

Systemy łączności optycznej w otwartej przestrzeni

Streszczenie. W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące praktycznych możliwości zastosowania optycznej łączności w otwartej przestrzeni. Szczególną uwagę zwrócono na wskazanie jej istotnych zalet jak również ograniczeń, z uwzględnieniem właściwości innych technologii przesyłania danych. Wskazany też został potencjał łączy optycznych w odniesieniu do rozwoju technologii 5G. W głównej części przedstawiono informacje dotyczące realizowanego projektu pt. „Hybrydowe łącze otwartej przestrzeni” realizowanego w ramach 8 konkursu NCBiR z zakresu obronności i bezpieczeństwa państwa. Opisana została koncepcja budowy tego łącza z uwzględnieniem właściwości zastosowanych źródeł promieniowania i modułów detekcyjnych pracujących w zakresie 8-12 μm . W części eksperymentalnej omówiono wyniki testów dotyczących funkcjonalności łącza hybrydowego oraz pracy w różnych warunkach pogodowych. Przeprowadzone obliczenia numeryczne umożliwiły oszacowanie SNR opracowywanego laserowego kanału przesyłania danych.

Abstract. The paper presents some analyses of practical applications of free space optical communications. Its advantages as well as limitations are described comparing with other data transfer technologies. The potential of FSO links in relation to the development of 5G technology has also been indicated. The main part of the paper presents some preliminary tests results of RF/FSO hybrid data link constructed for the purposes of national defense and security. The concept of the construction is based on use of radiation sources and photodetection modules operated in the spectral range of 8-12 μm . The performed tests of this hybrid link have confirmed its functionality and ability to work in different weather conditions. The numerical calculations made it possible to estimate the SNR value of the developed optical transmission channel. (**Free-space laser communications**).

Słowa kluczowe: łączność laserowa, Free Space Optics, kwantowe lasery kaskadowe, łącza hybrydowe, technologia 5G

Keywords: laser communication, Free Space Optics, quantum cascade lasers, hybrid data links, 5G technology

Wprowadzenie

Wdrażanie technologii FSO w cywilnych i wojskowych infrastrukturach komunikacyjnych było bardzo powolne. Wysoki koszt ich budowy w połączeniu z dość wysokim tłumieniem sygnału wczesnych systemów FSO stanowiły poważne bariery dla ich powszechnego użycia. Jednak ze względu na ich dużą przepustowość oraz brak wymagań dotyczących widma promieniowania, systemy te były i są nadal rozwijane. Rozwój zaawansowanych technologii elementów optoelektronicznych, technik oprogramowania oraz platform sprzętowych przyczyniły się do znaczącej poprawy parametrów tych łączy. Przykładowo, systemy hybrydowe RF/FSO, mają zwiększoną dostępność do 99,999% nawet w niesprzyjających warunkach atmosferycznych.

Historia łączności optycznej otwartej przestrzeni

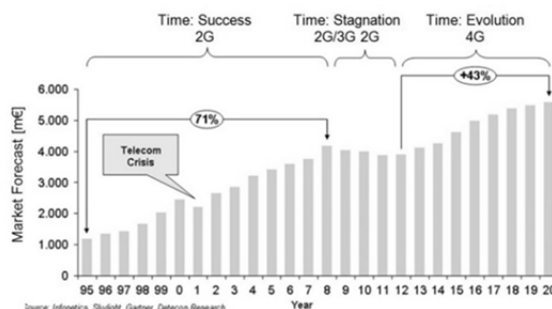
Komunikacja optyczna jest jedną z najwcześniejszych stosowanych form komunikacji. Na początku odbywała się ona na bardzo krótkie odległości np. przy użyciu rąk i ramion. Gdy pojawiła się potrzeba komunikacji na duże odległości, w szczególności odległości poza zasięgiem słyszalności, opracowano bardziej zaawansowane formy komunikacji optycznej. Na początku używano ognia, dymu lub światła słonecznego. Powstała również komunikacja optyczna w postaci semafora lub telegrafu optycznego. Wynalezienie teleskopu optycznego znacznie zwiększyło zasięg przesyłania informacji. Technika ta odgrywała istotne znaczenie we Francji za czasów Napoleona Bonaparte. W kolejnym etapie rozwoju, telegraf optyczny został zastąpiony telegrafem elektromagnetycznym i był używany w niektórych krajach aż do początku XX wieku [1]. Przykładowo, układ transmitujący kod Morse'a odbijając światło słoneczne, był używany przez pakistańskie wojsko do roku 1975 [2].

Do tej pory stosowane są proste techniki przesyłania informacji przy zastosowaniu lampek sygnalizacyjnych w marynarce wojennej, w systemach kontroli lotów do komunikowania się z pilotami w przypadku awarii łączności radiowej. Pierwsza udana transmisja głosu w wiązce światła na odległości 200 m nastąpiła w 1881 roku za pomocą wynalazku zwanego fotofonem opracowanego przez A.Bella i Ch. Taintera. Można zatem stwierdzić, że fotofon był

pierwszym urządzeniem FSO. Wynalezienie lasera wzbudziło ogromne zainteresowanie rozwojem tej technologii w latach 60. i 70. Jednak opracowanie światłowodów w latach 80. przyczyniło się do zmniejszenia zainteresowania rozwojem systemów FSO. Ponownie technologie FSO zaczynają się rozwijać ze względu na ich stosunkowo mały koszt, szybki czas konfiguracji, dużą przepustowość i wydajność. Pod koniec lat 90. i na początku XXI wieku pojawiły się komercyjne systemy FSO [3]. Najczęściej były one stosowane do rozwiązania problemu łączności tzw. „ostatniej mili”. Wykorzystanie systemów FSO zapobiegało dużym stratom sygnału wynikającym z użycia infrastruktury przewodowej [3]. Natomiast na terenach od dawna zamieszkałych, tylko niewielki procent budynków ma dostęp do szkieletu sieci światłowodowej. Porównując komunikację FSO z komunikacją radiową, należy pamiętać, że są to dwie odrębne technologie, które mają swoje zalety i wady. Wszystkie właściwości będą jednoznacznie definiowały możliwą do zastosowania technologię w oparciu o analizę kosztu, pasma, dostępności, wymagań bezpieczeństwa oraz środowiska pracy.

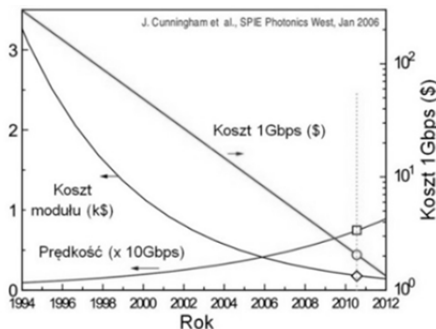
Zastosowanie

Zastosowanie promieniowania optycznego (o dużej częstotliwości) umożliwia szybką modulację, która przekłada się na dużą szerokość pasma, zdecydowanie lepszą niż większość technologii RF. Na rysunku 1 przedstawiono ewolucję systemów łączności bezprzewodowej z uwzględnieniem kierunku ich dalszego rozwoju.



Rys. 1. Rozwój technologii łączności bezprzewodowej [4]

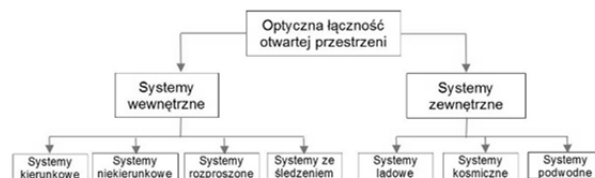
Większość dostępnych na rynku systemów FSO może pracować z szybkością około 1 Gb/s, a standard 2,5 Gb/s staje się coraz powszechniejszy. Pojawiły się publikacje, w których podaje się prędkości przesyłania danych dochodzące do Tb/s [5]. Główną zaletą stosowania FSO jest to, że nie są wymagane licencje. Dzięki temu oszczędza się potencjalnym użytkownikom kłopotów związanych z licencjonowaniem widma częstotliwości. Jedyną regulacją dotyczy użycia lasera, która określa bezpieczne użytkowanie tych źródeł z uwzględnieniem ogólnodostępnych przepisów i norm. Należy zauważyć, że wraz z rozwojem technologii FSO koszty jej komercyjnego wdrożenia zbliżyły się do około 1 USD za 1 Gbps – rys. 2 [6].



Rys. 2. Koszty wdrożenia technologii FSO

Wycena ta dotyczy jedynie prostych, stacjonarnych systemów FSO (np. LiFi). Natomiast nakłady finansowe przeznaczone na te systemy działające na dużych odległościach, w trudnych warunkach i/lub na mobilnych platformach wciąż są bardzo wysokie. Przykładowo, firma Communications Supply reklamuje łącze FSO 10 Gb/s przeznaczone do pracy na odległości 1,5 mil za kwotę 43 300 £ [7]. W jednym wypadku okazało się, że koszty zastosowania światłowodu, do obsługi trzech budynków, wyniosły 396 500 USD, natomiast koszty FSO jedynie 59 000 USD [3]. W łączności FSO są stosowane źródła emitujące promieniowanie w zakresie podczerwieni i pasma widzialnego. Istnieje kilka możliwych zastosowań takich systemów. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: połączenia naziemne lub między-satelitarne, kosmiczne lub połączenia ziemia-satelita/satelita-ziemia. Znajdują one również zastosowanie w teledetekcji, radioastronomii, wojsku, transmisji ostatniej mili, jako łącza awaryjne do bezprzewodowych sieci komórkowych i w wielu innych. W wielu wypadkach możliwości aplikacyjne systemów FSO są ograniczone przez niekorzystne efekty absorpcji, rozpraszania i turbulencji występujące w torze optycznym (atmosferze). Zatem, systemy łączności optycznej w otwartej przestrzeni można podzielić na dwie zasadnicze grupy: wewnętrzne i zewnętrzne. Wewnętrzne systemy FSO są przeznaczone do komunikowania się w budynkach, w których utrudnione jest zastosowanie tradycyjnych połączeń przewodowych [8]. W literaturze wyróżnia się cztery konfiguracje takich systemów: kierunkowe (*line-of-sight* LOS), niekierunkowe, rozproszone i ze śledzeniem. W zewnętrznych systemach FSO można ponadto wyróżnić: systemy lądowe (*terrestrial*), wodne (*underwater*) i kosmiczne (*space*) - rys. 3. Obejmują one łącza typu budynek-budynek, ziemia-satelita, satelita-ziemia, satelita-satelita, satelita-powietrzna platforma. Platformę powietrzną mogą stanowić bezzałogowe statki powietrzne (*unmanned aerial vehicle*, UAV) lub balony [9].

Niedawno wprowadzono także hybrydowe systemy FSO i RF. Umożliwiają one zwiększenie dostępności łącza w niekorzystnych warunkach atmosferycznych. W większości wypadków, łącze FSO jest wyposażone w przystawkę realizującą połączenie radiowe.



Rys. 3. Podział systemów FSO

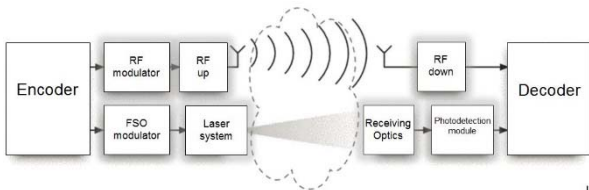
Oczekuje się, że w najbliższym czasie sieci komórkowe ulegną zasadniczej transformacji ze względu na rosnące zapotrzebowanie na mobilne usługi transmisji danych. W celu zwiększenia m.in. przepływności, gęstości pokrycia i energetycznej efektywności powstaną sieci mobilne nowej generacji (5G) [10]. Opierać się one będą na sieci punktów dostępowych o różnych rozmiarach, tj. mikro-komórki, piko-komórki, femto-komórki, itp. Duża ilość tych komórek wymaga jednak znacznej przepływności łącza dosyłowego [11]. Konieczna jest zatem modernizacja tego łącza w celu zwiększenia możliwości przesyłania olbrzymiej ilości danych. Tradycyjne technologie projektowania łączy dosyłowych obejmują połączenia przewodowe, mikrofalowe łącza radiowe i światłowodowe. Linie przewodowe zapewniają szybkości transmisji danych 1,544 Mb/s i 2,048 Mb/s, które są wystarczające do przesyłania informacji głosowych w sieciach 2G. Jednak dla technologii 3G i kolejnych generacji wymagane jest zrównoleglenie tych połączeń, zatem cena okablowania rośnie liniowo wraz z przepustowością. Linie przewodowe są kosztowne, wobec czego nie one są odpowiednim rozwiązaniem dla systemów łączności kolejnej generacji, tj. 5G. Technologie radiowe są najczęściej stosowane w projektowaniu sieci dosyłowych. Wymagają one jednak opłat licencyjnych, ponadto dla fal radiowych o małej częstotliwości (poniżej 6 GHz) zapewniają małą szybkość transmisji danych. Zastosowanie fal o wyższych częstotliwościach (mikrofalowych i milimetrowych z zakresu do 300 GHz) powoduje zmniejszenie zasięgu ze względu na występujące w tym pasie zakłócenia. Ostatnia technologia tworzy światłowodowe łącza dosyłowe. Obecnie zapewniają one najwyższe prędkości przesyłania danych na dużych odległościach [12]. Jednakże ich instalacja jest kosztowna, a czasami niemożliwa do realizacji ze względu na ograniczenia praktyczne lub nawet prawne.

Podsumowując należy stwierdzić, że zastosowanie łączy FSO nie wiąże się z żadnymi opłatami licencyjnymi i zwiększa odporność sieci na zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez inne urządzenia elektroniczne lub istniejące połączenia radiowe. Właściwości te sprawiają, że są one do 25 razy bardziej wydajne niż łącza RF [10]. Technologia FSO jest również mniej kosztowna w porównaniu z systemami światłowodowymi, dlatego też jest ona często rozpatrywana jako nowe rozwiązanie dla sieci 5G [13].

Warto jednak zaznaczyć, że łącza FSO są wrażliwe na warunki pogodowe. Dlatego też, aby zwiększyć ich niezawodność pracy stosuje się konfigurację hybrydową kanału optycznego i radiowego. Konfiguracja ta łączy zalety technologii RF (niezawodność) i FSO (przepustowość). Staje się ona bardzo atrakcyjnym, opłacalnym i niezawodnym rozwiązaniem dla sieci 5G. Przykładowo, system RF/FSO może przesyłać dane jednocześnie w obu kanałach lub też wyłącznie w kanale RF, gdy pojawiają się np. gorsze warunki pogodowe. Systemy te mogą być również szybko rozmieszczone na odległości kilku kilometrów współpracując jednocześnie z sieciami światłowodowymi [14].

Projekt hybrydowego łącza otwartej przestrzeni Wprowadzenie

Geneza powstania projektu wiąże się ściśle z pracami dotyczącymi systemów łączności otartej przestrzeni prowadzonymi w Instytucie Optoelektroniki WAT od 2002 r. W ramach tych prac opracowano modele demonstracyjne łącza pracujących w zakresie długości fal 880 nm oraz 1,55 μm . Dynamiczny rozwój technologii optoelektronicznych związanych ze źródłami i detektorami promieniowania optycznego umożliwił także opracowanie łącza FSO pracującego w zakresie widmowym 8-12 μm [15]. W ramach współpracy z ośrodkami naukowymi takimi jak Instytut Technologii Elektronowej, Instytut Fizyki Technicznej oraz firmami VIGO System S.A. oraz KenBIT Sp. j., powstała również idea opracowania łącza hybrydowego FSO/RF. Idea ta została przedstawiona na spotkaniu grupy eksperckiej NATO ACT w Norfolk w maju 2015 r. W roku 2016 został złożony wniosek o finansowanie projektu w ramach 8 konkursu NCBiR w obszarze obronności i bezpieczeństwa państwa pod nazwą „Hybrydowe łącze otwartej przestrzeni”. Wniosek ten został pozytywnie oceniony i uzyskał finansowanie. Głównym celem tego projektu jest uzyskanie nowych zdolności systemów łączności, które dotyczą zwiększonego poziomu mobilności przy zapewnieniu większej dostępności i bezpieczeństwa transmisji danych. Będą one osiągnięte poprzez opracowanie demonstratora technologii hybrydowego systemu łączności bezprzewodowej składającego się z łącza laserowego pracującego w zakresie widmowym ok. 8-12 μm oraz toru radiowego (rys. 4). Opracowany zostanie także unikatowy zestaw urządzeń komunikacyjnych umożliwiający nie tylko podłączenie demonstratora do sieci teleinformatycznej, ale również oferujących opcje związane z konfiguracją poszczególnych kanałów transmisyjnych, analizą jakości przesyłania danych w tych kanałach oraz ich kodowaniem.



Rys. 4. Schemat blokowy łącza hybrydowego

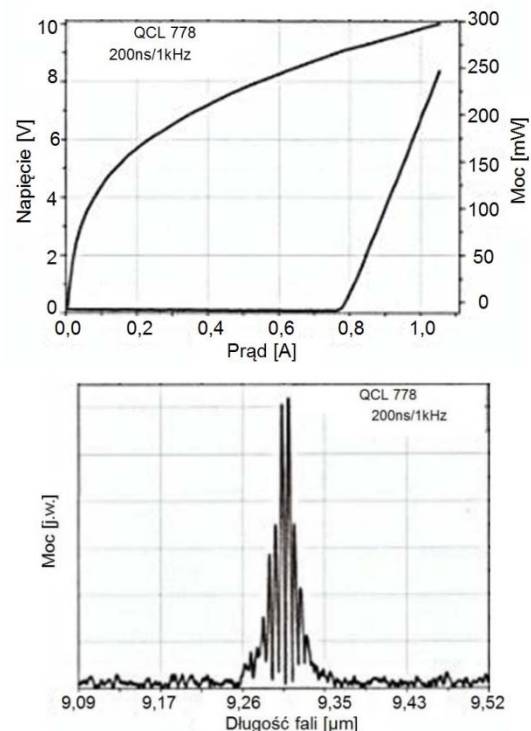


Rys. 5. Schemat blokowy toru nadawczego FSO

Model laboratoryjny

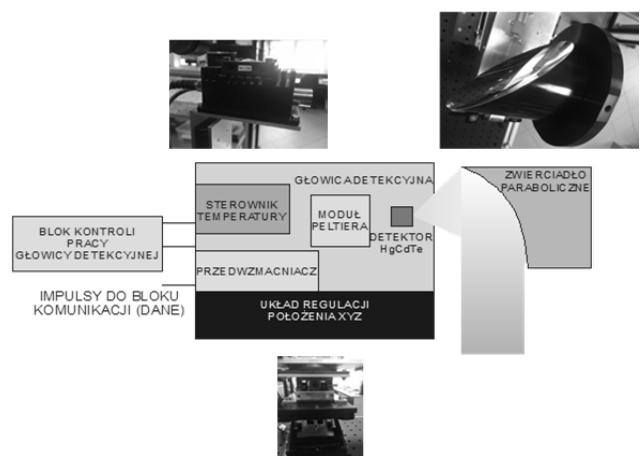
Koncepcja modelu laboratoryjnego systemu FSO/RF zakładała zastosowanie kanału laserowego oraz komercyjnie dostępnego radiowego kanału WiFi. Opracowany tor laserowy składa się z dwóch zasadniczych elementów: układu nadawczego oraz układu odbiorczego. Głównymi elementami układu nadawczego są głowica

laserowa z kwantowym laserem kaskadowym, sterownik prądowy lasera, sterownik temperatury, układ chłodzenia wodnego oraz układ optyczny (rys. 5). Kwantowy laser kaskadowy został opracowany w Instytucie Technologii Elektronowej przez zespół Pana Prof. M. Bugajskiego. Umożliwia on generację impulsów laserowych o długości fali ok. 9,3 μm (rys. 6).



Rys.6. Charakterystyki zastosowanego w systemie FSO kwantowego lasera kaskadowego

Badania parametrów czasowo-energetycznych promieniowania laserowego wykazały, że optymalną moc impulsów uzyskuje się przy maksymalnej częstotliwości 1 MHz i dla czasu trwania impulsu 10 ns. Dane te uwzględniono wstępnie dla przyjętego sposobu modulacji: PPM-5. Biorąc pod uwagę parametry geometryczne wiązki laserowej zdecydowano się w układzie optycznym nadajnika zastosować pozaosiowe zwierciadło paraboliczne o wymiarach 76,2 x 50,8 mm EFL. Schemat blokowy układu odbiorczego systemu FSO przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat blokowy odbiornika FSO

Układ ten składa się z modułu detekcyjnego oraz zwierciadła optycznego. W module detekcyjnym

zastosowano detektor serii PVI-IV firmy VIGO System S.A. charakteryzujący się wykrywalnością $D^* = 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ oraz pasmem sygnałowym $\Delta f = 620 \text{ MHz}$.

W torze radiowym zastosowano komercyjne urządzenia WiFi pracujące w paśmie 2,4 GHz - Groove 52HPn firmy Mikrotik.

Konstrukcja mechaniczna modelu FSO umożliwia nie tylko regulację osi optycznej nadajnika oraz odbiornika w kierunku X, Y oraz θ , ale również dokładne pozycjonowanie obszaru aktywnego lasera i powierzchni fotoczułej modułu detekcyjnego względem ogniska zastosowanych zwierciadeł parabolicznych. Widok modelu laboratoryjnego hybrydowego łącza przedstawiono na rys. 8.

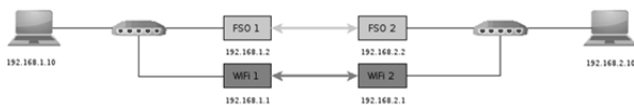


Rys. 8. Widok modelu laboratoryjnego łącza hybrydowego

Testy modelu laboratoryjnego

Wstępne testy modelu laboratoryjnego łącza hybrydowego wykonano w dwóch etapach. W pierwszych krokach przeprowadzono analizę funkcjonalności łącza w laboratoryjnych warunkach pracy. Następnie oceniono poprawność działania kanału laserowego w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

W ramach testów sprawdzono m.in. stopę błędów łącza optycznego, łączność pomiędzy komputerem a hybrydowym łączem bezprzewodowym, transmisję danych poprzez interfejs optyczny i/lub interfejs bezprzewodowy WiFi, oraz automatyczne przełączanie ruchu pomiędzy tymi interfejsami. Badania przeprowadzono wykorzystując komputery z zainstalowanym systemem linux (Debian) oraz dwa urządzenia sieciowe typu switch CISCO WS-C3560X-12PC-S – rys. 9. Na komputerach zostało zainstalowane oprogramowanie netperf oraz netserver

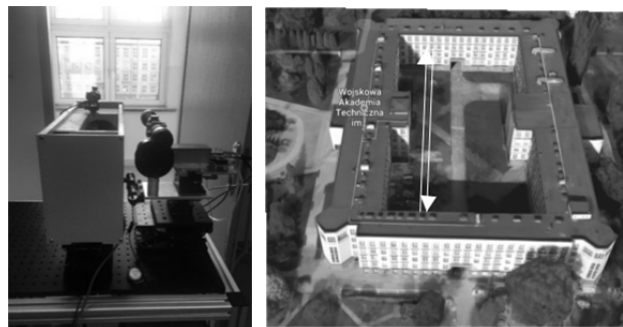


Rys.9. Schemat układu testowego

Wyniki testów wykazały osiągnięcie pełnej poprawności zaimplementowanych funkcjonalności. Wysyłając 10 pakietów testowych nie stwierdzono błędów. Uzyskana prędkość dla kanału laserowego wyniosła 4,5 Mb/s, natomiast dla kanału radiowego 10 Mb/s. Sprawdzenie automatycznego przełączania ruchu pomiędzy interfejsem radiowym i optycznym przeprowadzono analizując tablice routingu na bezprzewodowych łączach poprzez wykonanie stosownych poleceń w programie vtsh.

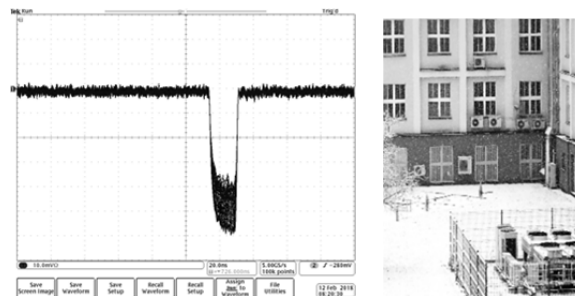
Analizowane trasy routingu wskazywały automatyczne przełączanie ruchu pomiędzy interfejsem radiowym a optycznym (odłączenie zasilania modemu WiFi) oraz optycznym a radiowym (zasłonięcie apertury wejściowej odbiornika).

Testy, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, przeprowadzono w obszarze (dziejni) budynku głównego WAT – rys. 10. W laboratorium umieszczono układ nadawczo-odbiorczy. Wiązka promieniowania laserowego, poprzez otwarte okno, została skierowana w kierunku fasady przeciwległej części budynku. Promieniowanie optyczne po odbiciu od przeciwległej ściany było rejestrowane w fotoodbierniku.



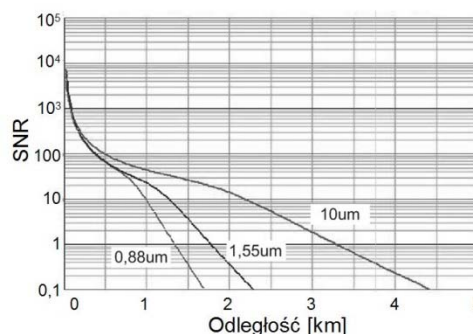
Rys.10. Widok warunków pomiarowych

Przeprowadzono pomiary amplitudy zarejestrowanych impulsów laserowych, dla różnych warunków atmosferycznych. Zauważono spadek amplitudy impulsów w wypadku pojawienia się opadów śniegu (rys. 11).



Rys.11. Warunki pomiarowe oraz zarejestrowanych impulsów promieniowania laserowego

Na podstawie znanych parametrów nadajnika i odbiornika, oraz dla założonych warunków atmosferycznych (widzialność, turbulencje), przeprowadzono analizę stosunku sygnału do szumu toru FSO. Na rysunku 12 przedstawiono przykładową charakterystykę zmian wartości SNR dla widzialności $Vis = 1 \text{ km}$, współczynnika $Cn^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ oraz trzech wartości długości fali.



Rys. 12. Przykładowa charakterystyka SNR dla widzialności $Vis = 1 \text{ km}$ oraz współczynnika $Cn^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

Obliczenia wykazały, że opracowany tor laserowy charakteryzuje się lepszym SNR aniżeli podobne układy pracujące w zakresie bliskiej i krótkiej podczerwieni. Poprawa SNR ma istotne znaczenie zwłaszcza w systemach FSO pracujących na dużych odległościach.

Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę możliwości zastosowania łączności optycznej otwartej przestrzeni w wielu dziedzinach życia i obszarach techniki. Analizy te wskazały na duży potencjał tej technologii w rozwoju mobilnych systemów przesyłania danych, np. sieci 5G. Przedstawiono również koncepcję hybrydowego łącza zbudowanego z dwóch kanałów transmisji danych. Kanał radiowy wyposażono w komercyjny zestaw WiFi, natomiast kanał optyczny został opracowany w ramach prowadzonych prac badawczych. Unikalną cechą toru optycznego jest jego zakres widmowy obejmujący (8-12) μm . Przeprowadzone testy wykazały, że dzięki przyjętej konfiguracji można uzyskać zwiększenie dostępności łącza. Ponadto, opracowane łącze optyczne charakteryzuje się znacznie większym zasięgiem pracy w gorszych warunkach pogodowych w porównaniu z komercyjnie dostępnymi urządzeniami FSO, w których wykorzystuje się promieniowanie z zakresu bliskiej i krótkiej podczerwieni.

Praca zrealizowana w ramach projektu pt. „Hybrydowe łącze otwartej przestrzeni” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (nr umowy DOB-BIO8/01/01/2016).

Autorzy: dr inż. Janusz Mikołajczyk Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, dr inż. Dariusz Szabra Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa

LITERATURA

- [1] B. Lundy, *Telegraph, telephone, & wireless: how telecom changed the world*. Booksurge, 2008.
- [2] D. Harris, "Wire at War: Signals communication in the South African War," *Mil. Hist. J.*, vol. 11, pp. 28–31, 1998.
- [3] Free-space optical communication system 'the last mile leap' a wireless solution for last mile optical connectivity in a fiber optic network." [Online]. Available: <http://www.oocities.org/virag81/freespaceoptics.html>.
- [4] H. Haan and M. Tausendfreund, "Free-space optical data transmission for military and civil applications: A company report on technical solutions and market investigation," in *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2013.
- [5] E. Ciaramella *et al.*, "1.28-Tb/s (32 × 40 Gb/s) Free-Space Optical WDM Transmission System," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 21, no. 16, pp. 1121–1123, 2009.
- [6] J. Cunningham *et al.*, "Overview of short-reach optical interconnects: from vcsels to silicon nanophotonics."
- [7] Communications Supply FSO price." [Online]. Available: <http://www.communicationsupply.com>.
- [8] J. B. Carruthers and J. M. Kahn, "Angle diversity for nondirected wireless infrared communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 6, pp. 960–969, 2000.
- [9] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 1. pp. 57–96, 2017.
- [10] J. G. J. G. Andrews *et al.*, "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [11] F. Boccardi, R. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, 2014.
- [12] O. Tipmongkolsilp, S. Zaghoul, and A. Jukan, "The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 13, no. 1, pp. 97–113, 2011.
- [13] F. Demers, H. Yanikomeroglu, and M. St-Hilaire, "A survey of opportunities for free space optics in next generation cellular networks," in *Proceedings - 2011 9th Annual Communication Networks and Services Research Conference, CNSR 2011*, 2011, pp. 210–216.
- [14] V. W. S. Chan, "Free-Space Optical Communications," *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4750–4762, 2006.
- [15] J. Mikołajczyk *et al.*, "Analysis of Free-Space Optics Development," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 24, no. 4, Dec. 2017.