

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Tomasza Mrozka

która odbędzie się w dniu **6 grudnia 2022 roku o godzinie 12:00 w trybie zdalnym**

Temat rozprawy doktorskiej:

„Wykorzystanie metody asynchronicznego próbkowania sygnałów i splotowych sieci neuronowych do oceny jakości transmisji optycznej”

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Perlicki- Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki – Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. inż. Krzysztof Wesołowski – Politechnika Poznańska

* Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Tomasz Trzcinski – email : tomasz.trzcinski@pw.edu.pl do dnia 5 grudnia 2022 do godz. 12.00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej:

<https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Tomasz-Mrozek>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
dr hab. inż. Jarosław Arabas

Streszczenie

Rozprawa doktorska została poświęcona badaniom nad możliwością zastosowania metody asynchronicznego próbkowania z opóźnieniem ADTS (ang. *Asynchronous Delay Tap Sampling*) do monitorowania zjawisk zachodzących w warstwie fizycznej sieci optycznej oraz spłotowych sieci neuronowych CNN (ang. *Convolutional Neural Network*) do wyznaczania wartości liczbowych parametrów opisujących monitorowane zjawiska. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano bardzo dobre wyniki monitorowania oraz wyznaczania wartości trzech równocześnie występujących zjawisk, czyli dyspersji chromatycznej, przeniku optycznego oraz szumu wzmocnionej emisji spontanicznej ASE (ang. *Amplified Spontaneous Emission*) dla modulacji fazy DPSK (ang. *Differential Phase Shift Keying*) i natężenia światła OOK (ang. *On-Off Keying*). Połączenie techniki ADTS oraz CNN pozwala na stworzenie metody i układu pomiarowego do jej realizacji, który charakteryzuje się właściwościami spełniającymi wymagania stawiane nowoczesnym metodom monitorowania wydajności pracy współczesnych systemów transmisji optycznej.

Słowa kluczowe:

Telekomunikacja światłowodowa, Monitorowanie jakości transmisji optycznej, Asynchroniczne próbkowanie z opóźnieniem, Spłotowe sieci neuronowe

Abstract

The PhD thesis was devoted to research on the possibility of using the Asynchronous Delay Tap Sampling (ADTS) method to monitor the phenomena occurring in the physical layer of the optical network and the Convolutional Neural Network (CNN) algorithms to determine the numerical values of parameters describing monitored phenomena. As a result of the conducted research, very good results of monitoring and determining the values of three simultaneously occurring phenomena of Chromatic Dispersion, Optical Crosstalk and Amplified Spontaneous Emission (ASE) noise for Differential Phase Shift Keying (DPSK) and On-Off Keying (OOK) modulation were obtained. The combination of the ADTS technique and CNN algorithms allows for the creation of a method and measurement system for its implementation, which is characterized by properties that meet the requirements for modern methods of monitoring the performance of modern optical transmission systems.

Keywords:

Optical fiber communications, Optical Performance Monitoring, Asynchronous Delay Tap Sampling, Convolutional Neural Networks

Wrocław, 01.08.2022

Prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki
Politechnika Wrocławska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Mrozka

Wykorzystanie metody asynchronicznego próbkowania sygnałów i spłotowych sieci neuronowych do oceny jakości transmisji optycznej

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

W pracy sformułowano następującą tezę: problem monitorowania kilku, równocześnie występujących zjawisk zakłócających transmisję danych w światłowodzie może być efektywnie rozwiązany stosując metodę asynchronicznego próbkowania sygnałów i spłotowe sieci neuronowe.

Natomiast zasadniczym celem pracy jest udowodnienie postawionej tezy oraz opracowanie metody i schematu pomiarowego do jej realizacji, służącej wyznaczaniu wartości parametrów opisujących zjawiska wpływające na jakość transmitowanego sygnału optycznego przy jednoczesnym ich występowaniu. Pomiar musi charakteryzować się małym błędem i ma odbywać się w warunkach równoczesnego występowania innych zjawisk w szerokim zakresie ich wartości, typowym dla rzeczywistych sieci optycznych.

Cel i teza rozprawy zostały sformułowane jasno.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W spisie literatury autor rozprawy powołał się na 98 pozycji przy czym około 30 razy odniósł się do wiodących czasopism naukowych z zakresu telekomunikacji optycznej, t.j. Journal of Lightwave Technology, IEEE Photonics Technology Letters, Optics Express. Powołał się także wielokrotnie na wyniki prac prowadzonych przez zespół Prof. Antonio Teixeira'y z Uniwersytetu w Aveiro w Portugalii, który uznawany jest za jednego z głównych ekspertów w rozważanej dziedzinie. Ponadto spis literatury zawiera odnośniki do istotnych norm ITU-T, wiodących konferencji naukowych z zakresu telekomunikacji światłowodowej, t.j. OFC i książek. Stwierdzam zatem, że w mojej opinii analiza źródeł została przeprowadzona w sposób właściwy i stanowi wierne odwzorowanie obecnego stanu wiedzy w zakresie rozważanej tematyki.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor wykorzystał profesjonalny pakiet oprogramowania do analizy propagacji w łączach światłowodowych, który został opracowany przez firmę VPI Photonics. Pakiet ten jest standardowym narzędziem, z którego korzystają specjaliści z dziedziny telekomunikacji optycznej do oceny jakości sygnału przesyłanego przez łącze optyczne. Korzystając z oprogramowania VPI Photonics doktorant stworzył zbiór uczący dla splotowych sieci neuronowych przy wykorzystaniu techniki ADTS (ang. Asynchronous Delay Tap-Sampling). Sieci neuronowe zrealizowano przy wykorzystaniu języka programowania Python oraz bibliotek Tensorflow i TFLearn. Według mojej opinii autor rozwiązał postawione zagadnienia i poprawnie dobrał metody.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy polega na połączeniu techniki ADTS ze splotowymi sieciami neuronowymi w celu równoczesnego monitorowania zjawisk fizycznych występujących w warstwie fizycznej sieci optycznej DWDM, które mają istotny wpływ na jakość transmisji. Dotychczas opublikowane prace na temat wyznaczania wartości liczbowych parametrów charakteryzujących główne zjawiska fizyczne, które mają istotny wpływ na jakość transmisji w sieci optycznej DWDM koncentrowały się na zbieraniu danych, ich analizie przy wykorzystaniu sieci splotowych i były zazwyczaj kończone po przeprowadzonym pozytywnym procesie uczenia. Okazuje się jednak, że wysoka dokładność gotowego modelu opisującego nauczoną sieć nie zawsze przekłada się na równie dobre wyniki w procesie weryfikacji. Dlatego też doktorant skoncentrował się na procesie weryfikacji na dodatkowych zewnętrznych danych. Zaprezentowane przez doktoranta wyniki uzupełniają zatem brakującą wiedzę dotyczącą monitorowania parametrów transmisji. W ramach przeprowadzonych prac badawczych doktorant w sposób szczegółowy omówił proces weryfikacji i pokazał jego kluczowe znaczenie.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

W mojej opinii autor wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Praca jest napisana bardzo starannie. Doktorant poprawnie wykorzystał tabele i różne rodzaje wykresów w celu poparcia wniosków. Na stronach 64 – 65 i dalej konsekwentnie w tekście autor pozostawił pojęcia w języku angielskim: dataset, test size value, itd. W mojej opinii autor mógł dokonać próby przetłumaczenia tych pojęć na język polski.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych?

W ramach przeprowadzonych badań opracowano metodę i układ pomiarowy który umożliwia mierzenie z dużą dokładnością wartości parametrów opisujących równocześnie występujące zjawiska dyspersji chromatycznej, przeniku oraz szumu ASE dla modulacji DPSK i OOK dla przepływności 10 Gbit/s. Opracowane narzędzie może być wykorzystywane do monitorowania jakości transmisji (ang. Quality of Transmission - QoT) w sieciach DWDM. Uzyskane wyniki pokazały, że sieci splotowe umożliwiają wyznaczanie wartości liczbowych parametrów występujących zjawisk. Daje to możliwość wykorzystania opracowanej metodyki w systemach zarządzania ruchem sieci DWDM. Oszacowanie QoT w sieciach DWDM pozwala operatorom sieci w sposób racjonalny wykorzystać dostępne zasoby, a tym samym zredukować koszty operacyjne oraz koszty zakupu sprzętu konieczne do realizacji zapotrzebowań pomiędzy węzłami sieci (ang. opex, capex). W mojej opinii praca ma zatem duży potencjał w zakresie możliwych zastosowań w systemach zarządzania zasobami sieci DWDM.

Biorąc pod uwagę przedstawioną przez Doktoranta rozprawę stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego wnoszę o przyjęcie niniejszej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Tomasza Mrozka do publicznej obrony.

Stawomir Sujada

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wesołowski
Instytut Radiokomunikacji
Politechnika Poznańska

**KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

Wykorzystanie metody asynchronicznego próbkowania sygnałów i splotowych sieci neuronowych do oceny jakości transmisji optycznej

Autor rozprawy: mgr inż. Tomasz Mrozek, Politechnika Warszawska
Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Perlicki, prof. uczelni
Promotor pom.: dr Piotr Wasilewski

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Przedmiotem rozprawy jest opracowanie metody pomiaru służącego wyznaczaniu parametrów zjawisk wpływających równocześnie na jakość transmisji sygnału optycznego. Autor w tym celu zastosował metodę asynchronicznego próbkowania sygnałów uzupełnioną o specjalnie skonfigurowane splotowe sieci neuronowe.

Teza pracy brzmi następująco:

Problem monitorowania kilku, równocześnie występujących zjawisk zakłócających transmisję danych w światłowodzie może być efektywnie rozwiązany stosując metodę asynchronicznego próbkowania sygnałów i splotowe sieci neuronowe.

Teza rozprawy została sformułowana jasno i w jej trakcie została wykazana. Zdaniem recenzenta świadczy o tym zaproponowana struktura pomiarowa pokazana na końcu rozprawy, według której trzy różne rodzaje zakłóceń są identyfikowane z wykorzystaniem trzech odpowiednio skonfigurowanych, równolegle działających splotowych sieci neuronowych.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny. Zawiera również obszerną część przeglądową. Część eksperymentalna bazuje na wielokrotnych próbach konfiguracji struktury splotowej sieci neuronowej i dobieraniu wielkości ciągów i wzorców treningowych, a także określaniu liczby iteracji (tzw. epok) algorytmu nastaw sieci neuronowych, aby osiągnąć zadaną dokładność wyników pomiarów zakłóceń występujących w systemach transmisji światłowodowej.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącą o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Według recenzenta, przegląd literatury i analiza źródeł została przeprowadzona prawidłowo. W rozprawie cytowanych jest 98 pozycji literatury, w tym 6 pozycji, których współautorem jest autor rozprawy doktorskiej. Sposób redakcji rozdziałów pozwala stwierdzić, że Doktorant posiada

umiejętność eksploracji źródeł i odpowiedniej syntezy wiadomości w nich zawartych. Autor rozprawy zawarł też krytyczne uwagi dotyczące treści publikacji i wyników w nich prezentowanych.

Omawiając splotowe sieci neuronowe, Doktorant pominął jednak szereg podstawowych podręczników akademickich dotyczących sieci neuronowych, zarówno w języku angielskim jak i polskim. Kilka takich pozycji literatury niewątpliwie wzbogaciłaby bibliografię rozprawy.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor rozwiązał postawione zagadnienia za pomocą modnej i obecnie szczególnie popularnej metody uczenia maszynowego zrealizowanego za pomocą splotowych sieci neuronowych, poprzedzonego asynchronicznym próbkowaniem analizowanych sygnałów. Spośród różnych rodzajów zjawisk zakłócających transmisję światłowodową Autor wybrał trzy istotne, występujące równocześnie zjawiska i wykazał, że możliwa jest ocena i pomiar ich wielkości. W przypadku uczenia maszynowego, przeprowadzenie analizy teoretycznej jest trudne a może i niemożliwe. Tak więc zasadniczym problemem do rozwiązania jest dobór sekwencji treningowych, dobór struktury i algorytmu adaptacji sieci i jego parametrów. Odbywa się to najczęściej na zasadzie eksperymentu. Zasadę tę zastosował również Autor rozprawy. Być może można byłoby ją nieco wzbogacić, gdyby Autor zastosował kilka różnych algorytmów adaptacji sieci a nie tylko jeden, bardzo popularny znany pod akronimem ADAM.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Chociaż, jak wynika z rozważań Autora rozprawy, podobna tematyka do tej, którą Autor rozpatrywał w swoim doktoracie, była w ostatnich latach równolegle przedmiotem zainteresowań innych badaczy, oryginalność rozprawy nie ulega wątpliwości. Samodzielny i oryginalny dorobek rozprawy stanowi zastosowanie próbkowania asynchronicznego wraz ze splotową siecią neuronową, przebadanie wielu konfiguracji struktury i sposobów trenowania takiej sieci w celu uzyskania wymaganej dokładności wybranych parametrów istotnych zjawisk zakłócających występujących w transmisji światłowodowej.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Duża część rozprawy ma charakter przeglądowy albo jest analizą zawartości innych prac. Własny wkład Autora rozpoczyna się mniej więcej od strony 59 (na 110 stron właściwego tekstu rozprawy nie licząc spisu literatury i wykazów tabel i rysunków). Część własna rozprawy to w dużej mierze sprawozdanie z eksperymentów wykonanych za pomocą pakietu symulacyjnego VPIphotonics, w ramach którego Autor skonfigurował strukturę systemu transmisyjnego, w którym zastosowano kilka różnych rodzajów modulacji sygnału optycznego, z asynchronicznym próbkowaniem sygnałów odbieranych. Następnie Autor dobierał najpierw strukturę splotowej sieci neuronowej (liczbę i konfigurację jej warstw) a następnie dla wybranej już struktury - parametry jej uczenia z liczbą przebiegów testujących, z doбором liczby iteracji (tzw. epok) algorytmu nastaw współczynników sieci i wielkością uzyskanych „portretów fazy”. Na ich podstawie sieci neuronowe wyznaczały parametry trzech wybranych zjawisk zakłócających transmisję.

Autor rozprawy nie wykazał się niestety zbyt dużymi umiejętnościami redakcyjnymi rozprawy. Można w niej znaleźć wiele sformułowań, które nie są poprawne językowo, jak np. sformułowania że „rozwiązanie jest oparte o architekturę”. Szereg wątpliwości budzą również tłumaczenia skrótów

zastosowanych w pracy. Ich lista jest całkiem długa. Jako jedynie przykłady takich nieprecyzyjnych tłumaczeń skrótów z języka angielskiego można podać:

- DFT – Discrete Fourier Transform – dyskretna transformata Fouriera (tak podał Autor) ale i dyskretna transformacja Fouriera (w języku angielskim zarówno transformata jak i transformacja są opisane słowem „transform”)
- FEC – Forward Error Correction – korekcja błędów z wyprzedzeniem (tak podał Autor) – w rzeczywistości nie występuje w kodowaniu FEC żadne wyprzedzenie. FEC oznacza, że kodowanie kanałowe po prostu nie wykorzystuje sprzężenia zwrotnego (Feedback) z dekodera do kodera – mamy działanie „w przód” od nadajnika do odbiornika (kodera/dekodera). W związku z tym termin FEC warto tłumaczyć jako kodowanie kanałowe bez sprzężenia zwrotnego.
- SPM – Self-phase Modulation – samo modulacja fazy (takie dziwne tłumaczenie podał Autor); zdaniem recenzenta odpowiednim tłumaczeniem tego terminu jest „samoistna modulacja fazy”, co wynika z samej istoty powstawania zmian fazy sygnału w trakcie jego transmisji pod wpływem zjawisk w światłowodzie.
- QAM – Quadrature Amplitude Modulation - Kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa (jak podał Autor); w rzeczywistości termin ten powinien być tłumaczony jedynie jako „kwadraturowa modulacja amplitudy” w odróżnieniu od modulacji amplitudowo-fazowej AM/PM, w której punkty konstelacji sygnału na płaszczyźnie składowej synfazowej i kwadraturowej występują na kilku okręgach (wyznaczonych przez składową modulację amplitudy) a na każdym z nich z różnymi fazami (wyznaczonych przez składową modulację fazy).
- PAM – Pulse Amplitude Modulation – Impulsowa modulacja amplitudy (jak podał Autor) – zdaniem recenzenta bardziej prawidłowym terminem jest modulacja amplitudy impulsów.
- ReLU – Rectifier Linear Unit – Prosta liniowa funkcja aktywacji (jak napisał Autor) – w istocie funkcja aktywacji nie jest prosta, zawiera zaś element prostowania jednopółówkowego (sygnały ujemne są zerowane, zaś dodatnie wzmacniane liniowo, czyli nie są zmieniane).
- RZ-DPSK – Return to Zero Differential Phase Shift Keying – kod z powrotem do zera z kwadraturową modulacją z kluczowaniem fazy (jak podał Autor) – w praktyce tłumaczenie tego terminu powinno być następujące: „kluczowanie różnicowe fazy z powrotem (sygnału) do zera”.

Innym przykładem budzącym wątpliwości jest stosowanie przez Autora rozprawy terminu „metoda kernel” (str. 40). Czasami Autor pisze z kolei o „metodzie Kernela” (str. 41; czyżby sądził, że to nazwisko wynalazcy tej metody?). Pisze też o „obliczeniach macierzy kernela”. Tymczasem metodę tę należałoby określić jako metodę jąder (ang. *kernel*) lub funkcji bazowych (ang. *basis functions*). Literatura na temat tej metody jest pewnie bogata, ale warto, aby Autor zapoznał się chociażby z przystępnym, krótkim tutorialiem Diego Unzuety pt. „Kernel Methods: A Simple Introduction”

(<https://towardsdatascience.com/kernel-methods-a-simple-introduction-4a26dcbe4ebd>),

który z pewnością uporządkowałby podstawy wiedzy na jej temat i terminy z nią związane.

W pracy można znaleźć wiele innych niezręcznych lub niepoprawnych sformułowań. Recenzent podaje tylko kilka przykładów:

- Na str. 34 Autor pisze o wykorzystaniu „specjalnego algorytmu opartego o dyskretną transformatę Fouriera DFT oraz transformatę świergotową CZT”. Sformułowanie to jest nie tylko niepoprawne językowo, ale również Autor nie odróżnia w nim terminu transformaty od transformacji. W rzeczywistości metoda wykorzystuje dyskretnie transformacje: Fouriera (DFT) i świergotową (CZT).
- Str. 46 sformułowanie „definicję splotu dwóch funkcji ciągłych przedstawiono na poniższym wzorze” jest niezgrabne.
- Recenzent ma wątpliwość, czy rzeczywiście sformułowanie na str. 47 „Obrazy

wyjściowe charakteryzują się sumą splotów między obrazem wejściowym a odpowiedzią impulsową filtru” jest prawidłowe.

- Na str. 64 można znaleźć sformułowanie: „Każdy obraz jest zapisany w postaci dwuwymiarowej macierzy, która przyjmuje wartości 0 lub 1”. Chyba to elementy macierzy przyjmują takie wartości nie zaś sama macierz, jak napisał Autor.
- Na str. 65 i wielu następnych Autor wspomina o współczynniku determinacji sieci R^2 . Współczynnik ten gra istotną rolę w procesie wyboru parametrów uczoney sieci neuronowej. Nie można jednak znaleźć w rozprawie jego definicji. Na str. 66 Autor określa z kolei R^2 jako współczynnik dopasowania gotowego modelu. Które określenie jest zatem prawidłowe i jaka jest jego definicja?
- W tabelkach w rozdziale 5 oprócz współczynników R^2 i liczby tzw. epok (iteracji) istotnym elementem jest średni błąd (śr. błąd). Recenzent nie znalazł w rozprawie definicji tego błędu, co należy uznać również za mankament rozprawy.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Słabą stroną pracy jest jej poziom redakcyjny, co już przedyskutowano w poprzednim punkcie. Autor nie ustrzegł się również kilku błędów we wzorach, których i tak nie ma w rozprawie wielu.

- Na str. 28 Autor przedstawił wzór na bitową stopę błędów (BER) powołując się na prace [17]. W rozprawie ma on postać:

$$BER = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} * \left(\frac{q}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

gdzie, jak pisze Autor, symbol „*” oznacza splot a erf to funkcja błędu. Dziwiąc się postaci tego wzoru, recenzent sprawdził publikację [17], w której powyższego wzoru nie znalazł. Zazwyczaj prawdopodobieństwo błędu określane jest (w przypadku zakłócenia gaussowskiego) funkcją erfc nie zaś erf , czyli komplementarną funkcją błędu (wartością pola pod rozkładem Gaussa począwszy od podanego argumentu tej funkcji do nieskończoności). Argumentem funkcji mogłoby być wyrażenie $Q/\sqrt{2}$, nie zaś $q/\sqrt{2}$, co podał Autor (wzór (3.1) opisuje współczynnik Q). Oczywiście nie występuje we wzorze splot. Prawidłowa postać tego wzoru jest następująca:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

co można znaleźć w postaci wzoru (8) np. w publikacji S. Burdah, R. Alamtaha, O. Nur Samijayani, S. Rahmatia, A. Syahriar, „Performance Analysis of Q Factor Optical Communication in Free Space Optics and Single Mode Fiber”, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering 6(3): 167-175, 2019. Na szczęście błędny wzór nie jest w pracy dalej stosowany.

- Czy we wzorze (4.4) (str. 47) opisującym dwuwymiarowy splot dyskretny argumenty funkcji g nie powinny mieć wartości $m-s, n-t$, zgodnie z definicją splotu, czyli tak jak we wzorze (4.3) lub też dodatkowo występujących ograniczeń w argumentach funkcji g tak, aby mieściły się one w założonym zakresie liczbowym?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Oceniam rozprawę jako istotną dla realizacji nowoczesnych metod pomiarowych w systemach światłowodowych. Praca stanowi krok do kolejnych badań, które mogłyby polegać na implementacji metody pomiarowej, dotychczas zrealizowanej symulacyjnie, za pomocą układu sprzętowo-komputerowego, co pozwoliłoby na rzeczywiste pomiary jakości transmisji.

Warta zauważenia jest też lista publikacji Autora zawarta w bibliografii rozprawy, składająca się z sześciu pozycji, z których na szczególną uwagę zasługuje artykuł w czasopiśmie *Optical and Quantum Electronics* (IF=2.794) wydawnictwa Springer oraz praca w czasopiśmie typu Open Access Politechniki Wrocławskiej pn. *Optica Applicata*. Oba czasopisma uzyskały 40 punktów na liście MEiN.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Podsumowując, pomimo uwag krytycznych zawartych w niniejszej recenzji, biorąc pod uwagę opracowaną metodę pomiarową i wykonanie dużej liczby pomiarów w systemie VPIphotonics uważam, że pracę doktorską mgr. inż. Tomasz Mrozka należy zaliczyć do spełniających wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Krzysztof Osiotowski