

(12) **CERERE DE BREVET DE INVENȚIE**

(21) Nr. cerere: **a 2018 00890**

(22) Data de depozit: **12/11/2018**

(41) Data publicării cererii:  
**29/05/2020** BOPI nr. **5/2020**

(71) Solicitant:  
• **UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI, SPLAIUL INDEPENDENȚEI NR.313, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU FIZICA LASERILOR, PLASMEI ȘI RADIAȚIEI, STR.ATOMIȘTILOR NR.409, MĂGURELE, IF, RO**

(72) Inventatori:  
• **MIHĂILESCU MONA,**  
**STR.ALEEA SOMEȘUL RECE, NR.21, BL.8, SC.3, ET.1, AP.40, SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO;**

• **SCARLAT EUGEN NICOLAE,**  
**STR. MÂNTULEASA, NR.2, ET.2, AP.3, SECTOR 2, BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **MIHALE NICOLAE,**  
**STR.SOLDAT GHEORGHE DUMITRU, NR.1, DOBROEȘTI, IF, RO;**  
• **PĂUN IRINA ALEXANDRA,**  
**STR.FĂȚ FRUMOS, NR.7, BL.P13, SC.1, AP.32, SECT.5, BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **LUCULESCU CĂTĂLIN ROMEO,**  
**STR. DRUMUL TABEREI NR. 104, BL. M17, AP. 30, BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **CĂLIN BOGDAN ȘTEFĂNIȚĂ,**  
**STR.CASTANILOR, NR.1, URLAȚI, PH, RO**

(54) **SISTEM DE COMUNICAȚII OPTICE ÎN SPAȚIUL LIBER CU ARHITECTURĂ RAMIFICATĂ FOLOSIND LAME CU FAZĂ ELICOIDALĂ ȘI HOLOGRAME PENTRU MULTIPLEXAREA MODURILOR**

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un sistem cu arhitectură ramificată destinat comunicațiilor optice prin spațiul liber (COSL), pe distanțe de ordinul sutelor de metri. Sistemul conform invenției conține unități de emisie cu holograme și lame de fază pentru modulația elicoidală cu momente cinetice orbitale (MCO) distincte care realizează multiplexarea cu divizarea modurilor (MDM) a două, trei sau patru fascicule laser independente, pe aceeași cale fizică, unitățile de emisie fiind configurate într-o rețea care permite multiplexarea progresivă a modurilor și care produc și un fascicul MDM complementar, pentru creșterea redundanței informaționale, și unități de recepție care realizează demultiplexarea folosind câte o singură hologramă de citire, cu constante spațiale x-y adaptate la valorile MCO din fasciculul multiplexat incident și la combinațiile acestora, iar corectitudinea modului demultiplexat este validată de o matrice de fotodetectori prevăzută cu o unitate software adecvată.

Revendicări: 8  
Figuri: 8

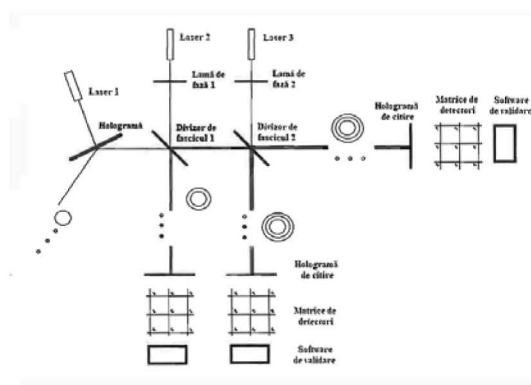
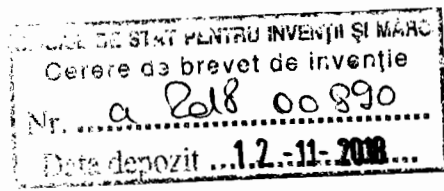


Fig. 7

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).





**TITLUL**

**“SISTEM DE COMUNICAȚII OPTICE ÎN SPAȚIUL LIBER CU ARHITECTURĂ RAMIFICATĂ FOLOSIND HOLOGRAME ȘI LAME CU FAZĂ ELICOIDALĂ PENTRU MULTIPLEXAREA MODURILOR”**

Invenția se referă la tehnologii COSL. Sistemul permite transmiterea de informații pe distanțe scurte, în rețea localizată, cu utilizatori multipli, fără a fi necesară alocarea de bandă. Capacitatea de transmisie este crescută prin multiplexare MDM.

În 2008, MRV Communications a introdus un sistem COSL cu o viteză de 10Gbit/s la distanța de 350m. În 2013, compania MOSTCOM a produs în serie un sistem COSL cu viteză de transmisie de 10Gbit/s, la o distanță de până la 2,5 km, care scade însă până la 10Mbit/s din cauza perturbațiilor atmosferice. În 2014, o companie din Centrul Tehnologic "Fiord" a atins o viteză de transmisie de 30 Gbit/s în condiții de laborator.

Studii militare au condus la COSL cu bătaia de ordinul a 2-3 km la altitudini de până la 12km [1]. Stabilitatea și calitatea legăturii depind în mare măsură de factorii atmosferici, cum ar fi ploaia, ceața, praful și gradientii de temperatură. Probabilitatea de eroare este de ordinul  $10^{-5}$ , inacceptabilă. În 2013, comunicarea prin laser dintre sol și un avion militar a fost demonstrată pentru o viteză de transmisie de 1Gbit/s pe o distanță de 60 km și la o viteză de zbor de 800 km/h.

În spațiul cosmic, fără turbulențe semnificative, sistemul Starlink-ul SpaceX oferă o acoperire globală de bandă largă între câteva sute până la mii de sateliți utilizând comunicații laser. În 2014 Agenția Spațială Europeană a pus în funcțiune Sistemul european de transmitere a datelor (EDRS) la viteza de 2Gbit/s. Sistemul este operațional.

Niciunul dintre COSL menționate anterior nu folosește MDM. MDM este o tehnologie optică destinată depășirii limitării de bandă folosind moduri spațiale ortogonale cu MCO diferite. Ortogonalitatea introduce grade de libertate suplimentare care măresc densitatea informației prin multiplexare adecvată.

Tehnica multiplexării MDM folosind MCO a condus la rate de transmisie de 1,036 Pbit/s utilizând 26 de moduri MCO în condiții de laborator [2] Utilizarea celei de-a doua ortogonalități a modurilor spațiale Laguerre–Gauss a mărit densitatea până la sute de moduri pe canal [3]. Teoretic, rețelele spațiale cu intrări și ieșiri multiple (MIMO) folosind MDM cu baze complete pot atinge densități limitate doar de baza ortogonală utilizată [4]. În toate cazurile, în ciuda codurilor corectoare, turbulențele atmosferice reduc entropia canalului cu circa două ordine de mărime [5].

Din acest motiv brevetele existente se referă la MIMO cu MDM cu transmisie pe fibre optice [6], sau MDM cu transmisie prin spațiul liber, dar în domeniul microundelor [7] dar nu există MIMO cu COSL în domeniul optic.

Invenția de față reclamă MIMO pentru COSL cu MDM pe o cale fizică monocanal.

Problemele tehnice la care se referă invenția sunt:

- 1/ Interconexiuni optice cu fascicule MDM fără fibră optică;
- 2/ Dispozitive de emisie și recepție cu holograme și lame de fază elicoidală fabricate prin scriere directă în fotopolimer pe substrat de sticlă la imprimantă 3D;
- 3/ Crearea unei rețele cu ieșiri / intrări multiple, cu multiplexare în scară progresivă, pentru distribuirea mesajelor după numărul de utilizatori, importanță, distanța de transmisie;

- 4/ Utilizarea, în cazul multiplexării MDM celei mai dense, a două fascicule MDM complementare pentru mărirea redundanței informaționale;  
 5/ Transmiterea locală a unui volum mare de informații fără alocare de bandă (monocanal).

Un fascicul laser gaussian purtător de mesaj, incident pe o hologramă este modulată MCO și distribuit în ordinele de difracție; pentru ordinul unu se obțin valorile MCO  $+m_0$  și  $-m_0$ . Unul din ele poate fi transmis prin spațiul liber către o unitate de recepție, celălalt este trimis spre un divizor de fascicul (DF1) unde se multiplexează cu alt fascicul laser purtător de mesaj și cu alt MCO,  $m_1$ , produs de o lamă de fază elicoidală adecvată, rezultând un fascicul cu două moduri multiplexate. De la DF1 rezultă două vortexuri cu MCO diferite, multiplexate pe aceeași cale (laserele funcționează pe aceeași lungime de undă). Unul dintre fasciculele multiplexate se transmite ca atare prin spațiul liber spre o unitate de recepție, iar celălalt se poate multiplexa suplimentar prin DF2 cu un alt fascicul purtător de mesaj, cu MCO de valoare  $m_2$ , modulată de o altă lamă de fază elicoidală. Procedul poate continua în progresie aritmetică. Ultimul fascicul conține cea mai mare densitate de moduri, fiind disponibil și în varianta complementară. Rețeaua produce și fasciculele cu modurile conjugate.

Pentru fiecare fascicul MDM transmis COSL este necesară câte o unitate de recepție cu hologramă de citire care să realizeze demultiplexarea. Aceasta conține valori MCO egale și de semn contrar cu cele din fasciculul incident și este proiectată încât să trimită fiecare MCO în altă poziție unde există câte o fotocelulă. Matricea de fotocelule din fiecare unitate de recepție este conectat la o unitate software de validare a iluminării incidente.

Invenția elimină fibra optică și poate fi exploatată industrial în comunicații localizate (între blocuri, între etajele aceleiași clădiri, sau aplicații casnice), la sincronizarea mașinilor agricole, la ghidarea dispozitivelor robotizate sau a proceselor de producție în spații închise.

Utilizarea hologramelor și a lamelor de fază produse dedicat la imprimantă 3D, ca și a diodelor laser și a fotocelulelor disponibile comercial face ca sistemele să poată fi ușor configurate și instalate în structuri compacte.

Avantajele invenției sunt următoarele:

- Comunicațiile sunt de mare capacitate, permanente, fără alocare de bandă și fără fibră;
- Oferă o variantă compactă prin utilizarea hologramelor și a lamelor de fază elicoidală fabricate cu imprimanta 3D prin scriere directă în fotopolimer;
- Utilizarea hologramelor pentru două funcții: divizare și modulare fascicul, simplifică schema optică și oferă sisteme mai compacte, mai ușor de aliniat
- Oferă o tehnologie optică MDM la problema obținerii unor fascicule care conțin 1, 2, ...,  $n$  mesaje independente (fascicule laser independente, aici  $n=4$ );
- Mărește capacitatea sistemelor COSL cu un factor egal cu  $n(n+1)/2$ , unde  $n$  este numărul modurilor multiplexate;
- Demultiplexarea se realizează optic cu câte o singură hologramă pentru fiecare fascicul MDM;
- Matricea de detectoare optice este însoțită de un software care reglează pragul de decizie în funcție de caracteristicile statistice ale mediului prin care se propagă fasciculele MDM.

Figurile următoare reprezintă un exemplu nelimitativ de realizare a invenției:

Fig.1 Holograma obținută prin interferența dintre o undă plană și o fază elicoidală cu MCO  $m=11$

Fig.2 Lamă de fază elicoidală cu moment cinetic orbital de valoarea  $m_2=4$

Fig.3 Schema de principiu a ansamblului de emisie-recepție



Fig.4 Schița sistemului cu arhitectura ramificată (unitatea de emisie)

Fig.5 Vortexuri concentrice multiplexate

Fig.6a Hologramă de citire (demultiplexare)  $H(mx, Kx), (my, Ky)$

Fig.6b Pozițiile spațiale ale vortexurilor dacă pe holograma  $H(mx, Kx), (my, Ky)$  ar fi incident un fascicul gaussian

Fig.7 Schița sistemului propus cu formarea fasciculelor MDM din multiplexate a trei fascicule laser simple modulate cu vortexuri cu MCO diferite urmată de demultiplexarea cu holograma de citire și detecție

Fig.8a Demultiplexarea unui fascicul MDM cu două vortexuri (stânga) și unui fascicul MDM cu patru vortexuri (dreapta)

Fig.8b Demultiplexarea a două fascicule conjugate MDM cu trei vortexuri

Pentru soluționarea problemei apărute la interconexiuni pentru obținerea mai multor fascicule MDM în care sunt multiplexate două, trei sau mai multe fascicule simple, fiecare modulat cu propriul MCO, și pentru demultiplexarea acestora, soluția propusă este includerea unor elemente optice de diferite tipuri: hologramă (Fig.1) și lamă cu faza elicoidală (Fig.2). Ambele sunt proiectate pe baza unei funcții care generează o fază elicoidală și conține o anumită valoare MCO:  $FE_m = e^{i \cdot m \cdot \theta}$  unde  $m$  este legat de valoarea MCO, iar unghiul  $\theta$  scanează întreg planul în intervalul  $0-2\pi$ .

Cele două elemente folosite sunt proiectate astfel:

1. Pentru a obține o hologramă  $H$  (Fig.1), se simulează interferența dintre această distribuție bidimensională de fază și o undă plană  $UP_{Kx} = e^{iK_x \cdot x}$ , unde  $K_x = (2\pi / \lambda)k_x$ ,  $\lambda$  este lungimea de undă a laserului, iar valoarea  $k_x$  este un factor de multiplicare pentru frecvența spațială legată de distanța dintre franjele care se formează prin interferență:

$$H = |UP_{Kx} + FE_m|^2 = |e^{iK_x \cdot x} + e^{i \cdot m \cdot \theta}|^2$$

Această distribuție  $H$  este reprezentată în Fig.1 pentru  $m1=13$ .

2. Pentru a obține o lamă cu faza elicoidală se reprezintă distribuția bidimensională dată de  $FS_m = e^{im\theta}$  pentru diferite valori  $m$ . În Fig.2 este reprezentat pentru  $m2=4$  și  $m3=8$ .

Aceste elemente formează o bază pentru a fi incluse sub diferite forme în unitățile de emisie și de recepție ale COSL cu interconexiuni, format din mai multe unități de emisie și mai multe unități de recepție (Fig. 3), între care există divizoare de fascicul pentru divizarea sau suprapunerea mai multor fascicule.

Prima unitate de emisie (Fig.4) va conține un laser L1 modulat în frecvență de un mesaj și o  $H$  care realizează simultan modularea cu  $m0$  și divizarea fasciculului laser în două fascicule modulate  $+m0$  și  $-m0$ . Celelalte unități de emisie conțin fiecare câte un laser L2, L3, fiecare modulat în frecvență la ieșirea de pe câte o lamă cu faza elicoidală ( $m2$  și  $m3$ ).

Acestea se vor diviza sau suprapune prin intermediul DF, rezultând fasciculele MDM cu 2, 3 semnale, fiecare modulat cu altă valoare MCO ( $m2$  și  $m3$ ) (Fig.5). Fiecare mod reprezintă un vortex spațial, fasciculele multiplexate fiind inele de intensitate în jurul unui minim central. Aceste fascicule multiplexate vor călători prin spațiul liber până la unitățile de recepție unde vor fi incidente pe holograme de citire (Fig.6a) proiectate prin suprapunerea a două holograme de tipul  $H$  descris mai sus.

$$H_1 = |UP_{Kx} + FE_{m1}|^2 = |e^{iK_x \cdot x} + e^{i \cdot m1 \cdot \theta}|^2$$

$$H_2 = |UP_{Ky} + FE_{m2}|^2 = |e^{iK_y \cdot y} + e^{i \cdot m2 \cdot \theta}|^2$$

$$H(mx, Kx), (my, Ky) = H_1 + H_2 \quad (\text{Fig. 6a}).$$

Similar,  $K_y = (2\pi/\lambda)k_y$ . În Fig.6b este rezultatul incidenței unui fascicul gaussian pe o hologramă  $H(mx, Kx), (my, Ky)$ .

Pentru fiecare unitate de recepție (Fig.7) este necesară câte o hologramă de citire  $H(mx, Kx), (my, Ky)$  care să realizeze demultiplexarea. Holograma de citire este proiectată cu acele valori MCO conținute în fasciculul incident. Aceasta are pe direcțiile  $Ox$  și  $Oy$  câte un MCO  $m_x, m_y$  (inclusiv conjugatele), poziționate după frecvențele spațiale asociate  $K_x, K_y$ . Se formează o matrice de fascicule demultiplexate spațial după valorile  $K_x, K_y$ , fiecare fascicul având alt MCO.

La trecerea unui fascicul multiplexat MDM printr-o hologramă de citire, aceasta va fi divizat într-o matrice de  $3 \times 3$  spoturi (Fig.8). În cazul în care valorile MCO din fasciculul MDM incident se potrivesc (valori egale dar de semn contrar) cu cele conținute în holograma de citire, inelele vor schimba minimul central în maxim central. În Fig.8a stânga este situația unui fascicul MDM cu două vortexuri, iar în Fig.8a dreapta este un fascicul MDM cu patru vortexuri. În Fig.8b este cazul unor fascicule conjugate MDM cu trei vortexuri. În acest fel, fiecare semnal va fi dirijat în poziții diferite, adică demultiplexat din fasciculul MDM incident.

Sistemul propus poate realiza interconexiuni multiple ale unor fascicule laser cu vortexuri de tip Laguerre-Gauss cu multiplexare MDM progresivă, care conțin 1, 2, 3, ... fascicule fiecare. Modulația MDM se realizează optic cu holograme și lame cu fază elicoidală care produc vortexuri optice MCO reciproc ortogonale. Sistemul este compact, hologramele și lamele de fază elicoidală fiind fabricate la imprimantă 3D.

Detecția stării de iluminare se face cu matrice de fotocelule și unitate software de validare care stabilește valori ale pragului de decizie adaptat la caracteristicile statistice ale mediului de propagare.

## Bibliografie

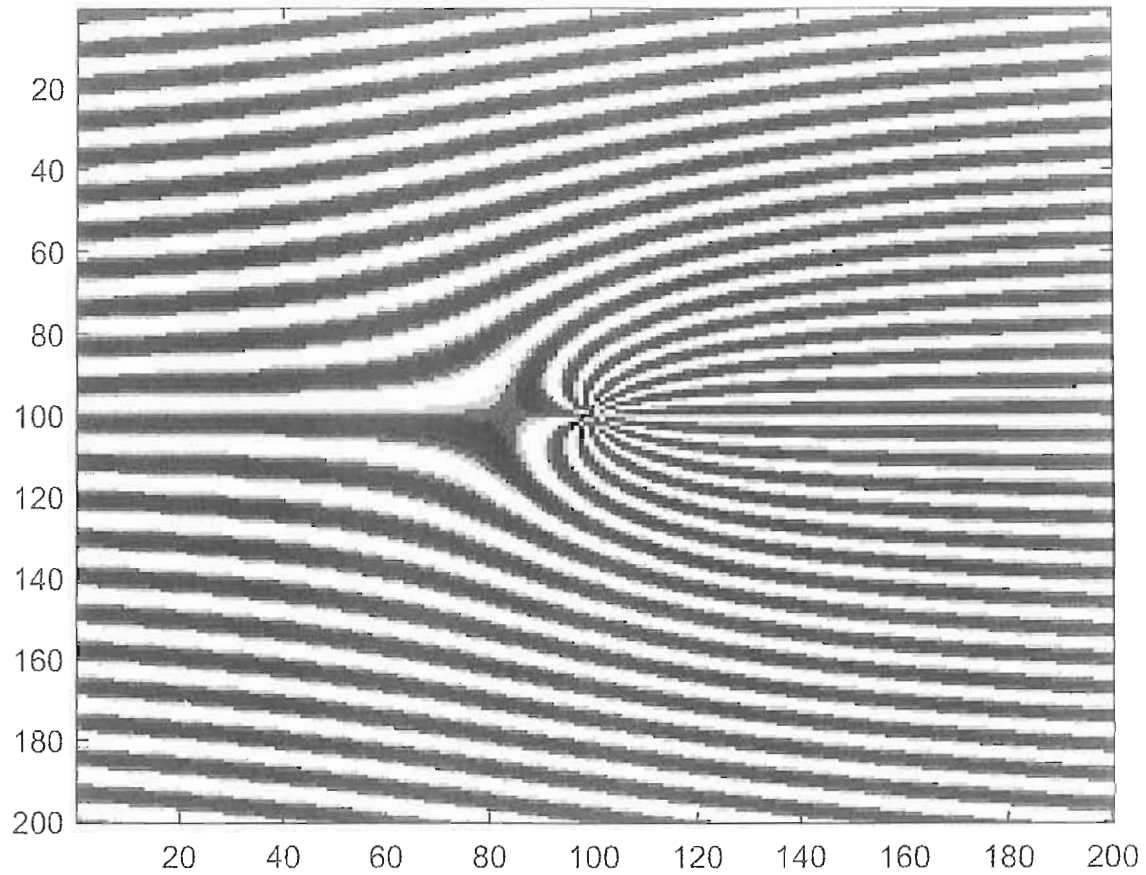
1. Tom Garlington, Joel Babbitt and George Long (March 2005). "Analysis of Free Space Optics as a Transmission Technology" (PDF). WP No. AMSEL-IE-TS-05001. US Army Information Systems Engineering Command. p. 3. Archived from the original (PDF) on June 13, 2007. Retrieved June 28, 2011.
2. Wang, J. *et al.* N-dimensional multiplexing link with 1.036-Pbit/s transmission capacity and 112.6-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes. In *Optical Communication (ECOC), 2014 European Conference on*, 1–3 (2014).
3. A. Trichili, C. Rosales-Guzmán, A. Dudley, B. Ndagano, S. A. Ben, M. Zghal, A. Forbes, "Optical communication beyond orbital angular momentum", *Sci. Rep.* 6, 27674, (2016).
4. Zhao, N., Li, X., Li, G. & Kahn, J. M. Capacity limits of spatially multiplexed free-space communication. *Nat Photon* 9, 822–826, Letter (2015)
5. Ren, Y. *et al.* Free-space optical communications using orbital-angular-momentum multiplexing combined with mimo-based spatial multiplexing. *Opt. Lett.* 40, 4210–4213 (2015).
6. A. Solyman, L. Roger, System and Method for Combining MIMO and Mode-Division Multiplexing, US201815960904 20180424 WO2017015532, (2018)
7. D.J. Barnickel, I. Gerszberg, R. Bennett; F. Barzegar; T.M. Willis Iii; H.P. Shala, Transmission Device With Mode Division Multiplexing and Methods for Use Therewith, MX20170006457 20151020, (2015).

## Revendicări

Invenția revendică următoarele aspecte:

1. Sistemul cu arhitectură ramificată pentru comunicații optice prin spațiul liber, caracterizat prin aceea că asigură o transmisie multiplex a unor moduri optice cu momente cinetice diferite, pe distanțe de ordinul sutelor de metri, fără alocare de bandă. Sistemul conține rețele de unități de emisie și unități de recepție.
2. Sistemul conform revendicării 1, caracterizat prin aceea că unitățile de emisie și recepție sunt compacte și cu eficiență optică mărită datorită utilizării hologramelor și lamelor de fază elicoidală fabricate pe sticlă prin scriere directă în fotopolimer.
3. Unitățile de emisie conform revendicării 1, caracterizate prin aceea că sunt configurate în rețea ramificată cu intrări multiple și o singură ieșire. Intrările provin de la utilizatori independenți, sau grupuri de utilizatori independenți în cazul mesajelor cu partiționare în timp. Unitățile de emisie realizează atât modulația de fază cât și multiplexarea progresivă a modurilor optice combinând holograme și lame de fază elicoidală.
4. Hologramele conform revendicării 3, caracterizate prin aceea că sunt proiectate pentru două funcții: divizare și modulare fascicul.
5. Unitățile de emisie conform revendicării 1, caracterizate prin aceea că folosesc atât fasciculele transmise cât și pe cele reflectate de către divizoarele de fascicul, iar fasciculul cu densitatea cea mai mare de moduri este transmis și în variantă conjugată.
6. Unitățile de recepție conform revendicării 1, caracterizate prin aceea că au în componență demultiplexoare spațiale cu holograme x-y și matrice de fotodetectori. Combinațiile prefigurate dintre valorile momentelor cinetice incidente sunt demultiplexate simultan de către o singură hologramă și distribuite în direcții diferite către utilizatori.
7. Matricele de fotodetectori conform revendicării 6, caracterizate prin aceea că sesizează fasciculul laser corespunzător unor valori de prag și validează recepția corectă a modului optic prefigurat folosind unități software de validare.
8. Unitățile software de validare conform revendicării 7, caracterizate prin aceea că reglează pragul de decizie adaptat la caracteristicile mediului de propagare în care funcționează sistemul de transmisie optică.

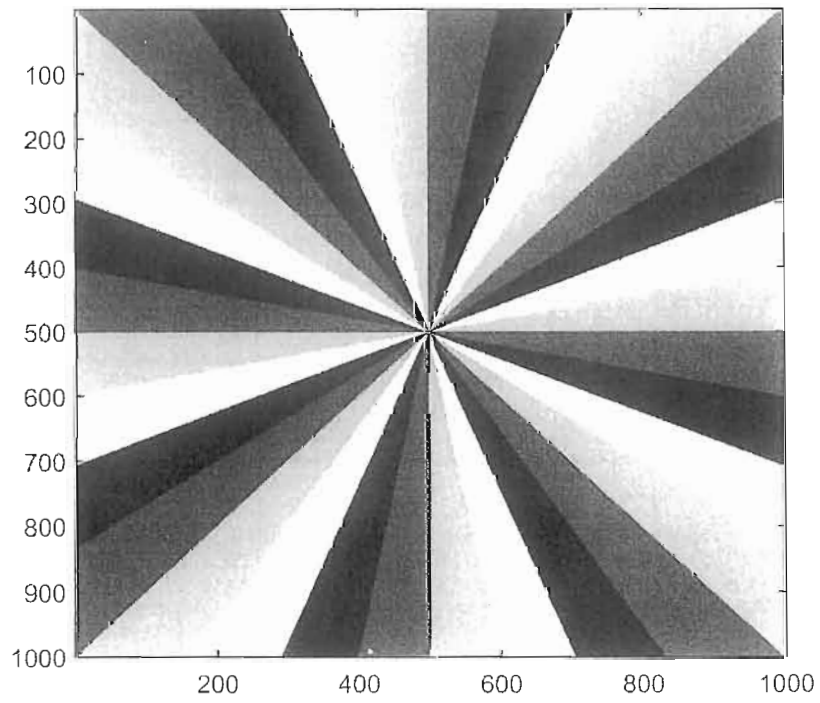
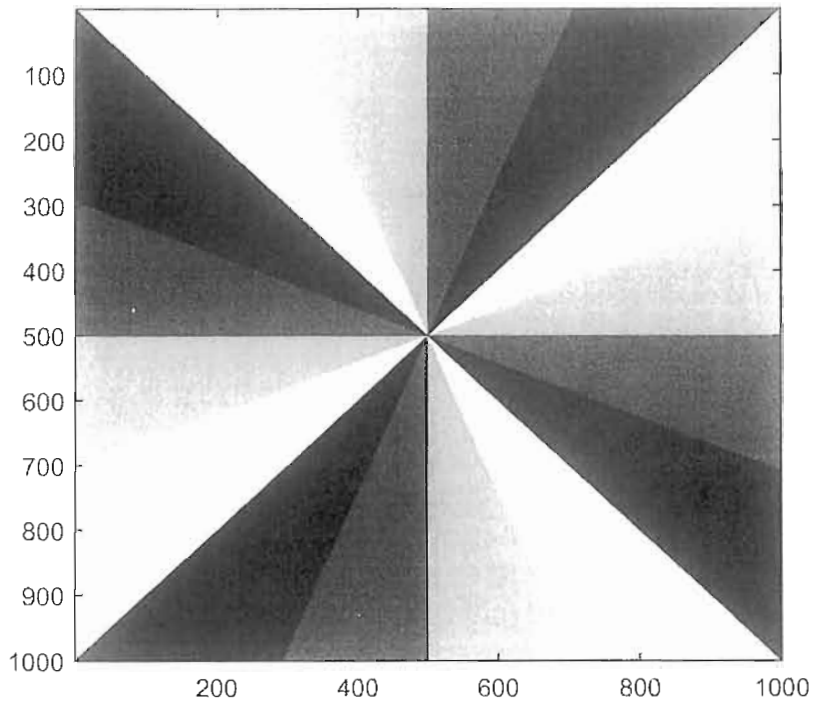
Fig.1 Holograma obținută prin interferența dintre o undă plană și o fază elicoidală cu  $m=11$ , (crop partea centrală), discretizat pe 4 nivele



Handwritten signature or mark.



Fig.2 Lamă cu fază elicoidală cu  $m_2=4$  și  $m_3=8$ , ambele discretizate pe 4 nivele



3



Fig.3 Schema de principiu a ansamblului de emisie-recepție

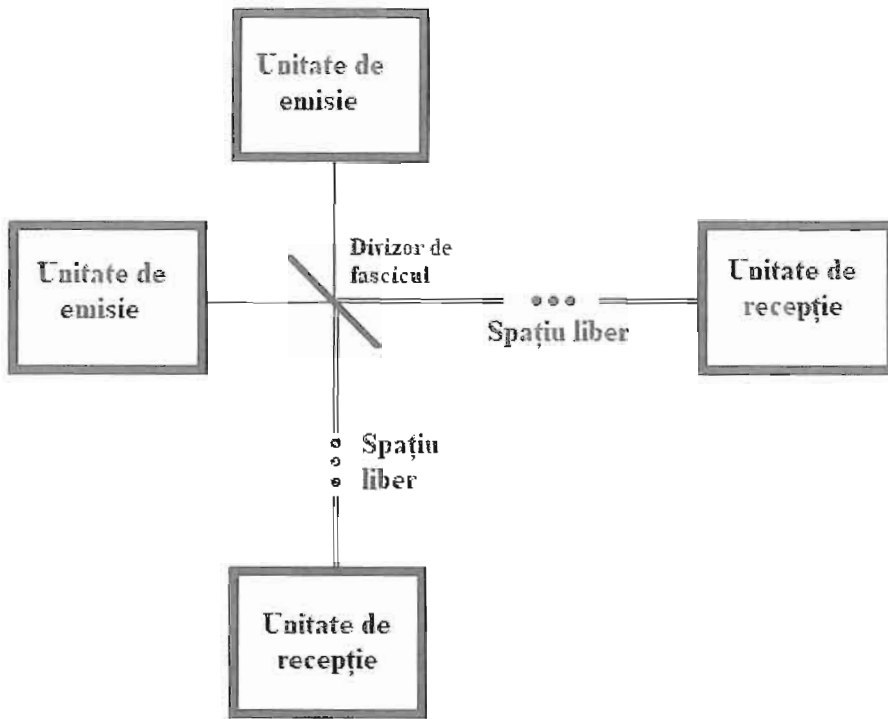


Fig.4 Schița sistemului cu arhitectura ramificată (unitățile de emisie)

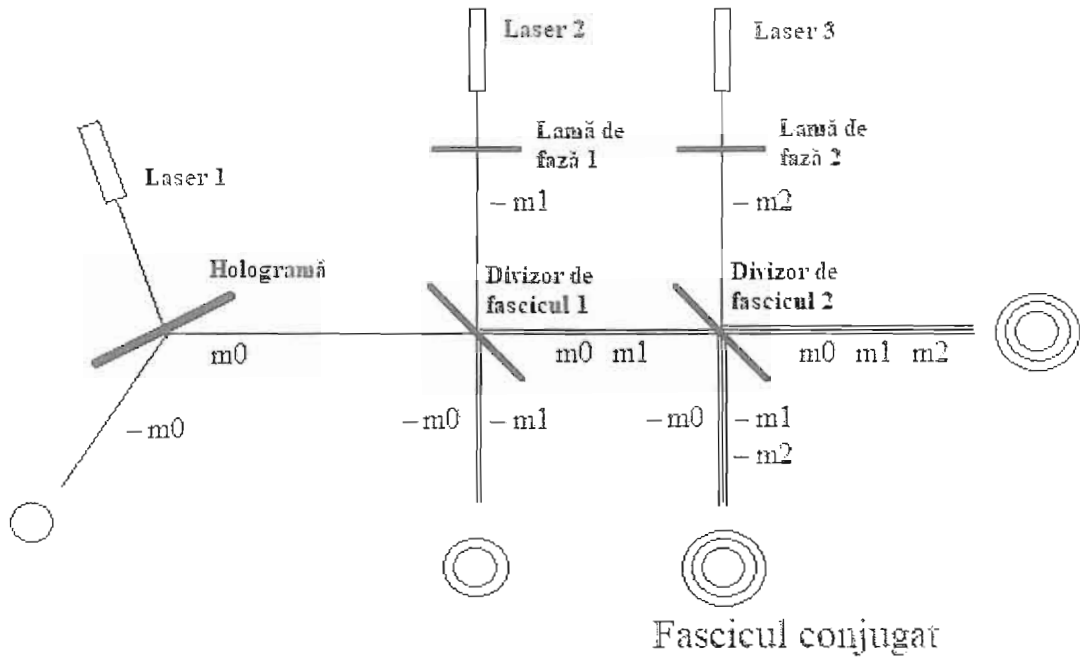
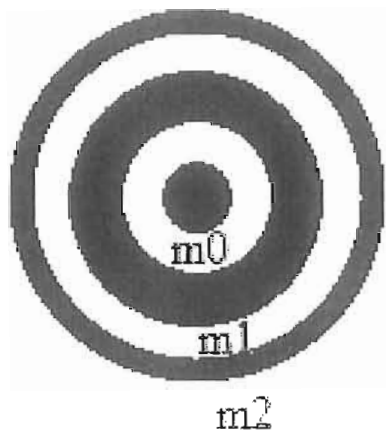


Fig.5 Vortexuri concentrice multiplexate



*[Handwritten signature]*

Fig.6a Hologramă de citire (demultiplexare)  $H(mx, Kx), (my, Ky)$   
Afișat doar partea centrală

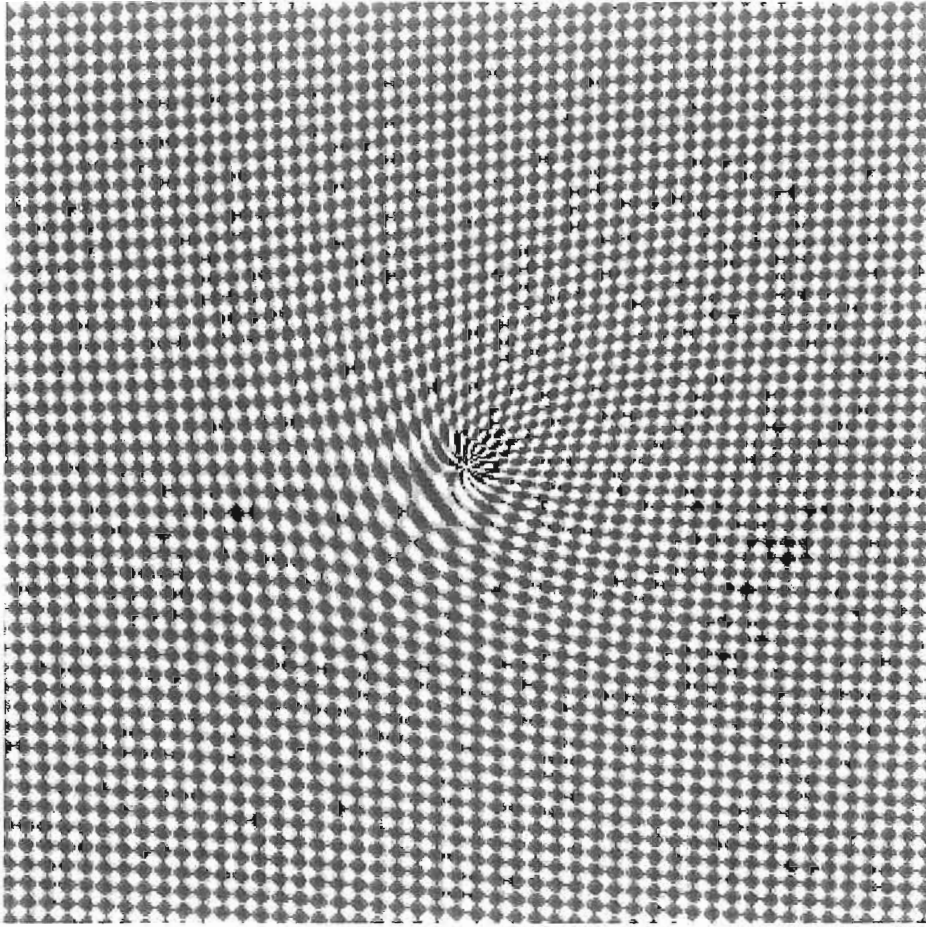


Fig.6b Pozițiile spațiale ale vortexurilor dacă pe holograma  $H(mx, Kx), (my, Ky)$  ar fi incident un fascicul gaussian

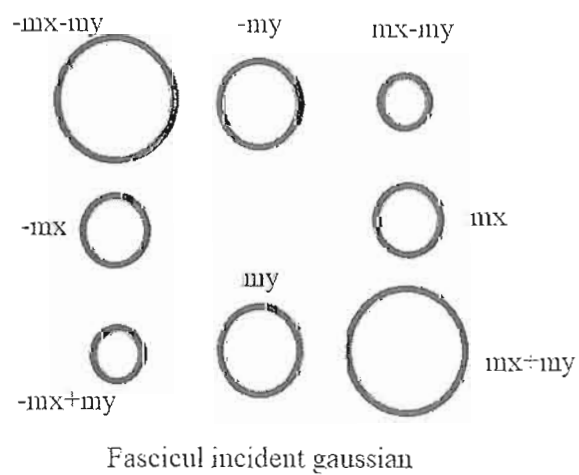


Fig.7 Schița sistemului propus cu formarea fasciculelor MDM prin multiplexarea a trei fascicule laser simple modulate cu vortexuri cu MCO diferite urmată de demultiplexarea cu holograma de citire și detecție

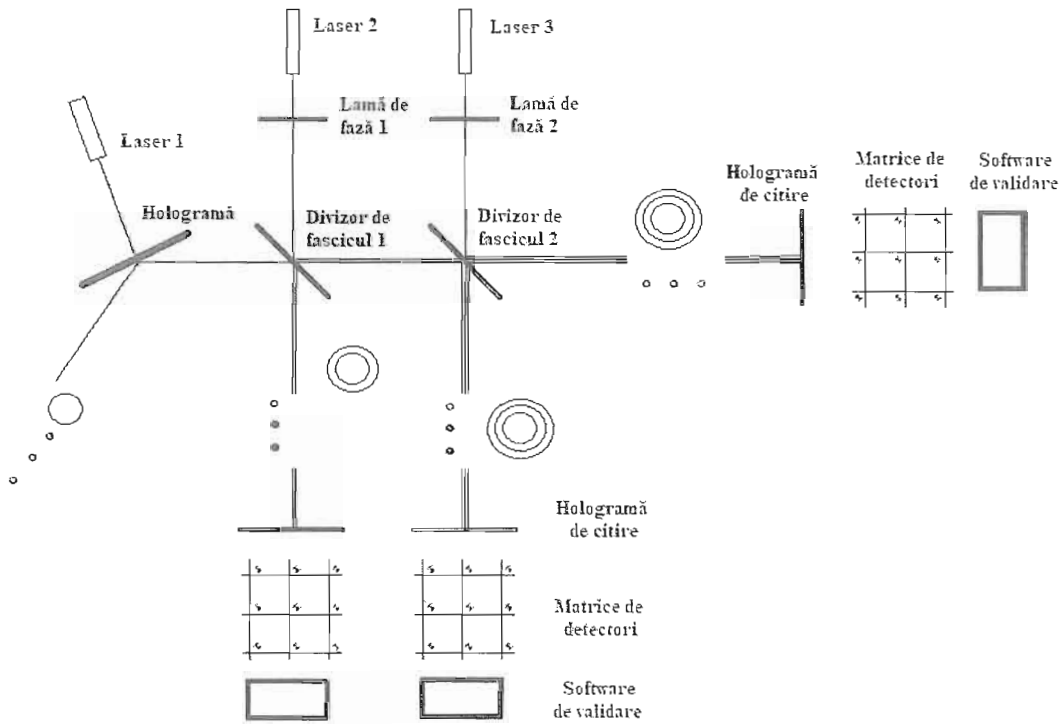


Fig.8a Demultiplexarea unui fascicul MDM cu două vortexuri (stânga) și unui fascicul MDM cu patru vortexuri (dreapta).

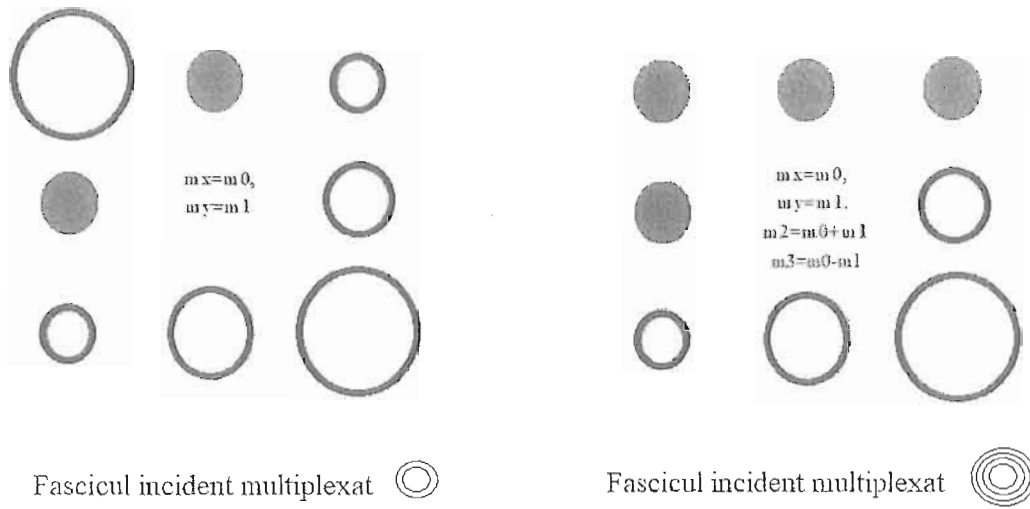


Fig.8b Demultiplexarea a două fascicule conjugate MDM cu trei vortexuri

