

prof. dr hab. Jan Masajada
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 22.09.23

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Joanny Starobrat

Reduction of Higher Diffraction Orders in Reconstructions of Sampled Fourier Holograms

Rozprawa doktorska pani mgr. inż. Joanny Starobrat poświęcona jest problemowi redukcji efektów powielania obrazów w projekcji holograficznej z wykorzystaniem ciekłokrystalicznych modulatorów światła dalej oznaczanych przez skrót SLM. Teza pracy stanowi, że taka redukcja jest możliwa dzięki apodyzacji pikseli należących do matrycy SLMów, lub techniki randomizacji pikseli SLMa.

Praca wsparta jest pięcioma publikacjami w wysoko notowanych czasopismach naukowych oraz siedmioma materiałami pokonferencyjnymi.

Zaletą i nowością przedstawionej rozprawy jest próba korekcji wielokrotnych obrazów na poziomie matrycy SLMa. W opracowanych do tej pory metodach koncentrowano się na usunięciu tych obrazów operując na wiązce światła odbitej od SLMa.

Szczegółowa ocena rozprawy

Rozdział pierwszy rozprawy zawiera informacje wstępne, w tym również sformułowanie celów i tezy pracy

Rozdział drugi zawiera wstęp teoretyczny.

Wstęp teoretyczny obejmuje takie zagadnienia, związane z tematem rozprawy, jak: funkcje specjalne i funkcja gaussowska, operacja splotu, transformaty Fouriera, skalarna teoria dyfrakcji, struktury dyfrakcyjne, holografia klasyczna,

dynamiczna i fourierowska. Wstęp zajmuje niespełna 19 stron rozprawy. Siłą rzeczy informacje w nim zawarte mają charakter spisu tych wzorów i faktów, które zostały wykorzystane w dalszej części pracy. Skrótowość ta prowadzi czasem do sformułowań, które dla niezoriantowanego czytelnika w konkretnym temacie, są trudne do odczytania. Tak jest na przykład z opisem hologramu Lohmanna na stronie 31. W zasadzie wystarczyło powiedzieć, że hologram Lohmanna był pierwszym syntetycznym hologramem i wymienić jego wady. Alternatywnie, w bardziej rozbudowanej wersji można było na rysunku przedstawić geometrię „okienek” wewnątrz komórek na powierzchni hologramu. Definicja dystrybucji delata Diraca dana wzorem (2.1) jest błędna. Faktem jest, że czasem jest podawana w podręcznikach. Wzór (2.2) lepiej definiuje deltę Diraca.

Krótki rozdział **trzeci** definiuje problem badawczy, to jest redukcję wyższych rzędów dyfrakcji w obrazie uzyskiwanego za pomocą SLMa. Wymienione są również dotychczas stosowane metody takiej redukcji, które jak zauważa doktorantka operują na wiązce odbitej od układu SLMa. Doktorantka proponuje zastosowanie metod korygujących działanie SLMa na poziomie jego matrycy.

W dalszej części przedstawiona jest analiza teoretyczna problemu oparta o skalarną teorię dyfrakcji. Analiza jest zaprezentowana dość skrótowo. Rzuca się w oczy duży przeskok między wzorami (3.4) a (3.5). Choć obliczenia tego typu są znane z literatury, to dla pracy mają kluczowe znaczenie i można by im poświęcić jedną czy dwie strony więcej.

Ponieważ doktorantka nakłada wzór fazowy soczewki Fresnela na generowaną strukturę dyfrakcyjną wzór (3.5) powinien być pochodną wzoru (2.24) a nie (2.21)

Dwie zaproponowane przez doktorantkę metody korekcji pasożytniczych rzędów dyfrakcji, to metoda apodyzacji fazowej lub amplitudowej oraz metoda randomizowania pikseli.

Rozdział czwarty poświęcony jest metodzie polegającej na nałożeniu maski apodyzującej na komórki SLMa. Maski są dwóch typów amplitudowe i fazowe. Mając na uwadze dane literaturowe z wcześniejszych badań nad apodyzacją doktorantka zdecydowała się na gaussowską maskę amplitudową, nałożoną na każdy z pikseli SLMa.

Metody numeryczne pozwoliły na przetestowanie tego pomysłu. Otrzymane wyniki wskazują, że maski gaussowskie są w stanie wyeliminować z obrazu wyższe rzędy dyfrakcji. Energia jest przekierowana do pożądanego obrazu. Równocześnie rozkład amplitudy w obrazie staje się bardziej jednorodny.

Testowane numerycznie maski zostały następnie wykonane metodą litografii laserowej i litografii elektronowej. Ze względów technicznych maski nie był przykładane do powierzchni SLMa. Obraz powierzchni SLMa został przeniesiony przez układ 4f do innej płaszczyzny, w której umieszczona została

maska. Eksperyment potwierdził przewidywania numeryczne, przy czym jak należało się spodziewać lepsze efekty uzyskano z maską wykonaną w technice litografii elektronowej.

Podsumowując: z wykonanych badań wynika, że maski tego typu pozwalają na usunięcie wkładów dyfrakcyjnych wyższych rzędów. W obrazie pozostaje rząd pierwszy i zerowy (czyli właściwy obraz). Zastosowanie maski amplitudowej powoduje zauważalne obniżenie energii w obrazie. Nadto, podwyższa względną energię pierwszego rzędu dyfrakcji (w odniesieniu do rzędu zerowego). Apodyzacja gaussowska wygładza również nierówności amplitudy w obrazie, co jest ważną dodatkową zaletą tej metody.

Drugim rodzajem przebadanej apodyzacji była apodyzacja fazowa. Doktorantka zaprojektowała i przebadła dwa rodzaje masek binarną i kinoformową. Zaletą tej pierwszej jest prostsza a przez to tańsza technologia, jednak kosztem gorszego działania. Symulacje numeryczne potwierdziły zdolność do tłumienia powielonych obrazów. Szczególnie dobre efekty dała maska kinoformowa. Podobnie jak w przypadku masek amplitudowych dodatkowym pozytywnym efektem jest większa jednorodność światła w obrazie testowanych obiektów. Symulacje numeryczne wykazały również dużą wrażliwość obrazu na błędy w justowaniu maski fazowej względem powierzchni SLMa. Stąd sugestia doktorantki by takie maski były wytwarzane w procesie fabrykacji matryc SLM.

Binarna maska fazowa została przetestowana z użyciem SLMa. W matrycy pary sąsiednich komórek były traktowane jako jeden superpiksel. Każdy z tych superpikseli mógł być modulowany dwoma wartościami fazy. Wyniki pomiarów pozostają w dobrej zgodności z teorią zarówno w zakresie eliminacji niechcianych obrazów jak i zwiększenia jednorodności światła w obrazie prostych przedmiotów.

Próba wytworzenia masek technikami litografii elektronowej i druku 3D (system Nanoscribe) nie przyniosła spodziewanych efektów. W wymaganej skali druk 3D okazała się zawodny. Maski binarne wykonane z użyciem litografii elektronowej nie dały spodziewanej korekcji obrazu. W opinii doktorantki problemem jest wyrysowanie masek o dokładnie określonym profilu a następnie zjustowanie ich względem obrazu matrycy SLMa, uzyskanego z użyciem układu obrazującego 4f. Nie mniej doświadczenie z maskami symulowanymi na SLMie w technice superpikseli, wolnej od powyższych wad, wskazały, że proponowana technika działa.

Uwaga redakcyjna. W podpisie do rysunku 4.31 głębokość modulacji powinna być wyrażona w nanometrach a nie w milimetrach

Rozdział piaty poświęcony jest technice osłabiania niechcianych rzędów dyfrakcji przez randomizację pikseli SLMa. Technika randomizacja stosowana była wcześniej pracach w odniesieniu do statycznych struktur dyfrakcyjnych. Metoda polega na zgrupowaniu pikseli (w pracy są to grupy 4x4). W każdej grupie

tylko jeden piksel ma fazę zgodną z wyliczoną mapą fazową. Przy czym doktorantka przebadła cztery przypadki o różnej swobodzie wyboru położenia właściwego piksela w ramach danej grupy 4x4 (rysunek 5.1).

Następnie doktorantka przeprowadziła analizę działania takiej struktury dyfrakcyjnej, wzorując się na pracy Wei [88]. Analiza pozwoliła na wyprowadzenie wzoru (5.15) opisującego działanie badanej metody dla różnych przypadków swobody wyboru położenia piksela. Analiza otrzymanego rezultatu, w tym obliczenia rozkładu szumu i stosunku szumu do sygnału, pokazała, że wraz ze wzrostem randomizacji maleje intensywności bocznych rzędów dyfrakcji, kosztem wzrostu szumu. Szum jednak lokalizuje się na pierścieniu wokół obrazu, czyli nie zakłóca samego obrazu.

Jak zrozumiałem z treści pracy, nieczynne piksele SLMA są w stanie podstawowym. Pojawia się pytanie czy nie ma metody takiego ich losowego modulowania aby poprawić uzyskane w pracy wyniki?

Teoria znalazła swoje potwierdzenie w symulacjach numerycznych. Boczne rzędy dyfrakcji zostały stłumione kosztem jednak wzrostu stosunku sygnału do szumu.

Eksperyment został przeprowadzony w układzie pokazanym na „mikrorysunku” (5.12). Wyniki eksperymentu dobrze zgadzają się z analizą teoretyczną i numeryczną.

Ostatnia część piątego rozdziału poświęcona jest krótkiej notce o perspektywach nowej konstrukcji matrycy dla przestrzennego modulatora światła. Materiałem jest domieszkowany kobaltem granat itrowo żelazowy. Na powłoce takiego materiału można, z użyciem femtosekundowego laser definiować dynamiczny wzór dyfrakcyjny. Metoda randomizacji pikseli może pozwolić na redukcję niechcianych rzędów dyfrakcji również w tym typie modulatora. Notkę ta wskazuje na nowe zastosowania rozwijanych metod korekcji obrazu.

Rozdział 6 zawiera konkluzje.

Uwagi końcowe

Praca została wykonana w ramach działań w trzech projektach wymienionych na stronie 9 rozprawy. Świadczy to o jej dobrym usytuowaniu w bieżącej działalności jednostki badawczej. Zaprezentowane w niej wyniki mają potencjalne znaczenie praktyczne dla rosnącego rynku wyświetlaczy opartych o technologię SLM, szczególnie w aspekcie przyszłych wyświetlaczy holograficznych.

Biorąc pod uwagę zaprezentowane wyniki stwierdzam, że doktorantka osiągnęła założone w pracy cele. A osiągnięte wyniki wyczerpują wymagania do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych.

Praca łączy w sobie metody analityczne, numeryczne i eksperymentalne. Ta kompletność stawia duże wymagania przed doktorantką i podnosi wartość pracy. Nie zawsze jednak można się zorientować co było pracą własną doktorantki, a co zostało zrealizowane przez współpracujący z nią zespół. Przykładowo domyślam się, że fabrykacja masek opisana w części (4.2.4) była dziełem zespołu wspierającego doktorantkę.

Praca jest napisana zrozumiałym językiem, zawiera nieliczne błędy pisowni. Rysunki są czytelne, literatura jest dobrze dobrana do treści rozprawy.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska, w świetle obowiązującej ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych, spełnia wynikające z tejże ustawy kryteria i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Jednocześnie biorąc pod uwagę zakres przeprowadzonych prac, oryginalny wkład doktorantki do dyscypliny, użyteczność uzyskanych wyników, oraz ich bardzo dobrą reprezentację w artykułach zamieszczonych w wysokopunktowanych czasopismach wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Jan Masajada

