

Autoreferat

I. Imię i nazwisko

Paweł Grzegorz ROSA

II. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

01/04/2014 **Doktorat** na wydziale: School of Engineering and Applied Science, Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK,

Praca dyplomowa: *“Quasi-Lossless Data Transmission with Ultra Long Raman Fibre Laser Based Amplification”*

04/02/2014 Studium Kształcenia Pedagogicznego, „Research Skills and Professional Development,” Centre for Learning Innovation and Professional Practice, Aston University, Birmingham, UK

01/06/2010 **Licencjat** (Bachelor of Engineering in Communication Engineering), Wydział: School of Engineering and Applied Science, Aston University, Birmingham, UK

Praca dyplomowa: *“Cooperative Communications in Wireless Sensor Networks”*

-praca została wyróżniona nagrodą **H. E. Pulsford Memorial** za najlepszą pracę dyplomową w dyscyplinie inżynierii elektrycznej

III. Informacje o zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Od 07/2017 Marie Skłodowska-Curie fellow, stanowisko: Adiunkt, Instytut Łączności, Warszawa, Polska

12/2014 – 04/2017 Marie Skłodowska-Curie fellow, Instituto de Óptica, CSIC, Madryt, Hiszpania

04/2014 – 11/2014 Post-doc na AIPT (Aston Institute of Photonic Technologies), Aston University, Birmingham, UK

IV. 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. 2017 r. poz. 1789):

Podsumowanie dorobku:

<i>h</i>-index:	13
Sumaryczny IF:	45.258
Research Gate faktor:	21.57
Liczba publikacji w czasopismach:	14
Liczba publikacji konferencyjnych:	21
Liczba cytowań publikacji:	375
Udzielone wykłady oraz seminaria:	18

a. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym opracowanym po otrzymaniu stopnia naukowego doktora, stanowiącym znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej Nauk Technicznych w dziedzinie Telekomunikacji i zgłaszanym jako podstawę wniosku o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego, jest monotematyczny zestaw recenzowanych publikacji w czasopismach naukowych pod zbiorczym tytułem „**Optymizacja wysokoprzepustowej transmisji światłowodowej za pomocą nowatorskich wzmacniaczy ramanowskich wyższego rzędu**”. W dorobku objętym wnioskiem habilitacyjnym znajdują się prace na temat innowacyjnych technik wzmacniania sygnału w sieciach optycznych wspomagających eliminację szumów liniowych ASE (amplified spontaneous emission) i RIN (relative intensity noise) oraz nieliniowych wykorzystując technologię obróbki cyfrowej sygnału (DSP), cyfrowej propagacji wstecznej (DBP -digital backpropagation) i koniugacji fazy optycznej (OPC -optical phase conjugation).

Badania eksperymentalne, jak również teoretyczne w postaci modeli numerycznych z inicjatywy habilitanta powstały w międzynarodowym środowisku:

1. AIPT Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK
2. IO-CSIC Instituto de Optica, CSIC, Madryt, Hiszpania
3. KTH Royal Institute of Technology, Sztokholm, Szwecja
4. UCL University College London, Londyn, UK
5. ITL Instytut Łączności, Warszawa, Polska

b. Wyselekcjonowane publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

1. **P. Rosa**, J. D. Ania-Castañón and P. Harper "Unrepeated DPSK transmission over 360 km of SMF28 fibre using URFL based amplification," Opt. Express, 22(8), (2014)

IF: 3.356 | h5-index: 103 | MNiSW: 40 PUNKTÓW

Stymulowane rozpraszanie ramanowskie SRS (stimulated Raman scattering) jest procesem nieliniowym, które może być stosowane we wzmacnieniu optycznym. W połączeniach długodystansowych oraz dalekosiężnych rozłożone wzmacnienie ramanowskie DRA (distributed Raman amplifier) zapobiega tłumieniu sygnału poprzez rozłożenie wzmacnienia na całej długości światłowodu. W szczególności, wzmacnienie ramanowskie wyższego rzędu może zmniejszyć wahania efektywnego współczynnika tłumienności światłowodu. Prowadzi to do zmniejszenia szumów (NF -noise figure) i poprawia OSNR (optical signal-to-noise ratio), co jest kluczowe w systemach transmisji długodystansowych z zaawansowanymi formatami modulacji. Wzmacnienie ultra-długiego lasera ramanowskiego (URFL -ultra-long Raman fibre laser), polegające na schemacie wykorzystującym siatkę Bragga (FBG -fibre Bragg grating) w celu utworzenia lasera w światłowodzie transmisyjnym, umożliwia uzyskanie wzmacnienia Ramanowskiego drugiego rzędu przy pojedynczej długości fali pompy, zmniejszając niniejszym wahania mocy sygnału. Może to być wykorzystane do utworzenia wirtualnie bezstratnego linku optycznego, zbliżonego do optymalnego przypadku dla wydajności transmisji i oferuje doskonałą równowagę między efektami nieliniowymi i zakłóceniami szumem. W przeciwieństwie do konwencjonalnego wzmacnienia ramanowskiego drugiego rzędu, w URFL profil wzmacnienia widmowego może być modyfikowany, a nawet ulepszony, bez potrzeby stosowania dodatkowych źródeł pompowania, po prostu wybierając odpowiednie FBG. W tym artykule badamy OSNR, wzmacnienie *on-off* i wydajność transmisji RZ-DPSK w dalekosiężnych transmisjach do 360 km, wykorzystując wzmacnienie oparte na URFL.

Zastosowanie: Uzyskane wyniki charakteryzują się doskonałą wydajnością szumu na dużych odległościach. Wykorzystując tę konfigurację, pokazano transmisję kanałów RZ-DPSK 42,7 Gb/s z bezpośrednią detekcją do 360 km w standardowym światłowodzie SMF-28. Według naszej wiedzy **jest to największa odległość, jaką kiedykolwiek osiągnięto w przypadku dalekosiężnej transmisji z bezpośrednią detekcją** bez stosowania zdalnie pompowanych włókien domieszkowanych (ROPA) lub specjalnych światłowodów nisko tłumiennych. Wyniki potwierdzają, że wzmacnianie oparte na URFL przy pojedynczej długości fali pompy jest wysoce kompatybilne z obecnie stosowanym światłowodem SMF-28 i może być wykorzystane do uaktualnienia już istniejących połączeń.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu doświadczenia dalekosiężnej transmisji wykorzystując detekcję bezpośrednią RZ-DPSK używając nowatorskiego wzmacniacza ramanowskiego URLF, wykonaniu doświadczeń polegających na aranżacji linku, nadajnika oraz odbiornika, interpretacji wyników badań oraz napisaniu wstępnej wersji manuskryptu.

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

2. **P. Rosa**, M. Tan, S. T. Le, I. D. Philips, J. D. Ania-Castañón, S. Sygletos, and P. Harper “Unrepeated DP-QPSK transmission over 352.8 km SMF using random DFB fibre laser amplification”, IEEE Photonics Technology Letters, 27(11), (2015)

IF: 2.446 | MNiSW: 30 PUNKTÓW

W dalekosiężnych transmisjach wielofalowych WDM (wave division multiplexing) rozproszone wzmocnienie ramanowskie zapewnia dobrą wydajność szumu i może być wykorzystane do optymalizacji wahań mocy sygnału na całej długości światłowodu transmisyjnego. Schemat wzmocnienia wykorzystujący siatki Bragga (FBG) do utworzenia lasera *random distributed feedback* (DFB) na początku i na końcu światłowodu może zwiększyć margines łącza. Detekcja koherentna w odbiorniku zapewnia poprawę czułości odbiornika o 3 dB i umożliwia kompensację szumów liniowych do arbitralnie wysokiego stopnia dzięki cyfrowej obróbce sygnału (DSP - digital signal processing). Dodatkowe zwiększenie wydajności spektralnej dzięki multipleksacji polaryzacyjnej sprawia, że modulacja QPSK (DP-QPSK) o podwójnej polaryzacji jest wiodącym wyborem formatu dla sieci optycznych o przepustowości 100 Gb/s i wyższej.

W tej publikacji badamy wydajność dwukierunkowo pompowanego wzmocnienia Ramanowskiego drugiego rzędu wraz z koherentnym sygnałem DP-QPSK w dalekosiężnej transmisji do 352,8 km standardowego światłowodu jednomodowego SMF-28 bez potrzeby kompensacji dyspersji, zdalnych wzmacniaczy optycznych (ROPA) czy specjalnych światłowodów o bardzo niskiej tłumienności. Eksperymentalnie wykazano dalekosiężną transmisję o przepustowości 2,2 Tb/s na dystansie 327,6 km oraz 1,4 Tb/s na dystansie 352,8 km. Zgodnie z naszą wiedzą **jest to najwyższa wydajność uzyskana w transmisji dalekosiężnej SMF-28 na tej odległości bez stosowania ROPA, modułów dyspersji lub specjalnych włókien.**

Zastosowanie: Ramanowskie wzmocnienie na bazie lasera DFB (distributed feedback) przy pojedynczej długości fali pompy jest kompatybilne z bezpośrednią detekcją jak i zaawansowaną modulacją koherentną, co oznacza, że proponowana przez nas konfiguracja, podobnie jak w poprzedniej publikacji może być łatwo wykorzystana do uaktualnienia istniejących zainstalowanych standardowych łączy światłowodowych SMF-28.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu doświadczenia dalekosiężnej transmisji wykorzystując koherentną detekcję DP-QPSK używając nowatorskiego wzmacniacza ramanowskiego randomDFB, wykonaniu doświadczeń polegających na aranżacji linku, nadajnika oraz odbiornika, interpretacji wyników badań oraz napisaniu wstępnej wersji manuskryptu.

Mój udział procentowy szacuję na 70%.

3. M. Tan, P. Rosa, S. T. Le, I. D. Phillips, and P. Harper "Evaluation of 100G DP-QPSK long-haul transmission performance using second order co-pumped Raman laser based amplification" OSA Opt. Express, 23(17), 2015

IF: 3.356 | h5-index: 103 | MNiSW: 40 PUNKTÓW

W tej publikacji, **po raz pierwszy, przedstawiamy szczegółowe badanie wpływu propagacji pompowania Ramana drugiego rzędu współbieżnego z kierunkiem sygnału na koherentną transmisję długodystansową 100 Gb/s WDM DP-QPSK do 7082 km przy użyciu konfiguracji opartych na laserze Ramana.** Moc sygnału i rozkłady szumów wzdłuż światłowodu dla każdego schematu pompowania scharakteryzowano zarówno numerycznie, jak i eksperymentalnie. Przedstawione schematy pompowania zostały porównane przy użyciu współczynnika Q w stosunku do współczynników mocy pompy. Znaczną degradację współczynnika Q wynoszącą do 4,15 dB zaobserwowano po dystansie 1666 km przy zastosowaniu symetrycznego pompowania dwubieżnego, w porównaniu z pompowaniem przeciwbieżnym, czyli w kierunku przeciwnym do kierunku sygnału. Nasze wyniki pokazują, że chociaż stosowanie pompowania współbieżnego (z kierunkiem sygnału) minimalizuje wahanie mocy sygnału w światłowodzie oraz kumulację szumu, degradacja współczynnika Q z wykorzystaniem przedniej pompy była zbyt duża, aby można było zaobserwować jakąkolwiek przewagę. Scharakteryzowaliśmy wpływy szumu względnej intensywności (RIN - relative intensity noise) lasera światłowodowego (wykorzystywanego jako pompa Ramana), sygnału wyjściowego oraz widma RF wewnątrz światłowodu. Stwierdzamy, iż degradacja współczynnika Q jest spowodowana szumami RIN, czyli z powodu przeniesienia RIN współbieżnego lasera światłowodowego pierwszego i drugo rzędu (czyli pompy) do sygnału.

Wyniki: W oparciu o koherentną transmisję długodystansową 100Gb/s DP-QPSK WDM z wykorzystaniem schematu wzmacniania opartego na RFL (Raman fibre laser), przeprowadziliśmy eksperymentalną ocenę wpływu na wydajność transmisji przy różnej propagowanej mocy pompy drugiego rzędu, od pompowania przeciwbieżnego tylko do symetrycznego pompowania dwukierunkowego (przednia i tylna pompa o tej samej mocy). Wykorzystując wyniki eksperymentalne i symulacyjne, analizowano zależność między zmiennością mocy sygnału a współczynnikiem Q, biorąc pod uwagę sytuację gdzie głównym czynnikiem degradacji był RIN (relative intensity noise) spowodowany przednią pompą oraz ASE.

Wniosek: Kolejne badania były potrzebne do wynalezienia skutecznych metod wzmocnienia sygnału dla transmisji długodystansowej z wykorzystaniem współbieżnego wzmacniania ramanowskiego.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na pomocy w zaplanowaniu doświadczenia dalekodystansowej transmisji wykorzystując koherentną detekcję DP-DQSK używając nowatorskiego wzmacniacza ramanowskiego URFL, wykonanie numerycznych symulacji, pomocy przy wykonaniu doświadczeń polegających na aranżacji linku, nadajnika oraz odbiornika, interpretacji wyników i korekcją wstępnej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

4. **P. Rosa**, G. Rizzelli, M. Tan, P. Harper, and J. D. Ania-Castañón "Characterisation of random DFB Raman laser amplifier for WDM transmission", Opt. Express, 23(22), (2015)

IF: 3.356 | h5-index: 103 | MNiSW: 40 PUNKTÓW

W niniejszej publikacji przedstawiamy nowatorski schemat wzmocnienia wykorzystujący pojedynczą siatkę Bragga (FBG) na końcu światłowodu, tworząc otwartą wnękę laserową (DFB) co umożliwi formowanie pompowania dwubieźnego, które znacznie zmniejsza wzrost szumu spontanicznej emisji (ASE) oraz, co ważniejsze, nie wykazuje podwyższonego współczynnika RIN z współbieżnej pompy, stając się tym samym wydajnym rozwiązaniem umożliwiającym wydłużenie odległości transmisji dla koherentnych formatów modulacji optycznej. Tutaj publikujemy również model numeryczny oraz przeprowadzamy pełną charakteryzację numeryczną różnych schematów ramanowskich wzmacniaczy laserowych DFB do transmisji WDM w zakresie zmienności mocy sygnału, szumu i nieliniowych zakłóceń, **pokazując doskonały potencjał schematu random DFB do zapewnienia wzmocnienia dla transmisji DWDM z jak najlepszą wydajnością, wykorzystując dwubieżne pompy Ramana, bez wyraźnej degradacji RIN spowodowanej przednią pompą, co stanowi rozwiązanie dylematu wspomnianego w poprzedniej publikacji.**

Wyniki: Wydajność przedstawionego schematu wzmacniacza laserowego random DFB bez siatki Bragg (FBG) po stronie nadajnika **w celu zmniejszenia transferu RIN została po raz pierwszy zbadana numerycznie dla transmisji DWDM.** Stosunek sygnału optycznego do szumu (OSNR), nieliniowe przesunięcie fazowe, wahania mocy sygnału, wpływ współczynnika odbicia FBG i wyczerpania pompy zostały zbadane w standardowym światłowodzie jedno-modowym na odległościach od 10 do 120 km. Wyniki pokazują prostotę stosowania siatek Bragga (FBG) o wysokim współczynniku odbicia w tego rodzaju układach wzmacniających, aby zmaksymalizować wydajność bez negatywnego wpływu na jakość transmisji. Zastosowanie wysokich współczynników mocy przedniej pompy wyraźnie poprawia OSNR przy długościach powyżej 30 km, ale optymalna zmienność mocy sygnału jest zoptymalizowana dla mocy przedniej pompy nieco poniżej 1,5 W, co może skutkować bardziej dogodną równowagą między szumem i nieliniowościami dla systemów nie ograniczonych przez ASE. Wyniki pokazują doskonałą przepustowość transmisji DWDM z równomierną dystrybucją wzmocnienia w symulowanym paśmie (1535 – 1555 nm) z wahaniami mocy sygnału mniejszym niż 0,2 dB. System może być dalej optymalizowany poprzez wybranie różnych długości fali FBG, które zmieniłyby ogólne widmo wzmocnienia lub zastosowanie innych kryteriów optymalizacji niż zaimplementowane w tym dokumencie (zysk netto 0 dB dla kanału centralnego).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaprojektowaniu modelu numerycznego którego symulacje są zgodne z eksperymentalnymi wynikami (pub. 1-3) optycznej transmisji danych wykorzystując nowatorski wzmacniacz ramanowski randomDFB, wykonaniu doświadczeń polegających na symulacji zachowania oraz charakteryzacji wzmacniacza na różnych długościach światłowodu, interpretacji wyników badań oraz napisaniu wstępnej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

5. **P. Rosa, S. T. Lee, G. Rizzelli, M. Tan, and J. D. Ania-Castañón** "Signal power asymmetry optimisation for optical phase conjugation using Raman amplification", *Opt. Express*, 23(25), (2015)

IF: 3.356 | h5-index: 103 | MNiSW: 40 PUNKTÓW

Wykorzystując potwierdzony model numeryczny z poprzednich publikacji, prezentujemy inwestycję optymalnej konfiguracji dla optycznej koniugacji fazowej OPC (optical phase conjugation), w której rozważamy trzy różne dwubieźne schematy wzmacniania ramanowskiego. W każdej konfiguracji symulowano wahania mocy sygnału dla różnych współczynników mocy pompy i długości światłowodu przy użyciu modelu zweryfikowanego eksperymentalnie z wynikami laboratoryjnymi, biorąc pod uwagę odpowiednie warunki brzegowe (boundary conditions). W tej publikacji wykazujemy, że prawie idealnie symetryczna ewolucja mocy sygnału może być osiągnięta w zaawansowanych schematach rozproszonego wzmocnienia, z najlepszymi wynikami uzyskanymi dla wzmacniacza ramanowskiego random DFB drugiego rzędu pompowanym dwubieźnie. Taka konfiguracja pozwala potencjalnie zmniejszyć asymetrię ewolucji mocy sygnału wewnątrz światłowodu w stosunku do punktu środkowego do zaledwie 3% w realistycznej długości światłowodu 62 km, **co stanowi do dnia dzisiejszego najniższy poziom asymetrii osiągnięty na tak długim odcinku**. Ponadto, aby zbadać najlepszą praktyczną konstrukcję łącza opartą na wzmacniaczach ramanowskich oraz wpływ zmniejszonej asymetrii mocy sygnału, rozważamy symulowaną transmisję 7×15 Gbaud-16QAM Nyquist WDM z OPC przy użyciu wzmacniacza laserowego Ramana random DFB oraz numerycznie wykazujemy zależność wydajności systemu od poziomu asymetrii mocy sygnału. Optymalna wydajność transmisji została uzyskana przy stosunku przedniej oraz tylnej mocy pompy zbliżonej do 1, co łączy najniższy poziom asymetrii z niskimi zakłóceniami.

Zastosowanie: Pokazaliśmy, że wzmacniacz laserowy random DFB jest najbardziej odpowiednim rozwiązaniem dla systemów WDM ze wspomaganiami OPC wykorzystujących długości światłowodu między 60 a 100 km. **Dzięki symulacjom zweryfikowaliśmy, wykorzystując sygnały WDM (7×15 16QAM Nyquist), że minimalizacja asymetrii poniżej 3% w zakresie 62 km prowadzi do znacznie lepszej wydajności transmisji, poprawiając współczynnik Q aż o 5 dB.**

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na rozwinięciu opublikowanego wcześniej modelu numerycznego (pub. 4) w celu uzyskania nowatorskich wyników określających maksymalną symetrię rozkładu mocy sygnału porównując różne prototypy wzmacniaczy ramanowskich które potwierdziły się najlepiej w wykorzystaniu technologii optycznie eliminującej szumy nieliniowe w czasie rzeczywistym (optical phase conjugation - OPC), interpretacji wyników badań oraz napisaniu wstępnej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

6. **P. Rosa, G. Rizzelli, and J. D. Ania-Castañón** "Link Optimisation for DWDM Transmission with an Optical Phase Conjugation" *Opt. Express*, 24(15), (2016)

IF: 3.356 | h5-index: 103 | MNiSW: 40 PUNKTÓW

Stopień kompensacji nieliniowej przy użyciu OPC zależy od dopasowania symetrii ewolucji mocy sprzężonego i transmitowanego sygnału w łączy światłowodowym. Znacząca poprawa symetrii mocy sygnału w standardowych światłowodach SMF-28 została wykazana w łączach optycznych wykorzystując wzmacnienie opartym na wzmacnianiu ramanowskim, z dodatkową zaletą lepszej wydajności szumu. Zwiększenie wydajności w systemach z OPC przy zachowaniu okresowej struktury światłowodu polega na zmniejszeniu asymetrii mocy sygnału na indywidualnym odcinku, przy jednoczesnym zapewnieniu niskiego wpływu szumów i niedeterministycznych nieliniowych zakłóceń w ogólnym łączy optycznym. Podejście to zakłada, że ewolucja sygnału wewnątrz światłowodu jest taka sama przed i po koniugacji, co będzie ważne tylko dla małych przesunięć częstotliwości sprzężonego sygnału. W poprzedniej publikacji wykazano, że nowatorski wzmacniacz laserowy Ramana random DFB z dwubieżnym pompowaniem drugiego rzędu może zmniejszyć asymetrię rozpiętości w odniesieniu do jej punktu środkowego i pokazuje najwyższy poziom symetrii osiągniętej do dnia dzisiejszego.

Tutaj, w celu zbadania najlepszego praktycznego projektu łączy opartego na ramanowskim wzmacniaczu dla OPC, **po raz pierwszy bierzemy pod uwagę potencjalny wpływ przesunięcia częstotliwości sprzężonego sygnału na asymetrię między kanałami przesyłanymi i sprzężonymi w transmisji WDM**, biorąc pod uwagę 5 różnych sekcji częstotliwości w paśmie C (192 - 195,775 THz). Każda sekcja składa się z dwóch siatek WDM (oryginalnych i sprzężonych) 20 kanałów z odstępem 25 GHz, które są symulowane niezależnie. Pokazujemy również zmienność asymetrii pojedynczego kanału transmisyjnego spowodowanej różną tłumiennością oraz współczynnikiem wzmacnienia Ramanowskiego na różnych częstotliwościach pasma oraz długościach światłowodu.

Wyniki: Po raz pierwszy oceniliśmy asymetrię mocy sygnału między kanałami przesyłanymi i sprzężonymi w transmisji WDM w systemach ze wzmacnieniem ramanowskim i OPC. Pokazaliśmy, że dla wybranych typowych charakterystyk OPC opartych na światłowodach i 20-kanałowej siatki o odstępem 25 GHz, długość odcinka światłowodu 56 km daje najbardziej odpowiednie rozwiązanie, zapewniając najlepszą wydajność asymetrii, z wartościami poniżej 3% w większości pasma C. Jeśli chodzi o optymalną lokalizację kanału, okno spektralne zaczynające się od 193,5 THz zapewnia najlepszą możliwą wydajność dla wszystkich badanych długości rozpiętości.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dalszym rozwinięciu opublikowanego wcześniej modelu numerycznego (pub. 4-5) w celu uzyskania nowatorskich wyników określających maksymalną symetrię rozkładu mocy sygnału na całym paśmie optycznego spektrum C z wykorzystaniem DWDM, interpretacji wyników badań oraz napisaniu wstępnej wersji manuskryptu.

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

7. G. Rizzelli, **P. Rosa**, P. Corredera, and J. D. Ania-Castañón “Transmission span optimization in fiber systems with cavity and random distributed feedback ultralong Raman laser amplification,” IEEE Journal of Lightwave Technology, 35(22), (2017)

IF: 3.652 | MNiSW: 35 PUNKTÓW

Optymalna konstrukcja komórki światłowodowej ze wzmocnieniem ramanowskim zależy silnie od ograniczeń określonych przez ogólne wymagania systemowe. Najlepszy możliwy kompromis pod względem opłacalności, nieliniowości, wydajności pompowania, optycznego stosunku sygnału do szumu (OSNR) i tolerancji na przenoszenie szumów o względnej intensywności zależy od charakterystyki, takiej jak całkowita długość transmisji lub wymagania dotyczące budżetu mocy. **Tutaj przeprowadzamy dogłębne eksperymentalne i teoretyczne badania najlepszych konfiguracji dla wzmacniania ramanowskiego drugiego rzędu w szerokim zakresie zastosowań**, o rozpiętościach światłowodu od 10 do 150 km. Wyniki podkreślają obecność różnych systemów, w których dominują różne wkłady w szum. Stwierdziliśmy, że ogniwa laserowe URFL z wysoką mocą przedniej pompy mają być preferowane w dalekosiężnych aplikacjach transmisyjnych, podczas gdy w długodystansowej transmisji krótsza komórka oparta na schemacie ramanowskim random DFB może być lepszą opcją, ponieważ charakteryzuje się niskim transferem szumu RIN z pompy do sygnału oraz wyższą wydajnością OSNR.

Wyniki: Nasze odkrycia oferują wgląd w **optymalną konfigurację wzmacniaczy laserowych drugiego rzędu opartych na siatkach Bragga (URFL, random DFB) pokazując najlepsze opcje, aby w pełni wykorzystać zalety wzmacniania ramanowskiego bez ponoszenia potencjalnie destrukcyjnych efektów dla łączy dalekosiężnych oraz długodystansowych**. Stwierdzamy, że architektura random DFB może oferować korzyści zarówno pod względem OSNR, jak i tolerancji transferu RIN, dla długości łącza światłowodowego krótszego niż 100 km, czyli przy transmisji długodystansowej. Specyficzny przypadek transmisji dalekosiężnej z kolei wymaga, aby komórka była jak najdłuższa. Dlatego należy zachować dodatkową ostrożność, ponieważ konfiguracje, które maksymalizują OSNR, wymagają zwiększonego współczynnika odbicia FBG i wysokiej mocy przedniej pompy co powoduje najwyższy transfer RIN z pompy do sygnału. W tym scenariuszu dokładny wybór parametrów może przyczynić się do poprawy wydajności i skuteczności wcześniej prezentowanych systemów. Nasze obecne wyniki w pełni potwierdzają wnioski dotyczące transferu RIN i rozszerzają je na inne konfiguracje łączy światłowodowych analizowane w niniejszym manuskrypcie, pokazując różne optymalne warunki operacyjne w zależności od preferowanej długości zakresu.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na projektowaniu oraz nadzorowaniu prac laboratoryjnych, interpretacji wyników badań i korekcją wstępnej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

c. **Omówienie celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

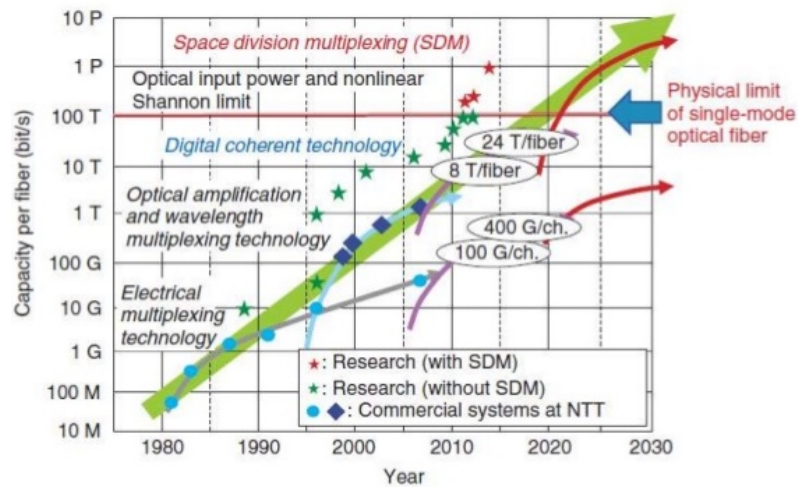


Fig 1. Advances in optical communication (Ref. 2)

W ciągu ostatnich 30 lat komunikacja światłowodowa zapowiadała rewolucję w szybkiej transmisji informacji na całym świecie, w doskonałej synergii z pojawieniem się zmieniających świat koncepcji, takich jak WWW, transmisja i przetwarzanie bazy danych, konferencje wideo lub rozrywka TV w wysokiej rozdzielczości. Zdolność światłowodowych systemów komunikacyjnych przez lata stale i szybko rosta, dostosowując się do rosnących wymagań społeczeństwa. W ostatnich latach pojawiły się obawy dotyczące teoretycznych ograniczeń wydajności dla technologii światłowodowej i zaproponowano kilka metod pokonania bariery, jaką stanowi nieliniowy limit Shannona^{1,2}. Wykładniczy wzrost ruchu danych w ciągu ostatnich dziesięcioleci przyczynił się do rozwoju technologii transmisji optycznej zwiększających przepustowość linków światłowodowych. Obecna architektura sieci optycznych opartych na wzmacniaczach EDFA³, stanowiących ponad 90% wszystkich wzmacniaczy wykorzystywanych komercyjnie, niestety nie będzie w stanie obsłużyć formatów modulacji wysokiego poziomu wymagających minimalizacji szumów ASE aby sprostać wymaganiom wydajności w światłowodach jedno-modowych SMF-28.

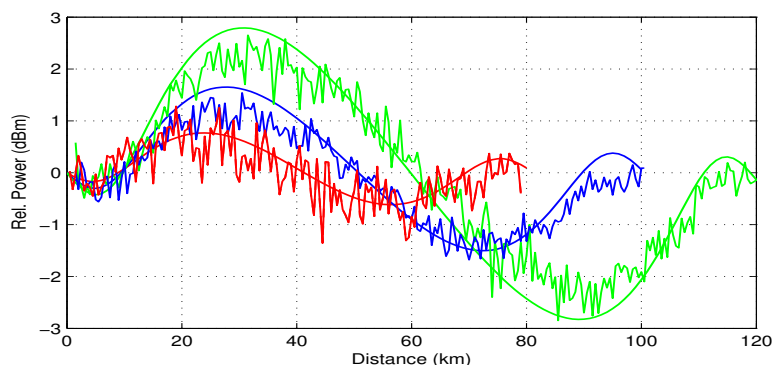


Fig. 2 Dystrybucja mocy sygnału w linkach wzmacnianych metodą URFL (ref. 5)

¹ R. J. Essiambre et al. "Capacity Limits of Optical Fiber Networks " J. Lightwave Tech. 28(4), (2010)

² A. D. Ellis et al. "Approaching the Non-Linear Shannon Limit" J. Lightw. Technol., 28(4) (2010)

³ J. Zyskind et al. Optically Amplified WDM Networks, Ch. 10. Academic Press, (2010)

Niskoszumowe wzmocnienie Ramana jest obiecującą alternatywą, która może pokonać ograniczenia wyznaczone przez EDFA i zaspokoić zapotrzebowanie na pasmo. Nowatorski schemat wzmacniaczy wykorzystujący światłowodową siatkę Bragga (FBG -fibre Bragg grating) w celu utworzenia bardzo długiego lasera światłowodowego Ramana (URFL -ultra long Raman fibre laser)^{4,5} wzdłuż światłowodu transmisyjnego umożliwia osiągnięcie wzmocnienia ramanowskiego drugiego rzędu z wykorzystaniem wyłącznie pojedynczej fali pompy wzmacniacza laserowego. W przeciwieństwie do konwencjonalnego wzmocnienia ramanowskiego drugiego rzędu gdzie wykorzystywane są dwie pompy o różnych długościach fali, w URFL profil wzmocnienia może być modyfikowany i w rzeczywistości uwydatniany przez wybór odpowiednich FBG⁶. Ta unikalna metoda wzmocnienia minimalizuje efektywny współczynnik tłumienności utrzymując stałą moc sygnału wzdłuż światłowodu (co zostało zilustrowane na Fig. 2), tworząc wirtualnie bezstratny nośnik transmisji. Bezstratna transmisja niekoniecznie jest optymalnym rozwiązaniem dla każdej sytuacji, ponieważ może prowadzić do silnych nieliniowych efektów przy względnie niskich mocach sygnału transmisyjnego, ale mimo to stanowi długoterminowy cel komunikacji optycznej, ponieważ przyniosłoby to zminimalizowanie narastania szumu wzmocnionej spontanicznej emisji ASE (amplified spontaneous emission). Rzeczywiście, jeśli te przypadki, w których ASE można uznać za jedyny znaczący wkład w szumy, podstawowy limit dla optycznego stosunku sygnału do szumu OSNR (optical signal to noise ratio) a uśrednioną mocą sygnału wzdłuż linii światłowodu, jest zminimalizowana. Podejście URFL zostało z powodzeniem wykazane, osiągając rekordowe odległości w transmisjach dalekosiężnych bez użycia ROPA (remote optical pumping amplifier) lub specjalnych światłowodów nisko tłumieniowych^{7,8,9,10,11,12,13}.

⁴ J. D. Ania-Castañón "Quasi-lossless transmission using second-order Raman amplification and fibre Bragg gratings" *Opt. Express*, 12(19), (2004)

⁵ P. Rosa et al. "Characterisation of random DFB Raman laser amplifier for WDM transmission," *Opt. Express*, 23(22), (2015)

⁶ M. Alcon-Camas et al. "Gain Bandwidth Optimisation and Enhancement in URFL based Amplifiers." in *Proc. ECOC'10*, P1.17:1-3, (2010)

⁷ P. Rosa et al. "Unrepeated 64QAM over SMF-28 using Raman Amplification and Digital Backpropagation," in *Proc. ACP, China*, (2017)

⁸ P. Rosa et al. "Unrepeated DP-QPSK transmission over 352.8 km SMF using random DFB fibre laser amplification", *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(11), (2015)

⁹ L. Galdino, M. Tan, D. Lavery, P. Rosa, R. Maher, I. D. Phillips, J. D. Ania-Castañón, P. Harper, R. I. Killey, B. C. Thomsen, S. Makovejs and P. Bayvel "Unrepeated Nyquist PDM-16QAM Transmission over 364 km using Raman Amplification and Multi-Channel DBP" *OSA Opt. Letters*, 14(13), 2015

¹⁰ P. Rosa et al. "Unrepeated DP-QPSK transmission over 350 km standard fibre using URFL based amplification" in *Proc. ACP, China*, (2014)

¹¹ P. Rosa et al. "Nyquist-WDM PDM-QPSK Transmission over SMF-28 Fibre Using URFL based Amplification" in *Proc. ICTON, Austria*, (2014)

¹² P. Rosa et al. "Unrepeated DPSK transmission over 360 km of SMF28 fibre using URFL based amplification," *OSA Opt. Express*, 22(8), (2014)

¹³ P. Rosa et al. "Unrepeated 8x42 Gb/s transmission over 320 km SMF-28 using ultra-long Raman fibre based amplification" in *Proc. ECOC, Netherlands*, (2012)

Wzmocnienie ramanowskie URFL może w pełni wykorzystać potencjał koherentnej detekcji bez konieczności instalowania nowych światłowodów. Cyfrowa obróbka sygnału w odbiorniku zapewnia dodatkowy wymiar w przekazywaniu informacji w fazie optycznej. Umożliwia to transmisję o większej pojemności bez zwiększania złożoności odbiorników, ponieważ zarówno fazę, jak i polaryzację sygnału można odzyskać za pomocą cyfrowego przetwarzania sygnału (DSP -digital signal processing). Cyfrowe filtrowanie w DSP umożliwia odbiornikowi dostosowanie się do zmiennych w czasie szumów i pomaga w użyciu zaawansowanych kodów korekcji błędów¹⁴. Ostatnie badania wykazały, że cyfrowa propagacja wsteczna DBP (digital backpropagation) może kompensować zarówno szumy liniowe, jak i nieliniowe rozwiązując równanie Schrödingera NLSE (nonlinear Schrödinger equation)^{15,16} i skutecznie zmniejszając wpływ nieliniowego szumu fazowego NLPN (nonlinear phase noise). Aby rozwiązać NLSE, analiza danych jest zwykle przeprowadzana metodą 'split-step', gdzie nieliniowości są kompensowane w każdym kroku zgodnie z chwilową mocą sygnału. Podczas gdy w systemach wzmacniaczy EDFA sygnał jest tłumiony równomiernie, w transmisji URFL rozkład mocy sygnału wzdłuż osi światłowodu musi być obliczany numerycznie przez rozwiązywanie równań różniczkowych zwyczajnych ODE (ordinary differential equations). Zmniejszenie nieliniowych efektów Kerra w łączach URFL za pomocą DBP pozwalają na zwiększenie mocy sygnału w systemie oraz przedniej pompy Ramana. **Doprowadza to bezpośrednio do zwiększonego OSNR, ponieważ wyższe wzmocnienie na początku światłowodu zmniejsza efektywny współczynnik tłumienia wzdłuż światłowodu. Wysokie OSNR umożliwia implementację zaawansowanych formatów modulacji z blisko rozmieszczonymi punktami konstelacji (QAM16, QAM64 itd.) i zwiększa zasięg transmisji o wysokiej widmowej wydajności**^{17,18,19,20}.

¹⁴ S. J. Savory "Digital filters for coherent optical receivers", OPEX. 16(2), (2008)

¹⁵ E. Ip et al. "Compensation of Dispersion and Nonlinear Impairments Using Digital Backpropagation" J. Lightw. Technol., 16(2), (2008)

¹⁶ D. Rafique et al. "Digital back-propagation for spectrally efficient WDM 112 Gbit/s PM m-ary QAM transmission," OSA Opt. Express, 19(6), (2011)

¹⁷ L. Galdino, M. Tan, D. Lavery, **P. Rosa**, R. Maher, I. D. Phillips, J. D. Ania-Castañón, P. Harper, R. I. Killey, B. C. Thomsen, S. Makovejs and P. Bayvel "Unrepeated Nyquist PDM-16QAM Transmission over 364 km using Raman Amplification and Multi-Channel DBP" OSA Opt. Letters, 14(13), (2015)

¹⁸ L. Galdino, M. Tan, A. Alvarado, D. Lavery, **P. Rosa**, R. Maher, J. D. Ania-Castañón, P. Harper, J. S. Makovejs, B. C. Thomsen, and P. Bayvel "Amplification Schemes and Multi-Channel DBP for Unrepeated Transmission" IEEE Journal of Lightwave Technology, 34(9), (2016)

¹⁹ S. T. Lee, J. E. Prilepsky, **P. Rosa**, J. D. Ania-Castañón and S. K. Turitsyn "Nonlinear Inverse Synthesis for Optical Links With Distributed Raman Amplification" IEEE Journal of Lightwave Technology 34(8) (Invited paper), pp. 1778-1786, (2016)

²⁰ S. T. Lee, J. E. Prilepsky, M. Kamalian, **P. Rosa**, M. Tan, J. D. Ania-Castanon, P. Harper and S. K. Turitsyn "Nonlinear Inverse Synthesis for Optical Links with Distributed Raman Amplification" in Proc. ECOC, Spain, 2015

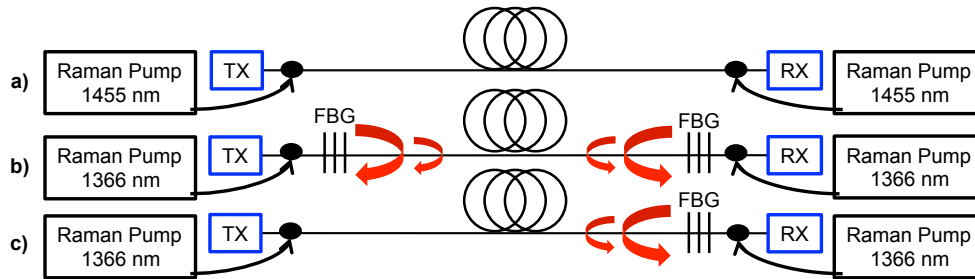


Fig. 3 Schemat wzmacniaczy ramanowskich 1-szego rzędu (a) oraz 2-go rzędu: URFL (b) i random DFB (c).

Kolejną metodą eliminacji niepożądanych efektów nieliniowych w światłowodach jest sprzężenie fazowe (OPC) w środku linku optycznego²¹ lub na końcu w odbiorniku²² które umożliwia kompensację w czasie rzeczywistym wszystkich deterministycznych (sygnał \times sygnał) nieliniowych szumów. Stopień kompensacji nieliniowej przy użyciu OPC łącza pośredniego jest związany z dopasowaniem asymetrii ewolucji mocy sprzężonego i przesyłanego sygnału w światłowodzie. Do tej pory, wyraźna poprawa wydajności została wykazana tylko w optycznych ogniach opartych na wzmacniaczach ramanowskich²³, dzięki lepszej kontroli asymetrii sygnału zapewnianej przez wzmocnienie sygnału na całej długości światłowodu, a także dzięki lepszej wydajności szumu. Podsumowując, **kluczem do zmaksymalizowania wydajności w systemach z układem OPC jest zmniejszenie asymetrii mocy sygnału przy jednoczesnym zapewnieniu niskiego wpływu szumów i nieliniowych zakłóceń w łączy transmisyjnym. Tutaj wykazuję, używając sprawdzonych modeli numerycznych, że prawie idealnie symetryczna ewolucja mocy sygnału może być osiągnięta w zaawansowanych schematach wzmacniaczy ramanowskich, z najlepszymi wynikami uzyskanymi dla wzmacniacza drugiego rzędu random DFB^{24,25,26,27}. Taka konfiguracja pozwala zmniejszyć asymetrię ewolucji mocy sygnału na długości światłowodu SMF-28 w stosunku do jego punktu środkowego do zaledwie 3% w realistycznym odcinku 62 km, co stanowi najniższy poziom asymetrii osiągnięty na tak długim dystansie.** Wyniki są zaprezentowane na ilustracji 4 poniżej.

²¹ S.L.Jansen et al. "Phase conjugation for increased system robustness," in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*, (2006), paper OTuK3.

²² M. D. Pelusi and B. J. Eggleton "Optically tunable compensation of nonlinear signal distortion in optical fiber by end-span optical phase conjugation," *Opt. Express* 20(7), 8015–8023 (2012).

²³ I. D. Phillips, M.Tan, M.F.C.Stephens, M.McCarthy, E.Giacoumidis, S.Sygletos, **P.Rosa**, S.Fabbri, S. T. Le, T. Kanesan, S. K. Turitsyn, N. J. Doran, and A. D. Ellis "Exceeding the nonlinear Shannon limit using Raman fibre based amplification and optical phase conjugation," in OFC, (2014) paper M3C.1

²⁴ **P. Rosa** et al. "Signal Power Symmetry Optimization for Optical Phase Conjugation Using Raman Amplification," in *Nonlinear Optics*, OSA Technical Digest (2015), paper NW4A.36

²⁵ **P. Rosa** et al. "Signal power asymmetry optimisation for optical phase conjugation using Raman amplification" *Opt. Express*, **23**(25), (2015)

²⁶ **P. Rosa** et al. "Link Optimisation for DWDM Transmission with an Optical Phase Conjugation" in *Proc. ICTON*, Italy, (2016)

²⁷ **P. Rosat** al. "Link Optimisation for DWDM Transmission with an Optical Phase Conjugation" *OSA Opt. Express*, **24**(15), (2016)

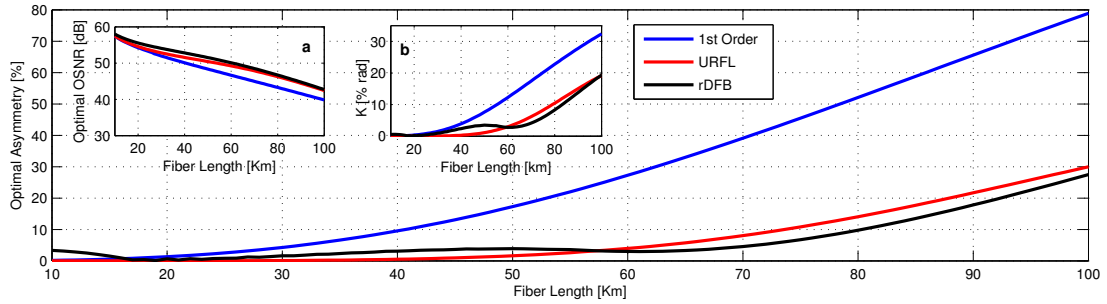


Fig. 4 Asymetria obliczona numerycznie dla wzmacniaczy Ramanowskich jak w/w (Fig. 3)

Zaprezentowałem różne konfiguracje wzmacniaczy oparte na laserach Ramana (Fig. 3), które zwiększają zasięg transmisji dalekosiężnej oraz długodystansowej^{28,29,30,31,32,33} przy zastosowaniu optymalnej architektury wymaganej dla danego łącza oraz metod zwalczania szumów liniowych jak też nieliniowych: wzmacnianie sygnału wykorzystując wzmacniacze wyższego rzędu, cyfrowe filtrowanie w DSP oraz kontroli asymetrii sygnału w celu większej wydajności technologii z wykorzystaniem OPC.

Wzmacniacze ramanowskie wykazują namacalną poprawę, ale są zwykle ograniczone przez dwie główne wady: niską wydajność pompowania i względny szum spowodowany przeskokiem natężenia (RIN) z pompy do sygnału^{34,35,36,37}. Dla danej liczby kanałów i formatu transmisji, wymagana moc pompy zależy głównie od właściwości medium i dlatego niewiele jest miejsca na poprawę, jeśli mają być stosowane standardowe światłowody jedno-modowe SMF-28. Teraz przedstawię

²⁸ M. Tan, P. Rosa, Md. A. Iqbal, S. T. Le, I. D. Phillips, S. K. Turitsyn, and P. Harper "Raman Fibre Laser Based Amplification in Long-haul/ Unrepeated Coherent Transmission Systems," ICTON, Spain, (2017)

²⁹ M. Tan, P. Rosa, S. T. Le, Md. A. Iqbal, I. D. Phillips, and P. Harper "Transmission performance improvement using random DFB laser based Raman amplification and bidirectional second-order pumping" OSA Opt. Express, 24(3), (2016)

³⁰ M. Tan, P. Rosa, I. D. Phillips and P. Harper "Extended Reach of 116 Gb/s DP-QPSK Transmission using Random DFB Fiber Laser Based Raman Amplification and Bidirectional Second-order Pumping" in Proc. OFC, USA, (2015), paper W4E.1

³¹ M. Tan, P. Rosa, S. T. Le, I. D. Phillips, and P. Harper "Evaluation of 100G DP-QPSK long-haul transmission performance using second order co- pumped Raman laser based amplification" OSA Opt. Express, 23(17), (2015)

³² M. Tan, P. Rosa, I. D. Phillips and P. Harper "Long-haul Transmission Performance Evaluation of Ultra-long Raman Fibre Laser Based Amplification Influenced by Second Order Co-pumping" in Proc. ACP, China, 2014

³³ M. Tan, P. Rosa, I. D. Phillips, M.F.C. Stephens, S. Sygletos, A. Ellis and P. Harper "10x118 Gbits DP-QPSK WDM Transmission using URFL based amplification in comparison to first order and dual order Raman amplification" in Proc. ICTON, Austria, (2014)

³⁴ C. R. S. Fludger, V. Handerek, and R. J. Mears, "Pump to signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers," J. Lightw. Technol., vol. 19, no. 8, pp. 1140–1148, (2001)

³⁵ M. Krause, S. Cierullies, H. Renner, and E. Brinkmeyer, "Pump-to-Stokes RIN transfer in Raman fiber lasers and its impact on the performance of co- pumped Raman amplifiers," Opt. Commun., vol. 260, no. 2, pp. 656–661, (2006)

³⁶ M. Alcòn-Camas and J. D. Ania-Castañón, "RIN transfer in 2nd-order distributed amplification with ultralong fiber lasers," Opt. Express, vol. 18, no. 23, pp. 23569–23575, (2010)

³⁷ J. Nuño, M. Alcon-Camas, and J. D. Ania-Castañón, "RIN transfer in random distributed feedback fiber lasers," Opt. Express, vol. 20, no. 24, pp. 27376–27381, (2012)

sposoby na ograniczenie wpływu szumów RIN poprzez poprawne projektowanie systemu, przy jednoczesnym zachowaniu równowagi między szumem ASE a nieliniowością typową dla wzmacniaczy Ramana.

W niektórych przypadkach można stosować lasery pomp półprzewodnikowych, które z natury są mniej hałaśliwe niż lasery światłowodowe, problem w tym, iż mogą one dostarczać jedynie moc do kilkuset mW. W aplikacjach zużywających więcej energii stosowane są lasery z pompą światłowodową. W jednej z publikacji wykazaliśmy, iż wzmacnianie ramanowskie drugiego rzędu (rDFB)³⁸ może wyjątkowo tolerować pompowanie dwukierunkowe, ze znacznie obniżonym szumem RIN³⁹. Podobnie, pokazaliśmy, że we wzmacnianiu drugiego rzędu maksymalny dopuszczalny wkład pompy w kierunku przednim przed wzrostem RIN zależy od mocy odbijanego od tyłu światła w przedniej części światłowodu, zaraz przy odbiorniku^{40,41,42,43,44}. **Zgodnie z naszą najlepszą wiedzą, żadna z poprzednich grup naukowych nie zajmowała się dogłębną analizą działania wzmacniaczy URFL oraz random DFB, ale raczej wydajnością transmisji określonego systemu. W publikacji⁴⁵ przedstawiamy dokładną optymalizację parametrów wzmacniaczy ramanowskich, takich jak długość, stosunek mocy pomp i współczynnik odbicia lustra FBG w celu poprawy wydajności transmisji.** Optymalizację przeprowadza się poprzez staranną charakteryzację wejściowego RIN pomp laserowych, sygnału wyjściowego RIN, optycznego stosunku sygnału do szumu (OSNR) oraz wymagań dotyczących mocy pompy w celu pełnego odzyskania mocy sygnału po całkowitej transmisji na danej długości światłowodu co ułatwia proces projektowania systemu, pomagając w rozwiązywaniu krytycznych problemów z wydajnością optycznych wzmacniaczy ramanowskich wyższego rzędu.

Ambicją przedstawionych wyżej prac naukowych jest połączenie kilku najbardziej obiecujących (zarówno pod względem potencjalnych kosztów, jak i wydajności) rozwiązań problemu komercyjnej implementacji wzmacniaczy Ramanowskich. Opracowane zostały nowe metody kompensacji nieliniowego efektu w systemach z

³⁸ S. K. Turitsyn *et al.*, "Random distributed feedback fibre laser," *Nature Photon.*, vol. 4, no. 4, pp. 231–235, 2010.

³⁹ M. Tan, **P. Rosa**, Md. A. Iqbal, I. D. Phillips, J. D. Ania-Castañón and P. Harper "RIN Mitigation in Second Order Pumped Raman Fibre Laser Based Amplification," *in Proc. ACP*, Hong Kong, 2015

⁴⁰ G. Rizzelli, **P. Rosa**, P. Corredera, and J. D. Ania-Castañón "Raman Cell Parameters Optimisation for Transmission Systems Based on Distributed Amplification," *in Proc. CLEO*, Germany, 2017

⁴¹ G. Rizzelli, F. Gallazzi, **P. Rosa**, P. Corredera, and J. D. Ania-Castañón "Raman Cell Optimisation for Distributed Amplification Based Transmission Systems," invited paper in ICTON, Spain, 2017

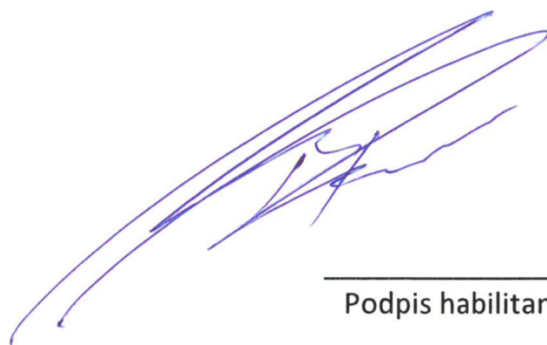
⁴² G. Rizzelli, Md. A. Iqbal, F. Gallazzi, **P. Rosa**, M. Tan, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón and P. Harper "FBG Reflectivity Impact on RIN in Ultralong Laser Amplifiers", *in Proc. ECOC*, Germany, 2016

⁴³ G. Rizzelli, Md. A. Iqbal, **P. Rosa**, M. Tan, L. Krzczanowicz, I. D. Phillips, W. Forysiak, J. D. Ania-Castañón, and P. Harper "Impact of Front-FBG Reflectivity in Raman Fiber Laser Based Amplification" *in Proc. CLEO*, US, 2016

⁴⁴ G. Rizzelli, Md. A. Iqbal, F. Gallazzi, **P. Rosa**, M. Tan, J. D. Ania-Castañón L. Krzczanowicz, P. Corredera, I. Phillips, W. Forysiak and P. Harper "Impact of input FBG reflectivity and forward pump power on RIN transfer in ultralong Raman laser amplifiers" *OSA Opt. Express*, 24(25), 2016

⁴⁵ G. Rizzelli, **P. Rosa**, P. Corredera, and J. D. Ania-Castañón "Transmission span optimization in fiber systems with cavity and random distributed feedback ultralong Raman laser amplification," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 35(22), 2017

zaawansowanym wzmocnieniem optycznym, oparte na najbardziej wydajnych formatach transmisji takich jak QPSK oraz QAM. Wymienione publikacje łączą technologie, które są bardzo obiecujące, jeśli chodzi o zwiększenie przepustowości systemów komunikacji światłowodowej. Koherentna transmisja wspierana przez niskoszumową i stałą nieliniowość zapewnioną przez wzmocnienie ramanowskie wyższego rzędu URFL, random DFB oraz ich hybryd jak także intensyfikacja badań nad kompensacją nieliniową okazała się sukcesem w kierunku komercjalizacji alternatywnych metod wzmacniania sygnałów optycznych. Przedstawione badania naukowe łączą eksperymentalną wiedzę w zakresie projektowania i wdrażania koherentnych systemów ze wzmocnieniem ramanowskim wyższego rzędu oraz numeryczne studium transmisji URFL i random DFB, w celu stworzenia optymalnego środowiska dla zwiększenia przepustowości w optycznych systemach transmisyjnych.



Podpis habilitanta