

PRZEGLĄD AKTUALNIE STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ W DZIEDZINIE RADIOLOKACJI DOPPLEROWSKIEJ

W artykule przedstawiono przegląd aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie radarowych pomiarów prędkości wylotowej pocisków. Omówiono różne techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów dopplerowskich, bazujące między innymi na transformacie FFT i Wignera. Przytoczono szereg przykładów radarów dopplerowskich, impulsowo-dopplerowskich oraz działających w oparciu o metodę FMCW.

1. Wstęp

Z punktu widzenia zastosowań dla potrzeb artylerii, dopplerowskie systemy radiolokacyjne z falą ciągłą generalnie można podzielić na radary artyleryjskie (zwane także balistycznymi) oraz radary śledzące.

Radary artyleryjskie są najczęściej urządzeniami z nieruchomą wiązką antenową. Z reguły dysponuje niewielką mocą i krótkim zasięgiem. Podstawowym przeznaczeniem radaru artyleryjskiego jest pomiar prędkości początkowej (wylotowej) pocisków. Bezpośrednią wielkością, niezbędną do określenia prędkości początkowej, jest chwilowa prędkość radialna wyznaczana na krótkim odcinku trajektorii.

Radary śledzące są złożonym systemem przeznaczonym do śledzenia trajektorii pocisku. Wobec konieczności obserwowania pocisku na torze lotu (co najmniej do osiągnięcia punktu przegięcia – wierzchołkowej), dysponuje on odpowiednio efektywnym zestawem antenowym (z mechanicznie lub elektronicznie przemieszczaną wiązką) oraz zwiększoną mocą. Przeznaczeniem radaru śledzącego jest ekstrapolacja punktu upadku pocisku lub wyznaczenie położenia środków ogniowych przeciwnika.

2. Systemy radarów artyleryjskich

Powszechnie używaną metodą pomiaru częstotliwości dopplerowskiej jest analiza widmowa za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT. Można również spotkać rozwiązania oparte na pętli PLL i metodzie zliczeniowej. Dostępna literatura oraz informacje zamieszczane przez producentów radarów na stronach www nie przytaczają przykładów innych metod.

Poniżej przedstawiono przegląd oferowanych w sprzedaży radarów artyleryjskich:

- ✓ MVR (Muzzle Velocity Radar) [15] produkowany przez firmę IN-SNEC (Francja). Do pomiaru częstotliwości dopplerowskiej radar wykorzystuje analizę widmową za pomocą FFT. Błąd pomiaru wynosi 0,1 % w zakresie od 50 do 2000 m/s. Montowany na korpusie działa.



- ✓ AFAMVR (Advanced Field Artillery Muzzle Velocity Radar) [16] produkowany przez firmę RSL Electronics (Izrael). Według danych podanych przez producenta, do pomiaru częstotliwości dopplerowskiej radar wykorzystuje techniki DSP. W uzbrojeniu armii amerykańskiej radar figuruje pod oznaczeniem M94. Błąd pomiaru wynosi 0,05 % w zakresie od 150 do 2000 m/s.

- ✓ EDH-2305 [17] produkowany przez firmę EDH. Do pomiaru częstotliwości sygnału dopplerowskiego radar wykorzystuje analizę widmową za pomocą FFT. Montowany na korpusie działa lub jako przenośna stacja balistyczna montowana na statywie. Fotografia przedstawia radar zamontowany na armacie okrętowej.



- ✓ MV201 [10] produkowany przez firmę AVITRONICS (Republika Południowej Afryki). Producent nie podaje żadnej informacji na temat metody pomiarowej. Radar montowany jest na korpusie działa. Błąd pomiaru nie przekracza 1 m/s w zakresie od 300 do 1400 m/s.

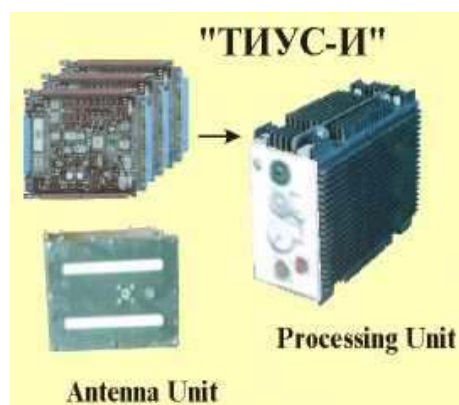
- ✓ MVRS (Muzzle Velocity Radar System) [13] produkowany przez firmę ASELSAN (Turcja). Jak podaje producent, pomiar prędkości przeprowadzany jest za pomocą zaawansowanych technik cyfrowego przetwarzania sygnałów.



- ✓ RUBIN 1M [2] produkowany przez Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia (Polska). Do pomiaru częstotliwości dopplerowskiej radar wykorzystuje analizę widmową za pomocą FFT. Błąd pomiaru prędkości nie przekracza 0,05% w zakresie od 30 do 3000 m/s. Używany jako samodzielna, przenośna stacja balistyczna.



- ✓ MVS-470 [14] produkowany przez firmę BAE SYSTEMS (Australia). Producent nie podaje żadnej informacji na temat metody pomiarowej.
- ✓ DR 5000 (Velocity Analyser) [20] produkowany przez firmę TERMA Elektronik AS (Dania). Do pomiaru częstotliwości dopplerowskiej radar wykorzystuje analizę widmową za pomocą FFT. Wykorzystywany jako samodzielna stacja balistyczna.
- ✓ MVSR-700 [24] produkowany przez firmę WEIBEL Scientific A/S. Do pomiaru częstotliwości dopplerowskiej radar wykorzystuje analizę widmową za pomocą FFT. Montowany na korpusie działa lub jako samodzielna, przenośna stacja balistyczna montowana na statywie.



- ✓ TIUS-I MVRS [11] produkowany przez Lviv Radio Engineering Research Institute (Ukraina). Metoda pomiaru częstotliwości dopplerowskiej polega na synchronizacji fazowej sygnału dopplerowskiego w pętli PLL, a następnie formowaniu sygnału VCO¹ w ciąg impulsów zliczanych w jednostce czasu (tzw. metoda zliczeniowa). Błąd pomiaru wynosi 0,05 % w zakresie od 100 do 1125 m/s.

- ✓ BS MVBS (Millimeter Wave Ballistic Station) [11] produkowany przez Lviv Radio Engineering Research Institute (Ukraina). Podobnie jak wyżej radar wykorzystuje metodę zliczania okresów sygnału dopplerowskiego w jednostce czasu oraz pętlę synchronizacji fazowej PLL. Błąd pomiaru wynosi 0,03 % w zakresie od 40 do 2400 m/s.

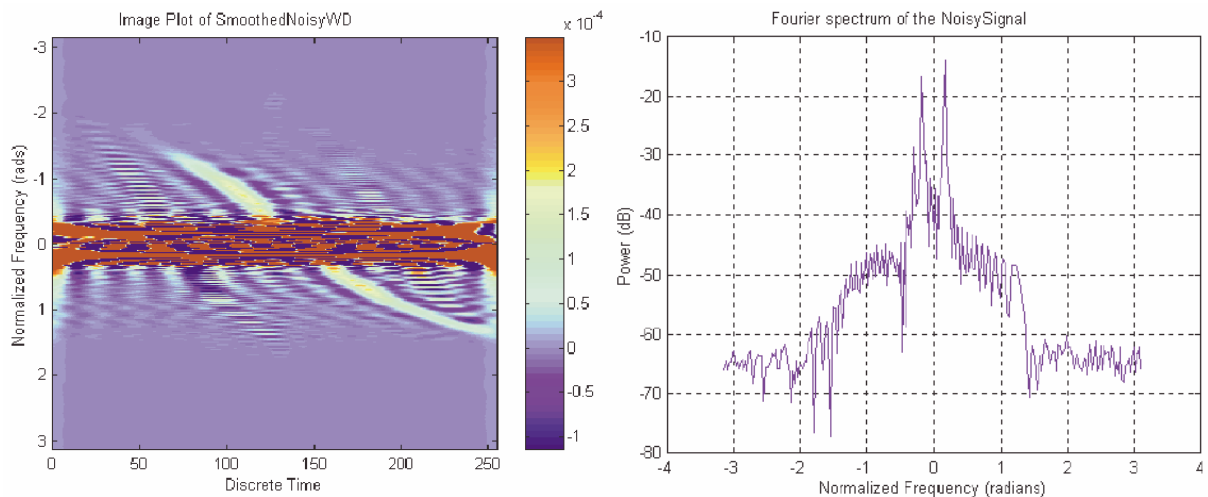


¹ Voltage Control Oscillator

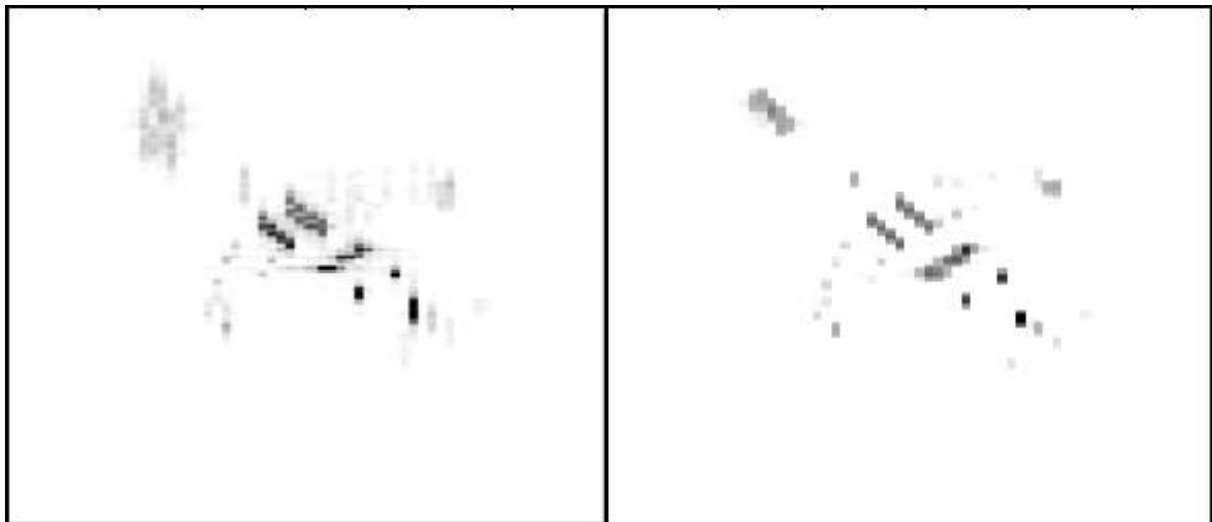
3. Wykorzystanie Transformaty Wignera

Inne zaawansowane techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP²) bazujące na transformacie Wignera (WD³), można spotkać w literaturze dotyczącej radarów impulsowych, impulsowo-dopplerowskich bądź radarów FMCW.

W radiolokacji często spotyka się trudny problem detekcji obiektów manewrujących (przyspieszających) lub obiektów na tle różnego rodzaju zakłóceń (np. spowodowanych odbiciem od powierzchni morza lub lądu). W takiej sytuacji widmo impulsu radiolokacyjnego uzyskane za pomocą transformaty FFT może być znacznie rozmyte i tym samym niewidoczne na tle widma zakłóceń [23], [25]. W celu zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia można zastosować transformatę Wignera, która pozwala na detekcję regularnych obszarów widmowych w rozkładzie czasowo-częstotliwościowym [21], [22]. Rys. 1 przedstawia rezultaty przetwarzania echa impulsu odbitego od nisko lecącego obiektu manewrującego.



Rysunek 1. Echo nisko lecącego manewrującego obiektu na tle zakłóceń biernych (z lewej transformata WD, z prawej transformata FFT) [22]



Rysunek 2. Radiolokacyjny obraz samolotu Boeing 727 (z lewej – transformata FFT, z prawej - transformata WD) [9]

² Digital Signal Processing

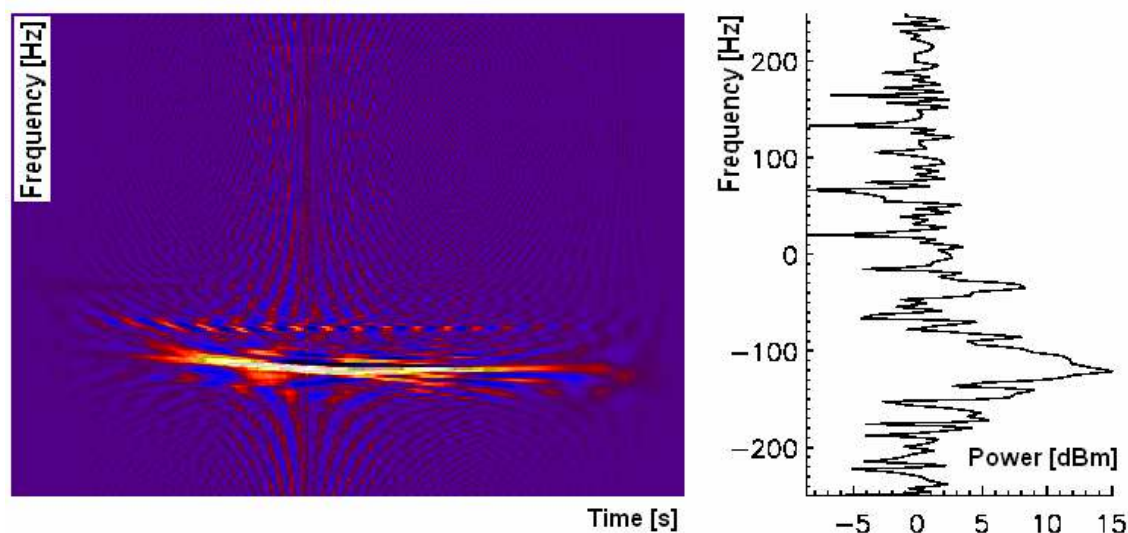
³ Wigner Distribution

Nowoczesne systemy radarowe umożliwiają rozpoznanie i klasyfikację wykrytych obiektów latających. Dwuwymiarowy obraz śledzonego celu (tzw. Range-Doppler Image) można zrekonstruować na podstawie widma dopplerowskiego sygnału echa. Ze względu na przyspieszenia i manewrowanie celu, często używana metoda FFT może generować obrazy rozmyte i trudne do zaklasyfikowania (rys. 2). Lepsze rezultaty można otrzymać stosując czasowo-częstotliwościowe przekształcenie Wignera [9], [3], [4].

Inne, równie interesujące zastosowanie transformaty Wignera można znaleźć w [6], [7]. Autorzy tych publikacji proponują wykorzystanie transformaty WD w rozpoznawaniu sygnałów radarowych (do analizy własności częstotliwościowych oraz parametrów modulacji echa impulsu radarowego).

Metody cyfrowego przetwarzania sygnałów są stosowane również w dziedzinie oceanografii. Przetwarzanie szeregów czasowych echa sygnału odbitego od powierzchni morza pozwala między innymi na ocenę stanu morza, badania mechanizmów rozpraszania fal, powstawania prądów morskich itp. Do tego celu wykorzystuje się różne techniki wyznaczania chwilowej częstotliwości, fazy oraz mocy sygnału dopplerowskiego. Przekształcenie Wignera jest jedną z metod stosowanych do estymacji tych wielkości [1].

Jednym z bardziej interesujących rozwiązań w tym obszarze jest eksperymentalny impulsowy radar morski IPIX opracowany i zaprojektowany na uniwersytecie McMaster [12]. Zastosowaniem radaru jest detekcja i klasyfikacja brył lodu poruszających się po powierzchni morza. Do oceny wektora prędkości analizowanych obiektów wykorzystywane jest przekształcenie Wignera (stosowane do analizy widmowej echa impulsu). Pokazany na rys. 3, obraz czasowo-częstotliwościowy uzyskany tą metodą jest następnie klasyfikowany przez sieć neuronową [8], [18], [19].



Rysunek 3. Echo słabo widocznej bryły lodu poruszającej się po powierzchni morza (z lewej transformata WD, z prawej transformata FFT) [12]

4. Podsumowanie

Literatura dotycząca radarów dopplerowskich, metod przetwarzania echa oraz aplikacji jest bardzo bogata. Ogromna większość prac dotyczy teoretycznej analizy zjawiska Dopplera i metod przetwarzania sygnału echa. Można też spotkać liczne prace dotyczące zastosowania radiolokacji dopplerowskiej w rozmaitych dziedzinach nauki, techniki, medycyny i gospodarki. W odniesieniu do artyleryjskich radarów dopplerowskich liczba publikacji jest jednak znikoma. Ze względu na wojskowe zastosowanie takich urządzeń w dostępnych materiałach podaje się zwykle jedynie ogólną charakterystykę techniczną, nie ujawnia się zaś najbardziej istotnych, szczegółów dotyczących metod przetwarzania sygnału echa, konkretnych algorytmów oraz konstrukcji bloków DSP.

Radary z falą ciągłą projektowane są również jako radary obserwacji pola walki, płyty lotniska bądź jako radary meteorologiczne. Są to tzw. radary FMCW⁴ (z modulowaną falą nośną). Ze względu na konieczność obserwacji równocześnie wielu obiektów w przestrzeni, do analizy widmowej sygnału radiolokacyjnego stosuje się przekształcenia liniowe (np. FFT). Dostępna literatura nie podaje przykładów stosowania innych metod.

Obecnie na uzbrojeniu Wojska Polskiego znajduje się stacja balistyczna RUBIN skonstruowana na początku lat osiemdziesiątych [5]. Jest to przestarzała konstrukcja oparta o zliczeniową metodę pomiaru częstotliwości. W roku 1999 w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia opracowano nową stację balistyczną RUBIN 1M. Powstała nowoczesna stacja balistyczna o uniwersalnej, modularnej konstrukcji wykorzystująca cyfrowe techniki przetwarzania sygnałów i umożliwiającą wymianę lub modyfikację oprogramowania. W podstawowej wersji stacji wykorzystano konwencjonalną, fourierowską analizę sygnału echa.

Literatura:

- [1] Allan N., Trizna D.B., McLaughlin D.J.: „Numerical comparizon of Techniques for estimating Doppler velocity time series from coherent sea surface scattering measurements”, *IEE Proceedings – Radar, Sonar, Navigation*, vol. 145, no. 6, 367-373, December 1998.
- [2] Bodjański M.: „Wyniki badań poligonowych radaru RUBIN 1M”, *X Konferencja Naukowo-Techniczna ‘Uzbrojenie 2001’ Rynia 2001*, Biuletyn WITU Nr 4/2001, 169-177, Zielonka 2001.
- [3] Chen V.C., Miceli W.J.: „Time-varying spectral analysis for radar imaging of manoeuvring targets”, *IEE Proceedings – Radar, Sonar, Navigation*, vol. 145, no. 5, 262-268, October 1998.
- [4] Chen V.C., Qian S.: „Joint Time-Frequency Transform for Radar Range-Doppler Imaging“, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, 486-499, April 1998.
- [5] Czekala Z.: *Parada radarów*, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
- [6] Fornalik J., Pieniężny A., Rapacki T.: „Zastosowanie transformaty Wignera-Ville’a w rozpoznawaniu sygnałów radarowych”, *XII konferencja naukowa, Sterowanie w Radiolokacji i Obiektach Latających*, tom III, 83-92, Jelenia Góra 2001.

⁴ Frequency Modulation Continuous Wave

- [7] Fornalik J., Pieniężny A.: „Analiza częstotliwościowo-czasowa w rozpoznawaniu sygnałów radarowych”, *XI konferencja naukowa, Sterowanie w Radiolokacji i Obiektach Latających*, tom III, 125-134, Jelenia Góra 2000.
- [8] Griszin J., Konopko K.: „Wykrywanie sygnałów radiolokacyjnych na tle zakłóceń niegaussowskich w oparciu o sztuczne sieci neuronowe typu RBF”, *XII konferencja naukowa, Sterowanie w Radiolokacji i Obiektach Latających*, tom I, 161-169, Jelenia Góra 2001.
- [9] <http://airborne.nrl.navy.mil/~vchen/tftsa.html>
- [10] <http://homepages.acenet.co.za/sadid/Pages/P145.htm>
- [11] <http://lreri.tripod.com/products.html>
- [12] http://soma.crl.mcmaster.ca/ASLWeb/Resources/data/ICASSP_2002.pdf
- [13] http://www.aselsan.com.tr/msting/ihr_eng.htm
- [14] <http://www.baesystems.com/ocs/australia/guns1.htm>
- [15] <http://www.in-snec.com>
- [16] <http://www.rsl.co.il/MVR.html>
- [17] <http://www.sabreballistics.com/moenews.htm>
- [18] Kacprzak T., Ślot K.: *Sieci Neuronowe Komórkowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.
- [19] Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
- [20] TERMA Elektronik AS.: *DR 5000 Velocity Analyser – technical description*, Denmark 1992.
- [21] Thayaparan T., Yasotharan A.: „Application of Wigner distribution for the detection of low-altitude aircraft using HF surface-wave radar”, Defence Research Establishment Ottawa, 2001.
- [22] Thayaparan T., Yasotharan A.: „Detection of low-altitude aircraft using time-frequency analysis for high frequency surface radar”, *International Radar Symposium India*, December 2001.
- [23] Thayaparan T., Yasotharan A.: „Limitations and strengths of the Fourier transform method to detect accelerating targets”, Defence Research Establishment Ottawa, *DREO TM 2000-078*, 2000.
- [24] Weibel.: *Muzzle Velocity Radar System MVRS-700 – specification*, Denmark 1998.
- [25] Yasotharan A., Thayaparan T.: „Strengths and limitations of the Fourier method for detecting accelerating targets by pulse Doppler Radar”, *IEE Proceedings – Radar, Sonar, Navigation*, vol. 149, no. 2, 83-88, April 2002.