

Invenția se referă la metode de înregistrare a informației optice și poate fi utilizată pentru înregistrarea imaginilor obiectelor cu o intensitate a iluminării mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale monocrome.

Metoda se utilizează atunci când obiectul înregistrat nu poate fi iluminat cu intensități înalte, de exemplu, pentru înregistrarea imaginilor obiectelor fotosensibile, atunci când iluminarea obiectelor cu intensitate înaltă poate afecta proprietățile obiectului.

Este cunoscută o metodă de înregistrare a hologramelor pe o cameră digitală cu sensibilitatea minimă, care permite obținerea hologramelor obiectului studiat cu sensibilitatea de fază la nivelul limitelor de fotosensibilitate ale camerei digitale utilizate, folosind o sursă coerentă de radiație laser, care permite înregistrarea imaginilor holografice ale obiectului studiat. Holograma obiectului studiat este înregistrată ca rezultat al interferenței a două fascicule laser, un fascicul care a trecut prin obiect și un fascicul de referință, care se proiectează pe matricea camerei digitale. Metoda propusă permite înregistrarea și reconstrucția informației despre amplitudine și fază a obiectului studiat la intensitățile iluminării laserului la nivelul limitelor de fotosensibilitate ale camerei digitale utilizate [1].

Dezavantajul metodei cunoscute constă în aceea că aceasta nu permite înregistrarea imaginilor obiectelor la intensități mai mici decât sensibilitatea minimă a camerei digitale utilizate.

Problema pe care o rezolvă invenția constă în asigurarea înregistrării imaginilor obiectelor cu intensitatea iluminării mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale monocrome utilizate.

Metoda, conform invenției, înlătură dezavantajul menționat mai sus prin aceea că imaginea unui obiect, iluminat cu un fascicul de radiație laser coerentă, se proiectează pe matricea unei camere digitale cu o intensitate mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale utilizate, iar matricea camerei digitale se iluminează cu un fascicul laser suplimentar din aceeași sursă de radiație laser cu o astfel de intensitate, încât la interferența fasciculului laser de la obiect și a fasciculului laser suplimentar intensitatea minimă a imaginii de interferență formate să fie nu mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale, totodată imaginea obiectului de pe matricea camerei digitale se înregistrează ca un set de franje de interferență întunecate și luminoase, cu intensitatea franjelor luminoase mai mare decât sensibilitatea minimă a camerei digitale.

Rezultatul tehnic al invenției constă în înregistrarea imaginii obiectului pe matricea unei camere digitale, atunci când intensitatea iluminării este mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei.

Invenția se explică prin desenele din fig. 1-8, care reprezintă:

- fig. 1, schema sistemului de realizare a metodei de înregistrare a imaginilor obiectelor cu intensitatea iluminării mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale monocrome;

- fig. 2, imaginea F1 a obiectului, înregistrată la intensitatea fasciculului  $I_1=1500 \text{ nW/cm}^2$ ;

- fig. 3, imaginea F1 a obiectului, înregistrată la intensitatea fasciculului  $I_1=172 \text{ nW/cm}^2$ ;

- fig. 4, modelul de distribuție a intensității franjelor de interferență atunci când matricea camerei digitale este iluminată de imaginea de interferență formată de fasciculele laser cu intensități: a)  $I_1=I_{ms}=1$  și  $I_2=1$ , b)  $I_1=I_{ms}=1$  și  $I_2=4$ ;

- fig. 5, imaginea F1 a obiectului, înregistrată la intensitatea fasciculului de la obiect  $I_1=I_{ms}=172 \text{ nW/cm}^2$  și a fasciculului  $I_2\sim 688 \text{ nW/cm}^2$ ;

- fig. 6, imaginea F1 a obiectului, înregistrată la intensitatea fasciculului care ajunge la matricea camerei: a)  $I_1=125 \text{ nW/cm}^2$ , b)  $I_1=125 \text{ nW/cm}^2$  și  $I_2\sim 590 \text{ nW/cm}^2$ ;

- fig. 7, imaginea F1 a obiectului, înregistrată la intensitatea fasciculului de la obiect  $I_1=67 \text{ nW/cm}^2$  și a fasciculului  $I_2\sim 454 \text{ nW/cm}^2$ ;

- fig. 8, imaginea F1 a obiectului, înregistrată la intensitatea fasciculului de la obiect  $I_1=24 \text{ nW/cm}^2$  și a fasciculului  $I_2\sim 324 \text{ nW/cm}^2$ .

Metoda de înregistrare a imaginilor obiectelor cu intensitatea iluminării mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale monocrome (fig. 1) constă în aceea că fasciculul de radiație laser plan paralel 1 cu lungimea de undă 532 nm, este împărțit în două fascicule, folosind cubul de separare 2. Primul fascicul cu intensitatea  $I_1$  trece prin primul set de filtre 3, iluminează obiectul 4, trece prin placa de sticlă transparentă 5 cu grosimea de 20 mm și, folosind lentila 6, imaginea obiectului este focalizată pe matricea camerei digitale 7, cu o intensitate mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale. Al doilea fascicul cu intensitatea  $I_2$ , când grila 9 este deschisă, cu ajutorul oglinzilor M1 și M2 este proiectat prin al doilea set de filtre 8 pe placa transparentă 5 și semnalul iluminării reflectate de la placa 5 este proiectat deasupra imaginii obiectului pe matricea camerei digitale 7 la un unghi  $\Theta$ . Perioada imaginii de interferență depinde de lungimea radiației laser și de unghiul  $\Theta$  [M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 7th ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1999; R. Collier, K. Burckhardt, and L. Lin. Optical Holography, Academic, New York, 1971.]. Ca urmare a interferenței fasciculelor cu intensitatea  $I_1$  și  $I_2$ , imaginea obiectului se formează în formă de imagine de interferență, constând dintr-un set de franje întunecate și luminoase. Intensitatea fasciculului  $I_1$  se setează, utilizând setul de filtre 8, astfel încât intensitatea minimă a imaginii de interferență să fie mai mare sau egală cu sensibilitatea minimă a camerei digitale și intensitatea maximă a franjelor de interferență să fie mai mare decât sensibilitatea minimă a camerei digitale. Imaginea obiectului înregistrat este recunoscută de contrastul dintre franjele întunecate și luminoase a imaginii de interferență.

Exemplu de realizare a invenției

Imaginea F1 a obiectului înregistrat 4 (fig. 1), realizat în formă de simboluri transparente pe fundal opac, se focalizează pe matricea camerei digitale 7. Fasciculul cu intensitatea  $I_2$  se suprapune cu ajutorul grilei 9 și imaginea F1 a obiectului 4 se înregistrează cu intensitatea fasciculului  $I_1=1500 \text{ nW/cm}^2$ . Imaginea se înregistrează pe camera digitală monocromă DCC1545M-GL ThorLabs, softul căreia permite monitorizarea imaginii pe ecranul

calculatorului în timp real. Imaginea se înregistrează cu timp de expunere de 0,04 ms. Fig. 2 reprezintă imaginea obiectului F1 înregistrat cu intensitatea fasciculului  $I=1500 \text{ nW/cm}^2$ . Cu ajutorul setului de filtre 3 (fig. 1), intensitatea fasciculului  $I_1$  se reduce până la sensibilitatea minimă a camerei digitale și se înregistrează imaginea F1. Fig. 3 reprezintă imaginea F1, înregistrată în apropierea sensibilității minime a camerei digitale atunci când imaginea F1 este abia vizibilă. Camera digitală 7 (fig. 1) se deplasează și cu ajutorul fotodetectorului S120VC - PM100 USB ThorLabs, ce măsoară intensitatea fasciculului  $I_1$ , și corespunde sensibilității minime a camerei digitale. Imaginea F1 (fig. 3), se înregistrează cu intensitatea fasciculului  $I_1$  care se încadrează în matricea camerei  $I_1=172 \text{ nW/cm}^2$ , ceea ce reprezintă sensibilitatea minimă  $I_{ms}$  a camerei digitale utilizate la timpul de expunere de 0,04 ms. Imaginea F1 înregistrată a obiectului 4 (fig. 3) poate fi recunoscută cu dificultate. Pentru înregistrarea imaginii conform metodei propuse, grila 9 (fig. 1) se deschide și fasciculul cu intensitatea  $I_2$  iluminează matricea camerei pe deasupra imaginii obiectului F1, în timp ce intensitatea fasciculului  $I_1$  de la obiectul 4 nu se schimbă și rămâne la același nivel. Drept rezultat al interferenței fasciculelor cu intensitatea  $I_1$  și  $I_2$ , se formează imaginea de interferență care constă din franjele întunecate și luminoase. Distribuția intensității imaginii de interferență corespunde ecuației:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (1)$$

unde  $\varphi$  este diferența fazelor.

Din formula (1) rezultă că maximul și minimul intensității imaginii de interferență sunt descrise prin formulele:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2)$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3)$$

Așa cum se vede din formula (3), cu intensitățile egale ale fasciculelor  $I_1=I_2$ , intensitatea minimă a imaginii de interferență este  $I_{min}=0$ . Intensitatea maximă, conform formulei (2), va fi de patru ori mai mare decât intensitatea fasciculelor  $I_1$  sau  $I_2$  [R. Collier, K. Burckhardt, and L. Lin. Optical Holography, Academic, New York, 1971]. În acest caz, este posibilă înregistrarea imaginii F1 a obiectului 4 ca un set de franje de interferență luminoase și întunecate. Contrastul oricărei imagini, conform formulei lui Michelson, se calculează din relația [M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 7th ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1999]:

$$k = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4)$$

unde  $I_{max}$  și  $I_{min}$  sunt intensitățile maxime și minime ale imaginii.

La interferența a două fascicule de radiație laser coerente, contrastul imaginii de interferență înregistrate este numit ca vizibilitatea franjelor de interferență. Prin substituirea formulelor (2) și (3) în (4), se obține o formulă pentru vizibilitatea franjelor de interferență:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (5)$$

Vizibilitatea franjelor de interferență și contrastul imaginii de interferență înregistrate vor fi egale ( $k=V$ ) în cazul sensibilității suficiente a mediului de înregistrare. Dar în cazul dat este o limită – sensibilitatea minimă a camerei digitale (pentru camera utilizată  $I_{ms}=172 \text{ nW/cm}^2$ ). Pentru a efectua o analiză teoretică a procesului de înregistrare a imaginii cu o intensitate mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale, se indică sensibilitatea minimă a camerei ca o unitate arbitrală  $I_{ms}=1$ . Dacă cu ajutorul setului de filtre 3 (fig. 1) de setat intensitatea fasciculului de la obiect tot egală cu 1,  $I_1=I_{ms}=1$ , atunci conform formulei (5), vizibilitatea franjelor de interferență va fi maximă  $V=1$ . Totodată contrastul imaginii înregistrate de camera digitală depinde de sensibilitatea minimă a camerei digitale. Fig. 4a reprezintă diagrama distribuției intensității franjelor de interferență atunci când matricea camerei digitale este iluminată cu imaginea de interferență, care este formată prin interferența fasciculelor laser cu intensitățile  $I_1=I_{ms}=1$  și  $I_2=1$ . Fascicul laser cu intensitatea  $I_2$  iluminează întreaga suprafață a matricei, dar fasciculul cu intensitatea  $I_1$  focalizează pe suprafața matricei o imagine a unui obiect în intervalul de coordonate  $X_1$  și  $X_2$ . În acest caz, pe o parte a matricei iluminate de fascicule cu intensitățile  $I_1$  și  $I_2$  egale, se formează o imagine de interferență cu vizibilitatea franjelor (conform formulei (5))  $V=1$ , dar intensitatea semnalului imaginii de interferență în intervalul de la 0 până la 1 (fig. 4a) este mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale  $I_{ms}$ . În acest caz, contrastul imaginii obiectului înregistrat de camera digitală va fi calculat din condiția  $I_{min}=1$  (formula (3)) și  $I_{max}=4$  (formula (2)) și, conform formulei (4), contrastul imaginii va fi  $k=0,6$ . Pentru a înregistra o imagine cu un contrast mai mare, este necesar de setat intensitatea  $I_2$  a fasciculului atât de mare încât, la interferența fasciculelor cu intensitățile  $I_1$  și  $I_2$ , intensitatea minimă a franjelor de interferență  $I_{min}$  (formula (3)) să fie egală cu sensibilitatea minimă a camerei digitale  $I_{min}=I_{ms}$ . În acest caz, conform formulei (2),  $I_{max}=9$  și, conform formulei (3)  $I_{min}=1$ , iar contrastul imaginii înregistrate, conform formulei (4), va fi  $k=0,8$  (fig. 4b). Astfel, pentru a înregistra imagini la intensități mai mici decât sensibilitatea minimă a camerei digitale, este necesar să se stabilească intensitatea fasciculului  $I_2$  cu așa valoare, că interferența fasciculului cu intensitatea  $I_1$  de la obiectul 4 și fasciculul cu intensitatea  $I_2$  să formeze o imagine de interferență cu o intensitate minimă a franjelor de interferență  $I_{min}$  (formula (3)) egală cu sensibilitatea minimă a camerei digitale  $I_{min}=I_{ms}$ .

Când intensitatea fasciculului de la obiectul 4 este egală cu  $I_1=I_{ms}=172 \text{ nW/cm}^2$ , intensitatea fasciculului  $I_2$ , folosind setul de filtre 8 (fig. 1), este setată la  $I_2 \sim 688 \text{ nW/cm}^2$ . Ca rezultat al interferenței fasciculelor, se formează imaginea de interferență cu intensitățile, conform formulelor (2) și (3),  $I_{max} \sim 1548 \text{ nW/cm}^2$  și  $I_{min} \sim 172 \text{ nW/cm}^2$ . Contrastul imaginii F1 a obiectului 4, înregistrată de camera digitală, conform formulei (4), va fi  $k=0,8$ . Imaginea F1

(fig. 5) a obiectului 4 este destul de bine recunoscută, spre deosebire de imaginea din fig. 3, în timp ce ambele imagini au fost înregistrate la aceeași intensitate a fasciculului de la obiect  $I_1 = 172 \text{ nW/cm}^2$ . Scanarea imaginii din fig. 5, folosind programul Origin 8.5, permite determinarea distribuției intensității imaginii în unități arbitrare de gradare a culorii gri de la 0 la 255 [A. Chirita, N. Kukhtarev, O. Korshak, V. Prilepov and Iu. Jidcov. Recording holograms of micro-scale objects in real time. Laser Physics, V. 23, N.3, 2013]. În partea de sus a imaginii din fig. 5 este reprezentată o diagramă de distribuție a intensității prin scanarea longitudinală a imaginii F1 (linia albă de-a lungul imaginii). După cum se vede din diagramă, imaginea obiectului este recunoscută ca rezultat al contrastului franjelor întunecate și luminoase ale imaginii de interferență.

Când intensitatea fasciculului de la obiectul F1 este redusă până la  $I_1=125 \text{ nW/cm}^2$ , care este mai mică decât sensibilitatea minimă a camerei digitale  $I_{ms}=172 \text{ nW/cm}^2$ , imaginea obiectului nu poate fi înregistrată de camera digitală (fig. 6a). Pentru înregistrarea imaginii, intensitatea fasciculului  $I_2$  este stabilită, utilizând setul de filtre 8 (fig. 1), până la  $I_2\sim 590 \text{ nW/cm}^2$ . Ca rezultat al interferenței fasciculelor  $I_1$  și  $I_2$ , se formează imaginea de interferență cu intensități, conform formulelor (2) și (3),  $I_{max}\sim 1258 \text{ nW/cm}^2$  și  $I_{min}\sim 172 \text{ nW/cm}^2$ . Contrastul imaginii F1, înregistrate de camera digitală, conform formulei (4), va fi  $k=0,76$ . Fig. 6b reprezintă imaginea F1, înregistrată la intensitatea semnalului de la obiectul 4 cu intensitatea  $I_1=125 \text{ nW/cm}^2$  și  $I_2\sim 590 \text{ nW/cm}^2$ . După cum se vede din fig. 6b, imaginea F1 a obiectului este destul de bine recunoscută, spre deosebire de imaginea din fig. 6a.

Când intensitatea fasciculului de la obiectul 4 este redusă până la  $I_1=67 \text{ nW/cm}^2$ , intensitatea fasciculului  $I_2$  este stabilită, utilizând setul de filtre 8 (fig. 1), până la  $I_2\sim 454 \text{ nW/cm}^2$ . Ca rezultat al interferenței fasciculelor cu intensitatea  $I_1$  și  $I_2$ , se formează imaginea de interferență cu intensități, conform formulelor (2) și (3),  $I_{max}\sim 869 \text{ nW/cm}^2$  și  $I_{min}\sim 172 \text{ nW/cm}^2$ . Contrastul imaginii F1 a obiectului 4, înregistrate de camera digitală, conform formulei (4), va fi  $k=0,67$ . Fig. 7 reprezintă imaginea F1, înregistrată la intensitatea fasciculului de la obiect  $I_1=67 \text{ nW/cm}^2$  și a fasciculului  $I_2\sim 454 \text{ nW/cm}^2$ . Așa cum se vede din fig. 7, imaginea obiectului F1 este bine recunoscută.

Când intensitatea fasciculului de la obiectul 4 este redusă până la  $I_1=24 \text{ nW/cm}^2$ , intensitatea fasciculului  $I_2$  este stabilită, utilizând setul de filtre 8 (fig. 1), până la  $I_2\sim 324 \text{ nW/cm}^2$ . Ca rezultat al interferenței fasciculelor cu intensitatea  $I_1$  și  $I_2$ , se formează imaginea de interferență cu intensități, conform formulelor (2) și (3),  $I_{max}\sim 524 \text{ nW/cm}^2$  și  $I_{min}\sim 172 \text{ nW/cm}^2$ . Contrastul imaginii F1, înregistrate de camera digitală, conform formulei (4), va fi  $k=0,5$ . Fig. 8 reprezintă imaginea F1, înregistrată la intensitatea fasciculului de la obiect  $I_1=24 \text{ nW/cm}^2$  și a fasciculului  $I_2\sim 324 \text{ nW/cm}^2$ . Așa cum se vede din fig. 8, imaginea F1 poate fi recunoscută.