

Holografia — możliwości i zastosowania

Dr Katarzyna CHAŁASIŃSKA—MACUKOW

Holografia jest to metoda zapisu i rekonstrukcji pełnej informacji niesionej przez fale różnej natury: fale elektromagnetyczne, akustyczne czy elektronowe. Już w samej nazwie, którą można tłumaczyć jako „pełny zapis” (z greckiego *holos* = pełny, *gramma* = = zapis), zaznaczona jest ta cecha. Właśnie możliwość pełnego zapisu różni holografię od konwencjonalnej fotografii i daje możliwość otrzymywania trójwymiarowych obrazów.

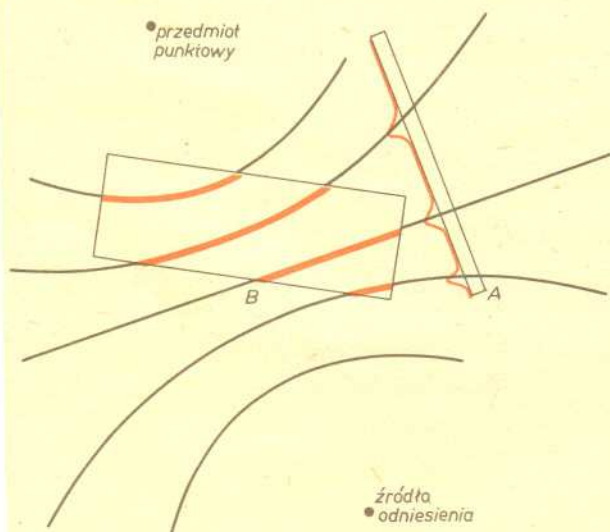
Podstawy holografii zostały sformułowane przez Denisa Gabora w latach 1948—1951, za co w 1971 roku otrzymał nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Prawdziwy rozwój holografii przypada jednak dopiero na lata sześćdziesiąte i jest ściśle związany z rozwojem techniki laserowej. W tym czasie holografia i możliwości jej zastosowania w wielu dziedzinach nauki i techniki wzbudziły ogromne zainteresowanie. Była ona przez jakiś czas dominującą dziedziną optyki stosowanej. Trójwymiarowe obrazy holograficzne fascynowały i pobudzały wyobraźnię. Dawały wielkie nadzieje na szybką realizację trójwymiarowego kina i telewizji. Tak się jednak nie stało. Zbudowanie holograficznego kina okazało się bardzo trudne do realizacji i do dzisiaj takie nie istnieje. Również hologram nie stał się natychmiast konkurencją dla fotografii i nie wszedł do powszechnego użytku. Coraz częściej zaczęły pojawiać się opinie, że holografia jako metoda zapisu informacji nie spełniła pokładanych w niej nadziei, że zawiodła i że nie warto dalej na tak szeroką skalę w nią inwestować.

Niemniej jednak w laboratoriach naukowych prace trwały nadal. W wielu dziedzinach nauki i techniki holografia weszła na stałe jako technika zapisu. Poszukiwano również nowych materiałów światłoczułych oraz opracowywano nowe metody zapisu

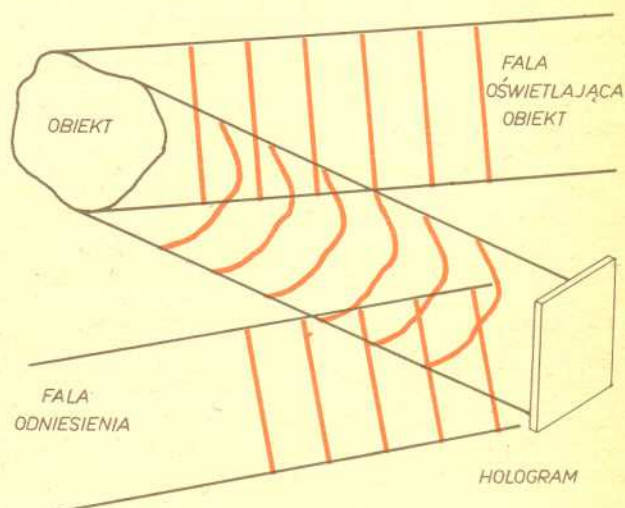
i rekonstrukcji hologramów. Rozwinęła się cała nowa dziedzina holografii — hologramy odtwarzane w świetle białym. To spowodowało, że w ostatnich latach holografia zaczyna znowu budzić zainteresowanie i mieć masowych odbiorców.

A właściwie na czym polega zapis holograficzny? Wyobraźmy sobie pole świetlne pochodzące od dwóch źródeł punktowych, z których jedno traktujemy jako przedmiot punktowy, a drugie jako źródło odniesienia. Rozkład maksimum fali stojącej, utworzonej przez interferencję fal pochodzących z obu źródeł, przedstawia rysunek 1. Aby zapisać hologram, należy umieścić w tym polu materiał światłoczuły. Sposób, w jaki to robimy, determinuje własności zapisanego hologramu oraz narzuca sposób jego odczytania. Położenie oznaczone na rysunku 1 jako *A* daje w efekcie tzw. hologram płaski, to znaczy zapis powstaje na powierzchni materiału światłoczułego.

Przykład prostego układu doświadczalnego do zapisu hologramu płaskiego przedstawia rysunek 2. Światło pochodzące z lasera jest dzielone na dwie części, z których jedna oświetla przedmiot i odgrywa rolę tzw. fali przedmiotowej, a druga, tzw. fala odniesienia, jest skierowana bezpośrednio w stronę hologramu. Obie fale są spójne, a więc mają zdolność do interferencji. Przypomnijmy sobie, że każdą falę można opisać poprzez podanie wartości jej amplitudy i fazy w danym momencie i punkcie przestrzeni. Gdy rejestrujemy światło rozproszone od przedmiotu, czyli gdy fotografujemy, klisza rejestruje natężenie I_p równe kwadratowi amplitudy fali rozproszonej. Faza jest zgubiona. Dlatego też fotografia wiernie odwzorowuje rozkład oświetlenia obiektu (za to odpowiada amplituda fali rozproszonej), ale jest dwuwymiarowa. Zagubiony został relief i głębia sceny — za to odpowiada właśnie faza fali rozproszonej.



Rys. 1



Rys. 2

W przypadku zapisu holograficznego klisza również rejestruje tylko natężenie I fali, ale dzięki wprowadzeniu fali odniesienia (i spójności światła) pojawiają się w nim nowe składniki. Natężenie I wynosi wtedy

$$I = I_p + I_o + I_{po},$$

gdzie I_p i I_o są odpowiednio natężeniami fal przedmiotowej i odniesienia, a I_{po} jest wynikiem interferencji między obu falami i zawiera informację o ich fazie. Właśnie dzięki dodaniu fali odniesienia hologram zawiera pełną informację o fali przedmiotowej, a obrazy holograficzne są trójwymiarowe.

Gdy hologram oświetlimy światłem laserowym (prosty układ przedstawia rysunek 3), otrzymamy obraz trójwymiarowy rejestrowanego obiektu, powstający w tej samej odległości, w jakiej znajdował się przedmiot i widziany tak, jak go „widział” hologram przy zapisie. Umieszczając oko za hologramem, w sposób zaznaczony na rysunku, możemy go obserwować „jak przez szybkę”. Ściśle rzecz biorąc, podczas odczytu hologramu powstają dwa obrazy: rzeczywisty i urojony. Który z nich przedstawiony jest na rysunku 3, a który na rysunku 5?

Hologram płaski składa się z mniej lub bardziej skomplikowanych prążków interferencyjnych i działa jak superpozycja wielu siatek dyfrakcyjnych. Aby zrekonstruować obraz z takiego hologramu, niezbędne jest oświetlenie monochromatyczne, bo w przeciwnym przypadku każda barwa daje obraz nieco przesunięty, co powoduje, że rekonstrukcja jest nieczytelna.

Konieczność użycia światła laserowego do rekonstrukcji była właśnie powodem, że technika holograficzna pozostawała techniką laboratoryjną i nie wchodziła do powszechnego użytku. Jednym z wcześniejszych sposobów ominięcia tej trudności było zastosowanie zapisu objętościowego. Kiedy grubą warstwę materiału światłoczułego umieścimy w polu interferencyjnym w taki sposób, jak to zaznaczone jest na rysunku 1 (położenie B), to zapis powstaje w całej objętości materiału w postaci warstw mniej lub bardziej naświetlonych. Tak wykonany hologram nazywamy hologramem objętościowym. Może on być odtwarzany w świetle białym, gdyż ma własność selektywności chromatycznej i kierunkowej. W pierwszym przybliżeniu

można go potraktować jako filtr interferencyjny, który wycina z widma tylko tę długość fali, która spełnia warunki Bragga (patrz niżej). Na ogół warunki te są spełnione dla długości fali użytej do zapisu.

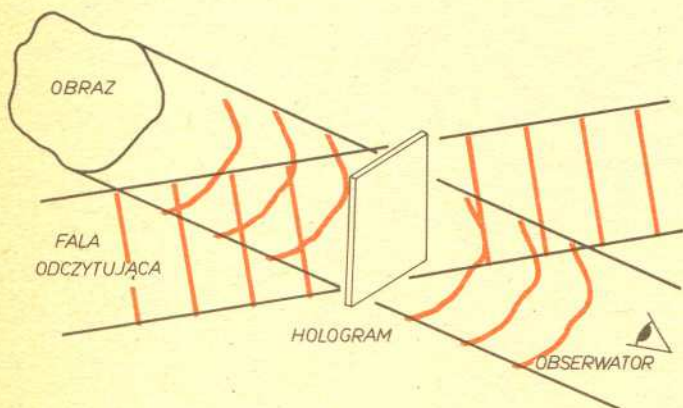
Filtr interferencyjny składa się z wielu naświetlonych płaszczyzn równoległych odbijających światło (podobnie jak warstwy atomów w kryształach). Fala padająca (np. światło białe) ulega ugięciu (rozproszeniu) na różnych płaszczyznach (patrz rysunek 4), uzyskując różne przesunięcia fazowe. W efekcie interferencji tych fal następuje wzmocnienie ich lub osłabienie w zależności od długości fali λ , kąta obserwacji θ i odległości d między płaszczyznami, zgodnie z warunkiem Bragga (warunek wzmocnienia)

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{gdzie } m = 1, 2, 3 \dots$$

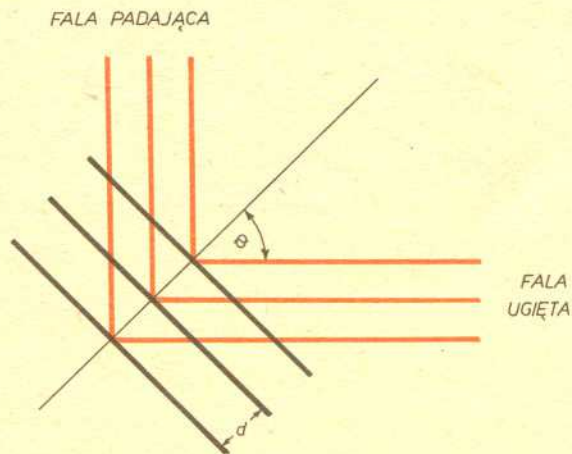
Selektywność chromatyczna i kierunkowa polegają na tym, że wzmocnienie dla różnych długości fal występuje pod różnymi kątami θ .

Technika objętościowa pozwala uzyskiwać obrazy holograficzne w naturalnych barwach. Wymaga to wielokrotnych naświetleń, z których każde tworzy hologram odpowiadający innej barwie, użytej do zapisu. W procesie rekonstrukcji światłem białym otrzymujemy superpozycję odtworzeń wiernie odpowiadającą obiektowi pierwotnemu. Ta technika jest w tej chwili bardzo rozwijana na całym świecie przez miłośników holografii artystycznej. Coraz częstsze są wystawy hologramów artystycznych. Powstały również muzea holograficzne, cieszące się wielką popularnością. W sklepach spotyka się reklamy holograficzne, a w kioskach z upominkami można kupić breloczki-hologramy. Dzięki uzyskiwaniu coraz to lepszych materiałów światłoczułych jakość obrazów bywa w tej chwili taka, że do złudzenia przypominają one oryginał.

Ale każdy hologram wykonany techniką objętościową jest jak dzieło artysty — trudny do skopiowania. Można więc mieć pojedyncze egzemplarze, ale nie ma mowy o masowym powielaniu dla celów komercyjnych. Ogromnej rewolucji w tej dziedzinie dokonały tzw. hologramy tęczowe, zaproponowane przez Bentona. Jego idea sprowadza się właściwie do wykonania hologramu z hologramu, przy czym zapis hologramów jest płaski. Pierwszy hologram jest zapisany w układzie konwencjonalnym z boczną falą odniesienia (rys. 2).



Rys. 3



Rys. 4

Drugi etap, polegający na zapisie hologramu z hologramu, przedstawiony jest na rysunku 5. Pomysł Bentona polegał na użyciu w tym drugim etapie szczeliny przesłaniającej hologram pierwotny. Odtwarzany z tak zamaskowanego hologramu obraz jest równocześnie rejestrowany przedmiotem na drugim hologramie, czyli na hologramie Bentona. Hologram Bentona rejestruje również obraz szczeliny maskującej hologram pierwotny.

Podczas rekonstrukcji (rys. 6) między obserwatorem a hologramem powstaje obraz przedmiotu oraz, w innej płaszczyźnie, bliżej obserwatora, obraz szczeliny maskującej. Jeśli taki hologram oświetlimy światłem białym, to wraz ze zmianą długości fali obrazy szczelin i obrazy przedmiotu dla różnych długości fal wypadają w innym miejscu, na różnych wysokościach. Obrazy szczelin, odpowiadające różnym barwom, są rozdzielone przestrzennie. Umieszczając oko w płaszczyźnie szczeliny na danej wysokości będziemy obserwowali obraz przedmiotu, dawany przez jedną tylko długość fali. Przesunięcie oka w kierunku prostopadłym do szczeliny daje zmianę barwy obrazu — od fioletu do czerwieni, stąd nazwa „hologramy tężowe”. Jak widzimy, szczelina wprowadza w proces rekonstrukcji selektywność chromatyczną — działa jak szczelina wyjściowa monochromatora. Barwa zrekonstruowanego przedmiotu nie jest barwą oryginału, jednak obraz jest czytelny, a efekt jest zadziwiający.

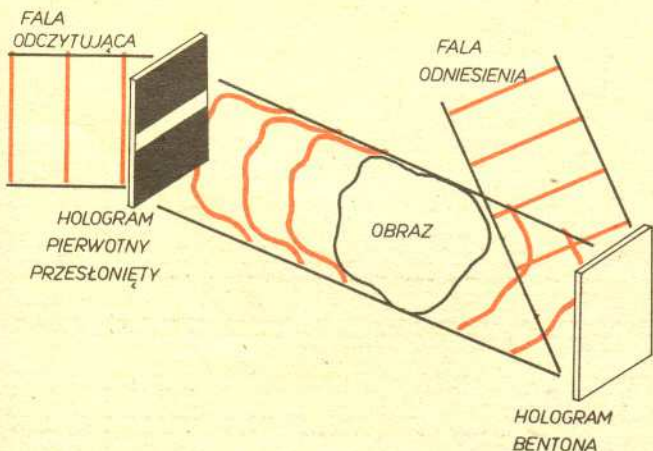
Bardzo ważny jest fakt, że metodą Bentona otrzymujemy hologram płaski. Proces kopiowania jest więc dużo prostszy niż w przypadku hologramów objętościowych. Bardzo łatwe jest też wykonanie hologramu odbiciowego, czyli takiego, na którym informacja zapisana jest nie w postaci rozkładu zacernienia na kliszy, lecz w postaci zmiennego reliefu proporcjonalnego do padającego natężenia w trakcie zapisu. Rekonstrukcja z takiego hologramu powstaje w świetle odbitym, a nie przechodzącym (jak to jest przedstawione na rysunku 6). Te cechy umożliwiły w ostatnich latach masową produkcję „hologramów tężowych”, które zaczęły się pojawiać konkurencyjnie z konwencjonalną fotografią. Ozdabiają one karty kredytowe, są na pocztówkach czy koszulkach typu *T-shirts*. Jedno z najpoczytniejszych czasopism na świecie *The National Geographic* już dwukrotnie „zafundowało” sobie okładkę z hologramem Bentona. Już widzę oczyma wyobraźni,

jak mój syn kupuje *Delę* z trójwymiarowym obrazem holograficznym na okładce.

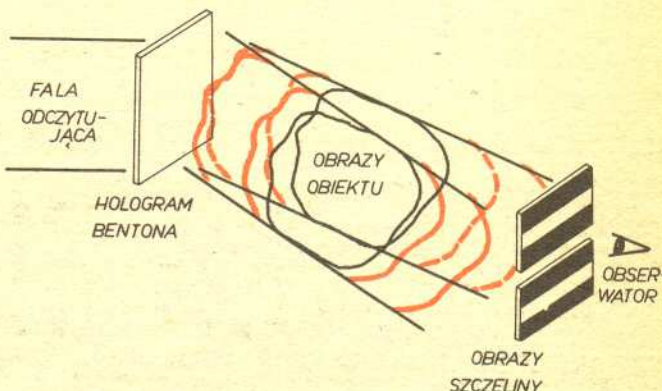
Na zakończenie chciałbym omówić jeszcze jeden, chyba najnowszy, rodzaj hologramu. Mam na myśli holografię komputerową. Na czym ona polega? Aby to zrozumieć, należy zdać sobie sprawę z tego, że światło rozproszone, niosące informację o przedmiocie, może być zapisane w postaci mniej lub bardziej skomplikowanej funkcji matematycznej, opisanej macierzą $n \times n$ punktów, odpowiadających punktom przestrzeni, w których znamy zarówno amplitudę, jak i fazę fali przedmiotowej. Stosunkowo proste operacje matematyczne pozwalają na obliczenie, za pomocą komputera, rozkładu natężenia pola odpowiadającego płaszczyźnie hologramu dla dowolnie danych rozkładów fali przedmiotowej. Otrzymane wartości liczbowe natężenia dla poszczególnych punktów hologramu można za pomocą specjalnych urządzeń przerzucić na kliszę w taki sposób, że zacernienie kliszy w danym punkcie będzie proporcjonalne do obliczonego natężenia. Tak otrzymany hologram odtwarza się światłem laserowym analogicznie jak płaski hologram konwencjonalny.

Komputerowy zapis hologramu rokuje ogromne nadzieje i ma zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. Pozwala na rejestrację dowolnych rozkładów pola odpowiadających abstrakcyjnym, trudno realizowalnym w praktyce obiektom. Ma to zastosowanie w optycznym przetwarzaniu informacji, czyli m.in. w analizie zdjęć lotniczych, zdjęć z mikroskopu elektronowego czy diagnostyce medycznej. Tą metodą wykonuje się hologramy działające jak bezberracyjne soczewki czy całe zestawy soczewek, idealnie dopasowane do potrzeb układu, w którym mają pracować.

Jak widzimy, zastosowania techniki holograficznej są ogromne i bardzo różnorodne. Omówiłam tu tylko niektóre, te, które w tej chwili walczą o swoje miejsce. Jest wiele innych zastosowań, takich jak np. interferometria holograficzna, które są powszechnie stosowane już od lat. Dzięki realizacji pełnego zapisu informacji holografia otworzyła możliwości dotychczas niedostępne. Opracowanie nowych materiałów światłoczułych i nowych metod zapisu umożliwiła coraz to nowe zastosowania i ciągle poszerzanie grona odbiorców. Chyba nie zostało powiedziane jeszcze ostatnie słowo w tej dziedzinie.



Rys. 5



Rys. 6