



Politechnika Łódzka

Instytut Fizyki

dr hab. inż. Maciej Dems, prof. ucz.

Łódź, 29 stycznia 2026 r.

**Recenzja Rozprawy Doktorskiej
mgra Rafała Roberta Stojka**

**Wysokorozdzielcze jednopikselowe obrazowanie hiperspektralne
w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni**

Rozprawa doktorska mgra Rafała Roberta Stojka została przygotowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w ramach realizacji doktoratu wdrożeniowego, pod kierunkiem dra hab. Rafała Kotyńskiego, prof. ucz., pełniącego funkcję promotora, oraz dra Michała Kozubala — opiekuna ze strony partnera przemysłowego, firmy Vigo Photonics. Praca dotyczy opracowania i eksperymentalnej weryfikacji układu do obrazowania jednopikselowego w zakresie średniej podczerwieni.

Punktem wyjścia rozprawy było stworzenie układu do wizualizacji rozkładu czułości spektralnej detektorów podczerwieni na potrzeby firmy Vigo Photonics. Doktorant skutecznie zrealizował to zadanie, a następnie rozwinął stojącą u jego podstaw koncepcję, adaptując ją do szerszych zastosowań w dziedzinie obrazowania. W tym kontekście tematyka pracy bardzo dobrze wpisuje się w założenia doktoratów wdrożeniowych, choć pewien niedosyt budzi sposób przedstawienia jej aspektu badawczego. Ten element został znacznie pełniej zaprezentowany w publikacjach naukowych autora, do których odnoszę się w dalszej części recenzji.

Rozprawa nie zawiera jednoznacznie sformułowanych tez naukowych; zamiast tego stanowi studium dotyczące obrazowania jednopikselowego w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Zgodnie z ideą doktoratu wdrożeniowego autor proponuje konstrukcje konkretnych urządzeń oraz przeprowadza szczegółową analizę ich zalet i ograniczeń. W szczególności w pracy można wyróżnić dwa główne zagadnienia badawcze:

- jednopikselowe obrazowanie skaningowe w zakresie podczerwieni,
- obrazowanie kompresywne z wykorzystaniem modulatora DMD.

W ramach pierwszego z powyższych zagadnień głównym osiągnięciem doktoranta było oryginalne opracowanie układu umożliwiającego obrazowanie przestrzennego rozkładu czułości detektorów podczerwieni, co pozwoliło na wyznaczanie takich parametrów, jak jednorodność detektora oraz poziom przesłuchów optycznych w matrycach detektorowych. Opracowane rozwiązanie zostało następnie w naturalny sposób rozwinięte w technologię skaningowej mikroskopii w zakresie podczerwieni. Istotnym elementem tego etapu była możliwość prowadzenia obra-

zowania przy kilku długościach fali, realizowana zarówno z wykorzystaniem laserowych źródeł światła o różnych częstotliwościach, jak i za pomocą optycznego rezonatora parametrycznego.

W ramach drugiego zagadnienia głównym osiągnięciem była eksperymentalna weryfikacja jakości obrazowania kompresyjnego oraz opracowanie i wdrożenie nowego algorytmu umożliwiającego wysokorozdzielcze obrazowanie struktur rzadkich. W tym obszarze upatruję największej wartości naukowej zaprezentowanych w rozprawie prac.

Doktorant jest współautorem trzech artykułów naukowych, z czego w dwóch występuje jako pierwszy autor:

1. A. Pastuszczak, R. Stojek, P. Wróbel, and R. Kotyński, "Differential real-time single-pixel imaging with Fourier domain regularization: applications to VIS-IR imaging and polarization imaging," *Optics Express*, vol. 29, no. 17, p. 26685, 2021.
2. R. Stojek, A. Pastuszczak, P. Wróbel, and R. Kotyński, "Single pixel imaging at high pixel resolutions," *Optics Express*, vol. 30, no. 13, pp. 22730–22745, 2022.
3. R. Stojek, A. Pastuszczak, P. Wróbel, M. Cwojdzńska, K. Sobczak, and R. Kotyński, "High-resolution single-pixel imaging of spatially sparse objects: Real-time imaging in the near-infrared and visible wavelength ranges enhanced with iterative processing or deep learning," *Sensors*, vol. 24, no. 24, 2024.

W powyższych publikacjach przedstawiono wyniki badań stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. Niestety należy stwierdzić, że zostały one zaprezentowane w sposób wyraźnie bardziej przejrzysty i naukowo przekonujący niż w samej dysertacji. Lektura artykułów pozwala w pełni docenić wysoki poziom merytoryczny wykonanych prac, który nie wyłania się z rozprawy równie jednoznacznie. Stanowi to istotną słabość dysertacji, wynikającą nie z jakości przeprowadzonych badań, lecz ze sposobu ich opisu i prezentacji.

Niemniej dominująca rola mgra Stojka jako pierwszego autora w dwóch spośród trzech publikacji pozwala uznać zaprezentowane w nich wyniki za jego oryginalny wkład naukowy i traktować je jako integralny element dorobku przedstawionego do oceny wraz z rozprawą doktorską.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. Rozdział pierwszy ma charakter wprowadzający; przedstawiono w nim ogólne założenia pracy oraz uzasadniono motywację podjęcia omawianej tematyki. Zaprezentowano również aktualny stan wiedzy w zakresie obrazowania jednopikselowego. W tym miejscu odczuwalny jest jednak brak ilościowego zestawienia parametrów uzyskiwanych w pracach literaturowych, co pozwoliłoby na bardziej jednoznaczne i wyraziste ukazanie przewag rozwiązań proponowanych w dysertacji.

Rozdziały drugi, trzeci i czwarty poświęcone są oryginalnym osiągnięciom doktoranta. Rozdział drugi koncentruje się na skaningowym badaniu przestrzennego rozkładu czułości detektora podczerwieni — stanowiącym punkt wyjścia dla dalszych prac — oraz na skaningowym obrazowaniu piksel po pikselu. W rozdziale trzecim przedstawiono odmienne podejście, w którym do detekcji natężenia światła pochodzącego jednocześnie z wielu punktów badanej próbki wykorzystano modulator DMD. Metoda ta wymaga zastosowania algorytmów obliczeniowych do

rekonstrukcji obrazu, jednak pozwala na zwiększenie średniej ilości światła docierającej do detektora w trakcie pojedynczego pomiaru. Ponadto umożliwia ona realizację obrazowania kompresyjnego, w którym liczba wykonanych pomiarów jest mniejsza od liczby pikseli rekonstruowanego obrazu.

Rozdział czwarty stanowi w istocie zestawienie wcześniej uzyskanych wyników oraz ich porównanie z obrazami otrzymywanymi metodami tradycyjnymi, tj. z wykorzystaniem matryc detektorów. W mojej opinii rozdział ten mógłby zostać połączony z niezwykle krótkim, jednostronicowym rozdziałem piątym, tworząc spójne podsumowanie całości przeprowadzonych badań.

Całość rozprawy zamyka spis literatury obejmujący 102 pozycje. Dobór cytowanych prac należy uznać za właściwy — pozwala on zarówno na osadzenie przeprowadzonych badań w szerszym kontekście naukowym, jak i obejmuje, wspomniane wcześniej, opublikowane prace doktoranta. Wszystkie odwołania bibliograficzne zostały poprawnie przywołane w tekście, co w połączeniu z ich omówieniem, szczególnie w rozdziale pierwszym, pozwala stwierdzić, że autor posiada ugruntowaną, ekspercką wiedzę z zakresu obrazowania jednopikselowego w obszarze podzwini.

Wszystkie sekcje w rozdziałach poświęconych oryginalnym badaniom doktoranta rozpoczynają się od opisu zastosowanej metodyki. W każdym przypadku widoczne jest bardzo praktyczne podejście do realizowanych prac. Układy doświadczalne oraz systemy akwizycji danych zostały przedstawione w sposób szczegółowy i przejrzysty. Zauważalnie mniej uwagi poświęcono natomiast części algorytmicznej. W szczególności algorytm rekonstrukcji stosowany w obrazowaniu kompresyjnym — MD-FDRI — został omówiony w sposób niewystarczająco pogłębiony. Na podstawie samej lektury rozprawy trudno jest jednoznacznie uchwycić istotę jego działania. Ponadto celowe byłoby przytoczenie i omówienie wcześniej opracowanych algorytmów, takich jak DFRI (nawet jeśli nie zostały one zaproponowane przez doktoranta), co umożliwiłoby czytelnikowi pełniejsze zrozumienie stosowanej metodologii. Ogólnie rzecz biorąc, opis obrazowania kompresyjnego, przedstawiony w sekcji 3.5, należy uznać za zbyt lakoniczny.

Wyniki doświadczalne zaprezentowane w rozprawie stanowią jej zasadniczy trzon. Za najbardziej doniosłe spośród nich należy uznać opracowanie nowatorskiej metody wizualizacji przestrzennego rozkładu czułości spektralnej detektorów oraz ich matryc, opisanej w sekcji 2.2, a także wysokorozdzielcze obrazowanie kompresyjne obiektów rzadkich, któremu poświęcono sekcję 3.7. Najmniej przekonująca jest natomiast analiza przedstawiona w rozdziale czwartym, w szczególności w sekcjach 4.2 i 4.3. Przykładowo rysunek 4.3a zawiera jedynie trzy punkty pomiarowe. Choć pozostają one w zgodzie z przewidywaniami teoretycznymi, ich liczba jest zbyt mała, aby formułować na ich podstawie daleko idące wnioski. Sprawia to wrażenie, że rozdział ten stanowi częściowo próbę zebrania i podsumowania uzyskanych wyników, a częściowo prezentację badań, które nie zostały w pełni zakończone. Potwierdza to fakt, że o ile wyniki zaprezentowane w rozdziałach drugim i trzecim zostały opublikowane w niezależnych artykułach naukowych, o tyle rezultaty przedstawione w rozdziale czwartym nie doczekały się analogicznej publikacji.

Pod względem redakcyjnym rozprawa została przygotowana poprawnie. Pewne zastrzeżenia dotyczące rozdziałów czwartego i piątego zostały omówione we wcześniejszej części niniejszej recenzji, jednak poza nimi układ pracy oraz podział na rozdziały, sekcje i podsekcje należy uznać za spójny i logiczny. Poniżej przedstawiam kilka drobnych uwag odnoszących się do sposobu prezentacji treści zawartych w dysertacji, z których najistotniejsze wymieniam poniżej:

- Niektóre podsekcje sprawiają wrażenie chaotycznych. Przykładowo opis wyznaczania wartości z' na stronie 21 pojawia się dość niespodziewanie. Jest to wprawdzie pewien — być może istotny — aspekt opracowanego układu, jednak brakuje wcześniejszego wprowadzenia i nakreślenia ogólnego kontekstu.
- W podpisie rysunku 2.23c pojawia się odniesienie do wykorzystania wiedzy o funkcji przenoszenia układu optycznego, jednak zagadnienie to nie jest nigdzie indziej omówione w treści rozprawy.
- Z rysunku 3.24 wynika, że zastosowanie algorytmu MD-FDRI prowadzi do uzyskania znacznie lepszej rozdzielczości obrazu niż w przypadku prostej operacji macierz–wektor, mimo dwunastokrotnie większego stopnia kompresji. Jest to wynik o dużym znaczeniu, który zasługuje na znacznie bardziej szczegółowe omówienie w tekście.
- W rozprawie sporadycznie pojawia się żargon techniczny, np. użycie słowa „waferów” na stronie 14.
- Algorytmy przedstawione w postaci kodu w języku Python w rozdziale drugim zaprezentowano w sposób mało czytelny. Zamiast zrzutów ekranu z ciemnym tłem należałoby przedstawić je w formie tekstowej, z poprawnym wyróżnieniem składni charakterystycznej dla danego języka programowania.
- W niektórych miejscach kolejność odwołań do ilustracji w tekście nie odpowiada ich rzeczywistej kolejności występowania w rozprawie.

Zamieszczone powyżej uwagi krytyczne mają w większości charakter marginalny lub polemiczny i jedynie w niewielkim stopniu wpływają na obniżenie mojej ogólnej, pozytywnej oceny przedstawionych badań. Podsumowując, stwierdzam, że autor wykazał się ekspercką wiedzą w omawianym zakresie, a także skutecznie zademonstrował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedłożona rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z obrazowaniem jednopikselowym w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni oraz posiada istotny aspekt aplikacyjny, zgodny z założeniami doktoratu wdrożeniowego.

W związku z powyższym potwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Rafała Roberta Stojka spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Signed by / Podpisano przez:

Maciej Dems
Politechnika Łódzka

Date / Data: 2026-01-29
11:11

dr hab. inż. Maciej Dems, prof. ucz.