

Warszawa, dnia 8 maja 2018 roku

Dr hab. inż. Tomasz Kozacki, prof. PW
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki
Wydział Mechatroniki, Politechniki Warszawskiej
ul. A. Boboli 8,
02-525 Warszawa
tel. (+48) 222348518
e-mail: t.kozacki@mchtr.pw.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Adama Piotra Kowalczyka p.t. „*Projekcja holograficzna z wykorzystaniem kolektywnej macierzy fazowych modulatorów światła*”

1. Wstęp

Rozprawa doktorska Pana magistra Adama Piotra Kowalczyka p.t. "*Projekcja holograficzna z wykorzystaniem kolektywnej macierzy fazowych modulatorów światła*" zawiera opis nowatorskiego rozwiązania projekcji holograficznej wykorzystującej zestaw modulatorów światła.

Praca zawiera rozwiązania problemów natury teoretyczno-numerycznej, jak i konstrukcyjno-eksperymentalnej. Na część teoretyczno-numeryczną składa się opracowanie modelu teoretycznego analizy rozdzielczości, stworzenie narzędzi numerycznych do budowy hologramów syntetycznych, oraz przeprowadzenie badań numerycznych. Natomiast, część konstrukcyjno-eksperymentalna zawiera budowę eksperymentalnego układu projekcji holograficznej wykorzystującej dwa modulatory światła umożliwiającą weryfikację eksperymentalną.

Powyższe przesłanki, a także bogata ekspertyza w zakresie wyświetlaczy holograficznych promotora Pana prof. nzw. dr hab. inż. Michała Makowskiego zadecydowały o podjęciu w pracy doktorskiej ambitnego zadania określonego poprzez następującą tezę rozprawy: „wykorzystanie kolektywnej macierzy fazowych modulatorów światła w projekcji holograficznej umożliwia zwiększenie rozdzielczości uzyskiwanych obrazów”.

Praca doktorska ma charakter numeryczno-eksperymentalny z elementami teorii, łączy wiedzę z optyki i przetwarzania informacji. Obejmuje obszerne badania eksperymentalne oraz analizy, które w przypadku pracy pozwoliły potwierdzić tezę pracy.

2. Ocena osiągnięć naukowych i technicznych

Rozprawa liczy 95 stron i gromadzi liczbę 76 pozycji bibliograficznych pozwalających na zapoznanie się ze stanem badań dotyczących rozważanego zagadnienia. Praca składa się z czterech części: wstępnej, która zawiera stan wiedzy oraz konieczne elementy teoretyczne (rozdziały 1 i 2), części numerycznej (rozdział 3), implementacyjno - eksperymentalnej (rozdziały 4, 5) oraz podsumowującej (rozdział 6). Praca została podzielona na sześć rozdziałów.

Rozprawa zaczyna się od części zarysowującej obszar poruszanej tematyki, przedstawiona jest struktura pracy, jej cele oraz teza. Uważam, że teza pracy jest aktualna. Dotyczy najważniejszego ograniczenia, jakie stoi przed wyświetlaczami holograficznymi tak, aby stały się urządzeniami szerokiego wykorzystania. To ograniczenie dotyczy niewystarczającej liczby pikseli urządzeń do modulacji światła, które są najczęściej wykorzystywane w budowie wyświetlaczy holograficznych.

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera trzy ważne elementy. Na początku opisany jest przegląd literatury, wskazujący na cechy różnego typu przestrzennych modulatorów światła SLM (ang. *spatial light modulator*) wykorzystywanych do budowy wyświetlaczy holograficznych. Kolejno omówione są: holograficzna projekcja barwna, szybkie metody wyliczania obrazów holograficznych, zaadresowany jest problem niewystarczającej liczby pikseli. Kolejno zarysowana jest idea wykorzystania wielu modulatorów światła w holografii komputerowej do różnego typu celów: (i) do zmniejszenia wielkości plamki odpowiedzi impulsowej, (ii) powiększenia kąta pola widzenia, (iii) do celów pułapkowania optycznego. Te zastosowania miały na celu zarysowanie tła dla tezy pracy. Pokazano, że w literaturze zestaw wielu modulatorów jest wykorzystywany w sposób niekoherentny.

Warto byłoby w tym miejscu wspomnieć o trzech doniesieniach literaturowych. Jedna z nich jest ściśle związana z tezą udowodnianą w pracy¹. W artykule udowodniono, że użycie dwóch modulatorów fazowych umożliwia zwiększenie rozdzielczości rekonstruowanych obrazów. Należy tu zaznaczyć, że praca bazuje jedynie na symulacjach. Drugą pracą² dotyczy wykorzystania dwóch modulatorów fazowych do zespolonej modulacji światła, gdzie kluczowym jest wzajemna koherentna superpozycja generowanych frontów falowych. Trzecia praca dotyczy tematyki apertury syntetycznej³, w której holograficznie rejestrowany jest front falowy o zwiększonej rozdzielczości.

W części poświęconej zaletom modulatorów światła więcej uwagi powinno się poświęcić przestrzennym modulatorom światła typu DMD (ang. *digital micromirror device*). Pozwalają one na modulację frontu falowego z częstotliwością ponad 20 kHz. Dla przykładu można byłoby tu wspomnieć o zbudowanym w Korei wyświetlaczu typu „*table top*” o kącie obserwacji 360 stopni⁴.

W rozdziale pierwszym przedstawiona jest teza pracy, oraz omówiona jest struktura pracy.

Rozdział drugi zawiera zagadnienia teoretyczne związane z tematem rozprawy. Kolejno są przedstawione: elementy transformaty Fouriera, metody numerycznej propagacji frontu falowego, fazowe elementy optyczne, testy rozdzielczości.

¹ S. B. Hasan, T. Kozacki, "Method for enhancing the resolution of holographic displays", *Photonics Letters of Poland*, VOL. 1 (4), 193-195, (2009).

² T. Kreis, "3-D Display by Referenceless Phase Holography," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 685-693 (2016).

³ A. E. Tippie, A. Kumar, and J. R. Fienup, "High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction," *Opt. Express* 19, 12027-12038 (2011).

⁴ Y. Lim, K. Hong, H. Kim, H.-E. Kim, E.-Y. Chang, S. Lee, T. Kim, J. Nam, H.-G. Choo, Jinwoong Kim, and Joonku Hahn, "360-degree tabletop electronic holographic display," *Opt. Express* 24, 24999-25009 (2016).

Wydaje mi się, że w pracy doktorskiej nie powinno się umieszczać podstawowych elementów transformacji Fouriera. Jest to wiedza podstawowa. Jest ona oczywiście wykorzystywana w pracy, ale nierozwijana dalej.

Rozdział trzeci jest teoretyczno-numerycznym rozdziałem pracy. Przedstawiono tu odpowiedź impulsową dla układu dwóch modulatorów liniowo odseparowanych w jednym kierunku. Omówiono położenie miejsca zerowego, i wartości maksimum. Pokazano symulacje dla różnej wzajemnej separacji modulatorów. Ilustrowany efekt zawężenia odpowiedzi impulsowej podobny do zwiększenia rozdzielczości, która jest uzyskiwana w soczewce dyfrakcyjnej „super-resolution”⁵ poprzez blokowanie centralnej części elementu. Kolejno opisano algorytm do symulacji hologramów dla układu wielu modulatorów. Przedstawiono symulacje dla testu rozdzielczości USAF, oraz dla testowych obrazów Lena i płytki drukowanej. Na końcu rozdziału zasymulowano układ projekcyjny składający się z czterech modulatorów, gdzie numerycznie udowodniono potencjał zwiększenia rozdzielczości w obu kierunkach, czyli tezę pracy.

Rozdział trzeci jest klarowny i nie wymaga komentarza.

Rozdział czwarty jest **bez wątpienia** najważniejszym, rozdziałem pracy. Przedstawia eksperyment zrealizowany dla potwierdzenia tezy pracy. Rozdział zaczyna się od omówienia metody kompensacji krzywizn modulatorów SLM, wykorzystywanej w pracy. Zbudowany układ wykorzystywany był bezpośrednio na stanowisku budowanego układu projekcyjnego. Bazował na interferometrze Macha-Zehndera. Kolejno omówiono eksperymentalną realizację wielo-modulatorowego holograficznego układu projekcyjnego, którego kluczową częścią jest układ mechaniczny pozwalający na sterowalną manipulację położeniem modulatorów względem siebie z wymaganą precyzją. Drobną uwagę dotyczy wniosków pokazanych w Tabeli 4.2 porównujących wyniki szerokości plamek uzyskanych w eksperymencie i symulacji. Porównania dokonano dla rozkładów plamek wygenerowanych dla różnych odległości rekonstrukcji: 1 m w przypadku symulacji numerycznej i 0,95 m dla eksperymentu. Uważam, że powinno się powtórzyć symulacje dla odległości 0,95 m. W rozdziale 4.6, gdzie opisywano wyniki rekonstrukcji obrazu ścieżek drukowanych, mamy szerokość ścieżki równą 1 piksel. Czego dotyczy ten piksel: rozdzielczości symulacji czy SLM'a?

W zbudowanym układzie projekcji holograficznej przebadano plamki odpowiedzi impulsowej, oraz izoplanarność obrazowania. Te dwa elementy pozwoliły na eksperymentalne udowodnienie tezy pracy. Z pewnością są one kluczowymi eksperymentalnymi wynikami rozprawy doktorskiej. W końcowej części rozdziału przedstawiono wyniki eksperymentalne projekcji holograficznej dla rekonstrukcji obrazu testu rozdzielczości USAF oraz ścieżek płytki drukowanej. Do rozdziału mam szereg pytań natury dyskusyjnej (Paragraf 3), oraz jedną drobną uwagę dotyczącą przedstawienia wyników. W rozdziale 4.5 napisano, że rozsunięcie pomiędzy modulatorami wynosiło 10,8 mm. Taki zapis sugeruje, że konieczna dokładność eksperymentalnej wzajemnej separacji modulatorów wynosi 0.1 mm, co z pewnością nie jest prawdą. Wykazano to kolejnym rozdziale.

Rozdział piąty jest również bardzo ważną częścią pracy. Zawiera wyniki badań teoretyczno – numerycznych oraz eksperymentalnych dotyczących dokładności wzajemnego ustawienia modulatorów światła i jego wpływu na rekonstrukcję. W rozdziale zdefiniowano obszar wspólny, który opisuje wielkość obrazu badanego wyświetlacza. Kolejno przeanalizowano efekt przesunięcia poprzecznego i podłużnego na otrzymaną rozdzielczość. Pokazano również wyniki eksperymentalne dla rekonstrukcji, dla których nie

⁵ B.C. Kress, p. Meyrueis, „Applied Digital Optics”, Wiley (2009).

wprowadzono kompensacji krzywizn modulatorów. Do rozdziału mam szereg uwag natury dyskusyjnej (rozdział 3).

W części podsumowującej pracy w sposób syntetyczny i czytelny przedstawione zostały uzyskane wyniki pracy. Sformułowano wnioski wyływające z przeprowadzonych badań i opracowanych rozwiązań.

Uwagi edycyjne

Praca pod kątem edycyjnym nie budzi zastrzeżeń. Napisana jest przejrzysto i czytelnie. Można znaleźć w niej jedynie drobne literówki, czy też drobne błędy natury edycyjnej.

3. Uwagi dyskusyjne, krytyczne

- Uwaga do rozdz. 2 dotycząca wydajności obliczeniowej przedstawionej metody propagacji opartej na transformacie Fouriera. W podrozdziale o tej metodzie propagacji napisano, cytuję „Dodatkowo konieczne jest przeskalowanie pola wyjściowego przez stały czynnik zależny od długości fali, odległości propagacji i rozmiaru macierzy obliczeniowej. Może to spowodować konieczność interpolacji rozkładu amplitudy pola wyjściowego lub powiększenia macierzy obliczeniowej [referencja 35 pracy] i tym samym zwiększenie złożoności obliczeniowej”. Podczas propagacji rozkład przestrzenno-częstotliwościowy pola optycznego ulega modyfikacjom [6], a wspomniane skalowanie pola wyjściowego odpowiada właśnie tej fizycznej modyfikacji sygnału. Z praktycznego punktu widzenia ta cecha umożliwi wydajniejszą propagację niż omówiona metoda splotowa.
- Uwaga do układu eksperymentalnego opisanego w rozdziale 4.1. Jak wygląda układ optyczny sprzęgający płaszczyznę badanego modulatora z detektorem CCD? Obrazy interferencyjne pokazane na rysunku 4.4 są raczej nieostre. Jaki jest wpływ nieostrości obrazowania na błąd kompensacji krzywizny.
- Uwaga do układu eksperymentalnego opisanego w rozdziale 4.2. Na rys. 4.6 obrazy projekcyjne generowane są przez kostkę światłodzielącą. W takiej konfiguracji generowana jest aberracja sferyczna, Czy można się dowiedzieć czy zaobserwowano efekt aberracji sferycznej, która powinna się pojawiać przy większej rozdzielczości.
- Uwaga do dowodu izoplanarności zbudowanego układu projekcyjnego zaprezentowanego w Rozdziale 4.4. Wniosek o izoplanarności układu został poparty eksperymentem, którego przekroje pokazano na rysunku 4.14. Czy przeprowadzono skan wzdłuż osi optycznej tak, aby znaleźć np. maksimum intensywności. Taki skan pozwoliłby na detekcję płaszczyzny ogniskowania dla każdego z punktów. Mam również pytanie, jaka jest głębia ostrości obrazu zrekonstruowanego? Brak jest takiej analizy w pracy.
- Uwaga do dowodu eksperymentalnego pokazującego uzyskany wzrost rozdzielczości w rozdziale 4. Uważam, że należało przebadać rozdzielczość dwu-punktową zbudowanego układu projekcyjnego.
- W rozdziale piątym pominięto dyskusję na temat wpływu błędu wzajemnego pochylenia modulatorów.
- Uwaga do rozdziału 5.1, w którym mowa jest o, cytuję „obszarze wspólnym”. Wprowadzony termin dotyczy wymiaru obrazu, który z pewnością powinien być dyskutowany. Na rys. 5.1 wielkość obrazu jest wyznaczana na podstawie kryterium, które bierze pod uwagę: kąt dyfrakcyjny, liniowy wymiar modulatorów i wzajemną ich separację. Zaproponowane kryterium części wspólnej jest dyskusyjne. Dla obszarów brzegowych, w których według rysunku 5.1 mogą być

⁶ A. W. Lohmann, R. G. Dorsch, D. Mendlovic, C. Ferreira, and Z. Zalevsky, J. Opt. Soc. Am. A 13, 470 (1996).

rekonstruowane obrazy, mamy do czynienia z małą rozdzielczością i niską energią obrazu⁷. Obydwa te parametry są równe 0 dla przypadku granicznego – na linii. Ponadto mamy do czynienia ze zjawiskiem obrazów aliasingowych.

- W rozdziale 5.2 wspomniano o możliwym błędzie obrotu jednego z modulatorów. Na podstawie zaprezentowanej dyskusji nie ma możliwości symulacji, lub kompensacji tego zjawiska. Wydaje mi się, że numeryczna analiza tego zjawiska jest możliwa stosując metody interpolacji⁸.
- W rozdziale 5.3 efekt przesunięcia modulatorów wzdłuż osi optycznej jest uwzględniony dodaniem stałego czynnika fazowego dla jednego z modulatorów. Takie podejście nie uwzględnia zjawisk dyfrakcyjnych i wydaje się być poprawne w granicach głębi ostrości układu. Zilustrowany efekt na rys. 5.6 jest bardzo podobny do wyniku analizy zaprezentowanej w „Introduction to Fourier Optics” dotyczącej rozdzielczości dwu-punktowej koherentnego układu optycznego⁹.

4. Opis dokonań naukowych

Wyniki rozprawy są z pewnością nowatorskie zostały przedstawione na jednej konferencji o zasięgu krajowym. Zostały zaakceptowane na dwie prestiżowe tematyczne konferencje, jedna to konferencja OSA, a druga SPIE. Pan **Kowalczyk** według bazy Web of Knowledge jest współautorem 13 prac, w tym 9 z tzw. listy filadelfijskiej, a liczba cytowań wynosi 59. Z pewnością jest to ponad przeciętny dorobek naukowy.

5. Podsumowanie

Powyższe uwagi krytyczne nie obniżają mojej ogólnej dobrej oceny rozprawy doktorskiej Pana **Adama Piotra Kowalczyka**. Doktorant wykazał się inwencją w rozwiązywaniu postawionego przed Nim problemu teoretycznego i eksperymentalnego. Waga i innowacyjność dokonań naukowych została potwierdzona zrealizowaniem bardzo ciekawych badań eksperymentalnych. Należy tu podkreślić, że postawione przed Nim zadanie wymagało bardzo szerokiego zakresu prac od teorii, numeryki po konstrukcję, czy bardzo wymagający eksperyment. Rozprawa mgr inż. **Adama Piotra Kowalczyka** pt. „*Projekcja holograficzna z wykorzystaniem kolektywnej macierzy fazowych modulatorów światła*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemów naukowych i udowadnia posiadanie ogólnej wiedzy w uprawianej dyscyplinie naukowej.

Ostatecznie stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa mgr inż. **Adama Piotra Kowalczyka** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



⁷ T. Kozacki, "On resolution and viewing of holographic image generated by 3D holographic display," Opt. Express 18, 27118-27129 (2010).

⁸ T. M. Lehmann, C. Gonner, K. Spitzer, "Survey: interpolation methods in medical image processing," IEEE Trans. Med. Imag. 18, 1049–1075 (1999).

⁹ J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics 2nd Edition," Roberts & Company (2005), rozdz. 6.5.2, rysunek 6.19.

