

Eksperymentalna weryfikacja algorytmu RDA w systemie SAR pracującym z falą ciągłą

Streszczenie. Przedstawiony niżej tekst zawiera opis algorytmu syntezy zobrazowania SAR w dziedzinie odległości i częstotliwości dopplerowskiej (ang. Range Doppler Algorithm - RDA), dostosowanego do specyfiki sensora wykorzystującego zmodulowaną częstotliwościowo falę ciągłą FMCW (ang. Frequency Modulated Continuous Wave) oraz opis wyników jego badań. Sensor został opracowany i wykonany na potrzeby systemu radarowego zobrazowania powierzchni terenu zainstalowanego na pokładzie miniaturowego bezałogowego statku powietrznego (miniBSP).

Abstract. The article presents a description of the Range-Doppler Algorithm tailored to the specific character of the FMCW sensor as well as a description of the results of the experimental tests. The tested sensor has been developed for a radar terrain imaging system operating from miniature unmanned aerial vehicle. (**Experimental verification of the Range-Doppler Algorithm in a continuous wave SAR system**).

Słowa kluczowe: FMCW SAR, algorytm RDA, BSL.

Keywords: FMCW SAR, Range-Doppler Algorithm, UAV.

Wstęp

Zobrazowanie terenu za pomocą radaru z syntetyczną aperturą (ang. Synthetic Aperture Radar - SAR) [1-4] polega na odzwierciedleniu rozkładu siły sygnałów echa odbitych od obiektów znajdujących się w obserwowanej przestrzeni. Radar z rzeczywistą anteną, ze względu na znaczną szerokość listka głównego charakterystyki kierunkowej systemu antenowego, nie pozwala na uzyskanie satysfakcjonującej rozdzielności w kierunku prostopadłym do odległości. W systemach SAR znaczną poprawę rozdzielności uzyskuje się poprzez dwuwymiarową filtrację dopasowaną surowych (nieprzetworzonych) sygnałów echa przy zastosowaniu odpowiedzi impulsowej wynikającej z parametrów sensora oraz geometrii systemu.

Ze względu na znaczną czasochłonność obliczeń oraz duże ilości sygnałów gromadzonych w szybkim tempie, w systemach czasu zbliżonego do rzeczywistego stosuje się algorytmy filtracji zoptymalizowane pod względem ilości operacji obliczeniowych, często kosztem nieznacznego pogorszenia jakości zobrazowania.

Jednym z najpopularniejszych algorytmów syntezy zobrazowania SAR jest algorytm RDA, w którym filtracja dopasowana w dziedzinie azymutu realizowana jest jako szybki splot sygnału i funkcji referencyjnej.

W dalszej części artykułu przedstawiono zasadę działania tego algorytmu, omówiono konieczne zmiany związane ze specyfiką radaru FMCW, a następnie zaprezentowano wyniki działania algorytmu przy wykorzystaniu sygnałów symulowanych, jak również pochodzących z badań eksperymentalnych.

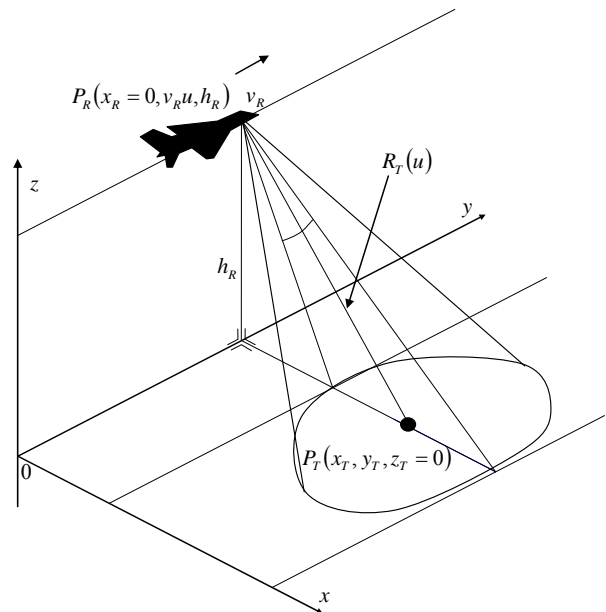
Algorytm RDA

W celu przybliżenia zasady działania wykorzystywanego algorytmu przyjęte zostaną następujące założenia. Sensor radarowy zainstalowany jest na platformie lotniczej poruszającej się ze stałą prędkością v_R , na stałej wysokości z_R , po linii prostej. Oś listka głównego charakterystyki antenowej radaru jest prostopadła do kierunku ruchu nośnika i skierowana w stronę powierzchni ziemi. Przyjmuje się układ odniesienia, w którym radar w chwili $\tau=0$ znajduje się w położeniu $(0, 0, z_R)$, a jego prędkość jest równoległa do osi OY . Sytuację tę przedstawia rysunek 1. Radar emituje sygnały sondujące o częstotliwości nośnej f_0 z okresem powtarzania T_p .

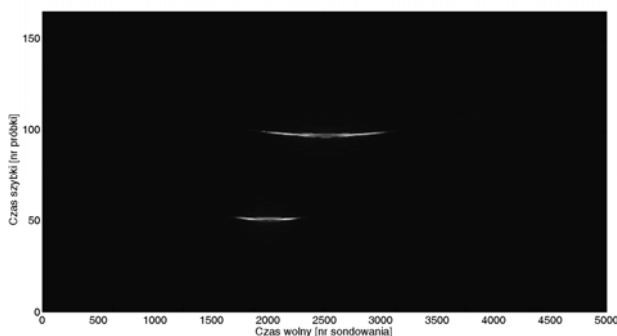
Sygnały echa odbite od obiektów znajdujących się w oświetlonej przestrzeni powracają do anteny odbiorczej radaru i są sprowadzane do pasma podstawowego jako sygnały o częstotliwości różnicowej pomiędzy sygnałem nadawanym a odebrany. Następnie poddawane są one kompresji odległościowej. W radarze z FMCW operacja ta polega na wyznaczeniu widma sygnału po konwersji do pasma podstawowego.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy symulowany sygnał surowy z radaru FMCW po kompresji odległościowej. Widoczne są dwie sygnatury symulowanych celów punktowych układające się w charakterystyczne hiperbole związane z kształtem funkcji zmiany odległości radar – cel w czasie wolnym, tzw. krzywej migracji odległościowej. Krzywa ta opisana jest następującą zależnością.

$$(1) R(u) = \sqrt{(x_R + x_C)^2 + [y_R(u) + y_C]^2 + (z_R + z_C)^2}.$$



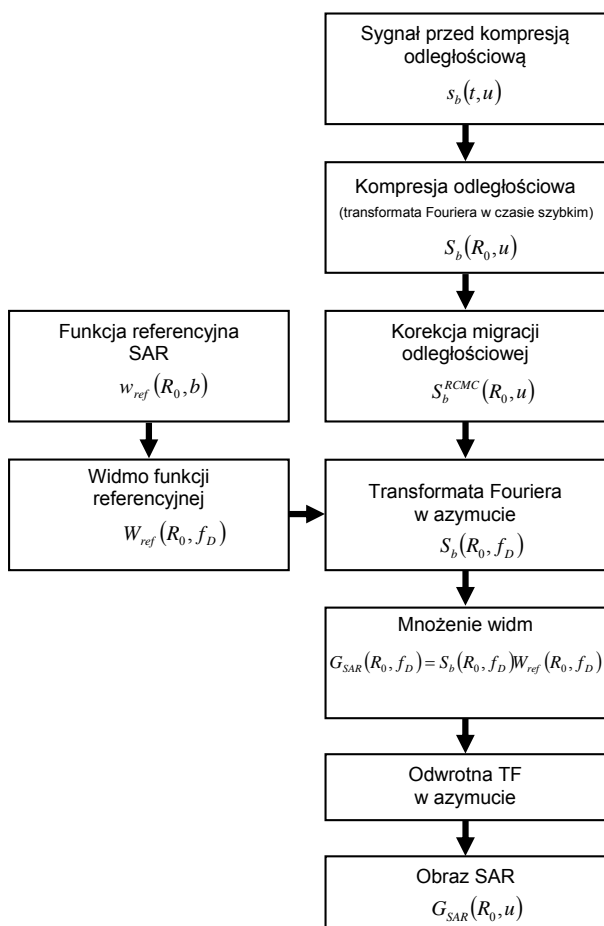
Rys.1. Geometria systemu SAR



Rys. 2. Przykładowy symulowany sygnał surowy po kompresji odległościowej

Na rysunku 3. przedstawiono schemat blokowy algorytmu RDA.

Pierwszym krokiem algorytmu jest przeniesienie sygnału do dziedziny częstotliwości w kierunku azymutalnym (Dopplera) i odległości (ang. range-doppler – R-D). W celu szybkiego wykonania w kroku tym wykorzystuje się szybkie przekształcenie Fouriera (FFT).

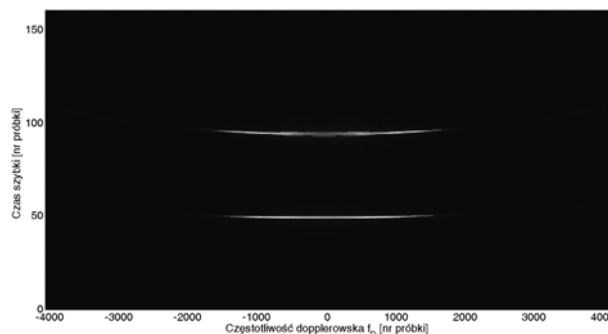


Rys. 3. Schemat algorytmu syntezy obrazowania SAR w dziedzinie odległość-częstotliwość dopplerowska (RDA)

Zatem wartość częstotliwości różnicowej w zależności od częstotliwości azymutalnej wynosi

$$(3) \quad f(R_0, f_D) = \frac{2\mu R_0}{c \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_D^2}{4v_R^2}}}$$

Aby poprawnie wykonać operację filtracji dopasowanej w dziedzinie częstotliwości należy doprowadzić do sytuacji, aby sygnały echa od pojedynczego nieruchomego celu układały się wzdłuż linii prostej. Operację taką nazywa się korekcją migracji odległościowej (RCMC) i wykonuje się ją dla każdej komórki odległościowej



Rys. 4. Azymutalne widmo sygnału surowego

Po tej operacji widma azymutalne wszystkich sygnałów skoncentrowane są wokół częstotliwości zerowej, dalej jednak odzwierciedlają kształt krzywej odległościowej. W dziedzinie R-D krzywa odbiega od hiperboli, można ją opisać

$$(2) \quad R(R_0, f_D) = \frac{R_0}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_D^2}{4v_R^2}}}$$

gdzie: R_0 - odległość do celu dla środka syntetycznej apertury (SA), λ - długość wykorzystywanej fali nośnej, f_D - bieżąca częstotliwość Dopplera. Na rysunku 4. przedstawiono widmo dopplerowskie symulowanych sygnałów z rysunku 2.

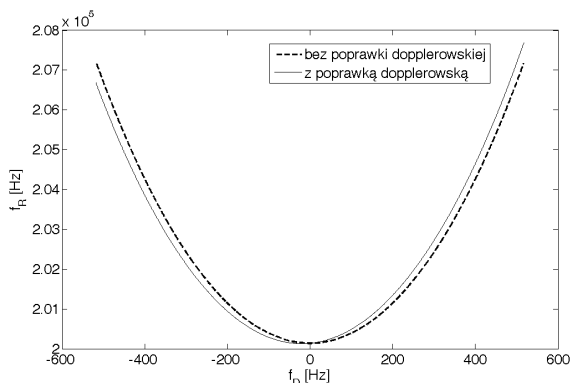
W literaturze [2,4] znajdują się opisy różnych metod korekcji migracji odległościowej. Najprostszą z nich jest przesunięcie sygnału w odległości o wartość wynikającą ze wzoru (2). Bardziej skomplikowane zakładają interpolację przesuwanego sygnału w celu zmniejszenia poziomu pojawiających się w obrazie SAR artefaktów, co jednak zwiększa złożoność obliczeniową całego algorytmu. Innym podejściem jest zastosowanie poprawki w dziedzinie czasu szybkiego przed kompresją odległościową, wymaga ono jednak założenia niezmienności funkcji RCMC z odległością, które nie może zostać przyjęte w systemach bliskiego zasięgu.

W opisywanych eksperymentach wybrano metodę przesunięcia sygnału bez interpolacji (ang. *nearest neighbour selection*), co powoduje skokowe zmiany poziomu sygnału wzdłuż syntetycznej apertury, jednak pozwala na osiągnięcie większych jej długości w stosunku do algorytmu bez korekcji migracji.

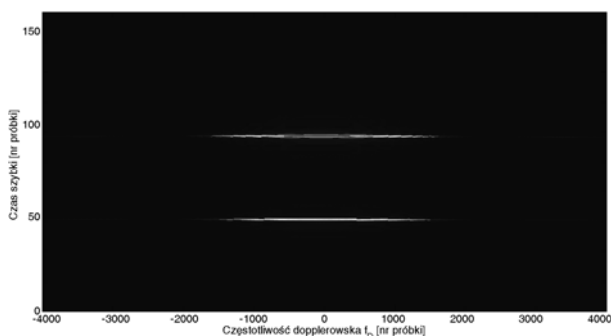
Należy jednak zauważyć, że postać funkcji RCMC dana wyrażeniem (2) została utworzona dla radaru impulsowego, w którym przesunięcie dopplerowskie sygnału echa nie wpływa znacząco na położenie obrazu celu na osi odległości. W radarach z FMCW odległości do celu wyznaczana jest na podstawie częstotliwości sygnału różnicowego po operacji konwersji do pasma podstawowego, zatem przesunięcie częstotliwościowe zaburza tę wartość, zmieniając tym samym postać funkcji korekcji migracji do postaci

$$(4) \quad f(R_0, f_D) = f_D + \frac{2\mu R_0}{c \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_D^2}{4v_R^2}}}$$

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi funkcji migracji w dziedzinie częstotliwości różnicowej bez uwzględnienia przesunięcia dopplerowskiego oraz przy jego uwzględnieniu, natomiast na rysunku 6 zamieszczono widmo sygnału po korekcji migracji odległościowej.



Rys. 5. Przebiegi funkcji migracji odległościowej bez poprawki dopplerowskiej i przy jej uwzględnieniu



Rys. 6. Widmo sygnału surowego po korekcji migracji odległościowej

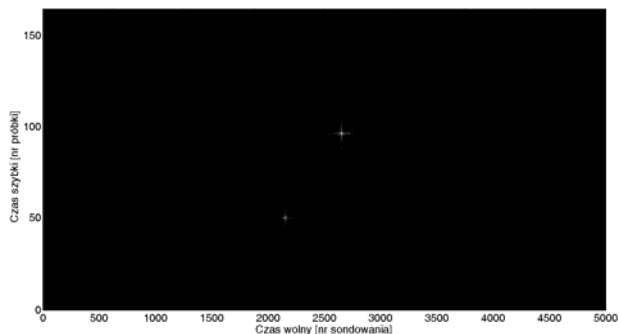
Funkcja referencyjna w dziedzinie azymutu odzwierciedla zmiany fazy sygnału echa od pojedynczego obiektu punkowego wzdłuż syntetycznej apertury i powinna zostać wygenerowana przed rozpoczęciem działania algorytmu, ponieważ może być później wykorzystywana do syntezy obrazu z kolejnych partii sygnału surowego. Dla określonej minimalnej odległości do celu R_0 oraz dla określonej długości syntetycznej apertury N_A funkcja referencyjna przyjmuje postać

$$(5) \quad w_{ref}(R_0, b) = \exp \left[j2\pi \left(\frac{2\sqrt{R_0^2 + b^2}}{\lambda} + f_D \frac{2\sqrt{R_0^2 + b^2}}{c} \right) \right]$$

Funkcja ta jest zależna od dwóch zmiennych: odległości minimalnej oraz położenia na syntetycznej aperturze b , przy czym jej rozmiar względem drugiej zmiennej zależy od długości SA.

Następnie wyznaczana jest widmo tej funkcji w dziedzinie azymutu i jest ono mnożone przez azymutalne widmo sygnału surowego po korekcji migracji odległościowej. Powstałe w ten sposób widmo obrazu SAR jest poddawane odwrotnej transformacji Fouriera w celu uzyskania właściwego obrazu.

Na rysunku 7 przedstawiono obraz SAR uzyskany na podstawie sygnału surowego z rysunku 2.

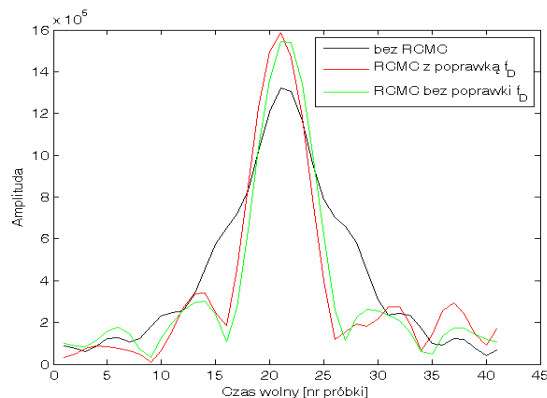


Rys. 7. Obraz SAR wyznaczony na podstawie sygnału surowego przedstawionego na rysunku 2

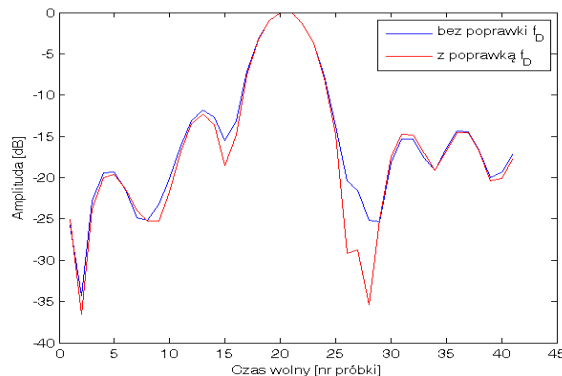
Badania z wykorzystaniem sygnału symulowanego

W celu określenia właściwości zmodyfikowanego algorytmu RDA porównano wyniki jego działania z wynikami algorytmu niezmodyfikowanego.

Dla celów eksperymentu wygenerowano sygnał surowy pochodzący od pojedynczego celu punkowego o niefluktuującej skutecznej powierzchni odbicia i założono dużą, tj. nie powodującą modulacji amplitudy echa, szerokość wiązki antenowej radaru. Na rysunku 8 przedstawiono przekroje azymutalne obrazu SAR dla algorytmu niezmodyfikowanego korekcji migracji odległościowej oraz dla algorytmów ją realizujących, odpowiednio przy uwzględnieniu poprawki na dopplerowskie przesunięcie echa i bez jej uwzględnienia.



Rys. 8. Porównanie przekrojów azymutalnych obrazów SAR dla algorytmów z różnymi wersjami korekcji migracji odległościowej



Rys. 9. Porównanie przekrojów azymutalnych obrazów SAR dla algorytmu uwzględniającego poprawkę f_D w funkcji referencyjnej oraz bez jej uwzględnienia

Można zaobserwować poszerzenie listka głównego obrazu oraz znaczący spadek jego amplitudy przy braku RCMC. Uwzględnienie poprawki na f_D w korekcji migracji spowodowało wzrost poziomu sygnału oraz nieznaczną poprawę szerokości listka głównego.

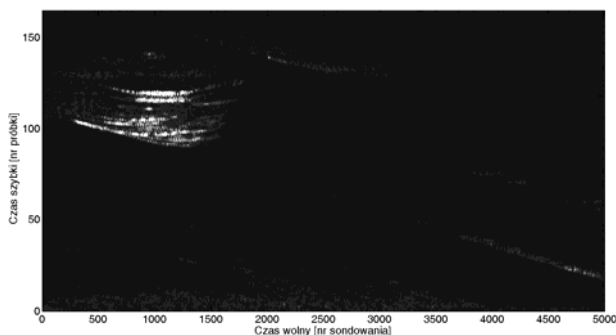
Na rysunku 9 przedstawiono przekroje azymutalne obrazu SAR przy uwzględnieniu poprawki na efekt Dopplera w funkcji referencyjnej oraz przy jej braku.

Uwzględnienie poprawki dopplerowskiej spowodowało zmniejszenie szerokości listka głównego obrazu.

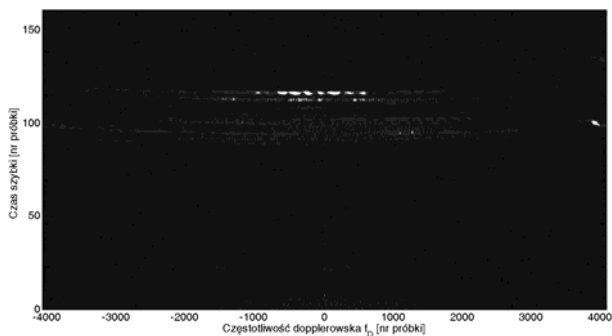
Badania eksperymentalne

Działanie algorytmu przetestowano na sygnale zarejestrowanym przez radarowy sensor FMCW zainstalowany na samochodzie osobowym. System antenowy skierowany był prostopadle do kierunku ruchu samochodu. Obserwowano teren i znajdujące się w nim obiekty wzdłuż trasy radaru.

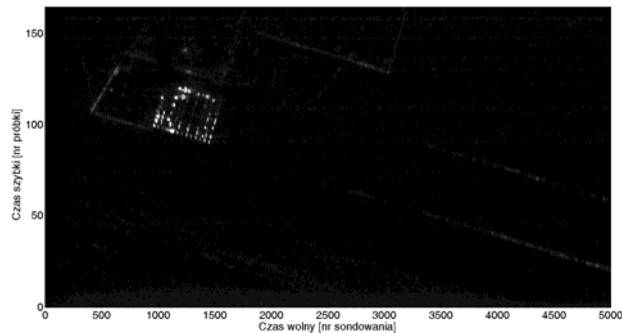
Na rysunkach 10 - 12 przedstawiono sygnał surowy z przykładowej rejestracji, jego widmo oraz obraz SAR uzyskany w wyniku działania algorytmu RDA.



Rys. 10. Surowy sygnał SAR po kompresji odległościowej



Rys. 11. Widmo azymutalne sygnału surowego SAR



Rys. 11. Obraz SAR

Podsumowanie

W referacie przedstawiono wyniki badań algorytmu RDA przystosowanego do specyfiki radaru z falą ciągłą. Uwzględnienie, w trakcie syntezy zobrazowania SAR, wpływu dopplerowskiego przesunięcia widma sygnałów echa na pomiar odległości w radarze FMCW umożliwiło uzyskanie poprawy jakości obrazu. Korekta została zastosowana zarówno do funkcji azymutalnej referencyjnej, jak i do funkcji korekcji migracji odległościowej. Należy zauważyć, że wpływ efektu Dopplera na jakość zobrazowania zwiększa się wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej sygnału sondującego systemu radarowego, zatem jego uwzględnienie jest konieczne w systemach pracujących w wyższych zakresach częstotliwości.

Projekt współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych jako Projekt Badawczy PBS1/B3/15/2012

LITERATURA

- [1] Wang B.C., Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image processing, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2008
- [2] Cumming I.G., Wong F.H., Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation, Artech House, Boston/London, 2005
- [3] Skolnik M. (ed.), Radar handbook, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, 2008
- [4] Massonnet D., Souyris J.C., Imaging with Synthetic Aperture Radar, EPFL Press, 2008

Autorzy: dr inż. Czesław Leśnik, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: Czeslaw.Lesnik@wat.edu.pl; mgr inż. Piotr Serafin, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: Piotr.Serafin@wat.edu.pl; inż. Hubert Milczarek, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: hmilczarek@tlen.pl.