

dr hab. inż. Jan PIETRASIENSKI, Prof. WAT\*  
mjr dr inż. Dariusz RODZIK\*  
kpt. mgr inż. Jacek WARCHULSKI\*  
kpt. mgr inż. Marcin WARCHULSKI\*  
dr inż. Stanisław ŻYGADŁO\*  
mgr inż. Grzegorz MUCHA\*\*  
mgr inż. Paweł SIERGIEJUK\*\*\*  
Armand OLEJKO\*\*\*\*  
Grzegorz ARCZYŃSKI\*\*\*\*  
\* Wojskowa Akademia Techniczna  
\*\* MUCHTECH  
\*\*\* Samsung Electronics Polska  
\*\*\*\* AGO S.C.

## SYSTEM OCENY REALIZACJI ARTYLERYJSKICH ZADAŃ BOJOWYCH PODODDZIAŁÓW PRZECIWLOTNICZYCH

**Streszczenie:** W pracy opisano przeznaczenie, budowę i zasadę działania opracowywanego systemu określania odległości przelotu pocisku względem ruchomej tarczy powietrznej, ze szczególnym uwzględnieniem fizycznych uwarunkowań możliwości detekcji zaburzeń ośrodka wywołanych ruchem pocisku z prędkością naddźwiękową. Przedstawiono wybrane wyniki badań laboratoryjnych i poligonowych urządzenia.

## ASSESSMENT SYSTEM OF ARTILLERY FIRING TASKS OF ANTI-AIRCRAFT UNITS

**Abstract:** The purpose, construction and operation of the developed system for determining the projectile miss distance with respect to movement air shield are described in this paper, with particular emphasis on the physical conditions of the possibility of medium disturbances detection caused by a projectile motion with a supersonic speeds. Selected results of laboratory and firing field tests of device are presented.

### 1. Wstęp

Oceny wyników realizacji artyleryjskich zadań bojowych pododdziałów plot. można dokonać na podstawie liczby uzyskanych trafień w makietę lub przy pomocy metody optycznej (np. z użyciem lornetki TZK) [1], elektrooptycznej [2], czy radiolokacyjnej [3]. Dąży się, aby stosowane metody oceny charakteryzowała obiektywność, możliwość określania wielkości oraz kierunku uchybu, duża dokładność, czy możliwość prowadzenia oceny w trudnych warunkach atmosferycznych. Stawiane są także konkretne wymagania techniczne w zakresie kosztów, prostej i szybkiej obsługi, niezawodności, autonomicznej pracy i wypracowania oceny w czasie rzeczywistym, możliwości rejestracji i akwizycji wyników oraz raportowania. Wymienione rodzaje metod i ich techniczne aplikacje nie w pełnym zakresie spełniają stawiane przed nimi wymagania [4].

Alternatywą dla powyższych metod mogą stać się akustyczne metody oceny realizacji zadań bojowych, których zaletą jest obiektywizm oceny, szybkość uzyskania wyników, stosunkowo mała wrażliwość na warunki atmosferyczne oraz niskie koszty aparatury pomiarowej. Aby zminimalizować wpływ warunków pogodowych na dokładność oceny plot. strzelań artyleryjskich, w metodach akustycznych zakłada się, że jako nośnik informacji pierwotnej o parametrach ruchu pocisku, przemieszczającego się z prędkościami naddźwiękowymi, wykorzystywane są wzbudzone w powietrzu fale dźwiękowe.

W PRZYPADKU umieszczenia na ostrzeliwanym Imitatorze Celu Powietrznego (ICP) układu dźwiękowych czujników pomiarowych (przy znanym ich wzajemnym położeniu), fala ciśnienia wywołana ruchem pocisku w środowisku sprężystym może być wykorzystana jako źródło informacji o położeniu pocisku względem ICP. Z uwagi na względnie wolne zmiany parametrów ośrodka lotu pocisku strumień danych pomiarowych z poszczególnych czujników może być przesyłany w czasie rzeczywistym, np. łączem radiowym o stosunkowo małej przepustowości. Stosowanie czujników o małych gabarytach nie powinno zakłócić lotu ICP. Odpowiednim przykładem takiego systemu jest opracowywany w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT), przy współudziale innych podmiotów, akustyczny system określania odległości przelotu pocisku względem tzw. *ruchomej tarczy powietrznej*.

## **2. Fizyczne uwarunkowania detekcji zaburzeń ośrodka wywołanych ruchem pocisku**

Pocisk artyleryjski lecący z prędkością naddźwiękową powoduje zaburzenie ośrodka w postaci akustycznej fali uderzeniowej. Fali tej odpowiada charakterystyczny rozkład ciśnienia w czasie [5, 6]. Ma on bowiem kształt litery *N*. Obszerne wyniki badań parametrów fali akustycznej typu *N*, powstałej na skutek przelotu pocisku, przedstawione są w pracy [7].

Odległość, jaką przebywa fala *N*, liczona od miejsca powstania zaburzenia do miejsca pomiaru jest wielkością mającą bezpośredni wpływ na wartość amplitudy i czasu trwania tego zaburzenia ośrodka. Wraz ze wzrostem odległości od pocisku amplituda zaburzenia maleje, a czas trwania zaburzenia rośnie. Można zauważyć również, że na wartość parametrów fali *N* wpływają także parametry amunicji tj. kaliber, długość oraz prędkość lotu pocisku. Prędkość lotu pocisku ma bezpośredni wpływ na wartość kąta Macha powstających zaburzeń, którego znajomość można wykorzystać przy określaniu trajektorii i śledzeniu lotu pocisku.

Aby móc jednoznacznie określić odległość przelotu pocisku względem czujnika pomiarowego, nie wystarczy wykryć charakterystyczny rozkład ciśnienia fali *N*. Może bowiem dojść do sytuacji, gdy dla dwóch różnych pod względem wymiarów pocisków zarejestrowane parametry zaburzenia ośrodka będą tej samej wartości, ponieważ pociski minęły czujnik pomiarowy w różnej odległości. Dlatego niezawodne określenie odległości przelotu pocisku względem czujnika pomiarowego wymaga dodatkowo identyfikacji parametrów częstotliwościowych.

Powietrze, w którym podczas przelotu pocisku rozprzestrzenia się fala typu *N* jest ośrodkiem niejednorodnym, dlatego propagacji tej towarzyszą pewne fluktuacje. Ich poziom jest wprost proporcjonalny do drogi jaką fala *N* przebywa w danym ośrodku. Na fluktuacje wpływają m.in. wiatr, temperatura, wilgotność powietrza oraz absorpcja dźwięku w atmosferze. Fale o wyższych częstotliwościach są silniej tłumione od niższych częstotliwości.

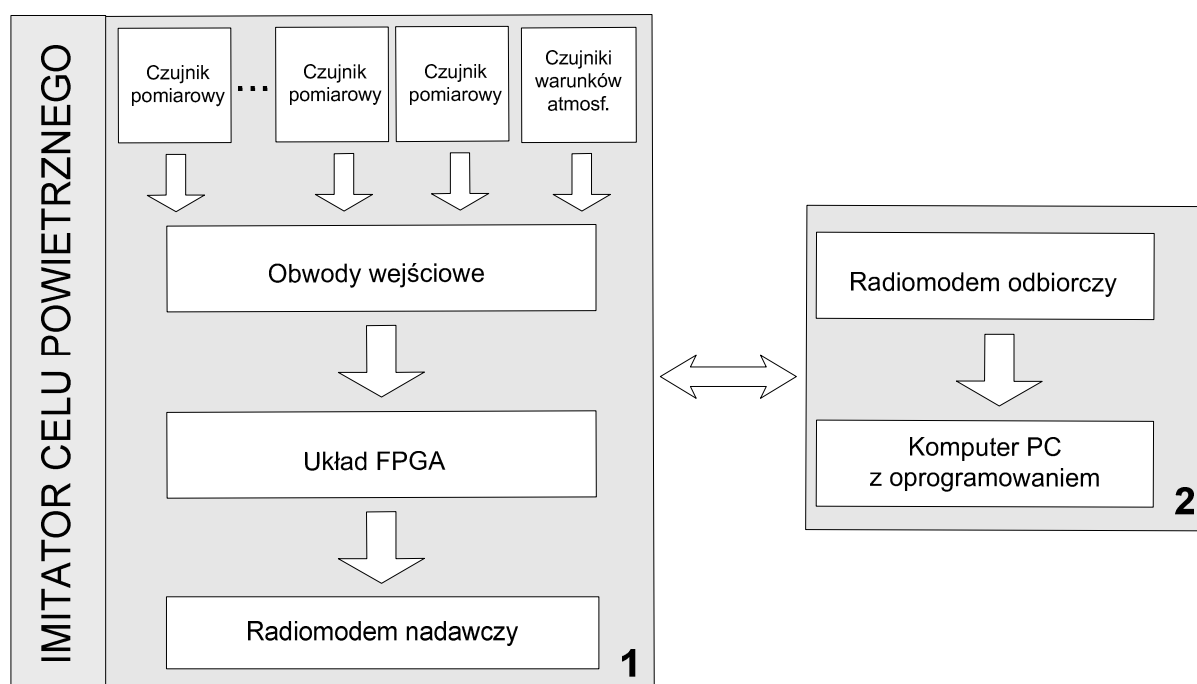
Z prowadzonych przez autorów badań i symulacji wynika, że powietrze w którym porusza się fala *N* na odcinku 100 m, prawie całkowicie tłumí wszystkie składowe powyżej 2 kHz. Istotną sprawą jest również dobór czujnika pomiarowego z odpowiednim pasmem pracy, ograniczonym od dołu.

### 3. Przeznaczenie, budowa i zasada działania opracowywanego systemu akustycznego

Przeznaczeniem opracowywanego w WAT systemu akustycznego jest określanie w czasie rzeczywistym odległości przelotu pocisku względem tzw. „tarczy powietrznej” oraz wypracowanie obiektywnej oceny wyników realizacji zadania bojowego wykonywanego przez artyleryjski zestaw przeciwlotniczy. Tarczą powietrzną jest tu ostrzeliwany w czasie realizacji zadania bojowego ruchomy ICP, wyposażony w wielokanałowy lokator akustyczny, określający zmiany wybranych wielkości zaburzeń ciśnienia ośrodka wywołanych ruchem pocisku.

#### 3.1. Realizacja sprzętowa tarczy powietrznej

Schemat funkcjonalny systemu określania odległości przelotu pocisku względem ruchomej tarczy powietrznej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny systemu określania odległości przelotu pocisku względem tarczy powietrznej: 1 – aparatura pokładowa tarczy powietrznej; 2 – aparatura naziemna

W skład systemu określania odległości przelotu pocisku względem ruchomej tarczy powietrznej wchodzi ICP, zestaw czujników pomiarowych (mikrofony pomiarowe i czujniki warunków atmosferycznych) z wejściowymi układami dopasowującymi, specjalizowany układ programowalny FPGA, system transmisji i odbioru danych oraz komputerowe stanowisko akwizycji, analizy i wizualizacji wyników, wspomagane oprogramowaniem specjalistycznym.

**ICP.** Jako ICP wykorzystana została konstrukcja całkowicie kompozytowego modelu samolotu T-250 firmy AGO S.C., sterowanego radiowo z wykorzystaniem autopilota, o następujących charakterystykach taktyczno-technicznych:

- rozpiętość skrzydeł 2,5 m;
- długość kadłuba 1,95 m;

- masa startowa 12 kg;
- moc silnika 7 KM;
- czas lotu 60 min.;
- pułap lotu do 5 km;
- zasięg 30 km;
- prędkości maksymalna do 200 km/h;
- prędkości przelotowa 170 km/h;
- prędkości minimalna 40 km/h.

Start ICP może nastąpić z wyrzutni długości 4,5 m, natomiast lądowanie może odbywać się konwencjonalnie lub na spadochronie. Model został przystosowany do przenoszenia rac termicznych i montażu stożka mikrofalowego o skutecznej powierzchni odbicia do 1 m<sup>2</sup>. Może zabrać na pokład do 5 kg dodatkowego ładunku.

Aparaturę pomiarową tarczy powietrznej można podzielić na trzy główne bloki odpowiadające za pozyskanie i przetworzenie danych oraz komunikację z urządzeniem naziemnym.

**Czujniki pomiarowe i obwody wejściowe.** W skład bloku wejść analogowych wchodzi zestaw czujników pomiarowych, cztery filtry pasmowo przepustowe z przetwornikami ADC, które mogą pracować z częstotliwością próbkowania do 1 MSa/s. Dane pomiarowe po przemianie na postać cyfrową zostają przekazane do analizy w bloku FPGA. Istotną rolę pełnią tu specjalnie wykonane czujniki ciśnieniowe, które pracując w paśmie akustycznym, charakteryzują się dynamiką pracy do 160 dB. Każdy czujnik ciśnieniowy posiada wbudowany układ przedwzmacniaczy dopasowujących.

**Układ FPGA** odbiera dane pomiarowe z przetworników ADC obwodów wejściowych, a następnie poddaje je analizie. Przy wykryciu przelatującego pocisku procesor bloku FPGA dokonuje obliczeń i rejestracji parametrów fali *N*. Procedura analizy danych pomiarowych rozpoczyna się dopiero po przekroczeniu określonego progu czułości, ustawianego z komputera PC. Wyznaczone parametry fali *N* przesyłane są za pomocą radiomodemu do komputera PC celem wyznaczenia odległości chybienia pocisku.

**Radiomodemy** stanowią blok komunikacji, która odbywa się w paśmie 433 MHz. Blok komunikacji pozwala na przesyłanie danych pomiarowych do komputera PC z odbiornikiem radiowym na dystansie do 5 km. Dane przesyłane są z prędkością 4,8 kbit/s.

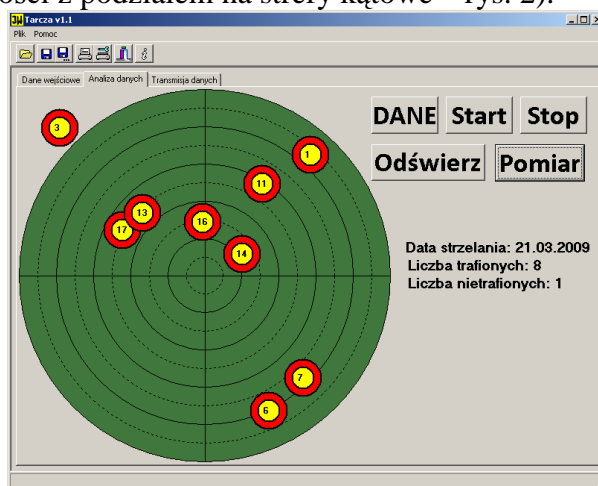
**Komputer PC z oprogramowaniem** jest wyposażony dodatkowo w radiomodem odbiorczy i stanowi aparaturę naziemną kierownika strzelań bojowych.

W czasie strzelań bojowych do ICP aparatura pokładowa tarczy powietrznej odpowiada za przekształcanie pierwotnych zjawisk ciśnieniowych na postać cyfrową, detekcję fali typu *N* oraz decymację danych pomiarowych. Dane pomiarowe z tarczy powietrznej do aparatury naziemnej przesyłane są radiomodemem. Komputer PC aparatury naziemnej na podstawie odebranych danych, przy użyciu programowej implementacji algorytmów, określa wyniki realizacji zadania bojowego. Komputer PC steruje także pracą całego systemu pomiarowego.

Uzasadnieniem takiego podziału funkcjonalno-technicznego systemu są bezsporne walory ekonomiczne, uwarunkowane względną prostotą aparatury pokładowej. Ekonomiczność zaproponowanego rozwiązania wynika również z natury fizycznej wykorzystywanych zjawisk, w których propagacja energii fali akustycznej w atmosferze zachodzi milion razy wolniej od prędkości rozchodzenia fal radiowych. W konsekwencji, koszt aparatury pokładowej „akustycznej” tarczy jest nieporównywalnie mniejszy od rozwiązań opartych na technice radiolokacyjnej.

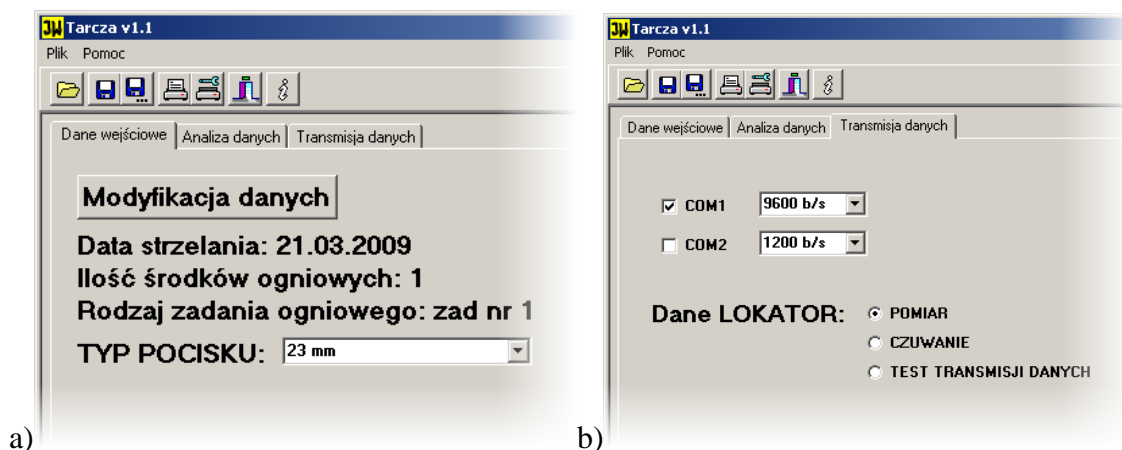
### 3.2. Oprogramowanie tarczy powietrznej

- Opracowane oprogramowanie stanowiska naziemnego pozwala na:
- ✓ wprowadzanie i edycję początkowych warunków strzelań (w tym: numeru seryjnego urządzenia, wersji oprogramowania, rodzaju zadania ogniowego, typu pocisku, daty strzelania oraz ilości środków ogniowych);
  - ✓ wydawanie komend definiujących tryb pracy aparatury pokładowej tarczy powietrznej (w tym: wydawanie komend *Pomiar* i *Czuwanie*);
  - ✓ analizę danych transmitowanych z tarczy (w tym: parametrów fali *N* i warunków atmosferycznych);
  - ✓ zobrazowanie na wyświetlaczu komputera PC znaczników trafień (okrągły wskaźnik ze znacznikami odległości z podziałem na strefy kątowe – rys. 2).



Rys. 2. Zobrazowanie na wyświetlaczu znaczników trafień pocisków artyleryjskich

Dane takie jak: data strzelania, ilość środków ogniowych, rodzaj zadania ogniowego i typ pocisku zostają wprowadzone przed strzelaniem artyleryjskim, po naciśnięciu przycisku *Modyfikacja danych* w zakładce *Dane wejściowe* (rys. 3a). W zakładce *Transmisja danych* opracowanego programu istnieje możliwość definiowania następujących parametrów transmisji oraz trybu pracy tarczy: numeru portu COM (COM1, COM2), prędkości transmisji danych, trybu pracy lokatora (POMIAR, CZUWANIE) oraz prowadzenia testów transmisji danych do tarczy (rys. 3b).



Rys. 3. Interfejs komunikacyjny oprogramowania:

- wprowadzanie danych wejściowych;
- definiowanie parametrów transmisji i komunikacji

## 4. Badania przyjętych rozwiązań sprzętowo-programowych

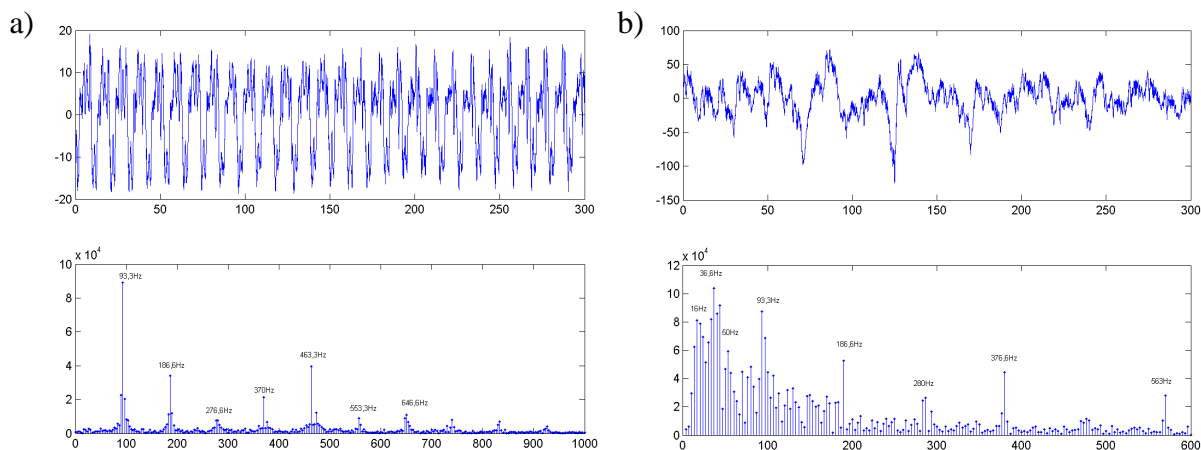
### 4.1. Badanie poziomu hałasu elementów mechanicznych ICP

Celem badań było określenie wartości poziomu emisji akustycznej wywołanych pracą elementów mechanicznych ICP oraz wyznaczenie stosunku S/N dla aparatury pomiarowej tarczy powietrznej. Wykonano serię pomiarów celem określenia wartości parametrów emisji akustycznej w wybranych miejscach modelu samolotu T-250. Czujniki pomiarowe rozmieszczono m.in. na i pod skrzydłem, za owiewką kadłuba, na stateczniku pionowym i poziomym. W czasie badań samolot z czujnikami umieszczony był na wyrzutni startowej. Sposób rozmieszczenia czujników pomiarowych obrazuje rys. 4.



Rys. 4. Rozmieszczenie czujników pomiarowych na samolocie

Charakterystyczne wyniki zarejestrowanych przebiegów czasowych (górne) i widmowych (dolne) przedstawiono rys. 5.

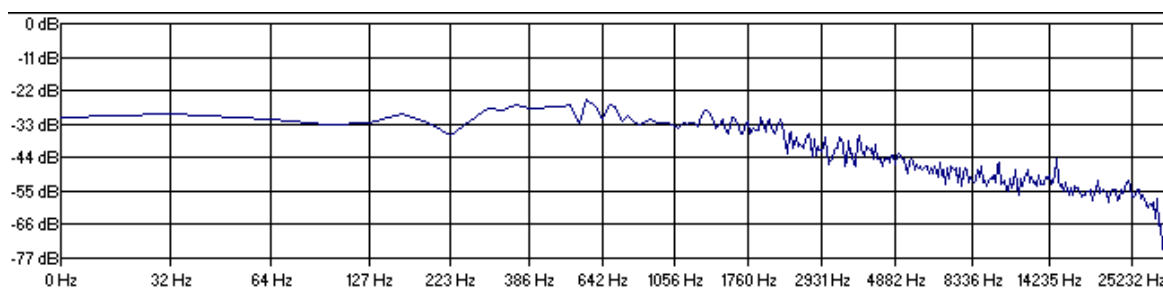


Rys. 5. Charakterystyczne wyniki zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej odgłosu: a) pracującego silnika, b) opływu strugi powietrza wokół kadłuba i skrzydeł

Z przedstawionych na rys. 5 przebiegów wynika, że zarówno dla zarejestrowanych odgłosów pracującego silnika (a), jak i opływu strugi powietrza wokół kadłuba i skrzydeł (b) samolotu, widma przebiegów czasowych wyraźnie posiadają częstotliwość podstawową 93.3 Hz i jej kolejne harmoniczne 186.6, 276.6, 370.0, 453.3, 553.3, 646.6 [Hz]. W przypadku (b) obecność „nowych” częstotliwości i ich zagęszczenie na spektrogramie są spowodowane losowym charakterem opływu powietrza wokół elementów konstrukcyjnych samolotu.

## 4.2. Badanie właściwości czujników pomiarowych i poziomu energii zakłóceń

Badano także wpływ opływu powietrza na pracę czujników pomiarowych umieszczonych czołem w trzech różnych kierunkach względem działania strugi. Przykładowy rozkład charakterystyki widmowej zarejestrowanych sygnałów przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przebieg widma emisji akustycznej opływu strugi powietrza wokół czujnika

Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że zasadnicza energia sygnałów tła akustycznego i zakłóceń pochodzących od silnika i obracającego się śmigła oraz szumów opływowych ma naturę dolnopasmową i zawiera się w paśmie kilkuset Hz, poza pasmem częstotliwości generowanych przez falę  $N$ .

## 4.3. Weryfikacja działania aparatury pokładowej tarczy i algorytmów programowych

Na Centralnym Poligonie Sił Powietrznych w Wicku Morskim przeprowadzono strzelania bojowe doświadczalne, których głównym celem była praktyczna weryfikacja działania rozwiązań sprzętowych i opracowanych algorytmów programowych. Przeprowadzone badania polegały na ocenie:

- poprawności działania aparatury rejestrującej i jakości rejestrowanych danych,
- dokładności mierzonych parametrów fali  $N$  i opóźnień czasowych,
- wartości współczynników korygujących przyczyny powstawania błędów systematycznych,
- odległości minięcia celu przez pocisk z uwzględnieniem współczynników korygujących.

Wyniki badań poligonowych potwierdziły trafność przyjętych rozwiązań techniczno-programowych aparatury pomiarowej oraz opracowanych algorytmów określania współrzędnych toru pocisku na podstawie pomiaru parametrów fali  $N$ .

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono opis techniczny i wybrane wyniki badań systemu określania odległości przelotu pocisku względem ruchomej tarczy powietrznej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zjawisko powstawania na skutek przelotu pocisku stożkowej fali uderzeniowej, może być efektywnie wykorzystane do opracowania akustycznego systemu oceny realizacji zadań bojowych pododdziałów przeciwlotniczych.

Opracowana aparatura pokładowa tarczy powietrznej wraz z algorytmami przetwarzania sygnałów umożliwia określanie współrzędnych toru pocisku. Dzięki zastosowaniu wstępnej obróbki sygnałów na pokładzie ICP, radykalnie ograniczono strumień danych transmitowanych do urządzenia naziemnego, co pozwoliło na stosowanie radiomodemów o stosunkowo niskiej przepustowości. Przewidziane w projekcie elementy konstrukcyjne

spełniają wymagania środowiskowe, przy jednoczesnym zachowaniu stosunkowo niskiego kosztu jej wykonania.

Założone parametry opracowanego urządzenia w zakresie konfiguracji czujników, rozwiązania układów przetwarzania sygnałów i transmisji danych oraz obróbki danych i wyświetlania wyników na stanowisku analizy mogą zapewnić określanie w czasie rzeczywistym odległości pocisków podczas prowadzenia strzelań poligonowych.

## Literatura

- [1] Kobierski J.W. (red.): *Centralny Poligon Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej Ustka*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2004.
- [2] Leśniczak J.: *Ocena działania zestawów przeciwlotniczych przy pomocy optycznych i optoelektronicznych systemów trajektograficznych*, materiały konferencyjne, V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „CRASS 2003”.
- [3] Boroń S.(kier.): *Przystosowanie ZRP-1 WAZA do obiektywnej kontroli strzelań doświadczalnych*, sprawozdanie z pracy badawczej, WSOWOPL, Koszalin 1996.
- [4] Pietrasieński J., Rodzik D., Żygadło S.: *Sformułowanie problemu akustycznej oceny realizacji artyleryjskich zadań bojowych*, w J.W. Kobierski (red): *Kierowanie ogniem systemów obrony powietrznej (przeciwlotniczej)*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2010, s. 197-206.
- [5] Pierce A.D.: *Acoustics. An Introduction to its Physical Principles and Applications*, American Institute of Physics, College Park Maryland, USA, 1991.
- [6] Sadler B. M., Pham T., Sadler L. C.: *Optimal and wavelet-based shock wave detection and estimation*, Journal Acoustic Society of America, Vol. 104, No. 2, Pt.1, August 1998, pp. 955-963.
- [7] Pietrasieński J., Rodzik D.: *Badanie rozchodzenia się zaburzeń ośrodka wywołanych ruchem pocisku*, Raport końcowy z pracy badawczej nr PBW – GR 577, WAT, Warszawa 2006.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 – 2011 jako projekt rozwojowy nr O R00 0001 09*