

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Jayanth Jayakumar „Joint precision limits and measurement compatibility in realistic quantum photonics sensing”

Recenzent:

dr hab. inż. Piotr Mironowicz, prof. PG
Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

Jednostka nadająca stopień:

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

Promotor:

dr hab. Magdalena Stobińska, prof. UW

Gdańsk, dnia 18 kwietnia 2026 r.

1. Ocena dorobku naukowego i aktywności Doktoranta

Doktorant wykazał się dobrą aktywnością naukową i zdolnością do współpracy, nawiązując efektywne kontakty zarówno w środowisku lokalnym, jak i międzynarodowym, co zaowocowało wspólnymi publikacjami z uznanymi badaczami w dziedzinie metrologii kwantowej.

Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje dwie prace w renomowanych czasopismach międzynarodowych, w których występuje jako pierwszy autor, co wskazuje na jego wiodącą rolę w prowadzonych badaniach. Publikacje te ukazały się w dobrze rozpoznawalnych periodykach z zakresu fizyki teoretycznej i metrologii kwantowej, a ich łączna punktacja ministerialna (odpowiednio 140 i 100 punktów) potwierdza ich wysoką rangę. Na podkreślenie zasługuje niewielka liczba współautorów, co sugeruje znaczący wkład Doktoranta w uzyskane wyniki. Jednocześnie należy zauważyć, że w przedstawionej dokumentacji brak jest szczegółowej informacji o indywidualnym wkładzie autorskim w poszczególne publikacje, co utrudnia jego jednoznaczną ocenę.

Tematyka obu prac jest spójna z zakresem rozprawy doktorskiej i dotyczy aktualnych zagadnień metrologii kwantowej, w szczególności estymacji wieloparametrowej i kompatybilności pomiarów. Wyniki przedstawione w publikacjach stanowią wartościowy wkład w rozwój tej dziedziny. Rdzeń merytoryczny rozprawy w dużym stopniu pokrywa się z opublikowanymi pracami, natomiast doktorat rozszerza je o materiał wprowadzający, uzupełniające analizy oraz dodatkowe wyniki numeryczne.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa przedstawiona przez Doktoranta dotyczy wieloparametrowej metrologii kwantowej w interferometrii optycznej, ze szczególnym uwzględnieniem jednoczesnej estymacji fazy oraz

P.M.

efektów dekoherencji, takich jak dyfuzja fazy i straty fotonów. Autor analizuje zarówno zasoby kwantowe (stany gHB), jak i realistyczne strategie pomiarowe (np. detekcja homodynowa i zliczanie fotonów), badając ich wpływ na granice precyzji oraz kompromisy (trade-off) informacyjne. Kluczowym wkładem jest wykazanie, w jakim stopniu praktyczne, separowalne pomiary mogą zbliżyć się do fundamentalnych granic oraz identyfikacja stanów i schematów najbardziej odpornych na szum.

Lista skrótów jest obszerna i dobrze odzwierciedla zakres stosowanych narzędzi teoretycznych, obejmując zarówno standardowe pojęcia metrologii kwantowej, jak i bardziej wyspecjalizowane konstrukcje, choć niektóre oznaczenia (np. SNS, MIB) mają charakter mniej ugruntowany w literaturze i wymagają dodatkowego doprecyzowania. Bibliografia obejmuje 224 pozycje. Są one odpowiednio dobrane, z czasopism odpowiednich dla dyscypliny. Praca składa się z 6 rozdziałów, o dobrze dobranej strukturze, odpowiednio podzielonych tematycznie. Pewna ilość technicznych szczegółów została zawarta w Appendixach.

Rozdział 1 ma charakter przeglądu i w sposób uporządkowany przedstawia aktualny stan badań oraz podstawy eksperymentalne fotoniki kwantowej, stanowiąc poprawne wprowadzenie do dalszej części pracy, choć nie zawiera elementów oryginalnego wkładu naukowego. Przedstawiony formalizm interferometru Macha–Zehndera jest poprawny i elegancko prowadzi do jego interpretacji jako efektywnej rotacji w przestrzeni modów zależnej wyłącznie od różnicy faz, co stanowi standardowy i fizycznie przejrzysty opis interferencji. W rozprawie podano jednak niepoprawny wzór na niepewność fazy dla stanu Holland–Burnetta (brak pierwiastka w mianowniku), co stanowi istotną nieścisłość formalną względem standardowych wyników literaturowych. Opis heraldowania i generacji stanów fotonowych jest poprawny, jednak w zapisie operatorów w przybliżeniu słabego ściskania pojawia się błąd indeksów (idler zastąpiony pompą), co wymaga korekty. Wyprowadzenie formalizmu detekcji homodynowej jest poprawne i standardowe.

Rozdział 2 stanowi teoretyczne zaplecze pracy i jest poświęcony systematycznemu wprowadzeniu narzędzi wieloparametrowej estymacji kwantowej oraz pojęcia kompatybilności pomiarów. Autor przechodzi od klasycznych podstaw (CRB) do ich kwantowych uogólnień (QCRB), a następnie do bardziej zaawansowanych ograniczeń (HCRB, NHCRB), które opisują ograniczenia wynikające z fundamentalnej niekompatybilności obserwabli oraz różnicy między pomiarami separowalnymi i kolektywnymi. Rozdział kończy się wprowadzeniem miar kompatybilności, które stanowią kluczowy element dalszej analizy w pracy. Wprowadzenie formalizmu jest poprawne i przejrzyste, choć rozróżnienie między operatorami śladu Tr i tr może być niepotrzebne i potencjalnie mylące dla czytelnika. Zdanie następujące po (2.12): "Since this estimator is optimal regardless of the value of θ_i , it is a global estimator." wydaje mi się pewnym nadużyciem, w kontekście nieokreślenia powszechności spełnienia warunku (2.12). Doktorant trafnie identyfikuje niekomutatywność operatorów SLD jako źródło fundamentalnej niekompatybilności pomiarów oraz poprawnie uzasadnia przejście do skalarnej funkcji kosztu. Przedstawienie QFI dla stanów czystych i modeli unitarnych jest poprawne i klarowne, choć interpretacja otrzymanej nierówności jako analogii do zasady nieoznaczoności Heisenberga ma jedynie charakter heurystyczny i powinna być traktowana z ostrożnością. Wyprowadzenie granicy Holevo–Craméra–Rao jest poprawne i kompletne, jednak wymaga od czytelnika znacznego wysiłku, a jego fizyczna interpretacja, zwłaszcza rola części urojonej macierzy $Z(X)$ jako miary niekompatybilności, mogłaby zostać wyraźniej podkreślona. Autor trafnie omawia ograniczenia i asymptotyczną osiągalność granicy NHCRB. Fundamentalna

niekompatybilność została wskazana jako główne ograniczenie wieloparametrowej metrologii wraz warunkami, w których możliwe jest osiągnięcie optymalnej estymacji.

Rozdział 3 przedstawia spójną i dobrze umotywowaną analizę wspólnej estymacji fazy i dyfuzji fazy w realistycznych warunkach interferometrii kwantowej, jasno łącząc fizyczne źródła szumu z formalizmem estymacyjnym. Szczególną wartością jest uwzględnienie zarówno ograniczeń fundamentalnych (granice precyzji), jak i wykonalnych eksperymentalnie strategii pomiarowych. Praca trafnie podkreśla, że traktowanie dyfuzji jako parametru ubocznego, który jednak należy estymować równocześnie, jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników w praktycznych zastosowaniach. Rozdział ten został napisany w oparciu o jedną z publikacji Doktoranta, figurującą w bibliografii jako pozycja [185]. Autor umiejętnie uogólnia model dekoherencji z poziomu pojedynczego kubitu na stany wielofotonowe, wykorzystując odwzorowanie Jordana–Schwingera oraz klarownie interpretując kolektywną dyfuzję fazy jako wspólny efekt oddziaływania z elementami interferometru. Doktorant przedstawia ścisły dowód relacji kompromisu informacyjnego dla kubitów, pokazując, że ograniczenie $Y \leq 1$ wynika bezpośrednio z geometrii przestrzeni Blocha oraz struktury pomiarów POVM, co jednoznacznie ujawnia fundamentalną niekompatybilność estymacji fazy i dyfuzji. Autor trafnie identyfikuje ograniczenia relatywnej miary Y i wprowadza komplementarną, absolutną miarę Σ^2 opartą na QFI, co umożliwia jednoznaczną ocenę zasobowości stanów oraz stanowi solidną podstawę do badania naruszenia ograniczenia SQB przez układy wielofotonowe. Doktorant przedstawia poprawne i spójne matematycznie wyprowadzenia prowadzące do istotnego wyniku o optymalności pomiaru homodynamicznego dla estymacji fazy, choć w kilku miejscach opiera się na argumentach symetrii i obliczeniach numerycznych zamiast pełnych dowodów analitycznych. Wykresy prezentowane w tym rozdziale w dużej części są powtórzeniami odpowiednich wykresów z publikacji [185] autorstwa Doktoranta. Sekcja prezentuje spójne i dobrze uzasadnione porównanie metrologiczne różnych stanów kwantowych, prowadzące do klarownego wniosku o przewadze stanów gHB, choć opiera się w dużej mierze na analizie numerycznej i interpretacji wykresów zamiast ścisłych dowodów analitycznych. W tym rozdziale, bardziej niż w innych, widać drobne problemy formatowania tekstu.

W rozdziale 4 Doktorant przedstawił wyniki ze swojej pracy [210]. Wprowadzenie jest klarowne i dobrze motywuje przejście od analizy wydajności do analizy kompatybilności, jednak pozostaje głównie na poziomie konceptualnym i przeglądowym. Zależność kompatybilności od liczby fotonów oraz wag parametrów została uchwycona poprawnie, jednak interpretacja przecięcia krzywych mogłaby zostać pogłębiona o bardziej bezpośrednią intuicję fizyczną. Interpretacja wyników jest poprawna i dobrze pokazuje konsekwencje słabej kompatybilności, natomiast wyjaśnienie osobliwości FIM dla pomiaru zliczania fotonów mogłoby zostać przedstawione bardziej precyzyjnie od strony informacyjnej. Pewną wadą jest zbyt techniczne wymienianie poszczególnych przypadków, z których każdy opiera się na analizie wykresów, natomiast spojrzenie całościowe, z syntezą oglądu nie jest wystarczająco nakreślone. Dyskusja trafnie porządkuje relacje między HCRB, NHCRB i osiągalnością w praktyce. Interesujące są wyniki Autora pokazujące, że zliczanie fotonów zapewnia lepszą wydajność niż pomiar double homodyne we wszystkich rozważanych przypadkach pewnej klasy problemów, co można przypisać dopasowaniu pomiaru niegaussowskiego do niegaussowskiego stanu.

Rozdział 5 omawia metody numeryczne, oparte na programowaniu półokreślonym, użyte w pracy. Charakter rozdziału jest inny niż pozostałych. Jego treścią jest głównie omawianie fragmentów

kodu. Zważywszy rolę, jaką optymalizacja numeryczna odgrywa w pracy, rozdział ten jest względnie krótki. Szczególnie niedostatecznie rozwinięte są kwestie związane z wydajnością programów i ograniczeniami użytych metod.

3. Ocena formalna rozprawy

Praca jest napisana w sposób ogólnie poprawny i przejrzysty. Struktura jest logiczna i spójna, a zakres bibliografii odpowiedni dla dyscypliny. Występują jednak drobne uchybienia formalne i redakcyjne, takie jak błędy formatowania, nieścisłości w zapisie czy miejscami nadmierna techniczność opisu, które nie wpływają jednak istotnie na wartość merytoryczną pracy.

4. Podsumowanie

Przedstawiona rozprawa doktorska dowodzi, że Autor posiada solidną i szeroką wiedzę teoretyczną w zakresie metrologii kwantowej oraz optyki kwantowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, obejmujących zarówno analizę formalną, jak i obliczenia numeryczne oraz interpretację fizyczną uzyskanych wyników.

Praca podejmuje aktualny i istotny problem naukowy związany z wieloparametrową estymacją w obecności dekoherencji oraz ograniczeń pomiarowych. Jej wyniki, w szczególności analiza kompromisów informacyjnych oraz kompatybilności pomiarów, stanowią oryginalny wkład w rozwój dyscypliny.

Dorobek publikacyjny Doktoranta, choć mógłby być bardziej rozbudowany, należy uznać za wystarczający do uzyskania stopnia doktora.

5. Pytania do Doktoranta

W rozprawie wskazuje Pan, że metody numeryczne, w szczególności te oparte na programowaniu półokreślonym (SDP), stają się bardzo kosztowne obliczeniowo wraz ze wzrostem liczby parametrów i wymiaru przestrzeni stanów próbkujących. Czy mógłby Pan bardziej szczegółowo skomentować skalowanie złożoności tych metod w analizowanym problemie oraz wskazać, jakie praktyczne ograniczenia napotkał Pan w swoich obliczeniach? Czy widzi Pan potencjalne strategie (np. symetrie, redukcje modelu, aproksymacje), które mogłyby uczynić takie podejścia bardziej skalowalnymi?

W pracy analizuje Pan ograniczenia estymacji wynikające z niekompatybilności pomiarów i dekoherencji. Czy mógłby Pan odnieść uzyskane wyniki do bardziej fundamentalnych interpretacji procesu pomiaru, takich jak kwantowy Darwinizm? W szczególności, czy można interpretować obserwowane kompromisy informacyjne (trade-off) i utratę precyzji jako konsekwencję selekcji „klasycznych” obserwabli przez środowisko, oraz czy taka perspektywa wnosi dodatkowy wkład w projektowanie optymalnych schematów metrologicznych?

P.M.

6. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pana Jayantha Jayakumara spełnia wymagania określone w obowiązujących przepisach, w szczególności:

- prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie nauki fizyczne,
- potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Podpis recenzenta:

Piotr Mironowicz.....

dr hab. inż. Piotr Mironowicz, prof. PG

P.M.