

Olografia

Margherita Bini, Francesco Sacco

1 Introduzione

L'olografia è la riproduzione di un'immagine tridimensionale mediante ricostruzioni di fronti d'onda.

Per la produzione di un ologramma è necessario che l'informazione, ovvero l'ampiezza e la fase di un'onda elettromagnetica scatterata dall'oggetto di cui voglio riprodurre l'immagine, venga registrata su un materiale fotosensibile, e che l'immagine sia successivamente ricostruita (Sez. 2).

Questa esperienza ha come scopo la realizzazione di olografie statiche e dinamiche.

Per l'esperimento è stato utilizzato un laser He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), di cui è possibile controllare l'accensione attraverso uno shutter. Il fascio uscente dal laser attraversa un filtro spaziale composto da un obiettivo 20x e da una fenditura di $12.5 \mu\text{m}$, che permette di eliminare i modi non gaussiani essendo quelli meno focalizzabili. La fenditura seleziona inoltre il massimo della gaussiana in modo da poter ridurre le fluttuazioni e lavorare ad un'intensità costante.

Il fascio uscente incide su un BS, che trasmette il 5 % e riflette il 95 %, in modo da rendere piccola l'ampiezza del fascio trasmesso e, quindi, minimizzare il "rumore" (il motivo è spiegato in Sez. 2). Il fascio trasmesso, chiamato fascio di riferimento, incide sullo specchio M1, viene riflesso e arriva su una lastrina fotosensibile; il fascio riflesso dal BS incide invece sullo specchio M2, viene riflesso nuovamente e incide sull'oggetto, viene quindi scatterato dall'oggetto e arriva sulla lastrina fotosensibile facendo interferenza con il fascio di riferimento.

L'apparato sperimentale è raffigurato in Fig. 1.

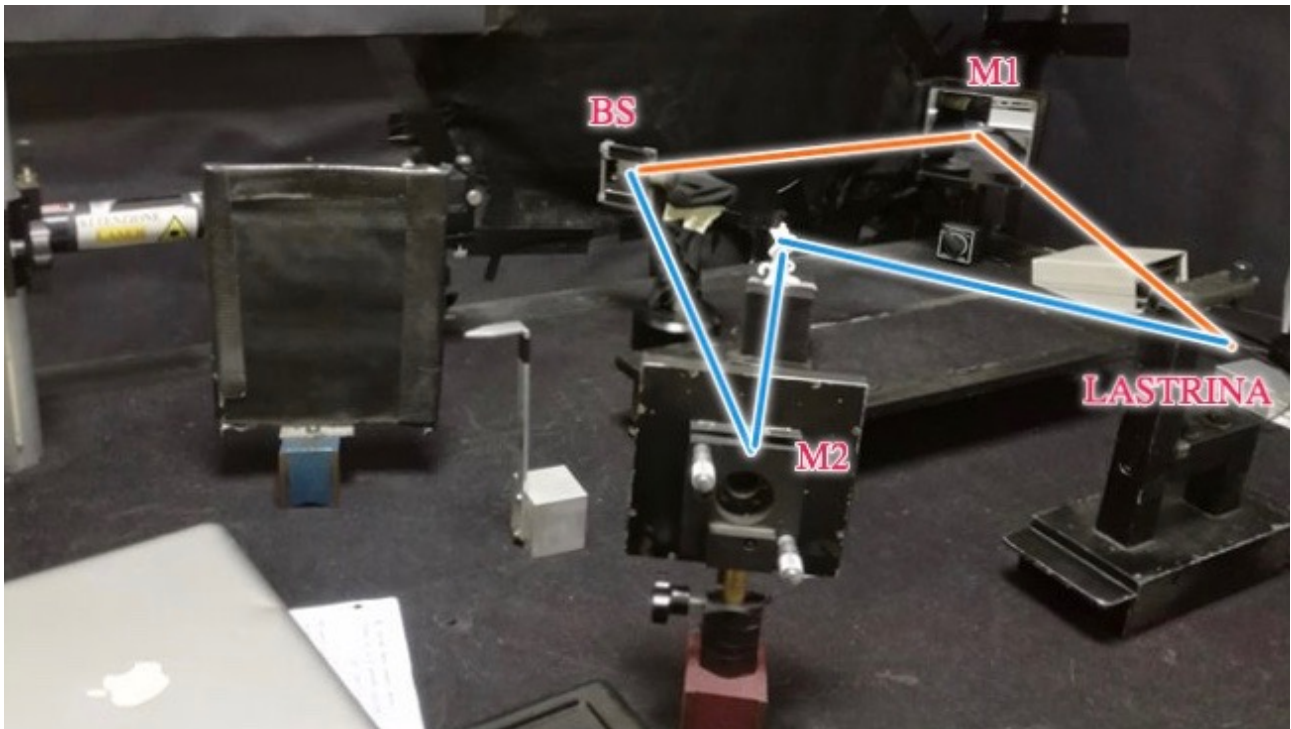


Figura 1: Apparato sperimentale utilizzato.

2 Registrazione e ricostruzione dell'ologramma

Nella prima fase, la fase di encoding, viene registrata l'ampiezza e la fase del fascio oggetto, $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = \text{Re}(\mathbf{a}_1(\mathbf{r})e^{-i\omega t})$, con $\mathbf{a}_1(\mathbf{r})$ ampiezza complessa, scrivibile esplicitando la parte reale come $\mathbf{a}_1(\mathbf{r}) = \mathbf{a}(\mathbf{r})e^{i\phi(\mathbf{r})}$, con $\phi(\mathbf{r})$ fase dell'onda, su una lastrina fotosensibile (Fig. 2, in alto).

Il fascio di riferimento, con la forma $\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) = \text{Re}(\mathbf{A}_2(\mathbf{r})e^{-i\omega t})$ con $\mathbf{A}_2(\mathbf{r}) = \mathbf{A}(\mathbf{r})e^{i\psi(\mathbf{r})}$, viene introdotto al fine di creare interferenza tra i due fasci e quindi poter trasformare l'informazione della fase del fascio oggetto, non misurabile sulla lastrina, in un'intensità.

Infatti, sia (x, y) un punto sulla lastrina, l'intensità totale in (x, y) dipende dalla differenza delle fasi $\delta = \psi - \phi$ del fascio oggetto e del fascio di riferimento, avendo assunto che il fascio oggetto e il fascio di riferimento abbiano polarizzazione parallela tra di loro:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos\delta(x, y),$$

dove $I_1 = |\mathbf{a}_1|^2/2$ è l'intensità del fascio oggetto, $I_2 = |\mathbf{A}_2|^2/2$ quella del fascio di riferimento.

Sulla lastrina, che dal lato in cui viene investita dalla radiazione è ricoperta da un materiale fotosensibile a base di alogenuri di argento, viene a crearsi un pattern di interferenza. La trasmissività della lastrina diminuisce all'aumentare dell'intensità della luce incidente. È necessario per la produzione di un ologramma operare nell'intervallo in cui la trasmissività t_f decresce linearmente con l'intensità, $t_f = \beta \cdot I$, a un'intensità maggiore della soglia ($50 \frac{\mu J}{cm^2}$) della reazione che provoca il rilascio dell'argento dal composto ionico e la formazione di cluster metallici che formano il pattern di interferenza. La trasmissività della lastrina dopo l'impressionamento è scrivibile come:

$$t_f(x, y) = t_{bias} + \beta' \cdot (|\mathbf{a}_1|^2 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{A}_2^* + \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{a}_1^*) \quad \text{dove } t_{bias} = \beta' |\mathbf{A}_2|^2 \text{ e } \beta' = \frac{\beta \cdot t}{2}.$$

t è il tempo dell'impressionamento, t_{bias} rappresenta il rumore che viene minimizzato tramite le proprietà di trasmissione e riflessione del BS. Inoltre \mathbf{A}_2 per semplicità è considerata costante sulla lastrina $\mathbf{A}_2(x, y) = \mathbf{A}_2$, condizione che verrà verificata sperimentalmente.

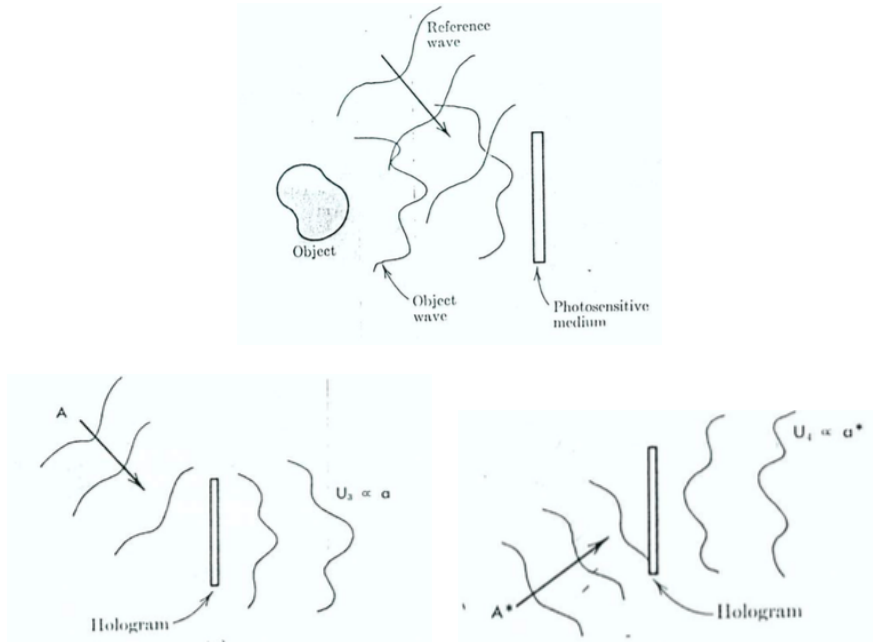


Figura 2: Foto dell'oggetto illuminato dal laser e della prima olografia statica.

La ricostruzione dell'immagine viene realizzata attraverso un fascio incidente \mathbf{B} sulla lastrina precedentemente registrata. Il fascio uscente dalla lastrina \mathbf{B}_{out} ha 4 componenti, identificate con $U_{1,2,3,4}$:

$$\mathbf{B}_{out} = t_f \cdot \mathbf{B}(x, y) = t_{bias} \cdot \mathbf{B}(x, y) + \beta' \cdot |\mathbf{a}_1|^2 \cdot \mathbf{B}(x, y) + \beta' \cdot \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{A}_2^* \cdot \mathbf{B}(x, y) + \beta' \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{a}_1^* \cdot \mathbf{B}(x, y) = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$$

Le informazioni necessarie per la ricostruzione dell'immagine sono contenute nella componente $U_3 = \beta' \cdot |\mathbf{A}_2|^2 \cdot \mathbf{a}_1$, se prendo come fascio di riferimento $\mathbf{B} = \mathbf{A}_2$, e in quella $U_4 = \beta' \cdot \mathbf{a}_1^* \cdot |\mathbf{A}_2|^2$, se invece considero

$B = A_2^*$, che sono infatti proporzionali al fascio oggetto e al coniugato del fascio oggetto essendo $|A_2|^2$ costante sulla lastrina (Fig. 2, in basso). Alla componente U_3 è associata l'immagine virtuale dell'oggetto, ovvero se l'osservatore si pone a destra della lastrina, l'immagine si trova a sinistra di quest'ultima. A U_4 è invece associata un'immagine reale, a destra della lastrina per lo stesso osservatore.

Nel nostro caso $B = A_2$, ovvero viene utilizzato come fascio di ricostruzione quello di riferimento. Lo scopo dell'esperienza è quindi rendere visibile la componente U_3 e per farlo è necessario, oltre ad ottenere una componente di t_{bias} bassa che si traduce in un U_1 trascurabile, riuscire a separare spazialmente U_3 da U_4 , ovvero l'immagine reale dall'immagine virtuale. Anche questa condizione è assicurata dal set-up sperimentale, dato che il fascio oggetto non è allineato con quello di riferimento.

3 Descrizione dell'esperienza

L'esperimento si compone di varie fasi: una fase di settaggio dell'apparato sperimentale, seguita dall'impressionamento della lastrina, dallo sviluppo e dal fissaggio, e infine dalla fase di ricostruzione dell'immagine.

- **Setup dell'apparato sperimentale.**

Abbiamo posizionato il BS, lo specchio M1, quello M2, e l'oggetto in modo tale che la differenza tra i cammini ottici del fascio oggetto e di riferimento fosse minore della lunghezza di coerenza del laser He-Ne $\lambda_0^2/\Delta\lambda$ (20-30 cm), condizione necessaria per avere interferenza.

I due cammini ottici non devono incontrarsi, per questo abbiamo posizionato lo specchio M2 in modo tale da vedere l'ombra dell'oggetto a sinistra dello specchio M1.

Mentre la distanza dell'oggetto dallo specchio M1 e M2 è stata determinata attraverso la misura della lunghezza dei cammini ottici, la sua altezza coincide approssimativamente con quella del centro della lastrina.

Inoltre, abbiamo fatto in modo che il centro del fascio di riferimento coincidesse con il centro della lastrina, al fine di ottenere A_2 uniforme sulla lastrina per ogni (x,y) (Sez. 2). Per realizzare questa condizione abbiamo agito sullo specchio M1 per far sì che la potenza nel punto più in alto della lastrina fosse uguale a quella nel punto più in basso, e abbiamo spostato la base della lastrina per aggiustare la coordinata orizzontale.

- **Registrazione dell'ologramma**

In condizioni di buio ambientale, per evitare che la luce della stanza impressioni la lastrina, è stato individuato il lato fotosensibile della lastrina ed è stata posizionata nel suo supporto. È stato quindi acceso il laser per il tempo necessario per l'impressionamento.

- **Sviluppo e fissaggio.**

Sempre in condizioni di buio ambientale, la lastrina è posizionata in una camera oscura (Fig. 3) dentro la quale viene trattata con un liquido per lo sviluppo, con dell'acqua deionizzata, con uno per il fissaggio, e nuovamente con dell'acqua deionizzata, con una durata di cinque minuti per ciascuna fase. La lastrina viene fatta quindi asciugare.



Figura 3: Camera oscura utilizzata nell'esperimento.

- **Ricostruzione dell'immagine.**

Riposizionando la lastrina fotosensibile nella sua posizione e osservandola nella direzione della posizione dell'oggetto (rimosso in questa fase) si osserva l'immagine dell'oggetto.

4 Ologrammi statici

Per gli ologrammi statici abbiamo utilizzato come oggetto quello rappresentato in Fig. 4. L'oggetto è bianco al fine di aumentare la luce riflessa.



Figura 4: Foto dell'oggetto utilizzato negli ologrammi statici.

Abbiamo campionato la potenza del fascio di riferimento incidente sulla lastrina utilizzando un fotorivelatore al silicio collegato a un tester. Per farlo abbiamo attaccato un foglio a quadretti sulla lastrina per suddividere la superficie in quadretti di 1 cm^2 , area attiva del rivelatore in silicio, e abbiamo misurato la potenza in vari punti (Fig. 5). Ad ogni misura della potenza è associato un errore di 0.01 V .

	1.09 V			1.01 V	
	1.36 V			1.43 V	
	1.39 V			1.44 V	
	1.11 V			1.10 V	

Figura 5: Campionamento della potenza sulla lastrina.

Abbiamo inoltre misurato con il metro a nastro i due cammini ottici. Sia:

- a = distanza tra il filtro spaziale e lo specchio M1;
- b = distanza tra lo specchio M1 e la lastra fotosensibile;
- c = distanza tra il BS e lo specchio M2;
- d = distanza tra il filtro spaziale e il BS;
- e = distanza tra lo specchio M2 e l'oggetto;
- f = distanza tra l'oggetto e la lastra.

Il cammino ottico del fascio di riferimento risulta essere $l_1 = a + b$, il secondo cammino ottico è invece $l_2 = d + c + e + f$. In Tab. 1 sono riportate le misure effettuate con il metro a nastro in cm.

	Lunghezza segmenti
a	75
b	72
l_1	147

	Lunghezza segmenti
c	65
d	19
e	32
f	37
l_2	153

Tabella 1: Misura della lunghezza dei cammini ottici

La condizione di interferenza $l_2 - l_1 \ll 20/30$ cm, considerando che a l_1 e l_2 è associato un errore di ± 1 cm, è soddisfatta.

Al fine di determinare il tempo di esposizione T della lastrina fotosensibile, che viene controllato accendendo e spegnendo lo shutter del laser, sapendo che per lavorare in regime lineare (Sez. 2) l'energia per unità di superficie sulla lastra deve essere di $50 \frac{\mu J}{cm^2}$ e che il fattore di conversione da Volt a Watt è $W = 2.6592 \text{ V} \cdot 0.16925$, e scegliendo per la tensione 1.24 V (media delle misure ottenute in Fig. 5), sostituendo in $50 \frac{\mu J}{cm^2} \cdot 1 cm^2 = T \cdot (2.65 \cdot V - 0.17)$ abbiamo ottenuto $T = 16$ s.

Il risultato della prima olografia è rappresentato in Fig. 6. A sinistra è mostrato l'oggetto illuminato dal fascio oggetto, a destra l'olografia.

È possibile notare come l'olografia ottenuta sia poco luminosa, questo può essere dovuto ad un tempo di esposizione breve. Inoltre, la parte superiore della statuetta è praticamente assente nell'olografia dato che in fase di ricostruzione in quella regione era presente un'ombra.

Essendo il tempo di esposizione T inversamente proporzionale alla potenza, abbiamo modificato la posizione degli specchi e campionato nuovamente la potenza sulla lastra. Inoltre, abbiamo cambiato la posizione dell'oggetto diminuendo l'angolo tra la sua posizione la normale alla superficie della lastrina, e abbiamo cercato di ridurre le ombre.

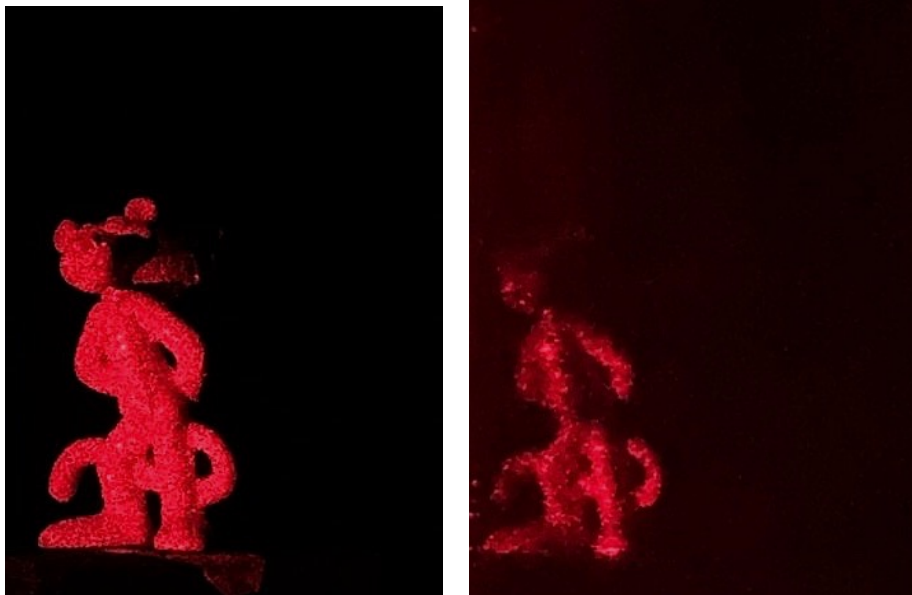


Figura 6: Foto dell'oggetto illuminato dal laser e della prima olografia statica.

I due giorni successivi non siamo potuti tornare in laboratorio causa lockdown e quindi non abbiamo potuto concludere l'esperienza.