

Warszawa, dnia 20 stycznia 2026 roku

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Rafała Roberta Stojka p.t. „WYSOKOROZDZIELCZE JEDNOPIKSELOWE OBRAZOWANIE HIPERSPEKTRALNE W ZAKRESIE BLISKIEJ I ŚREDNIEJ PODCZERWIENI”

1. Wstęp

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Rafała Roberta Stojka pt. „*Wysokorozdzielcze jednopikselowe obrazowanie hiperspektralne w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni*” stanowi obszerne i wszechstronne opracowanie poświęcone rozwojowi nowoczesnych technik obrazowania jednopikselowego w podczerwieni. Praca dotyczy problematyki wysoce aktualnej i istotnej zarówno z punktu widzenia badań podstawowych, jak i zastosowań przemysłowych — w szczególności w kontekście rosnącego zapotrzebowania na szybkie, precyzyjne i nieniszczące metody charakteryzacji detektorów podczerwieni oraz obrazowania hiperspektralnego. Autor podjął się ambitnego zadania obejmującego jednocześnie rozwijanie nowych metod pomiarowych, budowę prototypowych układów doświadczalnych oraz opracowanie algorytmów rekonstrukcyjnych, co nadaje pracy charakter zarówno teoretyczno-numeryczny, jak i konstrukcyjno-eksperymentalny.

W rozprawie zaprezentowano trzy zasadnicze kierunki badań: obrazowanie skaningowe w podczerwieni, obrazowanie kompresyjne z użyciem modulatora DMD oraz porównanie jakości obrazowania różnych układów fonicznych. Autor opracował i zbudował m.in. układ umożliwiający szybkie obrazowanie czułości widmowej detektorów z rozdzielczością 1000×1000 pikseli w czasie kilku sekund, co należy uznać za wynik imponujący. Praca zawiera ponadto szczegółowe analizy numeryczne, jak również implementację zaawansowanych algorytmów interpolacyjnych i kalibracyjnych pozwalających na rekonstrukcję obrazu z nieregularnych danych pomiarowych. Z kolei w części eksperymentalnej przedstawiono liczne przykłady obrazowania struktur detektorów podczerwieni oraz próbek biologicznych i materiałowych, co potwierdza szeroki zakres stosowalności zaproponowanych metod.

Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie i eksperymentalna weryfikacja hiperspektralnego mikroskopu jednopikselowego działającego w zakresie $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ z impulsowym

źródłem OPO. Rozwiązanie to umożliwia rejestrację wielokanałowych obrazów wysokiej jakości przy czasie akwizycji rzędu ~ 5 s na kanał spektralny (np. 16 kanałów ≈ 5 min dla 1000×1000), a ponadto wykazuje bardzo korzystny stosunek sygnału do szumu ($\text{SNR} \sim 1500$), co stanowi istotny wkład w rozwój metod pomiarowych w średniej podczerwieni. Interesującym osiągnięciem jest również wykazanie przewagi multipleksacji w obrazowaniu jednopikselowym w warunkach dominacji szumu detektora — co ma duże znaczenie praktyczne w technologiach IR, w których matryce są kosztowne i trudniej dostępne.

Opracowanie szeregu nowatorskich rozwiązań wymagało kompleksowego podejścia, obejmującego zarówno modelowanie numeryczne układów optycznych, projektowanie algorytmów rekonstrukcyjnych w oparciu o triangulację Delaunaya, interpolację barycentryczną oraz metody kompresyjne, jak i budowę licznych prototypów urządzeń wykorzystujących skanery galwaniczne, modulatory DMD i detektory termoelektryczne. Autor przeprowadził również rozbudowane testy rzeczywistych detektorów, identyfikując defekty strukturalne, przesłuchy elektrooptyczne i błędy montażowe, co pokazuje praktyczną wartość opracowanych metod.

Podjęty w rozprawie problem badawczy jest ambitny, nowatorski i oparty na solidnych podstawach merytorycznych. Praca w przekonujący sposób realizuje cel określony na początku dysertacji, jakim jest opracowanie szybkich i wysokorozdzielczych metod obrazowania jednopikselowego w podczerwieni, mogących stanowić alternatywę dla konwencjonalnych kamer oraz klasycznych układów FTIR. Wyniki przedstawione w rozprawie jednoznacznie potwierdzają zasadność postawionej hipotezy oraz wskazują na duży potencjał dalszego rozwoju metod jednopikselowych w zastosowaniach naukowych i przemysłowych.

2. Ocena osiągnięć naukowych i technicznych

Rozprawa liczy około 120 stron i obejmuje liczbę około 102 referencji bibliograficznych zgodną z aktualnym stanem badań w dziedzinie optycznych metod obrazowania, w szczególności technik jednopikselowych i hiperspektralnych. Praca została podzielona na pięć rozdziałów, poprzedzonych częścią wprowadzającą. Rozdział 1 ma charakter wstępny i przedstawia umiejscowienie badań, motywację oraz przegląd literatury. Rozdziały 2 i 3 obejmują część teoretyczną oraz konstrukcyjno-numeryczną, w której opisano kolejno jednopikselowe obrazowanie skaningowe oraz obrazowanie kompresyjne z wykorzystaniem modulatora DMD. Rozdział 4 ma charakter analityczno-porównawczy i dotyczy oceny różnych układów obrazujących, natomiast rozdział 5 stanowi syntetyczne podsumowanie uzyskanych wyników oraz perspektywy dalszych badań. Całość pracy ma klarowną strukturę wspierającą logiczne przejście od zagadnień podstawowych do złożonych eksperymentów i podsumowujących wniosków.

Rozdział 1 stanowi część wprowadzającą i osadza badania w kontekście współczesnego rozwoju technik obrazowania jednopikselowego. Autor przedstawia motywację pracy, wynikającą z ograniczeń klasycznych detektorów podczerwieni oraz potrzeb przemysłu fotonicznego, a także opisuje genezę dwóch głównych ścieżek badawczych rozwijanych w rozprawie. W rozdziale zawarty jest obszerny przegląd literatury dotyczący metod skanowania laserowego, mikroskopii podczerwieni, modulacji przestrzennej światła oraz obrazowania

kompresywnego, wraz z omówieniem najważniejszych osiągnięć ostatnich lat. Całość zamyka przedstawienie struktury dysertacji oraz wyjaśnienie wkładu autora.

Drugi rozdział rozprawy zawiera opis zagadnień dotyczących jednopikselowego obrazowania skaningowego w podczerwieni, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji stanowiska pomiarowego, zasad działania skanera galwanicznego oraz analizy optycznej rozkładu plamki laserowej. Autor omawia założenia projektowe, parametry soczewek, ograniczenia dyfrakcyjne, a także algorytmy służące do rekonstrukcji obrazu z sygnałów zbieranych w czasie rzeczywistym. W rozdziale zaprezentowano również wyniki licznych pomiarów eksperymentalnych, obejmujących m.in. mapowanie czułości detektorów InGaAs i HgCdTe oraz analizę zjawisk przesłuchów elektrooptycznych. Tę część pracy uważam za bardzo interesującą, choć w kilku miejscach nasuwają się istotne uwagi:

- Rekonstrukcja obrazu została w pracy zrealizowana z użyciem interpolacji barycentrycznej po triangulacji Delaunaya. Metoda ta została zastosowana do rekonstrukcji wielu obrazów w pracy. Czy Autor rozważał alternatywne metody rekonstrukcji; na przykład interpolację splajnami, metody regularyzacyjne lub podejścia oparte na uczeniu maszynowym; i jakie względy przesądziły o wyborze interpolacji barycentrycznej jako podstawowego narzędzia rekonstrukcyjnego. Metoda barycentryczna jest bardzo szybka, co mogło być kluczowe – ale warto, by Autor choć krótko to uzasadnił.
- Warto byłoby uzupełnić opis układu optycznego o pełniejszy model aberracji trzeciego rzędu, w szczególności o analizę krzywizny pola (krzywej Petzwa). W rzeczywistych układach optycznych promienie pozaosiowe ogniskują się nie na płaskiej powierzchni, lecz na powierzchni zakrzywionej, której promień jest zwykle znacznie większy od ogniskowej. Dotyczy to również zakresu podczerwieni, mimo większych współczynników załamania stosowanych materiałów. Z tego względu uproszczony opis oparty wyłącznie na geometrii soczewki sferycznej (jak w równaniu 2.3) nie w pełni oddaje rzeczywisty przebieg powierzchni najlepszego ogniskowania. Krótka analiza krzywej Petzwa pozwoliłaby dokładniej określić ograniczenia optyczne projektowanego układu oraz lepiej uzasadnić obserwowane pogorszenie ostrości na brzegach pola widzenia.
- W podpisie do rys. 2.23c Autor informuje o „poprawie obrazu z użyciem funkcji przenoszenia”, ale w tekście brakuje krótkiego wyjaśnienia, czym konkretnie była ta funkcja, jak ją wyznaczono i jak zastosowano.

Rozdział trzeci prezentuje rozwój obrazowania kompresywnego z użyciem DMD: opis układu jednopikselowego, charakterystykę dyfrakcyjno-geometryczną DMD oraz wpływ okna ochronnego na transmisję w podczerwieni. Autor przedstawia procedurę rekonstrukcji (m.in. maski Hadamarda) i porównania z obrazowaniem piksel-po-pikselu; rozdział oceniam wysoko, choć do tego rozdziału również mam pytania:

- W rozdziale 3 pokazano działanie układu z DMD i liczne rekonstrukcje, brakuje jednak analizy limitu rozdzielczości przestrzennej systemu. Autor w wielu miejscach podkreśla dyfrakcję na DMD; naturalnym uzupełnieniem byłoby określenie, jak przekłada się ona na zdolność rozdzielczą. Warto dodać krótkie omówienie czynników ograniczających pasmo przestrzenne: wpływu DMD, skończonej apertury toru optycznego, etc.

- Czy Autor rozważał oświetlenie strukturalne (SIM) z użyciem DMD w celu zwiększenia efektywnej rozdzielczości układu jednopikselowego? Na ile taka modulacja mogłaby poszerzyć pasmo rekonstruowanych częstości i poprawić rozdzielczość w rozdziale 3? Uwaga ta wynika jedynie z ciekawości recenzenta.

Rozdział czwarty stanowi wartościową część pracy, w której Autor porównuje działanie różnych układów obrazujących oraz metod rekonstrukcji. Szczególnie cenna jest dyskusja wpływu szumu na jakość obrazowania oraz zasadności stosowania kompresji pomiarowej, przekonująco pokazująca, w jakich warunkach techniki kompresyjne zyskują przewagę nad klasycznym skanowaniem.

3. Uwagi edycyjne

Praca pod kątem edycyjnym nie budzi większych zastrzeżeń; jest spójna i czytelna. Można jednak znaleźć pojedyncze literówki oraz drobne uchybienia redakcyjne. Przykładowo zwracają uwagę:

- niejednolite formatowanie jednostek (np. odstępy między liczbą a jednostką).
- literówki np: przypadku, “fotonowe detektorów podczerwieni” “wynikające z obić”, podpisy pod rysunkami nie zawsze zaczynają się od dużej litery...
- Drobne błędy na rysunkach: błąd w legendzie na rysunku 3.18.

4. Opis dokonań naukowych

Najważniejsze wyniki rozprawy zostały opublikowane w trzech pracach naukowych, w których mgr inż. Rafał Robert Stojek jest pierwszym autorem. Na szczególną uwagę zasługuje publikacja z Optics Express z 2022 r, która już została cytowana 31 razy (na dzień pisania recenzji). Dorobek naukowy autora obejmuje również kilka prac, w których nie jest pierwszym autorem. Współautorstwo tych prac świadczy o jego udziale w pracach zespołowych realizowanych w grupie badawczej prof. Rafała Kotyńskiego. Szczególnie istotny jest wkład wdrożeniowy zrealizowany w VIGO Photonics S.A., gdzie opracowane techniki zostały zastosowane.

5. Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Rafała Roberta Stojka **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** przez ustawę o tytule Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Dysertacja prezentuje wysoki poziom merytoryczny, oryginalne wyniki oraz staranne opracowanie teoretyczne i eksperymentalne, co potwierdza odpowiednie przygotowanie autora do samodzielnej pracy naukowej. **W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie mgra inż. Rafała Roberta Stojka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Ponadto ze względu na istotny wkład w rozwój kompresyjnego obrazowania w podczerwieni poprzez opracowanie oryginalnych, wysokorozdzielczych układów pomiarowych i szybkich algorytmów rekonstrukcji oraz ze względu na szczególnie istotny wkład wdrożeniowy stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.**

Podpisane elektronicznie przez
Tomasz Kozacki (Certyfikat
kwalifikowany) w dniu
2026-01-22.