



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**
im. Jarosława Dąbrowskiego

Instytut
Optoelektroniki 

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

Warszawa, 15 listopad 2017 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Juana Martinez-Carranzy
pt. „Development of quantitative phase retrieval method
employing the Transport of Intensity Equation”**

Praca doktorska magistra Juana Martinez-Carranzy powstała pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Kozackiego, profesora Politechniki Warszawskiej oraz dr. Konstantinosa Falaggisa – promotora pomocniczego. Praca została złożona na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w 2017 roku. Praca dotyczy aktualnych i bardzo ważnych zagadnień związanych z obrazowaniem fazowym przy użyciu pojedynczej wiązki promieniowania i technikami odzyskiwania, bądź też rekonstrukcji, fazy promieniowania elektromagnetycznego z zakresu widzialnego w zastosowaniu do mikroskopii optycznej.

Problem detekcji i zapisu fazy promieniowania elektromagnetycznego jest od dawna niezmiernie ważnym aspektem obrazowania. Znaczenie fazy w obrazowaniu podkreśla fakt, iż to ona często niesie większość informacji zawartej w obrazach, ponadto, nie da się jej zmierzyć w sposób bezpośredni, a jedynie pośrednio poprzez jej zamianę na inne wielkości fizyczne. Ma to miejsce np. w holografii, gdzie faza promieniowania jest zamieniana na jego intensywność, którą to można zarejestrować dostępnymi detektorami, w postaci np. kamer. W tym przypadku fazę da się odzyskać poprzez proces numerycznej rekonstrukcji (propagacja wsteczna promieniowania elektromagnetycznego z użyciem propagatorów, bądź też przejście z dziedziny częstości przestrzennych do dziedziny przestrzennej za pomocą transformaty Fouriera przy zastosowaniu układu optycznego w układzie holografii fourierowskiej w czasie zapisu hologramu). Holografia wymaga jednak spójnego przestrzennie i czasowo promieniowania, które pod postacią dwóch wiązek (przedmiotowej i odniesienia) interferują w płaszczyźnie detektora tworząc hologram.

W pracy Doktorant zajmuje się natomiast technikami nieinterferencyjnymi, w których faza jest odzyskiwana wskutek przetwarzania sygnału pochodzącego z serii obrazów obiektu, bez użycia dodatkowej wiązki odniesienia. W tym przypadku układ

eksperymentalny jest prostszy i często może być zaimplementowany w istniejących układach optycznych mikroskopów. Nieinterferometryczne techniki rekonstrukcji dzielą się na dwie grupy: iteracyjne i deterministyczne. Autor pracy zajmował się tymi drugimi, w ramach których opracowywał nowe techniki numeryczne rekonstrukcji fazy bazujące na technice transportu równania intensywności TIE (ang. Transport of Intensity Equation). Łączy ona fazę z poosiową zmianą intensywności w strefie Fresnela poprzez transformację liniową.

Celem pracy było rozwiązanie problemów trapiących technikę rekonstrukcji fazy TIE, takich jak, m.in., optymalne określenie pochodnej intensywności poosiowej, określenie odpowiednich warunków brzegowych zapewniających rekonstrukcję fazy przy jednoczesnej redukcji błędów rekonstrukcji, zastosowanie częściowo spójnego promieniowania w technice TIE oraz poprawienie rozdzielczości fazowej przy rekonstrukcji ponad rozdzielczość zapewnioną przez ograniczony dyfrakcyjnie układ optyczny. W ramach przedstawionej rozprawy Autor opracował matematyczne modele, które pozwalają na określenie optymalnych warunków eksperymentalnych podczas rekonstrukcji fazy za pomocą TIE przy równoodległych płaszczyznach rejestracji obrazów. Zaimplementował algorytm rekonstrukcji fazy na bazie TIE, który był w stanie odzyskać fazę z optymalnym ograniczaniem wpływu szumu w szerokim zakresie częstości przestrzennych. Przeprowadził teoretyczną analizę problemu właściwego określania warunków brzegowych w rekonstrukcji fazy za pomocą techniki TIE. Zajmował się również określaniem optymalnego oświetlenia badanego obiektu pod kątem poprawy warunków rekonstrukcji fazy oraz wpływem promieniowania częściowo spójnego na proces rekonstrukcji.

Rozprawa została przygotowana jako zbiór publikacji Autora, które opatrzone zostały opisem, będącym przewodnikiem po publikacjach. W przewodniku po publikacjach Autor przedstawia temat pracy oraz cel przyświecający jej powstaniu. Opisuje możliwości wizualizacji i pomiaru fazy promieniowania elektromagnetycznego. Następnie przechodzi do omówienia podstaw teoretycznych rekonstrukcji fazy w obrazowaniu. Posługując się aparatem matematycznym wyprowadza równanie transportu intensywności TIE, które przyrównując do ogólnej postaci różniczkowego równania ciągłości pozwala mu na nadanie znaczenia fizycznego dla równania TIE jako równania zachowania energii w procesie rejestracji obrazów na różnych płaszczyznach, będącego podstawą do rekonstrukcji fazy przy pomocy TIE. Następnie przedstawia problem odpowiedniego określania poosiowej zmiany (pochodnej) intensywności w zbiorze wcześniej wspomnianych obrazów, która jest kluczowa w równaniu rekonstrukcji fazy TIE. W ramach drugiego rozdziału przewodnika Autor przedstawia listę publikacji. Znajduje się tam pięć publikacji z listy filadelfijskiej, w czasopismach takich jak Optics Letters, Optics Express, Applied Optics, czy też Photonics Letters of Poland. Tematyka tych czasopism wpisuje się bardzo dobrze w tematykę prowadzonych przez Autora badań. Są to publikacje wieloautorskie, jednakże Autor jest w nich głównym autorem i określa swój wkład na 70%, co podkreśla jego zaangażowanie i kluczową rolę w koncepcji, badaniach oraz przygotowaniu publikacji. Do zbioru wliczono także sześć publikacji konferencyjnych; wszystkie opublikowane w Proceedings of SPIE z podobnym jak wyżej wkładem Autora pracy. W tym rozdziale Autor rozważa również problem optymalnego określania wcześniej wspomnianej poosiowej pochodnej

intensywności. Opisuje problemy związane z określeniem fazy przy użyciu jedynie dwóch oraz wielu równoodległych płaszczyzn, na których rejestrowane są obrazy intensywnościowe. Przedstawia zależności wiążące liczbę płaszczyzn i ich odległości, konieczne dla uzyskania odpowiedniego stosunku sygnału do szumu SNR w zrekonstruowanej fazie, które opublikował w pracy [P1], oraz określa wartość optymalnej odległości między płaszczyznami, która minimalizuje błąd określenia pochodnej poosiowej intensywności. Jednakże, Autor stwierdza, iż określenie minimalnego błędu pochodnej poosiowej nie jest równoznaczne z określeniem minimalnego błędu w rekonstrukcji samej fazy (RMSE), który uzyskał dla innej odległości między płaszczyznami. Tak więc wywnioskował poprawnie, iż dokładne określenie pochodnej poosiowej nie gwarantuje optymalnej rekonstrukcji fazy. Wyniki tych badań oraz model określający zależność pomiędzy powyższymi błędami Autor przedstawił w publikacji [A2], natomiast nowy sposób analizy błędów, oparty na transformacji Fouriera, użytej do określania odwrotnego operatora TIE, przedstawił w publikacji [P2]. Na podstawie tej pracy Autor stwierdził również, iż optymalne warunki eksperymentalne, które pozwolą na minimalizację błędu rekonstrukcji fazy muszą brać pod uwagę nie tylko liczbę płaszczyzn (obrazów intensywnościowych), ale również parametry szumowe oraz rozmiar detektora i piksela. Ważnym wkładem Autora jest sformułowanie zależności pomiędzy odwrotnym operatorem TIE, działającym na trzecią pochodną poosiową intensywności, a optymalną odległością między płaszczyznami, która to minimalizuje błąd średniokwadratowy rekonstrukcji fazy. Niestety, metodologia przedstawiona w pracach [P1, P2] oraz [A1] wymaga wiedzy *a priori* na temat rekonstruowanej fazy. Stąd też, aby lepiej zdefiniować to ograniczenie Autor zaproponował w pracy [A2] nowy model numeryczny do rekonstrukcji fazy oparty na przetwarzaniu obrazów intensywnościowych rejestrowanych na różnych, dobrze zdefiniowanych odległościach i porównał go do rekonstrukcji klasycznej, stosując trzy algorytmy rekonstrukcji, takie jak TIE, ISBT-TIE (Hybrid Iterative Single Beam Technique) i GP TIE (Gaussian Process Regression). Na podstawie tych wyników Autor wywnioskował, iż połączenie rejestracji obrazów intensywnościowych na nierównomiernej siatce odległości z algorytmami rekonstrukcji, takimi jak Hybrid-ISBT TIE lub GP-TIE pozwala na zniesienie ograniczenia znajomości *a priori* informacji fazowej. Jednakże, ograniczenia tych metod, przykładowo, możliwość analizy jedynie próbek nieabsorbujących promieniowanie oraz problemy z niskoczęstotliwościowymi artefaktami w rekonstrukcjach, spowodowało konieczność opracowania kolejnego algorytmu, opisanego w pracy [P3], nazwanego Multi-Filter TIE (MF-TIE), który w rekonstrukcji fazy bierze informację z obrazów intensywnościowych po selekcji częstości przestrzennych z użyciem odpowiednio dobranych filtrów pasmowo-przepustowych. Informacja ta jest następnie łączona i użyta na końcowym etapie rekonstrukcji fazy. Dzięki temu artefakty niskoczęstotliwościowe nie są wzmacniane, zaś metodologia opracowana przez Autora wcześniej, w publikacji [P2], mogła być użyta ponownie do określania błędów rekonstrukcji fazy. W kolejnej części przewodnika Autor skupia się na określaniu optymalnych warunków brzegowych w celu minimalizacji niestabilności numerycznych. Ta część bazuje na jego pracy [A3], w której Autor numerycznie określa zależność pomiędzy lokalizacją/pozycją badanego obiektu, rodzajem warunku brzegowego (Dirichlet, Neumann lub okresowy)

i obecnością artefaktów w rekonstrukcji fazy. W tej pracy Autor odrzucił możliwość zastosowania algorytmu rekonstrukcji, bazującego na transformacie Fouriera, z uwagi na możliwość użycia jedynie okresowego warunku brzegowego. W pracy [P4] Autor zademonstrował użycie warunku brzegowego von Neumana i algorytmu rekonstrukcji fazy opartego na transformacie Fouriera, poprzez odpowiednią modyfikację układu eksperymentalnego do akwizycji serii obrazów intensywnościowych. Z pracy wynika, iż niezależnie od typu warunku brzegowego niskoczęstotliwościowe artefakty mogą zostać wyeliminowane z rekonstrukcji fazy. Metoda TIE rekonstruuje fazę w postaci uciągłej. Natomiast metody interferometryczne – nieuciągłej, w granicach $(-\pi, \pi)$ wymagając dodatkowego algorytmu uciągania fazy. W pracy [P5] Autor opracował nowy, wydajny algorytm uciągania fazy (Phase Unwrapping). Określił również optymalne warunki do przeprowadzenia tej operacji. Autor jasno definiuje również ograniczenia tej metody, takie jak konieczność braku aliasingu w fazie, braku szumów, czy też niewielki gradient fazy. Często, rzeczywiste dane eksperymentalne nie spełniają tych warunków. Dlatego też Autor opracował algorytm iteracyjny, który zmniejsza wpływ tych ograniczeń i powoduje, iż rekonstrukcje fazy z pełnego zakresu są mniej czułe na artefakty występujące w rekonstrukcji fazy z ograniczonego zakresu. Kolejnym aspektem w pracy Autora jest odpowiednie kształtowanie oświetlenia padającego na badany obiekt. Poprawa rozdzielczości może być uzyskana poprzez zwiększenie apertury numerycznej, jednakże nie zawsze jest to możliwe lub celowe. Autor rozważa inny sposób, w którym kieruje wiązkę oświetlającą badany obiekt pod kilkoma kątami, aby przenieść wyższe częstotliwości przestrzenne do zakresu możliwego do rejestracji w aktualnym, niezmodyfikowanym układzie optycznym. Jest to podejście klasyczne, a nowatorstwo polega na jego połączeniu z algorytmami do rekonstrukcji fazy TIE. Dzięki temu uzyskuje poszerzenie widma fazowego i jednoznaczną poprawę rozdzielczości przestrzennej rekonstrukcji fazowej. Przedstawia to w pracy [A4]. Autor następnie zauważa, iż użycie promieniowania o dużej/pełnej spójności przestrzennej i czasowej może powodować powstawanie artefaktów, z którymi może nie poradzić sobie algorytm do rekonstrukcji fazy. Stąd też w publikacji [A5] przedstawia możliwość użycia promieniowania częściowo spójnego, wraz z demonstracją, iż MF-TIE w połączeniu z promieniowaniem o częściowej spójności pozwala na zredukowanie artefaktów w rekonstrukcji fazy, pochodzących od promieniowania o pełnej spójności. Ostatnim aspektem pracy jest metoda zaproponowana przez Autora, która pozwala na rejestrację obrazów/rozkładów intensywnościowych bez konieczności przesuwania kamery wzdłuż osi optycznej z użyciem stolików, itp. W pracy [A6] Autor proponuje użycie konfiguracji ze sferycznym frontem falowym, w której istnieje możliwość rejestracji rozogniskowanych rozkładów intensywności bez konieczności fizycznej zmiany pozycji detektora. Po zaprezentowaniu wszystkich publikacji, będących podstawą rozprawy Autora, w końcowej części przewodnika podsumowuje on swoje osiągnięcia, które pokrótce omówiłem.

Pracę przedstawioną przez Doktoranta, którą miałem przyjemność recenzować, nazwałbym pracą przede wszystkim teoretyczną. Główny nacisk w pracy położony został na symulacje numeryczne i opracowywanie nowych algorytmów, które sukcesywnie niwelują problemy i niedoskonałości poprzednich wersji oraz poszerzają możliwości zastosowań

tychże algorytmów. Algorytmy, będące osiągnięciem Autora, są według mnie najbardziej zaawansowanymi tego typu numerycznymi narzędziami do obrazowania fazowego, jakie występują. Na podstawie badań, które Autor przedstawił w jedenastu omówionych przeze mnie publikacjach mogę stwierdzić, iż jest on w światowej czołówce specjalistów zajmujących się tą tematyką.

Podsumowując, uzyskane przez Autora wyniki są bardzo ważne z punktu widzenia rozwoju metod obrazowania fazowego. Praca porusza problemy jak najbardziej aktualne i budzące duże zainteresowanie w środowisku naukowym, jednocześnie przedstawiając sposób ich rozwiązania. Aparat matematyczny, który zawarty jest w publikacjach, jest na bardzo wysokim poziomie. Większość prac Autora z listy JCR opublikowano w znanych i renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej, takich jak na przykład *Optics Letters* (IF = 3.416), czy też *Optics Express* (IF = 3.148). Aktualnie, liczba cytowań jego prac na podstawie danych z bazy Scopus wynosi ponad 60, w tym artykuł z *Optics Letters* z 2014 roku, [P1] - 19 razy, co jest niezłym wynikiem pomimo krótkiego okresu czasu, jaki upłynął od chwili publikacji. Stwierdzam, iż praca (w formie przewodnika wraz ze zbiorem publikacji) 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. We wstępie Autor pisze: „However, this phase delay oscillates too fast to be measured directly by any detector.”. Mam zatem kilka pytań. Czy jakiś detektor może w takim razie zmierzyć wolnozmienną fazę? Czy jakkolwiek detektor może bezpośrednio mierzyć fazę? Sam Autor pisze kilka zdań później, iż faza jest metodami optycznymi zmieniana na intensywność, która jest następnie detekowana/rejestrowana za pomocą detektorów.
2. Równanie 1.3 zostało poprawnie wyprowadzone, jednakże komentarz Autora do tego równania również wymaga wytłumaczenia. Autor pisze: „Notably, in this last expression the second derivative in z-direction has been replaced by its first derivative due to the slow variations of the field along the propagation axis.”. Jest to zdanie nieprawdziwe, z uwagi na fakt, iż druga pochodna nie jest zastępowana przez pierwszą, ale jest przyrównywana do zera, co jest znanym założeniem i o czym sam Autor pisze później, w końcowej części pracy.
3. Równanie 1.5 opisuje ogólną postać równania ciągłości. W równaniu tym pochodna po z powinna być zastąpiona pochodną po czasie. Wtedy przejście i porównanie tego równania z równaniem TIE, opisane nieco później przez Autora, ma sens.
4. Strona 23, Autor pisze: „In order to verify this assumption, the estimated axial derivatives from Fig. 2.1a)-h) were introduced in the QPI-TIE-Fourier based solver defined in Eq. (1.15).”. Równanie 1.15 ma sens przy założeniu niezmiennej lub

wolnozmienniej poprzecznie intensywności. Czy Autor zweryfikował możliwość użycia równania 1.14, które nie jest oparte na tym założeniu zamiast 1.15?

5. Strona 27, rys. 2.5: co jest przyczyną, iż krzywe nie mieszczą się granicach wyznaczonych przez $RMSE_N$? Szczególnie odbiega krzywa dla obiektu 3. Czy związane jest to z wysokimi częstotściami przestrzennymi fazy w tym obiekcie? Proszę o wyjaśnienie.
6. W rozprawie Autor pokazał, iż metody rekonstrukcji fazy działają najlepiej, jeśli obiekt jest fazowy i nie wykazuje absorpcji (lub wykazuje w niewielkim stopniu). Jednakże, Autor przedstawia w pracy [P3] algorytm, który pozwala na rekonstrukcję fazy dla obiektu posiadającego absorpcję. Jest to według mnie bardzo ważne i jest to jedna z silnych stron pracy, gdyż pozwala na obrazowanie próbek rzeczywistych, które nie zawsze są czysto fazowe. Mam jednak pewną obiekcję, która odnosi się do Rys. 7 z pracy [P3], strona 91. Dlaczego Autor uznał, że rozkład absorpcji (rys. 7a) - pięć kwadratów) powinien być kompletnie nieskorelowany z rozkładem fazowym (fantom Shepp'a-Logana)? Jest to niefizyczne, z uwagi na fakt, iż w rzeczywistych próbkach oba rozkłady są podobne wskutek bezpośredniej zależności pomiędzy absorpcją i fazą w postaci zależności Kramers'a-Kronig'a. Z jakiego powodu Autor rozważał taki właśnie obiekt?
7. Na koniec generalne uwagi do strony edytorskiej pracy: brakujące spacje, w niektórych przypadkach niska jakość użytej czcionki (nagłówek Tabeli 2.1, pod równaniem 2.5 na stronie 30). Brak konsekwencji w stosowaniu czcionki dla liczb. Czcionki na rys. 2.8, 2.13a) są za małe do czytania, przede wszystkim dla pracy w formacie A5. Niektóre skróty są wspomniane w przewodniku, np. DBC, NBC, PBC, ale żeby je rozszyfrować trzeba zajrzeć do pracy [P4] na stronę 60. Może to być kłopotliwe dla Czytelnika. Praca ma również niewielkie błędy gramatyczne, np. „a afocal imaging system”, strona 43.

Moje komentarze zostały przekazane Autorowi pracy.

Bazując na przedstawionej pracy mogę stwierdzić, iż jej wykonanie wymagało od Doktoranta dogłębnego zrozumienia zjawisk zachodzących w czasie propagacji promieniowania elektromagnetycznego przez obiekty fazowe i częściowo absorbujące to promieniowanie, a także opanowania szerokiego zakresu wiedzy z fizyki (optyki) i matematyki oraz profesjonalnego posługiwania się algorytmiką w programowaniu w środowisku MATLAB. 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 Juana Martinez-Carranza do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz, z uwagi na wysoki poziom merytoryczny rozprawy, który uzasadniłem w recenzji, wnioskuję o wyróżnienie jego pracy doktorskiej.



dr hab. inż. Przemysław Wachulak