



Dwubarwny LIDAR rozproszeniowy do zdalnego wykrywania aerozoli

ZYGMUNT MIERCZYK, MAREK ZYGMUNT,
ANDRZEJ GAWLIKOWSKI, ANDRZEJ GIETKA, PIOTR KNYSAK,
ANDRZEJ MŁODZIANKO, MICHAŁ MUZAŁ, WIESŁAW PIOTROWSKI,
MIROŚLAWA SZOPA, JACEK WOJTANOWSKI

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono dwubarwny LIDAR rozproszeniowy, który został opracowany w Instytucie Optoelektroniki w Wojskowej Akademii Technicznej. LIDAR ten przeznaczony jest do zdalnej detekcji aerozoli naturalnych oraz sztucznych, zarówno biologicznych, jak i chemicznych. W pracy omówiono budowę LIDARA, jego podstawowe parametry oraz zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych i terenowych z jego zastosowaniem.

Słowa kluczowe: LIDAR rozproszeniowy, zdalna detekcja skażeń, aerozole

Symbole UKD: 621.375.826

1. Wprowadzenie

Technika LIDARU (*Light Detection And Ranging*) jest techniką umożliwiającą zdalne monitorowanie (wykrywanie i określanie położenia badanego obiektu) różnego rodzaju parametrów środowiska za pomocą światła. Historia tej metody sięga lat dziewięćdziesiątych XX wieku, a jej idea polega na wysłaniu wiązki promieniowania o ściśle określonej charakterystyce spektralnej i czasowej, w wybrany obszar przestrzeni, a następnie detekcji i analizie otrzymanego sygnału powrotnego. Ze względu na różnorodność zjawisk fizycznych, na których opiera się ta technika, wśród LIDARÓW wyróżniamy [1]:

- LIDAR rozproszeniowy,
- LIDAR absorpcji różnicowej (DIAL — *Differential Absorption Lidar*),

- LIDAR fluorescencyjny,
- LIDAR ramanowski,
- LIDAR dopplerowski.

Poszczególne LIDARY znalazły liczne zastosowania w różnorodnych badaniach, szczególnie w obszarze ochrony środowiska, biologii, biocenologii itp.

2. LIDAR rozproszeniowy

Technika LIDARU rozproszeniowego opiera się na analizie sygnału powrotnego, otrzymanego jako skutek zjawiska elastycznego rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego. Zjawisko to polega na zmianie kierunku propagacji fali elektromagnetycznej bez zmiany jej długości, następującej w wyniku oddziaływania promieniowania z cząsteczkami ośrodka rozpraszającego. Istnieją trzy podstawowe rodzaje rozpraszania elastycznego [2, 3]:

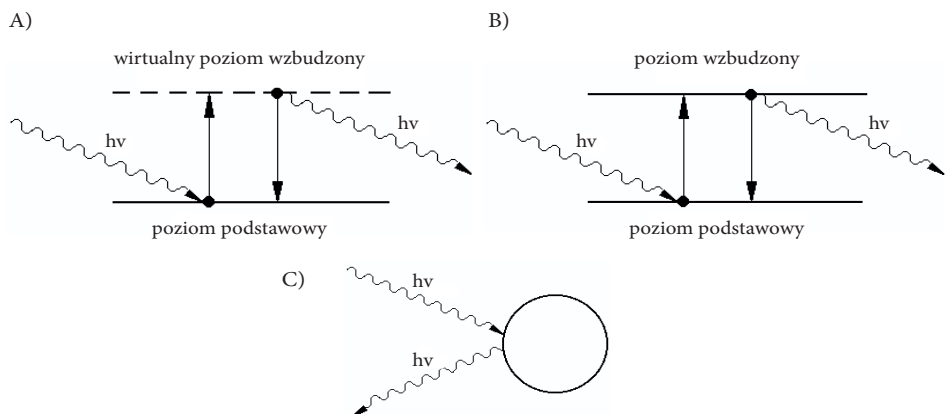
- rozpraszanie Rayleigha — zachodzi na skutek oddziaływania fali elektromagnetycznej z cząstkami, dla których bezwymiarowy parametr wielkości X jest mniejszy bądź równy 0,3. Wartość parametru X określona jest zależnością $X = 2\pi r/\lambda$, gdzie r to promień cząstki rozpraszającej, a λ to długość fali padającego promieniowania. Ten rodzaj rozpraszania ma znaczenie tylko w czystej atmosferze i dla małych wartości długości fali. Dla opracowanego LIDARA rozpraszanie Rayleigha zachodzi dla cząstek o promieniu mniejszym bądź równym 0,025 μm dla długości fali 532 nm oraz dla cząstek o promieniu mniejszym bądź równym 0,05 μm w przypadku długości fali 1064 nm;
- rozpraszanie Mie — zachodzi na skutek oddziaływania fali elektromagnetycznej z cząstkami, dla których bezwymiarowy parametr wielkości X jest większy niż 0,3 — ma podstawowe znaczenie dla techniki LIDAROWEJ;
- rozpraszanie rezonansowe — zachodzi na skutek oddziaływania cząstek rozpraszających, których pasmo absorpcji dopasowane jest spektralnie do energii fotonów. Ten rodzaj rozpraszania ma znikome znaczenie dla techniki LIDAROWEJ.

Schematy zjawisk rozpraszania elastycznego przedstawiono na rysunku 1.

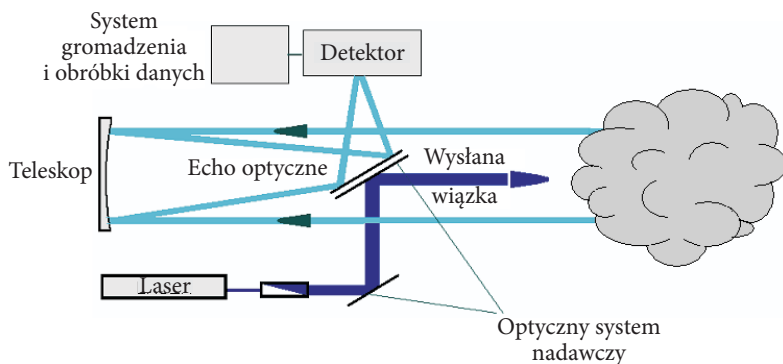
Podstawowymi elementami budowy każdego LIDARA są:

- laser — jako generator wiązki promieniowania o określonej charakterystyce spektralnej, czasowej i geometrycznej;
- optyczny układ nadawczy — formujący wiązkę i kierujący ją w wybrany obszar badanej przestrzeni;
- optyczny układ odbiorczy — zbierający „echo optyczne” i skupiający zebrany sygnał optyczny na detektorze;

- element detekcyjny — przetwarzający sygnał optyczny na prąd;
- układ gromadzenia i przetwarzania danych.



Rys. 1. Schematy zjawisk rozpraszania elastycznego: rozpraszanie Rayleigha (A), rozpraszanie rezonansowe (B), rozpraszanie Mie (C)



Rys. 2. Schemat podstawowych podzespołów LIDARA rozproszeniowego

Na rysunku 2 zaprezentowano schemat przedstawiający podstawowe elementy budowy LIDARA.

Sygnał powrotny w LIDARZE rozproszeniowym opisywany jest przez tzw. równanie lidarowe, mające postać [1]:

$$P_k(r) = P_p \cdot \frac{c \cdot t_i}{2} \cdot \frac{A}{r^2} \cdot \beta(r) \cdot e^{-2 \int_0^r \gamma(x) dx} \cdot C_1, \quad (1)$$

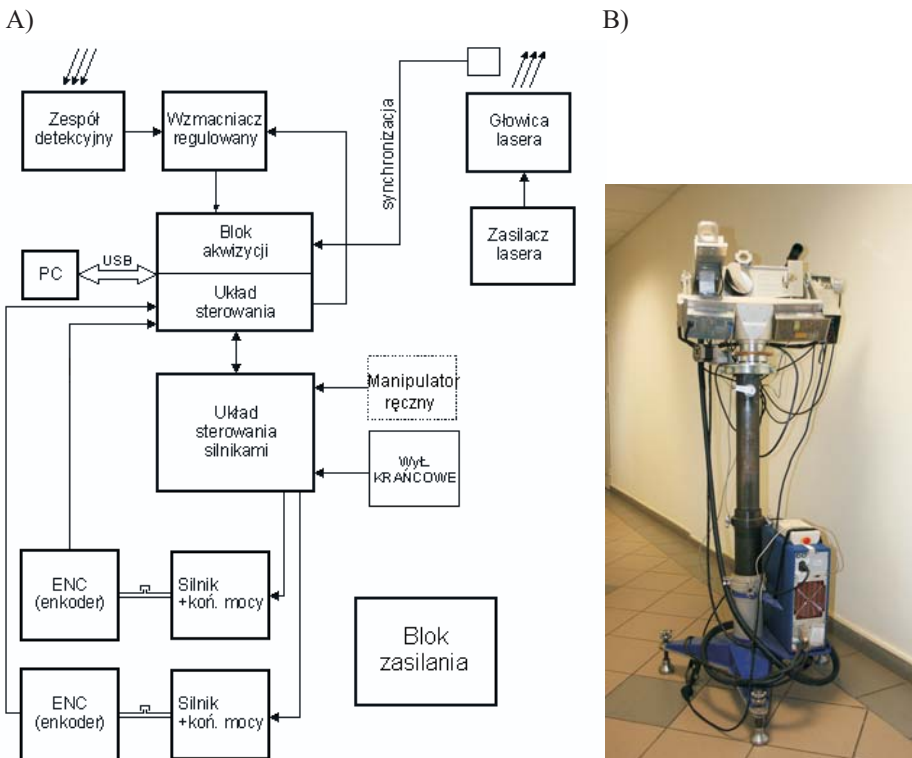
gdzie: $P_k(r)$ — moc padająca na detektor [W];

r — odległość, z której odbieramy promieniowanie rozproszone [m];

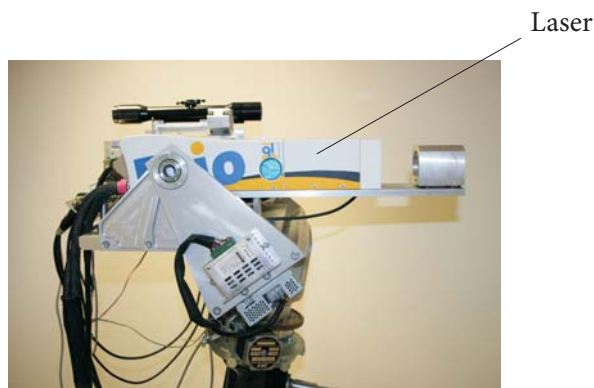
$P_p(r)$ — moc emitowanego impulsu [W];
 c — prędkość światła, $3 \cdot 10^8$ m/s;
 t_i — czas trwania impulsu [s];
 A — powierzchnia apertury odbiorczej [m²];
 $\beta(r)$ — całkowity współczynnik rozpraszania [1/m];
 $\gamma(r)$ — całkowity współczynnik ekstynkcji [1/m];
 C_1 — parametr systemu lidarowego.

3. Opis układu pomiarowego

LIDAR opracowany w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej jest dwubarwnym LIDAREM rozproszeniowym, umieszczonym na ruchomej platformie umożliwiającej skanowanie badanego obszaru. Schemat oraz zdjęcie platformy skanującej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat (A) oraz zdjęcie (B) platformy detekcyjnej LIDARA



Rys. 4. Zdjęcie lasera zamontowanego w LIDARZE

Źródłem promieniowania w LIDARZE jest laser Nd:YAG firmy BRIO QUANTEL, generujący impulsy o dwóch długościach fali: 1064 nm (pierwsza harmoniczna) oraz 532 nm (druga harmoniczna).

Laser generuje impulsy promieniowania, których czas trwania wynosi 10 ns. Odpowiada to przestrzennej długości impulsu równej 3 m. Rozbieżność kątowa generowanego promieniowania wynosi 2 mrad. W wyniku zastosowania teleskopu rozbieżność kątowa może być znacznie zmniejszona (2-5 razy).

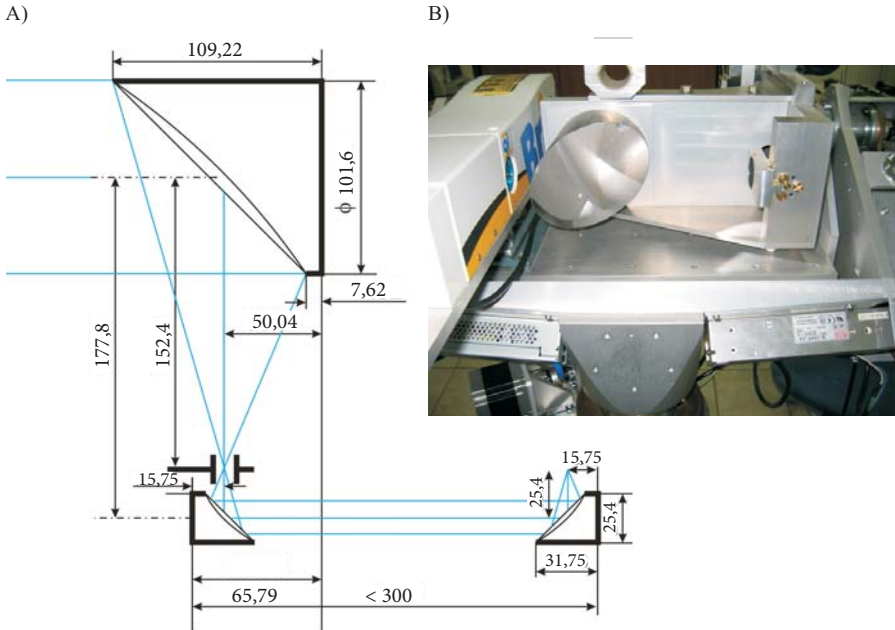
Optyczny układ odbiorczy LIDARA składa się z asferycznego obiektywu zwierciadlanego, dwóch zwierciadeł dodatkowych oraz układu filtrów interferencyjnych. Schemat blokowy oraz zdjęcie układu odbiorczego zaprezentowano na rysunku 5.

Obiektyw wraz z pierwszym zwierciadłem dodatkowym formuje równoległą wiązkę promieniowania i kieruje ją na filtry interferencyjne. Drugie zwierciadło dodatkowe odbiera wiązkę po przejściu przez filtry i skupia ją na detektorze.

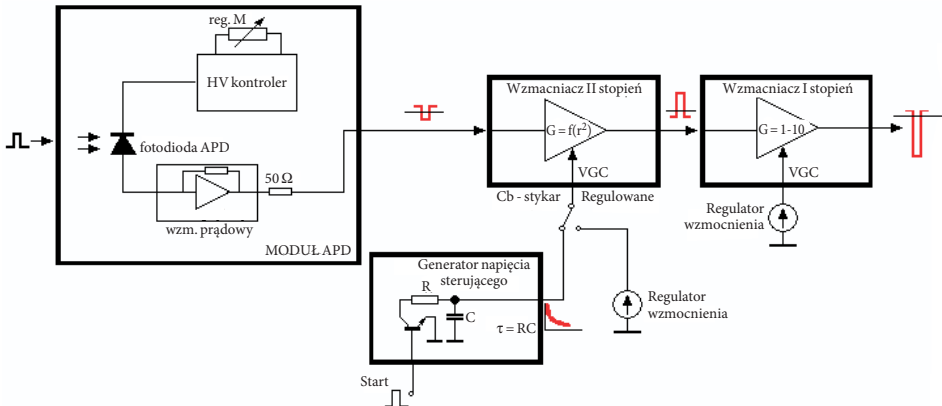
W LIDARZE zastosowano obiektyw zwierciadlany z pozaosiowym, asferycznym zwierciadłem o profilu paraboli. Ogniskowa paraboli zwierciadła wynosi 3 cale, jednak ze względu na znaczną pozaosiowość ogniskowa odbiciowa wynosi 6 cali. Średnica czynna zwierciadła równa jest 4 cale. Zwierciadło pokryte jest warstwą aluminium o współczynniku odbicia równym około 89% dla długości fali 532 nm i 88% dla długości 1064 nm. Układ obiektywu zapewnia dużą jasność oraz zmienny kąt widzenia, regulowany średnicą diafragm.

Układ detekcyjny LIDARA złożony jest z detektora promieniowania optycznego oraz dwóch wzmacniaczy sygnału. Schemat układu detekcyjnego przedstawiony został na rysunku 6.

Zastosowany w układzie odbiorczym detektor to skompensowana termicznie krzemowa fotodiody lawinowa S8890-10 HAMAMATSU PHOTONICS, zoptymalizowana dla długości fali równej 940 nm, pracująca w zakresie 400-1100 nm. Prąd z fotodiody przekształcany jest na proporcjonalne napięcie przez wzmacniacz



Rys. 5. Schemat blokowy (A) oraz zdjęcie (B) optycznego układu odbiorczego LIDARA



Rys. 6. Schemat blokowy układu detekcyjnego

transimpedancyjny. Następnie przekazywany jest na pierwszy i drugi stopień wzmacniacza odwracającego. Zakres regulowanego wzmocnienia dla poszczególnych stopni wynosi: 1-10 dla pierwszego stopnia wzmacniacza oraz 1-100 dla stopnia drugiego.

Podstawowe parametry układu detekcyjnego przedstawione zostały w tabeli 1.

TABELA 1

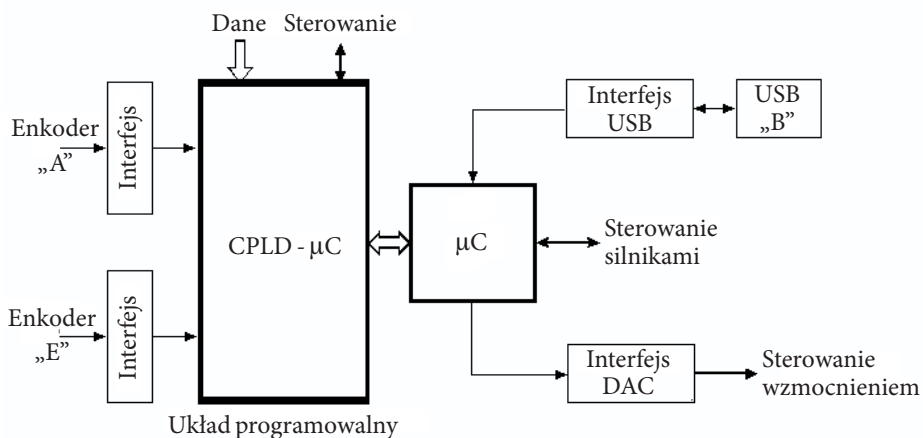
Podstawowe parametry układu detekcyjnego LIDARA

Kształt obszaru czynnego	Koło o średnicy 1 mm
Powierzchnia czynna	0,78 mm ²
Fotoczulłość	10 A/W dla $\lambda = 532$ nm 20 A/W dla $\lambda = 1064$ nm
Średnia wartość dla typowego prądu ciemnego	5 nA
Maksymalna wartość prądu ciemnego	50 nA
Maksymalne równoważne moce szumów NEP	5 nW dla $\lambda = 532$ nm 1,3 nW dla $\lambda = 1064$ nm

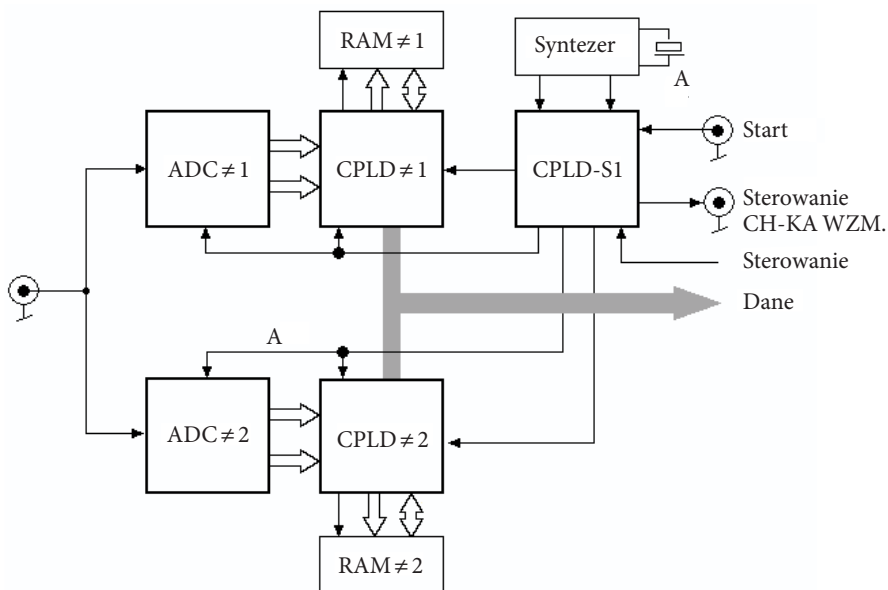
Praca LIDARA jest sterowana komputerowo. Opracowane oprogramowanie umożliwia między innymi:

- sterowanie platformą skanującą,
- regulację wzmacnienia i charakterystyk układu wzmacniaczy,
- sterowanie procesem cyfrowego przetwarzania sygnałów,
- archiwizację otrzymywanych danych.

Schemat układu sterującego przedstawiony jest na rysunku 7, natomiast schemat bloku akwizycji danych na rysunku 8.



Rys. 7. Schemat blokowy układu sterowania LIDAREM



Rys. 8. Schemat blokowy układu akwizycji danych LIDARA (ADC — przetwornik analogowo-cyfrowy, CPLD — układ programowalny)

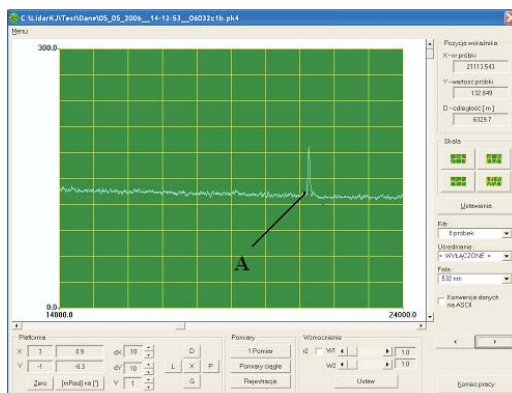


Rys. 9. Zdjęcia układu elektronicznego LIDARA

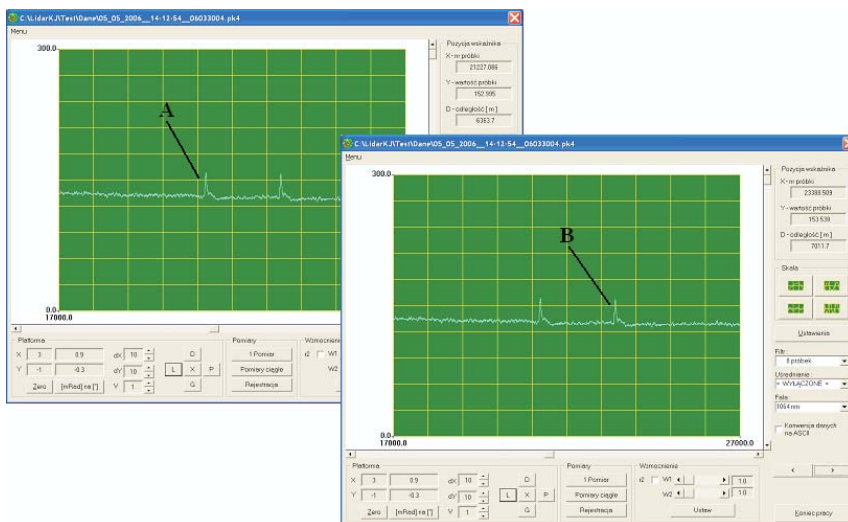
4. Wyniki pomiarów

Wstępne badania systemu lidarowego wykonano, wykorzystując naturalne chmury jako obiekty rozpraszające. Na rysunkach 10-12 pokazano wyniki pomiarów sygnału echa przy różnych warunkach zachmurzenia. Opracowane oprogramowanie komputerowe umożliwia: regulację wzmocnienia układu wzmacniaczy oraz ich charakterystyk (czas/wzmocnienie), sterowanie platformą

skanującą (obszar skanowania, prędkość skanowania), archiwizację otrzymanych wyników pomiaru, sterowanie procesem cyfrowego przetwarzania odbieranych sygnałów.



Rys. 10. Sygnał uzyskany od chmury, dla fali o długości $\lambda_2 = 532$ nm (A — podstawa chmury — odległość ok. 6330 m)



Rys. 11. Sygnał uzyskany od podwójnej warstwy chmur, dla fali o długości $\lambda_1 = 1064$ nm (A — pierwsza warstwa chmur — odległość ok. 6360 m, B — druga warstwa chmur — odległość ok. 7010 m)

Zastosowanie w lidarze ruchomej platformy skanującej pozwala na zebranie danych pomiarowych z wyznaczonej przez użytkownika przestrzeni i zobrazowanie ich w trzech wymiarach. Dzięki temu można uzyskiwać informację nie

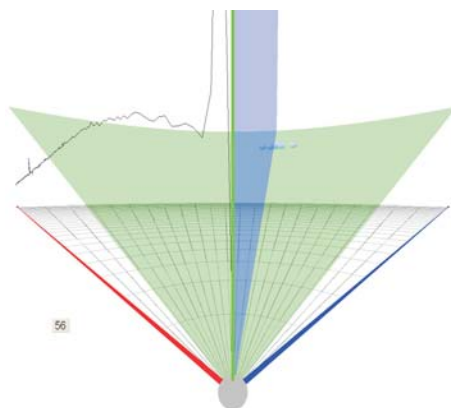


Rys. 12. Sygnały uzyskane od rozwarstwionej chmury, dla fali długości $\lambda_1 = 1064$ nm. Chmura znajdowała się na wysokości ok. 6400 m. Trzy kolejne wykresy pokazują zmiany w czasie

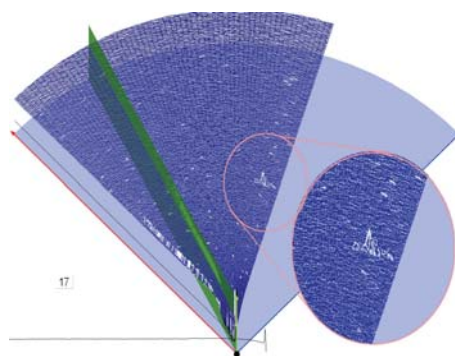
tylko o rodzaju rozpylonej substancji i jej odległości od nadajnika, ale także o jej przestrzennym rozkładzie.

Założeniem projektowanego interfejsu jest oddanie w ręce operatora lidarza charakteryzującego się łatwością obsługi oraz możliwością szybkiego dostępu do istotnych wyników pomiarów. Aby można było to osiągnąć, interfejs umożliwi stopniowe uszczegółowianie analizy danych poprzez przejście od ogólnych informacji o kształcie i położeniu interesującego obiektu do szczegółowych odczytów parametrów odebranego sygnału służących rozpoznaniu badanej substancji. Użytkownik dokonuje tego poprzez odpowiednie ustawienie w azymucie i elewacji dwóch płaszczyzn — horyzontalnej i wertykalnej. Płaszczyzna horyzontalna wybiera do zobrazowania dane pochodzące ze skanowania w jednej płaszczyźnie i określonej elewacji, natomiast płaszczyzna wertykalna wskazuje na pojedynczy pomiar o określonym azymucie wybrany ze zbioru pomiarów wskazanych przez płaszczyznę horyzontalną.

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wybrane wyniki trójwymiarowego zobrazowania obiektów rozpraszających.

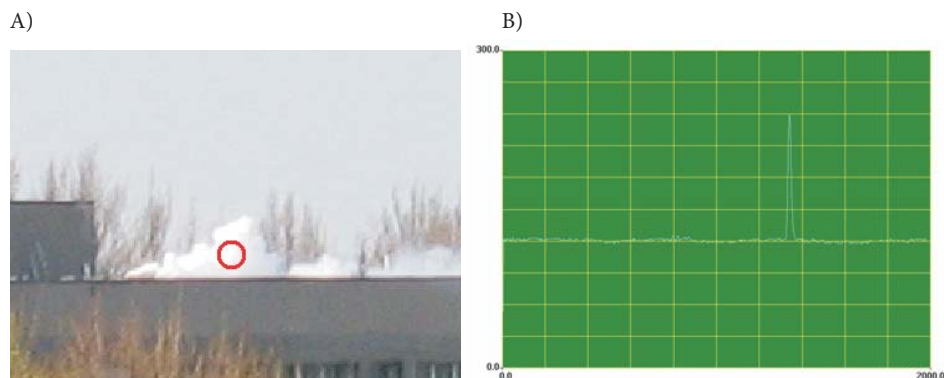


Rys. 13. Trójwymiarowy obraz przestrzeni skanowania lidar. Zaznaczone na niebiesko kuliste obszary reprezentują obiekty, od których nastąpiło odbicie promieniowania. Dane pochodzą ze skanowania tylko w jednej płaszczyźnie poziomej

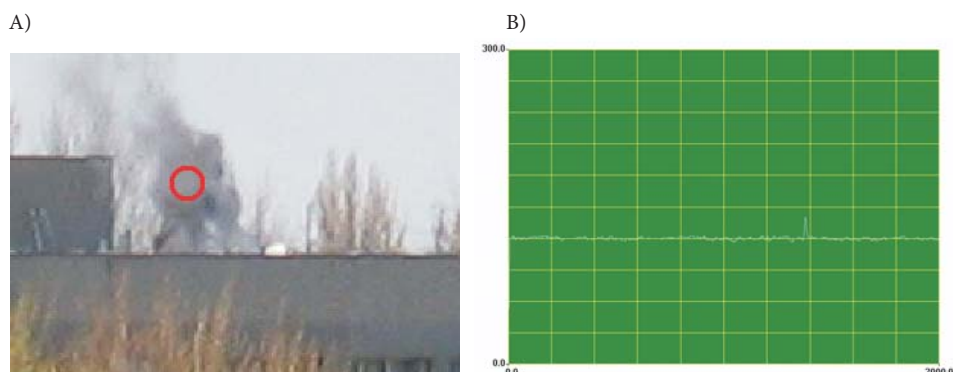


Rys. 14. Trójwymiarowy obraz wyników skanowania ze stałą elewacją. Widoczny jest obraz niewielkiej chmury rozpraszającej promieniowanie. Wysokość amplitud na wykresie oznacza wielkość wartości chwilowych sygnału odebranego przez detektor z tego odbicia

W badaniach aerozoli sztucznych zostały wykorzystane dymotwórcze mieszaniny pirotechniczne M2 oraz M16. Zdjęcia ośrodków rozpraszających oraz otrzymane sygnały zaprezentowano na rysunkach 15 i 16.



Rys. 15. Ośrodek rozpraszający powstały z mieszaniny dymotwórczej M16 (A) oraz oscylogram sygnału uzyskanego przy użyciu fali $\lambda = 1064$ nm (B)



Rys. 16. Ośrodek rozpraszający powstały z mieszaniny dymotwórczej M2 (A) oraz oscylogram sygnału uzyskanego przy użyciu fali $\lambda = 532$ nm (B)

5. Podsumowanie

Przeprowadzone w Instytucie Optoelektroniki wstępne analizy, symulacje oraz badania laboratoryjne umożliwiły zaprojektowanie i skonstruowanie dwubarwnego LIDARA rozproszeniowego do zdalnego wykrywania aerozoli. Wykonane i przebadane zostały podstawowe parametry systemu nadawczego, odbiorczego oraz układu gromadzenia i przetwarzania danych. Opracowane zostało odpowiednie oprogramowanie do sterowania ruchomą platformą oraz pozwalające na analizę detekowanego sygnału rozproszeniowego, a następnie zobrazowanie wyników w postaci standardowej oraz w formacie 3D.

Badania zostały wykonane dzięki dofinansowaniu przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Projektu Badawczego Zamawianego PBZ-MiN-009/T11/2003.

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

LITERATURA

- [1] V. A. KOVALEV, W. E. EICHINGER, *Elastic Lidar, Theory, Practise, and Analysis Methods*, Wiley Interscience, New Jersey, 2004.
- [2] H. C. VAN DE HULST, *Light Scattering by Small Particles*, Wiley, New York, 1957.
- [3] D. W. HAHN, *Light Scattering Theory*, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Florida, 2006.

Z. MIERCZYK, M. ZYGMUNT, A. GAWLIKOWSKI, A. GIETKA,
P. KNYSAK, A. MŁODZIANKO, M. MUZAL, W. PIOTROWSKI,
M. SZOPA, J. WOJTANOWSKI

Two-wavelength scattering LIDAR for stand off detection of aerosols

Abstract. In the article, two-wavelength backscattering LIDAR is presented. LIDAR was worked out and constructed at the Institute of Optoelectronics of the Military University of Technology. This LIDAR is destined for remote sensing of biological and chemical aerosols, both natural and antropogenic ones. In the work, one discussed the construction of LIDAR and typical parameters and first results obtained with its application.

Keywords: scattering LIDAR, stand off detection, aerosols

Universal Decimal Classification: 621.375.826

