



Analiza możliwości transmisji danych z wykorzystaniem laserów impulsowych

TADEUSZ DROZD, MAREK ZYGMUNT, PIOTR KNYSK,
JACEK WOJTANOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W systemach transmisji danych wykorzystywane są lasery o pracy ciągłej. W artykule przedstawiono koncepcje transmisji danych z wykorzystaniem laserów impulsowych. Jest to szczególnie istotne dla urządzeń, w których laser impulsowy już jest wbudowany i realizuje inne funkcje (np. dalmierz). Przedstawione zostały zalety oraz ograniczenia takiego sposobu kodowania. Dokonano została analiza szybkości transmisji danych wraz z przedstawieniem wpływu poszczególnych elementów kanału transmisyjnego na wynikową szybkość transmisji danych.

Słowa kluczowe: transmisja danych, lasery impulsowe, łącze optoelektroniczne

Wprowadzenie

Obecnie w laserowych systemach transmisji danych jako źródła promieniowania wykorzystywane są lasery o pracy ciągłej (ang. CW — *continuous wave lasers*). Powodowane jest to możliwością do uzyskania szybkością transmisji danych — pasmo modulacji laserów o pracy ciągłej sięga nawet kilkudziesięciu GHz — oraz stosunkowo prostą możliwością modulacji mocy optycznej nadajnika laserowego, w najprostszej postaci bezpośrednio przez modulację prądu zasilającego diodę laserową. W tego typu systemach lasery impulsowe wykorzystywane są w sposób marginalny. Ze względu na impulsowy charakter generowanego promieniowania znalazły zastosowanie głównie w dalmierzach laserowych, działających na zasadzie generacji laserowego impulsu sondującego i analizie powrotnego sygnału echa. Możliwość wykorzystania ich do transmisji danych jest bardzo istotna z punktu widzenia zasięgu transmisji, ponieważ lasery impulsowe mogą generować w impulsie

moce kilkadziesiąt razy większe niż lasery o pracy ciągłej. Umożliwiłyby to zwiększenie zasięgu transmisji danych lub transmisję w warunkach atmosferycznych, dla których laser o pracy ciągłej już nie zapewnia. Opracowanie koncepcji przesyłu danych z wykorzystaniem laserów impulsowych ma znaczenie szczególnie w urządzeniach, gdzie laser ten jest już wbudowany i wykorzystywany do innych celów (np. w dalmierzach laserowych), zwiększając funkcjonalność tego typu urządzeń.

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję kodowania danych z wykorzystaniem laserów impulsowych oraz analizę możliwej do uzyskania szybkości transmisji.

1. Koncepcja metody transmisji danych

Wykorzystując lasery impulsowe do transmisji danych, mamy możliwość kodowania informacji w zmianach wartości szczytowej impulsu, czasie jego trwania oraz w czasie pomiędzy kolejnymi impulsami.

Kodowanie danych w zmianach wartości szczytowej impulsów wprowadza ograniczenia ze względu na silną zależność tłumienia promieniowania wiązki laserowej od warunków atmosferycznych i odległości, na jakiej realizowana jest transmisja danych. Powoduje to ograniczenie zarówno zasięgu, gdyż zależałby on od wartości kodowanych danych, jak i szybkości transmisji danych, ponieważ ogranicza ilość danych możliwych do zakodowania w pojedynczym impulsie. Ponadto niezbędne byłoby dodawanie na etapie inicjalizacji transmisji dodatkowych impulsów, pozwalających dostosować parametry układów nadajnika i odbiornika do odległości transmisji i warunków atmosferycznych.

Kodowanie danych w czasie trwania impulsu również ma swoje ograniczenia. Wraz ze zmniejszaniem się mocy impulsów docierających do układu odbiornika maleje stosunek sygnał szum na jego wyjściu. Odebrany impuls występuje przez to na mniejszej ilości próbek w cyfrowym rekordzie danych przetworzonych z wyjścia odbiornika, ponieważ coraz większa jego część zanika w szumie. Ogranicza to ilość danych możliwych do zakodowania w pojedynczym impulsie i dodatkowo (tak jak w metodzie opisywanej wyżej) niezbędne byłoby dodawanie na etapie inicjalizacji transmisji dodatkowych impulsów, pozwalających dostosować parametry układów nadajnika i odbiornika do odległości transmisji i warunków atmosferycznych.

Wykorzystując do transmisji danych promieniowanie laserowe, należy zapewnić pracę urządzenia w klasie bezpieczeństwa bezpiecznej dla wzroku. Oznacza to, że energia emitowanego promieniowania, zależna od wartości szczytowej, czasu trwania i częstotliwości repetycji impulsów lasera nie może przekroczyć określonego poziomu. Ogranicza to dodatkowo zakres możliwych zmian wartości szczytowej (przy określonej szerokości i częstotliwości powtarzania impulsu) lub wartości czasu trwania impulsu (przy określonej wartości szczytowej i częstotliwości powtarzania impulsu).

Powyższych ograniczeń, poza koniecznością przestrzegania wymagań norm bezpieczeństwa, nie posiada układ z kodowaniem danych pomiędzy impulsami lasera. W metodzie tej nie zmienia się wartości szczytowej i czasu trwania impulsów, dzięki czemu kodowana informacja nie wpływa na zasięg i jakość transmisji. Dodatkowo nie ingerujemy w układ nadajnika, przez co nadajnik generuje stabilniejsze impulsy w czasie i w szerszym zakresie temperatur.

Koncepcja kodowania danych polega na uzależnieniu odstępu czasu pomiędzy poszczególnymi generowanymi impulsami lasera od wartości przesyłanych danych. Przykładowo danej o wartości n odpowiada odstęp czasu pomiędzy generowanymi impulsami o wartości $n \times \Delta t$, gdzie Δt jest rozdzielczością czasową kodowania, odstępem czasu odpowiadającym jednej wartości kodowanej informacji. Proces kodowania polega na wysterowaniu impulsu wyzwania nadajnika laserowego w ściśle określonym względem poprzedniego impulsu czasie.

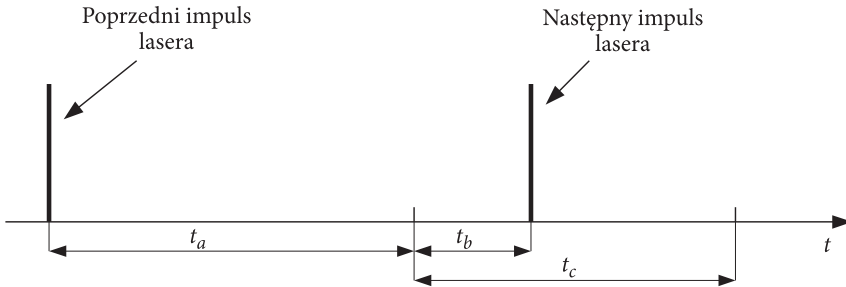
Jednym z najistotniejszych parametrów (oprócz zasięgu transmisji) jest szybkość przesyłu kodowanych danych. Zależy ona od następujących czynników:

- przyjętej rozdzielczości kodowania Δt ;
- możliwej do uzyskania częstotliwości repetycji impulsów nadajnika laserowego;
- ilości bitów danych kodowanych w pojedynczym odstępie pomiędzy impulsami.

Rozdzielczość kodowania zależy od dokładności pomiaru czasu pomiędzy dwoma impulsami laserowymi. Na dokładność pomiaru czasu ma wpływ: stabilność generacji układu nadajnika, stosunek sygnał szum odbieranego sygnału, jakość komparatora, czas narastania zbocza impulsu laserowego (czas trwania) oraz dokładność układu pomiaru czasu.

Maksymalną częstotliwość generacji impulsów lasera ogranicza tzw. *duty factor* — parametr impulsowych diod laserowych, który określa maksymalną częstotliwość powtarzania impulsów, z jaką może pracować nadajnik, w zależności od szerokości połówkowej impulsu laserowego. Parametr ten najczęściej jest rzędu ok. 0,1%, co oznacza np. że dla impulsów laserowych o szerokości połówkowej 50 ns, częstotliwość powtarzania impulsów nie powinna być większa niż 20 kHz. Dlatego też odstęp pomiędzy impulsami powinien być złożeniem stałego czasu (np. 50 μ s) zapewniającego, że maksymalna częstotliwość powtarzania impulsów nie zostanie przekroczona, oraz odcinka czasu, który będzie odpowiadał wartości przesyłanych, zakodowanych danych. Zilustrowano to na rysunku 1.

Przedstawiony na rysunku 1 odstęp czasu t_a wynika z ograniczonej częstotliwości generowania impulsów nadajnika laserowego, odstęp czasu t_c zależy od przyjętej rozdzielczości kodowania oraz od ilości bitów danej kodowanej w czasie pomiędzy impulsami lasera (dla długości kodowanej wartości równej n bitów czas $t_c = \Delta t \times (2^n - 1)$). Czas t_b zależy od wartości zakodowanej danej, np. dla wartości równej 0 czas $t_b = 0$, jeżeli będzie przesyłana wartość 10, to czas $t_b = 10 \times \Delta t$ itp.



Rys. 1. Kodowanie danych w czasie pomiędzy impulsami lasera: t_a — minimalny odstęp pomiędzy impulsami; t_b — odcinek czasu odpowiadający zakodowaniu pewnej wartości informacji; t_c — odstęp czasu odpowiadający maksymalnej wartości zakodowanej informacji

2. Określenie szybkości transmisji danych

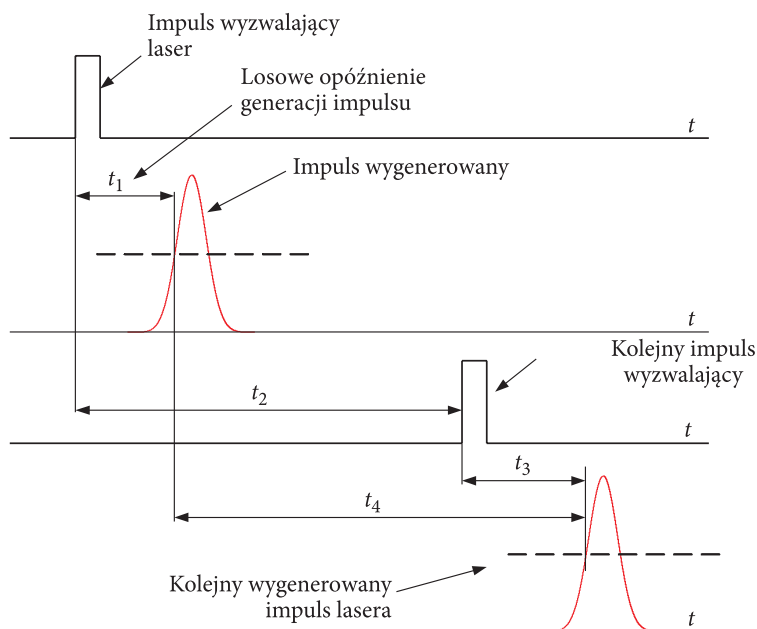
Jak przedstawiono wcześniej, rozdzielczość kodowania zależy od dokładności pomiaru czasu pomiędzy dwoma następującymi po sobie impulsami lasera. Dokładność ta zależy od wynikowej sumy następujących błędów wnoszonych przez poszczególne elementy kanału transmisji danych:

1. Błąd generacji impulsów układu nadajnika — wynika z faktu, że nadajnik laserowy generuje impuls laserowy z pewnym zmiennym opóźnieniem względem sygnału wyzwalającego. Na wartość tego opóźnienia ma wpływ konstrukcja sterownika, losowość procesu generacji impulsu oraz temperatura pracy. Jego wpływ na dokładność wyznaczenia odstępu czasu pomiędzy impulsami lasera w układzie odbiornika przedstawiony został na rysunku 2.

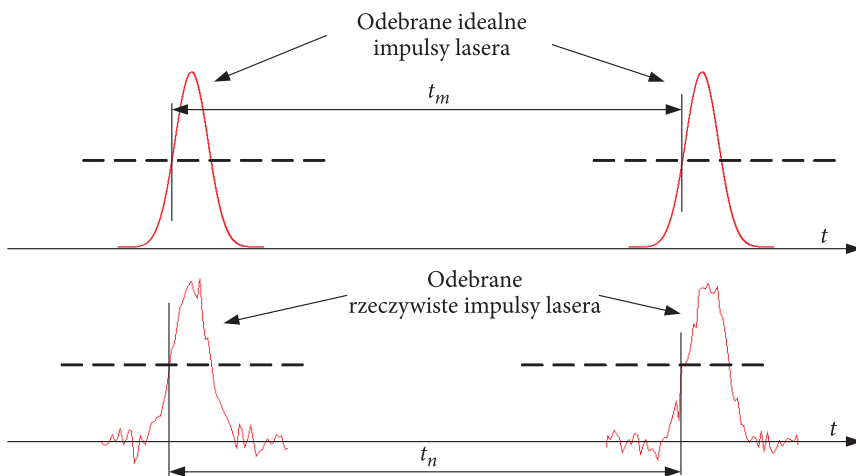
Odstęp czasu t_2 jest równy wartości przesyłanej zakodowanej danej, czas t_4 , na podstawie którego następuje dekodowanie przesyłanej danej, jest złożeniem czasu t_2 i wynikowego $(t_3 - t_1)$ opóźnienia generacji impulsów przez nadajnik laserowy. Różnica czasów $\delta = t_4 - t_2$ jest błędem wnoszonym przez układ nadajnika do metody kodowania danych w odstępie pomiędzy impulsami lasera.

2. Błąd fluktuacji kształtu mierzonych impulsów — na odebrany impuls lasera nałożony jest szum oraz zakłócenia o poziomie zależnym od odległości, warunków terenowych i warunków atmosferycznych, oraz szum wewnętrzny układu odbiornika generowany przez elementy elektroniczne [1]. Im mniejszy stosunek sygnał szum odbieranego sygnału, tym błąd ten bardziej wpływa na wynikowy błąd pomiaru czasu pomiędzy impulsami. Jego wpływ zilustrowano na rysunku 3.

Sygnały zakłócające oraz szумы dodające się do odbieranych impulsów lasera powodują detekcję impulsów przez układ dyskryminatora w innych momentach czasowych niż to powinno nastąpić. Powoduje to zmianę odstępu czasu pomiędzy odebranymi impulsami względem odstępu czasu odpowiadającemu zakodowanej



Rys. 2. Zobrazowanie błędu generowanego przez układ nadajnika laserowego: t_1 , t_3 — opóźnienia czasowe (o wartościach losowych) generacji impulsów lasera względem impulsów wyzwalających; t_2 — odstęp czasu pomiędzy impulsami wyzwalającymi nadajnik; t_4 — odstęp czasu pomiędzy wygenerowanymi impulsami lasera



Rys. 3. Zobrazowanie wpływu błędu fluktuacji kształtu odbieranych impulsów: t_m — odstęp czasu pomiędzy kolejnymi impulsami lasera; t_n — odstęp czasu pomiędzy kolejnymi impulsami lasera zniekształconymi przez dodanie szumów zewnętrznych oraz zewnętrznych i wewnętrznych sygnałów zakłócających

wartości przesyłanych danych ($t_m \neq t_n$). Różnica czasów $\delta = t_m - t_n$ jest błędem wnoszonym przez zmiany kształtów odbieranych impulsów laserowych pod wpływem szumów i sygnałów zakłócających.

3. Błąd układu pomiaru czasu — pomiar odcinka czasu pomiędzy zdetekowanymi w dyskryminatorze impulsami laserowymi dokonywany jest z określoną dokładnością. Zależy ona od zastosowanej metody konwersji czas–cyfra, wykorzystanego do tego celu układu i jakości wykonania układu konwersji.
4. Błąd dyskryminatora (komparatora) wynika z faktu, że moment detekcji odebranego impulsu zależy od rodzaju wykorzystywanego układu dyskryminatora, wartości maksymalnej i szybkości narastania zboczy odebranego impulsu [2]. Jednak błąd ten nie wpływa na wynikowy błąd pomiaru odstępu czasu, ponieważ wpływa on w tym samym stopniu na wszystkie emitowane impulsy lasera. Ma on charakter błędu systematycznego (pod warunkiem że w trakcie transmisji danych nie ulegną zmianie warunki mające wpływ na propagowanie się promieniowania lasera w atmosferze — warunki atmosferyczne, warunki terenowe, odległość, nie będzie się zatem zmieniać również znacząco moc impulsów docierających do odbiornika).

Na podstawie powyższych analiz można stwierdzić, że błąd określenia położenia impulsu (względem impulsu wyzwalającego nadajnik) na skali czasu jest złożeniem następujących błędów:

$$\sigma_{pom} = \sqrt{\sigma_{nad}^2 + \sigma_{\frac{S}{N}}^2}, \quad (1)$$

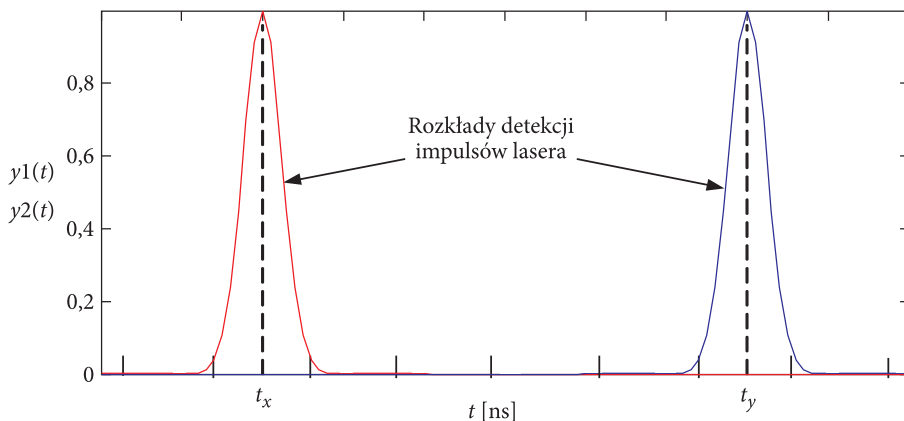
gdzie: σ_{pom} — błąd określenia położenia impulsu na skali czasu;
 σ_{nad} — błąd generacji impulsów przez nadajnik laserowy;
 $\sigma_{\frac{S}{N}}$ — błąd fluktuacji kształtu mierzonych impulsów.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady detekcji impulsów laserowych, gdy na położenie impulsów na skali czasu mają wpływ przedstawione wcześniej błędy składowe.

Końcowy błąd wyznaczenia odstępu czasu jest złożeniem błędów wyznaczenia położenia odebranych impulsów na skali czasu oraz błędu pomiaru czasu pomiędzy tymi impulsami:

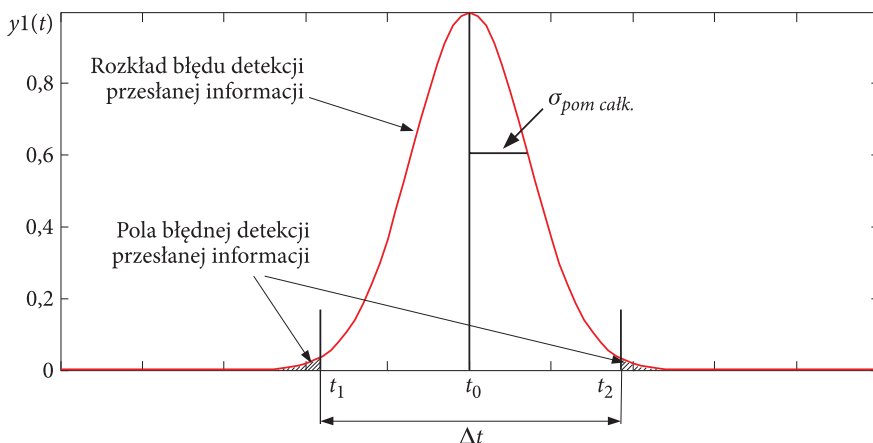
$$\sigma_{pom\ calk} = \sqrt{\sigma_{pom1}^2 + \sigma_{pom2}^2 + \sigma_{tdc}^2}, \quad (2)$$

gdzie: $\sigma_{pom1}, \sigma_{pom2}$ — błędy położenia odebranych impulsów, pomiędzy którymi kodowana jest informacja;
 σ_{tdc} — błąd metody konwersji czas–cyfra.



Rys. 4. Wpływ błędu określenia położenia impulsów na błąd zdekodowania przesłanej informacji: t_x, t_y – momenty czasowe detekcji impulsów, dla których $\sigma_{pom} = 0$

Mając oszacowany całkowity błąd pomiaru odstępu czasu, można wyznaczyć rozdzielczość kodowania. Niezbędne jest do tego założenie dopuszczalnej ilości przekłamanych danych. Parametrem charakteryzującym jakość transmisji jest elementowa stopa błędów (ang. *Bit Error Rate*), definiująca ilość błędnie przesłanych bitów danych względem ogólnej liczby odebranych bitów danych podczas ustalonego interwału czasowego.



Rys. 5. Rozkład prawdopodobieństwa poprawnej detekcji przesyłanych danych

Przyjmując, że błąd określenia położenia odebranych impulsów lasera na skali czasu względem sygnałów wyzwających sterownik nadajnika ma rozkład normalny, rozkład prawdopodobieństwa detekcji impulsu można przedstawić wg wzorów:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_{pom\ calk} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_{pom\ calk}^2}}, \quad (3)$$

$$P_{bl\ det} = \left(\int_{-\infty}^{t_1} f(t)dt + \int_{t_2}^{+\infty} f(t)dt \right) = 2 \cdot \int_{t_2}^{+\infty} \frac{1}{\sigma_{pom\ calk} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_{pom\ calk}^2}} dt, \quad (4)$$

gdzie: $f(x)$ — funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu błędu detekcji przesłanej informacji;

$P_{bl\ det}$ — prawdopodobieństwo błędnego zdekodowania przesyłanych danych (BER);

$\sigma_{pom\ calk}$ — odchylenie standardowe, błąd detekcji przesłanej informacji;

t_0 — wartość średnia (oczekiwana);

t_1, t_2 — wartości graniczne, dla których następuje błędna detekcja danych.

Na podstawie równania (2), zakładając określone wartości błędów składowych ($\sigma_{nad}, \sigma_{jitter}, \sigma_{idc}$) oraz przy założonym prawdopodobieństwie błędnej detekcji, korzystając z przekształceń równania (4), można wyznaczyć rozdzielczość kodowania:

$$\Delta t = 2 \times (t_2 - t_0). \quad (5)$$

Dla wyliczonej rozdzielczości kodowania oraz określonej maksymalnej częstotliwości repetycji nadajnika laserowego można wyznaczyć szybkość transmisji danych. Zgodnie z przedstawionymi wcześniej warunkami szybkość transmisji danych zależy również od ilości bitów danych kodowanych w pojedynczym odstępie między impulsami. W sytuacji przedstawionej na rysunku 1 maksymalny odstęp czasu pomiędzy impulsami wynosi $t_a + t_c$, z czego można szacować minimalny transfer danych kodowanych w odstępie pomiędzy impulsami lasera, wynoszący:

$$C = \frac{N}{(t_a + t_c)}, \quad (6)$$

gdzie: C — minimalny transfer danych [b/s];

N — ilość bitów kodowanych w pojedynczym odstępie pomiędzy impulsami lasera.

Po przekształceniu można powyższy wzór doprowadzić do następującej postaci:

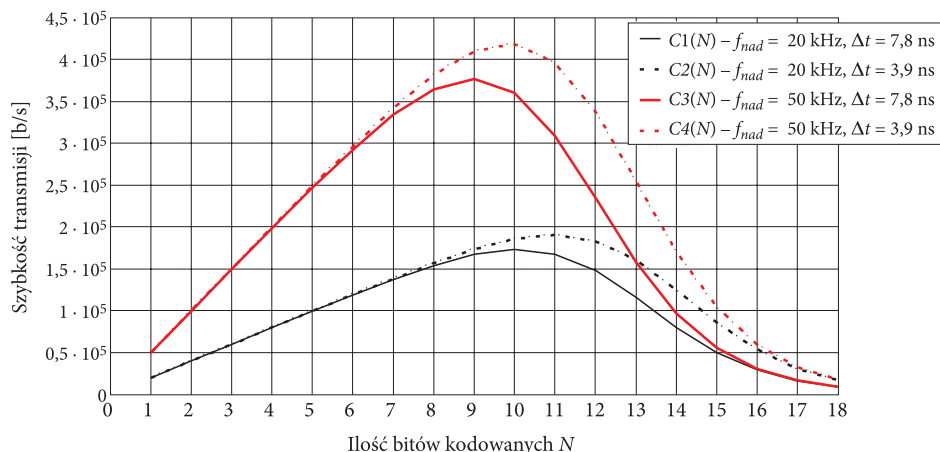
$$C(N) = \frac{N}{\frac{1}{f_{nad_{max}}} + 2^N * \Delta t}, \quad \text{gdzie} \quad f_{nad_{max}} = \frac{1}{t_a}. \quad (7)$$

Podstawiając dane do wzoru, można wyliczyć szybkość transmisji dla różnych wartości N oraz określić, dla jakiej wartości N szybkość transmisji osiągnie wartość maksymalną. Z badań układów nadawczo-odbiorczych przeprowadzonych w Instytucie Optoelektroniki WAT uzyskano następujące wyniki¹:

- $\sigma_{nad} = 330$ ps,
- $\sigma_{\frac{s}{N}} = 380$ ps,
- $\sigma_{tdc} = 250$ ps.

Dla założonego poziomu prawdopodobieństwa błędnej detekcji na poziomie $BER = 1 \cdot 10^{-6}$, na podstawie równań (4) i (5), wyliczona rozdzielczość kodowania wyniosła $\Delta t = 7,8$ ns. Przyjmując szerokość połówkową impulsu lasera na poziomie 50 ns, oraz $duty\ factor = 0,1\%$ minimalny odstęp pomiędzy impulsami wynosi $t_a = 50 \mu s$ ($f_{nad_{max}} = 20$ kHz).

Wynikowa szybkość transmisji danych została przedstawiona na rysunku 6. Wyliczona szybkość transmisji danych jest szybkością minimalną, tzn. dla przypadku gdyby cały czas nadawana była wartość, której odpowiada najdłuższy odstęp czasu pomiędzy generowanymi impulsami ($t_b = t_c$ dla wszystkich transmitowanych danych). Średnia szybkość transmisji danych z całą pewnością będzie wyższa.



Rys. 6. Wynikowa szybkość transmisji danych kodowanych w odstępach czasu pomiędzy impulsami

¹ $\sigma_{\frac{s}{N}} = 380$ ps dla $S/N = 60$, badania zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych.

Na podstawie wykresów można stwierdzić, że dla przyjętej częstotliwości pracy nadajnika laserowego $f_{nad} = 20$ kHz i wyliczonej rozdzielczości kodowania danych $\Delta t = 7,8$ ns, najkorzystniej jest kodować w odstępie czasu pomiędzy impulsami lasera dane o długości 10 bitów, uzyskamy wówczas najszybszą transmisję danych wynoszącą ok. 175 kb/s.

Dodatkowo przedstawione zostały wykresy pokazujące, jak uległaby zmianie szybkość transmisji przy zmianie rozdzielczości kodowania i częstotliwości repetycji impulsów nadajnika. Poprawienie dokładności wyznaczania czasu pomiędzy impulsami w niewielkim stopniu wpływa na zwiększenie szybkości transmisji, gdyż dwukrotne zwiększenie rozdzielczości kodowania powoduje zwiększenie szybkości transmisji tylko do ok. 190 kb/s. Natomiast zwiększenie częstotliwości pracy nadajnika laserowego do 50 kHz spowodowałoby zwiększenie szybkości transmisji do ok. 380 kb/s.

Należy zauważyć, że maksimum szybkości transmisji przypada dla różnej wartości N , w zależności od tego, w jakiej proporcji względem siebie są częstotliwość pracy nadajnika i rozdzielczość kodowania.

4. Podsumowanie

Lasery impulsowe można wykorzystać do transmisji danych. Możliwe jest zastosowanie kodowania danych w odstępie czasu pomiędzy impulsami lasera. Uzyskane w trakcie badań szybkości transmisji są stosunkowo nieduże w porównaniu do szybkości transmisji możliwych do uzyskania z wykorzystaniem laserów *cw*. Niemniej jednak transmisja danych z wykorzystaniem laserów impulsowych może być atrakcyjna wszędzie tam, gdzie szybkość transmisji nie jest decydującym parametrem, a istotnymi parametrami są zasięg lub niezawodność transmisji. Ponadto moduł transmisji danych może być sprzężony w jedno urządzenie z dalmierzem i być wykorzystywany jako urządzenie wielofunkcyjne nie tylko do pomiaru odległości, ale również do transmisji danych. Jest to cecha niezwykle istotna, gdy chcemy, zachowując ciszę radiową i w sposób trudny do podsłuchu, przekazać dane, np. na polu walki. Szybkość transmisji można zwiększyć poprzez zwiększenie częstotliwości repetycji impulsów (zmniejszenie szerokości połówkowej impulsów nadawanych, wybór lasera o większej wartości parametru *duty factor*), przez zmniejszenie błędu pomiaru czasu pomiędzy odbieranymi impulsami oraz przez zastosowanie układu nadajnika złożonego z kilku diod nadawczych.

LITERATURA

- [1] M. ZYGMUNT, *Metoda detekcji podszumowego sygnału echa w impulsowych dalmierzach laserowych*, rozprawa doktorska WAT, 2002.
- [2] P. PALOJARVI, *Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time of flight laser rangefinding*, rozprawa doktorska, Uniwersytet w Oulu, 2003.

T. DROZD, M. ZYGMUNT, P. KNYSAK, J. WOJTANOWSKI

Analysis of possibility of data transmission with use of pulsed lasers

Abstract. Pulsed lasers are used mainly in lidar systems, which generate laser pulses and detect and analyze reflected signals. In data transmission systems, continuous work lasers are used. It is also possible to use pulsed lasers in such systems. These features would be especially important for devices in which pulsed laser is already embedded and execute another function. This article shows data transmission system conception with the use of pulsed laser. Advantages and limits of this transmission method were described. Analysis of speed of data transmission was performed and influence of individual channel transmission elements on the data transmission speed was shown.

Keywords: data transmission, pulsed lasers, free space optics

