



Wojskowa  
Akademia  
Techniczna  
im. Jarosława Dąbrowskiego



płk prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak  
Instytut Optoelektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna  
Warszawa

Warszawa, 5 lipiec 2019 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. Maksymiliana Chlipały  
pt. „System barwnego holograficznego wyświetlacza 3D  
o szerokim kącie pola widzenia z oświetleniem niekoherentnym”**

Praca doktorska magistra Maksymiliana Chlipały powstała pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Kozackiego, profesora Politechniki Warszawskiej. Praca została złożona na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w 2019 roku. Praca dotyczy aktualnych i bardzo ważnych zagadnień związanych z opracowywaniem nowoczesnych schematów trójwymiarowych holograficznych wyświetlaczy z oświetleniem niekoherentnym.

Celem rozprawy było udowodnienie możliwości opracowania trójwymiarowych wyświetlaczy holograficznych pracujących ze źródłami promieniowania elektromagnetycznego o niskiej spójności przestrzennej i czasowej. Takie podejście ma szereg zalet, takich jak zmniejszenie ilości artefaktów związanych z użyciem promieniowania elektromagnetycznego o wysokiej spójności (przede wszystkim wysokokontrastowego szumu plamkowego, który obniża jakość obrazu), a także, co jest ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowników oraz przyszłej możliwej komercjalizacji tego typu urządzeń, eliminację promieniowania laserowego i zmniejszenie ceny urządzeń, poprzez zastosowanie diod elektroluminescencyjnych RGB w miejsce diod laserowych lub też laserów na ciele stałym. Celem rozprawy było zatem opracowanie, budowa oraz przebadanie barwnego wyświetlacza holograficznego o szerokim kącie pola widzenia, który wykorzystuje oświetlenie niekoherentne oraz umożliwia uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji trójwymiarowego przedmiotu. Wyświetlacz powinien zapewnić możliwość rekonstrukcji amplitudy zespolonej, dzięki której można uzyskać odtworzenia kolorowych obrazów dwu- i trójwymiarowych (2D i 3D) o wysokiej jakości rekonstrukcji oraz o znacznym rozmiarze, w tym przypadku sięgającym kilkunastu

centymetrów, co wymaga szerokiego kąta pola widzenia. Wyświetlacz miał za zadanie zapewnić obserwację obiektów gołym okiem, bez użycia dodatkowych przyrządów optycznych, rekonstrukcję których można uzyskać poprzez przetwarzanie hologramów cyfrowych obiektów rzeczywistych, a także hologramów wygenerowanych komputerowo. Uzyskanie takich możliwości było możliwe dzięki zastosowaniu fazowych i binarnych przestrzennych modulatorów światła, a także opracowaniu i implementacji szeregu dodatkowych rozwiązań konstrukcyjnych oraz algorytmicznych.

Rozprawa, przygotowana została w postaci opisu, na który składa się siedem rozdziałów. We wstępie (rozdział 1) Autor zawarł wprowadzenie do podjętej tematyki badawczej dotyczącej opracowywania cyfrowych wyświetlaczy holograficznych. Określił podstawy zastosowanej w swoich rozwiązaniach techniki holograficznej i omówił w skrócie holografię analogową i cyfrową. Przedstawił także techniki wytwarzania hologramów cyfrowych poprzez digitalizację interferogramu kodującego hologram za pomocą cyfrowych detektorów macierzowych, lub też poprzez generację hologramów w sposób bezpośredni, bez udziału pola elektromagnetycznego, poprzez operacje matematyczne wykonywane za pomocą urządzeń komputerowych. Omówił również metody odtworzenia reprezentacji przedmiotu z zarejestrowanego lub wytworzonego wcześniej hologramu poprzez użycie rekonstrukcji numerycznych lub też optycznych, z użyciem urządzeń umożliwiających modulację amplitudy lub fazy padającej na nie wiązki światła. W rozdziale 1 Autor zdefiniował także cel podjętej przez siebie pracy oraz przedstawił strukturę rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 2 zamieścił przegląd literaturowych rozwiązań, które umożliwiają odtworzenie barwy przedmiotu. Możliwe jest to poprzez użycie trzech niezależnych modulatorów SLM (ang. Spatial Light Modulator) dla każdej składowej koloru RGB lub też z użyciem jednego modulatora SLM i techniki multipleksingu czasowego. W rozdziale tym Autor przedstawił sposoby na zwiększenie obserwowalnego rozmiaru obiektu. Można to uzyskać również z użyciem wielu modulatorów ustawionych w różnych konfiguracjach przestrzennych, lub też z użyciem jednego modulatora SLM i/lub DMD (ang. digital micromirror device) oraz metod skaningowych wiązki. Autor zaprezentował także rozwiązania techniczne wyświetlaczy holograficznych z oświetleniem niekoherentnym oraz uzyskanie zespolonego frontu falowego z zastosowaniem komercyjnie dostępnych modulatorów SLM.

Rozdział 3 przedstawia pierwsze opracowane przez Autora rozwiązanie konstrukcyjne barwnego wyświetlacza holograficznego z pojedynczym, fazowym modulatorem SLM, diodą światła białego oraz specjalnie zaprojektowaną dedykowaną maską barwną. W rozdziale tym znajduje się koncepcja takiego układu wyświetlacza, opis opracowanego przez Autora układu wraz ze specyfikacją wykorzystanych elementów optycznych oraz procedurą ich kalibracji. Szczególnie interesujący wydaje się dla mnie nowy sposób, który umożliwia zakodowanie barwy przedmiotu 3D w pojedynczym, zespolonym hologramie światła białego. Jest to realizowane za pomocą specjalnie przygotowanej do tego celu maski barwnej, połączonej z odpowiednio zaprojektowanym algorytmem kodowania i dekodowania frontu falowego. Autor przedstawia w szczególności metodę generacji zespolonego hologramu światła białego, z użyciem zaproponowanej



maski barwnej oraz przedstawia metodę kalibracji położenia tej maski, której precyzyjne pozycjonowanie jest wymagane w tej konstrukcji wyświetlacza w celu zapobiegania przechodzenia określonych częstotliwości przestrzennych, zajmowanych przez jeden składowy hologram RGB, do komponentu o innej barwie. Przedstawione rozwiązanie zostało przebadane eksperymentalnie przez Autora rozprawy pod kątem wydajności oraz jakości (balans bieli i efekt wyciekania barw) otrzymywanych rekonstrukcji optycznych. Dodatkowo, w tym rozdziale Autor przeprowadził także dyskusję wpływu spójności przestrzennej i czasowej promieniowania elektromagnetycznego na jakość obrazowania w opracowanej konstrukcji wyświetlacza.

W rozdziale 4 Autor zaprezentował opis koncepcji holograficznego obrazowania Fouriera i budowy opracowanego przez Autora wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym. Takie rozwiązanie zapewnia rekonstrukcję barwnych rzeczywistych przedmiotów 3D o dużych rozmiarach, które mogą być obserwowane gołym okiem. W tej części pracy Autor przybliży Czytelnikowi całą ścieżkę przetwarzania, począwszy od metody generacji hologramu, poprzez rekonstrukcję optyczną rzeczywistego obiektu 3D, aż do analizy deformacji zrekonstruowanego obrazu przedmiotu 3D, pozwalającą na odtworzenie obiektu w dowolnym położeniu i z dowolnym powiększeniem. Wyniki optycznych rekonstrukcji zamieszczone w tym rozdziale stanowią weryfikację zaproponowanej przez Autora metody obrazowania. Dodatkowo w rozdziale tym znajduje się analiza wpływu spójności przestrzennej źródła promieniowania elektromagnetycznego na rozdzielczość przestrzenną i na głębię rekonstrukcji uzyskiwaną w wyświetlaczu.

W rozdziale 5 omówione jest kolejne zaproponowane przez Autora w rozprawie rozwiązanie, które umożliwia rozszerzenie kąta pola widzenia odtworzonego przedmiotu. Rozwiązanie to posiada nazwę tęczowego wyświetlacza holograficznego z rozszerzonym kątem pola widzenia. Rozdział 5 zawiera koncepcję i szczegółowe informacje dotyczące budowy takiego wyświetlacza. Następnie zamieszczony jest opis metody generacji hologramu. W procesie rekonstrukcji hologram tęczowy zostaje oświetlony przez pozaosiowe źródło światła białego. Na powierzchni hologramu zachodzi dyspersji promieniowania, która odpowiedzialna jest za powstawanie tzw. efektu tęczy. Poprzez to zjawisko wyświetlacz tego typu nie pozwala na dokładne odzwierciedlenie barwy przedmiotu w zrekonstruowanym obrazie, jednakże w polu widzenia wyświetlacza zrekonstruowany jest jasny obraz przedmiotu o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i jakości, który może być obserwowany w zwiększonym kącie pola widzenia w zmieniających się barwach tęczy. W rozdziale 5 znajduje się analiza powstawania zwiększonego okna obserwacji, a także zademonstrowane są w nim właściwości spektralne obserwowanych obrazów oraz wpływ wymiaru szczeliny nakładanej na hologram tęczowy na jakość i głębię rekonstruowanych przedmiotów.

Rozdział 6 przedstawia ostatnie, zaproponowane przez Autora, rozwiązanie barwnego wyświetlacza holograficznego, opartego na binarnym modulatorze DMD oświetlanym niekoherentnym promieniowaniem elektromagnetycznym. W rozdziale Autor analizuje właściwości dyfrakcyjne modulatora DMD oraz przeprowadza rozważania teoretyczne dotyczące dyspersji takiego urządzenia oświetlonego promieniowaniem

emitowanym z diody elektroluminescencyjnej LED. Autor przedstawia konstrukcję optyczną wyświetlacza holograficznego opartego na takim modulatorze, a także przedstawia metodę generacji hologramu binarnego z użyciem opracowanego algorytmu binaryzacji bazującego na podziale intensywności obiektu na  $N$  równych części. Następnie, na bazie optycznych rekonstrukcji obiektów 2D Autor eksperymentalnie udowadnia dominujący wpływ ograniczonej spójności czasowej źródła promieniowania na jakość rekonstrukcji uzyskiwanej z modulatorem DMD. W kolejnych rozważaniach Autor przedstawia rozwiązanie umożliwiające korekcję dyspersji modulatora DMD z zastosowaniem siatki dyfrakcyjnej umieszczonej w module oświetlającym wyświetlacza. Zamieszczone w rozdziale 6 wyniki optycznych rekonstrukcji stanowią weryfikację opracowanej metody.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie końcowe, wnioski z przeprowadzonych prac badawczych i możliwe kierunki dalszych prac, planowanych przez Autora. Autor przedstawia także elementy nowości pracy w obszarze koncepcyjno-numerycznym i instrumentalno-eksperymentalnym, które zostały opublikowane przez Autora. Pracę zamyka spis bibliograficzny, na który składają się 93 pozycje literaturowe, w tym 7 współautorstwa Doktoranta.

Wyniki badań opisanych w rozprawie zostały opublikowane przez Autora na przestrzeni lat 2015-2019. Są to prace:

- [57] T. Kozacki, **M. Chlipala**, „Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM,” *Opt. Express* 24, 2189–2199 (2016),
- [62] **M. Chlipala**, T. Kozacki, „Resolution limits in holographic display with LED illumination”, *Proc. SPIE*, 9527-11 (2015),
- [63] T. Kozacki, **M. Chlipala**, P. Makowski, „Color Fourier orthoscopic holography with laser capture and LED display”, *Opt. Express* 26, 12144-12158 (2018),
- [77] T. Kozacki, **M. Chlipala**, H. Choo, „Fourier rainbow holography”, *Opt. Express* 26, 25086-25097 (2018),
- [79] H. Choo, **M. Chlipala**, T. Kozacki, „Visual perception of Fourier rainbow holographic display”, *ETRI Journal* 41, 1225-6463 (2019),
- [83] **M. Chlipala**, T. Kozacki, „3D color reconstructions in single DMD holographic display with LED source and complex coding scheme”, *Proc. SPIE* 10335, 103350Y (2017),
- [93] **M. Chlipala**, H. Choo, T. Kozacki, „Histogram based hologram binarization for DMD application”, *Proc. SPIE* 10834 (2018).

Można zauważyć duże zainteresowanie środowiska naukowego pracami realizowanymi przez Autora, ponieważ ich tematyka pozwoliła na opublikowanie rezultatów w czołowym czasopiśmie optycznym jakim jest *Optics Express* (o współczynniku *impact factor* 3.356 (2017)), artykuły [57], [63], [77]. Ponadto rezultaty przedstawiono na konferencjach SPIE, czego rezultatem są trzy *proceedingi* SPIE, prace [62], [83] i [93]. Jedna praca, [79], opublikowana została natomiast w czasopiśmie ETRI (Electronics and Telecommunications Research Institute). Wszystkie publikacje są wieloautorskie, jednakże



Autor jest w nich głównym (3) i drugim współautorem (4 prace), co podkreśla jego zaangażowanie i kluczową rolę w koncepcji, badaniach oraz przygotowaniu publikacji.

Pracę przedstawioną przez Doktoranta, którą miałem przyjemność recenzować, nazwałbym pracą eksperymentalną z aspektami teoretycznymi. Główny nacisk w pracy położony został na opracowanie czterech nowatorskich rozwiązań eksperymentalnych wyświetlaczy holograficznych, do konstrukcji których wymagane były aspekty teoretyczne w postaci symulacji numerycznych. Opracowywane przez Autora nowe konstrukcje wyświetlaczy pokazują ewolucję w tej dziedzinie; kolejne rozwiązania, sukcesywnie niwelują problemy i niedoskonałości poprzednich wersji lub też w pewnym sensie poszerzają możliwości poprzednich wyświetlaczy. Wyświetlacze przedstawione przez Autora, będące jego osiągnięciem, są według mnie najbardziej zaawansowanymi tego typu układami do obrazowania holograficznego jakie występują. Na podstawie rezultatów badań przedstawionych w pracy, a także bazując na publikacjach Autora mogę stwierdzić, iż jest on w światowej czołówce specjalistów zajmujących się tą tematyką. Uważam także iż cel postawiony przez Autora w jego rozprawie doktorskiej został w pełni zrealizowany, zaś wszystkie opracowane rozwiązania pozwalają na efektywne obrazowanie holograficzne z bardzo dobrymi parametrami zrekonstruowanych obrazów w ramach założeń postawionych przez Autora w rozdziale 1.

Podsumowując, uzyskane przez Autora wyniki są bardzo ważne z punktu widzenia rozwoju wyświetlaczy holograficznych. Praca porusza problemy jak najbardziej aktualne i budzące duże zainteresowanie w środowisku naukowym, jednocześnie przedstawiając sposób ich rozwiązania. Kolejne konstrukcje wyświetlaczy holograficznych są przedstawione przez Autora w sposób sukcesywny i logiczny. W większości prace Autora są z listy JCR (Optics Express i ETRI Journal). Aktualnie (czerwiec 2019), liczba cytowań jego prac na podstawie danych z bazy Scopus wynosi ponad 60, w tym artykuł z Optics Express z 2016 roku, [57], był cytowany aż 48 razy, co jest bardzo dobrym wynikiem pomimo krótkiego okresu czasu, jaki upłynął od chwili publikacji. Stwierdzam, iż rozprawa jest przygotowana starannie. Jej układ i struktura nie budzą zastrzeżeń. Jest napisana w sposób zwarty, prostym i zrozumiałym językiem. Wyniki badań Autor przedstawił i omówił w sposób przejrzysty i jasny, odnosząc się do treści zawartych w publikacjach naukowych swojego autorstwa, nie pomijając jednak doniesień innych grup badawczych, zajmujących się podobną tematyką. Wyciągnięte wnioski są poprawne i przekonujące.

Do pewnych mankamentów pracy lub jej aspektów wymagających doprecyzowania, według mnie należą:

1. stwierdzenie na str. 31: „Na wyjściu układu umieszczony jest polaryzator o osi polaryzacji ustawionej pod kątem  $45^\circ$ . Za nim uzyskiwana jest interferencja między dwoma ortogonalnie spolaryzowanymi wiązkami, co umożliwi odtworzenie zespolonego sygnału.” narusza prawo Fresnela-Arago. Chodzi tu według mnie raczej o interferencję pomiędzy równoległymi składowymi polaryzacji pod kątem  $45$  stopni dla dwóch wiązek, a nie interferencję pomiędzy prostopadłymi wektorami pola elektrycznego.

2. czasem sygnał sprzężony jest oznaczony przez \* (równanie 3.2) a czasem linią nad literą (3.10), bez wyjaśnienia. Czasem mnożenie oznaczone jest jako „x” czasem bez (równania 3.4 i 3.11). Powinno to być oznaczenie jednolite w całej pracy.
3. nieścisłość we wzorach 3.4 i 3.5: w 3.4 część  $q\text{Arg}\{u_{BL}(y)\}$  sugeruje Arg jako wartość urojoną, natomiast w 3.5. Arg może być wartością rzeczywistą, gdyż dopisano tam „i”. Skoro  $\text{Arg}\{u\}$  jest taki sam w obu równaniach w jednym z nich jest błąd (zapewne w 3.4 brakuje „i”).
4. str. 41: Autor pisze „Efekt ten minimalizowany jest przez zastosowanie tablicy korekcyjnej uwzględniającej nieliniowość zrekonstruowanej amplitudy. Szczegółowy opis metody znajduje się w Rozdziale 3.4”. W rozdziale 3.4 jest opisane kodowanie i dekodowanie zespolonego frontu falowego, a nie korekcji nieliniowości.
5. Rys. 3.11: obok zdjęcia wskazane byłoby przedstawić schemat optyczny.
6. Równanie 4.1: w członie propagacyjnym powinno być  $u_1^2$ , a nie  $u_1$ .
7. Str. 61: odniesienie się do niewłaściwego rysunku w pracy: „Na Rys. 4-8(c) ostro odwzorowana jest ręka, bransoletka i kwiaty na bluzce, a na Rys. 4-8(d) spódniczka lalki.”. Odniesienie powinno być do Rys. 4.4.
8. str. 64, 65: nieścisłości związane z parametrem koherencji C. Jest to stosunek obszaru  $A_c$  do kąтового wymiaru okna obserwacji  $B_{VW}$ .  $A_c$  jest definiowane jako przestrzeń, lub jako obszar koherencji. A więc w jednostkach powierzchni, stąd C również powinno być w jednostkach powierzchni... Załóżmy jednak, iż jest to wymiar (jednowymiarowy) na rysunku 4.6 (dwuwymiarowym) zatem w jednostkach odległości. Wtedy C również powinno być reprezentowane w tych jednostkach. Na stronie 64 parametr koherencji podano w [mm], zaś na Rys. 4.7 bez jednostek (osie oznaczone przez C[1]), podczas gdy w opisie rysunku C jest ponownie podane w [mm]. Definiując jakiś parametr należy trzymać się tej definicji i wyrażać go w odpowiednich jednostkach w całej pracy.
9. str. 81: błąd w opisie: „Rys. 5-12 ilustruje obrazy zapisane dla czterech poosiowych położenia kamery ( $z_p = 500$  mm, 550 mm, 600 mm i 650 mm)”. Odległość 600 mm powinna być równa 700 mm. Dla 600 mm obraz powinien być jednobarwny.

Moje komentarze zostały przekazane Autorowi pracy.

Mam również kilka pytań, które narodziły się podczas lektury rozprawy:

1. czy charakterystyka spektralna na rys. 3.3b) bierze pod uwagę czułość oka ludzkiego, aby wyświetlać trzy składowe subiektywnie jednakowych intensywnościach? Czy też intensywności są po prostu zmierzone? Czy brano pod uwagę sprawność dyfrakcyjną spektrometru dla różnych długości fal i skompensowano odpowiednio intensywności dla trzech widm emisyjnych?
2. jaka jest fizyczna interpretacja funkcji Bessela q-tego rzędu w równaniach 3.4, 3.5, skoro w przetwarzaniu sygnału w dziedzinie częstości przestrzennych nie ma kołowych apertur transformowanych do dziedziny przestrzennej jako funkcja Bessela?
3. równanie 3.7: skoro funkcja CF może być dowolnie przyjęta dlaczego w pełni nie kompensuje nieliniowości funkcji  $J_1$  i krzywa czerwona nie pokrywa się z czarną kreskowaną linią na rys. 3.6?



4. str. 91: „Objętość przedmiotu wyśrodkowana jest wokół płaszczyzny obrazu modulatora. Jego głębia zależy głównie od koherencji czasowej użytego źródła. Dla zastosowanych diod RGB o szerokościach spektralnych  $\Delta\lambda_R = 20$  nm,  $\Delta\lambda_G = 35$  nm,  $\Delta\lambda_B = 25$  nm została ona zmierzona eksperymentalnie i wnosi kolejno około: 40 mm, 20 mm i 10 mm.” Chodzi o zmierzenie głębii ostrości, czy koherencji czasowej? Jeśli głębii ostrości, to jakie kryterium przyjęto przy określeniu jej wartości?

Bazując na przedstawionej pracy mogę stwierdzić, iż jej wykonanie wymagało od Doktoranta dogłębnego zrozumienia zjawisk zachodzących w czasie propagacji, interferencji i modulacji przestrzennej promieniowania elektromagnetycznego przez obiekty (elementy optyczne), co pozwoliło mu na opracowanie nowych konstrukcji wyświetlaczy holograficznych. Doktorant opanował szeroki zakres wiedzy z fizyki (optyki) i matematyki oraz posiadał profesjonalne umiejętności pracy w laboratorium optycznym. Zdobyta wiedza pozwoliła Doktorantowi na samodzielne posługiwanie się nią i wyrażanie nowatorskich idei przedstawionych w jego pracy doktorskiej.

**Z pełnym przekonaniem uważam, iż przedstawione w pracy wyniki badań spełniają w zupełności wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Maksymiliana Chłipalę do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz, z uwagi na wysoki poziom merytoryczny rozprawy, wnioskuję o wyróżnienie jego pracy doktorskiej.**

płk prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak