



Optymalizacja toru nadawczo-odbiorczego wysokościomierza laserowego dla układu BSP

JACEK WOJTANOWSKI, MAREK ZYGMUNT,
ZYGMUNT MIERCZYK

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
01-494 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule opisano charakterystyki zasięgowe układu dalmierza laserowego z uwzględnieniem właściwości transmisyjnych atmosfery jako ośrodka propagacji fal elektromagnetycznych. Wnioski z ich analizy umożliwiły optymalizację układu pomiaru wysokości w systemie Bezzałogowego Statku Powietrznego (BSP). W procesie optymalizacji zweryfikowano dobór parametrów laserowej wiązki roboczej oraz dobór parametrów konstrukcyjnych urządzenia. Uwzględniono także właściwości rzeczywistego układu wysokościomierza przy zastosowaniu wybranych fotodiod laserowych w torze odbiorczym. Na podstawie ich parametrów szumowych, wyznaczono wartości maksymalnych zasięgów pracy wysokościomierza. Przeprowadzona optymalizacja uwzględnia wymagania normy PN-EN 60825-1 dotyczącej zastosowań promieniowania laserowego w zakresie bezpiecznym dla oka ludzkiego.

Słowa kluczowe: wysokościomierz laserowy, dalmierz laserowy, BSP, technika laserowa

Symbole UKD: 621.375.826

1. Wprowadzenie

We współczesnych platformach BSP (Bezzałogowy Statek Powietrzny) do określania miejsca położenia stosuje się systemy GPS. Obliczone współrzędne geograficzne są wystarczająco dokładne, natomiast mało dokładne jest określenie wysokości. Informacja o wysokości jest szczególnie istotna, gdy obiekt porusza się w terenie górzystym, pagórkowatym lub zalesionym. Urządzeniem mogącym dostarczyć wystarczająco precyzyjnej informacji może być dalmierz laserowy, który na pokładzie platformy mikro-BSP mógłby pełnić rolę wysokościomierza. Jednak

dalmierz w takim zastosowaniu musi spełniać wiele specyficznych wymagań. Przede wszystkim musi mieć mały ciężar, małe gabaryty, niski pobór mocy, dokładność pomiaru około ± 1 m, zasięg do 1500 m, odporność na zmieniające się warunki atmosferyczne oraz możliwość współpracy z innymi urządzeniami pokładowymi (szczególnie obserwacyjnymi). W celu spełnienia większości tych wymagań należy przeprowadzić analizę możliwości konstrukcyjnych układów optycznych i mechanicznych, a także opracować model detekcji sygnału echa oraz dobrać parametry geometryczne i spektralne zastosowanego promieniowania laserowego.

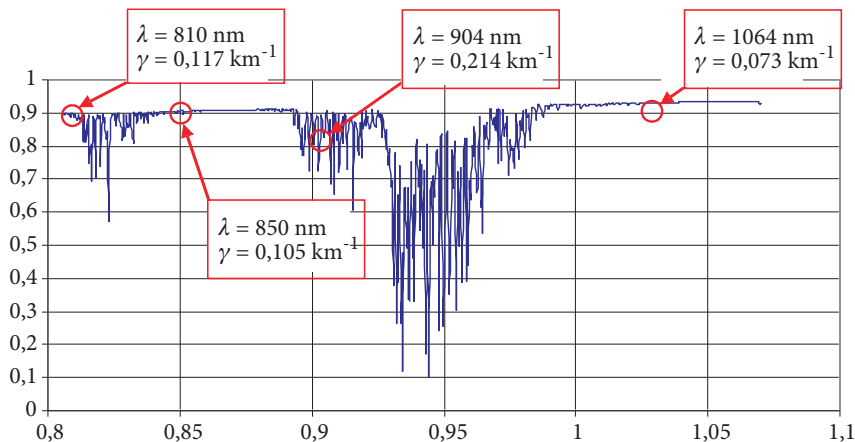
2. Właściwości propagacyjne atmosfery ziemskiej

Parametry wysokościomierza zależą w dużym stopniu od stanu atmosfery oraz od jej właściwości transmisyjnych promieniowania laserowego. Parametry propagacyjne atmosfery, jako mieszaniny gazów i aerozoli, wykazują silne zależności spektralne. W szerokim zakresie długości fal, możliwych do zastosowania występują przedziały silnego pochłaniania (wynikające z właściwości absorpcyjnych gazów składowych), a także tzw. okna transmisyjne, to jest przedziały charakteryzujące się małym współczynnikiem ekstynkcji atmosferycznej γ (osłabiania). Dobór odpowiedniej długości fali promieniowania laserowego uwarunkowany jest więc kształtem widmowego współczynnika przepuszczalności atmosfery. Należy także uwzględnić wartości wszystkich parametrów układu (fotodetektor i elementy optyczne) zależnych od długości fali, wynikające z ich charakterystyk spektralnych. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono charakterystyki widmowego współczynnika przepuszczalności atmosfery ziemskiej dla odległości propagacji 1 km. Wyniki uzyskano za pomocą transmisyjnych kodów radiacyjnych oprogramowania *ModTran*. Dla zwiększenia czytelności zakres widmowy podzielono na dwa podzakresy (800-1100 nm oraz 1100-1600 nm). Podział ten odpowiada jednocześnie typowym zakresom pracy fotodetektorów krzemowych oraz detektorów skonstruowanych z InGaAs.

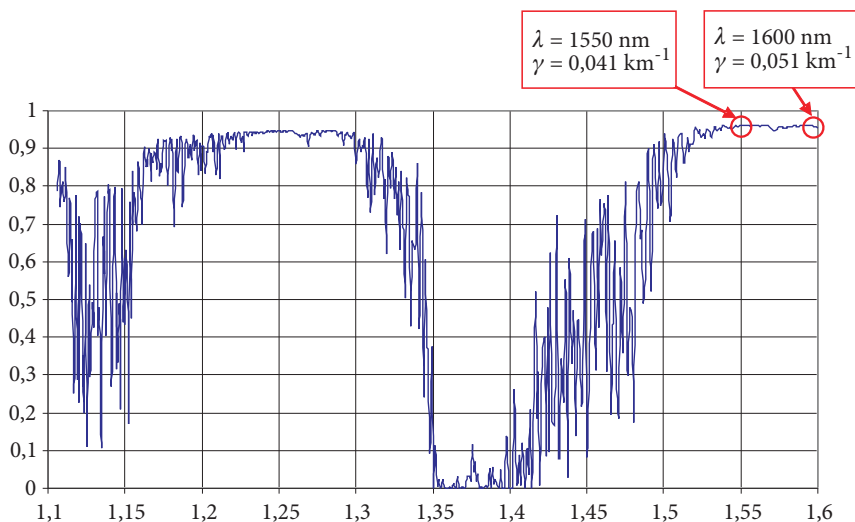
Na powyższych rysunkach zaznaczono również potencjalnie użyteczne długości fali ze względu na dobre właściwości propagacyjne atmosfery oraz dostępność impulsowych źródeł promieniowania laserowego. Na podstawie znajomości transmisyjności atmosfery dla wspomnianych długości fali na odległości 1 km, wyznaczono wartości współczynnika ekstynkcji z zależności:

$$\gamma(\lambda) = -\ln(T_{1\text{km}}(\lambda)), \quad (1)$$

gdzie: γ — współczynnik ekstynkcji atmosferycznej,
 $T_{1\text{km}}$ — transmisyjność atmosfery na odległości 1 km.



Rys. 1. Widmowy współczynnik przepuszczalności atmosfery w zakresie od 800 nm do 1100 nm na odległości 1 km

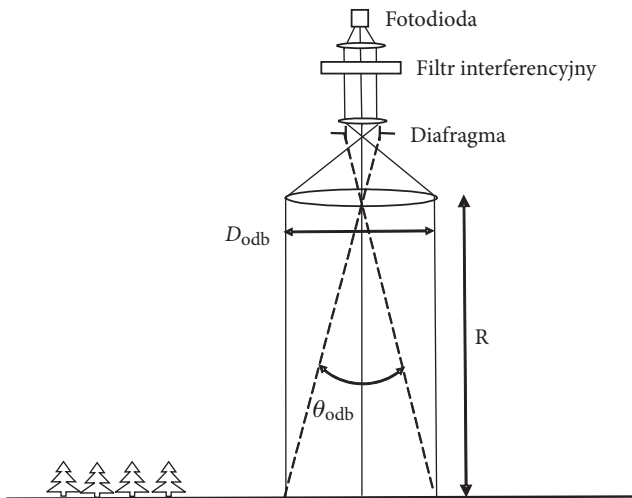


Rys. 2. Widmowy współczynnik przepuszczalności atmosfery w zakresie od 1100 nm do 1600 nm na odległości 1 km

Spośród wskazanych sześciu długości fali, ekstynkcja atmosferyczna osiąga wartość minimalną dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$, przy czym $\gamma(1550 \text{ nm}) = 0,041 \text{ km}^{-1}$. Dodatkowo należy pamiętać, iż układ wysokościomierza przewidziany jest do pracy na wysokości nie większej niż 1,5 km nad powierzchnią ziemi. Na tak niewielkiej odległości różnica w wartości współczynnika ekstynkcji rzędu $0,05 \text{ km}^{-1}$ nie powoduje istotnej różnicy w poziomie mocy transmitowanego sygnału.

3. Analiza zasięgowa dla układu wysokościomierza

W wyniku analizy zdolności zasięgowej układu wysokościomierza określono funkcje zasięgowe, tzn. zależności parametrów charakteryzujących układ od długości drogi propagacji wiązki laserowej (wysokości). Obliczenia wykonano dla różnych długości fal oraz konkretnych realizacji sprzętowych toru detekcyjnego. Uwzględniono deklarowane przez producentów wartości parametrów związanych z czułością i szumami fotodetektorów (APD). Wzięto również pod uwagę charakterystykę promieniowania tła generowanego przez odgórne oświetlenie atmosferyczne, odbite od analizowanej powierzchni, a następnie trafiające (obok użytecznego sygnału echa) do detektora. Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie tor detekcyjny układu.



Rys. 3. Schemat toru detekcji układu wysokościomierza

Należy podkreślić, że w takim układzie nie minimalizuje się wielkości plamki laserowej na analizowanej powierzchni, gdyż uzyskanie sygnału echa od większego obszaru powoduje naturalne uśrednianie ewentualnych jego niejednorodności. Dodatkowo, zwiększona rozbieżność wiązki powoduje zmniejszanie gęstości jej mocy, co z kolei związane jest z normami bezpieczeństwa.

W omawianym układzie moc sygnału echa P_{syg} padającego na detektor opiswana jest zależnością:

$$P_{\text{syg}} = \frac{P_{\text{nad}} \rho D_{\text{odb}}^2 \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{fi}} \exp(-2\gamma R)}{4R^2}, \quad (2)$$

gdzie: P_{nad} — całkowita moc sygnału nadajnika [W];
 ρ — współczynnik odbicia od obiektu;
 D_{odb} — średnica apertury odbiorczej [m];
 η_{opt} — współczynnik transmisji elementów optycznych;
 η_{fi} — współczynnik transmisji filtra interferencyjnego;
 γ — współczynnik ekstynkcji atmosferycznej [km^{-1}];
 R — odległość do powierzchni ziemi [km].

Zależność ta umożliwia ocenę ilościową poziomu mocy uzyskiwanej na detektorze, pochodzącej od użytecznego (z punktu widzenia techniki dalmierczej) sygnału echa. Do obliczeń przyjęto parametry konstrukcyjne układu zestawione w tabeli 1.

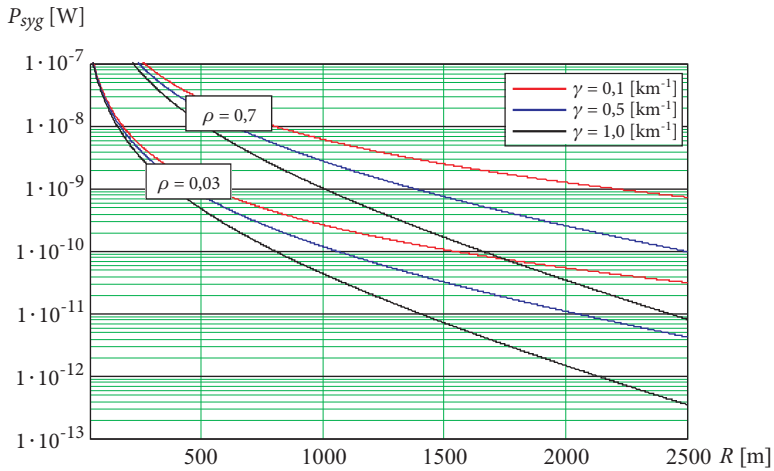
TABELA 1

Wartości parametrów przyjęte do obliczeń mocy promieniowania echa

Parametr	Wartość
moc sygnału nadajnika	$P_{nad} = 25$ [W]
współczynnik odbicia od terenu	$\rho = 0,03-0,7$
średnica obiektywu odbiorczego	$D_{odb} = 0,05$ [m]
współczynnik transmisji filtra interferencyjnego	$\eta_{fi} = 0,8$
współczynnik transmisji elementów optycznych	$\eta_{opt} = 0,85$
współczynnik ekstynkcji atmosfery	$\gamma = 0,1-1,0$ [km^{-1}]

Na rysunku 4 przedstawiono rodzinę krzywych zasięgowych, to jest mocy sygnału echa dla różnych współczynników odbicia od powierzchni ρ oraz współczynników ekstynkcji atmosferycznej γ . Wartości obu parametrów zostały dobrane tak, aby pokrywały przedział wartości możliwych do wystąpienia w praktyce. Przykładowo, założone $\rho_{min} = 0,03$ odpowiada odbiciu promieniowania laserowego od powierzchni wody (niekorzystne warunki odbiciowe), natomiast $\gamma_{max} = 1 \text{ km}^{-1}$ odpowiada niekorzystnym warunkom atmosferycznym (utrudniona propagacja wiązki).

Poziom mocy użytecznego sygnału echa zależy zarówno od wartości współczynnika odbicia od powierzchni, jak i wartości współczynnika ekstynkcji atmosferycznej, przy czym dla małych odległości bardziej zaznacza się współczynnik odbicia, natomiast dla większych odległości ekstynkcja atmosferyczna. Przy warunkach pomiaru wysokościowego, które można uznać za typowe (tj. dla warunków atmosferycznych określonych współczynnikiem ekstynkcji rzędu $0,2 \text{ km}^{-1}$ oraz powierzchni terenu scharakteryzowanej współczynnikiem odbicia rzędu 0,5) należy spodziewać się poziomów mocy sygnału echa rzędu pojedynczych nW. Wynik ten uzyskano dla



Rys. 4. Wartość mocy sygnału echa w funkcji odległości od powierzchni ziemi (dla różnych wartości współczynnika odbicia ρ i ekstynkcji atmosferycznej γ)

parametrów urządzenia przedstawionych w tabeli 1 oraz dla maksymalnego zasięgu wysokościomierza (1500 m). Poziom mocy sygnału echa można zwiększać poprzez zwiększenie apertury D_{odb} lub zastosowanie większej mocy nadajnika P_{nad} . Należy jednak pamiętać o ograniczeniach dotyczących wymiarów i masy urządzenia, a także o konieczności spełnienia norm bezpieczeństwa dotyczących oddziaływania stosowanego promieniowania na wzrok ludzki.

Oprócz użytecznego sygnału echa detektor rejestruje również sygnał pochodzący od promieniowania tła. Promieniowanie to pochodzi głównie od naturalnego oświetlenia atmosferycznego (słonecznego bezpośredniego i rozproszonego), a źródłem sygnału tła dla omawianego przypadku jest „oświetlony” tymże promieniowaniem fragment powierzchni terenu „widziany” przez detektor. W sytuacji niekorzystnej (duże nasłonecznienie), natężenie promieniowania tła E_{\downarrow} dla długości fali z zakresu bliskiej podczerwieni osiąga wartości rzędu $700 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$. Dla omawianego układu wartość mocy tła rejestrowana przez detektor wyraża się następującym wzorem:

$$P_b = \frac{\pi}{16} E_{\downarrow} \rho \theta_{odb}^2 D_{odb}^2 \Delta\lambda \eta_{fi} \eta_{opt} \exp(-\gamma R), \quad (3)$$

gdzie: P_b — moc promieniowania tła padająca na detektor [W];
 θ_{odb} — kąt płaski pola widzenia optycznego układu detekcyjnego [rad];
 $\Delta\lambda$ — szerokość widmowa filtra interferencyjnego [μm].

Wyznaczenie wartości mocy promieniowania tła docierającego do detektora umożliwia porównanie poziomów mocy sygnału echa i sygnału tła docierających

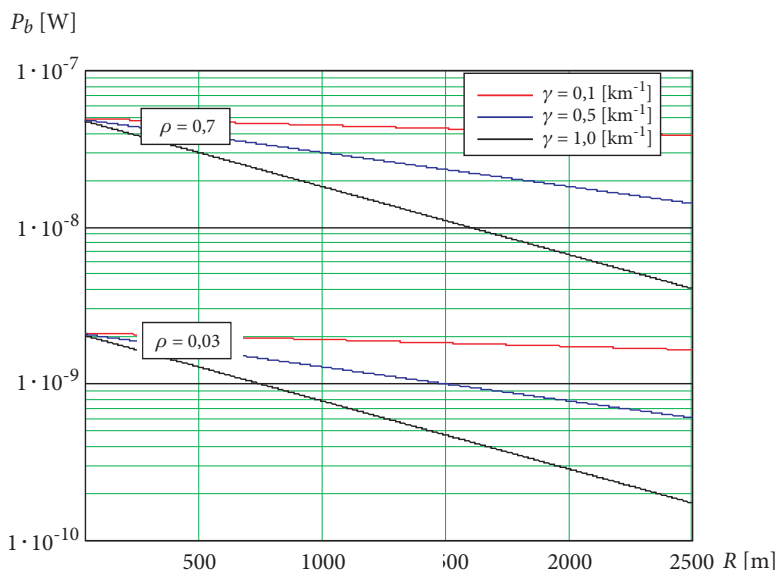
jednocześnie do detektora. Do obliczeń przyjęto parametry zestawione w tabeli 2, odzwierciedlające realną sytuację pomiarową.

TABELA 2

Wartości parametrów przyjęte do obliczeń mocy promieniowania tła

Parametr	Wartość
oświetlenie odgórne	$E_{\downarrow} = 700 \text{ [Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{]}$
współczynnik odbicia od terenu	$\rho = 0,03 - 0,7$
średnica obiektywu odbiorczego	$D_{odb} = 0,05 \text{ [m]}$
kąt płaski pola widzenia układu optyki odbiorczej	$\theta_{odb} = 0,005 \text{ [rad]}$
szerokość spektralna filtra interferencyjnego	$\Delta\lambda = 0,012 \text{ [\mu m]}$
współczynnik transmisji filtra interferencyjnego	$\eta_{fi} = 0,8$
współczynnik transmisji elementów optycznych	$\eta_{opt} = 0,85$
współczynnik ekstynkcyj atmosfery	$\gamma = 0,1 - 1,0 \text{ [km}^{-1}\text{]}$

Na rysunku 5 pokazano rodzinę charakterystyk przedstawiających wartość mocy sygnału tła padającego na detektor w zależności od wysokości układu nad powierzchnią ziemi. Podobnie jak dla wykresów przedstawiających wartość mocy



Rys. 5. Wartość mocy sygnału tła w funkcji odległości od powierzchni ziemi (dla różnych wartości współczynnika odbicia ρ oraz ekstynkcyj atmosferycznej γ)

sygnału echa (rys. 4), współczynnik odbicia od powierzchni oraz współczynnik ekstynkcji atmosferycznej zostały potraktowane jako parametry niezależne od przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego, lecz od panujących warunków pomiarowych, tzn. widoczności atmosferycznej oraz cech odbiciowych powierzchni.

Z porównania rysunków 4 i 5 wynika „słabsza” zależność mocy sygnału tła od wysokości (odległości) niż dla krzywych zasięgowych mocy echa. Związane jest to z występowaniem czynnika R^{-2} w zależności (2). Z rysunku 5 wynika wartość mocy sygnału pochodzącego od promieniowania tła — należy się spodziewać składowej tła na poziomie od kilku do kilkunastu nW.

4. Optymalizacja wysokościomierza

Optymalizacja układu wysokościomierza polega na dobraniu takich jego parametrów, przy których będą spełnione przyjęte dla niego wymagania techniczne. Możliwości pomiarowe urządzenia zależą przede wszystkim od rodzaju zastosowanego detektora, a ściślej jego czułości określanej minimalną mocą sygnału, przy której stosunek sygnału do szumu (SNR) na wyjściu przyjmuje wymaganą wartość. W prezentowanym wysokościomierzu fotodetektorem jest fotodioda lawinowa. Generowany na niej sygnał wskutek docierającego promieniowania jest wzmacniany i odpowiednio przetwarzany.

Dla układu z fotodiodą lawinową SNR wyraża się następującą zależnością:

$$SNR = \frac{(MS_{\lambda}P_{syg})^2}{2qB[(P_{syg} + P_b)S_{\lambda} + I_d]M^{2+x} + \frac{4kTBF}{R_L}}, \quad (4)$$

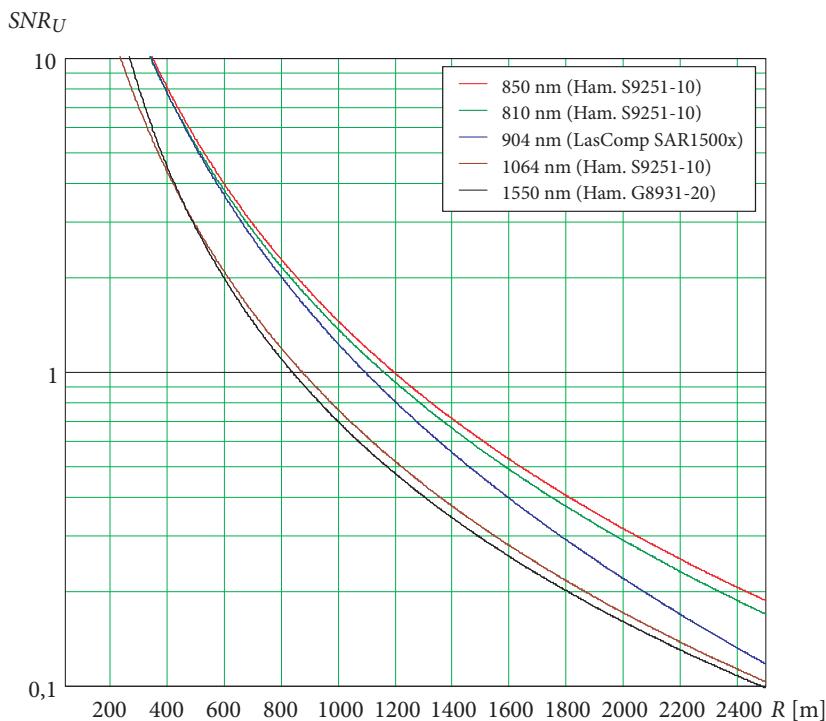
gdzie: P_{syg}, P_b — moc promieniowania odpowiednio echa i tła [W];
 S_{λ} — czułość fotodetektora [AW^{-1}];
 I_d — prąd ciemny fotodiody [A];
 M — współczynnik wzmocnienia lawinowego;
 x — współczynnik materiałowy;
 B — pasmo przenoszenia wzmacniacza [Hz];
 F — współczynnik szumów wzmacniacza;
 q — ładunek elementarny [C].

Powyższa zależność, opisująca parametr SNR w dziedzinie mocy, wiąże się z parametrem SNR_U w dziedzinie napięć (ozn. SNR_U) następującą zależnością:

$$SNR_U = \sqrt{SNR}. \quad (5)$$

Zależność (4) umożliwia przeprowadzenie optymalizacji układu, przy uwzględnieniu zależności (2) i (3). Analizę doboru optymalnych wartości parametrów układu należy przeprowadzić etapowo, badając oddzielnie zależności ze względu na poszczególne parametry.

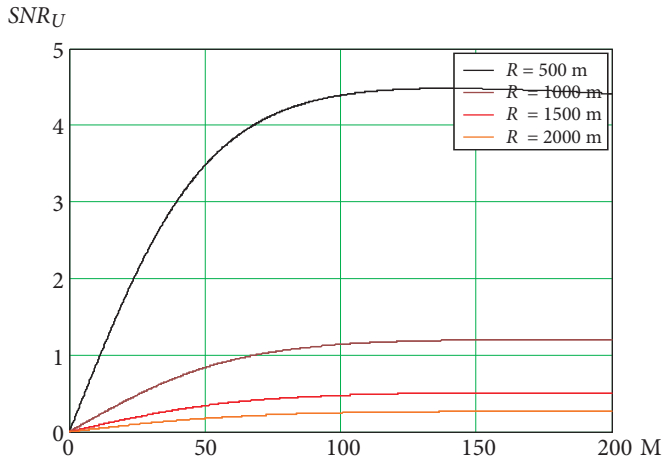
W punkcie 2 omówiono właściwości propagacyjne atmosfery ziemskiej w aspekcie doboru optymalnej długości fali stosowanego promieniowania. Zwrócono uwagę na kilka potencjalnie użytecznych wartości λ . Spośród nich najlepsze cechy propagacyjne przypisać można promieniowaniu o długości fali 1550 nm. Nie jest to jednak jednoznaczne z tym, że właśnie promieniowanie o tej długości fali jest optymalnym. Uwzględnić należy także możliwości detekcyjne tego promieniowania, a więc wziąć pod uwagę konkretny typ detektora oraz jego charakterystyki spektralne i szumowe. Na rysunku 6 przedstawiono krzywe zasięgowe $SNR_U(R)$ dla różnych długości fali przy uwzględnieniu parametrów wybranych fotodiod lądowych.



Rys. 6. Charakterystyki SNR_U w funkcji odległości (wysokości) dla wybranych długości fali w przypadku zastosowania wybranych fotodiod lądowych (Hamamatsu, Laser Components)

Na podstawie powyższych charakterystyk można stwierdzić, że optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie w torze nadawczym impulsowego źródła promieniowania laserowego o długości fali 850 nm, a w torze odbiorczym fotodiody lądowej Hamamatsu (S9251-10).

Współczynnik wzmocnienia lawinowego prądu fotodiody lawinowej zależy od jej punktu pracy. Na rysunku 7 przedstawiono zależność SNR_U wyznaczoną dla wspomnianej fotodiody lawinowej w funkcji wartości współczynnika wzmocnienia lawinowego M przy uwzględnieniu typowych warunków pomiarowych i różnych wysokości. Charakterystyka ta pozwala stwierdzić, że wartość współczynnika wzmocnienia lawinowego około 100 jest wystarczająca.



Rys. 7. Zależność SNR_U w funkcji wartości współczynnika wzmocnienia lawinowego M (dla fotodiody lawinowej uznanej za optymalną dla różnych wysokości pracy układu)

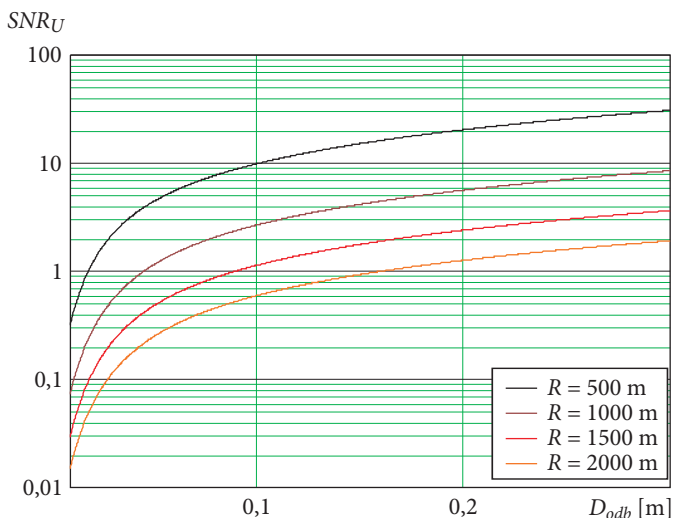
Apertura optycznego układu detekcyjnego jest parametrem istotnym zarówno dla jego parametrów eksploatacyjnych, jak i gabarytów. Układ wysokościomierza przewidziany do zastosowań na BSP powinien mieć minimalne rozmiary oraz minimalną masę. Z drugiej strony minimalizacja wartości tych parametrów nie powinna pogarszać parametrów urządzenia poniżej poziomu postawionych wymagań. Analiza optymalizacyjna pod kątem doboru właściwej apertury odbiorczej jest więc zasadna i konieczna. Do wykonania obliczeń numerycznych przyjęto parametry rzeczywistego układu detektora (Hamamatsu APD S9251-10), które zebrano w tabeli 3. Na rysunku 8 zaprezentowano wykresy zależności stosunku sygnał/szum w funkcji wartości średnicy apertury odbiorczej D_{odb} dla różnych wysokości pracy układu. Omawiane zależności wykazują kształt krzywych monotonnie narastających. Należy jednak podkreślić, że tempo ich narastania nie jest stałe i maleje w miarę zwiększania się wartości apertury D_{odb} . Wynika stąd wniosek, iż zwiększanie wartości apertury powyżej pewnego poziomu jest nieefektywne, gdyż powoduje relatywnie coraz mniejszą poprawę stosunku sygnał/szum. Wartość apertury optymalnej odpowiada zatem odciętej punktu, w którym wyraźnie maleje tempo zmian SNR_U . Dla wszystkich krzywych zaprezentowanych na rysunku 8 może to być $D_{odb} \sim 4$ cm.

TABELA 3

Wartości parametrów zoptymalizowanej fotodiody lawinowej (S9251-10)

Parametr	Wartość
współczynnik wzmocnienia lawinowego	$M = 100$
czułość fotodetektora (dla $M = 1$)	$S_\lambda = 0,55 \text{ [AW}^{-1}\text{]}$
prąd ciemny fotodiody	$I_d = 0,4 \cdot 10^{-9} \text{ [A]}$
współczynnik materiałowy	$x = 0,3$
współczynnik szumów wzmacniacza	$F = 1,3$
pojemność fotodiody	$C_d = 1,9 \cdot 10^{-12} \text{ [F]}$
pojemność wejściowa wzmacniacza	$C_w = 5 \cdot 10^{-12} \text{ [F]}$

Z punktu widzenia możliwości poprawnej detekcji sygnału echa i oddzieleniu go od zakłócającego sygnału tła, koniecznym jest założenie minimalnej wartości SNR (SNR_U). W omawianym urządzeniu mamy do czynienia z techniką detekcji podszumowej. Umożliwia ona wydzielenie użytecznego sygnału echa nawet wtedy, gdy jego poziom znajduje się poniżej poziomu szumów. Jak widać z rysunku 8, optymalnej apertury odbiorczej $D_{odb} = 4 \text{ cm}$ odpowiada $SNR_U > 0,2$. Można więc uznać, że uzyskana wartość pozwala na efektywne wyodrębnienie użytecznego sygnału echa metodą podszumową.



Rys. 8. Zależność SNR_U w funkcji wielkości apertury odbiorczej (dla wybranej optymalnej fotodiody lawinowej) dla różnych wysokości pracy układu

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono procedurę i wyniki optymalizacji laserowego wysokościomierza przewidzianego do zastosowań na BSP. Przeprowadzona analiza umożliwiła dobór optymalnych parametrów wysokościomierza przy założeniu wysokości jego pracy od 40 m do 1500 m. Optymalizację przeprowadzono minimalizując napięciowy stosunek sygnał/szum przy zachowaniu założeń dotyczących specyfiki zastosowań omawianego układu (niewielkie wymiary, mała masa, bezpieczeństwo). Optymalnym rozwiązaniem okazało się wykorzystanie w torze nadawczym impulsowego źródła promieniowania laserowego o długości fali $\lambda = 850$ nm oraz zastosowanie w torze odbiorczym fotodetektora w postaci fotodiody lawinowej. Punkt pracy fotodiody powinien gwarantować wartość współczynnika wzmocnienia lawinowego na poziomie 100. W wyniku przeprowadzonej analizy optymalizacyjnej wielkości apertury odbiorczej, określono jej wartość na $D_{odb} = 4$ cm. Konfiguracja optymalna gwarantuje wartość napięciowego stosunku sygnał/szum, dla maksymalnego zasięgu pracy urządzenia, na poziomie $> 0,2$. Stosowana w urządzeniu technika detekcji podsumowej pozwala uznać tę wartość za wystarczającą do prawidłowej detekcji użytecznego sygnału echa.

Artykuł wpłynął do redakcji 6.03.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2008 r.

LITERATURA

- [1] D. DUPUY, M. LESCURE, H. TAB-BÉTEILLE, *High frequency scanning response of an APD photocurrent for laser range finder*, Elsevier, Sensors and Actuators A110, 2004, 289-293.
- [2] U. PANNE, *Laser remote sensing*, Elsevier Science B.V., vol. 17, 1998, 491-500.
- [3] A. WEHR, U. LOHR, *Airborne laser scanning — an introduction and overview*, Elsevier, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 1999, 68-82.
- [4] W. GONG, T. CHYBA, D. A. TEMPLE, *Eye-safe compact scanning LIDAR technology*, Elsevier, Science Direct.

J. WOJTANOWSKI, M. ZYGMUNT, Z. MIERCZYK

Optimization of laser altimeter for unmanned aerial vehicle

Abstract. The analysis of the laser altimeter main characteristics has been developed, including the influence of atmospheric propagation properties. The analysis allowed us to perform the optimization procedure with respect to device application on unmanned aircraft system. The optimization process covered both laser beam characteristics and major structural parameters of the altimeter. The application of real avalanche photodiodes and their noise characteristics were taken into consideration in all the calculations, thus enabling to evaluate the maximum working altitudes of the device and to compare the photodetectors themselves. The PN-EN 60825-1 safety standard was respected in all the estimations to satisfy the requirements of the eye-safe laser technique.

Keywords: laser altimeter, rangefinder, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft system, laser technology

Universal Decimal Classification: 621.375.826