

## Obrazowanie SAR w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem miniaturowego radaru pasma 94 GHz

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki pracy badawczo-rozwojowej prowadzonej przez Zespół Techniki Radiolokacyjnych Instytutu Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej w ramach projektu SARape (Radar z Syntetyczną Aperturą pracujący na platformach bezałogowych we wszystkich warunkach pogodowych, ang. Synthetic Aperture Radar for all weather PENetrating UAV application) finansowanego przez Europejską Agencję Obrony. Pracę tę można zaklasyfikować do dynamicznie rozwijanej na świecie dziedziny zwanej teledetekcją (ang. remote sensing), której jednym z elementów jest radiolokacja wykorzystująca technikę syntetycznej apertury (ang. Synthetic Aperture Radar – SAR). Technika ta umożliwia tworzenie obrazowań terenu o wysokiej rozdzielczości za pomocą radaru pokładowego w praktycznie dowolnych warunkach pogodowych, ograniczonych jedynie poprzez zdolności lotne platformy. Celem projektu SARape było opracowanie nowatorskiego systemu radarowego pasma milimetrowego (94GHz) przeznaczonego do instalacji na pokładzie niedużej platformy bezałogowej (UAV – ang. Unmanned Aerial Vehicle). Opracowany system radarowy umożliwia tworzenie obrazowania terenu o bardzo wysokiej rozdzielczości (do 15 cm) w czasie rzeczywistym. Zrealizowany system SAR został przetestowany w warunkach rzeczywistych. Jako nośnik radaru wykorzystano przy tym mały ultralekki samolot (ang. ultralight). Otrzymane wyniki potwierdziły możliwość uzyskania wysokiej rozdzielczości obrazowań SAR w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem metod przetwarzania sygnałów opracowanych przez zespół z Politechniki Warszawskiej

**Abstract.** In the paper results of a project realized by Radar Techniques Research Group from the Institute of Electronic Systems, Warsaw University of Technology are presented. The project, called SARape (Synthetic Aperture RAdar for all weather PENetrating UAV application), was sponsored by the European Defence Agency. The topic of this project concerned remote sensing using synthetic aperture radar technique. This technique allows for creation of high resolution images using onboard radar, almost independently of the weather conditions. The main limitation is the minimum weather conditions of the radar platform. The aim of the project was to develop a mm-wave radar (operating at 94 GHz) which could be mounted on a UAV (Unmanned Aerial Vehicle). The developed system enables to create real-time imagery with resolution up to 15 cm. The radar has been tested in real flight conditions using ultralight aircraft. The obtained results confirmed the real-time capabilities of high-resolution imagery. (Real-time SAR imaging using miniaturized 94 GHz radar)

**Słowa kluczowe:** elektronika, teledetekcja, radar z syntetyczną aperturą (SAR)

**Keywords:** electronics, remote sensing, synthetic aperture radar (SAR).

### Wstęp

Radar z syntetyczną aperturą (ang. SAR – Synthetic Aperture Radar) jest wykorzystywany do tworzenia obrazowań powierzchni Ziemi z ruchomej platformy, np. samolotu. W otrzymanym obrazowaniu wyróżnia się rozdzielczość w dwóch kierunkach: kierunku ruchu platformy i kierunku w którym „patrzy radar”.

Teoretyczna możliwa do uzyskania dzięki technice SAR rozdzielczość w kierunku ruchu platformy jest równa połowie długości anteny (długości określonej w kierunku ruchu platformy). Przykładowo, chcąc uzyskać rozdzielczość 15 cm konieczne jest zastosowanie anteny o długości 30 cm. Aby antena o takim wymiarze zapewniała odpowiednią kierunkowość, należy zastosować fale dostatecznie krótkie. Między innymi to wymaganie skłoniło wykonawców projektu do wyboru pasma W – częstotliwość pracy radaru wynosiła 94 GHz.

Rozdzielczość w kierunku w którym „patrzy” radar jest z kolei uwarunkowana jest pasmem emitowanego sygnału [4]. Przykładowo dla pasma 10 MHz można uzyskać teoretyczną rozdzielczość wynoszącą 15 m. Aby uzyskać rozdzielczość 15 cm konieczne jest zastosowanie sygnału sondującego o paśmie 1 GHz. Takie pasmo sygnału bardzo trudno jest uzyskać w zakresie fal decymetrowych (ze względu na dużą wartość pasma względnego). Jest to łatwiejsze w zakresie fal centymetrowych lub milimetrowych. Fakt ten również skłonił wykonawców projektu do zastosowania pasma wysokich częstotliwości. W paśmie W szerokość bezwzględna pasma wynosząca 1 GHz odpowiada ok. 1% pasma względnego i cały system można traktować jako wąskopasmowy.

### Koncepcja systemu radarowego

Radar SAR zrealizowany w ramach projektu jest klasycznym radarem FMCW (Frequency Modulated

Continuous Wave) – z liniowo zmodulowaną częstotliwościowo falą ciągłą. Sygnał na częstotliwości pośredniej jest generowany przez układ DDS (Direct Digital Synthesizer). Sygnał ten jest następnie powielany i przesuwany w częstotliwości do pasma W. Układ DDS wykorzystuje sygnał wysokostabilnego zegara kwarcowego, co gwarantuje niskie szumy fazowe i amplitudowe. Sygnał po przeniesieniu do pasma W jest wzmacniany i emitowany przez antenę nadawczą. Część sygnału nadawanego jest odsprężana i mieszana z sygnałem odebrany przez antenę odbiorczą. W ten sposób powstaje tzw. sygnał zdudnień – sygnał o częstotliwości różnicowej proporcjonalnej do odległości do obiektu. W urządzeniu zastosowano dwa równoważne tory odbiorcze. Dwa kanały mogą być wykorzystane do pracy interferometrycznej, polarymetrycznej lub w trybie wykrywania obiektów ruchomych (GMTI – Ground Moving Target Indication), w zależności od konfiguracji anten. Sygnał po mieszanu jest wzmacniany, filtrowany i przetwarzany na postać cyfrową. Sygnał cyfrowy, po wstępnej kompresji, jest przesyłany do naziemnej stacji przetwarzającej, gdzie w czasie rzeczywistym tworzone jest obrazowanie. Stanowisko naziemne, poza przetwarzaniem odebranych danych w czasie rzeczywistym, realizuje wyświetlanie końcowego obrazowania terenu na konsoli operatorskiej.

### Przetwarzanie sygnałów

W celu weryfikacji opracowanych algorytmów SAR w trakcie realizacji projektu przeprowadzono szereg symulacji mających na celu określenie podstawowych parametrów odbieranego sygnału oraz wrażliwości obrazowania na różne błędy. Określono przy tym między innymi szerokość pasma sygnału azymutalnego, wrażliwość obrazowania radarowego na liczbę bitów służącą do zapisu jednej próbki oraz wrażliwość obrazowania radarowego na zgubione w transmisji dane.

W dalszej fazie projektu przeprowadzono zaawansowane symulacje mające na celu wygenerowanie sygnału zbliżonego do rzeczywistego służącego do weryfikacji opracowywanych algorytmów. W celu uzyskania realistycznych wyników wykorzystano rzeczywistą trajektorię platformy lotniczej zarejestrowaną we wcześniejszych próbach przez jednego z członków konsorcjum. Do symulacji surowego sygnału wykorzystano cyfrową mapę terenu uzyskaną z wykorzystaniem LIDARu (ang. Light Detection and Ranging).

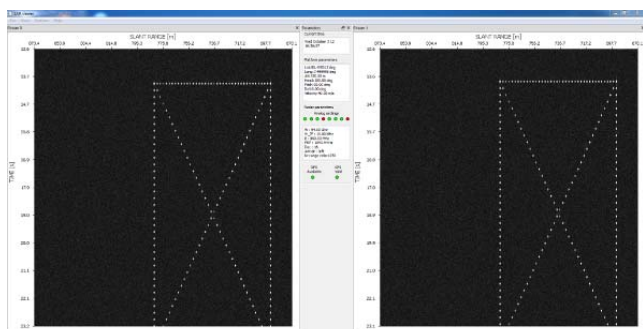
Ze względu na wysoką częstotliwość nośną radaru (94 GHz), a tym samym krótką falę (3 mm), wymagana była bardzo precyzyjna kompensacja ruchu platformy na poziomie sub-milimetrowym, z czasem odświeżania informacji rzędu milisekundy. W tym celu opracowano dwie grupy algorytmów korekcyjnych. W pierwszej grupie wykorzystuje się dane pochodzące z przyrządów nawigacyjnych samolotu. W drugiej grupie algorytmów do korekcji wykorzystywany jest sam odebrany sygnał radarowy. Po procesie korekcji sygnału, dokonywane jest ogniskowanie sygnału, czyli tworzenie syntetycznej apertury. Ogniskowanie jest realizowane przez filtrację dopasowaną wykonywaną dla kolejnych bloków danych. W rezultacie otrzymuje się zobrazowanie radarowe o wysokiej rozdzielczości.

Opracowane algorytmy zostały w celach testowych zaimplementowane w środowisku obliczeniowym Matlab. Ich pomyślna weryfikacja została przeprowadzona z wykorzystaniem przygotowanych wcześniej danych symulowanych.

Docelowo przetwarzanie zostało zrealizowane w trybie czasu rzeczywistego. Wiązało się to z bardzo wysokim zapotrzebowaniem na szybkość bezprzewodowej transmisji danych i na moc obliczeniową. W trakcie realizacji projektu przystosowano opracowane algorytmy do możliwości ich implementacji zrównoleglonej na platformach wielordzeniowych – kartach graficznych, wyposażonych w setki rdzeni obliczeniowych. Przetwarzanie i wizualizacja realizowana została jako połączenie dwóch aplikacji: przetwarzającej i wizualizującej.

Aplikacja przetwarzająca realizuje odbieranie danych wejściowych przesyłanych z modułu naziemnego łącza telekomunikacyjnego. Dane są zapisywane na dysk i jednocześnie przetwarzane w czasie rzeczywistym [6]. Główna część przetwarzania jest wykonywana na karcie graficznej. Dane po przetworzeniu są przesyłane do aplikacji wizualizującej.

Okno główne aplikacji wizualizującej przedstawiono na rys. 1. W oknie wyświetlane są dwa obrazy radarowe, odpowiadające dwóm kanałom odbiorczym systemu. W środkowej części okna wyświetlane są aktualne parametry platformy oraz ustawienia radaru.



Rys.1 Okno główne aplikacji wyświetlającej zobrazowanie radarowe

W drugim oknie aplikacji wizualizującej wyświetlana jest dodatkowo mapa z zaznaczoną aktualną pozycją platformy oraz pasem skanowania co w znacznej mierze ułatwia sterowanie platformą bezzałogową.

### Badania eksperymentalne systemu SAR

Testy kompletnego systemu odbyły się we wrześniu i październiku 2012 roku w Niemczech na lotnisku lokalnego aeroklubu w okolicach Bonn. Jako platformę ruchomą do zamontowania radaru wykorzystano ultralekki samolot załogowy (rys. 2). Część mikrofalową radaru, układ wstępnej przetwarzania oraz platformę inercyjną IMU (ang. Inertial Measurement Unit) umieszczono w zasobniku zainstalowanym pod skrzydłem samolotu [5]. W zasobniku umieszczono również aparat fotograficzny w celu rejestracji obrazów i filmów w paśmie widzialnym w celach porównawczych. Dane radarowe były przesyłane do modułu nadawczego łącza telekomunikacyjnego umieszczonego w kokpicie samolotu. Oprócz przesyłania danych do stacji naziemnej, możliwe było również rejestrowanie danych na pokładzie samolotu.



Rys.2. Ultralekki samolot wykorzystywany podczas eksperymentów oraz zasobnik zawierający pod skrzydłem zainstalowany radar SAR

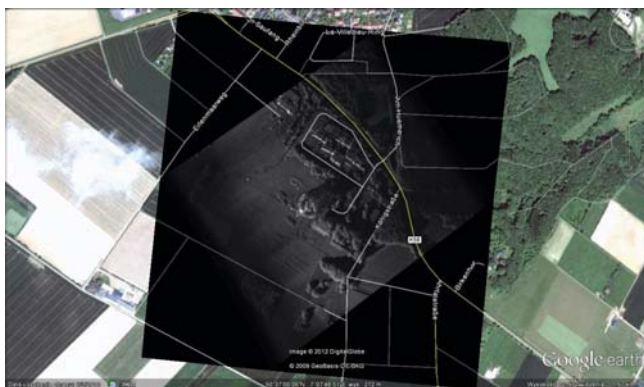
W skład naziemnego stanowiska przetwarzania danych wchodził moduł odbiorczy łącza telekomunikacyjnego oraz laptop do przetwarzania i wizualizacji danych. Przeprowadzone próby wykazały, że moduł odbiorczy wyposażony w antenę kierunkową był w stanie odbierać duży strumień danych (80 Mbit/s) przy odległości do 4.5 km od nadajnika. Warto nadmienić, iż jest to rezultat lepszy niż zakładano w projekcie. Odbierane przez stację naziemną dane były przetwarzane w czasie rzeczywistym i otrzymywano zobrazowanie o bardzo wysokiej jakości. Przykładowy widok okna głównej aplikacji wizualizującej przedstawiono na rys. 3. Na rysunku widoczne jest zobrazowanie radarowe SAR z dwóch kanałów odbiorczych systemu. Na zobrazowaniach można dostrzec odbicia od słupów wysokiego napięcia oraz cienie radiolokacyjne słupów oraz linii wysokiego napięcia. Wyniki te dowodzą bardzo wysokiej jakości uzyskanych zobrazowań pod względem rozdzielczości i szczegółowości. Wskazują one również olbrzymi potencjał techniki SAR w zastosowaniach związanych z rozpoznaniem – identyfikacją nieznanymi

obiektów. Do realizacji tego celu konieczne jest jednak stworzenie szerokiej bazy obrazów celów i zaimplementowanie algorytmów identyfikacyjnych, co wykraczało poza zakres projektu SARape.



Rys.3 Przykładowe rzeczywiste zobrazowanie radarowe uzyskane podczas lotów (dwukanałowe)

Inne przykładowe zobrazowanie uzyskane w ramach realizacji projektu przedstawiono na rys. 4. Na rysunku tym widać zobrazowanie radarowe nałożone na zobrazowanie optyczne otrzymane z Google Earth. W ramach badania systemu potwierdzono eksperymentalnie, z wykorzystaniem różków odbijających, uzyskanie rozdzielczości 15x15 cm.



Rys.4 Obraz SAR okolic instytutu FHR nałożony na obraz optyczny Google Earth

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono rezultaty uzyskane przez konsorcjum pracujące nad projektem wysokorozdzielczego radaru SAR o kryptonimie SARape, realizowanym pod egidą Europejskiej Agencji Obrony. W trakcie realizacji projektu Politechnika Warszawska opracowała zaawansowane algorytmy SAR pozwalające na uzyskanie zobrazowań radarowych o rozdzielczości rzędu 15cm x 15cm przy dużych niestabilnościach lotu.

Do kompensacji ruchu platformy z dokładnościami sub-milimetrowymi wykorzystano zarówno dane z platformy inercyjnej [8] jak i nowatorskie algorytmy auto-ogniskowania [10, 11, 12] dostosowane do pracy w czasie rzeczywistym przy umiarkowanych nakładach obliczeniowych. Dzięki temu Politechnika Warszawska, jako pierwsza w Polsce instytucja badawcza, uzyskała zobrazowania radarowe o tak wysokiej rozdzielczości tworzone w czasie rzeczywistym.

Wyniki pracy i doświadczenia zdobyte przez zespół z Politechniki Warszawskiej będą wykorzystane do stworzenia rodziny krajowych radarów SAR przeznaczonych dla samolotów załogowych i bezzałogowych [7, 8, 9] pracujących w różnych pasmach (od L do W). Będzie to twórczą kontynuacją prac nad krajową techniką SAR, rozpoczętą we współpracy z Przemysłowym Instytutem Telekomunikacji (PIT) w

programie BRYZA w roku 2002, ukoronowana stworzeniem pierwszego w Polsce radaru SAR pracującego w czasie rzeczywistym ze średnią rozdzielczością 15x15 m.

**Podziękowania:** This work was supported by the SARAPE project A- 1089-RT-GC that is coordinated by the European Defence Agency (EDA) and funded by 11 contributing Members (Cyprus, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Norway, Poland, Slovakia, Slovenia and Spain) in the framework of the Joint Investment Programme on Innovative Concepts and Emerging Technologies (JIP-ICET).

## LITERATURA

- [1] Franceschetti G., Lanari R., Synthetic Aperture Radar Processing, 1999 CRC Press LLC
- [2] Curlander J. C., McDonough R. N., Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc., 1991
- [3] Cumming I. G., Wong F. H.: Digital processing of synthetic aperture radar data, Artech House, 2005
- [4] Kawalec A., Komorniczak W., Pietrasinski J., Czarniecki W.: Evaluation of a low-cost microUAV platform for sensor suite, Proceedings of International Radar Symposium (IRS), pp.1,4, 24-26 May 2006, Kraków, Poland.
- [5] Caris M., Stanko S., Essen H., Leuther A., Tessmann A., Weber R., Malanowski M., Samczynski P., Kulpa K., Mieszoly G., Topping C., E. Georgiou G., Papanastasiou A. C., Guruly R., Bilacz Z.: Synthetic aperture radar for all weather penetrating UAV application (SARAPE) - project presentation, Proceedings of 9th European Conference of Synthetic Aperture Radar (EUSAR), pp. 290-293, 23-26 April 2012, Nurnberg, Germany.
- [6] Malanowski M., Krawczyk G., Samczyński P., Kulpa K., Borowiec K., Gromek D., Real-time high-resolution SAR processor using CUDA technology, Proceedings of 14th International Radar Symposium (IRS), vol. 2, pp. 673-678, 19-21 June 2013, Dresden, Germany.
- [7] Samczynski P., Kulpa K., Malanowski M., Wielgo M., Baranowski P., Ndini K., Roszkowski P., Dzwonkowski P., SARENKA – C-band SAR radar for UAV application, Proceedings of EUSAR 2014 – 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 03-05 June 2014, Berlin, Germany
- [8] Samczynski P., Malanowski M., Gromek D., Gromek A., Kulpa K., Krzonkalla J., Mordzonek M., Nowakowski M., Effective SAR image creation using low cost INS/GPS, Proceedings of 15th International Radar Symposium (IRS), 16-18 June 2014, Gdańsk, Poland.
- [9] Wielgo M., Samczynski P., Malanowski M., Kulpa Ndini K., K., Baranowski P., The SARENKA SAR System – Experimental results of ISAR imaging in Proceedings of 15th International Radar Symposium (IRS), 16-18 June 2014, Gdańsk, Poland.
- [10] Samczynski P., Kulpa K.: Coherent MapDrift Technique, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, Issue 3, 2010
- [11] Samczynski P.: Super-Convergent Velocity Estimator for an Autofocus Coherent MapDrift Technique, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 9, Issue 2, March 2012, pp. 204-208
- [12] Purchla M., Malanowski M.: Simple motion compensation algorithm for unfocused synthetic aperture radar, Proceedings of the SPIE, R. S. Romaniuk, Ed., vol. 5484. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2004, pp. 659–654.
- [13] M. Malanowski, P. Samczyński, K. Kulpa, G. Krawczyk, D. Gromek, A. Gorzelańczyk, „Obrazowanie SAR w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem miniaturowego radaru pasma 94 GHz”, Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej”, 2014, pp. 1-6.

**Autorzy:** dr hab. inż. Mateusz Malanowski, Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: [m.malanowski@elka.pw.edu.pl](mailto:m.malanowski@elka.pw.edu.pl); dr hab. inż. Piotr Samczyński, prof. dr hab. inż. Krzysztof Kulpa, mgr inż. Grzegorz Krawczyk, mgr inż. Krzysztof Borowiec, mgr inż. Damian Gromek, mgr inż. Adam Gorzelańczyk