* 161, 777, 1948

Off-axis
holography



Emmett Leith

“Reconstructed wavefronts and communication theory” *JOSA* 52: 1123-1130, 1962

Volume reflection
holography



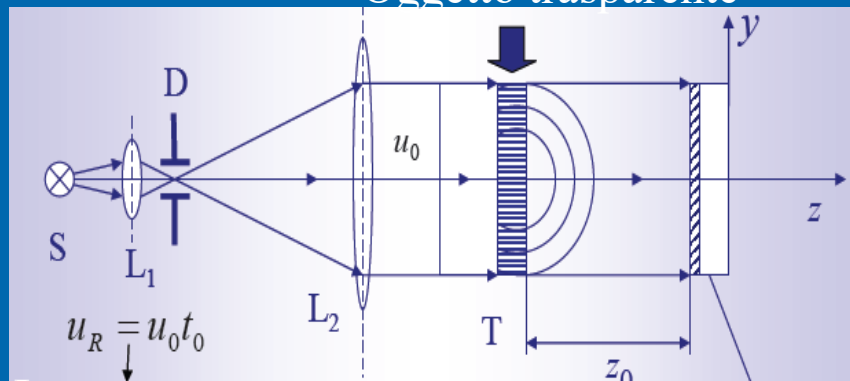
Yury Denisyuk

“On the reflection of optical properties of an object in the wave field of light scattered by it” *Doklady Akademii Nauk SSSR* 144, 1275, 1962

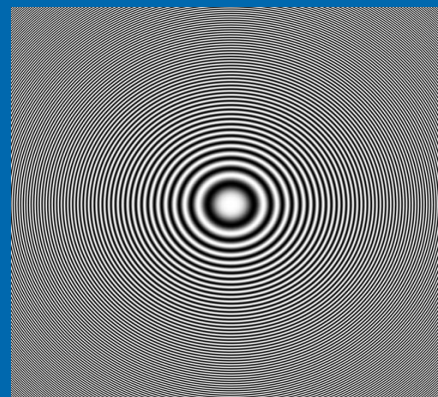
Gabor (on axis)

Registrazione

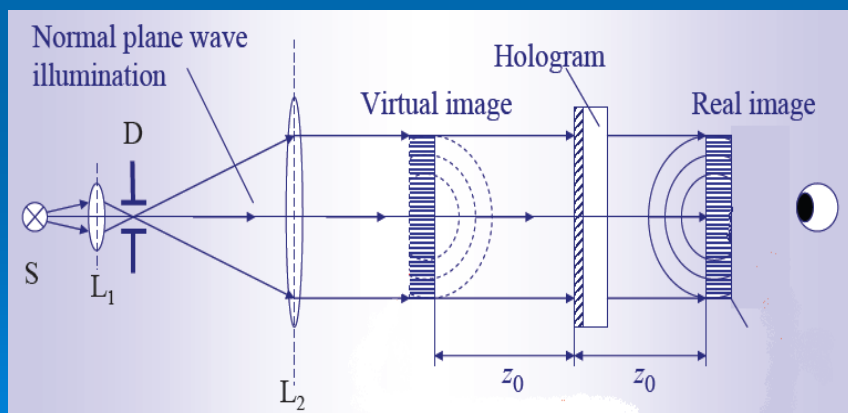
Oggetto trasparente



Luce trasmessa



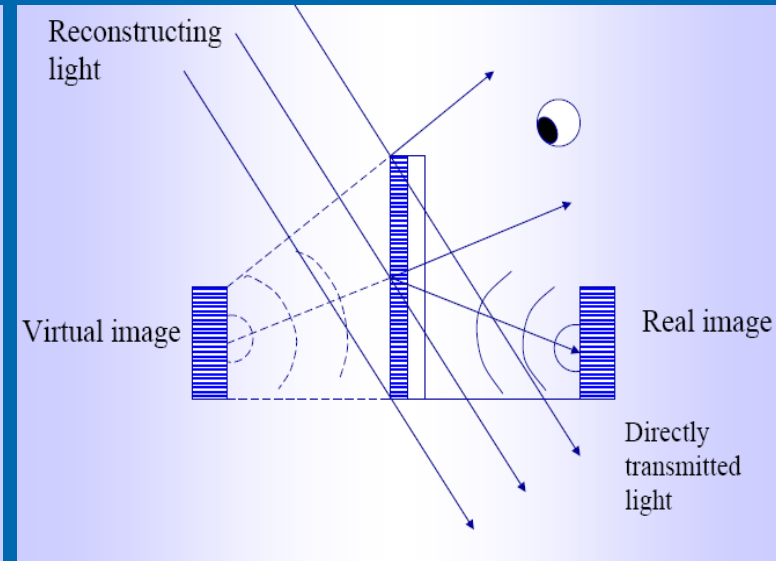
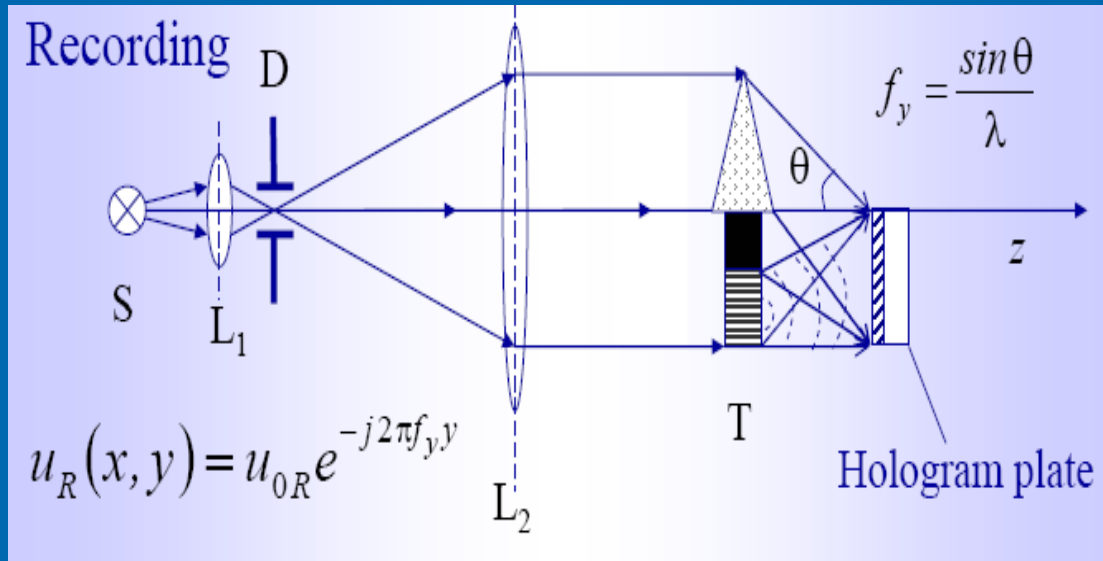
$$I(x, y) = |u_{obj}|^2 + |u_R|^2 + u_{obj}u_R^* + u_{obj}^*u_R$$



Immagini coniugate sovrapposte

$$u_{rec}(x, y)t(x, y) = u_{rec}t_{\beta} + \beta u_{rec}|u_{obj}|^2 + \beta u_{rec}u_{obj}u_R^* + \beta u_{rec}u_{obj}^*u_R$$

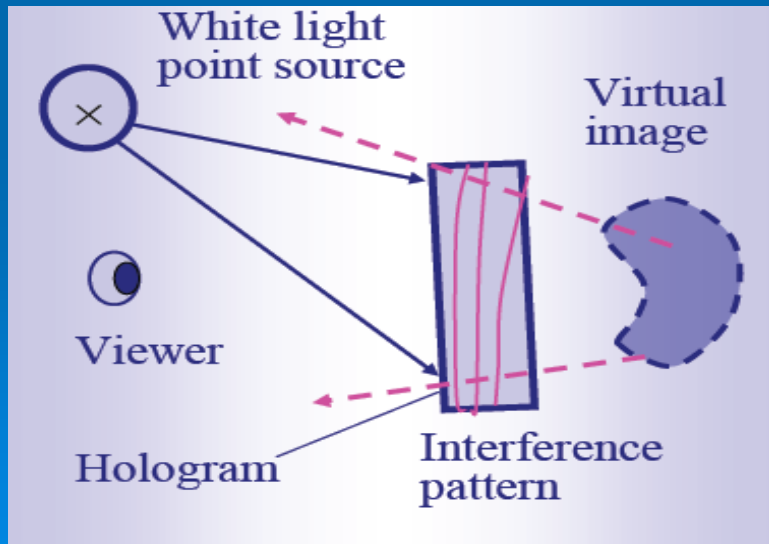
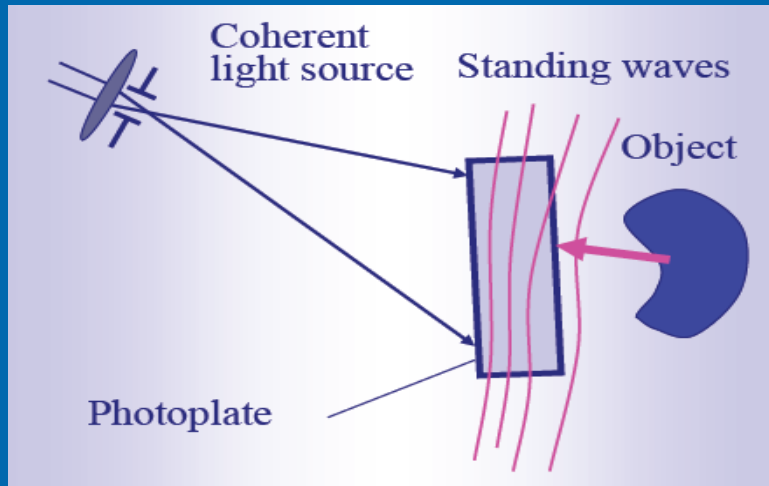
Leith e Upatnieks (off axis)



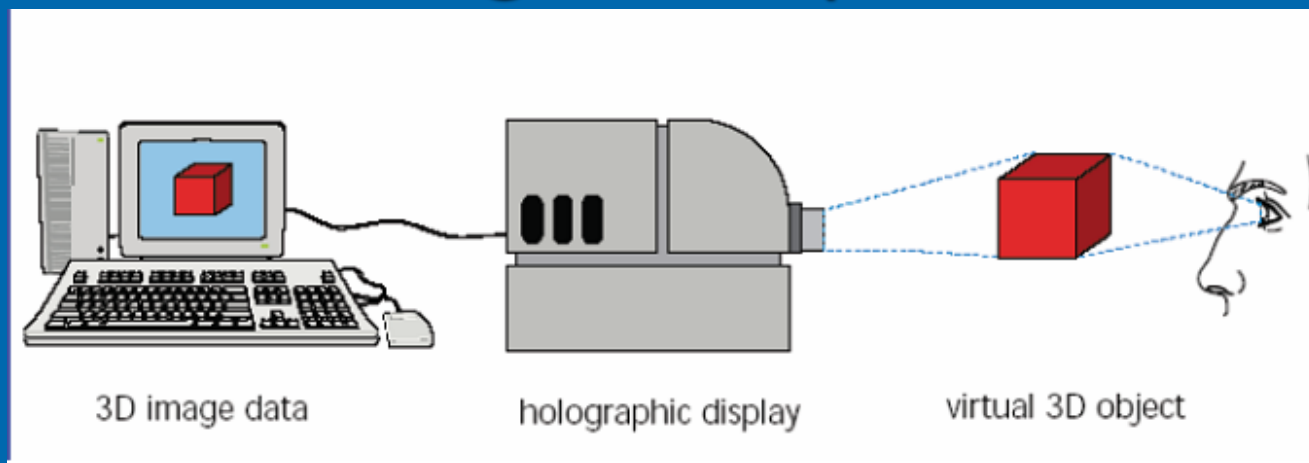
$$I(x, y) = u_{0R}^2 + |u_{obj}(x, y)|^2 + u_{0R} u_{obj}(x, y) e^{j2\pi f_y y} + u_{0R} u_{obj}^*(x, y) e^{-j2\pi f_y y}$$

$$I(x, y) = u_{0R}^2 + |u_{obj}(x, y)|^2 + 2u_{0R} u_0(x, y) \cos[2\pi f_y y - \varphi(x, y)]$$

Denisyuk (volume)



Elettro-olografia (holovideo)



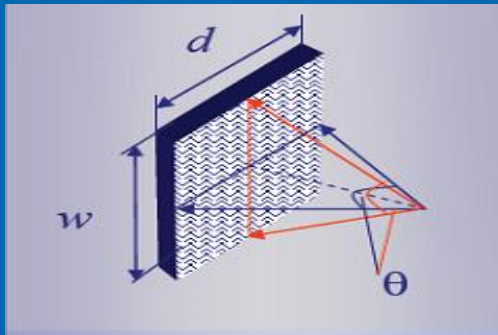
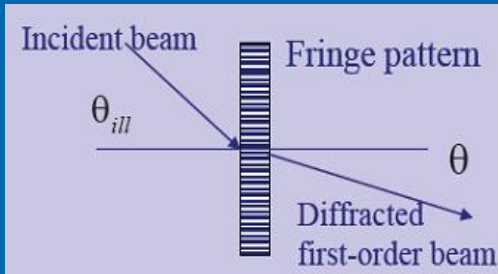
- Unità di processo 3-D, dove si determina la geometria spaziale della scena
- Generazione di un CGH (Computer Generated Hologram) dove, con differenti sistemi, si determina il processo di interferenza e lo si rende disponibile
- Uno SLM (Spatial Light Modulator) , sistema di scansione e lenti per visualizzare l'ologramma.

Generazione di Ologrammi elettronici

- **Parte computazionale** dove la descrizione 3-D dell'oggetto è convertita in frange:
 - simulazione dello scattering dagli oggetti della scena
 - propagazione nel piano dell'ologramma
 - calcolo dell'interferenza del fronte d'onda oggetto con raggio di riferimento
- **Parte ottica** dove la luce è modulata dalle frange:

L'intensità totale risultante (il modello di frange) è usato da un display olografico per modulare spazialmente un raggio di luce coerente con le frange ottenute,

Contenuto informazione olografica



Per un ologramma di dimensioni $w \times d$ il numero di campioni è:

$$N_{2d} = 4dw \sin^2 \theta / \lambda^2$$

Per $d=100\text{mm}$, $w=100\text{mm}$, $\lambda=633\text{nm}$, $\theta=30^\circ$, occorrono 25×10^9 campioni.

- L'angolo θ è determinato dalla equazione del reticolo:

$$f\lambda = \sin \theta - \sin \theta_{ill}$$

- Posto $\theta = 0$ e f_{max} la massima frequenza spaziale:

$$f_{max} \lambda = \sin \theta$$

- per il teorema del campionamento:

$$f_c = 2f_{max}$$

- Per una linea olografica di dimensione d sono quindi necessari:

$$N_{1d} = 2df_s = 2d \sin \theta / \lambda$$

Fase di Calcolo

- Grande numero di campioni richiesti per rappresentare la struttura microscopica
- Complessità di calcolo associata con la simulazione della propagazione della luce e sua interferenza
- Elevata ridondanza dell'informazione
- Elevata banda passante necessaria

Ridondanza di informazione

- Una riga televisiva monocromatica con 1024 pixel a 8 bit occupa 1 kB di memoria ed è indipendente dalla sua dimensione
- Una hololinea corrispondente a 50cm di larghezza con un campionamento di 1000lpm necessita di 1mB circa.

Complessità di calcolo

Formula base per il calcolo di un CGH

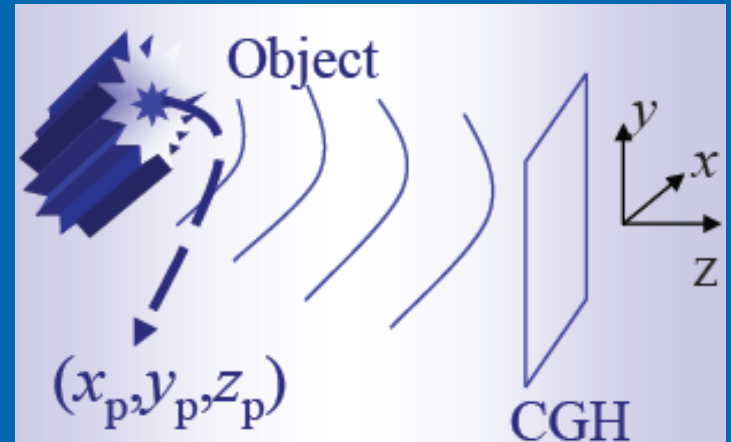
$$I(x, y) = \sum_p^{N_p} A_p \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[z_p + p^2 \frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{2z_p} \right] \right\}$$

A_p = intensità nel punto (x_p, y_p, z_p)

x, y = coordinata h e v del CGH (assunto $z = 0$)

N_p = numero di punti dell'oggetto 3D

λ = lunghezza d'onda



Supposto un oggetto con 1000 punti ed una immagine di 10x10cm
il CGH è composto di 10.000 x 10.000 campioni

Ogni campione richiede 1000 somme di termini Intensità

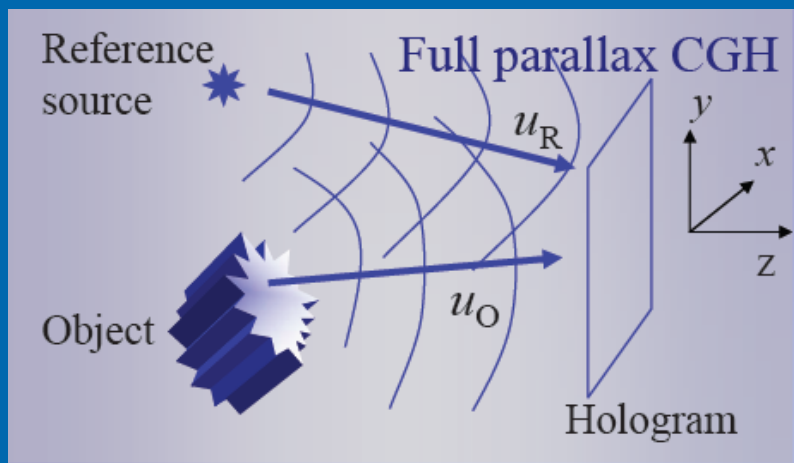
Totale operazioni 10^{11} da eseguire 30 volte al secondo (video rate)

Data rate totale 3×10^{12} byte per secondo

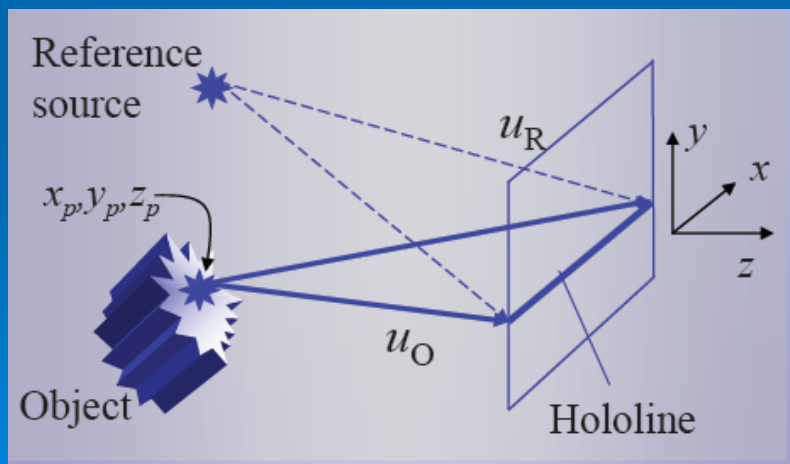
Riduzione dell'informazione

- Eliminazione della parallasse verticale
- Riduzione della zona di visione orizzontale
- Riduzione delle dimensioni dell'immagine
- Riduzione del contenuto di informazione, basata sui parametri della visione umana
- Campionamento non uniforme dell'ologramma
- Tecniche di codifica specifiche per l'olografia.

Eliminazione parallasse verticale



➤ Per un CGH di 10x10cm occorrono circa 100giga sample



HPO (Horizontal Parallax Only)

Il campionamento verticale è ridotto di 100 volte (circa 10 lpm)

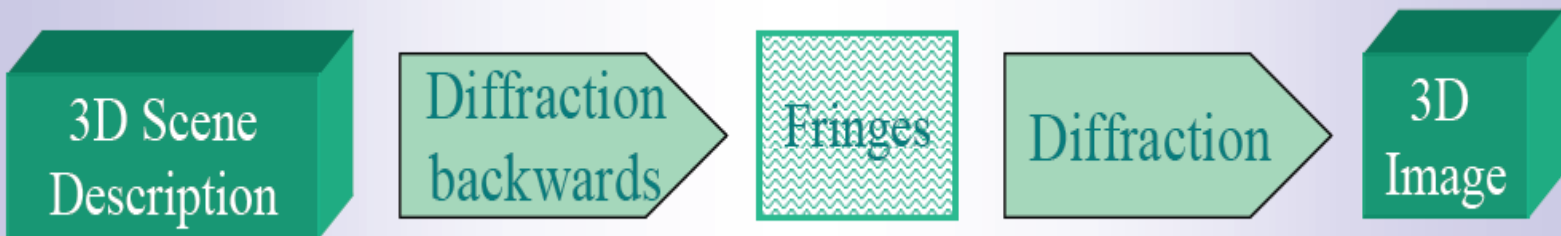
Il contenuto di informazione si riduce di 100 volte

Calcolo CGH

Basato sull'interferenza



Basato sulla diffrazione

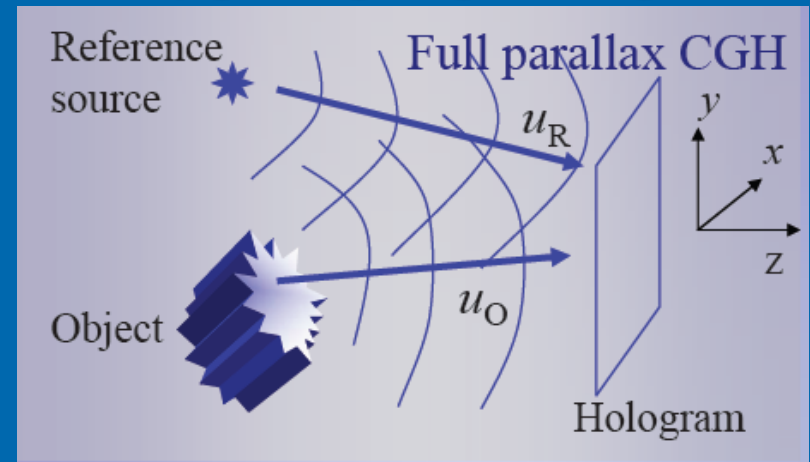


Calcolo CGH per interferenza

u_o e u_R mutualmente coerenti e monocromatici

La polarizzazione è assunta identica

u_R assunto come onda piana con angolo θ
con direttrice q



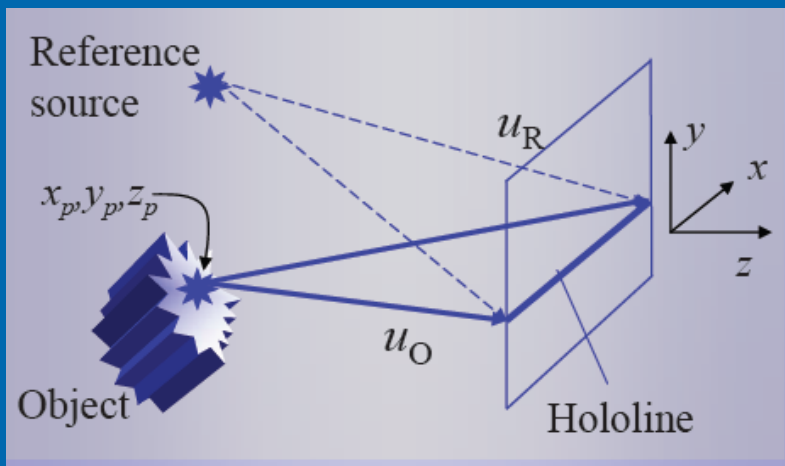
$$\vec{u}_R(\hat{q}, \vec{r}) = u_{0R} \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \hat{q} \cdot \vec{r} - j\varphi_0 \right]$$

Intensità onda di riferimento
Sul piano olografico al punto r

$$u_{sf}^p(\vec{r}) = u_0^p \|\vec{r} - \vec{r}_p\|^{-1} \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \|\vec{r} - \vec{r}_p\| - j\varphi_p \right]$$

$$u_o(\vec{r}) = \sum_p^{Np} u_{sf}^p(\vec{r})$$

$$u_{tot}(\vec{r}) = u_o(\vec{r}) + u_R(\vec{r})$$



$$u_{sf}^p(x, z) = u_0^p r_p^{-1} \exp\{-j\Phi_p\}$$

$$\Phi_p = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(x - x_p)^2 + (z - z_p)^2 \right]^{1/2} + \varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda} r_p(x, z) + \varphi_p$$

$$u_R(x, z) = u_{0R} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (q_x x + q_z z) - j\varphi_0\right]$$

$$u_{tot}(x, z) = \sum_p^{Np} u_{sf}^p(x, z) + u_R(x, z) = u_O(x, z) + u_R(x, z)$$

$$I(x, z) \propto |u_{tot}(x, z)|^2 = |u_O|^2 + |u_R|^2 + 2 \operatorname{Re}\{u_O u_R^*\}$$

Intensità

A

B

C

A interferenza oggetto-oggetto

B Onda di riferimento

C Valore reale dell'informazione olografica

Tecnica Bipolare (Burch e Lucente)

$$I(x, z) \cong 2 \operatorname{Re}\{u_O u_R^*\} = 2 \operatorname{Re}\left\{ \left[u_{0R} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta + j \phi_0 \right) \right] \times \sum_p^{Np} u_0^p \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_p - j \phi_p \right] \right\}$$

$$I(x, z) = 2u_{0R} \sum_p^{Np} u_0^p \cos\left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [x \sin \theta - r_p(x) + \psi_p] \right\}$$

Somma lineare di frange elementari

Tecnica interferenziale completa

- Rumore dovuto all'autointerferenza e al termine DC dovuto al riferimento
- Alto numero di calcoli con funzioni trigonometriche e radici
- Il modello dell'oggetto può essere solo analitico e descrivibile in termini di punti sorgente
- Difficoltà di codificare e ridurre l'informazione

Tecnica intensità bipolare

- Nessuna autointerferenza
- Nessun termine DC (Bias) e possibilità di usare l'intero range dinamico
- Somma elementare di frange in cui ogni frangia elementare rappresenta un elemento dell'immagine
- Uso di look-up table di frange elementari per il calcolo del CGH

Metodo di calcolo incrementale (metodo bipolare)

➤ Holoprimitives:

- Punti
- Segmenti
- Aree

Ogni primitiva è posizionata ad una certa distanza $(0.,0,z)$ e ha una orientazione specificata da un vettore normale n .

➤ Look-up Table

- Ogni frangia elementare descrive l'interferenza di un'onda piana con il fronte d'onda emesso dall'oloprimitiva
- L'orientamento e la distanza (profondità) determina quale frangia elementare usare e la locazione x,y è utilizzata per posizionare la frangia nel CGH finale



Diffraction-specific

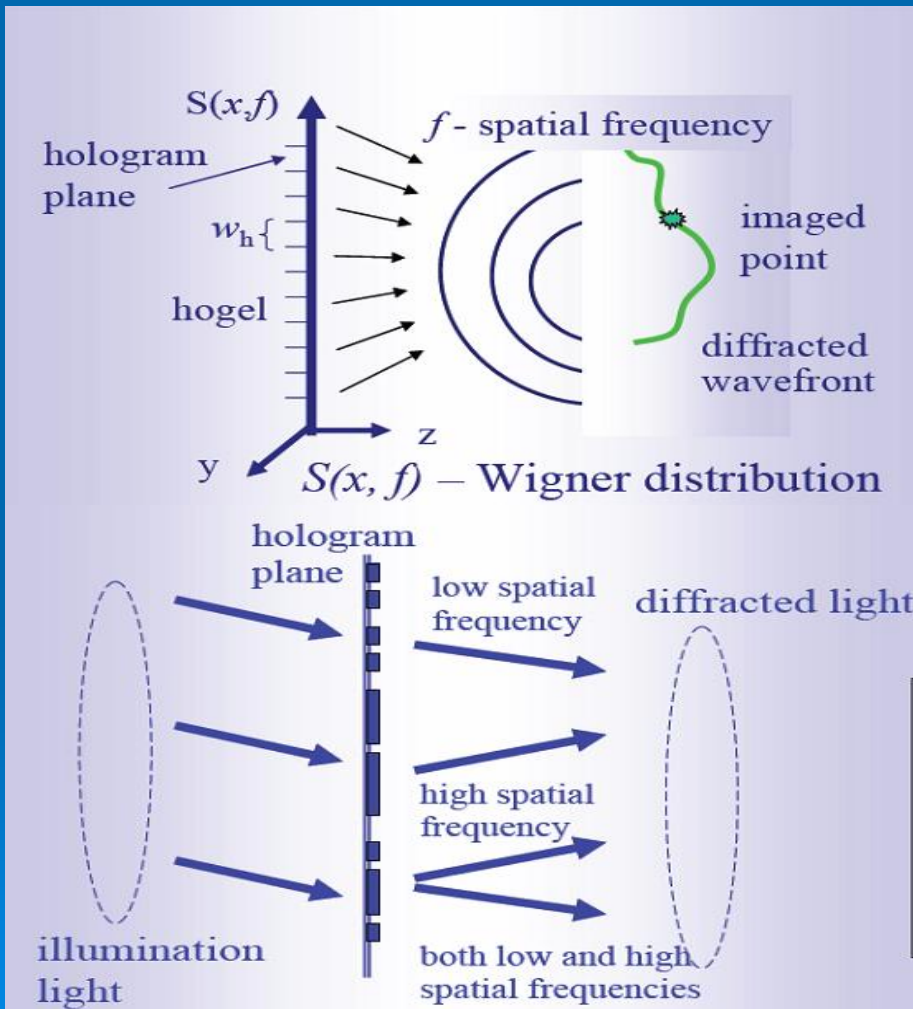
Interferenziale

- Si parte da un punto nello spazio oggetto e si determinano le frange sul piano olografico con metodi di ottica interferenziale
- Tali frange, opportunamente illuminate, generano un punto focalizzato nello spazio.

Diffrattivo

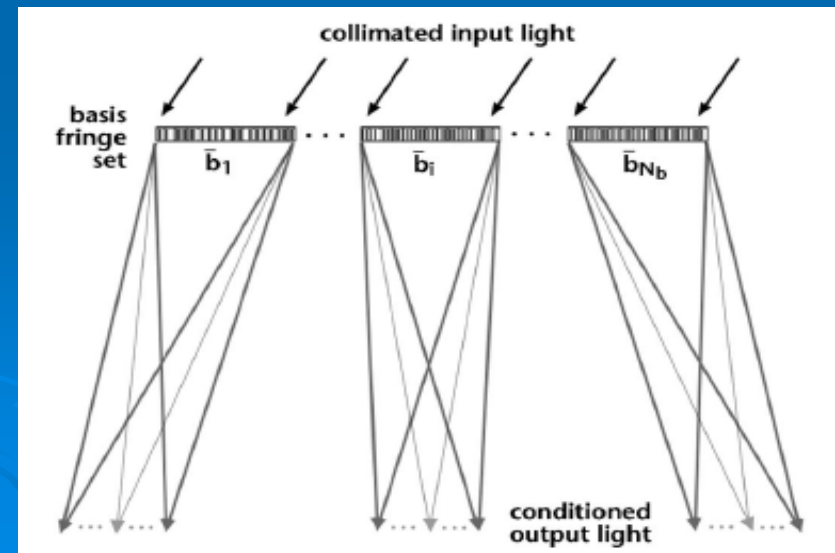
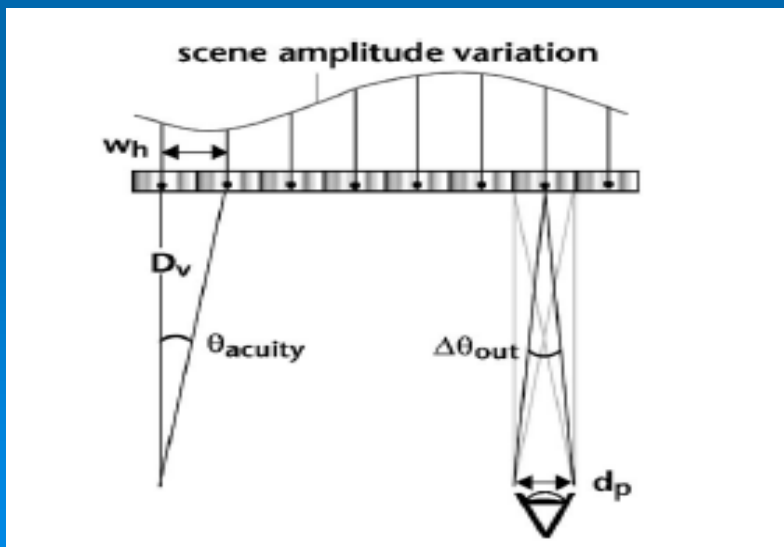
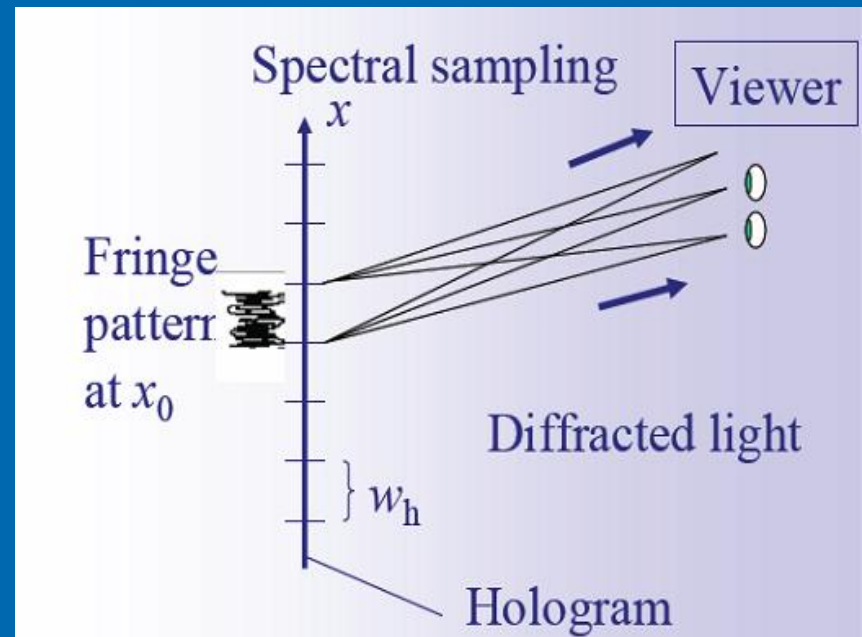
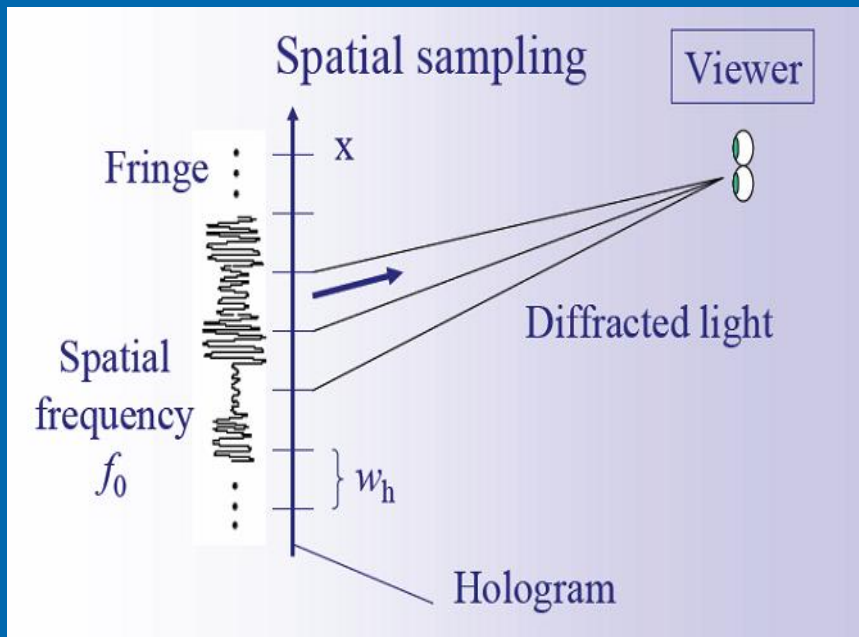
- Si parte dal punto nello spazio immagine e si determinano quali frange elementari sono necessarie perché la luce diffratta converga in quel punto con metodi iterativi.
- Il piano olografico viene diviso in parti regolari elementari detti Hogel (holographic element)
- Ognuno di questi hogel determina una specifica diffrazione della luce per uno specifico angolo
- Ogni elemento base (hogel vector) è dato dalla somma di vari hogel elementari

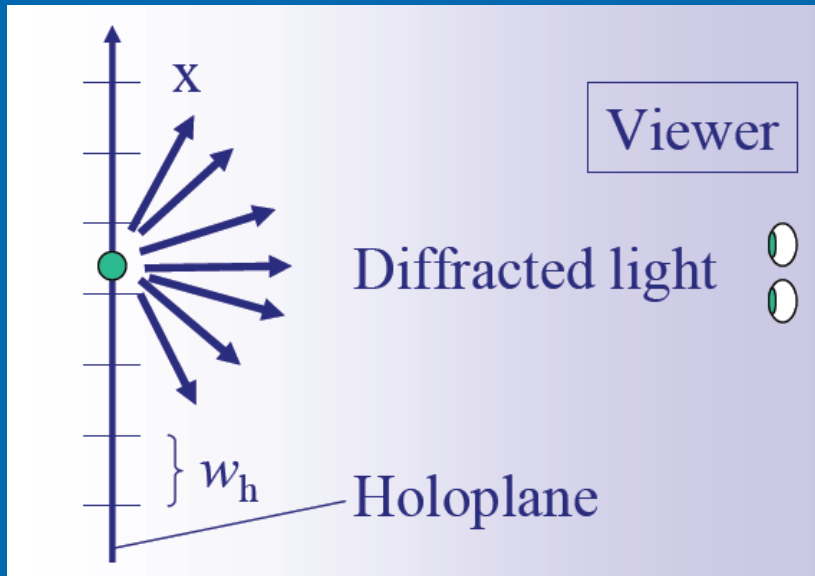
Diffraction-specific



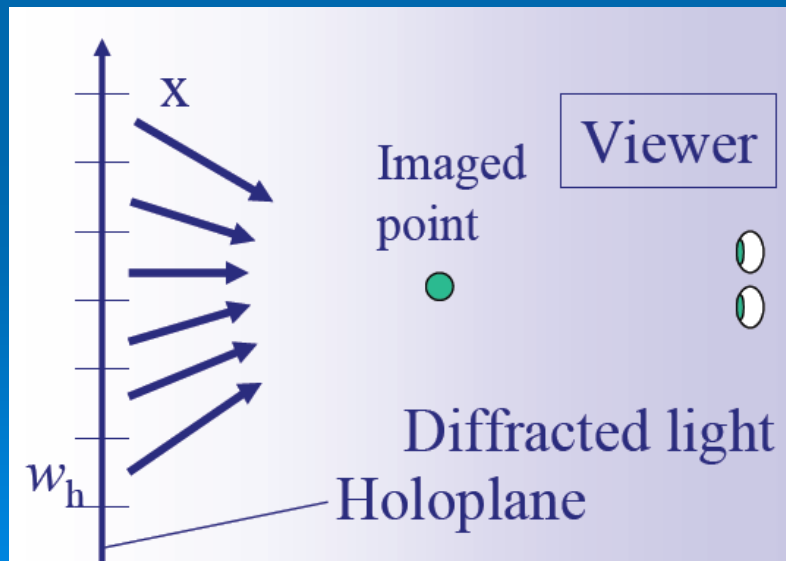
- Ogni hololinea è composta di un array di hogel che diffrangono la luce e formano un punto nello spazio.
- Il CGH è diviso in un array regolare di hogels di ampiezza w_h ognuno con N campioni.
- 1 linea = M hogels di ampiezza w_h con N_h campioni.
- Frange basi precalcolate sono combinate. Ogni frangia base rappresenta una parte dello spettro.

Campionamento spaziale e temporale





- Un punto sorgente sul piano olografico contribuisce ad una stessa quantità a tutti i componenti di un singolo hogel-vector che costituisce l'immagine di quel punto.

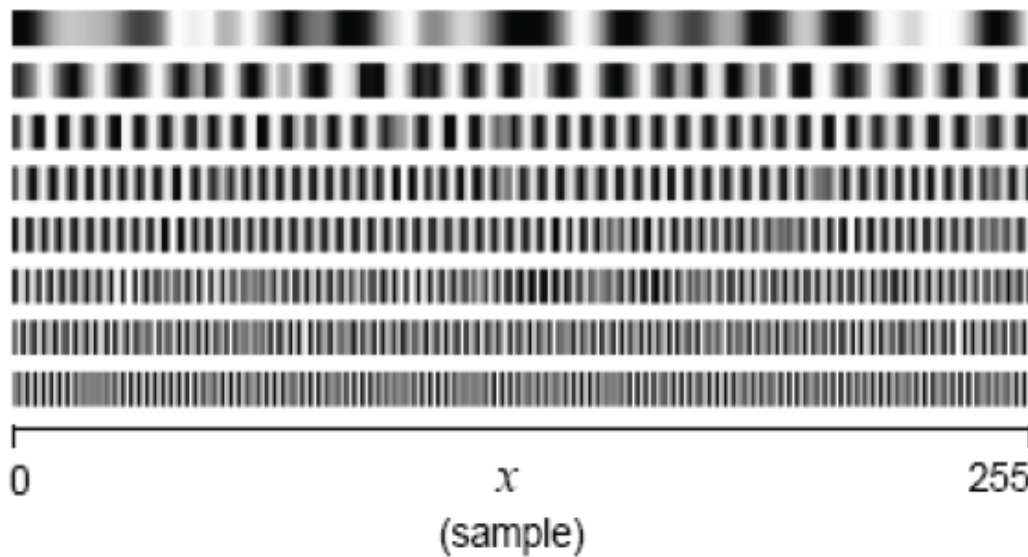


- Un punto nello spazio riceve contributi luminosi da uno o più hogel, quindi uno o più componenti di ogni hogel-vector deve includere un contributo per quel punto.

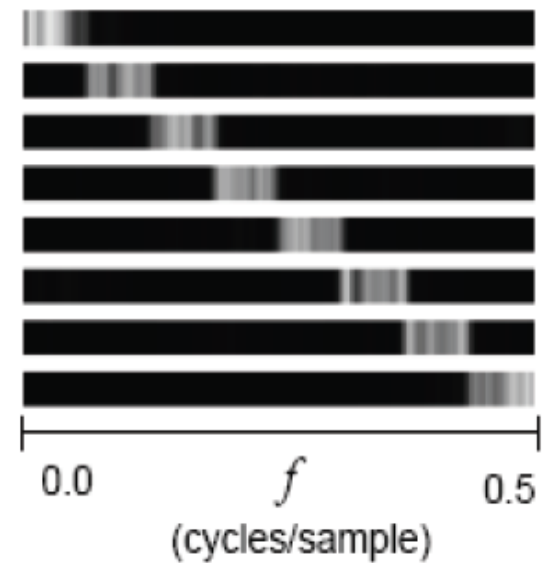
Frangé Base

Eight Basis Fringes

Basis Fringes: $\text{Re}\{u(x)\}$



Spectra: $|v(f)|^2$



Information content of an encoded fringe



$$CR = \frac{N_h}{N} = 2w_h \Delta f$$

If $N = N_h$ then $\Delta f = 1/2w_h$ and no overlapping of hogels will occur; $S(x, f)$ is recovered from S_{ij} through convolutions with sinc functions

$$S(x, f) = \sum_i^{M_h} \sum_j^N S_{ij} \text{sinc}(i - x\Delta f) \text{sinc}(j - fw_h)$$

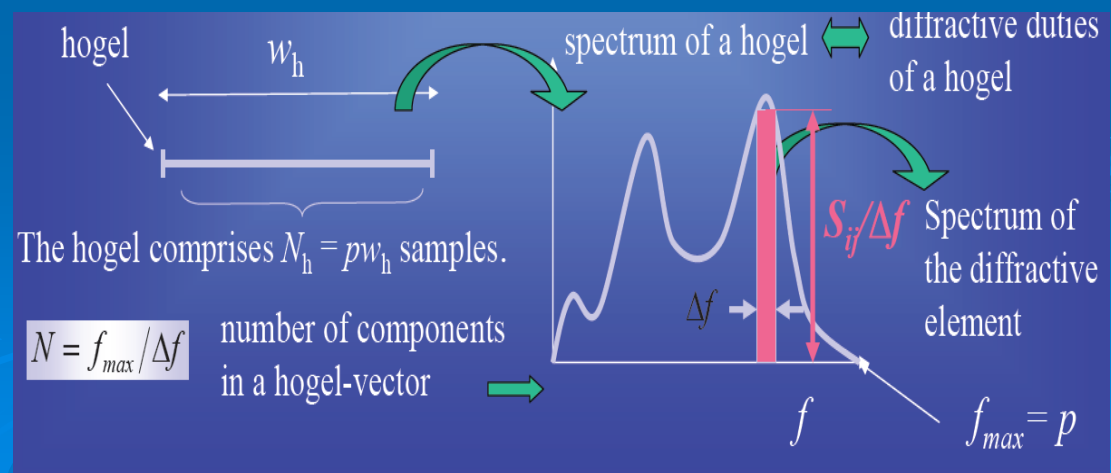
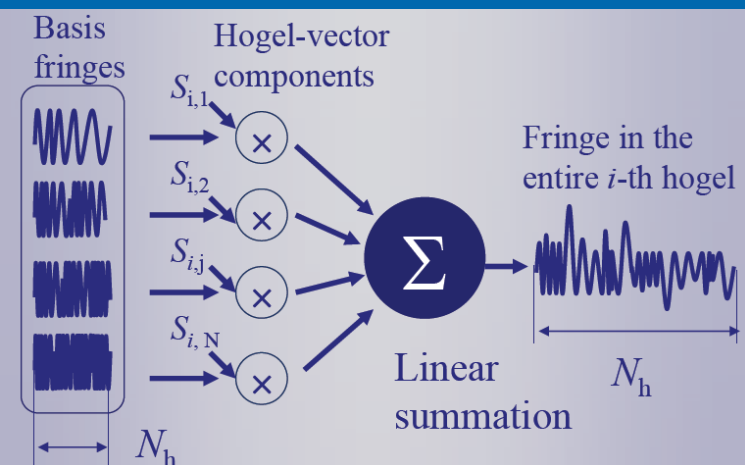
but in this case $\Rightarrow$ **CR (compression ratio) = 1**

Hogel-vector encoding reduces the number of symbols by sampling hogel spectra at larger frequency steps

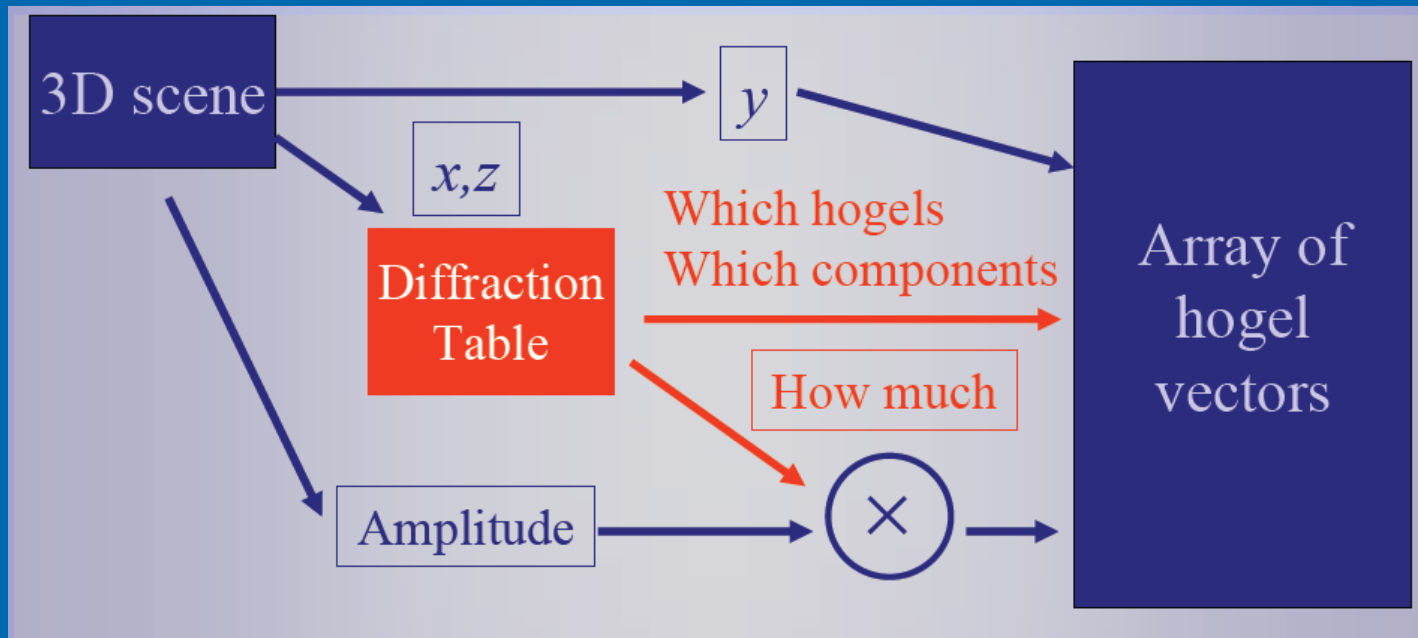
$$\Delta f > 1/2w_h$$

Riassunto proprietà hololinea

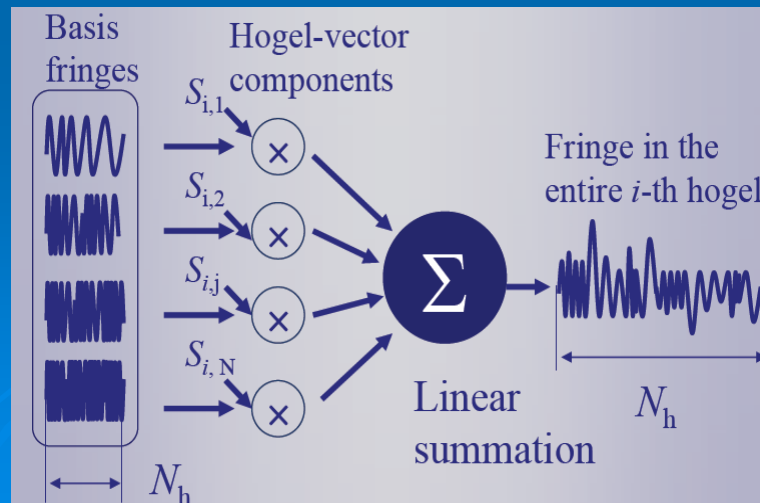
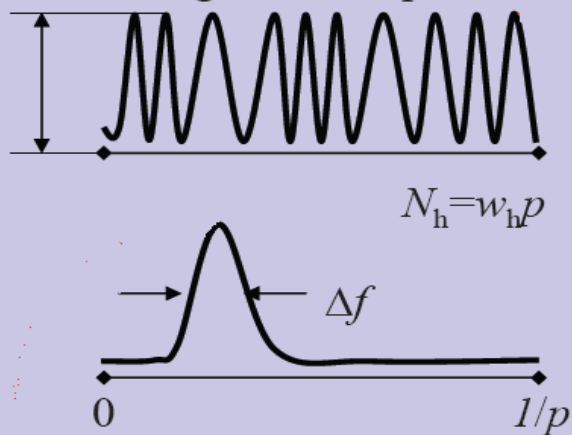
- Le frange sono trattate come un array di piccole frange di ampiezza w_h
- Ogni piccola frangia è chiamata hogel
- La frangia di ampiezza w_h consiste di N elementi diffrattivi
- Ogni elemento diffrattivo ha uno spettro omogeneo ed piccolo abbastanza da apparire come un punto
- N elementi diffrattivi formano un hogel-Vector
- Ogni componente dell'hogel-vector rappresenta la quantità di energia spettrale all'interno di una piccola parte dello spettro
- Ogni elemento diffrattivo corrisponde ad una frangia base nel dominio spaziale



Hogel-vector composition



Basis fringe and its spectrum

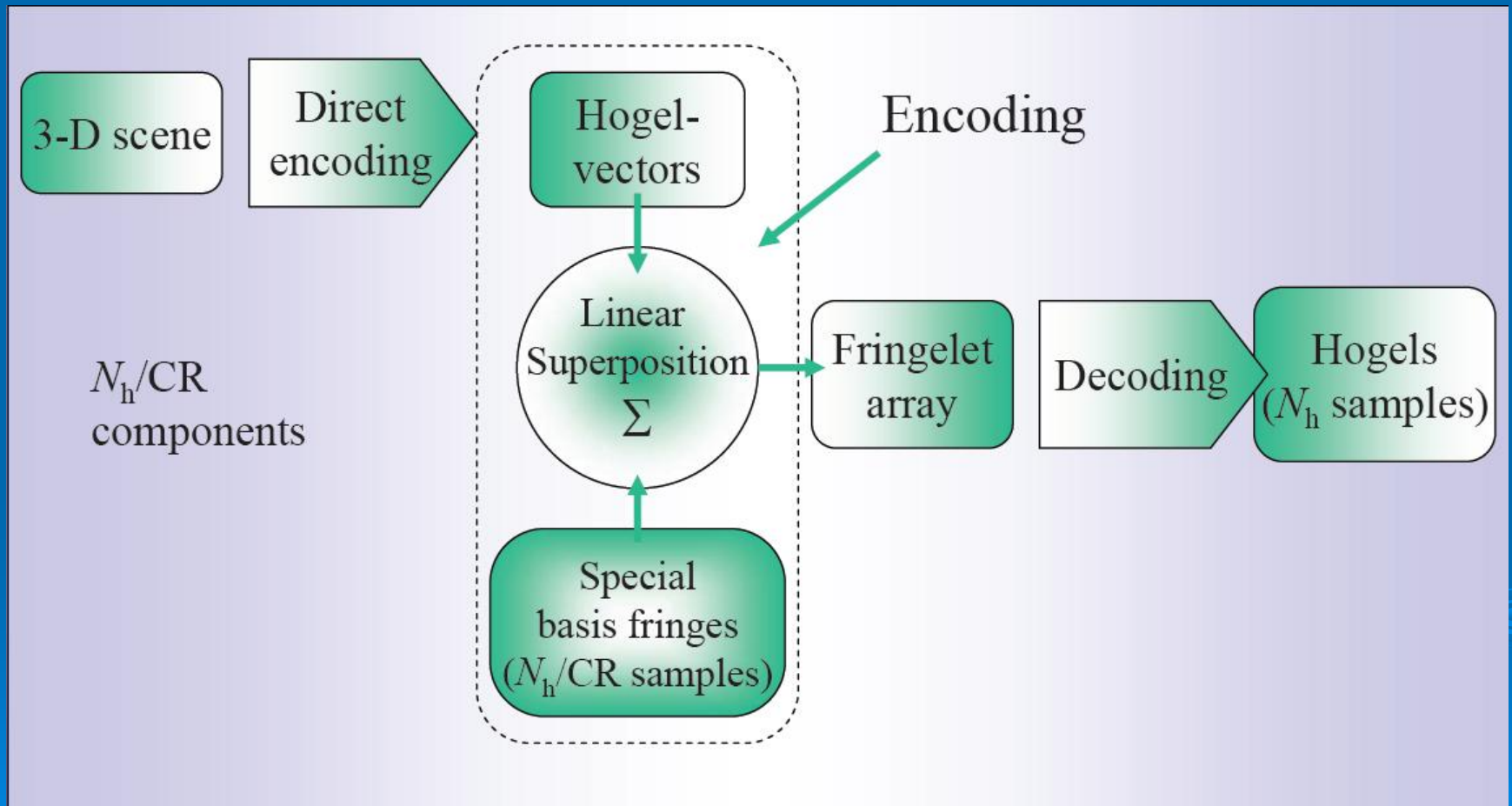


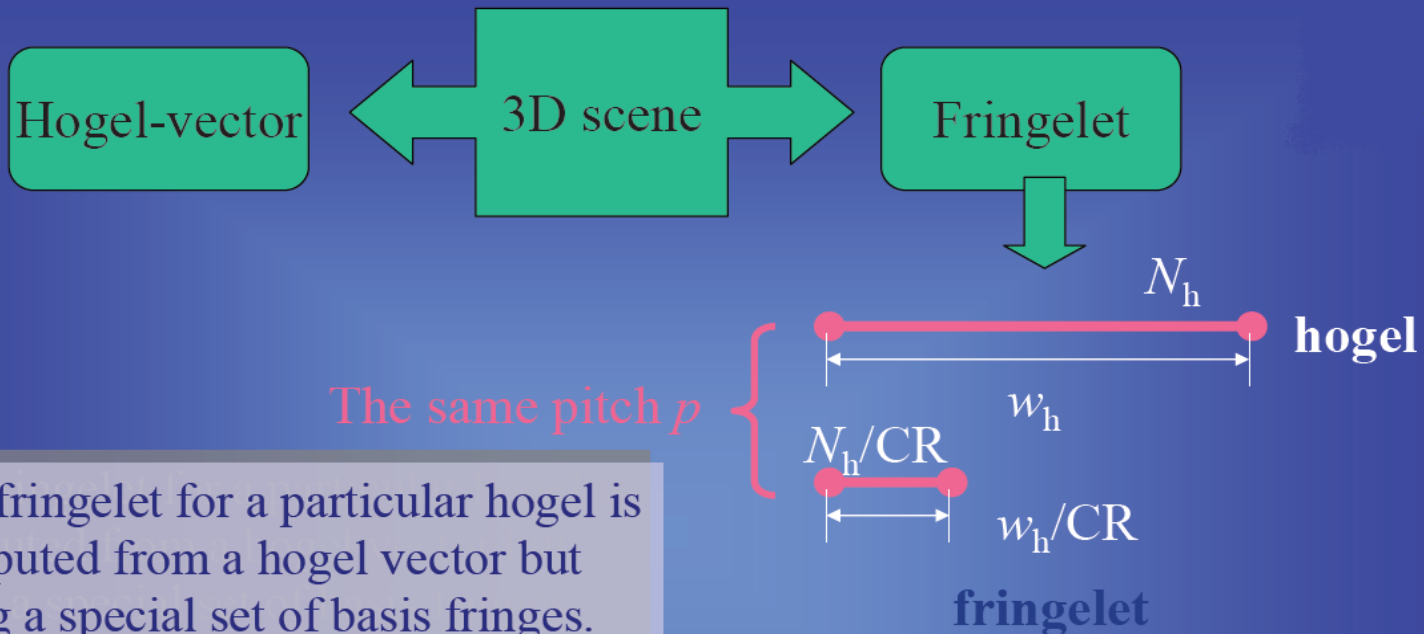
$$[fringe] = [h_1, h_2, \dots, h_N]$$

hogel-vector

$basis_1$
 $basis_2$
 $\dots$
 $\dots$
 $basis_N$

Fringelet





The fringelet for a particular hogel is computed from a hogel vector but using a special set of basis fringes. Each basis fringe has a width of N_h/CR samples, and is specially computed to contain spectral energy in a specific region.

- resembles a hogel fringe
- has spectrum that is closely related to the hogel spectrum

$$CR = \frac{\text{hogel width in samples}}{\text{fringelet width in samples}}$$

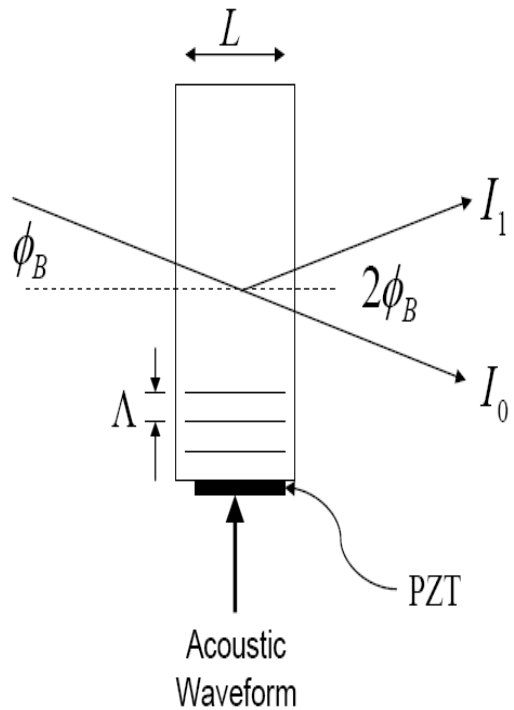
SLM (Spatial light modulator)

- Efficienza di diffrazione
- Risoluzione spaziale
- Banda passante
- Modulazione di fase e/o ampiezza



- AOM (Acoustic-optical Modulator)
- EOM (Electro-optical modulator)
- LCM (Liquid Crystal Modulator)
- DMD (Digital Micromirror Devices)

AOM



L = width of sound column.

Λ = wavelength of sound.

I_0 = zeroth order diffraction intensity.

I_1 = first order diffraction intensity.

$\phi_B = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right)$ = the Bragg angle.

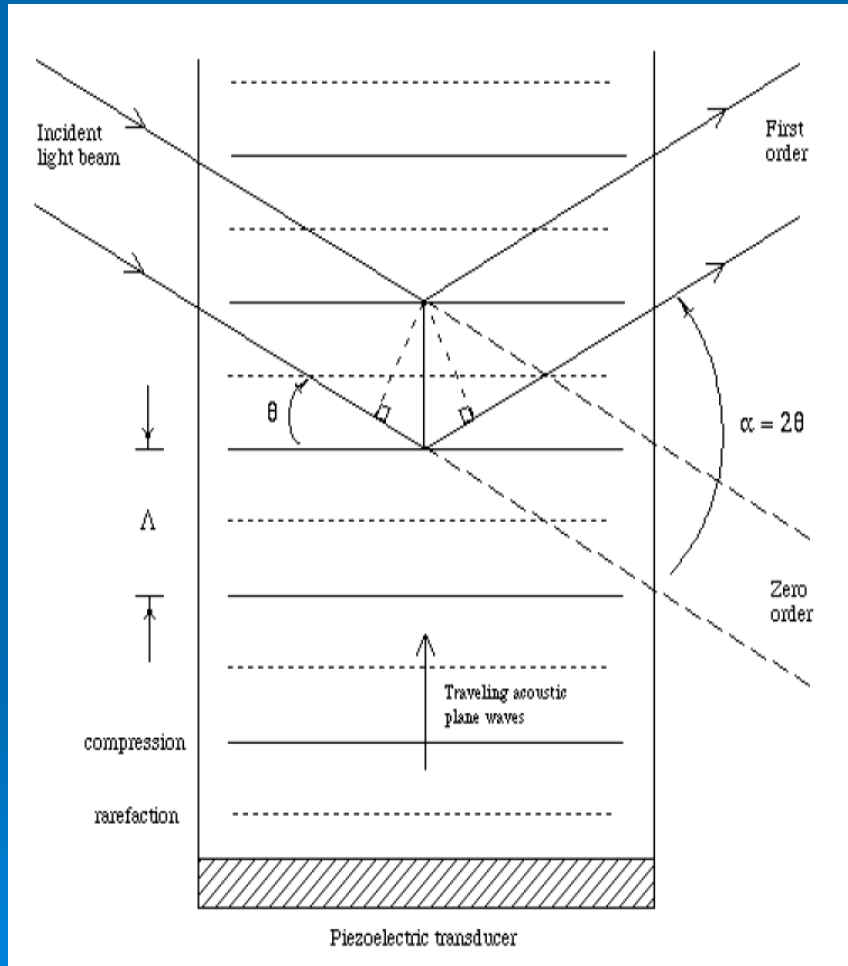
$$n(x, t) = n + \Delta n \cos(2\pi ft - Kx)$$

$$\Lambda = 2\pi K^{-1}$$

Fattore di merito

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\Lambda^2}$$

AOM (Acoustic optic modulator)



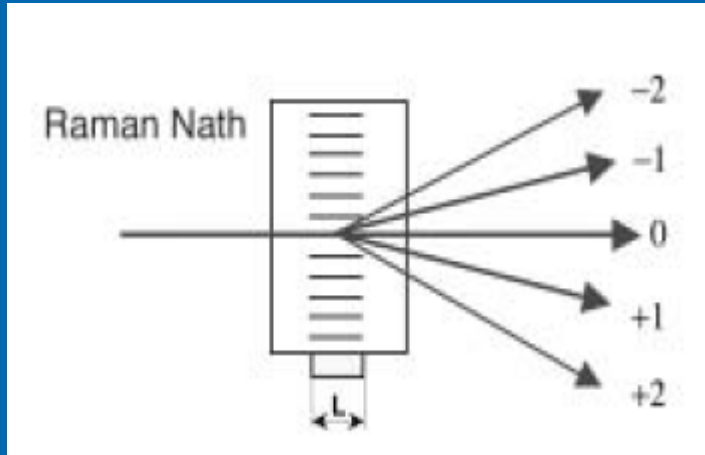
- Deflessione (frequenza onda acustica)
- Modulazione (ampiezza onda acustica)

Materiali per AOM

Material	Type	Optimum optical range for AO application (nm)	Incident optical polarization (*)	Refractive Index @ λ (nm)	Max CW laser power density (W/mm ²)	Acoustic velocity (m/s)	M ₂ AO figure of merit (10 ⁻¹⁰ S ³ /kg)	@ λ (nm)
Ge	Crystal	2500 - 11000	Linear//	4 10600	5	5500	180	10600
Doped Glass	Glass	500 - 650	Unpolarized	2.09 633	1	3400	24	633
Ge ₃₃ As ₁₂ Se ₅₅	Glass	1100 - 1700	Unpolarized	2.59 1064	1	2520	248	1064
As ₂ S ₃	Glass	700-900	Unpolarized	2.46 1150	1	2600	433	633
PbMoO ₄	Crystal	450 - 1100	Unpolarized	2.26/2.38 633	0.5	3630	36	633
TeO ₂	Crystal	450 - 1100	Linear ⊥	2.26 633	5	4200	34	633
TeO ₂	Crystal	350 - 4500	Linear-Circular	2.26 633	5	620	1200	633
SiO ₂ (fused silica)	Glass	200 - 200	Linear ⊥	1.46 633	> 100	5960	1.5	633
SiO ₂ (fused silica)	Glass	200 - 200	Unpolarized	1.46 633	> 100	3760	0.5	633

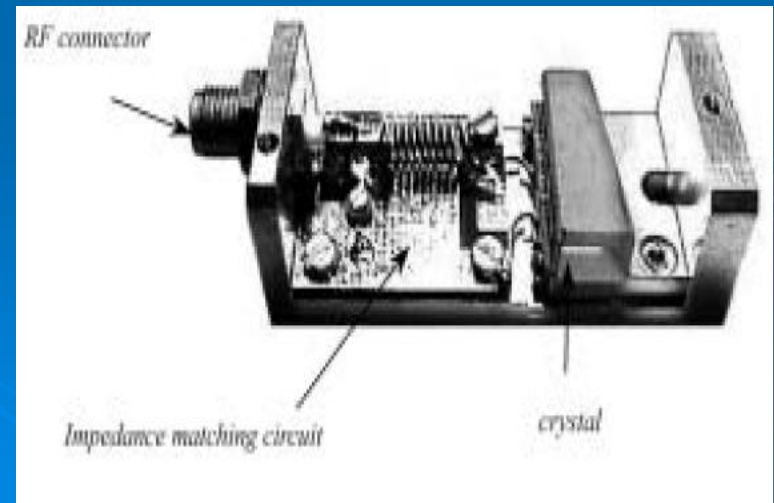
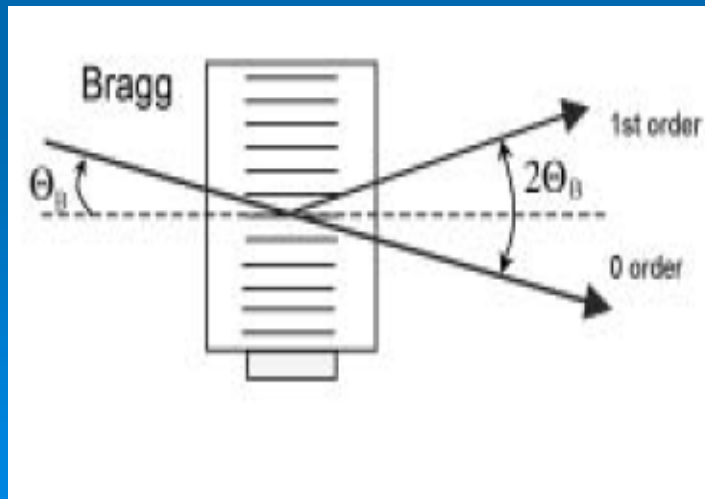
Regimi di diffrazione di un AOM

$Q \ll 1$



$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\Lambda^2}$$

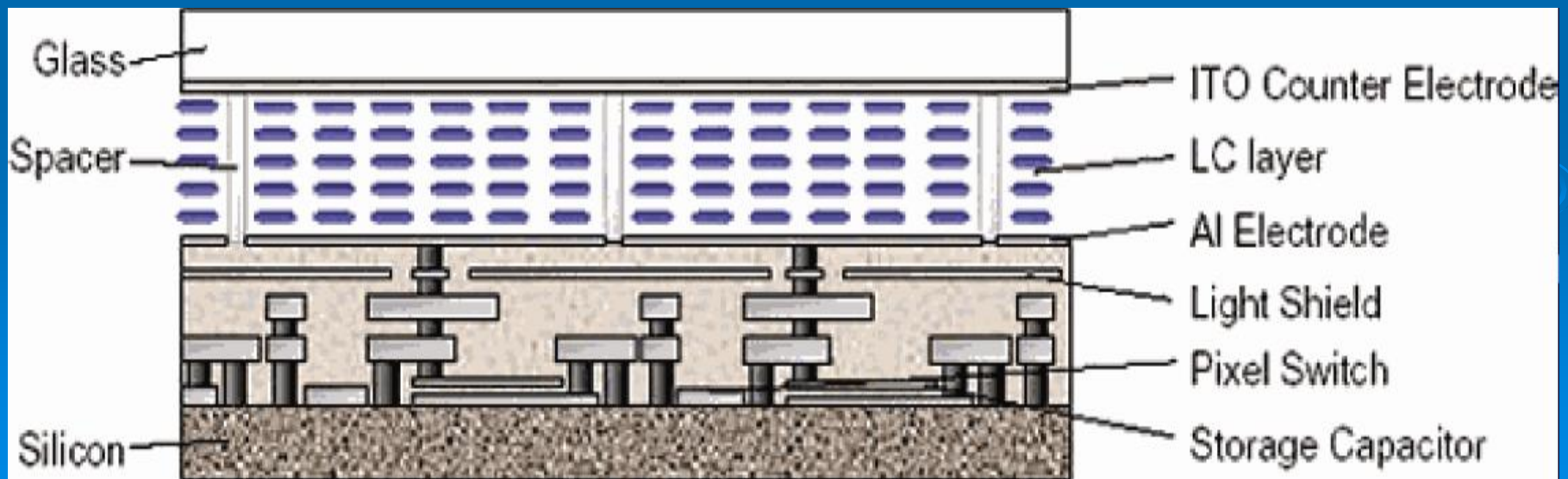
$Q \gg 1$



LCD (Liquid crystal display)

- STN (Supertwisted Nematic)
- DSTN (Dual scan Twisted Nematic)
- FLC (Ferroelectric Liquid crystal)
- SSFLC (surface stabilized Ferroelectric)
- RTN (Reflective twisted Nematic)
- EALCD (Electrically addressable LCD)
- OALCD (Optically Addressable LCD)

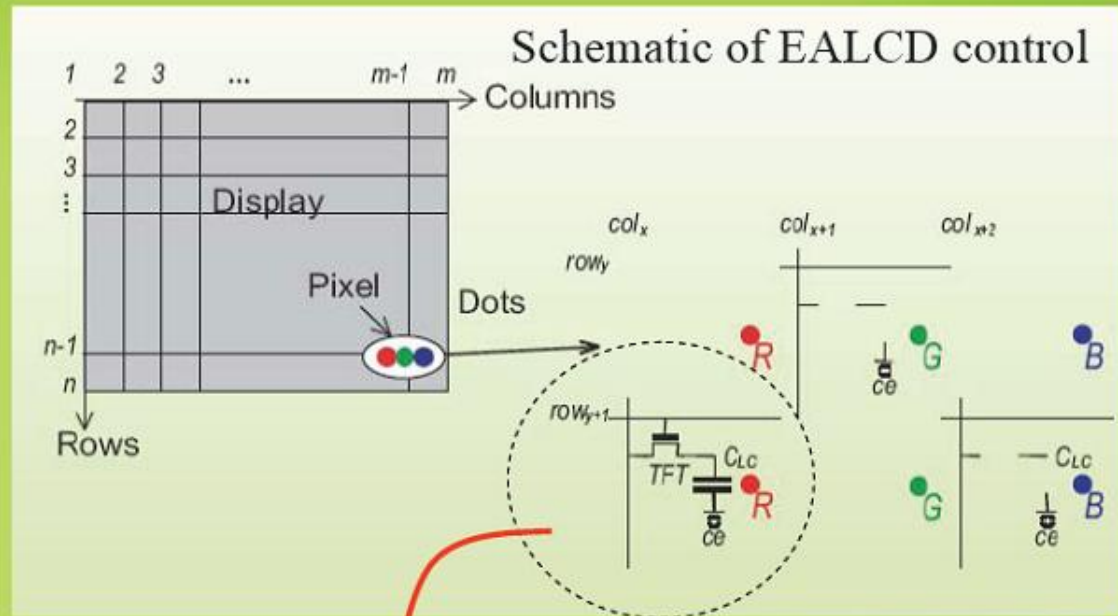
Reflective Twisted Nematic



Electrically addressable LCD

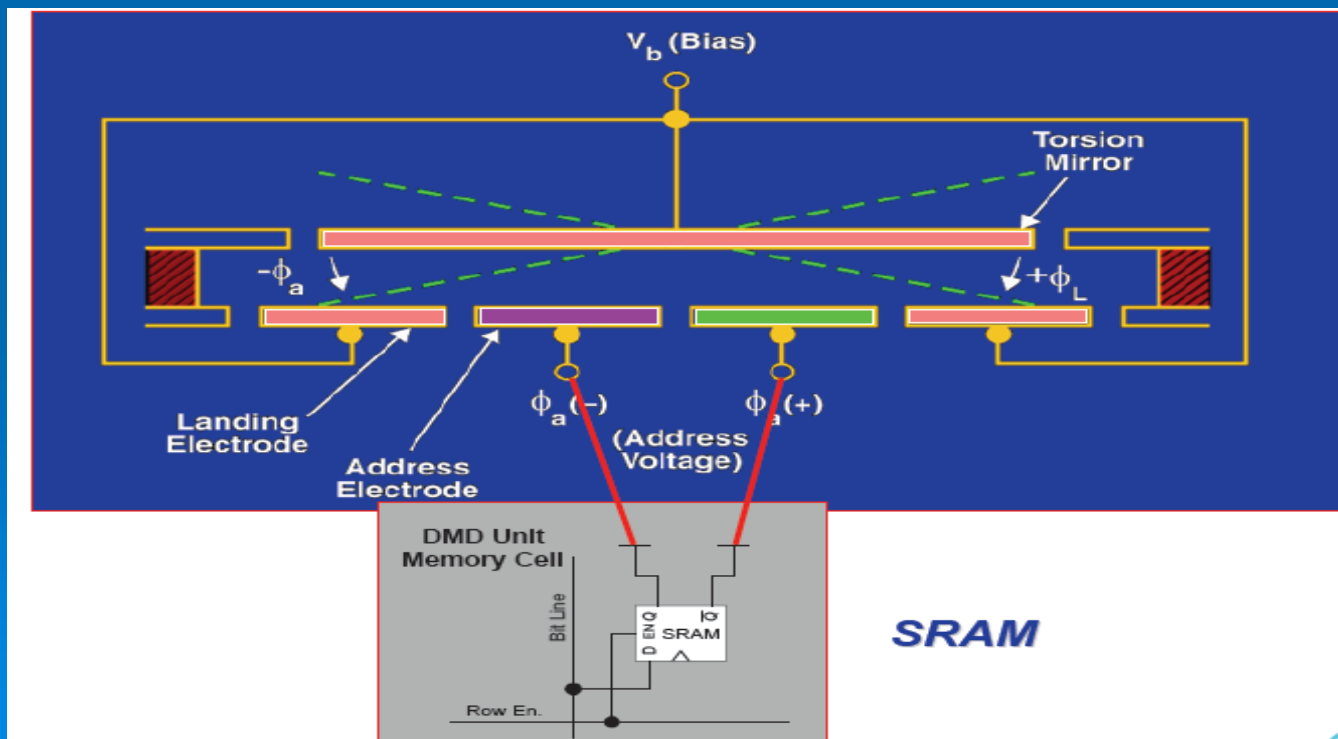
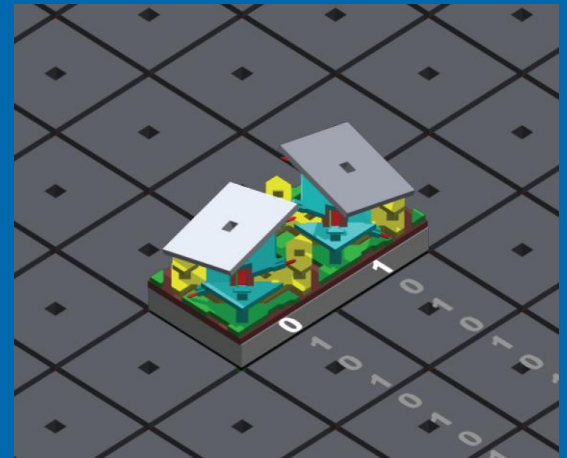
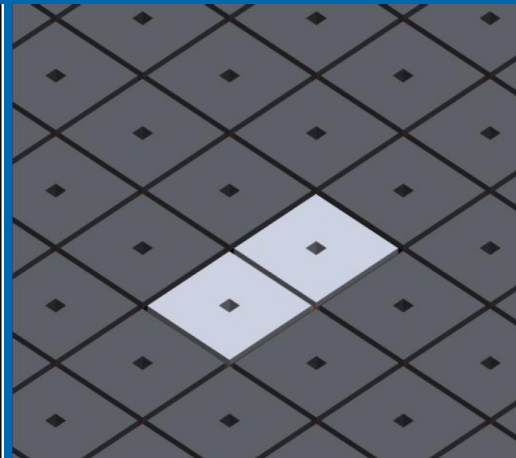
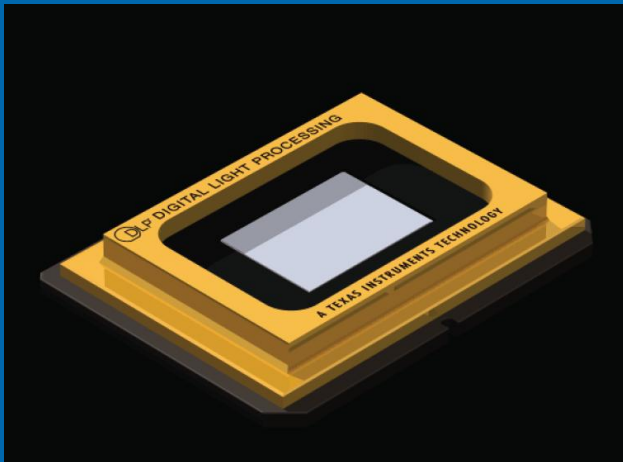


$m \times n$ – pixels EALCD



TFT (thin film transistor) switching element of each pixel

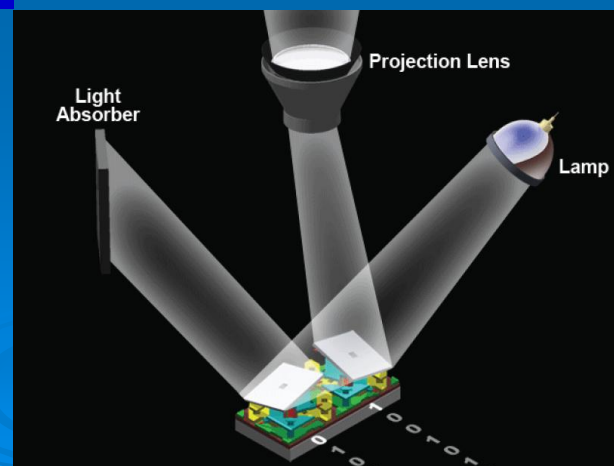
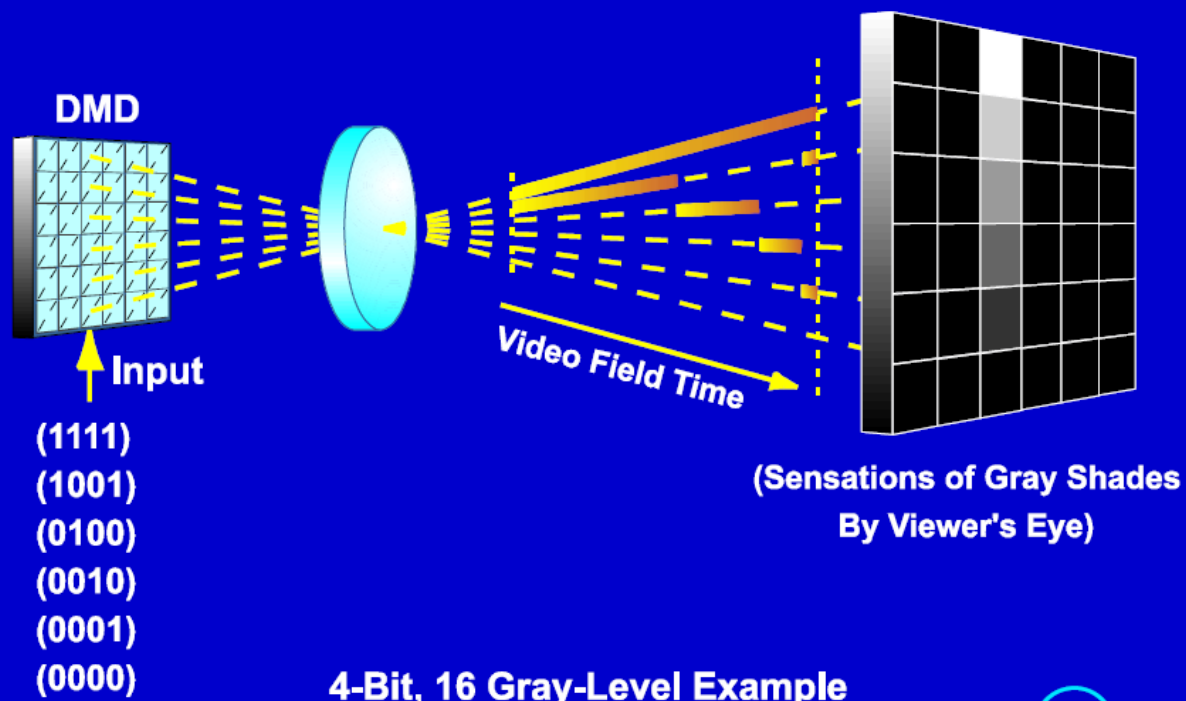
DMD



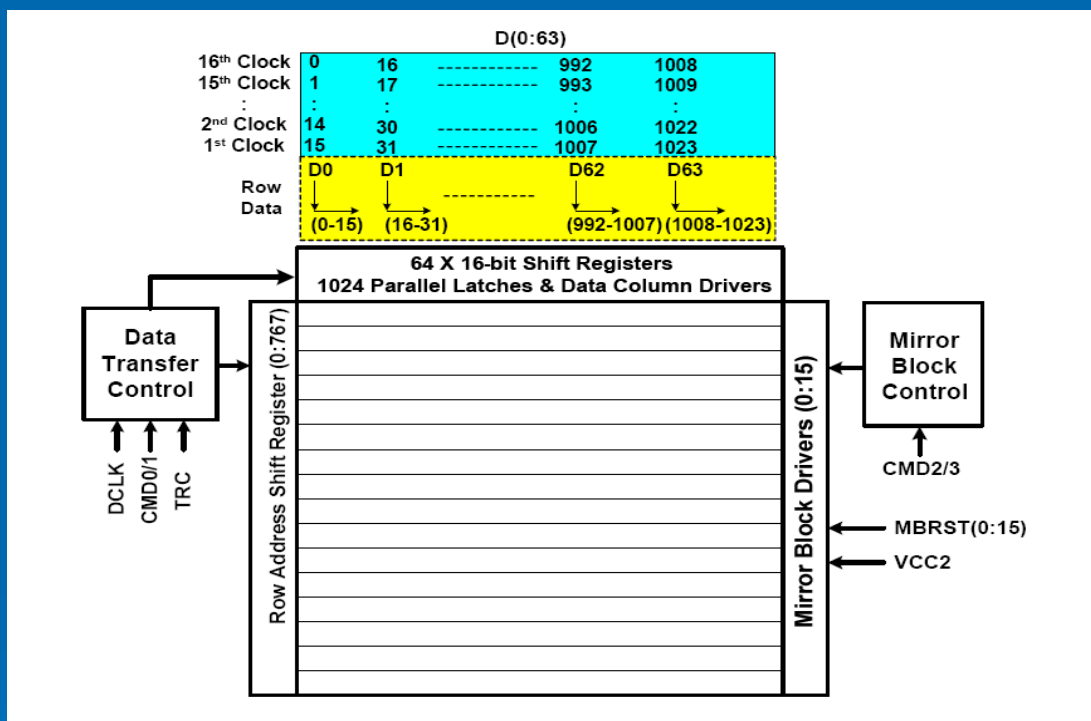


How Grayscale is Created

DMD™ Binary Pulsewidth Modulation



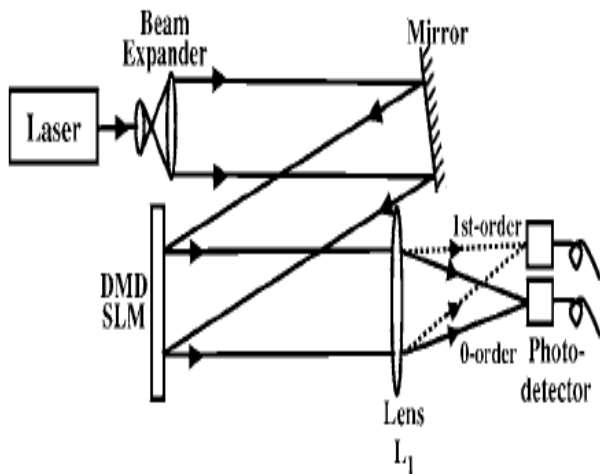
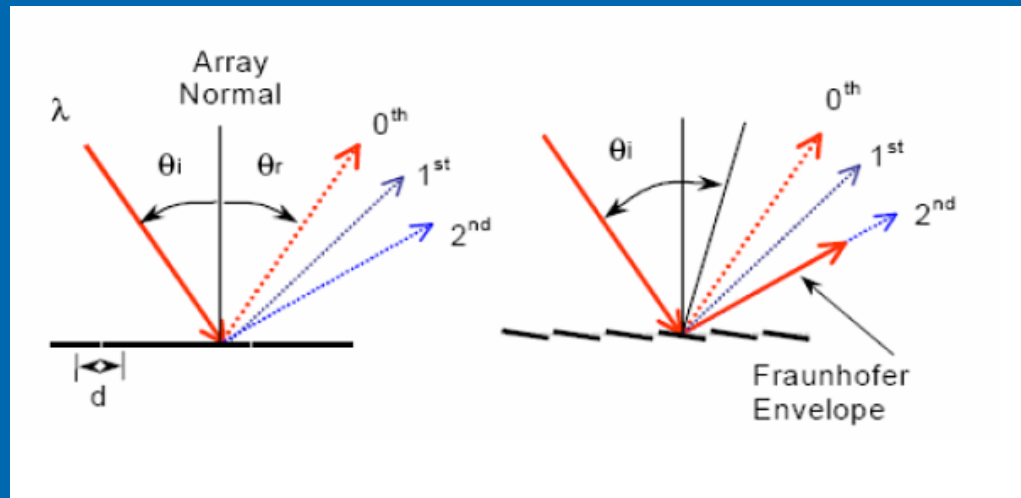
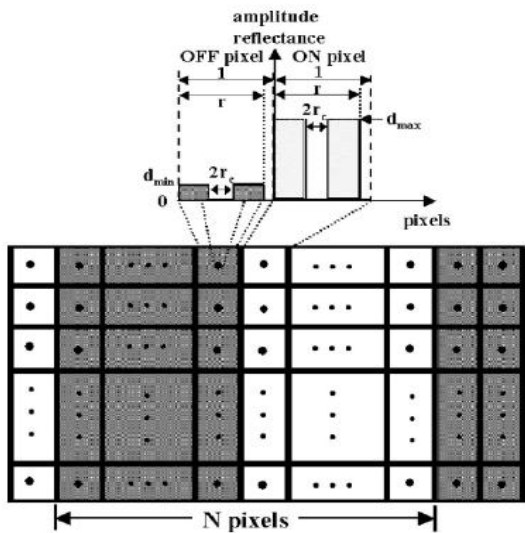
Gestione dati DMD



Tempo di caricamento immagine= 80 microsecondi

Frame rate massimo = 16500 frame/secondo

Modulation transfer function diffraction properties



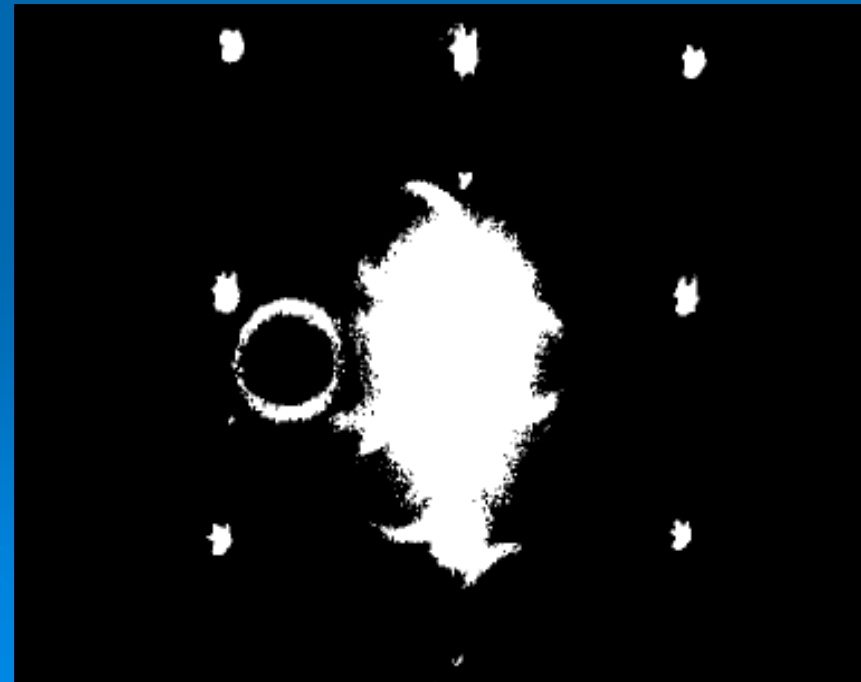
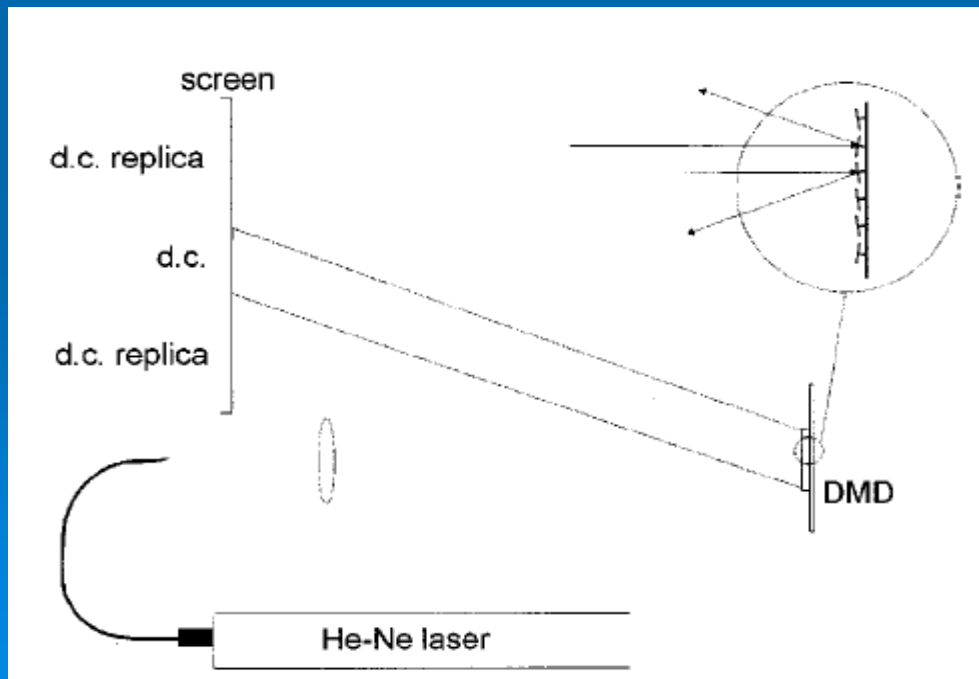
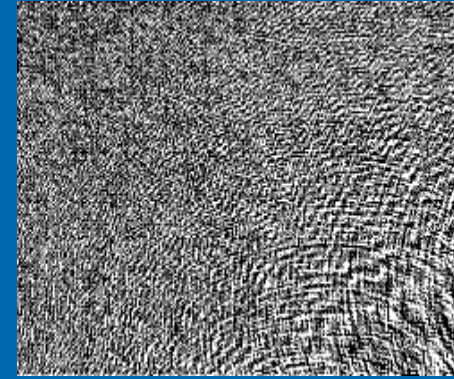
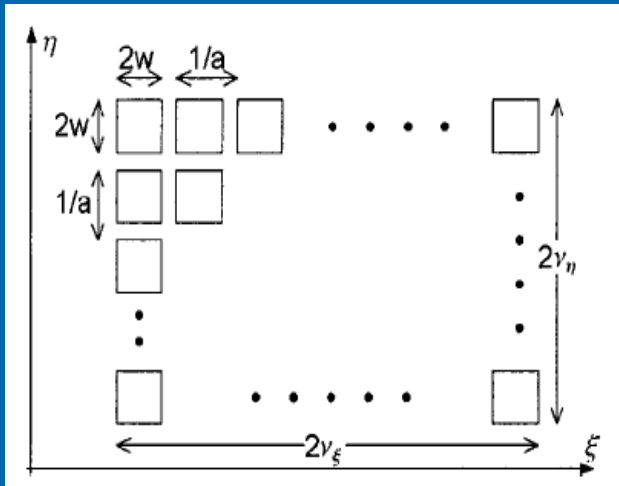
$$\text{MTF} = \frac{a_1^2 + b_1^2}{a_0^2} = \frac{16V^2(a^2 + b^2)}{\pi^2(r - 2r_c)^2}$$

where

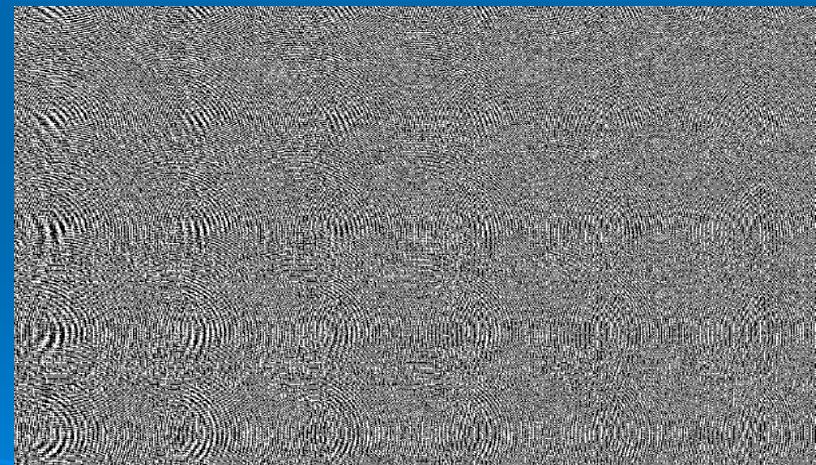
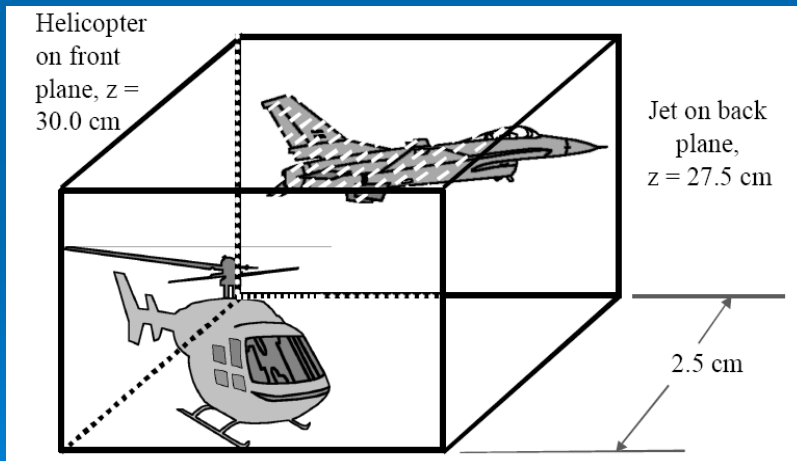
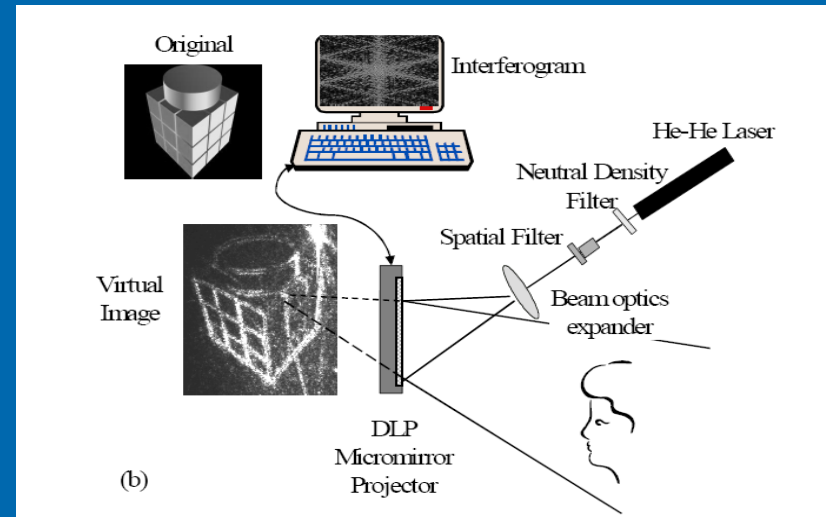
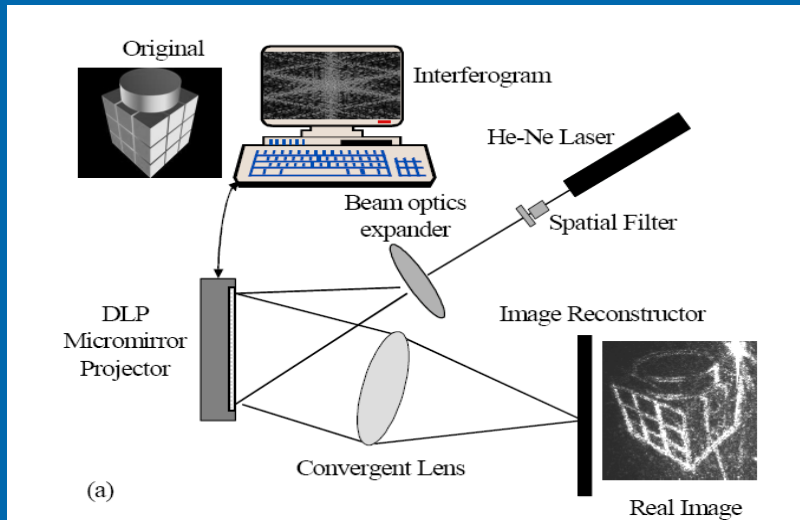
$$V = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}},$$

$$a = \sin \left[\frac{\pi}{N} \left(\frac{r}{2} - r_c \right) \right] \cos \left[\frac{\pi}{N} \left(\frac{r}{2} + r_c \right) \right] \\ \times \sum_{n=0}^{N/2-1} \cos \left[\frac{\pi}{N} \left(n + \frac{r}{2} \right) \right],$$

Reconstruction of hologram with dmd



Ologrammi con dmd



$$U_s(x, y) = \int_v dv' \frac{U(x', y', z')}{\sqrt{z'^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2}} \exp \left[-ik \left(\sqrt{z'^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2} - \frac{x^2 + y^2}{2f} \right) \right]$$

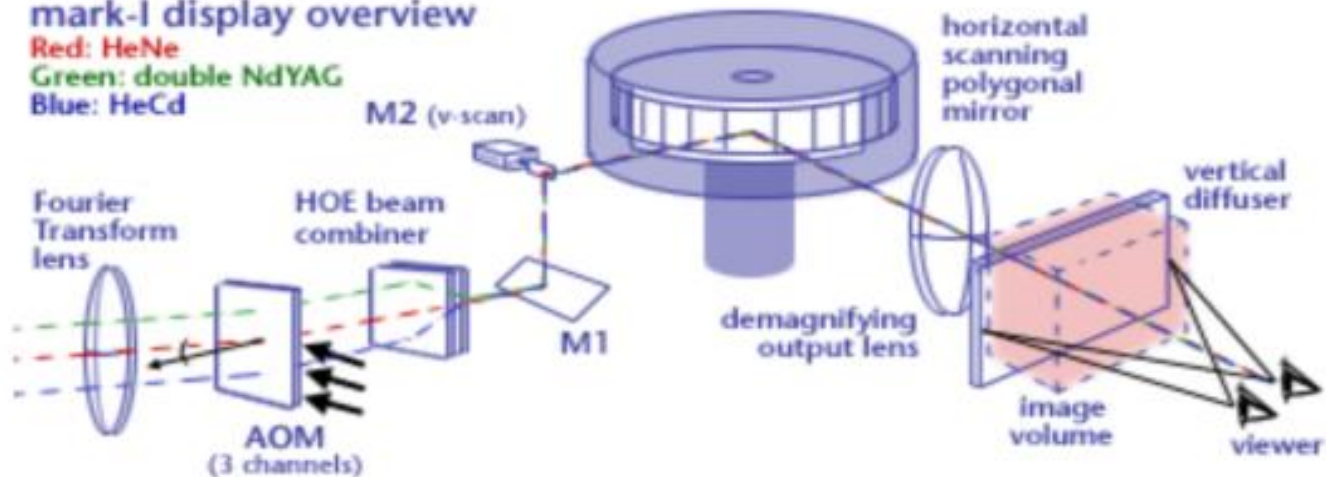
HOLOVIDEO Mk1-Mk2

mark-I display overview

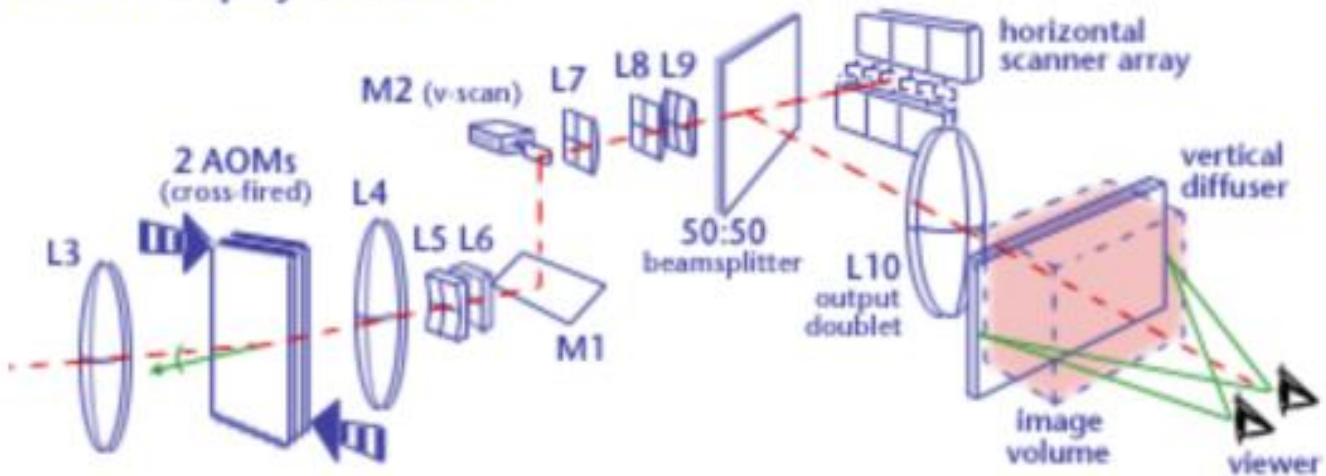
Red: HeNe

Green: double NdYAG

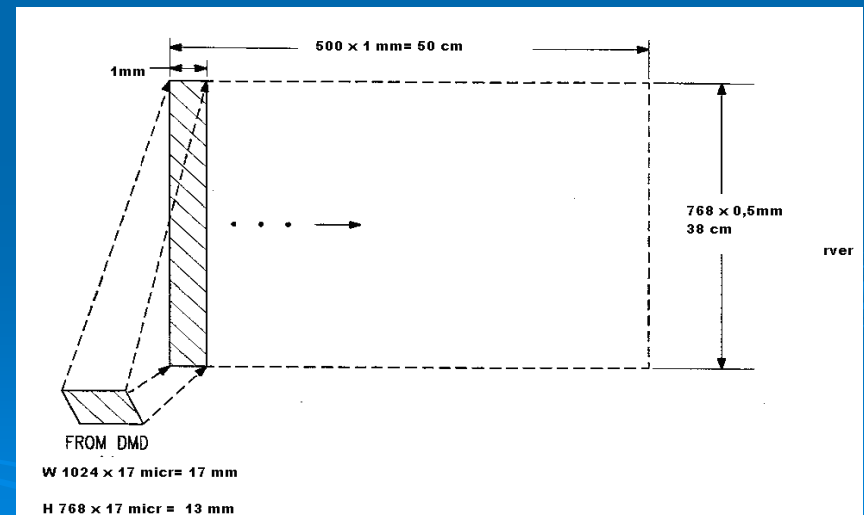
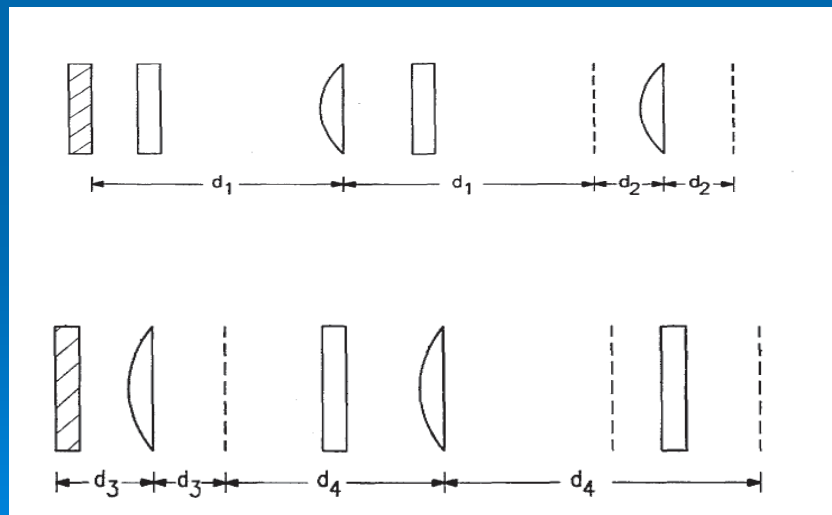
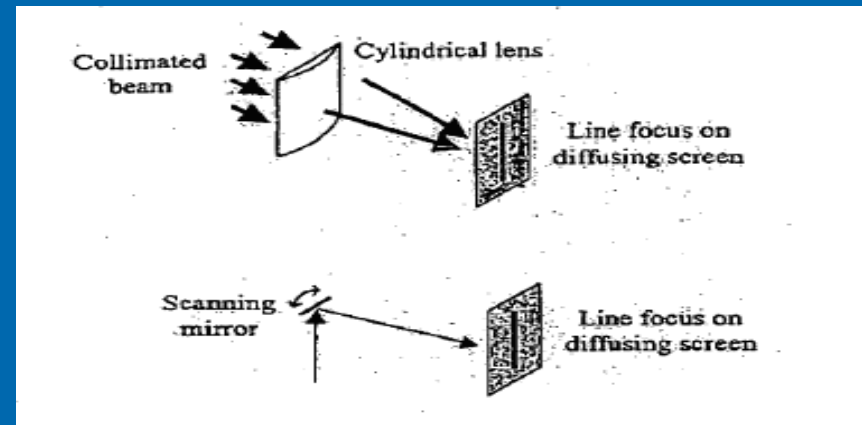
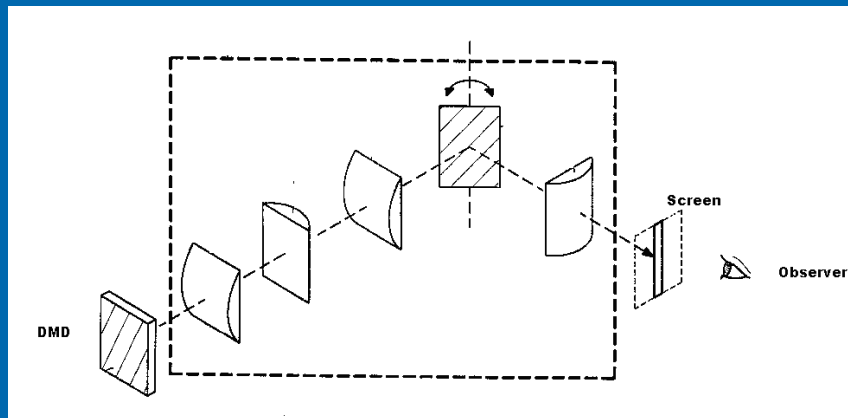
Blue: HeCd



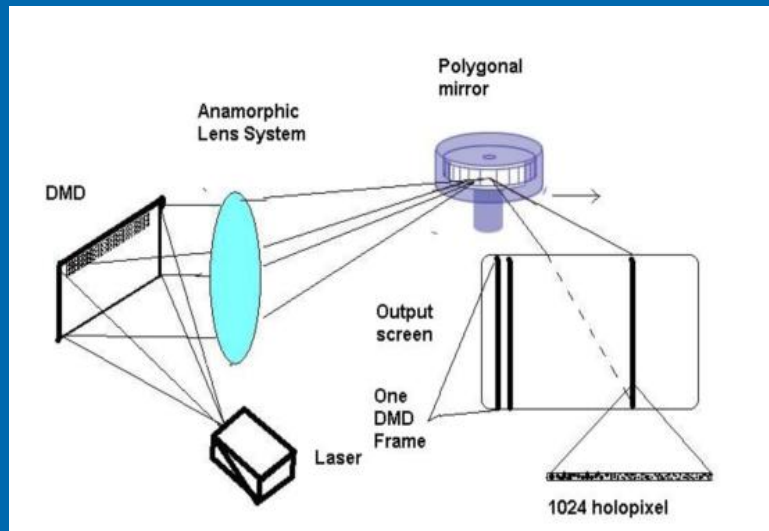
mark-II display overview



Holovideo Mk3



Holovideo



Modulazione binaria

a) $N \times M$

U_{11}	U_{12}	U_{13}	...	U_{1N}
U_{21}	U_{22}	U_{23}	...	U_{2N}
U_{31}	U_{32}	U_{33}	...	U_{3N}
...	...	...	...	...
U_{M1}	U_{M2}	U_{M3}	...	U_{MN}

b) $4N \times M$

A_{11}^1	A_{11}^2	A_{11}^3	A_{11}^4	...	
A_{21}^1	A_{21}^2	A_{21}^3	A_{21}^4	...	
				...	
...	...	...	...	...	...
				...	

c) $4N \times 4M$

A_{11}^2	A_{11}^3	...	
A_{11}^2	A_{11}^3	...	
A_{11}^2	A_{11}^3	...	
A_{11}^2	A_{11}^3	...	
...	...	...	...

d) $4N \times 4M$

			...	
			...	
			...	
			...	
...	...	...	...	...

Fig. 8: Binary phase and amplitude encoding using Lee's technique.

- a) Calculated hologram matrix
- b) Expanded matrix with phase encoded using four projections
- c) Expanded matrix with compensated cell dimension mismatch
- d) Expanded matrix with binary amplitude and phase encoding

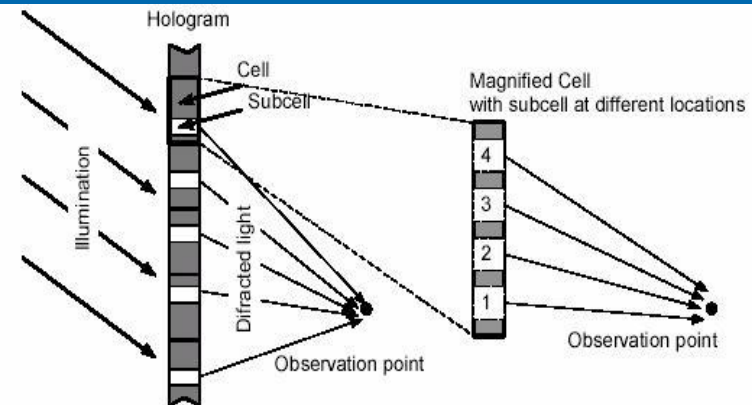


Fig. 5: Detour-phase hologram encoding concept.

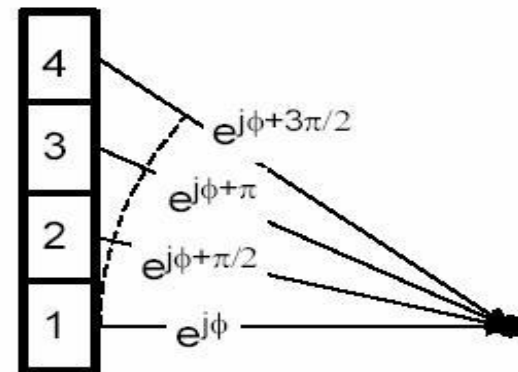


Fig. 7: Relative phase delay between four apertures (base vectors) in Lee's encoding technique.

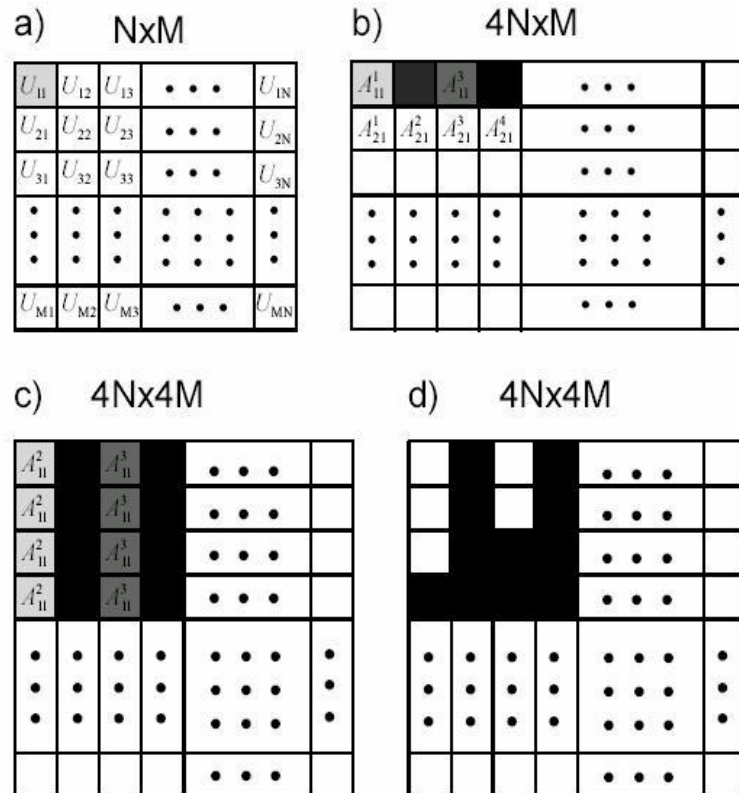


Fig. 8: Binary phase and amplitude encoding using Lee's technique.

- Calculated hologram matrix
- Expanded matrix with phase encoded using four projections
- Expanded matrix with compensated cell dimension mismatch
- Expanded matrix with binary amplitude and phase encoding

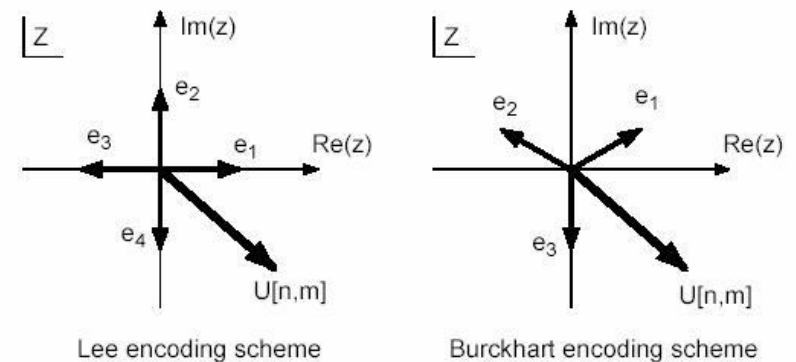
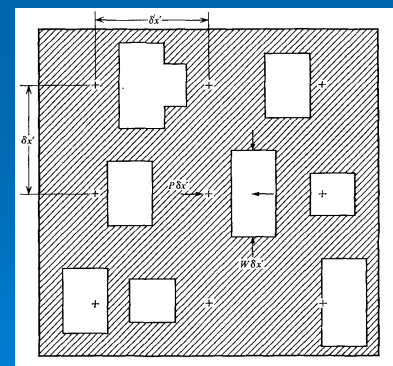
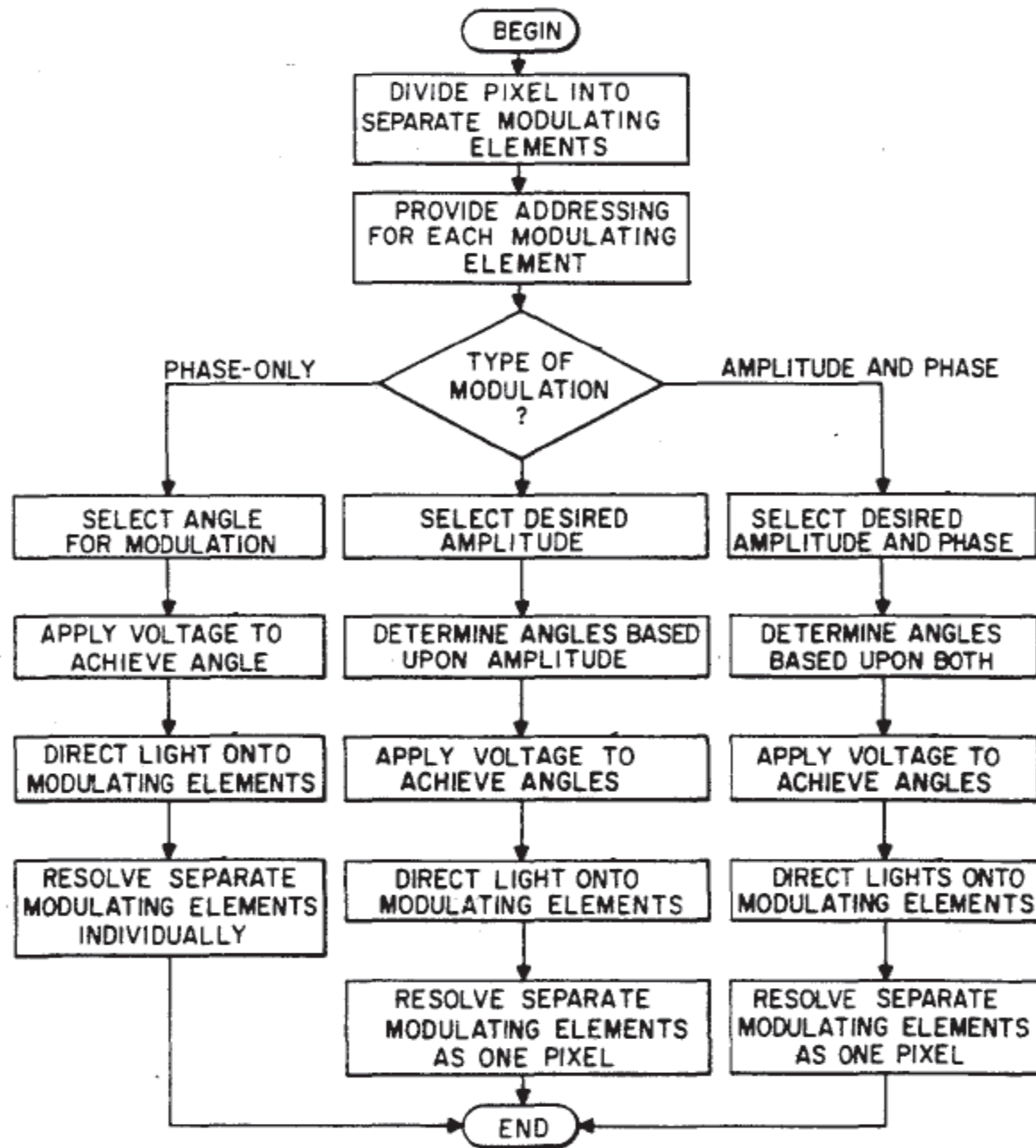


Fig. 6: Lee and Burckhart hologram encoding techniques.





To do

- Set up ottico anamorfico integrato con filtro spaziale e TIR prism (offaxis / onaxis)
- Studio sul tipo miglior tipo di modulazione per rendering olografico (binary pwm, phase cell, laser amplitude)
- Elettronica di controllo laser-scanner-DMD
 - Sincronizzazione pwm-blank-rotazione- scanner-load-display
 - FPGA per calcolo epipolarità immagini stereo
 - FPGA gestione hogels e look-up-table