

Artur CYWIŃSKI
Roman OSTROWSKI

PROMIENIOWANIE LASEROWE JAKO ISTOTNE NARZĘDZIE W POSZUKIWANIU OBIEKTÓW PODWODNYCH

STRESZCZENIE *W artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia dotyczące systemów laserowych do wykrywania obiektów podwodnych. Transmisja wody morskiej ulega silnym, cyklicznym zmianom w zależności od czasu jak i położenia. W analizowanych obszarach Bałtyku, średni współczynnik ekstynkcji zmieniał się od 0.3 do 2.4 m⁻¹. Analiza promieniowania tła pokazała, że jego moc zmienia się w zakresie od pojedynczych nW do 25 nW, w zależności od kąta padania promieniowania słonecznego. Mając oszacowane moc sygnału i moc szumów tła, można wyznaczyć stosunek sygnału do szumu (SNR). Zakładając, że minimalna wartość SNR wynosi 17.5 dB, otrzymano zasięgi wykrycia obiektów podwodnych zmieniające się od 7 do 30 m. Pozwala to efektywnie wykrywać i określać położenie takich obiektów podwodnych jak kontenery czy miny kotwiczne.*

Słowa kluczowe: *dalmierz laserowy, obiekt podwodny, współczynnik ekstynkcji, zasięg wykrycia*

dr inż. Artur CYWIŃSKI
a.cywinski@amw.gdynia.pl

Instytut Uzbrojenia Okrętowego, Akademia Marynarki Wojennej
81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69

dr inż. Roman OSTROWSKI
rostrowski@wat.edu.pl

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

1. WSTĘP

Doświadczenia ostatnich lat pokazują, że w wielu rejonach żeglugowych, szczególnie tych gdzie trwały działania wojenne, dla żeglugi morskiej występować może zagrożenie kryjące się pod powierzchnią wody. Stanowią je mogą swobodnie dryfujące zerwane miny kotwiczne, nierzadko jeszcze z okresu II Wojny Światowej, jak również inne elementy uzbrojenia takie, jak miny denne, torpedy, zatopiona amunicja, etc. Również działania asymetryczne w różnych rejonach żeglugowych dotyczyć mogą działań pod powierzchnią wody. Tory podejściowe do portów, redy, kotwiczowiska i same porty nie są monitorowane pod powierzchnią wody i mogą stać się bardzo łatwym celem działań terrorystycznych. Tereny te wraz ze swoją infrastrukturą to miejsca szczególne o strategicznym znaczeniu dla poprawnego funkcjonowania gospodarki morskiej państwa, a ich częściowe nawet wyłączenie z eksploatacji może mieć poważne konsekwencje dla poprawności funkcjonowania całego państwa. Zasobnik wypełniony materiałem wybuchowym lub innym materiałem niebezpiecznym, z powodzeniem może zostać zatopiony w miejscu przyszłego postoju lub przejścia statku-celu, a fakt ten pozostanie niezauważony. Detonacja takiego ładunku nastąpić może w dowolnym momencie, w zależności od zamiaru sprawcy, z wykorzystaniem zapalnika czasowego lub zdalnego. Znane są już przypadki dysponowania przez terrorystów bronią minową przygotowywana do postawienia w rejonach szczególnie newralgicznych dla żeglugi morskiej.

Istnieje, zatem konieczność wykrywania wszelkich obiektów podwodnych, począwszy od małych, takich jak improwizowane urządzenia wybuchowe zalegające na dnie lub określonej głębokości, poprzez podwodne, autonomiczne lub kierowane aparaty pływające i płetwonurków, aż po duże jak np. okręty podwodne czy dryfujące kontenery. Wszystkie one w określonych warunkach mogą stanowić zagrożenie dla jednostek nawodnych i mieć zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo żeglugi.

W przypadku pojawienia się zagrożenia w rejonie pływania koniecznym staje się jego sprawdzenie pod względem występowania w nim obiektów niebezpiecznych i neutralizacja takich obiektów by rejon ten był ponownie, w jak najkrótszym czasie, bezpieczny dla żeglugi. Takie działanie to duże przedsięwzięcie logistyczne i militarne, które przeprowadzone może być wyłącznie przez wyspecjalizowane jednostki sił morskich danego państwa lub grupy sił międzynarodowych. Przedsięwzięcie takie wiąże się jednak z koniecznością zaangażowania do działań różnego rodzaju specjalistycznych okrętów (trałowców i niszczycieli min), a niejednokrotnie również sił lotniczych. Poszukiwanie

obiektów niebezpiecznych w ramach takiego przedsięwzięcia może być długotrwałe i w pełni zależne od panujących warunków hydrometeorologicznych. W przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych akcja taka może być przerwana, a jej wznowienie wiązać się będzie z realizacją poszukiwania obiektów niebezpiecznych od początku. Takie działania to ogromne koszty dla nie tylko ponoszone przez marynarkę wojenną, ale także przez armatorów ze względu na przestój statków lub zmiany tras żeglugowych.

Alternatywa dla takich działań jest wykorzystanie do poszukiwań systemów wykorzystujących promieniowanie laserowe jako narzędzie penetrujący środowisko wodne.

W przypadku, gdy obiektem niebezpiecznym może być mina lub inny obiekt z ładunkiem wybuchowym, laserowe poszukiwanie daje możliwość uniknięcia pobudzenia zapalników kontaktowych i niekontaktowych, a tym samym poderwania materiału wybuchowego. Toteż wysoce celowym wydaje się być włączenie do przeciwdziałania zagrożeniu spod powierzchni wody, nosicieli powietrznych do przenoszenia laserowych układów skanujących i dalmierczych.

2. MORSKIE SYSTEMY LASEROWE

Lata dziewięćdziesiąte ubiegłego wieku to szybki rozwój optoelektroniki, a w niej również metod umożliwiających precyzyjne badania powierzchni morza, toni wodnej, a w niektórych przypadkach także dna morskiego. Metody te pozwalają wykrywać i lokalizować obiekty małogabarytowe i wielkogabarytowe w toni morskiej do głębokości zależnej od optycznych właściwości wody, jak również samego obiektu podwodnego. Szczególnie atrakcyjną wydaje się być zastosowanie promieniowania laserowego do poszukiwania i lokalizacji obiektów podwodnych znajdujących się na niewielkich (rzędu do kilkudziesięciu metrów) głębokościach. Zapewnienie monitoringu w takim zakresie głębokości, w większości rejonów, w pełni zabezpiecza potrzeby bezpiecznego pływania jednostek. Alternatywą dla sił morskich w wykrywaniu i likwidacji zagrożenia podwodnego mogą być zatem morskie, lotnicze systemy laserowe – LIDAR-y morskie (Light Detection and Ranging) [1, 2].

W chwili obecnej na świecie funkcjonują już systemy laserowe służące do pomiarów głębokości badanych akwenów wodnych i odwzorowania dna, uzyskując dane niezbędne do tworzenia podwodnych map terenu, a co najważniejsze służące do wykrywania obiektów podwodnych. Niektóre z tych systemów są modernizowane i ulepszane, a do poszukiwania obiektów stosuje się

najnowsze metody detekcji sygnałów, metody transmisji i obróbki danych. Pracujące obecnie lotnicze lidary morskie prezentują sobą różne klasy i generacje urządzeń tego typu, których podział wynika głównie z przeznaczenia oraz zastosowanych technik poszukiwania obiektów podwodnych.

Do najważniejszych, obecnie pracujących lotniczych systemów laserowych do poszukiwania i lokalizacji obiektów podwodnych, zalicza się:

- systemy pomiarów batymetrycznych: LADS Mk II (Laser Airborne Depth Sounder), Larsen, SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey) [3, 4];
- systemy wykrywania obiektów podwodnych: Hawk-Eye, SHOALS, Magic Lantern, ALMDS (Airborne Laser Mine Detection System), LLSS (Laser Line Scan System) [5, 6];
- systemy wykrywania i zwalczania min: RAMICS (Rapid Airborne Mine Clearance System) [5].

Prezentowany tu podział systemów odpowiada rozwojowi kolejnych generacji lotniczych, morskich systemów laserowych, które od prostych pomiarów i batymetrii płycizn rozwinęły się do w pełni aktywnych systemów pozwalających neutralizować wykryte zagrożenie.

Na korzyść prezentowanych systemów, oprócz bezpieczeństwa załogi, wynikającego z operowania poza obszarem rażenia niebezpiecznych obiektów podwodnych, przemawia również czas rozpoznania akwenu niebezpiecznego. Ten właśnie czynnik rewolucjonizuje szybkość w pozyskiwaniu danych z określonego rejonu i przeszukiwaniu akwenów wodnych. Lotniczy system laserowy daje możliwość rozpoznania akwenu niemalże z dowolną prędkością, jest mobilny i w każdej chwili może być szybko przerzucony w inny rejon działania w krótkim czasie, czego nie mogą osiągnąć siły morskie. Nie bez znaczenia jest również łatwość przeszukiwania rejonów niedostępnych dla statków z różnych względów, również bezpieczeństwa oraz niewielki czas mobilizacji sprzętu do pracy.

Perspektywicznym przykładem poszukiwania i jednoczesnego niszczenia obiektów podwodnych stanowiących zagrożenie dla żeglugi może być system RAMICS. Ten laserowy, lotniczy system szybkiego niszczenia obiektów łączy w sobie technologię laserowego wykrywania i lokalizacji obiektów podwodnych, głównie min, z techniką ich niszczenia przez podsystem artyleryjski. W kierunku miny wystrzelona zostaje seria około 20-50 pocisków, a prawdopodobieństwo, że jeden lub więcej z nich dokona penetracji głowicy bojowej wynosi 0,95. Dzięki temu, że pocisk ma kształt otwartego cylindra i przy wlocie do wody ma bardzo dużą prędkość, tworzy się w wodzie kawerna kawitacyjna (bąbel powietrzny), a pocisk znajdujący się wewnątrz kawerny utrzymuje wysoką wartość energii kinetycznej i jest w stanie poruszać się w toni wodnej z dużą prędkością.

Wszystkie operacje związane z ostrzeliwaniem miny odbywają się w bezpiecznej odległości od niej, co gwarantuje bezpieczeństwo załogi pracującej przy zwalczaniu min. Technologia RAMICS jest kompatybilna z innymi systemami pracującymi w warstwie litoralnej i weszła na wyposażenie US ARMY w 2007 roku.

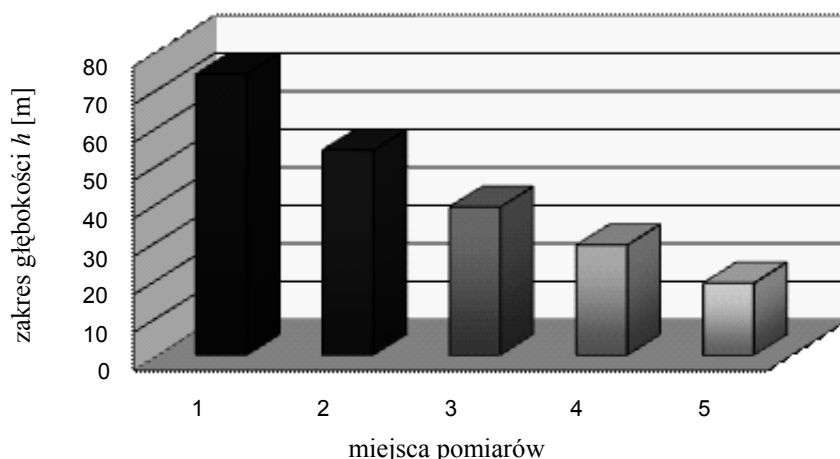
Jednym z najdłużej działających systemów, który w oparciu o doświadczenia przeszedł szereg modernizacji jest australijski, lotniczy, laserowy system LADS Mk II [3, 5]. Zawiera on najnowocześniejsze rozwiązania techniczne i może być przedstawiony jako reprezentatywny dla całej podgrupy lotniczych systemów laserowych (zwłaszcza pomiarów batymetrycznych). Pozwala on na przeszukanie 64 km² w ciągu godziny wykonując przy tym 3 240 000 sondowań. Przykładowe parametry systemu zaprezentowano w tabeli 1.

TABELA 1

Podstawowe dane techniczne systemu LADS MK II [3]

Dane	LADS MK II
Platforma	samolot
Typ samolotu	Dash 8-202
Zasięg samolotu [km]	3700
Prędkość maksymalna [m/s]	-
Prędkość nominalna [m/s]	90
Wysokość operacyjna [m]	350-500
Rodzaj lasera	Nd:YAG
Długość fali (podczerwień) [nm]	1064
Długość fali (zielony) [nm]	532
Dostrajanie	automatyczne
Częstotliwość sondowania [Hz]	900
Szerokość sondowanego pasa na wys. 500 m [m]	240
Zdolność operacyjna	całodobowa
Maksymalny czas sondowania [godz.]	-
Wydajność [km ² /godz.]	64
Liczba sondowań na km ²	50 625
Liczba sondowań na godzinę	3 240 000
Rozmiar siatki [m]	3
Gęstość sondowania (rozmiar kwadratu)	5x5,4x4,3x3,2x2
Zakres głębokości [m]	0,5-70
Prędkość wykonywania pomiarów [m ² /s]	21 600
Dokładność pomiaru głębokości [m]	Standard IHO S44
Dokładność pozycjonowania [m]	±5
System pozycjonowania	WADGPS, GPS, GLONASS/GPS
Ekipa obsługująca system	1 osoba

System LADS MK II w przypadku czystych, płytkich wód może być użyty jako zasadniczy środek do zbierania danych batymetrycznych lub na głębszych i bardziej mętnych wodach może uzupełniać prace jednostek nawodnych. Możliwości skutecznych zasięgów osiągnięte przez LADS Mk II obrazuje poniższy rysunek 1.



Rys. 1. Skuteczne zasięgi działania systemu LADS MK II [7]:

1. M. Koralowe, M. Czerwone (do 70 m), 2. Wielka Rafa Koralowa, Zatoka Arabska, C. Bassa, M. Timor (do 50 m), 3. Południowa Australia, Nowa Południowa Walia, Nowa Zelandia, Alaska (do 35 m), 4. C. Torresa – pora sucha (do 25 m), 5. C. Torresa – pora deszczowa (do 15 m).

Dane przedstawione na rysunku 1 wskazują duże zróżnicowanie możliwości wykonywania pomiarów głębokości przez ten sam system. Na podstawie przedstawionych wyników widać jednoznacznie, że miejsca, których dotyczyły pomiary mają decydujący wpływ na zasięg przenikania promieniowa laserowego w głąb toni wodnej. Ten sam system w zależności od warunków atmosferycznych czy badanego rejonu może osiągać różne wyniki pomiarów i to w stosunkowo dużej rozbieżności osiągniętych zakresów głębokości. Fakt ten dotyczy wszystkich systemów LIDAR stosowanych do pracy w środowisku wodnym.

Zaprezentowane powyżej systemy, oprócz przeznaczenia, różnią się między sobą skutecznym zasięgiem wykrywania obiektów podwodnych czy zakresem mierzonej głębokości. Dostrzec można wiele czynników wpływających na taki stan rzeczy. Poza rozwiązaniami technicznymi, związanymi z konstrukcją systemu laserowego, duże znaczenie ma położenie geograficzne badanego rejonu. Element ten determinuje kąt położenia Słońca oraz jego przebieg po półsferze, jako czynnika stanowiącego tło dla układów detekcji dalmierzy laserowych wykorzystywanych w systemach LIDAR. Położenie geograficzne to również różnorodność wód pod względem jej zdolności trans-

misyjnych promieniowania. To też przy szacowaniu możliwości wykorzystania lasera jako narzędzia do poszukiwania obiektów podwodnych należy dobrze rozpoznać środowisko wodne pod kątem jego składu chemicznego i biologicznego.

Najważniejszym elementem determinującym użycie systemu laserowego w danym akwenie są własności ośrodka wodnego. Ten sam system w zależności od warunków atmosferycznych lub badanego rejonu może osiągać różne wyniki pomiarów i to w stosunkowo dużej skali osiąganych zakresów głębokości (rys. 1). Fakt ten dotyczy wszystkich systemów LIDAR stosowanych do pracy w środowisku wodnym, a przedstawione systemy, w innych warunkach środowiskowych mogą działać z dużym ograniczeniem lub być całkowicie nieprzydatne.

3. BADANIA PRZYDATNOŚCI PROMIENIOWANIA LASEROWEGO W BAŁTYKU

Biorąc pod uwagę fakt, że rejon Bałtyku był teatrem działań wojennych i do dnia dzisiejszego znajduje się tutaj wiele zatopionego uzbrojenia, celowym wydaje się być zastosowanie lasera do jego poszukiwania. Szereg prowadzonych badań miał odpowiedzieć na pytanie; na ile promieniowanie laserowe będzie przydatne do penetracji i poszukiwania obiektów podwodnych w tak specyficznym akwenie jak południowa część Bałtyku. Przez przydatność promieniowania laserowego jest rozumiany skuteczny zasięg wykrywania obiektów znajdujących się pod powierzchnią wody.

Położenie geograficzne to również różnorodność wód pod względem jej zdolności transmisyjnych promieniowania. Południowa część Bałtyku jest szczególnie trudna pod względem zawartości różnych substancji i zmienności przejrzystości wody (dotyczy to także naszych wód terytorialnych).

Aby określić możliwości wykorzystania promieniowania laserowego w lotniczych systemach morskich do poszukiwania i lokalizacji niebezpiecznych obiektów podwodnych w rejonie Bałtyku południowego należało opracować model uwzględniający:

- parametry obiektu podwodnego (reprezentowany przez jego właściwości odbiciowe promieniowania ρ i głębokość zanurzenia R_w);
- parametry środowiska wodne (reprezentowane przez współczynnik ekstynkcji wody morskiej c ($\lambda = 532$ nm));
- parametry dalmierza laserowego (nadajnik i odbiornik).

Obiekt podwodny reprezentowany jest przez jego współczynniki odbicia promieniowania. Wielkość ta zależna jest od wielu czynników takich jak kolor

farby pokryciowej czy rodzaj powierzchni [8]. Nie bez znaczenia jest także czas zalegania obiektu w wodzie, który powodując przyleganie glonów i innej fauny, determinuje zmianę właściwości odbiciowych obiektu.

3.1. Środowisko wodne

Tak więc te trzy grupy parametrów decydować będą o skuteczności jego użycia. W przeciwieństwie do parametrów układów laserowych czy metod poszukiwania, parametry środowiska wodnego stanowią ten element w procesie poszukiwania, który jest niezmienny lub zmienia się powoli z punktu widzenia mijającego czasu i rozwoju techniki i w żaden sposób nie jest od nich zależny. Tak więc, oddziaływanie na ten parametr nie jest możliwe na drodze postępu technicznego, a właściwości wody morskiej wynikają jedynie z szeregu naturalnych procesów w niej zachodzących, w których dopatrywać się można tylko pewnych cyklicznych zmian właściwości. Toteż najistotniejszym elementem w modelu jest wyrażenie w sposób matematyczny zmian hydrometeorologicznych. W tym celu konieczny było przeprowadzenie szeregu badań środowiskowych pozwalających określić właściwości optyczne wody oraz charakter ich zmian w różnych sezonach. Wieloletnie badania pozwoliły określić charakter tych zmian, które wyrażone współczynnikiem ekstynkcji wody $c(\lambda)$ przybierają wartości jak w tabeli 2, a graficzne przedstawienie przebiegu interpolacyjnej funkcji sklepanej $S(t)$ zmienności wartości średnie współczynnika $c(\lambda)$ w badanych rejonach zobrazowany na rysunku 2.

TABELA 2

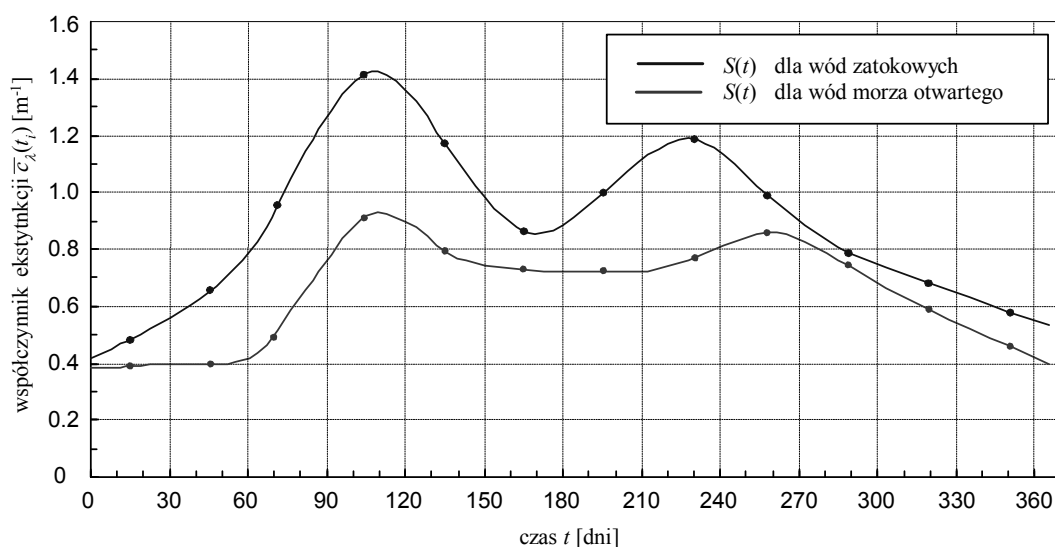
Wartości współczynnika ekstynkcji dla wód przybrzeżnych RP

miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$c(\lambda)$ [m^{-1}]	0,49	0,65	0,88	1,42	1,16	0,86	1,01	1,19	0,98	0,80	0,68	0,58
$c_{min}(\lambda)$	0,26	0,41	0,46	0,88	0,34	0,48	0,81	0,79	0,30	0,44	0,23	0,33
$c_{max}(\lambda)$	0,76	1,01	1,35	2,44	1,81	1,14	1,25	1,55	1,74	1,44	1,21	0,93

3.2. Układ laserowy

Do modelu przyjęto dane typowych nadajników laserowych stosowanych w lotniczych systemach poszukiwania oraz dokonano szeregu niezbędnych założeń, wśród których najistotniejsze to takie, że powierzchnia obiektu podwodnego oświetlana jest z pewnej apertury kołowej nadajnika laserowego

w odległości R_w . Założono także, że wielkość plamki laserowej na obiekcie jest mniejsza od rozmiarów obiektu, a obiekt ustawiony jest prostopadle do wiązki, jak również, że obiekt rozprasza padające promieniowanie laserowe zgodnie z prawem Lamberta.



Rys. 2. Przebieg interpolacyjnej funkcji sklepanej $S(t)$ zmienności wartości średniej współczynnika ekstynkcji wody $c(\lambda)$ w badanych rejonach południowego Bałtyku [9]

Obliczenia przeprowadzone zostały dla przykładowego dalmierza laserowego Nd:YAG z konwersją częstotliwości na II-gą harmoniczną generującego promieniowanie o długości fali $\lambda = 532$ nm. Do obliczeń przyjęto wartości współczynników ekstynkcji wody uzyskane z czteroletnich obserwacji badanego rejonu. Pozostałe parametry zestawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Założone parametry do obliczeń

Parametr	Wartość
moc sygnału nadajnika	$P_{NAD} = 4,3$ MW
energia impulsu laserowego	$E_i = 30$ mJ
czas trwania impulsu laserowego	$\tau_i = 7$ ns
współczynnik transmisji przez granicę ośrodków	$\rho_{gr} = 0,98$
współczynnik odbicia od obiektu	$\rho = 0,05 \div 0,3$
średnica optyki odbiorczej	$D_{ODB} = 0,11$ m
współczynnik transmisji optyki odbiorczej	$\eta_{OPT} = 0,98$
współczynnik transmisji filtra interferencyjnego	$\eta_{FI} = 0,6$
zanurzenie obiektu	$R_w = 0,5 \div 40$ m
współczynnik ekstynkcji wody	$c(\lambda)_{532\text{ nm}} = 0,2 \div 1,4$ m^{-1}
stała związana ze stratami w atmosferze	$\rho_a = 2,4 \times 10^{-3}$

Jak już wspomniano, o zasięgu wykrycia obiektu podwodnego decydować będą:

- parametry dalmierza laserowego (nadajnik i odbiornik);
- parametry obiektu (reprezentowany przez jego właściwości odbiciowe promieniowania ρ i głębokość zanurzenia R_w);
- parametry środowiska wodne (reprezentowane przez współczynnik ekstynkcji wody morskiej c ($\lambda = 532$ nm)).

O możliwości wykrycia obiektu podwodnego i określeniu jego położenia decydować będzie czułość fotoodbiornika określana jako minimalna moc sygnału, przy której stosunek sygnału do szumu (SNR) na wyjściu przyjmuje wymaganą wielkość. W niekoherentnej (bezpośredniej) metodzie detekcji sygnału, SNR mierzony na wyjściu z detektora jest miarą sprawności działania dalmierza laserowego i decydować będzie o zasięgu wykrycia obiektu podwodnego.

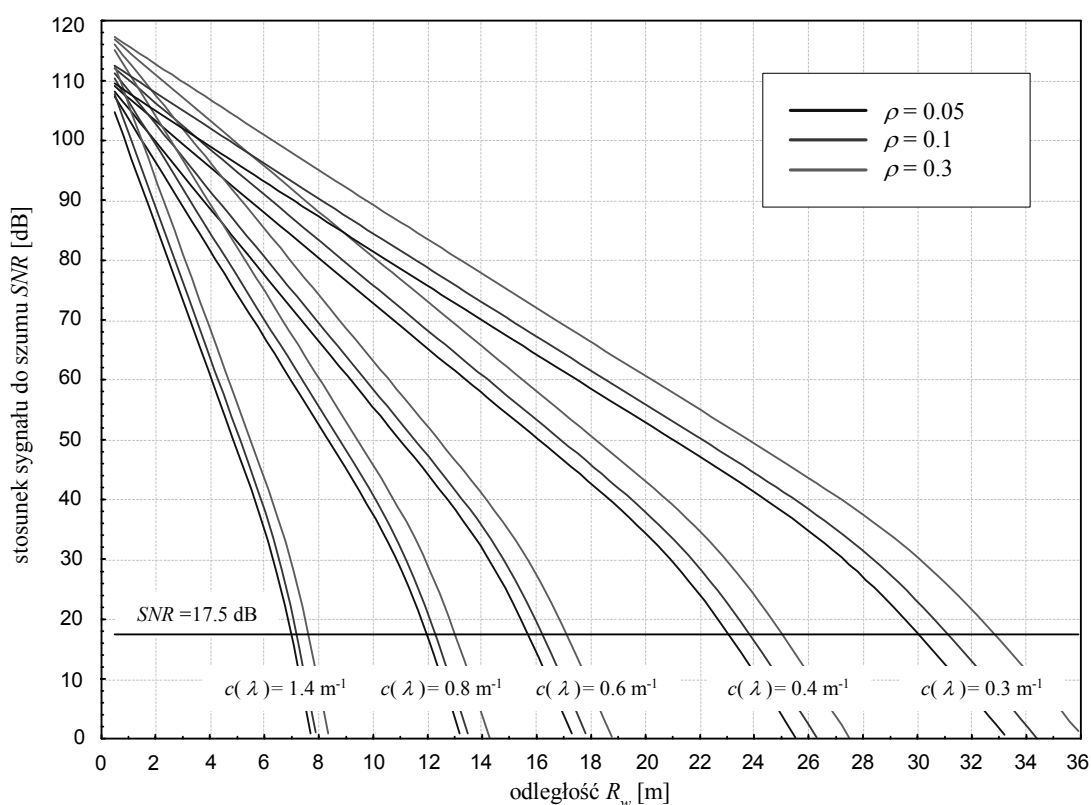
Z punktu widzenia możliwości wykrycia obiektu podwodnego w różnych rejonach i przy różnych właściwościach optycznych wody oraz określeniu jego położenia, koniecznym jest określenie minimalnej wartości SNR . Minimalną wartość SNR wprowadza się po to, aby uzyskać minimalną wartość stosunku sygnału do szumu pozwalającą z akceptowalnym prawdopodobieństwem detekcji sygnału echa PD , zidentyfikować sygnał echa od pojedynczego impulsu przy minimalnym prawdopodobieństwie fałszywego alarmu PFA .

Dla przyjętego prototypu dalmierza, w oparciu o powyższe założenia obliczono wartość stosunku sygnał/szum w funkcji odległości R dla przyjętego prawdopodobieństwa detekcji P_D . Jest to jednoznaczne z możliwością wykrycia przez dalmierz obiektów podwodnych położonych na różnych głębokościach z uwzględnieniem warunków środowiskowych. Przeprowadzone symulacje zostały wykonane dla wartości mocy sygnału tła $P_B = 9$ i 22.7 nW, co odpowiada różnym kątom położenia Słońca oraz uwzględnia wariant najbardziej niekorzystny. Otrzymane wyniki dla $P_B = 9$ nW przedstawiono na rysunku 3.

Przedstawione na rysunku 3 rodziny charakterystyk pozwoliły jednoznacznie określić na ile, dla założonego P_D , promieniowanie laserowe będzie skutecznym narzędziem w poszukiwaniu i lokalizacji obiektów podwodnych.

Zwiększenie głębokości wykrycia pozwoliłoby na laserowe poszukiwanie w badanym rejonie obiektów innych, operujących na większych głębokościach, a mianowicie okrętów podwodnych czy też podwodnych aparatów pływających. Wysoce celowym staje się zatem konieczność poprawy możliwie największej ilości parametrów pozwalających na zwiększenie zasięgu wykrycia obiektów podwodnych.

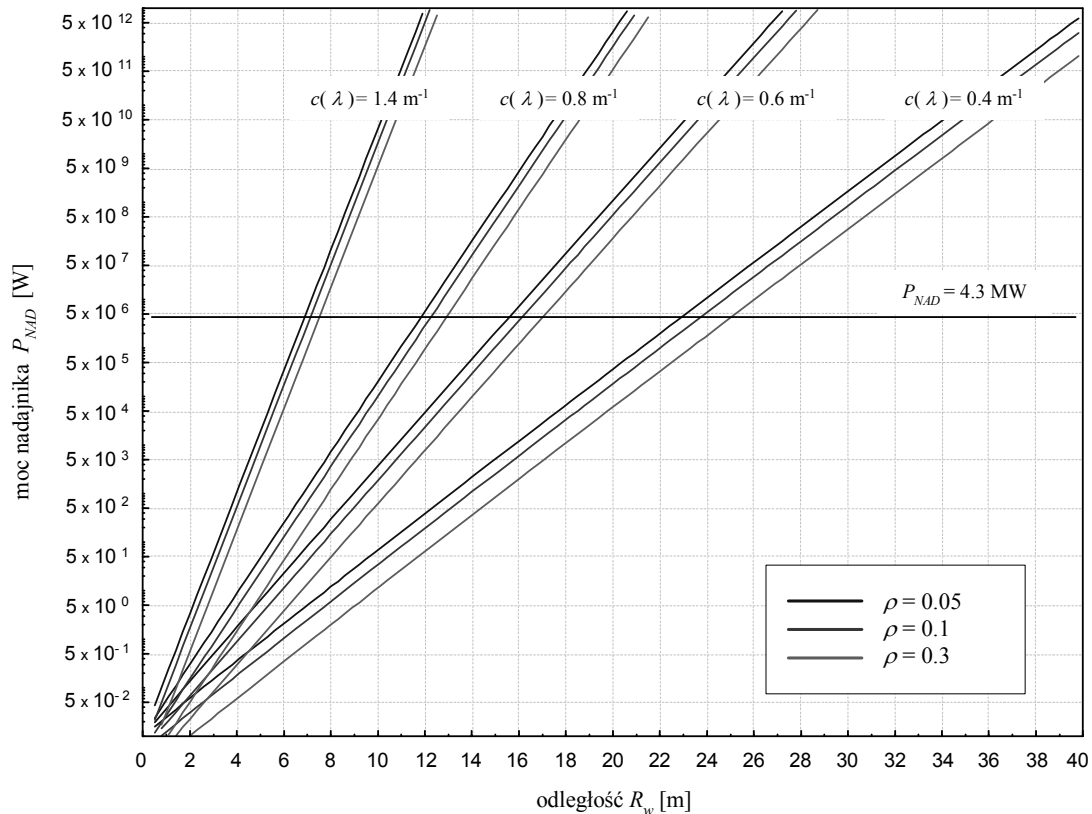
Przy braku możliwości oddziaływania na właściwości transmisyjne środowiska wodnego lub właściwości obiektu podwodnego, obok doboru optymalnej długości fali promieniowania czy też doboru metody detekcji sygnału, dodatkowym rozwiązaniem wydaje się być poprawa parametrów energetycznych dalmierza.



Rys. 3. Wykres stosunku sygnał/szum w funkcji odległości R_w dla różnych wartości współczynnika odbicia od obiektu ρ i współczynnika ekstynkcji wody $c(\lambda = 532 \text{ nm})$ przy wartości mocy sygnału tła $P_B = 9 \text{ nW}$

Dla założonej wartości $SNR = 17,5 \text{ dB}$, wyznaczona została funkcja $P_{NAD} = f(R_w)$. Przebieg funkcji $P_{NAD} = f(R_w)$, dla różnych wartości $c(\lambda = 532 \text{ nm})$ i ρ przedstawiono na rysunku 4.

Przedstawiona analiza, polegająca na poprawie możliwości energetycznych dalmierza, jednoznacznie wyklucza to rozwiązanie jako metodę poprawienia zasięgu wykrywania obiektów podwodnych z użyciem promieniowania laserowego. Jak wynika z rysunku 4, zwiększenie mocy nawet o kilka rzędów, co stanowi już poważne ograniczenia technologiczne, na niewiele poprawi zasięg wykrywania obiektów podwodnych.



Rys. 4. Zależność mocy nadajnika dalmierza laserowego w funkcji odległości do wykrywanego obiektu dla $SNR = 17,5 \text{ dB}$, $P_B = 9 \text{ nW}$, przy różnych wartościach współczynnika odbicia od obiektu ρ i współczynnika ekstynkcji wody $c(\lambda = 532 \text{ nm})$

4. PODSUMOWANIE

W chwili obecnej najprężniej rozwijającymi się metodami poszukiwania obiektów podwodny stały się metody związane z wykorzystaniem laserów, zwłaszcza tych montowanych na nosicielach latających. W znacznym stopniu przyczyniają się one do zwiększania bezpieczeństwa pływania i wszystkie umożliwiają szybkie i tanie badanie, stosunkowo czystych wód przybrzeżnych. Są one najbardziej efektywne w przypadku rozległych, płytkich i niebezpiecznych akwenów, ale również mają duże zalety w przypadku odległych, niedostępnych obszarów, gdzie zdobywanie danych jest o wiele bardziej czasochłonne i pracochłonne niż badanie z powietrza.

Głównym czynnikiem determinującym skuteczność laserowej metody poszukiwania obiektów podwodnych jest współczynnik ekstynkcji wody morskiej

$c(\lambda)$, będący reprezentatywnym parametrem określającym jej zdolności transmissyjne promieniowania laserowego.

Widmo transmisji promieniowania z zakresu widzialnego wody morskiej w badanym rejonie jest zmienne w czasie, co wynika z różnej koncentracji występujących w niej, substancji zawieszonych i rozpuszczonych. Dostrzegalna jest jednak cykliczność zmian tego widma na przestrzeni roku. Wskutek wyraźnych, okresowych zmian charakterystyk widmowych transmisji promieniowania widzialnego w południowej części Bałtyku, nie istnieje jedna optymalna długość fali promieniowania laserowego propagująca się w wodzie przez cały rok, pozwalająca na poszukiwanie i określanie położenia obiektów podwodnych z jednakową skutecznością.

Na podstawie przeprowadzonych systematycznych badań i obserwacji w okresie czterech lat i analizie danych archiwalnych z lat dziewięćdziesiątych wynika, że, optymalną długością fali propagującą się w wodzie południowego Bałtyku jest długość z zakresu przypadającego niemal na środek szerokości pasma widzialnego tj.: dla okresu jesienno - zimowego $\lambda_{opt} \in \langle 540 \div 580 \rangle$ nm i dla okresu wiosenno-letniego $\lambda_{opt} \in \langle 580 \div 630 \rangle$ nm.

Dla wód czystych (o największej transmisji promieniowania optycznego), występujących na obszarze morza otwartego w okresie jesienno-zimowym, widoczne jest przesunięcie maksimum transmisji w kierunku fal krótszych tj. na około $540 \div 560$ nm. Wówczas wartość współczynnika ekstynkcji wody $c(\lambda = 532 \text{ nm}) \leq 0,2 \text{ m}^{-1}$.

Działające obecnie na świecie systemy lidarowe wykorzystujące powszechnie laser Nd:YAG z konwersją częstotliwości na II-gą harmoniczną, nie są odpowiednimi do poszukiwania i określania położenia obiektów podwodnych w rejonie południowego Bałtyku ze względu na przesunięcie w widmie maksymalnej transmisji wody z tego rejonu w kierunku fal dłuższych.

Optymalnym źródłem do poszukiwania i określania położenia obiektów podwodnych w południowym rejonie Bałtyku byłby laser przestrajalny pracujący w zakresie generacji fal $\lambda = 540 \div 640$ nm. Względna zmiana wartości współczynnika ekstynkcji wody morskiej $c(\lambda)$ dla optymalnej długości fali $\lambda = 575$ nm, a dla badanej $\lambda = 532$ nm nie przekracza 7,5%.

Mocno ograniczone wydają się być również dane dotyczące odbicia promieniowania laserowego od obiektów wykonanych z różnych materiałów i wykończonych różnymi pokryciami, zwłaszcza tych znajdujących się pod wodą. Interesującymi i bardzo wskazanymi wydają się być zatem badania ukierunkowane na określenie współczynników odbicia promieniowania laserowego od różnych obiektów znajdujących się pod wodą. Badania powinny uwzględniać szeroką gamę materiałów pokryciowych stosowanych w technikach morskich oraz wpływ na odbicie czasu zalegania obiektu pod wodą w akwenach o różnej aktywności biologicznej.

LITERATURA

1. Jankiewicz Z., Marczak J.: „Radar laserowy - wpływ parametrów fizycznych na parametry funkcjonalne”, IV Konferencja Problemy współczesnej radiolokacji, 2001.
2. Jelalian A.: „Laser radar systems”, Boston 1992.
3. Cywiński A., Kołaczyński S.: „Nie tylko akustyka”, Przegląd morski 3/2003.
4. Sinclair M.: „Australians get on board with new Laser Airborne Depth Sounder”, Sea Technology, VI 1998.
5. Cywiński A.: „Optoelektroniczne systemy wykrywania min morskich”, NIT, Warszawa 4-5/2005
6. Walters B.: Lidar – suitable for ASW, Navy International, VI 1992.
7. Cywiński A.: „Wykorzystanie lasera do poszukiwania i określania położenia obiektu podwodnego”, rozprawa doktorska, Gdynia AMW 2007.
8. Zissis G. et al.: The infrared & electro-optical systems handbook, vol. 1, Washington 1993.
9. Cywiński A., Zellma M.: „Algorytm interpolacji wartości oczekiwanej współczynnika ekstynkcji wody morskiej za pomocą wielomianowych funkcji sklejanego stopnia trzeciego”, Zeszyty Naukowe AMW, nr 1/172, Gdynia 2008.

Rękopis, dostarczono, dnia 26.03.2010 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Andrzej Zajac

LASER RADIATION AS AN IMPORTANT TOOL
IN SEARCH OF UNDER-WATER OBJECTS

Artur CYWIŃSKI, Roman OSTROWSKI

ABSTRACT *The paper presents selected issues on laser systems for detection and location of underwater objects. Sea-water transmission undergoes cyclic and strong changes in time and is strongly area-diversified. In the analyzed regions, average extinction coefficient changes from 0.3 m^{-1} to 2.4 m^{-1} , whereas optimal laser wavelength falls into the spectral range of 575-580 nm. The analysis of the background radiation power has shown, that its value varies from several nW to about 25 nW in dependence of the incidence angle of solar radiation. Having already estimated the signal power and the background noise power, signal to noise ratio (SNR) could be determined. The assumption that the minimal SNR is 17.5 dB results in the range detection of under-water objects varying from 7 m to 30 m. This range permits effective detecting and position determining of under-water objects like containers or anchor mines.*

Dr inż. Artur CYWIŃSKI, studia ukończył w Wojskowej Akademii Technicznej w 1993. Jest specjalistą w dziedzinie optoelektroniki oraz morskich systemów uzbrojenia. Obecnie, kierując pracownią Broni Podwodnej w Instytucie Uzbrojenia Okrętowego AMW, prowadzi badania w zakresie zastosowań laserów w środowisku morskim, w szczególności do poszukiwania obiektów podwodnych. Bierze lub brał udział w kilkunastu grantach oraz projektach celowych związanych z uzbrojenią techniką morską oraz w kilkudziesięciu pracach n-b. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji, referatów i komunikatów prezentowanych w czasopiśmie i na międzynarodowych konferencjach naukowych.



Dr inż. Roman OSTROWSKI jest specjalistą w dziedzinie fizyki i techniki laserów na ciele stałym, oddziaływania impulsowego promieniowania laserowego z materią oraz metrologii optoelektronicznej. Obecnie prowadzi badania w zakresie zastosowań laserów impulsowych w renowacji dzieł sztuki oraz generacji nanocząstek i nanokolei-dów metodą ablacji laserowej. Bierze lub brał udział w realizacji programów międzynarodowych COST, projektów inicjatywy EUREKA oraz dwustronnych prac badawczo-rozwojowych we współpracy z "Hannover Laser Centre" (Niemcy). Jest członkiem SPIE. Autor lub współautor kilkudziesięciu publikacji, referatów i komunikatów prezentowanych w czasopiśmie i na konferencjach naukowych.

