

Stanisław RAJBA, Alan LIPIŃSKI-KEMPYS

AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA
Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

Dwufalowe łącze optyczne**Dr inż. Stanisław RAJBA**

Adiunkt Katedry Elektrotechniki i Automatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora uzyskał w 1985 r. na Politechnice Wrocławskiej. Specjalizuje się w zagadnieniach transmisji informacji w systemach telekomunikacyjnych i sieciach komputerowych. Zajmuje się także techniką światłowodową.



e-mail: rajbas@ath.bielsko.pl

Inż. Alan LIPIŃSKI-KEMPYS

Absolwent kierunku Informatyka na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Specjalność telekomunikacja.



e-mail: lipinski.alan@gmail.com

Streszczenie

Przedmiotem pracy jest analiza warunków pracy łączy optycznych w otwartej przestrzeni. Przedstawiono podstawowe uwarunkowania poprawnej pracy takich łączy. W oparciu o pewne doświadczenia eksploatacyjne z tego zakresu i na podstawie przedstawionej analizy zaproponowano koncepcję łącza dwufalowego, wskazując na wybrane długości fal do pracy łącza. W podsumowaniu wskazano na właściwości tego typu rozwiązań komunikacyjnych i na pola ich zastosowań w technice przesyłania informacji.

Słowa kluczowe: FSO (Free Space Optics), bezprzewodowe łącza w podczerwieni, transmisja optyczna, optolinia.

Dual wavelength optical link**Abstract**

The demand for implementation of digital data transmission lines in various topographies and field conditions is increasing. Such diversity requires many original solutions. Certainly one of the solutions are links that use free space to transmit information on optical wavelengths. The idea is not new, but the new optical and electronic technologies make this possible. The subject of investigations is to analyze the working conditions of optical links in open spaces. The issue is known in the literature as Free Space Optics Communication (FSO). In this paper there are presented the basic conditions for correct work of such links. On a basis of certain operating experience in this field and the presented analysis there was proposed the concept of a dual wavelength link with indicating the selected length waves for the link work. In the summary there are described the properties of such solutions in the fields of communications and their applications to information transmission technology.

Keywords: FSO (Free Space Optics), wireless infrared links, optical transmission, optolink.

1. Wstęp

Transmisja optyczna w otwartej przestrzeni (ang. Free Space Optics) wykorzystuje promieniowanie w zakresie podczerwieni do komunikacji pomiędzy dwoma stałymi punktami [1]. Najistotniejszym zagadnieniem w komunikacji wykorzystującej fale z zakresu podczerwieni są własności toru przesyłowego, czyli wpływ warunków atmosferycznych na tłumienie sygnału optycznego (opady deszczu, mgła, zadymienie, zapylenie, przelatujące ptaki). Na tłumienie sygnału optycznego najbardziej wpływa występowanie gęstych mgieł, ulewnych deszczy, zapylenia oraz w mniejszym stopniu miejski smog. Najlepsze warunki dla transmisji FSO można uzyskać w strefach klimatycznych, gdzie w skali roku występuje jak najmniejsza wilgotność powietrza, np. na terenach pustynnych. Jak wynika z analizy rynku aktualnie sprzedawanych produktów, na chwilę obecną sprzedawane są systemy pozwalające uzyskać zasięg nawet w granicach do 6 km, przy czym jest to zasięg uzyskiwany tylko w przypadku występowania idealnych warunków pogodowych. Maksymalny zasięg rzeczywisty dla klimatu umiarkowanego to mniej niż 1 km dla transmisji z prędkością

do 1,5 Gbit/s [2]. Produkowane obecnie łącza optyczne działają na długościach fal z zakresu bliskiej podczerwieni (780 nm, 850 nm, 980 nm, 1300 nm, 1550 nm) [3, 4, 5, 6].

W pracy przedstawiono analizę tłumienia sygnału optycznego w zależności od warunków atmosferycznych dla różnych długości fal z zakresu podczerwieni. Przedstawiono także wyniki pomiarów jakości transmisji w optolinii będące rezultatem kilkuletniej eksploatacji optolinii SkyCom w rejonie Bielska-Białej. Na podstawie zebranych doświadczeń proponujemy nowe rozwiązanie polegające na pracy przy dwóch długościach fal odpowiednio dobranych, na podstawie przedstawionej analizy.

2. Analiza warunków propagacji w otwartej przestrzeni w zakresie podczerwieni

Propagacja fal z zakresu bliskiej podczerwieni w atmosferze jest ściśle uzależniona od długości fali, na której odbywa się transmisja oraz występujących warunków atmosferycznych. Ograniczenie widoczności (zwłaszcza mgła) ma zasadniczy wpływ na tłumienie między nadajnikiem i odbiornikiem optolinii. Zagadnienie to stanowi fundamentalny problem w tworzeniu stabilnych połączeń optycznych. Dlatego też problem tłumienności atmosfery w zakresie różnych długości fal został wielokrotnie przebadany i przeanalizowany m.in. w [7, 8] oraz [9-16]. Zagadnienie tłumienności atmosfery w transmisji optycznej ma bardzo złożony charakter i dlatego jest nadal przedmiotem wielu badań. Na podstawie dotychczasowej wiedzy wiemy, że nawet nieznaczne wahania warunków pogodowych są w stanie istotnie wpłynąć na pracę łącza optycznego. Wpływ ten wygląda różnie dla różnych długości fal w zakresie podczerwieni.

Aby transmisja optyczna punkt-punkt była możliwa, tłumienność pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem nie powinna być większa niż około 40 dB. Oczywiście będzie to różnie dla różnych urządzeń tego typu, co jest głównie uwarunkowane mocą źródła promieniowania i czułością odbiornika, którego zasadniczym elementem jest fotodetektor dopasowany do długości fali emitowanej przez nadajnik [7]. Przyjmuje się dla urządzeń obecnie produkowanych, że przy tej wartości tłumienności możliwe jest uzyskanie komunikacji o ograniczonym występowaniu błędów w transmisji.

Istotnym elementem przy budowie łącza FSO jest staranne przeanalizowanie warunków klimatycznych typowych dla regionu planowanej optolinii i dystansu, na jakim ma pracować łącze. Może się okazać, że na terenach, gdzie ograniczenia widoczności występują zbyt często w skali roku, budowa stabilnego łącza FSO jest nierealna, zwłaszcza w przypadku budowy łącza o wymaganym zasięgu większym niż 500 m.

Na podstawie badań przedstawionych m.in. w [9, 11, 13, 15, 16], wynika bezpośrednio, że występowanie mgły na drodze między nadajnikiem a odbiornikiem powoduje największe tłumienie sygnału. Wartości tłumienności w zależności od widoczności (a więc gęstości mgły) ilustruje tab. 1 opracowana na podstawie badań zawartych w [9].

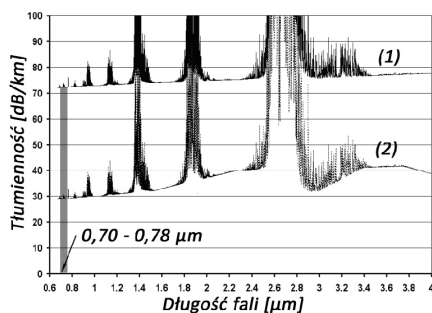
Tab. 1. Tłumienność w zależności od zasięgu widzenia podczas mgły, dla fal o długości $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Tab. 1. Attenuation depending on the range of vision in fog, for the wavelength $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Opis	Zasięg widoczności [m]	Tłumienność [dB/km]
Ekstremalna mgła	40-70	250-143
Gęsta mgła	70-250	143-40
Umiarkowana mgła	250-500	40-20
Słaba mgła	500-1000	20-9,3
Mgielka	1000-2000	9,3-4,0

Wiadomo, że występowanie mgieł na terenie Polski położonej w strefie klimatu umiarkowanego nie jest rzadkością. Należy spodziewać się dużego tłumienia transmitowanego sygnału w czasie występowania mgły [15]. Zauważono jednak [12], że podczas występowania różnych rodzajów mgły (w różnym stopniu ograniczających widoczność) dla każdej z nich możliwe jest uzyskiwanie różnych poziomów mocy sygnału na odbiorniku – w zależności od długości fali, na której pracuje dane łącze. Wyniki tych badań są podstawą do przedstawienia nowej koncepcji optolinii wyposażonej w niezależne łącza pracujące na kilku długościach fal w jednej parze urządzeń.

Wyniki badań [12] tłumienności atmosfery w zakresie podczerwieni podczas występowania dwóch rodzajów mgły zilustrowano na rys. 1 (dla fal bliskiej podczerwieni) i rys. 2 (dla fal średniej podczerwieni). Na rys. 3 przedstawiono tłumienność atmosfery dla średniej i dalekiej podczerwieni przy mgle ograniczającej widoczność do 100 m.

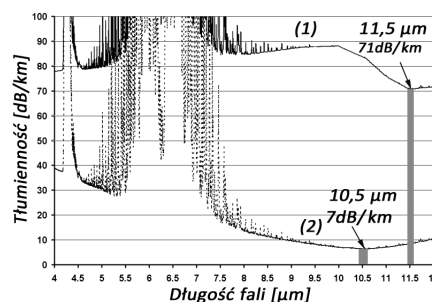


Rys. 1. Tłumienność atmosfery w zakresie długości fal 0,5-4 μm dla dwóch rodzajów mgły: charakterystyka (1) – intensywna mgła ograniczająca widoczność do 200 m, charakterystyka (2) – mgła ograniczająca widoczność do 500 m. Zaznaczono zakres o najmniejszej tłumienności (0,70-0,78 μm)

Fig. 1. Atmospheric attenuation in the wavelength range 0.5-4 μm for two kinds of fog: characteristic (1) - intensive fog limiting visibility to 200 m, characteristic (2) - fog limiting visibility to 500 m. The selected range of lowest attenuation (0,70-0,78 μm)

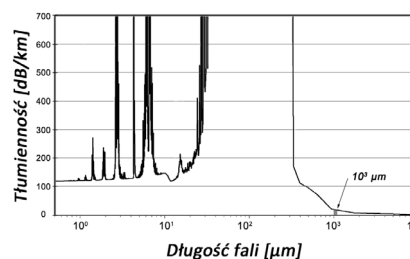
Jak wynika z charakterystyki (1) na rys. 1, podczas gęstej mgły transmisja na odległość 1 km jest niemożliwa, gdyż tłumienie atmosfery oscyluje w zakresie 72-78 dB w oknach falowych (lokalne minimum tłumienności występuje dla fal z zakresu 0,7-0,78 μm). Wartość tłumienności stopniowo wzrasta do ~78 dB/km, wraz ze zwiększeniem długości fali (analizując jedynie zakres okien falowych, gdyż poza nimi tłumienność przekracza wartość 100 dB/km). Maksymalny zasięg transmisji w niniejszych warunkach pogodowych jest nie większy niż 400-500 m.

W wypadku występowania bardzo gęstej mgły, charakterystyka (1) na rys. 2 wskazuje, że transmisja na odległość 1 km jest również niemożliwa (dla okien falowych o najmniejszej tłumienności i tak tłumienie przekracza wartość 70 dB/km w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni). Dopiero na granicy dalekiej podczerwieni i mikrofal tłumienie przez atmosferę spada do niskich wartości umożliwiających utrzymanie łączności na omawianych dystansach – rys. 3. Interesujące są wyniki pomiarów dla umiarkowanej mgły, (charakterystyka (2) na rys. 2). Okazuje się, że występuje lokalne minimum tłumienności dla długości fali 10,5 μm i ma ono wartość poniżej 10 dB/km.



Rys. 2. Tłumienność atmosfery w zakresie długości fal 4-12 μm dla dwóch rodzajów mgły: charakterystyka (1) – intensywna mgła ograniczająca widoczność do 200m, charakterystyka (2) – mgła ograniczająca widoczność do 500 m. Zaznaczono zakresy o najmniejszej tłumienności (10,5 μm , 11,5 μm)

Fig. 2. Atmospheric attenuation in the wavelength range 4-12 μm for two kinds of fog: characteristic (1) - intensive fog limiting visibility to 200 m, characteristic (2) - fog limiting visibility to 500 m. The selected ranges of lowest attenuation (10,5 μm , 11,5 μm)



Rys. 3. Tłumienność atmosfery w zakresie długości fal 0,5 μm – 1 cm przy mgle o tłumienności 120 dB/km (intensywna mgła ograniczająca widoczność do 100 m) [7]

Fig. 3. Atmospheric attenuation in the wavelength range 0.5 μm - 1 cm for fog of attenuation 120 dB / km (intensive fog limiting visibility to 100 m)

Podsumowując wyniki badań przeprowadzonych dla fal bliskiej podczerwieni (rys. 1) oraz średniej podczerwieni (rys. 2) stwierdzamy, że w warunkach umiarkowanej mgły fale z zakresu średniej podczerwieni o długości ~10,5 μm (min. lokalne) są znacznie lepiej propagowane. Orientacyjne porównanie okien transmisyjnych dla fal z zakresu bliskiej oraz średniej podczerwieni ilustruje tab. 2.

Tab. 2. Tłumienność w atmosferze zależności od poziomu zamglenia i zakresu długości fal

Tab. 2. Attenuation in the atmosphere depending on the haze level and wavelength range

Poziom zamglenia	Min. tłumienności (0,5-4 μm)	Min. tłumienności (4-12 μm)
Wysoki (widoczność do 200 m)	72 dB/km	71 dB/km
Umiarkowany (widoczność do 500 m)	29 dB/km	7 dB/km

Jak wynika z powyższego zestawienia, niezależnie od długości fali (w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni), przy ograniczeniu widoczności podczas mgły do 200 m transmisja nawet na dystansie ok. 500 m jest nierealna, gdy tłumienie atmosfery przekracza 70 dB/km. Zarówno dla fal z zakresu bliskiej jak i średniej podczerwieni, sygnał tłumiony jest w niemal identycznym stopniu. Fakt ten powinien motywować do wnikliwej analizy częstości występowania mgieł na terenach, gdzie planowane jest wdrożenie łącza optycznego. Natomiast jeśli widoczność podczas mgły jest w zakresie ok. 500 m, to zakres średniej podczerwieni (10-12 μm) daje bardzo obiecujące możliwości transmisyjne (nawet znacznie powyżej 1 km). Decyzja o instalacji optolinii winna być poprzedzona przede wszystkim analizą zamgleń w rejonie planowanej lokalizacji. Istnieją serwisy internetowe [17] dostarczające bieżące informacje o zakresie widoczności oraz warunkach pogodowych na całym globie, z możliwością wybrania analizy danego regionu. Dostępna historia warunków atmosferycznych pozwala przepro-

wadzić analizę częstości występowania negatywnych czynników pogodowych i stwierdzić na podstawie statystyk widoczności w danym regionie, czy zastosowanie łącza optycznego jest rozwiązaniem zalecanym. Dla wybranych regionów świata istnieją gotowe mapy dostępności FSO, z których łatwo odczytać jaka jest statystyczna dostępność łącza optycznego w skali roku [13].

Cała przedstawiona sytuacja ma miejsce w przypadku stosowania optolinii pracujących w zakresie bliskiej podczerwieni (współczesnych konstrukcji). Analizując charakterystyki tłumienności atmosfery w całym paśmie podczerwieni, można wskazać okna falowe, które wykorzystane do budowy łącza zagwarantują jego dostępność powyżej 97%

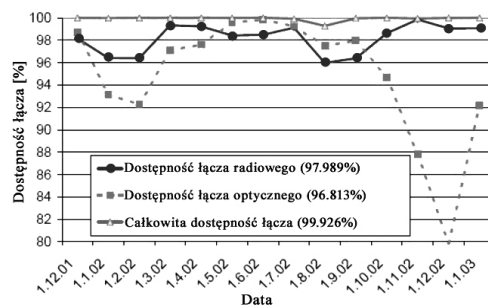
3. Doświadczenia eksploatacyjne

W rejonie Bielska-Białej w minionym dziesięcioleciu użytkownika przez kilka lat optolinie SkyCom tworzące połączenie w postaci dwóch przęseł stanowiących jedno łącze o przepływności 2.048 Mbit/s. Optolinie pracowały na długości fali w zakresie 860-920 nm. Każde z przęseł pracowało na dystansie poniżej 1 km (ok. 500 m i 800 m). W okresie eksploatacji dostępność łącza była na poziomie 98%. W okresie eksploatacji wykonywano także testy jakościowe transmisji z użyciem testera transmisji danych LITE 3000E stosując sygnał PRBS24 o przepływności 2.048 Mbit/s. Na tej podstawie wyznaczono szereg statystyk dotyczących łącza, stopy błędów BER w różnych warunkach pogodowych i prognozowania zachowania łącza w zmiennych warunkach pogodowych. Zebrane doświadczenia i pomiary pozwoliły na sformułowanie pewnych ogólnych wniosków eksploatacyjnych przedstawionych w zakończeniu. Zauważono m.in., że jeśli warunki pogodowe powodowały wzrost BER do poziomu 10^{-3} , to w konsekwencji zwykle dochodziło do utraty synchronizacji ramki, zaniku sygnału i wystąpienia sygnału AIS, co jest traktowane jako przerwa transmisji. Nie przeprowadzono szczegółowych badań w zależności od warunków pogodowych, by można było udzielić jednoznacznych odpowiedzi bezpośredniego wpływu konkretnych zjawisk pogodowych na jakość transmisji. Należy zauważyć, że zastosowane optolinie były znacznie przewymiarowane co do mocy nadajnika i zasięgu (jedna z nich wg producenta mogła pracować na maksymalnym dystansie 4 km, a druga na dystansie 6 km). To przewymiarowanie mocy było korzystne i przerwy w transmisji występowały tylko w wyjątkowych wypadkach przy bardzo gęstych mgłach. Wg wskazań producenta tych optolinii, dobierając urządzenie wg mocy lasera i odległości, można oczekiwać zakłóconej pracy, bądź przerwy w funkcjonowaniu łącza, jeśli warunki atmosferyczne przekroczą podane niżej wartości progowe:

- opady deszczu – 15 cm/h,
- opady mokrego śniegu – 10 cm/h,
- opady suchego śniegu – 5 cm/h,
- widoczność we mgle mniej niż 6% odległości transmisji.

Urządzenia te miały jednak pewną wadę, która zdecydowała o wycofaniu ich z użytkowania. W wysokich temperaturach latem, dodatkowo przy dużym bezpośrednim nasłonecznieniu następował gwałtowny wzrost stopy błędów BER. Powodów nigdy do końca nie ustalono. Niewykluczone, że był to efekt zmian współczynnika załamania powietrza przy wysokich temperaturach nad powierzchnią dachu [7], gdzie optolinie były zainstalowane lub po prostu wadliwość konstrukcji. Z innych praktycznych doświadczeń można wskazać badania eksploatacyjne w Austrii [10].

Podczas 15-sto miesięcznego testu dostępności hybrydy łącza optycznego i radiowego (60 GHz) przeprowadzonych w latach 2002 – 2003 w miejscowości Graz, na odległości 1500m stwierdzono dostępność łącza optycznego na poziomie 96,81% a łącza radiowego na poziomie 97,99% co określiło całkowity poziom dostępności sprzężonych systemów na 99,93%. Łącze optyczne do transmisji wykorzystywało laser emitujący fale o długości 850 nm, jego przepustowość wynosiła 155 Mbit/s [10]. Wyniki pomiarów dostępności łącza prezentuje poniższy rysunek.



Rys. 4. Charakterystyka dostępności łącza optycznego sprzężonego z łączem radiowym, na przestrzeni 15 miesięcy. Testy zostały przeprowadzone w Austrii (Graz). Dystans między nadajnikiem a odbiornikiem wynosił 1500 m [11]

Fig. 4. Characteristic of availability of the optical link coupled with a radio link for 15 months. Tests were carried out in Austria (Graz). The distance between the transmitter and the receiver was 1500 m

Z opisanej 15-sto miesięcznej analizy dostępności łącza optycznego wynika, iż w klimacie środkowo-europejskim łącza optyczne pracujące na odległościach większych niż 1 km nie nadają się do zastosowań wymagających dużej dostępności. Zgodnie z przewidywaniami najwyższa wartość dostępności łącza występowała w okresie letnim – od kwietnia do września poziom dostępności łącza w tym okresie nie spadł poniżej 97%. Podczas okresu jesienno-zimowego występowały znaczne spadki dostępności łącza, podczas listopada nawet poniżej 90%.

Szereg badań eksploatacyjnych dotyczących dostępności łącza FSO w zależności od warunków pogodowych przeprowadzono w USA. W cytowanej pracy [7] przedstawiono analizę wpływu zamglenia na pracę optolinii m.in. w Denver (Colorado). Ogólnie biorąc wnioski dotyczące dostępności tego typu łącza (w zakresie bliskiej podczerwieni) są zbieżne.

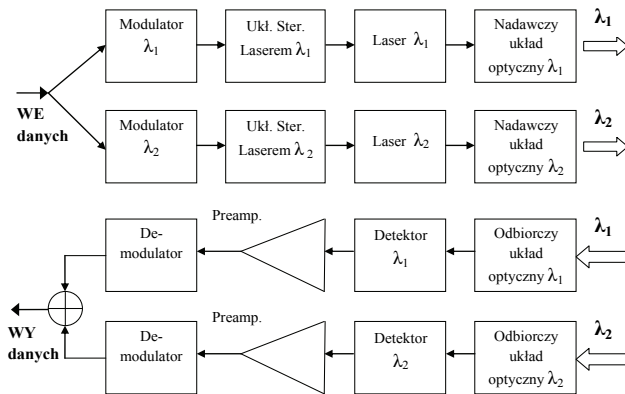
4. Koncepcja optolinii dwufalowej

Analiza charakterystyk spektralnych przepuszczalności atmosfery wskazuje na możliwość wykorzystania minimum tłumienia dla promieniowania o długości 11,5 μm niezależnie od zagospodarowania innych okien transmisyjnych z zakresu bliskiej podczerwieni. Wykorzystanie dodatkowo długości fali 11,5 μm wskazuje na możliwość poprawy dostępności systemu transmisyjnego w warunkach ograniczonej widoczności atmosfery. Produkowane optolinie wykorzystują modułowane elektrycznie źródła promieniowania z zakresów długości fal wykorzystywanych w optoelektronice i technice światłowodowej. Tego typu konstrukcje przyrządów półprzewodnikowych są opracowane od lat i dostępne w handlu, pozwalając na budowę w szczególności także optolinii. Typowe długości fal wymienionych przyrządów półprzewodnikowych to: 0,78 μm , 0,85 μm , 1,55 μm . Do tych zakresów opracowano wydajne fotodetektory [7]. Czulość odbiorników jest na poziomie ok. 1 μW .

Propozycja zastosowania długości fali z zakresu średniej podczerwieni, konkretnie dla $\lambda = 11,5 \mu\text{m}$ jest sprawą przyszłości, kiedy produkcja laserów na tę długość fali zostanie opanowana i będą dostępne w handlu. Po stronie odbiorczej realizacja łącza jest obecnie technologicznie możliwa [18]. Schemat blokowy proponowanej dwufalowej optolinii przedstawiono na rys. 5.

Propozycja realizacji łącza optycznego, które mogłoby się charakteryzować większą dostępnością w skali roku w polskich warunkach pogodowych, wynika z analizy propagacji fal z zakresu podczerwieni w trudnych dla łącz optycznych warunkach atmosferycznych, które zacytowano w niniejszej pracy i przedstawionej bibliografii [8, 12, 14], a także doświadczeń eksploatacyjnych [15]. Na rys. 5 przedstawiono schemat budowy optolinii w zakresie dwufalowego systemu transmisyjnego. Charakterystycznymi cechami tego systemu są dublowane nadajniki i odbiorniki pracujące dla dwóch różnych długości fal, czyli niezależne dwa łącza do pracy na różnych długościach fal. Praca łącza na skrajnie różnych długościach fal w zakresie podczerwieni wymaga innej konstrukcji układów optycznych zarówno po stronie nadajnika jak i odbiornika

(dopasowane układy optyczne i filtry do źródeł promieniowania i detektorów) dla każdej długości fali. Istotnym elementem układu odbiorczego jest przedstawiony na schemacie węzeł sumacyjny wyposażony także w układ decyzyjny. Jego funkcja polega na analizie odbieranych bitów informacji z obu odbiorników i wybrze najbardziej prawdopodobnej informacji w przypadku, gdy z każdego toru odbiorczego bity mają przeciwne stany.



Rys. 5. Schemat blokowy zespołu nadawczo-odbiorczego optolinii
Fig. 5. Block diagram of the optolink transceiver unit

Uzasadnieniem budowy dwufalowej optolinii jest analiza bilansu energetycznego łączy dla λ_1 i λ_2 dla różnych warunków pogodowych. Korzystamy z zależności [8]:

$$P_{odb} = P_{nad} \cdot \frac{d_2^2}{[d_1(D \cdot l)]^2} \cdot 10^{(-\alpha l/10)},$$

gdzie: P_{odb} – moc na wejściu odbiornika, P_{nad} – moc na wyjściu nadajnika, d_1 – średnica układu nadawczego [m], d_2 – średnica układu odbiorczego [m], D – rozbieżność wiązki promieniowania nadajnika [$\text{mrad}(1/e^2)$], l – odległość pomiędzy optoliniami, α – współczynnik tłumienia w atmosferze (zależny od warunków pogodowych) [dB/km].

Powyższe wyrażenie przekształcamy do praktycznej postaci umożliwiającej dyskusję co do wyboru okien falowych, wprowadzając wyrażenie $C(l) = d_2^2 / [d_1(D \cdot l)]^2$, które nazywamy stałą optolinii (jest funkcją odległości). Całkowite tłumienie $\alpha \cdot l = A(\alpha; l)$ (jest funkcją współczynnika tłumienia zależnego od warunków pogodowych zdefiniowanego na odległości 1 km i odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem).

$$\text{Stąd otrzymujemy: } P_{odb} = P_{nad} \cdot C(l) \cdot 10^{-A(\alpha, l)/10}.$$

Na podstawie [7] wybieramy przykładową (typową) optolinie Vendor B, dla której $C(l) = 0,02$ na dystansie 1 km, a $P_{nad} = 1$ W. Przyjmujemy ponadto, że wszystkie analizy przeprowadzamy na dystansie 1km, czyli $l = l_0 = 1$ km.

Zakładamy, że dla obu długości fal λ_1 i λ_2 wszystkie wielkości pozostają takie same z wyjątkiem współczynnika tłumienia α (dla ułatwienia porównania i analizy), który jest inny dla λ_1 i λ_2 . Wyznaczamy zatem moc w punkcie odbioru, która musi być większa od czułości odbiornika. Dokładniej, dla zadanego stosunku sygnał/szum gwarantującego jakość transmisji na wymaganym poziomie (BER) [7]. Dla określonych warunków atmosferycznych (charakterystyka 1 i charakterystyka 2 na rys. 1 i rys.2) dla $\lambda_1 = 0,78 \mu\text{m}$ i $\lambda_2 = 11,5 \mu\text{m}$ lub też wybieramy inną parę długości fal np. $\lambda_1 = 0,78 \mu\text{m}$ i $\lambda_3 = 1000 \mu\text{m}$ albo $\lambda_2 = 11,5 \mu\text{m}$ i $\lambda_3 = 1000 \mu\text{m}$.

Wybierając $\lambda_1 = 0,78 \mu\text{m}$ przy widoczności we mgle do 500m otrzymamy: $P_{odb} = P_{nad} \cdot C(l_0) \cdot 10^{-A(\alpha, l_0)} = 0,02 \cdot 10^{-30/10} = 20 \mu\text{W}$.

Czyli na dystansie 1km optolinia ma wystarczający zapas mocy na odbiorze i będzie poprawnie pracować (czułość odbiornika wynosi 1 μW), z kolei przy widoczności 200 m moc na odbiorniku

wyniesie 1,6 nW – transmisja jest nierealna. W tych samych warunkach pogodowych również dla $\lambda_2 = 11,5 \mu\text{m}$ sytuacja jest niemal analogiczna. Przy widoczności 500m dla $\lambda_2 = 11,5 \mu\text{m}$ moc na odbiorze będzie wynosić 2,5 mW (znakomite warunki odbioru). Jak widać, wykorzystując okna w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, nie ma co liczyć na istotną poprawę dostępności w trudnych warunkach atmosferycznych. Jeśli jednak wykorzystamy okno z dalekiej podczerwieni $\lambda_3 = 1000 \mu\text{m}$ sytuacja ulega radykalnej zmianie. Nawet przy bardzo intensywnej mgle ograniczającej widoczność do 100 m tłumienie wynosi ok. 20 dB/km. Czyli wg powyższego szacowania można się spodziewać ok. 200 μW na odbiorze.

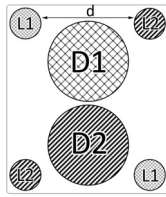
Z przeprowadzonej powyżej analizy wynika jednoznacznie, że zaproponowany wyżej wybór długości fal do opracowania nowej konstrukcji optolinii wpływa na istotną poprawę dostępności w trudnych warunkach atmosferycznych. Realny wybór jest jednak jeszcze zdeterminowany możliwościami nabycia i ceną elementów oraz ich faktycznymi parametrami do realizacji łączy na danej długości fali. Opracowanie urządzeń do pracy w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni wydaje się logiczną konsekwencją wynikającą z analizy propagacyjnej dla tych zakresów. Nasuwa się też pytanie, czy warto realizować dwufalowy system transmisyjny, czy nie wystarczy wykorzystać w przyszłości tylko zakres ok. 1000 μm ? Odpowiedź jest uwarunkowana wieloma aspektami. Jednym z istotnych aspektów poprawiających dostępność systemów telekomunikacyjnych jest tzw. protekcja (powszechnie stosowana w systemach SDH stanowiących sieci szkieletowe). Z punktu widzenia tej zasady oczywiście odpowiedź jest twierdząca. Do tego należy dodać jeszcze szereg innych uwarunkowań niezwiązanych bezpośrednio z tą analizą, a wskazujących na dwufalową realizację.

Aby uzyskać łączy optyczne o lepszej dostępności, proponuje się zastosowanie większej liczby laserów w układzie nadawczym, które pracowałyby na dwóch różnych długościach fal.

Obecnie dostępne w handlu urządzenia, te o największej odporności na zmiany tłumienności toru przesyłowego, posiadają w układzie nadawczym kilka źródeł promieniowania, zastosowanych m.in. w celu powiększenia mocy sygnału i uodpornienia go na przerwania powodowane przez drgania konstrukcji i np. przelatujące ptaki. Wszystkie urządzenia posiadające więcej niż jeden laser, których dane techniczne przeanalizowano na potrzeby niniejszej pracy, pracują na jednej długości fali [2, 4] z zakresu bliskiej podczerwieni.

Proponowane rozwiązanie musi być także wyposażone w podwójny układ odbiorczy, gdyż nie można dla tak odległych długości fal wykorzystać jednego typu fotodetektora i tych samych układów optyki w odbiorniku [18]. Zatem inaczej będzie skonstruowany odbiornik dla fali 0,78 μm (fotodetektor i optyka skupiająca promieniowanie na fotodetektorze – szkło optyczne lub niskostratne w tym zakresie tworzywa sztuczne), a nieco inaczej dla fali 11,5 μm . W tym wypadku optyka odbiornika, ze względu na inny zakres długości fal, musi być wykonana z zupełnie innych materiałów. Korzystając z doświadczeń termowizji pracującej w tym zakresie, wskazanym materiałem na układy optyczne jest german. Ponadto detekcja w tym zakresie promieniowania jest trudna i nie wykluczone, że detektor [18] powinien pracować w dużo niższej od otoczenia temperaturze. A więc, na przykład może być wymagane schładzanie fotodetektora w układzie z ogniwami Peltiera. Problemem obecnie może być źródło promieniowania bezpośrednio modulowane prądem, pracujące przy długości fali 11,5 μm . Przykładowe rozmieszczenie źródeł promieniowania i układów odbiorczych ilustruje rys. 6.

W przypadku wykorzystania zakresu dalekiej podczerwieni konstrukcja układów nadawczo odbiorczych będzie znacząco różna. Jest to jednak problem konstrukcyjny związany z opanowaniem technologii określonego zakresu długości fal. Jego opanowanie oznacza w szczególności, dostępność handlową przyrządów półprzewodnikowych tego zakresu, układów optyki długofalowej etc., co stanowić dopiero będzie o produkcji nowej generacji systemu transmisyjnego w klasie FSO.



Rys. 6. Przykładowy schemat czola proponowanego układu nadawczo odbiorczego: **L1 (Laser 1)** – Źródło promieniowania o długości fali z zakresu bliskiej podczerwieni (0,78 μm), **D1 (Detektor 1)** – Detektor dla fal L1 (0,78 μm), **L2 (Laser 2)** – Źródło promieniowania z zakresu średniej podczerwieni (11,5 μm), **D2 (Detektor 2)** – Detektor dla fal L2 (11,5 μm), **d** – odstęp pomiędzy laserami

Fig. 6. Example of the face of the proposed transmitter-receiver unit: L1 (Laser 1) – Source of radiation in the wavelength range from the near IR (0.78 μm), D1 (Detector 1) – Wave detector for L1 (0.78 μm), L2 (Laser 2) – Radiation source of mid-infrared range (11.5 μm), D2 (Detector 2) – Wave detector for L2 (11.5 μm), d – distance between the lasers

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe rozmieszczenie promienników (źródeł promieniowania) i odbiorników, lecz do zagadnienia tzw. przestrzennego zróżnicowania należy przy opracowywaniu konstrukcji podejść nieco szerzej. Możliwe są następujące warianty: jeden promiennik (nadajnik) i jeden odbiornik dla jednej długości fali, wiele promienników i jeden odbiornik (wariant często stosowany), wiele promienników i wiele odbiorników dla jednej długości fali przestrzennie rozsuniętych (odstęp d na rys. 6) – MIMO (Multiple-input-multiple-output). Rozwiązanie typu MIMO daje zdecydowanie lepsze wyniki w zakresie jakości (np. dla MIMO 4x4 wynik BER na poziomie 1×10^{-8} uzyskamy przy S/N ok. 4 dB gorszym niż dla MIMO 2x2 [19], a więc gwarantuje to mniejsze BER w dla określonej wartości S/N). Rozwiązanie typu MIMO zdecydowanie służy poprawie jakości transmisji, głównie przez zmniejszenie wpływu termicznych fluktuacji współczynnika załamania powietrza. Jeśli zastosujemy to rozwiązanie dla dwóch długości fal należy oczekiwać znaczącej poprawy czasu dostępności dwufalowego systemu FSO.

5. Podsumowanie

Na podstawie literatury i własnej praktyki eksploatacyjnej optolunii pracujących w zakresie bliskiej podczerwieni należy stwierdzić, że eksploatacja ich w warunkach klimatu Polski wprowadza pewne ograniczenia dotyczące ich stosowania. Nie można stosować ich na duże odległości, mimo wskazań producenta. Dystans do 1 km wydaje się maksymalny. Nie pozwalają na uzyskanie dostępności wymaganej przez operatorów telekomunikacyjnych. W związku z czym nie stanowią zwykle docelowych stałych połączeń, lecz są stosowane do „szybkiego” podłączenia klienta (bez zbędnych i czasochłonnych procedur administracyjnych), licząc się z tym, że w dalszej perspektywie należy przewidzieć – utworzenie innego protekcyjnego łącza (dublującego), nawet o mniejszej przepustowości, pozwalającego na utrzymanie dostępności na zadanym poziomie.

Propozycja konstrukcji dwufalowej znacząco powinna poprawić dostępność, lecz nie należy oczekiwać, że uda się doprowadzić ją do poziomu stosowanego przez operatorów telekomunikacyjnych (99,999%). W przypadku takich oczekiwań niezbędne jest alternatywne łącze światłowodowe. Przy nieco mniejszych oczekiwaniach (99,9%) rozwiązaniem może być np. połączenie z radiolinia [11] lub korzystanie z łącza xDSL stanowiących podtrzymanie łączności w przypadku przerw na łączu optycznym. Optolunii nie należałoby polecać jako jedyne łącza w warunkach dużych wymagań dostępności.

Do bezsprzecznych zalet optolunii należy zaliczyć brak wymagań administracyjnych co do ich montażu, co daje dużą mobilność i szybkość w ich instalacji tak istotną w warunkach silnej konkurencji na rynku telekomunikacyjnym. Jest to urządzenie dobrze nadające się do centrów miast, zwłaszcza zabytkowych, gdzie jakiegokolwiek budowy sieci lub przebudowy obwarowane są poważnymi ograniczeniami i długotrwałymi procedurami administracyjnymi. Znakomicie sprawdzają się w realizacji transmisyj-

nych dróg protekcyjnych, bądź tworzenia wielobocznej lub kratowej architektury sieciowej.

Jeśli opracujemy optolunię dwufalową pracującą w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni z rozbudowanym systemem MIMO, to sytuacja związana z ograniczeniami wykorzystania optolunii w warunkach naszego klimatu może ulec radykalnej poprawie i możliwe jest znacząco szersze wykorzystanie w telekomunikacji tych systemów głównie jako tzw. systemów dostępowych o wysokiej przepustowości. Zdecydowaną przewagą tych systemów nad systemami radiodostępowymi jest separacja przestrzenna (brak oddziaływania wiązek laserów z różnych połączeń optolunii), co czyni pojemność systemu dostępowego wykorzystującego optolunię nieporównywalnie większą niż w przypadku systemów radiowych (ograniczenia wynikające z interferencji i ograniczonej liczby kanałów radiowych).

6. Literatura

- [1] http://pl.wikipedia.org/wiki/Free_Space_Optics, Free Space Optics (na dzień 22-01-2011r.).
- [2] <http://www.mrv.com/library/docs/PDF300/MRV-PRODOVW-TereScope.pdf>, Katalog produktów TereScope firmy MRV. (na dzień 25-03-2011r.).
- [3] http://www.lightpointe.com/downloads/datasheets/FlightLite100_100E.pdf, Katalog produktu firmy LightPointe. (na dzień 22-03-2011r.).
- [4] <http://www.cablefreesolutions.com/pdf/CFGigabitDatasheet.pdf> specyfikacja techniczna urządzenia. (na dzień 22-03-2011r.).
- [5] <http://www.cablefreesolutions.com/pdf/CF%20Access%20Datasheet.pdf> Informacje techniczne (na dzień 25-03-2011r.).
- [6] <http://www.fsona.com/product.php?sec=1250e>, Specyfikacja techniczna urządzenia (na dzień 23-03-2011r.).
- [7] Bloom S.: The Physics of Free Space Optics, Air Fiber Inc., 2 May, 2002.
- [8] Bloom S., Korevaar E., Schuster J., Willebrand H.: Understanding the performance of free-space optics. J. Optical Networking, vol.2, pp.178–200, June 2003.
- [9] Fischer K.W., Witiw M.R., Baars J.A. and Oke T.R.: Atmospheric Laser Communication: New Challenges for Applied Meteorology, Bulletin of the American Meteorological Society, 85, 2004, 725–732.
- [10] Forin D.M., Incerti G., Tosi Beleffi G.M., Teixeira A.L.J., Costa L.N., De Brito Andre P.S., Geiger B., Leitgeb E. and Nadeem F.: Free Space Optical Technologies, ISBN: 978-953-307-072-8, Publisher: InTech, Publishing date: March 2010.
- [11] Kim I.I. and Korevaar E.: Availability of Free Space Optics (FSO) and Hybrid FSO/RF Systems, Available at http://www.freespaceoptics.com/White_Papers.htm.
- [12] Kalashnikova O.V., Willebrand H.A. and Mayhew L.M.: Wavelength and Altitude Dependence of Laser Beam Propagation in Dense Fog, Proc SPIE, vol. 4635, 2002, pp. 278–87.
- [13] Korevaar E.J., Kim I.I. and McArthur B.: Atmospheric propagation characteristics of highest importance to commercial free space optics, Proc. SPIE 4976, 1 (2003); doi:10.1117/12.483804.
- [14] Kvičala R., Kvičera V., Grábner M., Fišer O.: BER and Availability Measured on FSO Link, 2007, ISSN 12102512, p. 7-12.
- [15] Rajba S.: Wykorzystanie traktu 2Mbit/s do transmisji danych pomiarowych i sterujących. Ocena przydatności optolunii, VII Konferencja Naukowa: Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE Tom II, Rzeszów 2002.
- [16] Wainright E., Hazem H. Refai, and James J. Sluss Jr.: Wavelength Diversity in Free- Space Optics to Alleviate Fog Effects, Proceedings of the SPIE Photonics West 2005, San Jose, CA, January 22-27, 2005.
- [17] <http://www.wunderground.com,serwis WeatherUndergorund.com> (na dzień 25-03-2011r.).
- [18] http://www.vigo.com.pl/index.php/pl/content/download/2411/10089/file/katalog_17032011.pdf, IR Detectors Catalogue, Katalog VIGO system S.A. 129/133 Poznańska Street, 05-850 Ożarów Mazowiecki, Poland. (na dzień 20-03-2011r.).
- [19] Ghassemlooy Z.: Free Space Optical Communications, <http://www.docstoc.com/docs/22054676/Optical-Wireless-Communication-using-Digital-Pulse-Interval-Modulation> (na dzień 10-05-2012r.).