

OPTYCZNIE NIEKOHERENTNA TRANSMISJA QAM PO ŚWIATŁOWODZIE MM POZA JEGO PASMEM PODSTAWOWYM

Streszczenie: W artykule poruszono kwestię potencjalnej możliwości zwiększenia pojemności transmisyjnej światłowodu wielomodowego na drodze wykorzystania do tego celu „dodatkowych pasm”, ułożonych poza obszarem jego pasma podstawowego. W pracy skupiono się na wykorzystaniu efektywnej widmowo cyfrowej modulacji QAM w tego typu transmisji, prezentując wyniki badań eksperymentalnych dla transmisji 16 i 64-QAM.

1. WSTĘP

Gwałtowny rozwój usług teleinformatycznych, skierowanych na odbiorcę indywidualnego, jaki dokonał się na przestrzeni ostatniej dekady zmienił nieodwracalnie punkt patrzenia na możliwości oferowane przez dostępne sieci optyczne krótkiego zasięgu, określanych też mianem sieci lokalnych LAN (ang. Local Area Network). Tego typu sieci były i są budowane w dużej mierze w oparciu o wykorzystanie włókien wielomodowych MMF (ang. Multimode Fibers) [1,2]. Popularność światłowódów MM w tego typu zastosowaniach wynika z niższych, całkowitych kosztów instalacji sieci o nieopartych, w porównaniu do rozwiązań budowanych na bazie światłowódów jednomodowych SMF (ang. Single Mode Fibers). Należy podkreślić, że chodzi tu o koszt całkowitej instalacji sieci a nie wydatki poniesione na zakup samego światłowodu, które są wyższe dla światłowódów MM. Szacuje się, że nawet ponad $\frac{3}{4}$ istniejącej infrastruktury światłowodowej, przeznaczonych do roli sieci krótkiego zasięgu jest oparta o wykorzystanie tego typu światłowódów [2]. Cechą odróżniającą światłowody MM od światłowódów SM jest relatywnie duża średnica ich rdzenia, typowo 50 lub 62,5 μm . Dla porównania w przypadku SMF ta wartość jest na poziomie jedynie 9-10 μm . Tak duża średnica ułatwia realizację procesu sprzęgania światła, dzięki temu wymagania stawiane układom nadawczo-odbiorczym, które współpracują z tym medium transmisyjnym, są dużo bardziej mniej restrykcyjne w stosunku do wymagań stawianych ich odpowiednikom, przeznaczonych do współpracy z SMF. Dzięki temu są one również znacząco tańsze. Dużą popularnością w tego typu rozwiązaniach cieszą się m.in. tanie źródła światła w postaci laserów VCSEL (ang. Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Oferują one bardzo dobre parametry transmisji przy relatywnie niewielkich kosztach ich zakupu [2,3].

Niski koszt optoelektroniki współpracującej z światłowodami MM znacząco obniża końcowy koszt instalacji tego typu sieci, co ma kolosalne znaczenie w kontekście ich popularności. Jednakże oprócz oferowanych niewątpliwych zalet przez światłowody MM, wynikających bezpośrednio z dużej średnicy ich rdzenia, są też istotne wady. Uwidaczniają się one przede wszystkim w

kontekście ich możliwości transmisyjnych. Duża średnica rdzenia stoi bowiem u źródła zachodzenia wysoce destruktywnego zjawiska w tego typu światłowodach, jakim jest dyspersja modowa [1,4]. Jej obecność podyktowana jest tym iż duża średnica rdzenia umożliwia propagowanie się światła w postaci tzw. wielu modów. Mówiąc bardziej obrazowo w tego rodzaju medium światło może propagować się w postaci wielu niezależnych dróg optycznych. Ponieważ każdy z takich modów propaguje się z odmienną, typową tylko dla siebie opóźnieniem, skutkuje to rozmywaniem się nadawanych impulsów optycznych podczas ich propagacji. Dyspersja modowa stanowi główny czynnik ograniczający możliwości transmisyjne światłowódów MM. Determinuje ona bowiem w znacznej mierze szerokość pasma modowego, które to przekłada się bezpośrednio na możliwe do osiągnięcia parametry transmisji wyrażone w możliwej do osiągnięcia przepływności przy założonej długości łącza.

Destruktywny wpływ obecności dyspersji modowej na właściwości transmisyjne światłowódów MM powoduje, że tego typu światłowódów nie stosuje się w ogóle w rozwiązaniach dla sieci szkieletowych dalekiego zasięgu. Ich podstawowe zastosowanie zostało ograniczone do wykorzystania ich na masową skalę, w sieciach krótkiego zasięgu.

W przeszłości kiedy wymagano zapewnienia przepływności w optycznych sieciach krótkiego zasięgu na poziomie do 100 Mb/s instalacje realizowane w oparciu o MMF umożliwiały bez przeszkód realizację transmisji na odległość do 2000 m, zobacz tab.1 [5,6]. Biorąc pod uwagę, że średnia długość łącza w sieciach kampusowych nie przekracza typowo 500 m, były one ze względu na niewielki koszt ich instalacji rozwiązaniem wręcz idealnym do tego typu zastosowań.

Tab. 1. Zestawienie możliwości wykorzystania MMF w odniesieniu do różnych standardów transmisji w oparciu o [5,6]

| Typ\ Standard | 100 Mb Ethernet | 1 Gb (1000 Mb) Ethernet | 10 Gb Ethernet | 40 Gb Ethernet |
|----------------|-----------------|-------------------------|----------------|----------------|
| OM1 (62.5/125) | do 2000m | 275m | 33m | Brak wsparcia |
| OM2 (50/125) | do 2000m | 550m | 82m | Brak wsparcia |
| OM3 (50/125) | do 2000m | 550m | 300m | 100m |
| OM4 (50/125) | do 2000m | 1000m | 550m | 150m |

Na przestrzeni ostatniej dekady sytuacja ta uległa jednak znaczącemu przeobrażeniu. Pojawienie się standardów 10GBASE, 40GBASE oraz 100GBASE [6,7], będących odpowiedzią na zarysowujący się coraz silniej wzrost wymagań, spowodowało, że od tego typu sieci oczekuje

się oferowania przepływności na poziomie często już obecnie znacząco przewyższający 10 Gb/s. Skutkuje to tym, że praktycznie tylko najnowocześniejsze włókna wielomodowe typu OM3 i OM4, optymalizowane dla wykorzystania ich na długości fali 850 nm, są w stanie podołać tym wymaganiom. Nawet jednak one stają się bezużyteczne, jeśli długość realizowanego w ich oparciu łącza zapewniającego przepływność powyżej 10 Gb/s przekracza kilkaset metrów lub transmisja jest realizowana w drugim a nie pierwszym oknie transmisji. W tego typu przypadkach zaleca się stosowanie bardziej zaawansowanych metod transmisji, które umożliwiają zwiększenie oferowanej pojemności transmisyjnej przez światłowody MM, np. multipleksację [7]. Przykładowo standard 10GBASE-LX4, umożliwiający transmisję z przepływnością 10 Gb/s na odległość do 300m w obszarze długości fali 1300 nm bazuje na wykorzystaniu techniki zwielokrotnienia długości fali CWDM (ang. Coarse Wavelength Division Multiplexing). W ramach tego standardu prowadzi się jednoczesną transmisję dla czterech niezależnych kanałów z przepływnością 3.125 Gb/s każdy. To właśnie wykorzystanie zaawansowanych form transmisji jest wskazywane jako droga do utrzymania popularności zastosowania światłowodów MM w obszarze sieci krótkiego zasięgu, jak również jako metoda rozszerzenia aktualnych możliwości sieci już istniejących w odpowiedzi na rosnące wymagania. Jest to o tyle ważne, że często nie ma możliwości zastąpienia już istniejącej infrastruktury okablowania nową lub koszt jej wymiany jest zbyt wysoki, aby ktoś był gotów go ponieść. Alternatywą w tego typu przypadkach jest ich modernizacja, obejmująca jedynie aktualizację bądź wymianę urządzeń w obszarze tzw. punktów końcowych, bez ingerencji w infrastrukturę okablowania.

Pewną swego rodzaju oczywistością jest, że doświadczone ograniczone możliwości transmisyjne światłowodów MM w zderzeniu z przytoczoną ich „popularnością zastosowań” sprawiają, że wraz ze wzrostem wymagań im stawianym, którym muszą podołać wzrasta również intensywność badań w kontekście poprawy ich możliwości transmisyjnych. Na przestrzeni ostatnich lat zaproponowano kilka podejść oferujących uskutecznienie tego celu. Do tego typu rozwiązań można zaliczyć: zwiększenie możliwości transmisyjnych włókien MM na drodze realizacji pobudzenia ograniczonej liczby modów, tzw. pobudzenie RML (ang. Restricted Mode Launching), przy zastosowaniu pobudzenia off-setowego [8], różne formy multipleksacji sygnału transmitowanego, takie jak transmisja w oparciu o zwielokrotnienie grup modowych MGDM (Mode Group Division Multiplexing) [9,10], wykorzystanie techniki WDM (ang. Wavelength Division Multiplexing) i CWDM [11,12], wykorzystanie znanej z transmisji radiowej techniki MIMO (ang. Multiple Input Multiple Output) [13], a także wykorzystanie dodatkowych pasm transmisyjnych (ang. passbands), leżących poza pasmem podstawowym światłowodu MM [14-17]. To właśnie wykorzystanie tej ostatniej propozycji jest obiektem szczególnego zainteresowania niniejszego artykułu. Jego dalsza część jest poświęcona właśnie temu rozwiązaniu.

Dalsza zawartość artykułu przedstawia się następująco. W rozdziale 2 przedstawiono uzasadnienie dla

podjętego tematu badań. Rozdział 3-ci poświęcono omówieniu koncepcji transmisji poza pasmem podstawowym światłowodu MM, wykorzystując do tego celu dobrze znaną z transmisji radiowej technikę zwielokrotnienia podnośnych SCM. Rozdział 4-ty zawiera opis układu eksperymentalnego, który posłużył do weryfikacji tezy dotyczącej potencjalnej możliwości prowadzenia tego typu transmisji z wykorzystaniem cyfrowej modulacji 16 i 64-QAM. Rozdział 5-ty prezentuje natomiast wyniki badań uzyskane przy jego udziale. W rozdziale 6-tym, ostatnim dokonano podsumowania osiągniętych wyników oraz zawarto wnioski końcowe.

2. MODULACJA QAM DROGĄ ROZWOJU – UZASADNIENIE PODJĘCIA BADAŃ

Dotychczas w prasie naukowej pojawiło się kilka interesujących prac badawczych [14-17], traktujących na temat możliwości znaczącego zwiększenia pojemności transmisyjnej światłowodu MM, bazując na organizacji dodatkowych kanałów transmisji w obszarach tzw. pasm dodatkowych, leżących poza jego pasmem podstawowym. Bazując m.in. na przesłaniu zawartym w pracy [16] można przyjąć, że przy zastosowaniu tego podejścia jesteśmy w stanie podnieść możliwości transmisyjne światłowodów wielomodowych co najmniej o rząd wielkości. Co ważne, takie podejście rozszerza możliwości transmisji konwencjonalnej, realizowanej przy wykorzystaniu pasma podstawowego, nie wpływając na nią. Wykorzystywane są bowiem odmienne zakresy częstotliwości. Podejście to oferuje wiele unikatowych zalet wynikających bezpośrednio z właściwości techniki zwielokrotnienia podnośnych SCM (ang. Subcarrier Multiplexing), będącej jego bazą. Jednakże jak w przypadku każdego z przytoczonych wcześniej podejść mających na celu zwiększenie pojemności transmisyjnej MMF również w tym przypadku istnieją ograniczenia w jej stosowalności. Największym z nich jest praktyczna nieprzewidywalność a priori położenia gwałtownych spadków (zaników) na częstotliwościowej charakterystyce przenoszenia włókna MM. Wymusza to konieczność stosowania dodatkowych mechanizmów niwelujących ich wysoce destruktywny wpływ, takich jak np. automatyczny dobór częstotliwości kanałów poszczególnych podnośnych, realizowany w czasie rzeczywistym [17]. Dotychczas realizowane prace badawcze, w obszarze wykorzystania dodatkowych pasm transmisji, koncentrowały się w głównej mierze na wykorzystaniu najprostszych formatów modulacji cyfrowych, takich jak binarne kluczowanie fazy BPSK (ang. Binary Phase Keying) oraz binarne kluczowanie częstotliwości BFSK (ang. Binary Frequency Shift Keying). A więc formatów łatwych w implementacji, zapewniających dużą odporność na zniekształcenia charakterystyki przenoszenia MMF, ale jednocześnie mało efektywnych od strony oferowanych przez nie efektywności widmowych, co w tego przypadku transmisji jest jednak problematyczne. Analizując szczegółowo bowiem naturę ograniczeń tego typu transmisji, specyfikę jej realizacji łatwo dojść do przekonania, że w jej przypadku celowym jest wprowadzenie rozwiązań opartych o adaptacyjne mechanizmy doboru najbardziej efektywnego formatu modulacji dla danego

kanalu w uzależnieniu od oferowanych przez niego warunków transmisji.

W niniejszej pracy sugeruje się możliwość wykorzystania w tym celu wysoce efektywnej widmowo cyfrowej modulacji QAM (ang. Quadrature Amplitude Modulation). Wykorzystanie tego formatu modulacji pozwala znacząco zwiększyć możliwe do uzyskania całkowite przepływności oferowane w ramach przytaczanego podejścia. Przykładowo zastosowanie modulacji 16 i 64-QAM zapewnia (przynajmniej teoretycznie) uzyskanie przepływności odpowiednio 4 i 6 krotnie większej w stosunku do transmisji opartej o modulację BPSK, przy zajętości tej samej szerokości pasma. Obrazuje to tabela 2, zawierająca zestawienie teoretycznych efektywności widmowych dla wybranych cyfrowych formatów modulacji [18]. Oczywiście zastosowanie formatu o większej efektywności widmowej wymaga zapewnienia większej wartości odstępów SNR (ang. Signal to Noise Ratio) w ramach danego kanału transmisji. Jednakże skoro i tak w ramach realizacji rzeczywistych systemów zmuszeni jesteśmy badać warunki oferowane przez dany kanał transmisyjny, to możemy również w przypadku zaistnienia sprzyjających warunków realizować transmisję o większej efektywności widmowej. Prowadzone prace badawcze miały dać odpowiedź czy jest to możliwe przy tego typu podejściu. Możliwość prowadzenia takiej transmisji opartej o modulację QAM ma też duże, potencjalne znaczenie w kontekście m.in. realizacji transmisji ROF (ang. Radio Over Fiber) po światłowodzie MM. Relatywnie duża bowiem częstotliwość pasm radiowych wykorzystywanych w tego typu transmisji powoduje, że w przypadku jej realizacji po tego typu światłowodzie z dużym prawdopodobieństwem będzie ona realizowana poza zakresem jego pasma podstawowego.

Tab. 2. Teoretyczne efektywności widmowe dla wybranych modulacji cyfrowych [18]

| Forma modulacji cyfrowej | Teoretyczna efektywność widmowa |
|--------------------------|---------------------------------|
| MSK | 1 bit/s/Hz |
| BPSK | 1 bit/s/Hz |
| QPSK | 2 bit/s/Hz |
| 8 PSK | 3 bit/s/Hz |
| 16 QAM | 4 bit/s/Hz |
| 32 QAM | 5 bit/s/Hz |
| 64 QAM | 6 bit/s/Hz |
| 256 QAM | 8 bit/s/Hz |

3. TRANSMISJA POZA PASMEM PODSTAWOWYM MMF

Pojęciem wymagającym szerszego komentarza w kontekście całego artykułu jest pojęcie „transmisji poza pasmem podstawowym światłowodu MM”. Otóż tego rodzaju transmisja jest możliwa w odniesieniu do tego typu światłowodu jako bezpośrednie następstwo faktu, że w odróżnieniu od częstotliwościowej charakterystyki przenoszenia SMF, charakterystyka włókna MM nie zanika monotonicznie poza obszarem jego pasm podstawowego, wyznaczanego przez 3 dB-owy spadek transmistancji w odniesieniu do wartości maksymalnej, mierzonej typowo dla częstotliwości DC. Jednakże wykazuje ona istnienie wielu tzw. pasm

dotychczasowych (ang. passbands). Są to charakterystyczne zakresy częstotliwości tworzące obszary o relatywnie płaskich amplitudach. Ze względu na tę cechę pasma te mogą być wykorzystane do realizacji dodatkowych kanałów transmisji [14-17]. Niestety nie jest możliwym ich wykorzystanie jako „naturalne rozszerzenie” zakresu szerokości pasma podstawowego, w ramach którego realizowana jest transmisja konwencjonalna. Leżą one bowiem od kilku do kilkanastu dB optycznie poniżej poziomu pasma podstawowego, obrazuje to rys. 1 [14].



Rys. 1. Charakterystyka przenoszenia światłowodu MM 62,5 μm , o długości 500m, VCSEL, 850 nm, [14]

Specyficzny kształt częstotliwościowej charakterystyki przenoszenia włókna MM jest konsekwencją faktu, że jego odpowiedź impulsowa, rejestrowana dla warunków pobudzenia go ultra-krótkim impulsem optycznym, ze względu na występujące zjawisko propagacji światła w postaci wielu modów, ma kształt grzebieńca, składającego się z wielu pojedynczych impulsów Dirace’a, których poszczególne przesunięcia odpowiadają opóźnieniom poszczególnych modów, doznawanych podczas propagacji. Obecność tzw. pasm dodatkowych na charakterystyce przenoszenia jest powodowana obecnością tzw. modów wysokiego rzędu, nie obecnych w przypadku światłowodu SM. Niestety kształt charakterystyki przenoszenia światłowodu MM nie jest stały. Nie da się go praktycznie określić a priori z pełną dozą pewności. Zależy on bowiem od wielu czynników takich jak: rodzaj zastosowanego pobudzenia, długość światłowodu, średnica jego rdzenia, profil załamania światła w rdzeniu, długość fali padającej. Na jej kształt nie pozostaje również bez wpływu obecność dyspersji chromatycznej, a tym samym również szerokość spektralna linii widmowej użytego źródła światła. Dyspersja chromatyczna powoduje wzrost spadku charakterystyki przenoszenia MMF w obszarze wyższych częstotliwości.

Przyjmując, że mimo wszystko wiele pojedynczych modów wykazuje zbliżone względem siebie właściwości propagacyjne, np. wartość opóźności grupowej, tworząc tzw. grupy modowe, to przebieg zmian częstotliwościowej charakterystyki przenoszenia włókna MM można z dobrym przybliżeniem opisać równaniem (1) [19]:

$$H(f) = \exp\left[-\frac{(2\pi f D L \sigma_\lambda)^2}{2}\right] \cdot \sum_{k=1}^K P_k \exp(-j2\pi f \tau_k L) \cdot 10^{-\alpha_k L/10}, \quad (1)$$

gdzie: f - częstotliwość, D - współczynnik dyspersji, L - długość włókna, α_k – jego współczynnik tłumienia, σ_λ -średnia szerokość linii widmowej źródła światła, τ_k - opóźnienie k -tej grupy modowej.

W ogólności dane mody należą do tej samej grupy modowej jeśli indeksy opisujące rozkład intensywności ich pola poprzecznego spełniają równanie (2) [19]:

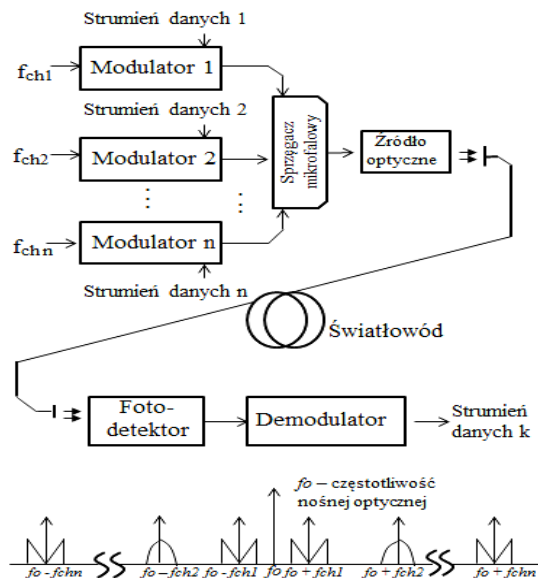
$$m = 2p + l - 1, \quad (2)$$

gdzie: p – liczba maksimów liczona względem składowej azymutalnej, l – liczba maksimów liczona względem składowej radialnej.

Zgodnie z równaniem (1) kształt częstotliwościowej charakterystyki przenoszenia MM może być interpretowany jako efekt nakładania się zjawisk dyspersji modowej oraz dyspersji chromatycznej. W równaniu tym człon pierwszy obrazuje wpływ dyspersji chromatycznej, człon drugi dyspersji modowej.

3.1. Technika zwielokrotnienia podnośnych SCM

Ze względu na fakt, że wspomniane dodatkowe pasma transmisji leżą kilka, kilkanaście dB optycznie poniżej poziomu pasma podstawowego nie jest możliwym ich wykorzystanie w ramach transmisji konwencjonalnej. Pasma te mogą być jednak zagospodarowane na drodze zastosowania znanej bardzo dobrze m.in. z transmisji radiowej lub transmisji CATV (ang. Cable Television) techniki zwielokrotnienia podnośnych SCM, przeniesionej na grunt transmisji optycznej. Typowy schemat jej implementacji obrazuje rys. 2.



Rys. 2. Schemat działania systemu SCM

Zgodnie z zamieszczonym schematem N podnośnych mikrofalowych o odpowiednio dobranych częstotliwościach jest modulowane przez N strumieni danych. Odpowiedni dobór częstotliwości poszczególnych podnośnych zapewnia „rozłączność” realizowanych z ich udziałem kanałów w domenie częstotliwości. Dzięki temu możliwa jest ich późniejsza dekompozycja po stronie odbiornika. Zmodulowane podnośne są ze sobą sumowane przy wykorzystaniu sprzączki mikrofalowej i jako jeden, złożony sygnał modulują nośną optyczną. Modulacja nośnej optycznej może odbywać się za-

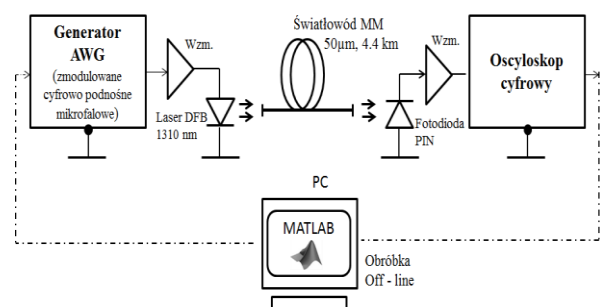
równy na drodze realizacji optycznej modulacji zewnętrznej jak też co jest znacznie częstsze na drodze modulacji bezpośredniej. To drugie podejście nie wymaga optycznych modulatorów zewnętrznych, dzięki czemu jest tanie. W tym przypadku modulacja odbywa się jedynie bowiem na drodze zmian wartości prądu zasilającego źródło światła, które to powodują adekwatne zmiany poziomu mocy emitowanego sygnału optycznego. Zmodulowany sygnał optyczny jest sprzęgany do światłowodu.

Po stronie odbiorczej sygnał optyczny po jego fotodetekcji i zamianie na postać elektryczną jest poddawany „obróbce” w celu dokonania dekompozycji poszczególnych, zmodulowanych podnośnych mikrofalowych a następnie ich demodulacji celem odzyskania pierwotnie nadanych sygnałów informacyjnych.

Taki schemat działania sprawia, że od strony optycznej, transmisja taka ma charakter transmisji niekoherentnej bez względu na rodzaj zastosowanej modulacji w domenie elektrycznej.

4. UKŁAD EKSPERYMENTALNY

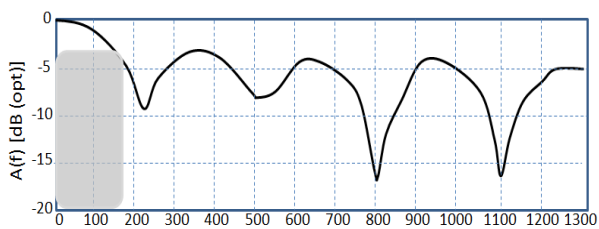
W celu weryfikacji możliwości prowadzenia efektywnej widmowo transmisji QAM poza pasmem podstawowym światłowodu MM przeprowadzono szereg symulacji z wykorzystaniem środowiska Matlab w oparciu o wykorzystanie modelu jego charakterystyki przenoszenia, opisanej równaniem (1). Przeprowadzone symulacje potwierdzały taką możliwość w przypadku gdy poziom mocy sygnału nadawanego był dostatecznie duży a częstotliwość podnośnej wypadała w obszarach szczytów kolejnych podpas. W ramach symulacji uzyskiwano bardzo dobre wyniki dla modulacji 16, 64 i 256-QAM. Powyżej tej wartości jakość wyników zaczęła gwałtownie spadać i w dużej mierze zależać od mocy sygnału nadawanego. Wynikało to z faktu, że dla bardzo dużych wartości M trudno było spełnić wymagania odnośnie wartości SNR w odbiorniku w przypadku stosowania typowych źródeł światła o niewielkiej mocy, rzędu pojedynczych mW. Bez większych jednak przeszkód możliwym było uzyskanie transmisji o bardzo dobrej jakości dla modulacji 16 i 64-QAM. Dla tych też formatów przeprowadzono weryfikację eksperymentalną. W tym celu zrealizowano układ eksperymentalny, którego schemat przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny zrealizowanego układu eksperymentalnego

W układzie tym jako źródło sygnałów nadawanych (zmodulowane cyfrowo w formacie QAM podnośne mikrofalowe) wykorzystano generator przebiegów dowolnych AWG (ang. Arbitrary Wave Generator, Textronic AWG7122C 24Gs/s). Wymagało to jego uprzedniego „zaprogramowania”, polegającego na wgraniu do jego rejestru pamięci wewnętrznej odpowiedniego zbioru próbek, odpowiadających zmodulowanym sygnałom mikrofalowym w formacie 16 i 64-QAM. Sekwencje te były generowane z użyciem narzędzia Matlab w wersji 7.1.

Uzyskane w ten sposób sygnały po ich uprzednim wzmocnieniu były wykorzystywane do modulacji lasera DFB 1310 nm (Finisar DBF-1310 nm) na drodze bezpośredniej modulacji jego prądu zasilania, powodując tym samym modulację generowanego przez niego sygnału nośnej optycznej. Poziomą moc wyjściową -6dBm. Sygnał ten był sprzęgany do światłowodu typu OM2 o średnicy rdzenia 50 μm i długości 4.4 km (Corning Glass). W trakcie trwania eksperymentu prowadzono badania w zakresie pasma częstotliwości 0.5 ÷ 1.5 GHz. Taki wybór częstotliwości powodował, że transmisja we wszystkich badanych przypadkach odbywała się poza pasmem podstawowym używanego w eksperymencie światłowodu MM. W jego przypadku szerokość pasma podstawowego wynosiła bowiem około 160 MHz, co obrazuje rys. 4, prezentujący jego charakterystykę przenoszenia, zmierzoną w początkowej fazie eksperymentu. Zakres jego pasma podstawowego wyróżniono ciemnym kolorem.



Rys. 4. Charakterystyka przenoszenia użytego w eksperymencie światłowodu typu OM2

Górny zakres wykorzystywanych częstotliwości, w tym przypadku odpowiednio 1.5 GHz, wynikał z ograniczeń szerokości pasma dostępnego podczas badania oscyloskopu cyfrowego.

Po stronie odbiornika odebrane sygnały optyczne podlegały zamianie na postać elektryczną w procesie fotodetekcji z wykorzystaniem fotodiody PIN (JTSU-ETX 100 1310 nm). Po ich wzmocnieniu były one kierowane na wejście oscyloskopu cyfrowego (LeCroy 294 MXi-A-2GHz 10 Gs/s), zapewniającym ich odpowiednie spróbkowanie i zapamiętanie w postaci zewnętrznych zbiorów. Zbiory te były następnie poddawane obróbce off-line z wykorzystaniem do tego celu środowiska Matlab. Z udziałem którego realizowano proces ich programowej demodulacji, odzyskując w ten sposób przebiegi dla symboli nadanych, które posłużyły do generacji w oparciu o nie odpowiednich diagramów konstalacji I-Q. Na bazie uzyskanych diagramów wyznaczano wartość parametru EVM (ang. Error Vector Magnitude) dla każdej z realizacji. W oparciu o jego znajomość dokonywano

szacowania wartości elementarnej stopy błędów BER (ang. Bit Error Rate), określając tym samym jakość prowadzonej transmisji.

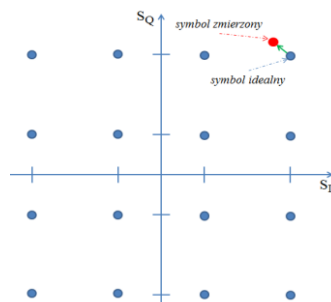
Badanie prowadzono dla dwóch szybkości modulacji, tj. odpowiednio 100 i 150 Mboud/s na kanał, co odpowiada przepływności 400 i 600 oraz 600 i 900 Mb/s.

W ramach eksperymentu prowadzono transmisję typu punkt – punkt.

Bardzo niewielka moc optyczna sygnału nadawanego, jedynie -6 dBm jak też relatywnie długi odcinek światłowodu MM (4.4 km) bardzo dobrze odpowiadały przypadkom granicznym tego typu transmisji w kontekście najgorszego przypadku.

4.1 Parametr EVM

Jedną z powszechnie stosowanych miar oceny jakości transmisji dla złożonych, cyfrowych formatów modulacji jest parametr EVM. Parametr ten określa odstępstwa rzeczywistego położenia symbolu odebranego na grafie konstalacji względem jego położenia idealnego, obrazuje to poglądowo rys.5. Zachodzące odstępstwo jest wynikiem obecności szumów w układzie nadawczo-odbiorczym, interferencji międzysymbolowej, zniekształceń nieliniowych oraz zachodzących niedokładności w procesie demodulacji, realizowanej po stronie odbiornika.



Rys. 5. Graficzna interpretacja metryki EVM, zobrażona w odniesieniu do grafu konstalacji 16-QAM

Typowo wartość odchyłki opisywanej przez parametr EVM wyraża się w dB lub %. Wartość tego parametru w oparciu o diagram konstalacji może zostać wyznaczona matematycznie zgodnie z równaniem [20]:

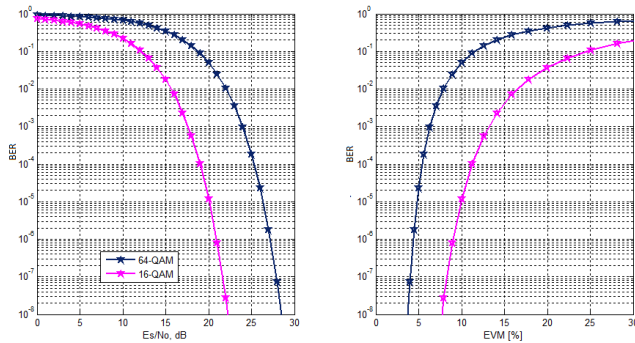
$$EVM = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |S_{ideal,r} - S_{meas,r}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |S_{ideal,r}|^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

gdzie: $S_{meas,r}$ – znormalizowany r-ty symbol w strumieniu symboli zmierzonych, $S_{ideal,r}$ – znormalizowany idealny punkt konstalacji dla r-tego symbolu, N – liczba unikatowych symboli, tworzących daną konstalację.

Uzyskana w ten sposób wartość EVM może być powiązana z wartością parametru SNR, notowaną w odbiorniku, zgodnie z zależnością [21]:

$$EVM \approx \frac{1}{\sqrt{SNR}} \approx \sqrt{\frac{N_0}{E_s}}. \quad (4)$$

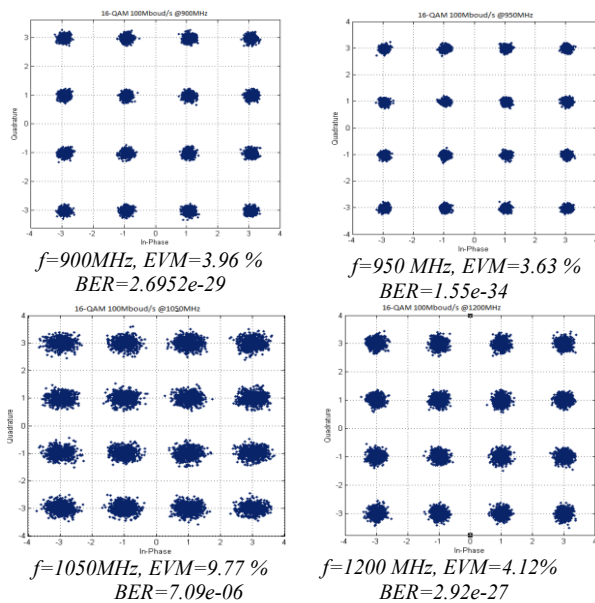
W oparciu o który możliwym jest m.in. oszacowanie elementarnej stopy błędów BER, wykorzystując do tego celu funkcję prawdopodobieństwa wystąpienia błędu dla danego formatu modulacji w zależności od zmiany parametru SNR. Obrazem wykonania takiego powiązania dla modulacji 16 i 64-QAM, wykorzystywanych w ramach eksperymentu, są krzywe obrazujące szacunkową wartość elementarnej stopy błędów BER w funkcji zmian wartości parametru EVM. Zostały one przedstawione na rys.6. Krzywe te posłużyły do wyznaczenia szacunkowej wartości BER dla każdej prowadzonej realizacji transmisji.



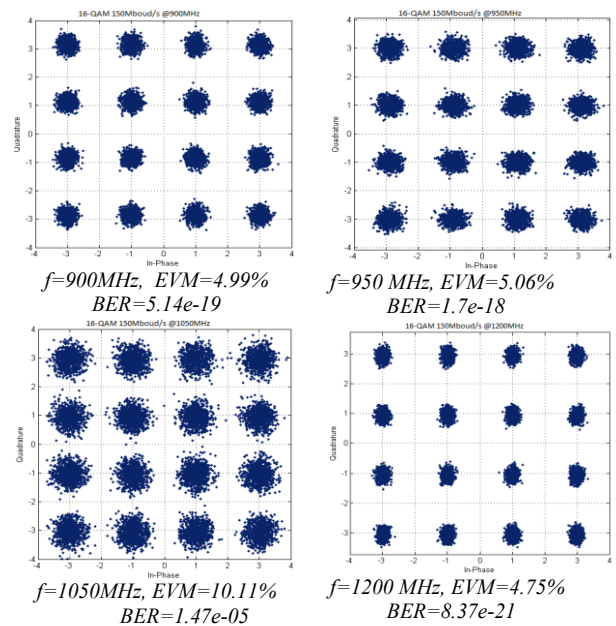
Rys. 6. Krzywe teoretycznego prawdopodobieństwa błędnej detekcji symbolu dla niezakodowanej transmisji 16 i 64-QAM w funkcji E_s/N_0 [dB] i EVM [%]

5. WYNIKI

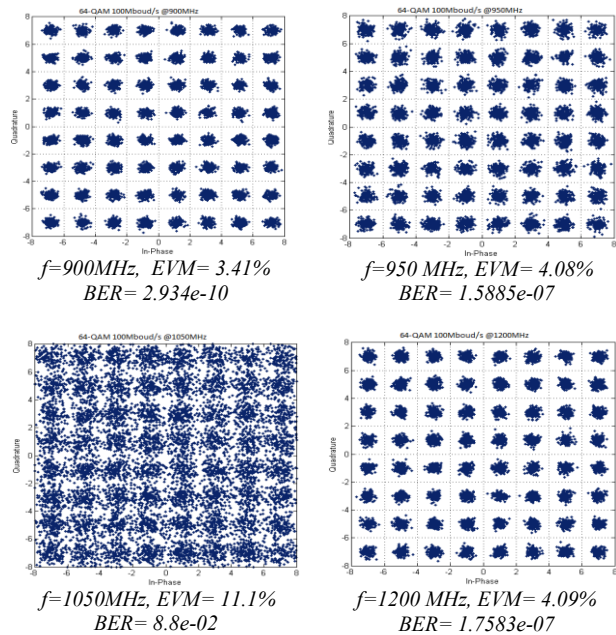
Przykładowe, uzyskane w badaniu wyniki w postaci grafu konstelacji dla symboli odebranych zamieszczono na rysunkach 7 (transmisja 16-QAM, 100Mboud/s), 8 (16-QAM, 150 Mboud/s) oraz 9 (64-QAM, 100 Mboud/s). Na rys. 10 dokonano natomiast zestawienia dla szacowanej stopy błędów BER dla obu formatów modulacji, tj. 16 i 64-QAM oraz obu szybkości modulacji (100 i 150 Mboud/s) w funkcji zmian częstotliwości kanału podnośnej w zakresie od 800 do 1500 MHz.



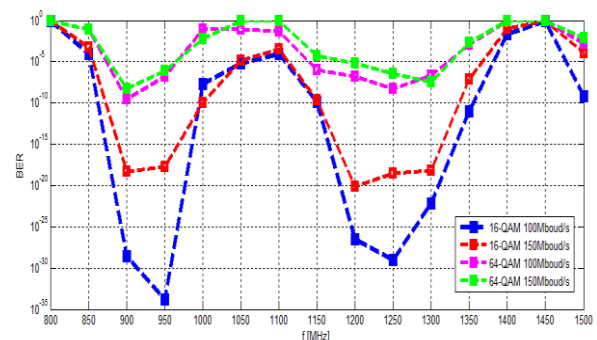
Rys. 7. Przykładowe konstelacje dla transmisji 16-QAM, 100 Mboud/s



Rys. 8. Przykładowe konstelacje dla transmisji 16-QAM, 150 Mboud/s



Rys. 9. Przykładowe konstelacje dla transmisji 64-QAM, 100 Mboud/s



Rys. 10. Zestawienie otrzymanych wyników w powiązaniu do oszacowanej elementarnej stopy błędów BER

6. Dyskusja i wnioski końcowe

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły w dużej mierze wyniki badań uzyskanych na drodze symulacji. Badania te pokazały, że bez większych przeszkód możliwym jest prowadzenie skutecznej transmisji 16-QAM nawet w przypadku systemu, którego parametry klasyfikują go w kategorii systemów „najgorszego przypadku”. Zastosowanie modulacji 16-QAM pozwala osiągnąć czterokrotny wzrost przepływności w odniesieniu do wartości jaka jest możliwa do uzyskania przy wykorzystaniu modulacji BPSK bez potrzeby zwiększenia zajętości szerokości wykorzystywanego zakresu pasma częstotliwości. Jest to bardzo istotne ze względu na fakt, że specyfika charakterystyki przenoszenia światłowodu MM poza jego pasmem podstawowym oferuje dużą liczbę pasm dodatkowych, przy względnie niewielkich ich szerokościach. Zgodnie z teorią [19] szerokość pojedynczego podpasma jest nie większa niż szerokość pasma podstawowego. Powoduje to, że jeżeli chcemy je efektywnie wykorzystać, powinniśmy tworzyć systemy z dużą liczbą dodatkowych kanałów, zajmujących relatywnie niewielkie zakresy częstotliwości. Sugeruje się tu np. realizację transmisji wielotonowej, opartej o efektywne widmowo formaty modulacji cyfrowej.

W ramach prowadzonych badań w odniesieniu do modulacji 16-QAM pokazano, że uzyskanie transmisji, charakteryzującej się elementarną stopą błędów BER poniżej 10^{-9} nie stanowi większego problemu, jeśli tylko częstotliwość kanału wyznaczanego przez częstotliwość podnośnej mikrofalowej pokrywa się z zakresem częstotliwości wypadających w obszarze „szczytu” danego podpasma. W tego typu przypadkach bez większych przeszkód uzyskiwano transmisję o wartości parametru EVM poniżej 5.5%, co zapewnia otrzymanie transmisji dla której szacunkowa wartość elementarnej stopy błędów BER jest znacznie niższa niż wymagane 10^{-9} . Oczywiście zachodzi ogromna korelacja pomiędzy możliwą do uzyskiwania jakością transmisji dla danej częstotliwości podnośnej a przebiegiem charakterystyki przenoszenia światłowodu MM. Bardzo dobrze obrazują to wyniki zestawienia dla wszystkich zbadanych przypadków zamieszczone na rys.10. Analizując to zestawienie łatwo zidentyfikować zależność, że gdy częstotliwość podnośnej wypada w obszarze gwałtownego spadku na charakterystyce przenoszenia MMF nie ma możliwości uzyskania transmisji o dobrej jakości. W przypadku transmisji z wykorzystaniem formatu modulacji 64-QAM odnotowano nawet przypadki gdy jakkolwiek jej odbiór w tego typu przypadkach był niemożliwy. Wynika to z faktu, że poziom tłumienia sygnału nośnej w zakresie tych częstotliwości był zbyt duży aby możliwym było uzyskanie wystarczającego poziomu odstepu CNR (ang. Carrier to Noise Ratio), który to przekłada się bezpośrednio na możliwą do uzyskania wartość parametru SNR w odbiorniku. Szczególnie było to odczuwalne w przypadku transmisji 64-QAM, która w porównaniu do modulacji 16-QAM wymaga zapewnienia odstepu SNR wyższego o 8 dB przy zachowaniu tej samej elementarnej stopy błędów BER= 10^{-9} i szybkości modulacji. Słabsze wyniki niż

oczekiwano w odniesieniu do transmisji 64-QAM były spowodowane tym, że moc lasera jakim dysponowano podczas badań była relatywnie niewielka, jedynie -6 dBm. Tak mała wartość mocy nadawanej nie pozwalała na osiągnięcie wymaganej wartości SNR w odbiorniku, chociaż odnotowano kilka przypadków transmisji o stopie błędów BER na poziomie 10^{-9} . Oznacza to, że dla tego typu transmisji należałoby rozważyć konieczność zastosowania np. kodowania nadmiarowego i korekcji FEC (ang. Forward Error Code). Wydaje się jednak, że w przypadku zastosowania źródła światła o większej mocy np. +6 dBm lub +10 dBm (typowe wartości mocy w optycznych systemach CATV) również dla tego typu formatu modulacji QAM możliwym byłoby prowadzenie transmisji o wysokiej jakości, wyrażonej wartością elementarnej stopy błędów BER poniżej 10^{-9} bez konieczności wprowadzania kodowania nadmiarowego.

Dokonując porównania jakości transmisji w obszarze tego samego formatu modulacji dla różnych szybkości modulacji wyniki są zgodne z oczekiwaniami. Generalnie im większa szybkość modulacji, tym większa szerokość pasma zajmowanego przez kanał a tym samym zarówno większy poziom szumu w paśmie widzianym przez odbiornik jak też większe oddziaływanie zniekształceń na charakterystyce przenoszenia MMF, a tym samym odnotowywalne pogorszenie jakości transmisji, aczkolwiek nie było ono znaczne, patrz rys.10.

Dokonując ostatecznego podsumowania wyników prowadzonych prac badawczych, można stwierdzić, że uzyskane wyniki potwierdziły możliwość stosowania efektywnych widmowo formatów modulacji w realizacji transmisji poza pasmem podstawowym światłowodu MM. Czyniąc to rozwiązanie jeszcze bardziej atrakcyjnym w kontekście jego zastosowania w systemach rzeczywis-tych. Należy jednak pamiętać, że jest to jedynie możliwe w obszarach szczytów poszczególnych podpasm. Nieunikniona jest zatem konieczność wprowadzania mechanizmów, które umożliwiają np. adaptacyjny wybór częstotliwości kanału. Przy takim podejściu bardzo dobrym, możliwym do zastosowania scenariuszem w odniesieniu do systemów rzeczywistych jest wykorzystanie transmisji wielotonowej, o dużej liczbie podnośnych, których modulacja powinna być realizowana przy wykorzystaniu wysoce efektywnych formatów modulacji takich jak QAM. W grę wchodzi tu na przykład wykorzystanie transmisji typu DMT (ang. Discrete Multitone Transmission).

PODZIĘKOWANIE

Autor serdecznie dziękuje za wsparcie finansowe udzielone ze strony Dziekana Wydziału EiT Politechniki Warszawskiej w ramach grantu 504/M/1036/0246/0286, mającego na celu wspieranie aktywności naukowej prowadzonej przez młodych naukowców.

SPIS LITERATURY

[1] C. Tatkeu, D. Loum, I. Dayoub, M. Heddebaut, J-M. Rouvaen, „Theoretical and Experimental Performances

- Evaluation of a New Multiple Access Technique for Optical Fibers”, *Interna. Jour. of Inform. Engineering*, vol. 2 Issue 3, str. 129-137, 2012
- [2] I. Dayoub, A. Zaouche, J. M. Rouvaen, C. Lethien, J. P. Vilcot and D. Decoster, “Wireless Systems Radiooptic demonstrator for distributed antenna system indoor wireless applications using low-cost VCSELs”, *European Trans. on Telecomm.*, vol. 18 Issue 7, str.811-814, 2007
- [3] R. Safaisini and all, „22 Gb/s error-free data transmission beyond 1 km of multi-mode fiber using 850 nm VCSELs”, *Proc. SPIE* 8639, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVII, 86390T, 13 March, 2013
- [4] W. van Etten and J. van der Plaats, „Fundamentals of Optical Fiber Communications”, Prentice Hall, 1991
- [5] Furukawa Electric North America (pdf), OM4 - The next generation of multimode fiber, 2012.
- [6] Hewlett-Packard Development Company, L.P., „100BASE-FX Technical Brief”, 2007
- [7] IEEE Std 802.3-2008
- [8] L. Raddatz, I.H. White, D.G. Cunningham, M.C. Nowell, „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, issue 3, str. 324-331, 1998
- [9] J. Siuzdak, L. Maksymiuk, G. Stepniak, „A 2 and 3 channel mode group diversity multiplexing transmission over graded and step index multimode fibers”, *Proc. ECOC 2008*, Brussels, Belgium, Sep. 2008, paper We.3.F.6
- [10] S. Schöllmann, N. Schrammar, W. Rosenkranz, „Experimental realization of 3x3 MIMO system with mode group diversity multiplexing limited by modal noise”, in *Proc. OFC/NCFE 2008*, San Diego, CA, Mar. 2008, paper JWA68
- [11] I. Gasulla and J. Capmany, „1 Tb/s-km Multimode fiber link combining WDM transmission and low-linewidth lasers”, *Optics Express*, vol. 16, issue 11, str. 8033-8038, 2008
- [12] H.S. Chung, S.H. Chang, K. Kim, „6 x 86 Gb/s WDM transmission over 2 km multimode fiber using center launching technique and multi-level modulation”, *Optics Express*, vol. 17, issue 10, str. 8098-8102, 2009
- [13] T. Mori, T. Sakamoto, T. Yamamoto, S. Tomita, „Coherent optical MIMO transmission over 20 km GI multi-mode fiber by using digital coherent receiver with mode convergence unit”, *Optics Express*, vol. 19, issue 17, str. 16252-16258, 2011
- [14] Y. Zhang, K. Iwashita, „MIMO transmission using SCM with modal diversity in multimode fiber systems”, 10th International Conference on Optical Communications and Networks ICOCN, str. 1-2, 2011
- [15] J. Zeng, H.P.A. van den Boom, A.M.J. Koonen, „1.25 Gb/s Subcarrier Modulated Transmission over 4.4 km 50 Multimode Fibre”, 11th European Conference on Networks and Optical Communications – NOC, str. 1-6, 2006
- [16] L. Raddatz, and I.H. White, „Overcoming the Modal Bandwidth Limitation of Multimode Fiber by Using Passband Modulation”, *IEEE Phot, Technol, Letters*, vol. 11, no. 2, str. 266-268 1999
- [17] M. Kowalczyk, J. Siuzdak, „SCM transmission in MM fiber with automatic selection of the subcarrier frequency”, *Microwave & Optical Technology Letters*, vol. 51, no 5, str. 1212-1214, 2009
- [18] Agilent, Digital Modulation in Communications Systems -An Introduction, Application Note 1298, 2006
- [19] J. Siuzdak, Ł. Maksymiuk, G. Stepniak, M. Kowalczyk, „On the frequency response of multimode fibers”, *Proceedings of the 6th IFIP International Conference on Wireless & Optical Communications Networks*, Cairo, 28-30 April 2009, IEEE 978-1-4244-3474-9/09
- [20] M.D. McKinley, K. A. Remley, M. Myslinski, J. S. Kenney, D. Schreurs, B. Nauwelaers, “EVM Calculation for Broadband Modulated Signals”, 64th ARFTG Conf. Dig., str. 45-52, Orlando, 2004
- [21] R. A. Shafik, S. Rahman, R. Islam, „On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics”, 4th International Conf. on Electrical and Computer Engineering ICECE 2006, Dhaka, Bangladesh, str.1-4, 2006