

1. Imię i nazwisko

Grzegorz Stępnia

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2005	Magister inżynier, telekomunikacja, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej
2009	Doktor nauk technicznych, telekomunikacja, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, tytuł rozprawy: Zastosowanie zwielokrotnienia grup modowych do transmisji danych w światłowodzie wielomodowym

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych

2005-2009	Doktorant na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej
2007-2009	Asystent na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, 1/2 etatu
2009-	Adiunkt na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Cykl powiązanych ze sobą publikacji pt. "Zwiększenie przepustowości optycznych łączy krótkiego zasięgu za pomocą metod optycznych i elektrycznych"

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

C1. G. Stępnia, L. Maksymiuk, J. Siuzdak, Influence of Fourier spatial filtering on multimode fiber bandwidth, *Optica Applicata*, vol. 40, no. 4, pp. 791-800, 2010 (IF: 0.3)

C2. G. Stępnia, L. Maksymiuk, J. Siuzdak, Binary phase spatial light filters for mode selective excitation of multimode fibers, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 13, July, 2011, pp. 1980-1987 (IF: 2.7)

C3. G. Stępnia, J. Siuzdak, Transmission Beyond 2 Gbit/s in a 100 m SI POF with Multilevel CAP Modulation and Digital Equalization, *OFC/NFOEC 2013*, NTu3J.5 Anaheim CA, USA

C4. G. Stępnia, Comparison of Efficiency of N-Dimensional CAP Modulations, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 2516-2523, 2014 (IF: 2.8)

- C5. G. Stępniaak, Three-Dimensional CAP for Short-Reach Bandwidth-Limited Optical Connections, OSA Signal Processing in Photonic Communications (SPPCom), San Diego, ST1D.3, 2014
- C6. G. Stępniaak, J. Siuzdak, Experimental investigation of PAM, CAP and DMT modulations efficiency over a double-step-index polymer optical fiber, Optical Fiber Technology, vol. 20, pp. 369-373, 2014 (IF: 1.2)
- C7. G. Stępniaak, DMT Transmission in SI POF With Minimax Channel Shortening Equalizer, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, no. 17, pp. 1750-1753, 2014 (IF: 2.2)
- C8. G. Stępniaak, Low-Cost Direct-Detection Passive Optical Network, Microwave and Optical Technology Letters, , vol. 55, no. 10, pp. 2504-2507, 2013 (IF: 0.62)
- C9. G. Stępniaak, Dispersion-Supported Direct-Detection Mode Group Division Multiplexing Using Commercial MMF Couplers, Optics Letters, vol. 39, no. 7, pp. 1815-1818, 2014 (IF: 3.2)
- C10. G. Stępniaak, J. Siuzdak, P. Zwierko, Compensation of a VLC Phosphorescent White LED Nonlinearity by Means of Volterra Decision Feedback Equalizer, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25, no. 16, pp. 1597-1600, August 2013 (IF: 2.2)
- C11. G. Stępniaak, L. Maksymiuk, J. Siuzdak, Experimental comparison of PAM, CAP and DMT modulations in phosphorescent white LED transmission link, IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 3, 2015, pp. 7901708 (IF: 2.3)
- C12. G. Stępniaak, M. Schueppert, C.A. Bunge, Advanced Modulation Formats in Phosphorous LED VLC Links and the Impact of Blue Filtering, Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 21 (IF: 2.8)
- C13. G. Stępniaak, M. Kowalczyk, L. Maksymiuk, J. Siuzdak, Optical Wireless Transmission at Rates Beyond 100 Mbit/s Using LED both as Transmitter and Receiver, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 27, no. 19, pp. 2067-2070, 2015 (IF: 2.2)

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Głównymi obszarami mojej aktywności badawczej w okresie od czerwca 2009 do września 2015 była transmisja sygnałów w optycznych łączach krótkiego zasięgu: światłowodach wielomodowych szklanych, światłowodach wielomodowych plastikowych oraz w wolnej przestrzeni, w tym ostatnim wypadku z wykorzystaniem diod oświetleniowych jako źródeł światła. Koncentrowałem się przy tym na poprawianiu takich parametrów tych łączy, które są istotne z punktu widzenia telekomunikacji, tzn. zwiększeniu uzyskiwanej przepływności binarnej lub redukcji kosztu łącza. Do tego celu stosowałem metody optyczne, czyli takie, w których np. zmieniane były własności przestrzenne fali świetlnej, wprowadzane były nowe kanały optyczne w tym samym paśmie lub metody elektryczne, które polegały na stosowaniu widmowo wydajnych formatów modulacji lub korekcji zniekształceń poprzez odpowiednie przetwarzanie sygnału. W dalszej części autoreferatu omówię moje najważniejsze osiągnięcia, związane z poddanym ocenie cyklem publikacji [C1-C13].

1. Metody optyczne - filtracja przestrzenna światła

W początkowym okresie po obronie pracy doktorskiej zajmowałem się filtracją przestrzenną światła na wejściu światłowodu wielomodowego oraz jej wpływem na parametry transmisyjne tego światłowodu, czyli pasmo oraz mocowe straty wtrąceniowe. Poprawa pasma światłowodu możliwa do uzyskania za pomocą filtracji przestrzennej polegała na redukcji liczby modów propagujących się w

światłowodzie. Podobna, dobrze znana metoda polega na filtracji światła w odcinku światłowodu jednomodowego umieszczonego za laserem nadawczym i zetkniętego czołowo ze światłowodem wielomodowym. Jest to tak zwane pobudzenie offsetowe [Raddatz]. Ja rozważałem inny układ doświadczalny, w którym pomiędzy laserem nadawczym a czołem światłowodu wielomodowego umieszczony był optyczny procesor Fourierowski składający się z dwóch soczewek i umieszczonego pomiędzy nimi w układzie współogniskowym filtru przestrzennego (SLM - ang. *spatial light modulator*) [Goodman]. Kluczowym moim osiągnięciem było opracowanie takiej transmitancji filtru SLM, która zwiększałaby pasmo światłowodu a jednocześnie wprowadzała możliwie najmniejsze straty mocy. Jednocześnie musiałem uwzględnić ograniczenia sprzętowe posiadanego filtru SLM - była to matryca TN LCD (ang. *twisted nematic liquid crystal display*) o rozdzielczości 640 x 480 pikseli, adresowana analogowo przy pomocy złącza VGA komputera PC, przeznaczona na światło widzialne.

Pierwszym moim pomysłem było zbudowanie na bazie tej matrycy filtru amplitudowego, poprzez umieszczenie na drodze optycznej polaryzatora pionowego przed matrycą i poziomego za nią. Sterując poszczególnymi elementami matrycy, możliwa była płynna, przestrzenna regulacja skręcenia płaszczyzny polaryzacji, a przez to amplitudy światła lasera, tak jak dzieje się to w monitorze LCD. Ponieważ światłowód jest symetryczny cylindrycznie, w grę wchodziły filtry o takiej też symetrii. Zaproponowałem trzy rodzaje filtrów: dolno, górno i środkowo-przepustowe względem widma przestrzennego wiązki lasera. Ponieważ rząd pobudzanych modów zależy od częstości przestrzennej światła oświetlającego czoło światłowodu, stosując filtry tego typu można było ograniczyć liczbę pobudzonych grup modowych, a przez to dyspersję modową. To rozwiązanie pozwoliło mi zwiększyć pasmo światłowodu około dwukrotnie, jednak niestety ta najwyższa poprawa pasma osiągnięta została przy wysokim tłumieniu dodatkowym filtru [C1].

Filtry amplitudowe nie dawały zasadniczej poprawy wobec metody pobudzania światłowodu wielomodowego przez filtrację w światłowodzie jednomodowym (metoda opisana w pracy [Raddatz]), a wprowadzały większe tłumienie. Dlatego zająłem się poszukiwaniem innych rodzajów filtrów przestrzennych, które również mogły być zrealizowane doświadczalnie przez posiadaną matrycę. Udało mi się dotrzeć do pracy [Remenyi], w której autorzy pokazali, że matryca TN LCD w odpowiedniej konfiguracji polaryzatorów i płytek ćwierćfalowych może działać jak filtr przestrzenny o transmitancji czysto fazowej. Na podstawie tej pracy, zbudowałem układ, który działał jak przestrzenny modulator fazy światła o zakresie 0-170 stopni, ze szczytkową pasożytniczą modulacją amplitudy (do 1 dB). Ponieważ układ nie pozwalał na uzyskanie pełnego zakresu modulacji kąta (0-360 stopni), poszukiwania transmitancji optymalnych filtrów ograniczyłem do filtrów fazowych binarnych (0 i 180 stopni). Istotną kwestią było to, czy filtry mają pobudzać selektywnie grupy modowe (np. przez utworzenie pierścieni o regulowanej średnicy), czy też może pojedyncze mody własne światłowodu. Selektywne pobudzenie pojedynczych modów jest bardziej użyteczne, ponieważ:

- Na skutek zgięć światłowodu mody w obrębie grupy modowej wymieniają energię, zatem pobudzając pojedynczy mod, moc pozostaje i tak w jednej grupie modowej, tej do której ten mod przynależy. Nie zostają jednak pobudzone sąsiednie grupy modowe, co ma np. miejsce w przypadku filtrów amplitudowych [C1], lub pobudzenia offsetowego światłowodem jednomodowym [Raddatz]. Pobudzając pojedyncze mody mogłem uzyskać zatem największą poprawę pasma.
- Selektywne pobudzenie modów oprócz poprawy pasma, ma szereg innych zastosowań:
 - Jest kluczowym elementem w systemach zwielokrotnienia modowego, gdzie różne sygnały informacyjne przenoszone są przez różne mody światłowodu

- Może służyć do charakteryzacji światłowodu wielomodowego: badania opóźności grupowych modów (DGD - ang. *differential group delay*), tłumienia modów (DMA - ang. *differential modal attenuation*) i wreszcie określenia mieszania energii modów w czasie propagacji, badania sprzęgaczy, konwerterów modów, itp.
- Ze względu na symetrię (lub antysymetrię) pól modów i własności transformaty Fouriera mody światłowodu mogły być pobudzane za pomocą binarnych filtrów fazowych

Należy podkreślić, że w do roku 2010 mało znane w literaturze były metody selektywnego pobudzenia modów, a na pewno żadna ze znanych metod nie miała większego znaczenia praktycznego. Jako przykład można podać metodę z wykorzystaniem komputerowo generowanych hologramów Lohmanna, która pozwala kształtować zarówno amplitudę, jak i fazę światła w płaszczyźnie Fourierowskiej. Metoda ta jednak z samej zasady działania, wykorzystując macierz amplitudowych apertur, wprowadza bardzo duże straty optyczne. Ponadto, filtr amplitudowo-fazowy wprawdzie pozwoliłby uzyskać całkowite sprzęgnięcie światła do wybranego modu światłowodu, jednak za cenę nieakceptowalnie wysokiego tłumienia (co najmniej 12-16 dB) [C2]. **Zaproponowane przeze mnie filtry fazowe światła były praktycznie bezstratne** a obliczone zostały jako czysto fazowa aproksymacja transformaty Fouriera pól modów w płaszczyźnie filtru. Dodatkowo, w zaproponowanych przeze mnie filtrach konieczne jest dobranie zakresu częstotliwości przestrzennych źródła światła do pobudzanego modu. Im wyższy rząd modu, tym szersze jest jego widmo przestrzenne. W praktyce każdy układ optyczny przenosi pewien zakres częstotliwości przestrzennych i optymalne jest pobudzanie tych modów, którym ten zakres odpowiada. W przypadku pobudzania modów niższych rzędów, konieczne jest zastosowanie apertury amplitudowej. W pracy [C1] funkcję tę pełniła po prostu przysłona obiektywu fotograficznego. Przy pomocy zaproponowanych filtrów uzyskałem selektywność pobudzenia na poziomie 90-97% (wartość teoretyczna). W układzie doświadczalnym dla sześciu wybranych filtrów zmierzono ponad trzykrotną poprawę pasma światłowodu. Wyniki tej pracy zaprezentowałem także na konferencji ECOC 2010 w Turynie [StepniakECOC]. Warto dodać, że w kolejnym roku na konferencji OFC zespół z Bell Labs wykorzystał podobne filtry do pierwszej transmisji ze zwielokrotnieniem modów w światłowodzie kilkumodowym [Salsi].

2. Metody elektryczne - przetwarzanie sygnału, zaawansowane metody modulacji

Po zakończeniu projektu związanego z filtracją przestrzenną skierowałem swoją aktywność badawczą w kierunku transmisji zaawansowanych formatów modulacji w łączach optycznych z detekcją bezpośrednią. Ten kierunek badań związany był z obecnym trendem w telekomunikacji optycznej, który każe odchodzić od prostej modulacji OOK (ang. *on-off keying*) na rzecz wydajnych widmowo modulacji, które pozwalają przeciwdziałać interferencjom międzysymbolowym (ISI - ang. *inter-symbol interference*) oraz nieliniowości łącza.

Pierwsza ważniejsza publikacja na ten temat [C3] dotyczyła wykorzystania modulacji CAP (ang. *carrierless amplitude-phase*) w światłowodach plastikowych (POF - ang. *plastic optical fiber*), o skokowym profilu współczynnika załamania (SI - ang. *step index*). Charakterystyka częstotliwościowa łącza SI POF z laserem jako źródłem światła charakteryzuje się silnym tłumieniem składowej stałej, wprowadzanym przez obwód stabilizacji prądu lasera. To z kolei jest niekorzystne dla modulacji, które przenoszą istotną część energii sygnału w pobliżu tej składowej, np. PAM. CAP to dwuwymiarowa modulacja kwadraturowa o widmie w pobliżu składowej stałej (DC), nieco podobna do QAM (ang. *quadrature amplitude modulation*), jednak nie wymaga do odbioru i generacji oscylatora lokalnego. Generacja (oraz odbiór) sygnału CAP odbywa się poprzez filtrację symboli

wysyłanych (oraz sygnału odebranego) przez dwa ortogonalne filtry cyfrowe w nadajniku (i odbiorniku). Ortogonalność filtrów jest zapewniona przez związanie ich transformacją Hilberta. Modulacja CAP umożliwia łatwe kształtowanie widma sygnału i odsunięcie go od składowej stałej, co w systemach optycznych ułatwia stabilizację pracy nadajnika. W pracy [C3] zastosowałem układ transmisyjny, w którym jako przetwornik cyfrowo/analogowy w nadajniku wykorzystałem generator przebiegów dowolnych (AWG - ang. *arbitrary waveform generator*), zaś jako przetwornik analogowo/cyfrowy oscyloskop z pamięcią. Do generowania sygnału i demodulacji napisałem odpowiednie kody w języku Matlab. W odbiorniku zastosowałem korektory cyfrowe: korektor transversalny (FFE - ang. *feed forward equalizer*) oraz korektor z decyzyjnym sprzężeniem zwrotnym (DFE - ang. *decision feedback equalizer*). Przeprowadziłem analizę wpływu wzmacniania szumu przez korektor oraz utraty SNR związanej z zastosowaniem modulacji wielowartościowej. **Udało mi się osiągnąć rekordową w owym czasie przepływność 2,1 Gbit/s w 100 m takiego światłowodu, co było wówczas rekordem transmisji w tego typu światłowodzie.**

Modulacja CAP jest modulacją o konstelacji dwuwymiarowej. Możliwe jest jednak rozszerzenie bazy ortogonalnych filtrów do większej liczby wymiarów: 3, 4, itd. W ostatnich latach ukazało się kilka prac poświęconych potencjalnym zaletom wielowymiarowej modulacji CAP, w tym jej efektywności widmowej. Prace te były jednak niekonkluzywne i niekompletne, w szczególności brakowało badań eksperymentalnych w kanałach z interferencją międzysymbolową. W literaturze można było znaleźć sprzeczne informacje na temat wymaganego pasma dla modulacji wielowymiarowej. **W pracy [C4] przedstawiłem kompletny system transmisyjny oparty o trójwymiarową modulację CAP, w tym: sposób obliczenia filtrów bazowych (nieco zmodyfikowaną metodą [Shalash]), analizę prawdopodobieństwa błędu w kanale z białym szumem gaussowskim (AWGN - ang. *additive white gaussian noise*), efektywność widmowa na tle modulacji jedno i dwuwymiarowej, sposób korekcji w przód oraz z decyzyjnym sprzężeniem zwrotnym. Wreszcie przeprowadziłem transmisję sygnału trójwymiarowej CAP w łączu POF i porównałem z modulacjami jedno i dwuwymiarowymi (czyli z modulacją amplitudy PAM (ang. *pulse amplitude modulation*) i klasyczną CAP) o tej samej liczbie poziomów amplitudy. Wykazałem, że efektywność widmowa trój i więcej wymiarowej modulacji CAP z punktu widzenia teorii komunikacji jest taka sama jak modulacji jedno i dwuwymiarowych. Ponadto wykazałem, że modulacja trójwymiarowa charakteryzowała się wyższym współczynnikiem wartości mocy szczytowej względem średniej (PAPR - ang. *peak to average power ratio*) o ok. 2,3 i 0,3 dB względem jedno i dwu wymiarowej CAP. Najistotniejszym jednak problemem, który zidentyfikowałem, była korelacja szumu wprowadzana przez trójwymiarowy korektor cyfrowy. Objawiało się to tym, że w trójwymiarowej przestrzeni chmura odebranych sygnałów wokół punktów konstelacji miała kształt elipsoid pochylonych pod kątem 45 stopni, podczas gdy w kanale niekształcącym z szumem białym gaussowskim AWGN miała kształt sfery. Takie elipsoidalne ukształtowanie wpływało negatywnie na stopę błędu (BER - ang. *bit error rate*), przy tym samej wektorowej magnitudzie błędu (EVM - ang. *error vector magnitude*). W pracy [C4] wykazałem, jakie warunki muszą spełniać filtry korektora w 2 i 3-wymiarowych systemach, aby nie dochodziło do korelacji szumu. Zaproponowałem również metodę wybielania szumu korekcji, po której zastosowaniu chmura konstelacji była sferyczna. Ujemną stroną wybielania była liniowa transformacja konstelacji. Ponadto zauważyłem, że korekcja i wybielanie szumu jako operacje liniowe mogą być przeprowadzone od razu przez korektor, który korygując sygnał przekształca go do przetransformowanej konstelacji. Korektor z wybielaniem szumu istotnie zmniejszył stopę błędu w stosunku do korektora zwykłego (5-6 dB różnicy). Zbudowałem kompletny system transmisyjny dla trójwymiarowej modulacji CAP, przeprowadziłem pomiary, w których w tym samym układzie transmisyjnym porównałem jedno, dwu i trójwymiarowe modulacje CAP. Okazało się, że ich**

efektywność jest bardzo zbliżona, z niewielką przewagą modulacji jednowymiarowej (czyli modulacji PAM).

O ile modulacja trójwymiarowa ma taką samą efektywność widmową jak jej jedno i dwuwymiarowe odpowiedniki dla konstelacji sześcienniej [C4], to wiadomym jest, że zwiększenie liczby wymiarów pozwala uzyskać większy zysk konstelacji przez optymalizację jej kształtu - zastosowanie siatki punktów innej niż prostokątna i pakowanie sfery. W pracy [C5] poszukiwałem optymalnej konstelacji dla trójwymiarowej modulacji CAP, czyli takiej, która przy tych samych odległościach pomiędzy sąsiednimi punktami konstelacji ma mniejszą energię średnią niż klasyczna konstelacja sześcienna. Wykorzystałem siatkę punktów opartą na siatce HCP (ang. *hexagonal close packed*). Z moich obliczeń wynikało [C4], że konstelacja taka powinna dać 1,34 dB zysku nad sześcienną. Istotnym problemem okazało się przyporządkowanie słów kodowych punktom konstelacji: w siatkach nieregularnych nie jest możliwe kodowanie Graya, a zatem błąd symbolowy może nieść za sobą więcej niż jeden błąd bitowy. Do przyporządkowania wykorzystałem algorytm symulowanego wyzarcia, otrzymując konstelację z karą za brak kodowania Graya na poziomie 1,47, 1,65 oraz 2,8 odpowiednio dla 32, 64 i 512 punktów konstelacji. Po zaprojektowaniu konstelacji przeprowadziłem symulacje w kanale AWGN oraz w kanale SI POF. W kanale AWGN konstelacje heksagonalne dały zbliżony do przewidywań teoretycznych zysk dla symbolowej stopy błędu. Jednak zysk dla bitowej stopy błędu był już znacznie niższy i zauważalny dopiero dla niskiej bitowej stopy błędu (efekt mnożnika kary Graya). Z kolei w kanale POF, na skutek interferencji symbolowej i korekcji z wybielaniem szumu optymalna konstelacja transformowana była do innej, nieoptymalnej, przez co zysk ze stosowania konstelacji heksagonalnej zniknął zupełnie i w efekcie konstelacja prostokątna radziła sobie lepiej. Praca [C5] w naturalny sposób uzupełniła rozważania [C4]. Obie prace pokazały, że zwiększanie wymiarów konstelacji jest bezzasadne jeżeli odbywa się ono w sposób sztuczny, w tym wypadku przez inne wykorzystanie tych samych zasobów czasowo-przestrzennych.

W pracy [C6] porównałem eksperymentalnie efektywność modulacji PAM, CAP oraz DMT (ang. *discrete multitone*) w łączu SI POF pod kątem najwyższej możliwej do osiągnięcia przepływności bitowej. Dla modulacji PAM oraz CAP stosowałem korektory FFE i DFE, jednak ostateczne wyniki porównałem dla DFE, gdyż ten rodzaj korekcji był najskuteczniejszy. Okazało się, że przepływności uzyskiwane przy użyciu CAP i PAM są zbliżone: 2 Gbit/s wobec 2,1 Gbit/s dla 100 m odcinka oraz 3,3 Gbit/s i 3,15 Gbit/s dla 50 m, odpowiednio dla PAM i CAP. Zaletą modulacji CAP jest odsunięcie widma sygnału od składowej stałej, która jest silnie tłumiona przez obwód elektryczny nadajnika (zachowanie takie jest typowe dla nadajników z automatyczną regulacją prądu lasera). Efekt nieprzeniesienia składowej stałej ma większe znaczenie dla kanałów o węższym paśmie, stąd wyższa przepływność CAP niż PAM dla 100 m. Modulacja DMT dała istotnie niższe przepływności od dwóch poprzednich: odpowiednio 1,65 i 2,65 Gbit/s dla 100 i 50 m i to nawet pomimo stosowania algorytmu optymalnego przydziału bitów na podnośną nakierowanego na uzyskanie jak największej przepływności dla zadanej stopy błędu (algorytm Chowa). O niższej efektywności modulacji DMT decydował współczynnik wartości mocy szczytowej do średniej (PAPR - ang. *peak to average power ratio*), który był dla niej o 2-3 dB wyższy niż dla pozostałych modulacji (zależnie od ich wartościowości).

Efektywności modulacji DMT w światłowodzie SI POF udało mi się poprawić w pracy [C7], wykonanej w ramach grantu [Pro12]. Motywacją do badań było spostrzeżenie, że odpowiedź impulsowa w posiadanym układzie transmisyjnym wykorzystującym laser oraz światłowód SI POF charakteryzowała się relatywnie długim postkursorem o niskiej amplitudzie. Podobne odpowiedzi były zresztą prezentowane w literaturze. Za zapobieganie interferencjom symbolowym w DMT odpowiada tzw. prefiks cykliczny, który powinien być co najmniej tak długi jak odpowiedź

impulsowa kanału. W przypadku kanału SI POF wydłużając prefiks ponad długość piku głównego obserwuje się bardzo niewielką poprawę jakości odbieranego sygnału, zaś w istotny sposób zmniejsza się wtedy przepływność. Dlatego w pracy [C7] zaproponowałem wykorzystanie korektora skracającego, tj. filtru w dziedzinie czasu, który powoduje, że odpowiedź kanału zostaje skrócona do kilku-kilkunastu próbek. Korektor taki nie wymusza całkowitego zniesienia interferencji międzysymbolowych, a jedynie ogranicza ich zasięg, a przez to powoduje tylko nieznaczne wzmocnienie szumu. Z literatury dotyczącej transmisji w kablach miedzianych znanych jest nawet kilkanaście metod obliczania współczynników takiego korektora. Moim wkładem w tę dziedzinę jest metoda, która wykorzystywała procedurę optymalizacyjną minimax. Metoda ta w bardzo prosty sposób pozwala dobierać kryteria korekcji: długość odpowiedzi po skróceniu, wzmocnienie szumu oraz daje możliwość przeciwdziałania występowania tzw. zer odpowiedzi po skróceniu. Metodę minimax porównałem z dwoma najlepszymi metodami literaturowymi (choć w artykule [C7] są wyniki tylko dla korektora filtrów własnych), osiągając lepsze bądź takie same wyniki. Eksperymentalnie, **przez zastosowanie korektora skracającego minimax, uzyskałem zwiększenie przepływności o 7,1 % oraz 9,5 %** odpowiednio dla światłowodu o długości 50 m i 100 m. Było to również prawdopodobnie pierwsze zastosowanie korektora skracającego w transmisji optycznej.

W pracy [C8], związanej z projektem [Pro10], zaproponowałem sposób na obniżenie kosztu pasywnej światłowodowej sieci dostępowej PON (ang. *passive optical network*) opartej o modulację OFDM i wielodostęp częstotliwościowy. W rozważanej sieci różne grupy podnośnych OFDM przydzielone były różnym węzłom końcowym sieci (z wielokrotnieniem podnośnych). Zaproponowany przeze mnie sposób opierał się na założeniu, że cena przetwornika A/C wzrasta liniowo z pasmem pracy. Stosując w stacjach odbiorczych (ONU - ang. *optical network unit*) heterodynę i filtr mikrofalowy, można zmniejszyć częstotliwość pracy przetwornika w stosunku 1:N, gdzie N jest podziałem sieci (lub liczbą ONU). **Pozwala to osiągnąć $N \times N$ - krotną redukcję kosztu sieci**, zakładając oczywiście, że główną składową kosztu ONU jest przetwornik. Jednocześnie taki zabieg w stacji OLT (ang. *optical line termination*) nie jest potrzebny, ponieważ stacja czołowa jest tylko jedna na całą sieć i jej koszt pokrywają wszyscy abonenci. W pracy podałem, jakie warunki muszą być spełnione, aby zaproponowany system mógł działać, jakie są ograniczenia przetwarzania sygnału oraz przeprowadziłem eksperyment, w którym zrealizowałem postulowany system oraz pokazałem wpływ zaproponowanej przemiany częstotliwości na jakość transmisji.

Korekcja sygnału wielowymiarowej modulacji CAP skłoniła mnie do zajęcia się również tematem korekcji przeniików w światłowodowych systemach MIMO (ang. *multiple input - multiple output*). Takie systemy demonstrowane były w światłowodach kilkumodowych przy wykorzystaniu detekcji koherentnej [Salsi]. Jednak detekcja koherentna ułatwia korekcję przeniiku ponieważ macierz MIMO jest w nich macierzą zespoloną i dobrze uwarunkowaną ze względu na wrażliwość na różnicę stałych fazowych poszczególnych modów. Macierz ta ma współczynniki o własnościach statystycznych radiowego kanału Rayleigha [Shah], gdzie systemy MIMO z powodzeniem wykorzystuje się od kilku lat. O stopniu uwarunkowania tej macierzy decyduje różnicowe tłumienie modów, które jest zwykle niewielkie. Z kolei w systemach niekoherentnych (z detekcją bezpośrednią) w światłowodach wielomodowych potrzebne jest bardzo selektywne pobudzenie modów na wejściu i układ do separacji modów na wyjściu. Niestety, chociaż w literaturze zaproponowano wiele rozwiązań takich układów, były one mało praktyczne i nie miały istotnych zalet w stosunku do systemów jednokanałowych. Przykładowo, w nadajniku wykorzystywano układy optyki w wolnej przestrzeni zaś w odbiorniku dokonywano filtracji optycznej modów, która wносиła znaczne straty mocy. W efekcie przykładowy system 2x2 z pracy [Schoelmann] wykorzystywał 2 wzmacniacze EDFA (ang. *erbium doped fiber amplifier*), a i tak nawet nie zademonstrowano jednoczesnej detekcji obu kanałów. Stosowane było

proste przetwarzanie sygnału w odbiorniku, które polegało na odwróceniu macierzy przeniku. Jednak ze względu na słabe uwarunkowanie mocowej macierzy przeniku, taka operacja istotnie wzmacniała szum w odbiorniku. Pewnym rozwiązaniem problemu złego uwarunkowania było nadawanie sygnału na częstotliwości radiowej [Stuart,Kowalczyk]. Ponieważ radiowa fala nośna na skutek opóźnienia modów w światłowodzie doznaje przesunięcia fazowego, macierz przeniku jest zespolona. Dzięki temu do sprzęgania i rozdzielania kanałów nie potrzeba dużej selektywności optyki, a zatem na wyjściu światłowodu można zastosować zwykły, wielomodowy sprzęgacz kierunkowy i proste przetwarzanie sygnału polegające na odwróceniu macierzy przeniku. Wadą jest to, że transmitowany sygnał powinien być wąskopasmowy, albowiem różne składowe widma sygnału doznają różnych opóźnień grupowych. W pracy [C9] zauważyłem, że tak jak przeniesienie sygnału na częstotliwość radiową poprawia uwarunkowanie macierzy MIMO, tak samo dywersyfikacja powinna zwiększyć się również przy większej szybkości modulacji sygnału dolnopasmowego. Zaproponowałem światłowodowy system MIMO 2 x 2 o prostej optyce (wielomodowy sprzęgacz kierunkowy jako multi- i demultiplekser). System ten cechował się szybkością modulacji znacznie przekraczającą 3 dB pasmo modowe światłowodu, co ułatwiało dywersyfikację przestrzenno-czasową. Negatywną konsekwencją dużej szybkości modulacji są silne interferencje międzysymbolowe, dlatego do ich korekcji zastosowałem macierzowy korektor DFE, który jednocześnie usuwał przenik międzykanałowy. Wykazałem, że system może działać nawet pomimo osłabionej mocowej macierzy MIMO, chociaż działa tym lepiej im większa jest dywersyfikacja odpowiedzi impulsowych (w systemie MIMO 2 x 2 są 4 odpowiedzi impulsowe). W części eksperymentalnej zbadałem jakość odbioru obu kanałów w zależności od szybkości transmisji. Potwierdziło to moją hipotezę - system działał gorzej dla niskich przepływności, a jakość transmisji ulegała poprawie przy zwiększeniu szybkości modulacji, oczywiście do wartości przy której większą rolę odgrywać zaczynały interferencje międzysymbolowe. Porównałem działanie systemu z systemem jednokanałowym przy tej samej mocy odbieranej w odbiorniku oraz pokazałem, że zmiany jakości transmisji w czasie są dość powolne (czas koherencji kanału wynosił około minuty). **Uzyskałem wartość przepływności [bit/s] ok. 90 razy większą niż wartość katalogowa pasma [Hz] światłowodu w którym prowadziłem transmisję, co uznać należy za bardzo dobry wynik.**

Obok transmisji światłowodowej, zajmowałem się również optyczną transmisją w wolnej przestrzeni w świetle widzialnym (VLC - ang. *visible light communications*), głównie w kontekście wykorzystania diod oświetleniowych jako nadajników sygnału Li-Fi (ang. *light fidelity* - optyczny odpowiednik bezprzewodowych sieci radiowych). Diody oświetleniowe stają się coraz bardziej popularnymi źródłami światła i wspierane przez urzędy regulacyjne, z powodzeniem wypierają żarówki, świetlówki czy halogeny. Oprócz oczywistych zalet w oświetleniu takich jak np. energooszczędność i długi czas życia, białe LEDy dają się przełączać znacznie szybciej niż inne źródła światła, co można wykorzystać do jednoczesnej transmisji informacji. W ten sposób mogą powstać optyczne piko-komórki, stanowiące uzupełnienie do coraz mniejszych komórek radiowych w sieciach 5G. Na świecie prowadzi się bardzo intensywne badania nad wykorzystaniem oświetleniowych LED do transmisji informacji. Są dwa typy białych LED. Pierwszym rodzajem są diody niebieskie pokryte fluorescencyjną warstwą fosforu, która zamienia część niebieskich fotonów na światło z zakresu 580-780 nm (żółte). Razem z niezmiennymi fotonami niebieskimi takie światło postrzegane jest przez człowieka jako białe. Drugim rodzajem białych diod są tak naprawdę trzy diody: czerwona, zielona i niebieska zintegrowane w jednym czipie. Diody z warstwą fosforową są znacznie tańsze i częściej spotykane i transmisją przy użyciu tych diod zajmowałem się właśnie w swojej pracy.

W publikacji [C10] zaproponowałem wykorzystanie korektora opartego na opisie Volterry systemów nieliniowych do korekcji nieliniowości fosforowej diody oświetleniowej. Była to praca

eksperymentalna. Badania wykonałem w łączy dioda nadawcza-fotodiody w bezpośredniej widzialności, przy standardowym natężeniu oświetlenia fotodiody. Jako przetwornik cyfrowo-analogowy wykorzystałem AWG, natomiast jako przetwornik analogowo-cyfrowy oscyloskop cyfrowy. Korektor Volterra umieszczony był w odbiorniku. Dodatkowo, aby lepiej przeciwdziałać ISI, korektor wykorzystywał decyzyjne sprzężenie zwrotne (Volterra-DFE). W tej pracy do obliczenia wag korektora wykorzystałem algorytm LMS (ang. *least mean square*). Silniejszy algorytm RLS (ang. *recursive least square*) zaimplementowałem później, a wyniki opublikowane zostały w pracy [StepniakMOTL2015]. Przy użyciu korektora Volterra uzyskałem bardzo dobre rezultaty dla modulacji PAM o wartościowości 2, 4 i 8, uzyskując ok. 5 dB zysku czułości odbiornika w stosunku do zwykłego korektora DFE. Zbadałem również wpływ wyższych rzędów nieliniowości, jednak okazało się, że największe znaczenie ma nieliniowość drugiego rzędu. Ponadto, nieliniowość dynamiczna była istotna, co widoczne jest w niezerowych współczynnikach jądra drugiego rzędu. Niezerowe współczynniki korektora wskazywały również, że dioda taka nie powinna być opisywana uproszczonymi modelami Wienara czy Hammersteina.

W pracy [C11] porównałem wydajność modulacji PAM, CAP oraz DMT w tym samym układzie eksperymentalnym co w [C10]. Tym razem nie użyłem korektora nieliniowego, ponieważ celem było porównanie odporności modulacji na efekty nieliniowe, a nie porównanie efektywności metod ich kompensacji. Przeprowadziłem transmisję dla przepływności 300 i 450 Mbit/s. W przypadku PAM i CAP wzięto pod uwagę modulacje dwu i czteropoziomowe, czyli PAM-2 i PAM-4 oraz CAP-4 i CAP-16. W przypadku modulacji DMT zastosowałem algorytm przydziału bitów i mocy na podnośne, który minimalizował stopę błędów dla zadanych przepływności (algorytm Fischera). W modulacjach CAP i PAM wykorzystałem korektory DFE w odbiorniku. Sygnały zostały unormowane w taki sposób, aby ich moce elektryczne były takie same. Aby zbadać wpływ nieliniowości diody oświetleniowej, moc sygnału modulującego diodę była zmieniana w zakresie do 22 dB. Uzyskano wyniki typowe dla systemów nieliniowych, tzn. dla niskich mocy sygnału nadawanego elementowa stopa błędów (BER - ang. *bit error rate*) była wysoka na skutek szumu. Przy wzroście mocy odbieranej BER malał, aż do poziomu mocy, dla której zaczynały mieć znaczenie zniekształcenia nieliniowe. Były one szczególnie silne zwłaszcza dla modulacji czteropoziomowych i DMT. Przy zwiększaniu mocy BER rósł z powodu tych zniekształceń. Najważniejszy wniosek, który wykazałem, to stwierdzenie przewagi modulacji dwupoziomowych, zwłaszcza PAM-2, nad modulacjami czteropoziomowymi oraz DMT. W pracy zamieściłem prosty analityczny model obliczenia produktów zniekształceń nieliniowych dla różnych modulacji i przeprowadzono obliczanie współczynnika SINR (stosunku mocy sygnału do interferencji), które potwierdziły wynik eksperymentu w kwestii odporności różnych modulacji na zniekształcenia nieliniowe.

Porównanie modulacji w łączy z diodą fosforową było również tematem mojej pracy o charakterze teoretycznym [C12]. Jednym z jej celów była odpowiedź na pytanie, czy filtr niebieski, umieszczony w odbiorniku w celu usunięcia światła generowanego w fosforze (sygnał generowany w fosforze ma znacznie większą stałą czasową i ogranicza pasmo łączy), poprawia przepustowość łączy, w którym stosowane są zaawansowane formaty modulacji takie jak PAM, CAP oraz DMT. Filtr niebieski stosuje się powszechnie w odbiornikach VLC pomimo tego, że z punktu widzenia teorii informacji, zmniejsza on (zamiast poprawiać) przepustowość łączy, powoduje bowiem zmniejszenie amplitudy odpowiedzi częstotliwościowej w zakresie niskich częstotliwości. Celem pracy [C12] było także stworzenie analitycznego modelu transmisji wymienionych formatów modulacji z wykorzystaniem fosforowej diody LED. Model transmisji sygnałów zaawansowanych formatów modulacji bazował na modelu analitycznym z wcześniejszej pracy poświęconej światłowodom POF [Randel], został jednak przeze mnie istotnie rozszerzony. Między innymi, **dodałem do niego modulację CAP, możliwość**

badania wpływu kształtowania widma sygnału nadawanego, obliczyłem analitycznie współczynnik PAPR modulacji CAP. Dodałem również analityczną analizę wpływu interferencji między symbolami i między nośnymi w modulacji DMT na skutek niewystarczającego prefiksu cyklicznego.

Do przeprowadzenia obliczeń konieczne było opracowanie analitycznego modelu fosforowej diody LED. Wspólnie ze współautorami z HfT w Lipsku zaproponowaliśmy prosty model takiej diody, oparty na dwóch systemach liniowych: systemie modelującym generację światła niebieskiego oraz systemie zamiany światła niebieskiego na żółte. Stworzony model miał 2 stałe czasowe oraz 2 amplitudowe. Stałe czasowe modelu zostały zmierzone dla typowej diody LED przez dofitowanie jej odpowiedzi częstotliwościowej, stosując zamiennie filtr niebieski oraz żółty w odbiorniku. Stałe amplitudowe wyznaczyłem analitycznie na podstawie znanych z kart katalogowych widm diody.

W pracy wyznaczyłem optymalne współczynniki kształtu filtru RRC dla modulacji PAM oraz CAP. Przeprowadzone przeze mnie obliczenia wskazują, że wpływ filtru niebieskiego na margines szumowy modulacji jest niewielki. W przypadku modulacji PAM-2 z korektorem DFE filtr pogarszał nawet margines szumowy o ok. 2 dB. Zasadna wydaje się zatem hipoteza, że filtr niebieski nie zwiększa przepustowości łącza, a nawet w niektórych przypadkach może ją zmniejszać. Jednak filtr ten stanowi prosty w realizacji korektor interferencji międzysymbolowych i pozwala znaczeni zmniejszyć nakłady obliczeniowe w odbiorniku. Ponadto, przypuszczalnie sygnał przenoszony w świetle żółtym jest bardziej podatny na nieliniowość, bowiem oprócz nieliniowości sygnału niebieskiego, który pompuje warstwę fosforową, następuje dodatkowa, podatna na nasycenie konwersja fotonów niebieskich na żółte. Porównanie modulacji na drodze analitycznej dało podobne rezultaty jak w pracy [C11], tj. modulacja PAM jest najwydajniejsza. CAP i DMT mają niższą efektywność, przy czym DMT przy większej przepływności ma większy margines szumowy niż CAP.

Ciekawym aspektem transmisji przy wykorzystaniu diod oświetleniowych jest również możliwość wykorzystania LED jako detektorów światła. Zaskakującą własnością diod LED jest to, że mogą one całkiem efektywnie zamieniać optyczny sygnał informacyjny na prąd. Do tej pory w literaturze brakowało jednak wielu istotnych informacji na temat wydajności LED jako odbiorników w zastosowaniach telekomunikacyjnych. W szczególności brakowało wiedzy na temat czułości diod LED jako fotodetektorów, ich pasma, oraz zależności obu tych wielkości od napięcia wstecznego. Ponadto w dotychczasowych eksperymentach transmisyjnych osiągnięto niewielkie przepływności - od kilku kbit/s do pojedynczych Mbit/s. Moim wkładem w badania nad fotodetekcyjnymi własnościami LED w telekomunikacji było napisanie odpowiednich kodów w języku Matlab do przeprowadzenia eksperymentu transmisyjnego nastawionego na osiągnięcie jak największej przepływności binarnej, a także wyodrębnienie do artykułu [C13] najciekawszych wyników eksperymentalnych, pokazujących zalety użycia LED jako fotodetektorów. Wykorzystując parę identycznych LED w nadajniku i odbiorniku udało się naszemu zespołowi odbierać sygnały telekomunikacyjne prostej modulacji OOK o szybkości ponad 100 Mbit/s [C13]. Istotnym wnioskiem z naszej pracy jest to, że chociaż napięcie wsteczne poprawia zarówno czułość diody LED jak i jej pasmo, to część diod pozwala odbierać sygnał o dużej przepływności również w trybie fotowoltaicznym, co znacznie upraszcza. Bez wątplenia LEDy są tańsze niż fotodiody, a rezultaty pracy wskazują na możliwość zastosowania LEDowych odbiorników do systemów o niewielkich przepływnościach (kilku-kilkunastu Mbit/s), np. w zabawkach, urządzeniach AGD, czy też w celu zapewnienie kanału zwrotnego w transmisji VLC.

Do najważniejszych swoich osiągnięć zaliczam:

- Opracowanie praktycznie bezstratnych, fazowych filtrów przestrzennych światła do pobudzenia pojedynczych modów światłowodów wielomodowych;
- Przeprowadzenie rekordowo szybkiej transmisji w światłowodzie SI POF, przy użyciu wielowartościowej modulacji CAP;
- Zbadanie efektywności 3-wymiarowej modulacji CAP;
- Przeprowadzenie transmisji MIMO dużej przepływności w światłowodzie wielomodowym ze wsparciem o dyspersję modową
- Opracowanie nowej metody obliczania współczynników korektora skracającego opartej na kryterium minimax i zastosowanie po raz pierwszy takiego korektora do transmisji DMT w POF
- Transmisję przy użyciu diody oświetleniowej z korekcją jej nieliniowej charakterystyki statycznej i dynamicznej;
- Opracowaniu modelu transmisji zaawansowanych formatów modulacji w łączy wykorzystującym fosforową diodę oświetleniową;
- Przeprowadzeniu rekordowo szybkiej transmisji sygnału z wykorzystaniem tej samej diody LED jako nadajnika i odbiornika światła

Literatura

[Goodman] Goodman, Joseph W. *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.

[Kowalczyk] M. Kowalczyk, J. Siuzdak, Four-channel incoherent mimo transmission over 4.4-km MM fiber, *Microw. Opt. Techn. Lett.* vol. 53, no. 502, 2011

[Raddatz] Raddatz, L., White, I. H., Cunningham, D. G., & Nowell, M. C. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 3, 1998

[Randel]] S. Randel, F. Breyer, S. Lee, and J. Walewski, “Advanced modulation schemes for short-range optical communications,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1280–1289, 2012.

[Remenyi] J. Remenyi, P. Varhegyi, L. Domjan, P. Koppa, and E. Lorincz, Amplitude, phase and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at 400 nm, *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 17, pp. 3428–3434, Jun. 2003.

[Salsi] Salsi, Massimiliano, et al. , Transmission at 2x100Gb/s, over two modes of 40km-long prototype few-mode fiber, using LCOS based mode multiplexer and demultiplexer. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2011.

[Schoellmann] S. Schoellmann, W. Rosenkranz, Experimental Equalization of Crosstalk in a 2 x 2 MIMO System Based on Mode Group Diversity Multiplexing in MMF Systems @ 10.7 Gb/s, *ECOC (European Conference on Optical Communications)*, 2007.

[Shah] A.R. Shah, R. C. J. Hsu, A. Tarighat, A. H. Sayed, B. Jalali, Coherent optical MIMO (COMIMO), *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 8, pp. 2410-2419, 2006

[Shalash] A. F. Shalash and K. K. Parhi, “Multidimensional carrierless AM/PM systems for digital subscriber loops,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 11, pp. 1655–1667, Nov. 1999.

[StepniakECOC] G. Stepniak, L. Maksymiuk, J. Siuzdak, Increasing multimode fiber transmission capacity by mode selective spatial light phase modulation, European Conference on Optical Communications (ECOC), Torino, September 2010, p6.04

[StepniakMOTL2015] G. Stepniak, L. Maksymiuk, J. Siuzdak, 1.1 Gbit/s white lighting LED based visible light link with pulse amplitude modulation and Volterra DFE equalization.

[Stuart] H. R. Stuart, Dispersive multiplexing in multimode optical fiber, Science 289, 281{283 (2000).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

5.1 Omówienie pozostałych osiągnięć publikacyjnych

Oprócz zagadnień omówionych w pkt. 4, po obronie pracy doktorskiej zajmowałem się jeszcze kilkoma innymi problemami z dziedziny transmisji optycznej. Były to następujące zagadnienia:

- Badanie mieszania modów i jego wpływu na charakterystykę przenoszenia światłowodów SI POF. Badania te prowadził prof. Savovic ze swoim zespołem. Moim wkładem było wykonanie pomiarów charakterystyk przenoszenia POF.

S. Savovic, B. Drljaca, M.S. Kovacevic, A. Djordjevich, J.S. Bajic, D.Z. Stupar, G. Stepniak, Frequency response and bandwidth in low-numerical aperture step-index plastic optical fibers, Applied Optics, vol. 53, no. 30, pp. 6999-7003, October 2014 (IF: 1.65)

Savovic, M. S. Kovacevic, A. Djordjevich, J. S. Bajic, D. Z. Stupar, G. Stepniak, Mode coupling in low NA plastic optical fibers, Optics and Laser Technology, vol. 60, pp. 85-89, 2014 (IF: 1.65)

- Badanie wpływu szumu OBI (ang. *optical beat interference*) na transmisję sygnałów RoF w światłowodach. W poniższej pracy wykazano, że wpływ tego szumu jest znacznie mniejszy w sieci PON opartej o światłowody wielomodowe.

J. Siuzdak, M. Kowalczyk, L. Maksymiuk, G. Stepniak, Substantial OBI noise reduction in MM fiber Network, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25, no. 14, pp. 1350-1353, July 2013 (IF: 2.2)

- Badanie niestabilności charakterystyki przenoszenia światłowodu wielomodowego poza pasmem podstawowym, spowodowanej szumem modowym.

J. Siuzdak, G. Stepniak, M. Kowalczyk, L. Maksymiuk, Instability of the Multimode Fiber Frequency Response beyond the Baseband for Coherent Sources, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, no. 14, pp. 993-995, July 2009 (IF: 2.2)

J. Siuzdak, L. Maksymiuk, G. Stepniak, M. Kowalczyk, On the Frequency Response of Multimode Fibers, IEEE WOCN 2009, April 28-30, Kair, Egipt, 2009

J. Siuzdak, M. Kowalczyk, L. Maksymiuk, G. Stępnia, Frequency response of multimode fibers Beyond the baseband: a systematic study, IEEE ECTI-CON 2009, Pattayta, Thailand

- Metodami estymacji odpowiedzi impulsowej i częstotliwościowej łącza transmisyjnego.

G. Stępnia, L. Maksymiuk, Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments. International Society for Optics and Photonics, 2014. p. 929008-929008-9.

G. Stępnia, Estymacja odpowiedzi impulsowej kanału transmisyjnego z wykorzystaniem cyfrowego przetwarzania sygnału, Przegląd Telekomunikacyjny, rocznik LXXXIV, nr 2-3, 2015, str. 45-49

- Wykorzystaniem metody minimax do znalezienia optymalnej struktury korektora modulacji CAP. Metoda minimax pozwala w prosty sposób, pisząc kilka linijek kodu w języku Matlab, testować różne konfiguracje korektora, testować sprzężenie zwrotne, prekodowanie, korekcje w strukturze filtru o nieskończonej odpowiedzi impulsowej.

G. Stępnia, Finding the best equalizer structure for carrierless amplitude-phase modulation using minimax criteria, In XXXVI Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments (Wilga 2015) (pp. 96621V-96621V). International Society for Optics and Photonics.

- Modelowaniem numerycznym parametrów światłowodów wielomodowych - opóźności grupowych modów, dyspersji profilowej, wzajemnej kompensacji dyspersji chromatycznej światłowodu przez modową, sprzężania z laserem VCSEL. W pracach wykazany został wpływ zaniedbania w metodzie WKB pochodnej współczynnika kształtu współczynnika profilu załamania światłowodu na obliczenie opóźności grupowych, który skutkuje nieakceptowalnie wysokim przesunięciem maksimum pasma światłowodu w dziedzinie długości fali (o ok. 100 nm).

L. Maksymiuk, G. Stępnia, On the precision of mode delays derivation with the use of the WKB method, Optical and Quantum Electronics, accepted

L. Maksymiuk, G. Stępnia, Precise numerical modeling of next generation multimode fiber based links, Konferencja Światłowody i Zastosowania, Naęczów, 2015

- Opracowałem metodę pomiaru rozkładu mocy modów w światłowodach wielomodowych. Metoda opierała się na algorytmie Gerchberg-Saxton, który w optyce wykorzystywany jest do obliczania transmitancji fazowej komputerowo generowanych hologramów. W proponowanej metodzie jednocześnie mierzony był rozkład natężenia światła w polu bliskim i dalekim światłowodu wielomodowego, a następnie iteracyjnie poszukiwany był rozkład fazy obu pól. Po zbiegnięciu algorytmu dokonywano dekompozycji rozkładu na poszczególne mody światłowodu, wyznaczając zarówno ich fazę jak i amplitudę.

G. Stępnia, In Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments (pp. 929007-929007). International Society for Optics and Photonics, 2014

G. Stępnia, Pomiar rozkładu mocy w modach światłowodu z wykorzystaniem algorytmu redukcji błędu, KSTiT, Warszawa 2012, PTiWT vol. 8-9, pp. 904-912, 2012

5.2 Podsumowanie tabelaryczne publikacji w czasopismach JCR

Czasopismo	IF	Liczba pozycji	Pierwszy autor wieloautorskich	Autorskie	Po doktoracie
Journal of Lightwave Technology	2,8	3	2	1	3
Optics Letters	3,2	1	0	1	1
IEEE Photonics Techn. Lett.	2,2	5	2	1	5
Applied Optics	1,65	1	0	0	1
Optics & Laser Technology	1,6	2	1	0	2
Optical Fiber Technology	1,2	1	1	0	1
Microwave and Opt. Techn. lett.	0,7	3	1	1	2
Optical & Quant. Electr.	0,9	4	3	0	1
Optica Applicata	0,3	3	2	0	1
IEEE Photonics Journal	2,3	1	1	0	1
Electronics Letters	0,93	1	1	0	1
Wartość sumaryczna	38,48	25	14	4	19

Po obronie pracy doktorskiej byłem również pierwszym autorem komunikatów na konferencjach ECOC (1 raz) i OFC/NFOEC (2 razy).

5.3 Udział w projektach

Pro1) Passive optical networks employing multimode fibers – grant France Telecom, okres: 2005-2007, wykonawca

Pro2) Opracowanie metody transmisji w światłowodzie wielomodowym z użyciem zwielokrotnienia grup modowych – grant MNiSzW, okres: 2006-2008, nr umowy 4152/T02/2006/30, nr projektu 3T11D 003 30, wykonawca

Pro3) Zastosowanie zwielokrotnienia grup modowych do transmisji danych w światłowodach wielomodowych – grant promotorski Dziekana WEiTI, 2009, wykonawca

Pro4) Zwiększenie przepustowości binarnej światłowodów wielomodowych poprzez zastosowanie zwielokrotnienia podnośnych – grant MNiSzW, okres 2007-2009, nr umowy 2993/T02/2006/31, nr projektu N517 020 31 2993, wykonawca

Pro5) Zastosowanie optycznej filtracji przestrzennej dla zwiększenia pasma przepustowego światłowodów wielomodowych – grant MNiSzW, okres: 2008 – 2010, nr umowy 4451/B/T02/2007/33, nr projektu N517 4451 33, główny wykonawca

Pro6) Zastosowanie techniki MIMO dla zwiększenia możliwości transmisyjnych światłowodów wielomodowych – grant MNiSzW, okres: 2009 – 2011, nr umowy 3887/B/T02/2009/36, nr projektu N N517 3887 36, wykonawca

Pro7) Zastosowanie uogólnionej modulacji CAP do bardzo szybkiej transmisji danych w światłowodach polimerowych o skokowym współczynniku refrakcji, okres: 2012 – 2015, grant NCN, nr umowy UMO-2011/01/B/ST7/02368, główny wykonawca

Pro8) Wykorzystanie algorytmu Gerchberg-Saxton do pomiaru rozkładu mocy w modach (grupach modowych) światłowodu wielomodowego, grant Dziekana WEiTI, 2011, **kierownik G. Stępnia**

Pro9) FBOSA, Filters and optical spectrum analyzer for access networks of the future, project ERA-NET w ramach inicjatywy pianoplus.eu, okres 2011-2013, wykonawca

Pro10) Światłowodowa sieć DD-OFDM-PON z wielodostępem na łączu w dół opartym o przemianę częstotliwości, grant Dziekana WEiTI, 2012, **kierownik G. Stępnia**

Pro11) Zwielokrotnienie MIMO w światłowodzie wielomodowym w oparciu o wykorzystanie dyspersji modowej światłowodu oraz korekcję cyfrową sygnałów, WEiTI, 2013, **kierownik G. Stępnia**

Pro12) Zastosowanie metody minimax do optymalizacji wag korektora cyfrowego sygnałów modulacji wielowymiarowych i zaawansowanych formatów modulacji, projekt MNiSZW **Iuventus Plus**, 2013-2014, **kierownik G. Stępnia**

Pro13) Zastosowanie zaawansowanych metod modulacji w szerokopasmowych optycznych sieciach bezprzewodowych wykorzystujących światło widzialne, 30.08.2012 - 29.08.2015, NCN, wykonawca

Pro 14) Wpływ filtru niebieskiego na transmisję w wolnej przestrzeni z wykorzystaniem diody oświetleniowej LED z warstwą fosforu, grant Dziekana WEiTI, 2014, **kierownik G. Stępnia**

Pro15) Badanie selektywnych modowo własności światłowodów wielomodowych, grant Dziekana WEiTI, 2015, **kierownik G. Stępnia**

5.3 Nagrody i wyróżnienia

- Stypendium konferencyjne Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej (FNP) na konferencję ECOC 2010 w Turynie
- Stypendium Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, 2010-2011
- Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej I stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2008-2009 (zespółowa)
- Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej I stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2010-2011 (zespółowa)
- Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej I stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2013-2014 (zespółowa)
- Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej I stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2013-2014 (**indywidualna**)
- Stypendium wyjazdowe przyznane przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, 2013
- **Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców, przyznane 9/2015 na 3 lata**

5.4 Działalność na rzecz środowiska naukowego

W latach 2010-2015 recenzowałem artykuły dla renomowanych czasopism naukowych.

Czasopismo	Liczba recenzowanych artykułów (nie licząc kolejnych recenzji tego samego artykułu)
<i>Optical Fiber Technology</i>	2
<i>Optics and Laser Technology</i>	5
<i>Optics Express</i>	8
<i>Optics Letters</i>	5
<i>IEEE Photonics Techn. Letters</i>	5
<i>Chinese Optics Letters</i>	3
<i>IET Optoelectronics</i>	1

<i>Optica Applicata</i>	1
<i>IET Communications</i>	1

5.5 Staże zagraniczne

W roku 2014 odbyłem 3-miesięczny staż na Uniwersytecie Nauk Stosowanych w Lipsku (HfT Leipzig).

