

## **WPŁYW ŚRODOWISKA WODNEGO NA MOŻLIWOŚĆ LASEROWEGO WYKRYCIA OBIEKTÓW PODWODNYCH W REJONIE DZIAŁANIA MARYNARKI WOJENNEJ RP**

*W artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia dotyczące systemów laserowych wykorzystywanych do określenia położenia obiektów podwodnych. Przedstawiony został stan obecny w dziedzinie rodzajów laserów stosowanych w dalmierzach oraz zagadnienia dotyczące dalszych możliwości wykorzystania promieniowania laserowego na potrzeby Marynarki Wojennej. Ze względu na zmienność warunków hydrometeorologicznych panujących nad morzem, w artykule zaprezentowano wyniki badań systematyzujące czynniki środowiskowe wpływające na laserowe poszukiwanie obiektów podwodnych. W oparciu o badania, zaprezentowano skuteczne zasięgi wykrycia obiektów podwodnych w różnych warunkach meteorologicznych, oraz różnych sezonach, w rejonach działania MW RP.*

### **1. Wstęp**

Współczesne działania wojenne na morzu, podobnie jak lądowe pole walki, charakteryzują się dużą dynamiką. Atak może nadejść niespodziewanie z każdego kierunku i z dużym natężeniem. Głównym zagrożeniem dla okrętów wojennych oraz jednostek wsparcia są środki napadu powietrznego – samoloty i rakiety. Najnowsze generacje pocisków mogą szybko poruszać się na znacznych wysokościach lub tuż nad powierzchnią wody. Często budowane są w technologii „stealth”, czyniącą ich niewidzialnymi dla systemów radarowych, a w wielu przypadkach charakteryzują się dużymi zdolnościami manewrowymi. Podstawowym warunkiem skutecznej obrony staje się zatem odpowiednio wczesne wykrycie celu i jego szybkie zniszczenie. Wiąże się z tym konieczność automatyzacji systemów obronnych okrętów, oraz wyposażanie ich w nowe, optoelektroniczne środki wykrywania, rozpoznania i śledzenia, które dzięki pomiarom w czasie rzeczywistym oraz dużej dokładności i precyzji lokalizacji, potrafią przewyciężyć wady klasycznych systemów mikrofalowych, a niejednokrotnie i wykrywać cele, gdy metody radarowe czy zobrazowania w paśmie widzialnym bądź w podczerwieni zawodzą [1, 2].

W ostatnich latach zaobserwować można duże zainteresowanie wykorzystaniem wiązki laserowej do penetracji środowiska wodnego. Związane jest to z faktem, że w przypadku działań morskich, inaczej niż na lądzie, dochodzi dodatkowy wymiar – możliwość ataku spod powierzchni wody. Zagrożenie stanowią mogą okręty podwodne, podwodne aparaty pływające i nurkowie. Okręt podwodny zachowując

większość swoich walorów taktyczno-bojowych (duża niezależność od warunków hydrometeorologicznych, wysoki potencjał bojowy, wysoka autonomiczność) może działać skutecznie i być bardzo niebezpieczny nawet na tak niewielkim morzu jak Bałtyk, i powodować wiązanie znacznych sił i środków do walki z nim. Główne jednak zagrożenie, dla każdego rodzaju akwenu bez względu na jego głębokość, stanowią miny kotwiczne, które stawiane z okrętów lub środków latających na głębokościach 10 – 30 m pod powierzchnią wody, mogą skutecznie zwalczać każdą jednostkę pływającą.

Stale postępujący rozwój broni minowej i rosnąca liczba państw wprowadzających na uzbrojenie ten środek rażenia z jednej strony, a z drugiej reorganizacja sił i środków marynarek wojennych związana z realizacją coraz to nowych zadań (np. „organicznej obrony przeciwminowej”) sprawia, że również techniki poszukiwania obiektów podwodnych podlegać muszą procesowi ciągłego doskonalenia. Szeroko stosowane metody akustyczne czy magnetometryczne penetracji środowiska wodnego nie rozwiązują wszystkich problemów, gdyż okręt przeszukujący określony obszar sam jest narażony na niebezpieczeństwo kryjące się pod wodą. Ogromną zaletą promieniowania laserowego jego możliwość przenikania przez granice ośrodków o różnej gęstości, pozwalającą w efekcie na penetrację środowiska wodnego z powietrza. Unika się zatem konieczności przejścia przez rozpoznawany akwen, co jest wysoce atrakcyjne z punktu widzenia bezpieczeństwa załogi oraz jednostki pływającej, prowadzącej działania w rejonie zagrożonym minami. Metody optoelektroniczne umożliwiają precyzyjne badania dna morskiego, toni wodnej i powierzchni morza, a także lokalizacji obiektów podwodnych mało- jak i wielkogabarytowych. W chwili obecnej dostępne są już systemy laserowe służące do pomiarów głębokości badanych akwenów wodnych i wykrywania obiektów podwodnych. Do najważniejszych, będących obecnie w różnym stadium rozwoju i zastosowania, zaliczyć można systemy pomiarów batymetrycznych typu LADS i Larsen, oraz systemy wykrywania min typu Hawk–Eye, SHOALS, Magic Lantern, ALMDS (Airborne Laser Mine-Detection System), LLSS (Laser Line Scan System), czy RAMICS (Rapid Airborne Mine Clearance System) [2]. Prowadzenie działań przy ich pomocy tych systemów ograniczone jest do ściśle określonych rejonów, a ich skuteczność działania jest zdeterminowana warunkami hydrometeorologicznymi.

Wyznaczenie parametrów nawigacyjnych obiektu podwodnego, takich jak pozycja i głębokość, jak w każdym systemie dalmierczym opiera się na emisji impulsu promieniowania laserowego i detekcji odbitego sygnału echa. Koniecznym zatem staje się znajomość środowiska wodnego, którego różne charakterystyki determinują tłumienie promieniowania w wodzie, a które z kolei decyduje o wartości sygnału echa w stosunku do poziomu szumów (SNR) i w efekcie, o zasięgu wykrycia obiektu podwodnego.

## **2. Czynniki wpływające na zasięg wykrycia obiektu podwodnego**

Analizując drogę sygnału od laserowego systemu dalmierczego do obiektu podwodnego i z powrotem, mamy do czynienia z szeregiem czynników wpływających na jego osłabianie i zniekształcanie, czego skutkiem jest przede wszystkim ograniczenie możliwości wykrycia i określenia położenia obiektu. W analizie takiej, w pierwszej kolejności występują parametry samego systemu dalmierczego, wśród których rozpoznajemy parametry związane z nadajnikiem laserowym, jak moc impulsu, długość fali i rozbieżność wiązki laserowej, oraz parametry dotyczące toru odbiorczego systemu, w tym optyki odbiorczej, fotodetektora i toru wzmacniającego.

Zasadnicze znaczenie ma także sposób detekcji sygnału echa – stosowanie bezpośredniej detekcji progowej, odbioru koherentnego czy też statystycznego. Nie bez znaczenia jest również metoda poszukiwania i wiążący się z nią liniowy lub przestrzenny rodzaj skanowania. O zasięgu wykrycia i określenia położenia decydują także różne właściwości charakteryzujące sam obiekt podwodny, w tym jego gabaryty, głębokość zanurzenia, czy współczynnik odbicia od powierzchni.

Osobną grupę, a zarazem mającą decydujący wpływ na możliwość poszukiwania i określania położenia obiektu podwodnego przy pomocy wiązki laserowej, stanowią parametry środowiska wodnego (wody morskiej). W odróżnieniu od parametrów systemu dalmierczego i obiektu podwodnego, parametry środowiska wodnego stanowią ten element w procesie poszukiwania, który jest niezmienny z punktu widzenia mijającego czasu i rozwoju techniki, i w żaden sposób od nich nie zależy, a właściwości wody morskiej wynikają jedynie z szeregu naturalnych procesów w niej zachodzących, w których dopatrywać się można tylko pewnych cyklicznych zmian.

Do zasadniczych parametrów środowiska wodnego zaliczyć można właściwości optyczne wody oraz panujące warunki hydrometeorologiczne. Właściwości optyczne wody, a przede wszystkim właściwości propagacyjne, to wypadkowa całej materii organicznej i nieorganicznej, która się w tej wodzie znajduje, a ta zależy głównie od położenia geograficznego, głębokości akwenu, zlewiska rzek i pory roku. Optyczne właściwości wody charakteryzowane są przez zjawiska osłabienia promieniowania – ekstynkcji wody. Ekstynkcja, określana jako łączny efekt rozpraszania i absorpcji światła w wodzie, opisywana jest przez objętościowy współczynnik osłabiania promieniowania  $c(\lambda)$  [ $m^{-1}$ ] (nazywany również współczynnikiem ekstynkcji) [3]:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (1)$$

gdzie:  $a(\lambda)$  jest objętościowym współczynnikiem absorpcji światła [ $m^{-1}$ ], a  $b(\lambda)$  jest objętościowym współczynnikiem rozpraszania światła [ $m^{-1}$ ]. Współczynnik ekstynkcji jest parametrem zależnym od długości fali  $\lambda$  i reprezentatywnym dla wody morskiej pod względem jej właściwości optycznych [4].

Całkowity objętościowy współczynnik absorpcji rozpatrywać należy jako sumę składowych pochłaniania promieniowania optycznego przez poszczególne grupy składników znajdujących się w wodzie. Jako pierwsze wymienić należy cząsteczki samej wody, których jednak główne pasma absorpcji znajdują się w zakresie średniej podczerwieni, w okolicach 3  $\mu m$ .

Kolejną, istotną grupę stanowią substancje organiczne rozpuszczone w wodzie. Dominują tu tzw. substancje żółte, które mają zdolność pochłaniania promieniowania widzialnego, głównie w zakresie 410 – 440 nm, wykazując przy tym selektywny charakter absorpcji [5].

Trzecia, ważna grupa, to zawiesiny morskie, zarówno organiczne jak i nieorganiczne. Do grupy organicznych zalicza się fitoplankton, czyli zawieszony w wodzie żywe komórki roślinne zawierające pigmenty i absorbujące promieniowanie w sposób selektywny. Obok fitoplanktonu, w grupie tej występują również martwe zawiesiny cząstek ciał stałych nazywane detrytusem oraz inne zawiesiny pochodzenia organicznego (grzyby, bakterioplankton oraz zooplanktonu). Detrytus to podgrupa odznaczająca się podobnymi do substancji żółtych właściwościami pochłaniającymi [6]. Grupa cząstek nieorganicznych to głównie zawiesiny mineralne, do których zalicza się cząstki powstałe w wyniku erozji powierzchni lądów, brzegów i dna morskiego, pyłów przemysłowych, kosmicznych i wulkanicznych [7].

Obok absorpcji, w wodzie morskiej zaobserwować można silne rozpraszanie, którego charakter zależy do wielkości centrów rozpraszających w stosunku do

długości fali rozpraszanego promieniowania [9]. Rozmiary cząstek zawieszonych w wodzie morskiej są z reguły większe od długości fali, dlatego zastosowanie ma tu teoria Mie, według której kątowy rozkład promieniowania rozproszonego cechuje znaczne wydłużenie w przód (silna asymetria względem kierunku padającego promieniowania). Oznacza to silniejsze rozpraszanie promieniowania pod małymi kątami do przodu, natomiast rozpraszanie wsteczne promieniowania jest znikome i nie przekracza 2% [9].

Inną grupę właściwości optycznych stanowią właściwości pozorne (wtórne) wody morskiej. Właściwości te zależą od chwilowych warunków oświetlenia powierzchni morza, na które największy wpływ ma rozkład kierunkowy natężenia światła padającego oraz panujące warunki zewnętrzne: stan morza (sfalowanie powierzchni), występujące na powierzchni pęcherzyki powietrza czy spienienie powierzchni wody. Do najczęściej stosowanych w badaniach morza pozornych właściwości optycznych wody zaliczyć można współczynnik dyfuzyjnego odbicia, rozumiany jako stosunek całkowitego oświetlenia oddolnego (tuż nad wodą), wynikającego jedynie z odbicia od powierzchni morza, do całkowitego oświetlenia odgórnego tej powierzchni.

Do najistotniejszych warunków hydrometeorologicznych wywierających wpływ na możliwość wykrycia obiektów podwodnych, a nawet determinujących zastosowanie metody laserowej, zaliczyć należy: stan morza, kierunek prądów morskich, zasolenie wody, temperaturę wody, występowanie upwellingów i downellingów, jak również siłę wiatrów.

### **3. Charakterystyka współczynnika ekstynkcji wody morskiej**

Współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda)$  determinuje przenikanie energii promienistej przez środowisko wodne. Jako parametr niezależny od zewnętrznych warunków oświetlenia (promieniowania słonecznego), jest wskaźnikiem znajdujących się w wodzie zawieszin oraz rozpuszczonych substancji organicznych i nieorganicznych.

Rozkłady spektralne współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda)$  w wodach morskich i oceanicznych są silnie zróżnicowane i dodatkowo zmienne w czasie (zmiany sezonowe). Zróżnicowanie to wynika ze zmiennej koncentracji różnych składników optycznie czynnych. Od ich składu i stężenia zależą właściwości optyczne wody, a przede wszystkim zdolność do transmisji promieniowania o różnej długości fali. W najczystszych wodach oceanicznych (środkowy Pacyfik) minimum osłabiania promieniowania przypada w zakresie spektralnym 410 – 440 nm. W wodach oligotroficznych, bardzo ubogich w substancje biogenne i organiczne (zaliczanych do pierwszego rodzaju wód), minimum osłabiania promieniowania przesunięte jest do przedziału widmowego 450 – 490 nm i przesuwają się dalej, do długości fali 510 nm dla wód eutroficznych. Dla wód śródlądowych i półzamkniętych (wody drugiego rodzaju), do których zaliczany jest również Bałtyk, minimum tłumienia przesunięte jest w kierunku fal dłuższych tzn. w zakres 450 – 550 nm, a w rejonach oddziaływania dużych ujść rzecznych, może przesuwają się nawet do 600 nm.

W latach 2001 – 2004 zostały przeprowadzone systematyczne badania [10], w ramach których z wybranych rejonów Bałtyku pobierano próbki wody morskiej, a następnie mierzono ich transmisję w funkcji długości fali. Otrzymane tym sposobem charakterystyki widmowe wykorzystano do wyznaczenia współczynników ekstynkcji  $c(\lambda)$  w zakresie spektralnym od 200 nm do 1100 nm. Wyniki tych badań, uzupełnione o rezultaty pomiarów prowadzonych okresowo w latach 1999 – 2000, stanowią cenny

materiał archiwalny, szczególnie w odniesieniu do najtrudniejszego pod względem dynamiki – rejonu Zatoki Gdańskiej. Stanowią one zarazem uaktualnienie danych otrzymanych wcześniej przez inne zespoły badawcze.

Przeprowadzone badania pokazały, że widmo transmisji wody morskiej ulega cyklicznym i silnym zmianom w czasie, w zależności od pory roku. Zachowanie takie jest następstwem zmian składu i koncentracji zanieczyszczeń wody w przeciągu roku. Ponadto, widmo transmisji jest silnie zróżnicowane w przestrzeni, w zależności od położenia danego akwenu na Bałtyku. Jest to wynikiem, podobnie jak poprzednio, zmian w składzie i koncentracji zawieszin oraz substancji rozpuszczonych w wodzie.

W badanym rejonie wód przybrzeżnych RP optymalnym zakresem spektralnym, ze względu na propagację promieniowania laserowego, jest przedział długości fal od 575 nm do 580 nm. W porach roku, gdy współczynnik ekstynkcji osiąga duże wartości,  $c(\lambda) > 3.0 \text{ m}^{-1}$ , obserwowane jest przesunięcie maksimum transmisji w kierunku fal dłuższych, nawet do 650 nm. Odwrotnie, gdy współczynnik ekstynkcji osiąga minimalne wartości,  $c(\lambda) < 0.2 \text{ m}^{-1}$ , optymalny przedział przesuwa się w kierunku krótkofalowej części widma, w okolice 540 – 560 nm [10].

Omówione wyżej zmiany optymalnego przedziału widmowego transmisji nie są korzystne z punktu widzenia laserowego systemu dalmierczego, przeznaczonego do wykrywania i lokalizacji obiektów podwodnych. Zmienność widma transmisji narzuca zastosowanie jako nadajnika lasera o szerokim paśmie przestrajania. W chwili obecnej dostępnymi laserami tego typu są tylko lasery barwnikowe. Niestety skomplikowana konstrukcja praktycznie uniemożliwia ich wykorzystanie w urządzeniach czy systemach pracujących w terenie, a tym bardziej w sprzęcie wojskowym, pracującym ponadto w ekstremalnych warunkach morskich. Jedynym możliwym rozwiązaniem na dzień dzisiejszy jest zastosowanie, doskonale opanowanego pod względem technologicznym i szeroko rozpowszechnionego w różnorodnych aplikacjach, lasera Nd:YAG z konwersją częstotliwości na drugą harmoniczną, generującego promieniowanie od długości fali  $\lambda = 532 \text{ nm}$ . Wprawdzie promieniowanie to nie mieści się w optymalnych przedziałach widmowych, ale różnica w transmisji wody morskiej jest nieznaczna. Przykładowo, względna zmiana współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda)$  dla  $\lambda = 575 \text{ nm}$  i  $\lambda = 532 \text{ nm}$  nie przekracza 8.5%.

Tabela 1. Średnie wartości współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda = 532 \text{ nm})$  dla rejonu Zatoki Gdańskiej wyznaczone na podstawie danych zebranych w latach 2001-2004

	Styczeń	Luty	Marzec	Kwiecień	Maj	Czerwiec	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik	Listopad	Grudzień
$c(\lambda) [\text{m}^{-1}]$	<b>0.49</b>	<b>0.65</b>	<b>0.88</b>	<b>1.42</b>	<b>1.16</b>	<b>0.86</b>	<b>1.01</b>	<b>1.19</b>	<b>0.98</b>	<b>0.80</b>	<b>0.68</b>	<b>0.58</b>
$c_{\min}(\lambda) [\text{m}^{-1}]$	0.26	0.41	0.46	0.88	0.34	0.48	0.81	0.79	0.30	0.44	0.23	0.33
$c_{\max}(\lambda) [\text{m}^{-1}]$	0.76	1.01	1.35	2.44	1.81	1.14	1.25	1.55	1.74	1.44	1.21	0.93

W tabeli 1 zaprezentowano średnie wartości współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda)$  dla długości fali 532 nm w poszczególnych miesiącach roku, uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań transmisji wody morskiej. Widać wyraźne wahania średniego współczynnika  $c(\lambda)$  od miesiąca do miesiąca, jak i znaczne rozrzuty jego

wartości (od wartości minimalnej  $c(\lambda)_{\min}$  do wartości maksymalnej  $c(\lambda)_{\max}$ ) w każdym miesiącu.

#### 4. Analiza zasięgu wykrycia obiektu podwodnego

Osiągi każdego systemu dalmierczego zależą nie tylko od wielkości wyemitowanej mocy, ale również od czułości fotoodbiornika, jego wzmocnienia i parametrów szumowych, średnicy i transmisji optyki odbiorczej, wielkości mocy promieniowania tła oraz właściwości transmisyjnych środowiska, w którym zachodzi pomiar. W przypadku detekcji progowej, o możliwości wykrycia obiektu podwodnego przez system laserowy decyduje wielkość sygnału echa uzyskana na tle szumu, na wyjściu układu odbiorczego. Koniecznym jest zatem osiągnięcie odpowiednio dużego stosunku sygnału do szumu (SNR). Na parametr ten wpływa wiele czynników, które podzielić można na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią czynniki zewnętrzne oddziałujące na wielkość sygnału optycznego padającego na detektor, takie jak parametry środowiska wodnego, obiektu podwodnego oraz parametry nadajnika laserowego. W drugiej grupie mieszczą się czynniki związane z torem elektrycznym odbiornika (od detektora do wyjścia układu odbiornika).

W sygnale optycznym padającym na detektor wyróżnić można dwie składowe. Pierwszą stanowi promieniowanie użyteczne – impuls laserowy odbity od obiektu, drugą natomiast – promieniowanie tła. Poniżej rozpatrzony będzie wpływ obu tych składowych na możliwość wykrycia obiektu podwodnego, a analiza ograniczona zostanie do wyznaczenia ich mocy na wejściu detektora. Do obliczeń przyjęto założenia, w oparciu o które opracowano prototyp dalmierza laserowego służącego do pomiaru odległości do obiektów podwodnych. Jego niezbędne w dalszej analizie parametry przedstawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Założone parametry dalmierza laserowego

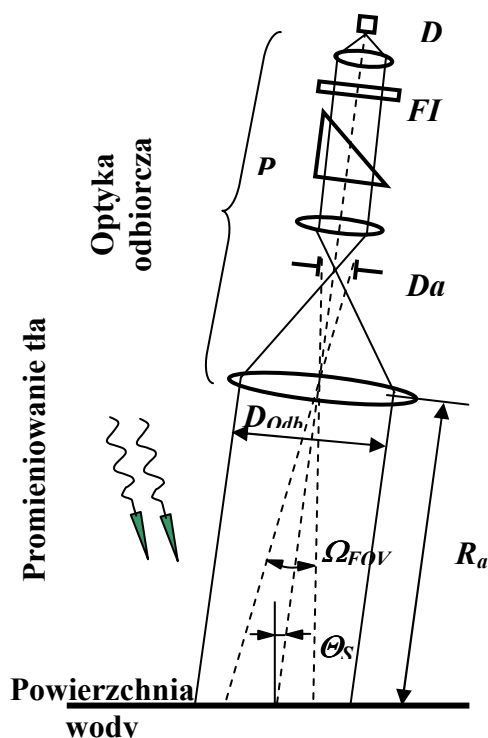
Parametr	Wartość
długość fali	$\lambda = 532 \text{ nm}$
energia impulsu laserowego	$E_i = 30 \text{ mJ}$
czas trwania impulsu laserowego	$\tau_i = 7 \text{ ns}$
moc sygnału nadajnika	$P_{NAD} = 4.3 \text{ MW}$
szerokość spektralna filtra interferencyjnego	$\Delta\lambda = 0.01 \text{ }\mu\text{m}$
współczynnik transmisji optyki odbiorczej	$\eta_{Opt} = 0.98$
współczynnik transmisji filtra interferencyjnego	$\eta_{FI} = 0.6$
kąt płaski pola widzenia optyki odbiorczej	$\theta_{Odb} = 5 \text{ mrad}$
średnica optyki odbiorczej	$D_{Odb} = 110 \text{ mm}$

##### 4.1. Moc promieniowania tła

Opis ilościowy szumu spowodowanego promieniowaniem tła jest bardzo złożony. Na moc promieniowania tła padającego na detektor wpływa wiele czynników, które można sklasyfikować jako związane z samym urządzeniem dalmierczym (transmisja, pole widzenia i średnica optyki odbiorczej, szerokość spektralna i transmisja filtrów,

itp.), oraz wynikających z warunków hydrometeorologicznych (stan morza, pora dnia, zachmurzenie, kąt położenia Słońca, itp.).

Spektralna luminancja energetyczna  $L_\lambda$  źródła promieniowania tła (głównie promieniowania Słońca odbitego o powierzchni wody i rozproszonego w atmosferze) jest parametrem, który ma decydujący wpływ na detekcję sygnału echa i jako taki jest uwzględniany przy wyznaczaniu mocy  $P_B$  promieniowania tła docierającego do detektora. Związek między  $L_\lambda$  i  $P_B$  określa wzajemne usytuowanie geometryczne odbiornika optycznego i źródła promieniowania tła. Na rysunku 1 przedstawiono schemat toru optycznego typowego odbiornika dalmierza laserowego, w oparciu o który wyznaczona zostanie zależność na moc promieniowania tła.



Rys.1. Schemat toru optycznego odbiornika dalmierza laserowego:  $P$  - pryzmat,  $Da$  - diafragma,  $FI$  - filtr interferencyjny,  $D$  - detektor

Moc promieniowania tła docierającego do detektora, a zbieranego przez optyczny układ odbiorczy, można opisać za pomocą zależności [11]:

$$P_B = L_\lambda \cdot A_S \cdot \cos \Theta_S \cdot \Omega_{FOV} \cdot \Delta\lambda \cdot \eta_{FI} \cdot \eta_{OPT} \cdot \exp(-\gamma \cdot R_a), \quad (2)$$

gdzie  $\Theta_S$  jest kątem pomiędzy normalną do powierzchni morza i osią optyczną odbiornika,  $\gamma$  jest współczynnikiem ekstynkcji atmosfery a  $R_a$  jest odległością do powierzchni wody. Pole powierzchni morza widziane przez detektor  $A_S$  i kąt bryłowy pola widzenia odbiornika  $\Omega_{FOV}$  są powiązane z parametrami dalmierza poprzez:

$$A_S = \frac{\pi}{4 \cos \Theta_S} (\theta_{Odb}^2 R_a^2), \quad (3)$$

$$\Omega_{FOV} = \frac{\pi}{4} \theta_{Odb}^2 = \frac{\pi D_{Odb}^2}{4 R_a^2}. \quad (4)$$

Pełna, spektralna luminancja energetyczna  $L_\lambda$  promieniowania tła jest sumą składowych od promieniowania słońca odbitego od powierzchni wody i

promieniowania własnego wody. Tą ostatnią, ze względu na niewielką wartość w porównaniu z pierwszą, można pominąć. Ponadto, maksimum promieniowania własnego wody leży poza widzialną częścią widma (w dalekiej podczerwieni) i nie mieści się w paśmie transmisji filtru w układzie odbiornika. Spektralną luminancję energetyczną można zatem przybliżyć zależnością:

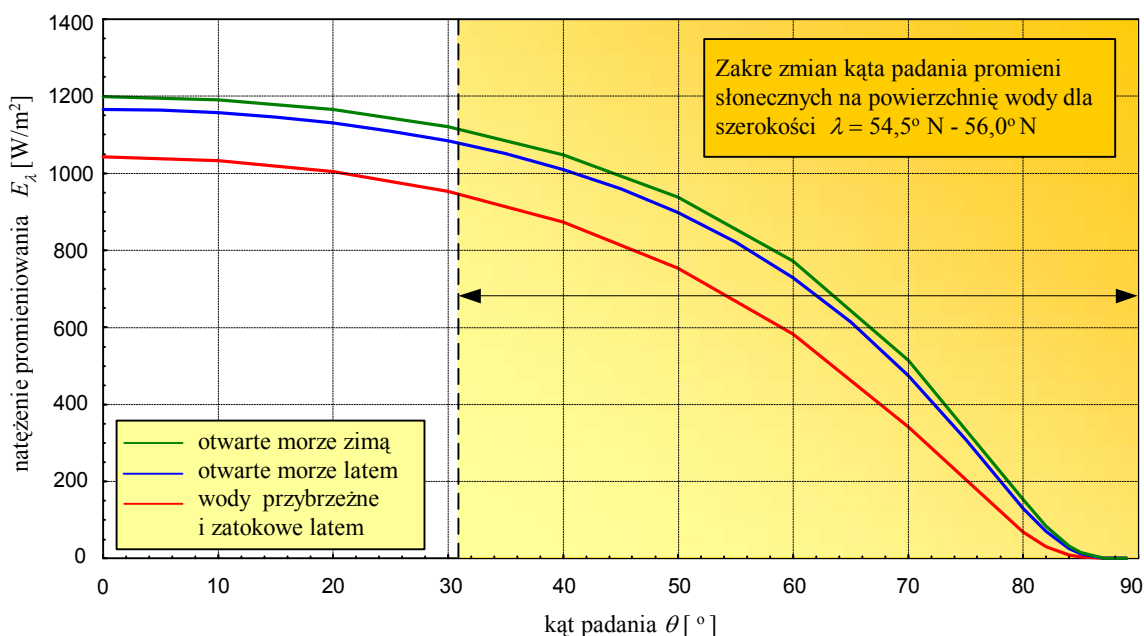
$$L_{\lambda} = \frac{\rho_w E_{\lambda}}{\pi}, \quad (5)$$

gdzie  $E_{\lambda}$  jest spektralnym natężeniem napromienienia Słońca [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ] a  $\rho_w$  jest współczynnikiem odbicia promieniowania od powierzchni wody.

Spektralne natężenie napromienienia Słońca podawane jest często w literaturze w postaci tabelarycznej lub w formie wykresu. Jednak wyznaczenie jego wartości dla danej długości fali na podstawie danych tego typu jest słuszne tylko dla tych szerokości geograficznych, dla których Słońce osiąga wysokości zenitalne, tzn. w zakresie od  $23.5^{\circ}\text{E}$  do  $23.5^{\circ}\text{N}$ . W rejonie południowego Bałtyku, tj. dla szerokości geograficznej od  $54.5^{\circ}\text{N}$  (Zatoka Gdańska) do  $56^{\circ}\text{N}$  (górną granicę południowego Bałtyku), Słońce osiąga wysokości:

- dla przesilenia letniego (21 VI):  $h_{\max}(\varphi = 54.5^{\circ}) = 59^{\circ}$ ,  $h_{\max}(\varphi = 56^{\circ}) = 57.5^{\circ}$ ,
- dla przesilenia zimowego (21 XII):  $h_{\max}(\varphi = 54.5^{\circ}) = 12^{\circ}$ ,  $h_{\max}(\varphi = 56^{\circ}) = 10.5^{\circ}$ ,

Dla wysokości tych i dla interesującej nas długości fali,  $\lambda = 532\text{ nm}$ , przeprowadzono obliczenia natężenia promieniowania Słońca, których rezultat pokazano na rysunku 2. W obliczeniach uwzględniono dodatkowe osłabianie promieniowania w rejonie wód przybrzeżnych i zatokowych przez aerozole i zanieczyszczenia niesione w powietrzu z lądu w kierunku morza. Do obliczeń wykorzystano program PCMODWIN, należący do rodziny radiacyjnych kodów transmisyjnych typu LOWTRAN czy MODTRAN, pozwalający na wyznaczenie natężenia promieniowania Słońca przy różnych warunkach hydrometeorologicznych.



Rys.2. Kątowa charakterystyka natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię morza w rejonie południowego Bałtyku dla  $\lambda = 532\text{ nm}$  w warunkach zimowych i letnich (widzialność meteorologiczna 23 km)



W celu oszacowania mocy promieniowania tła zakłada się, że pasmo spektralne transmisji selektywnego filtra optycznego (np. interferencyjnego) jest na tyle wąskie, że słuszna jest aproksymacja za pomocą stałej wartości funkcji spektralnego natężenia napromienienia w tym przedziale widmowym. Podstawiając zależności (3), (4) i (5) do wzoru (2), oraz uwzględniając wszystkie wcześniej omawiane założenia, otrzymujemy uproszczoną formułę na moc promieniowania tła padającego na detektor w postaci:

$$P_B = \frac{\pi}{16} E_\lambda \rho_w \theta_{Odb}^2 D_{Odb}^2 \Delta\lambda \eta_{Opt} \eta_{FI} \exp(-\gamma \cdot R_a) \quad (6)$$

Zauważyć można, że moc promieniowania tła zależy zarówno od parametrów konstrukcyjnych dalmierza i właściwości transmisyjnych atmosfery (poprzez współczynnik ekstynkcji  $\gamma$ ), jak i natężenia napromienienia Słońca. Jedynym dotąd nie dyskutowanym parametrem jest współczynnik odbicia  $\rho_w$  promieniowania od powierzchni wody. Jego wartość może zmieniać się w szerokich granicach, w zależności od kąta padania, od 0.02 przy padaniu normalnym do jedności przy padaniu prostopadłym.

Dla światła niespolaryzowanego, a w przypadku promieniowania słonecznego założenie takie jest jak najbardziej poprawne, współczynnik odbicia opisywany jest wzorem Fresnela [8]:

$$\rho_w = \frac{1}{2} \left[ \frac{\tan^2(\theta_p - \theta_z)}{\tan^2(\theta_p + \theta_z)} + \frac{\sin^2(\theta_p - \theta_z)}{\sin^2(\theta_p + \theta_z)} \right], \quad (7)$$

gdzie  $\theta_p$  jest kątem padania promieniowania na powierzchnię wody, a kąt załamania  $\theta_z$  jest związany z kątem padania prawem Snella:

$$\sin \theta_p = n \cdot \sin \theta_z, \quad (8)$$

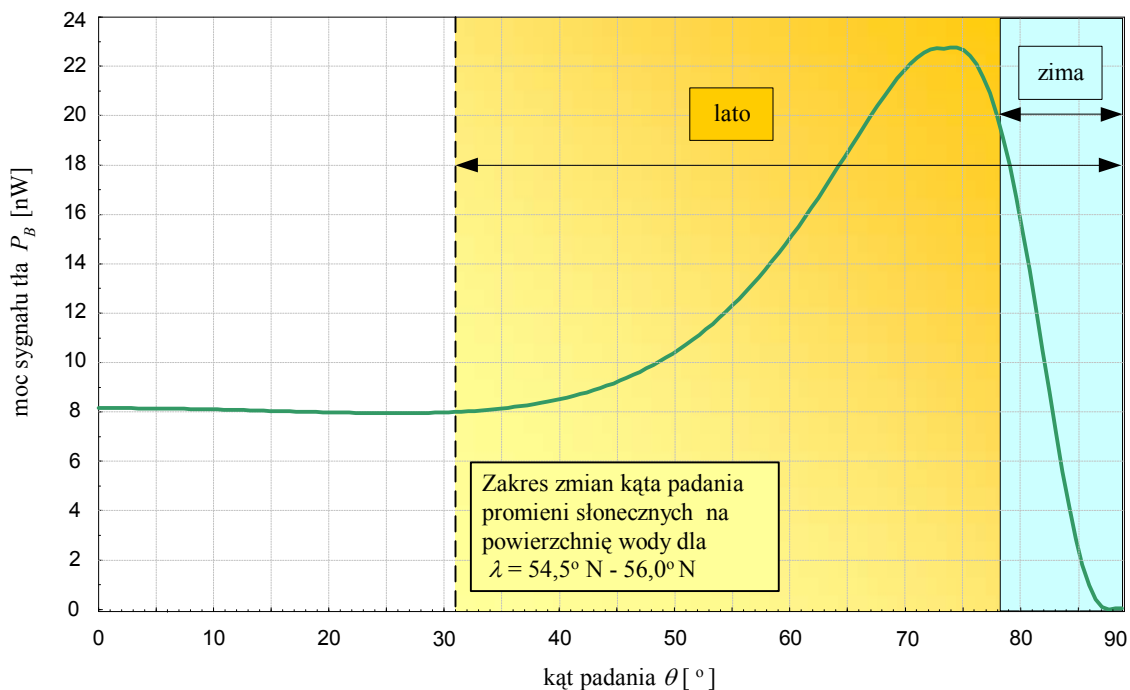
gdzie  $n$  jest współczynnikiem załamania wody morskiej. Jego wartość może być różna i zależy od zasolenia i temperatury wody. W morzu Bałtyckim wpływ ten jest jednak niewielki [67] i dla potrzeb analizy można przyjąć średnią wartość wynoszącą  $n = 1.33$ . W stosunku do współczynnika załamania atmosfery założono milcząco jego jednostkową wartość.

W wyniku prostych przeliczeń można pokazać, że dla szerokości geograficznych w rejonie południowego Bałtyku, kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię wody będzie się zmieniał w granicach  $90^\circ - 31^\circ$  latem i  $90^\circ - 78^\circ$  zimą.

Wykorzystując parametry dalmierza laserowego zawarte w tabeli 2, oraz obliczone wartości natężenia promieniowania słonecznego  $E_\lambda$  (pokazane na rysunku 2), w oparciu o zależność (6) przeprowadzono analizę mocy promieniowania tła padającego na detektor. W analizie przyjęto dodatkowo, że współczynnik ekstynkcji atmosfery wynosi  $\gamma = 0.06 \text{ km}^{-1}$ , a dalmierz usytuowany jest 15 m nad poziomem wody. Otrzymane w wyniku obliczeń wartości mocy promieniowania tła  $P_B$  w funkcji kąta padania promieni słonecznych  $\theta_p$  przedstawiono na rysunku 3.

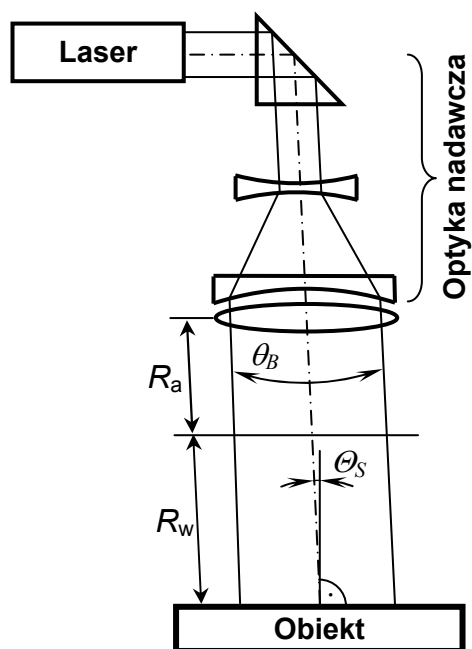
## 4.2. Moc sygnału echa

Analizę mocy sygnału echa przeprowadzono dla typowego układu nadajnika dalmierza laserowego. Schemat optyczny nadajnika pokazany został na rysunku 4, a wymagane w analizie parametry zawiera tabela 2.



Rys.3. Zmiana wartości mocy promieniowania tła na detektorze dla różnych kątów padania promieniowania słonecznego na nie sfalowaną powierzchnię wody

Zakłada się, że powierzchnia obiektu oświetlana jest z pewnej apertury kołowej nadajnika znajdującego się w odległości  $R$ , a wielkość plamki wiązki laserowej na obiekcie  $A_L$  jest mniejsza od rozmiarów obiektu. Zakłada się również, że obiekt ustawiony jest prostopadłe do wiązki i rozprasza padające promieniowanie laserowe zgodnie z prawem Lamberta.



Rys.4. Schemat toru optycznego nadajnika dalmierza laserowego

Natężenie napromienienia obiektu  $E_L$  oświetlonego wiązką laserową można wyrazić następująco:

$$E_L = \frac{P_{NAD} \exp(-\gamma \cdot R)}{A_L}, \quad (9)$$

gdzie:  $P_{NAD}$  jest całkowitą mocą sygnału emitowanego przez nadajnik dalmierza [W], a  $\gamma$  jest współczynnikiem ekstynkcji ośrodka, w którym propaguje się promieniowanie laserowe. Rozmiar plamki  $A_L$  zależy od parametrów optyki nadawczej zgodnie z zależnością:

$$A_L = \frac{\pi}{4 \cos \Theta_S} (\theta_B^2 R^2), \quad (10)$$

gdzie:  $\Theta_S$  jest kątem padania promieniowania na obiekt, a  $\theta_B$  jest kątem rozbieżności wiązki laserowej.

Jeśli luminancję energetyczną obiektu  $L_L$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ] opiszemy przez:

$$L_L = \frac{E_L \cdot \rho}{\pi}, \quad (11)$$

gdzie  $\rho$  jest współczynnikiem odbicia promieniowania od obiektu, to po podstawieniu (9) i (10) dostajemy:

$$L_L = \frac{4P_{NAD} \rho \cos \Theta_S \exp(-\gamma \cdot R)}{\pi^2 \theta_B^2 R^2}. \quad (12)$$

Moc sygnału echa  $P_{SYG}$  padającego na detektor jest opisywana przez:

$$P_{SYG} = L_L A_L \cos \Theta_S \Omega_{FOV} \eta_{OPT} \eta_{FI} \exp(-\gamma R), \quad (13)$$

Zakładając, że promieniowanie laserowe emitowane będzie z dalmierza umieszczonego na nosicielu latającym, znajdującym się na wysokości  $R_a$  nad powierzchnią wody, oraz że kąt padania  $\Theta_S$  jest bliski zeru, możemy wyrażenie (13), z uwzględnieniem zależności (4) i (12), przedstawić w postaci:

$$P_{SYG} = \frac{\rho_{gr}^2 P_{NAD} \rho D_{Odb}^2 \eta_{OPT} \eta_{FI} \exp[-2\gamma \cdot R_a - 2c \cdot R_w]}{4R^2}, \quad (14)$$

gdzie  $c = c(\lambda)$  jest współczynnikiem ekstynkcji wody [ $m^{-1}$ ],  $\rho_{gr}$  jest współczynnikiem strat na granicy ośrodków woda-powietrze, a  $R_w$  jest odległością od powierzchni wody do obiektu.

Jak już przedyskutowano, wartość współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda)$  może zmieniać się szerokim zakresie, od około  $0.2 m^{-1}$  do ponad  $1.4 m^{-1}$ . Porównując te wartości ze współczynnikiem ekstynkcji atmosfery  $\gamma = 0.06 km^{-1}$  można zauważyć, że dominujący wpływ na moc sygnału echa ma pierwszy z nich. Dlatego w dalszych rozważaniach, człon zawierający współczynnik  $\gamma$  w eksponencie wyrażenia (14) został zastąpiony przez stałą wartość  $r = 1.8 \times 10^{-3}$ , odpowiadającą wysokości lotu nosiciela  $R_a = 15 m$ . Współczynnik  $\gamma$  może mieć znaczenie wtedy, gdy system laserowy znajdować się będzie na dużej wysokości nad powierzchnią wody (kilkaset metrów) i panować będą trudne warunki pogodowe (mgła, deszcz itp.).

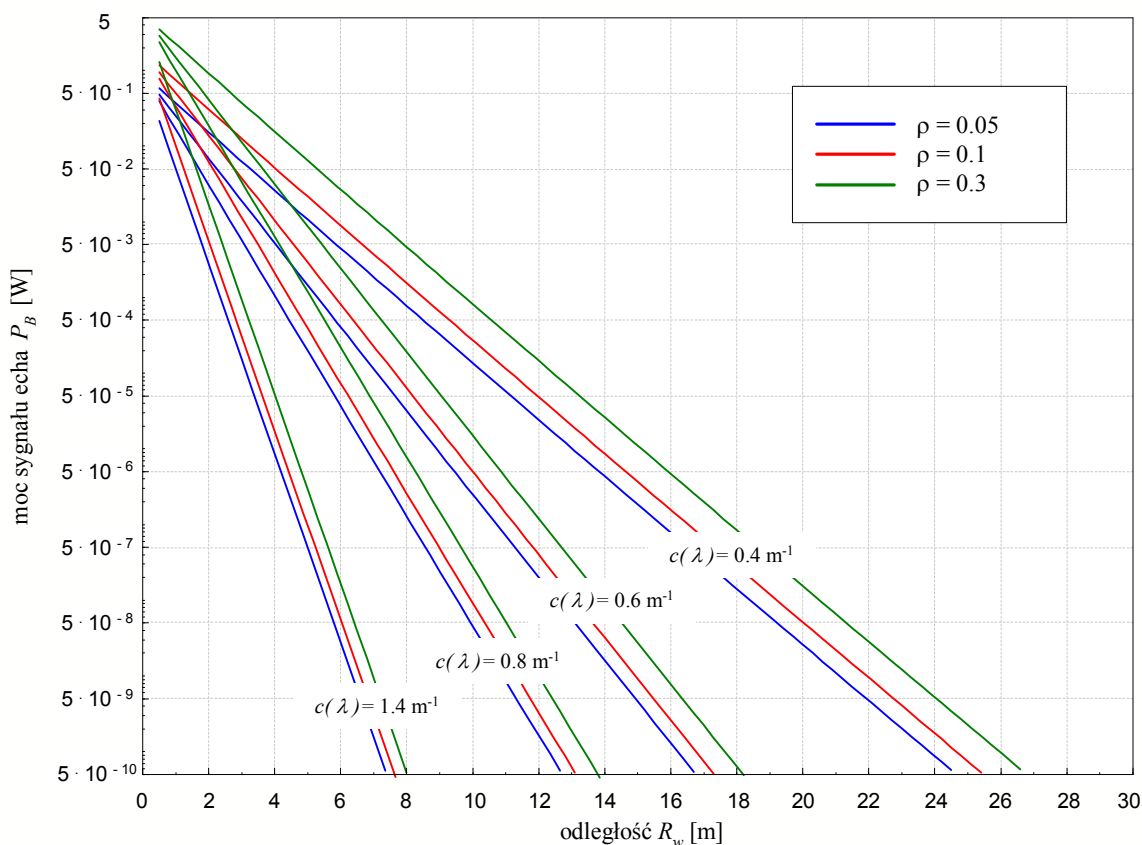
Biorąc powyższe pod uwagę, wyrażenie (14), opisujące moc sygnału echa, przyjmuje ostateczną postać:

$$P_{SYG} = \frac{\rho_{gr}^2 P_{NAD} \rho D_{Odb}^2 \eta_{OPT} \eta_{FI} \exp(-2cR_w - r)}{4R^2}, \quad (15)$$

Na bazie (15) przeprowadzono dalszą analizę. W obliczeniach wykorzystano cztery wartości współczynnika ekstynkcji  $c(\lambda)$ , wyznaczone na podstawie pomiarów i będące reprezentatywnymi, dla całego jego zakresu zmian, w wybranym akwenie morskim w ciągu roku.

W wyniku obliczeń, otrzymano rodziny charakterystyk zmian wartości mocy sygnału echa  $P_{SYG}$  w funkcji odległości do obiektu  $R_a$ , zaprezentowane na rysunku 5. W ramach każdej z rodzin, zmiany mocy sygnału echa w funkcji współczynnika odbicia od obiektu  $\rho$  są niewielkie, co jest konsekwencją liniowości tej zależności. Inny charakter zmian obserwowany jest w przypadku zależności od parametru  $c(\lambda)$ .

Jak wynika z rysunku 5, moc sygnału echa zmienia się znacznie w analizowanym przedziale wartości współczynnika  $c(\lambda)$ . Otrzymane wyniki potwierdzają wcześniejszą tezę, że o zasięgu wykrycia obiektu podwodnego decyduje środowisko wodne. Zmiana współczynnika ekstynkcji wpływa na moc sygnału echa dużo bardziej niż zmiana własności obiektu podwodnego, którego właściwości odbiciowe reprezentuje współczynnik  $\rho$ .



Rys.5. Mocy sygnału echa w funkcji głębokości penetracji wody dla różnych wartości współczynnika odbicia od obiektu i współczynnika ekstynkcji wody

W oparciu o charakterystyki zamieszczone na rysunku 5, wnioskować można również o silnym wpływie współczynnika  $c(\lambda)$  na uzyskiwany zasięg wykrycia obiektu podwodnego. Dla zadanej wartości mocy sygnału echa, wynikającej z poziomu mocy promieniowania tła, wraz ze zmniejszaniem się współczynnika ekstynkcji, szybko wzrasta głębokość na jakiej można zlokalizować zanurzony obiekt.

## 5. Podsumowanie

Stosowanie laserowej techniki dalmierczej w Marynarce Wojennej wiąże się z koniecznością automatyzacji procesów dowodzenia i kierowania ogniem. Silne zagęszczenie środków walki, ich manewrowość i duże prędkości powodują, że czas reakcji jest decydującym czynnikiem wpływającym na skuteczną obronę. Dzięki swoim zaletom, dalmierze laserowe w znacznym stopniu przyczyniają się do spełniania przez systemy pokładowe wymogów współczesnego pola walki. Odnosi się to także do laserowych systemów wykrywania i lokalizacji obiektów podwodnych, w szczególności min kotwicznych stawianych na głębokościach 10 – 30 m. W tym przypadku, dzięki możliwości penetracji środowiska wodnego z powietrza, uzyskuje się dodatkowo zwiększenie bezpieczeństwa jednostki pływającej i jej załogi.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że na zasięg wykrycia obiektu podwodnego przy pomocy dalmierza laserowego dominujący wpływ mają właściwości transmisyjny środowiska wodnego, reprezentowane przez współczynnik ekstynkcji  $c(\lambda)$ . Wpływ innych parametrów, związanych z samym systemem dalmierczym jak i właściwościami obiektu podwodnego, jest znacznie słabszy.

Wskutek wyraźnych, okresowych zmian charakterystyk spektralnych współczynnika ekstynkcji, nie istnieje jedna optymalna długość fali promieniowania laserowego. Dlatego najlepszym źródłem byłby laser na ciele stałym, przestrajalny w szerokim zakresie, od około 540 nm do około 650 nm. Niestety, na dzień dzisiejszy lasery tego typu nie istnieją. Należałoby zatem rozpocząć badania na możliwością opracowania i budowy źródła promieniowania opartego, przykładowo, na generacji w laserze tytanowym lub aleksandrytowym z konwersją częstotliwości, lub generatora parametrycznego (OPO). Pozwoliłoby to zawsze, w zależności od pory roku i warunków hydrometeorologicznych, dobrać optymalną długość fali promieniowania laserowego pod kątem propagacji w wodzie morskiej. Zagadnienie to jest o tyle istotne, że nawet niewielkie zmniejszenie współczynnika  $c(\lambda)$  przy zmianie długości fali drastycznie zwiększyłoby zasięg dalmierza.

Z analizy mocy promieniowania tła wynika, że najkorzystniejszym okresem pracy, laserowego systemu dalmierczego przeznaczonego do wykrywania i lokalizacji obiektów podwodnych, jest pora zimowa. Koreluje to z minimalnymi wartościami współczynnika ekstynkcji wody morskiej,  $c(\lambda) \approx 0.3 \text{ m}^{-1}$ , uzyskiwanymi w miesiącach od listopada do marca. W takich warunkach, dla obiektu podwodnego zanurzonego na głębokościach 30 – 33 m uzyskuje się moc sygnału echa na poziomie 5 nW, będącego powyżej poziomu mocy szumów.

Poprawność przeprowadzonej analizy zostanie zweryfikowana eksperymentalnie po zbudowaniu, zgodnego z założeniami, modelu użytkowego dalmierza laserowego. Wykonane obliczenia miały na celu wstępną ocenę możliwości wykrywania obiektów podwodnych przy pomocy promieniowania laserowego. Otrzymane wyniki pokazują, że możliwa jest skuteczna penetracja środowiska wodnego do głębokości odpowiadających głębokościom stawiania min kotwicznych.

*Praca częściowo dofinansowana przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji w ramach grantów T00C 020 25 i PBZ-MiN-009/T11/2003*

## Literatura

1. Marczak J., Ostrowski R., Zygmunt M., Mierczyk Z., Młodzianko A, Gawlikowski A., Wypych M., „Wojskowe dalmierze laserowe”, Biuletyn WAT, Vol.LI, Nr 6, 21-63 (2002);
2. Ostrowski R., Cywiński A., „Dalmierze laserowe – aspekty zastosowania w marynarce wojennej”, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 95, Nr 2/2005, 111-121, 2005;
3. Dera J., „Fizyka morza”, PWM, Warszawa 2003;
4. Jerlov N.G., „Marine optics”, Elsevier Csi. Publ. Company, Amsterdam 1976 ;
5. Darecki M, Olszewski J., „Complexity of the optical properties of Baltic Waters”, Instytut Oceanologii PAN, private communication;
6. Darecki M., Weeks A., Sagan S., Kowalczyk P., Kaczmarek S., „Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms”, Science, 237-250, 2002;
7. Bradtke K., „Pole zawiesiny i jego wpływ na właściwości optyczne wód przybrzeżnych na przykładzie Zatoki Gdańskiej”, rozprawa doktorska, Instytut Oceanografii UG, Gdynia 2004;
8. Born M., Wolf E., „Principle of Optics”, 7<sup>th</sup> Edition, Cambridge University 1999;
9. Bradtke K., „Pole zawiesiny i jego wpływ na właściwości optyczne wód przybrzeżnych na przykładzie Zatoki Gdańskiej”, rozprawa doktorska, Instytut Oceanografii UG, Gdynia 2004;
10. Cywiński A., Kołaczyński S., „Aspekty użycia promieniowania laserowego do wykrywania celów podwodnych”, IV Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia, Waplewo, 09-11.10.2002;
11. Marczak J., „Impulsowy dalmierz laserowy z podsumowym odbiorem sygnału echa”, Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji. Rok XXVII, Zeszyt 66, 117-128, 1998.