

Tomasz GUSZKOWSKI, Ewa FRĄCZEK

POLITECHNIKA WROCLAWSKA, KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ,
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław

Sieć neuronowa lokalizująca wiry optyczne rozmieszczone w regularnej strukturze

Mgr inż. Tomasz GUSZKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, obecnie pracownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej w zespole prof. Mroczi. Jego zainteresowania naukowe obejmują metody sztucznej inteligencji, sposoby rozwiązania problemu odwrotnego oraz konstrukcje inteligentnej aparatury pomiarowej.



e-mail: tomasz.guszkowski@pwr.wroc.pl

Dr inż. Ewa FRĄCZEK

Absolwentka Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Obecnie zatrudniona w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej na stanowisku adiunkta. Zainteresowana naukowo ukierunkowane w stronę aspektów metrologicznych zastosowania regularnych sieci nieciągłości fazowych generowanych w polu optycznym do badania wybranych właściwości fizycznych obiektów odbijających i transmisyjnych.



e-mail: ewa.fraczek@pwr.wroc.pl

Streszczenie

Praca prezentuje opartą na sztucznej sieci neuronowej metodę określania położenia wirów optycznych rozmieszczonych w regularnej strukturze i powstałych w wyniku interferencji trzech fal płaskich. Do uczenia i oceny jakości działania sieci neuronowej wykorzystano zestaw symulowanych obrazów, na które dodatkowo nałożono szum pomiarowy oraz zniekształcenia geometryczne wynikające z symulowanych drgań układu pomiarowego. W wyniku uczenia sieci neuronowej uzyskano neuronowy lokalizator wirów optycznych o medianie błędu lokalizacji poniżej 0,4 piksela.

Słowa kluczowe: wir optyczny, lokalizacja, sztuczna sieć neuronowa.

Artificial neural network for localization of optical vortices positioned in a regular structure

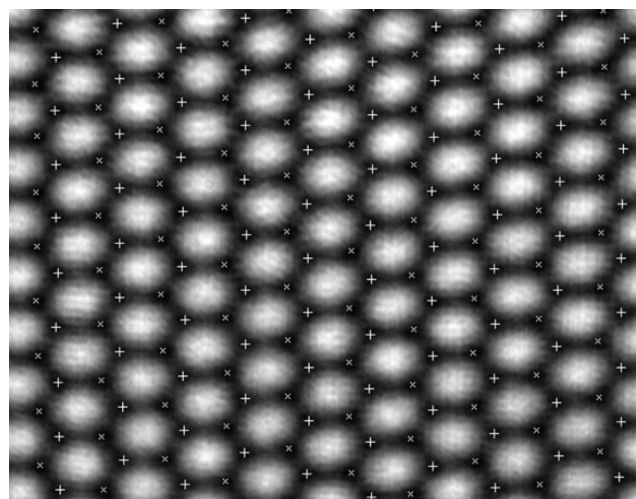
Abstract

The paper presents a short introduction to the optical vortices localization problem and an Artificial Neural Network (ANN) for localization of the optical vortices positioned in a regular structure of honeycomb. The analyzed vortices form as an effect of interference of three planar waves. A set of 1800 simulated images with added noise and geometric distortions modelling experimental setup vibrations was used for ANN learning and evaluation. As a result an unidirectional ANN with 100 inputs which correspond with pixels in a 10x10 image matrix; one non-linear hidden layer of 5 neuron and 2 outputs representing the coordinates of the vortex were created. The learning criterion was Mean Square Error (MSE) and the net was taught with Levenberg-Marquardt algorithm implemented in MATLAB. Final tests were performed with 180 images excluded from ANN learning. As a result a neuronal localizator of optical vortices was obtained with the worst-case localization error less than 2.1 pixel and localization error median less than 0.4 pixel.

Keywords: optical vortex, localization, artificial neural network.

1. Wstęp

Wir optyczny jako punktowa, izolowana nieciągłość w rozkładzie pola optycznego [1-2] może występować jako obiekt niepożądany lub może być sztucznie wprowadzony w pole interferencyjne. W punkcie, w którym występuje osobliwość fazy fali świetlnej o amplitudzie zespolonej U wartość rzeczywista funkcji U ($\text{Re}(U)$) oraz wartość urojona funkcji U ($\text{Im}(U)$) wynoszą zero [2-4]. W punkcie przecięcia linii zerowych funkcji U_{Re} i U_{Im} faza fali jest nieokreślona, a wokół tej osobliwości rozbudowuje się wir optyczny. Należy podkreślić, że wir optyczny to nie tylko punkt osobliwy – nazywany „punktem wiru”, ale również otoczenie tego punktu. Typowe pole optyczne zawiera dużą liczbę wirów optycznych. Wytworzenie pola wolnego od takich struktur wymaga precyzyjnie kontrolowanych warunków, a każde zaburzenie wprowadzone do tak wygenerowanej wiązki, powoduje powstanie wirów optycznych (rys. 1).



Rys. 1. Wiry optyczne rozmieszczone w regularnej sieci. Symbole „+” i „x” oznaczają położenia wirów o przeciwnych znakach

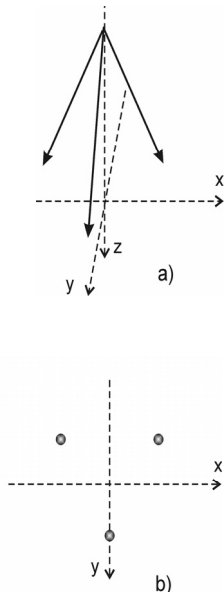
Fig. 1. Optical vortices placed in a regular structure. Marks „+” and „x” denote positions of vortices with opposite signs

Aby zdać sobie sprawę jak trudno jest uzyskać monochromatyczną wiązkę wolną od wirów optycznych wystarczy zauważyć, że jest to równoważne z uzyskaniem pola wolnego od spekli, z którymi wiry optyczne są ściśle związane [3-5]. Interferencja dwóch lub większej liczby fal może dać efekt taki, że amplituda wypadkowa w izolowanych punktach będzie wynosić zero. W takich punktach powstają wiry optyczne. Z punktu widzenia zastosowań szczególnie ciekawy jest przypadek interferencji trzech fal płaskich, w efekcie, czego powstaje regularna sieć wirów optycznych [6-7].

Sieć wirów wygenerowana przez trzy fale płaskie posiada szereg szczególnych własności, które nie są obecne w sieciach wirów generowanych przez więcej niż trzy fale[8]:

- Geometria dodatniej (ujemnej) podsięci wirów zależy tylko od współrzędnych wektorów falowych i nie zależy od amplitud i faz początkowych interferujących fal.
- Amplitudy trzech interferujących fal, w punktach gdzie faza jest nieciągła, w sposób jednoznaczny definiują względne kąty fazowe między tymi falami.
- Geometria sieci wirów (obejmująca wiry dodatnie i ujemne) nie zależy od fazy interferujących fal. Gdy zmienia się faza początkowa jednej, dwu lub trzech interferujących fal, sieć przesuwa się jak ciało sztywne.
- Trzy końce wektorów falowych definiują płaszczyznę. Wiry optyczne propagują się prostopadle do tej płaszczyzny.

Na rysunku 2 przedstawiony jest przykład ukazujący kierunki rozchodzenia się trzech interferujących fal płaskich. Jeżeli wektory falowe tworzą kąty takie jak przedstawione na rysunku, wiry optyczne tworzą sieć regularnych sześciokątów foremnych. W przypadku kiedy wierzchołki wektorów falowych nie tworzą trójkąta równobocznego, komórka sześciokątna przestaje być foremna. Fakt ten wpływa na rozkład natężenia w otoczeniu punktu wirowego.



Rys. 2. Kierunki rozchodzenia się fal tworzących sieć sześciokątną wirów optycznych. Wektory falowe trzech fal płaskich (a) oraz punkty oznaczające rzuty końców wektorów falowych na płaszczyznę xy (b)

Fig. 2. Directions of propagation of the waves forming hexagonal network of optical vortices. Wave vectors of three planar waves (a), and points projections of wave vectors' endings on xy plane (b)

Nieciągłości fazowe, włączając w to wiry optyczne, z powodu występowania nieokreślonej wartości fazy utrudniają analizę interferogramów, dlatego wymagają bardziej złożonych metod analizy lub w standardowej analizie są pomijane. W technice Interferometrii na Wirach Optycznych (IWO) analizowane są położenia nieciągłości fazowych i ich otoczenie. Wykorzystanie nieciągłości fazowych do analizy pola optycznego wymaga ich precyzyjnego zlokalizowania w obrazie interferencyjnym, a następnie analizy ich wzajemnego rozmieszczenia. Znajomość zmian geometrii sieci wirów pozwala na uzyskanie wartości wielkości mierzonych. Ponieważ wir optyczny jest punktem ciemnym, w którym poziom sygnału wynosi zero, pomiar położenia takiego punktu nie powinien odbywać się wprost, ale na podstawie rozkładu fazy pola w okolicy wiru optycznego. Taki pomiar wymaga opracowania nowych metod lokalizacji. Uzyskany metodą dedukcyjną model wiru optycznego nie może być bezpośrednio wykorzystany do lokalizacji wirów optycznych, ze względu na zespoloną amplitudę fali pola optycznego charakterystyczną dla wiru optycznego. Konieczne staje się połączenie istniejącego opisu z informacją uzyskaną drogą indukcyjną. Stosowane do tej pory metody lokalizacji punktów wirowych wymagają rejestracji serii interferogramów liczącej od kilku do kilkunastu obrazów [8-11]. Metody te wrażliwe są zatem na drgania wnoszone do układu pomiarowego przez otoczenie.

2. Metoda badań

W pracy wykorzystano jednokierunkową sztuczną sieć neuronową z pojedynczą warstwą ukrytą do określenia lokalizacji wirów. Warstwa ukryta miała funkcję aktywacji typu tangens hiper-

boliczny, warstwa wyjściowa charakteryzowała się liniową funkcją aktywacji. Sieć posiadała 100 wejść dla jasności poszczególnych pikseli oraz dwa wyjścia odpowiadające współrzędnym x i y lokalizowanego wiru optycznego.

2.1. Przygotowanie danych dla sieci

Do nauczania i testowania sztucznej sieci neuronowej została wykonana symulacja sieci wirów optycznych rejestrowanych za pomocą kamery CCD o rozmiarze piksela $3,5 \mu\text{m}$. Wygenerowanych zostało 90 obrazów interferencyjnych o różnych parametrach, następnie z każdego z nich wylosowanych zostało 20 punktów wirowych z różnych obszarów obrazów zgodnie z rozkładem jednostajnym. Daje to zbiór 1800 próbek. Wśród nich znajdują się próbki powstałe w wyniku interferencji fal pod różnymi kątami, takimi że odległości pomiędzy dwoma sąsiednimi punktami wirowymi tego samego znaku zmieniają się od $35 \mu\text{m}$ do $135 \mu\text{m}$, co jest możliwe do uzyskania w rzeczywistym układzie pomiarowym.

Zaburzenia amplitud interferujących fal zostały zasymulowane przez losowy dobór amplitud dla każdej z fal w każdym z generowanych obrazów zgodnie z rozkładem jednostajnym z zakresu $\pm 15\%$ wartości nominalnej.

Niewielkie zaburzenia fazowe występujące w układzie pomiarowym zasymulowane zostały poprzez dodanie fal płaskich o niewielkich amplitudach (rzędu od 2% do 0,2% wartości nominalnej), różnych kierunkach rozchodzenia i różnych fazach początkowych. Zastosowana została również funkcja deformująca fazę w zakresie $\pm 0,2\pi$ dla 40% próbek oraz $\pm 4\pi$ dla 20% próbek. W przypadku pozostałych 40% próbek zaburzenie to nie występowało.

Do wszystkich wygenerowanych interferogramów zostały dodane zaburzenia losowe rejestrowanego natężenia. Były one dodane do wyniku interferencji w postaci szumu o rozkładzie normalnym z wartością oczekiwaną równą zeru i odchyleniem standardowym odpowiednio 0,02 dla 60% próbek, 0,012 dla 20% próbek i 0,01 dla pozostałych 20% próbek. Każda próbka obrazu o wymiarach 10×10 pikseli została utworzona jako wycinek obejmujący jeden z punktów wirowych obrazu interferencyjnego.

Wyodrębnienie podobszaru zawierającego punkt wirowy następowało z losowo wybraną i znaną dyslokacją z zakresu $\langle -3;3 \rangle$ pikseli zgodnie z rozkładem jednostajnym na liczbach całkowitych. Zatem położenie punktu wirowego znajdowało się w takim podobszarze w odległości nie większej niż 3,5 piksela czyli około $12 \mu\text{m}$ od środka podobszaru.

Symulowane obrazy po zaszumieniu, zniekształceniu i kadrowaniu z losowymi przesunięciami w siatce 10×10 pikseli były podawane na sieć neuronową. Z ogólnej liczby 1800 wygenerowanych obrazów, 1440 wykorzystywane było do uczenia sieci, 180 do bieżącej oceny stopnia nauczania sieci (walidacji) i 180 do ostatecznych testów.

Zbiory uczący, walidujący i testujący były rozłączne, a przyporządkowanie do poszczególnych zbiorów losowe.

2.2. Uczenie sieci neuronowej

Jako kryterium dopasowania sieci przyjęto błąd średniokwadratowy MSE. Do uczenia sieci wykorzystano program MATLAB z biblioteką Neural Networks Toolbox.

Uczenie przeprowadzono algorytmem Levenberga-Marquardta dla liczby neuronów ukrytych od 3 do 7, inicjalizując sieć neuronową losowo dobranymi współczynnikami wagowymi połączeń pomiędzy neuronami.

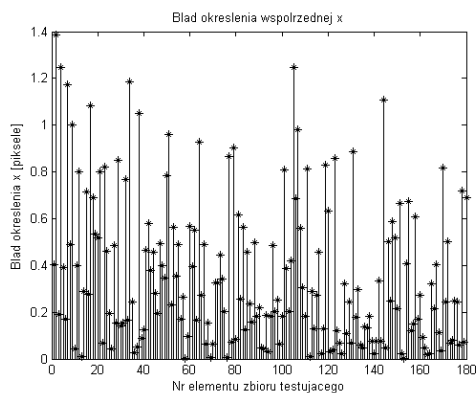
Najlepsze wyniki uzyskano dla 5 neuronów ukrytych, uzyskując wartości błędów MSE dla: zbioru uczącego 0,1827, dla zbioru walidującego 0,2511 oraz dla ostatecznego zbioru testującego 0,2501. W przypadku tym uczenie zostało zatrzymane po 35 epokach dla uniknięcia efektu przeuczenia sieci.

3. Wyniki

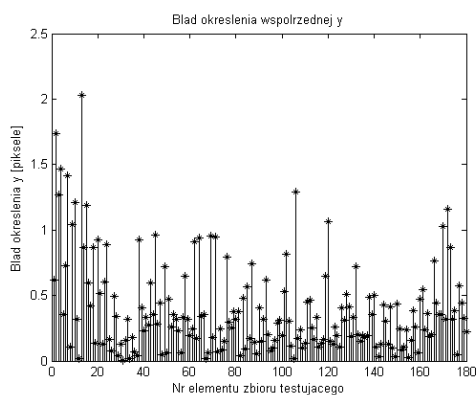
Ostateczne testy przeprowadzono z wykorzystaniem 180 obrazów, które nie brały udziału w uczeniu sieci.

Rysunki 3 i 4 prezentują odpowiednio błędy bezwzględne określenia położenia dla współrzędnych x i y , a rysunki 5 i 6 histogramy błędów bezwzględnych określania położenia wirów.

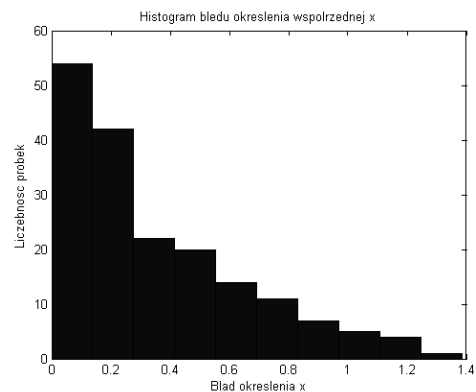
Średni błąd określenia położenia współrzędnej x wynosi 0,358 pikseli, a jego mediana 0,253 pikseli. Dla współrzędnej y wartości te wynoszą odpowiednio 0,390 pikseli i 0,310 pikseli. W najgorszym przypadku błąd lokalizacji był mniejszy niż 2,1 pikseli.



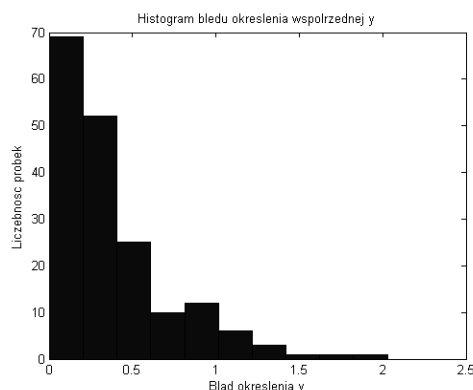
Rys. 3. Błąd określenia współrzędnej x
Fig. 3. Error of x coordinate determination



Rys. 4. Błąd określenia współrzędnej y
Fig. 4. Error of y coordinate determination



Rys. 5. Histogram błędów określenia współrzędnej x [piksele]
Fig. 5. Histogram of error of x coordinate determination [pixel]



Rys. 6. Histogram błędów określenia współrzędnej y [piksele]
Fig. 6. Histogram of error of y coordinate determination [pixel]

4. Dyskusja

Uzyskane wyniki potwierdzają tezę, że sztuczna sieć neuronowa może być skutecznie wykorzystana do określania położenia wirów optycznych rozmieszczonych w regularnej strukturze. Uzyskano błąd lokalizacji nie przekraczający w żadnym z badanych przypadków 2,1 pikseli, a mediana i wartość średnia tego błędu nie przekraczają pół pikseli. Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty są co prawda wynikiem symulacji, ale przeprowadzonych dla warunków maksymalnie zbliżonych do spotykanych w rzeczywistych pomiarach, tj. z uwzględnieniem błędów pomiarowych i szumu przetwornika.

Następnym etapem prac będzie eksperymentalna weryfikacja skuteczności lokalizacji położenia wirów przez sztuczną sieć neuronową.

Autorzy dziękują Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie prac wykonanych w ramach grantu nr N N505 364636.

5. Literatura

- [1] Freund I., Shvartsman N.: Wave-field phase singularities: The sign principle, *Phys. Rev. Lett.*, 50 (1994), 5164.
- [2] Vasnetsov M.V., Staliunas K.: *Optical vortices*, Nova Science Publishers, 1999.
- [3] Freund I.: Optical vortices in Gaussian random wave fields: statistical probability densities, *J. Opt. Soc. Am. A*, 11 (1994), 1644-1652.
- [4] Freund I.: Vortex derivatives, *Opt. Comm.*, 137 (1997), 118-126.
- [5] Freund I.: Saddles, singularities, and extrema in random phase fields, *Phys. Rev. E*, 52 (1995), 2348-2360.
- [6] Masajada J., Dubik B.: Optical vortex generation by three plane wave interference, *Opt. Comm.*, 198 (2001), 21-27.
- [7] Nicholls K.W., Nye J.F.: Three-beam model for studying dislocations in wave pulses, *J. Phys. A: Math. Gen.*, 20 (1987), 4673-4696.
- [8] Frączek E., Frączek W., Mroczka J.: Wiry optyczne jako znaczniki fazy w polu optycznym. [w:] *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej: praca zbiorowa. T. 2* pod red. Janusza Mroczki. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009, 323-386.
- [9] Masajada J., Popiołek-Masajada A., Wieliczka D.M.: The interferometric system using optical vortices as phase marks, *Opt. Comm.*, 207 (2002), 85-93.
- [10] Masajada J., Popiołek-Masajada A., Frączek E., Frączek W.: Vortex point localization problem in optical vortices interferometry, *Opt. Comm.*, 234 (2004), 23-28.
- [11] Wang W., Ishii N., Hanson S.G., Miyamoto Y., Takeda M.: Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to micro-displacement measurement, *Opt. Comm.* 248 (2005), 59-68.