



Symulacja procesu polarymetrycznej klasyfikacji obiektów realizowanej metodą dekompozycji

BOGDAN LILA, JERZY KAPELEWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Dane uzyskiwane z zastosowaniem radaru polarymetrycznego SAR stanowią podstawę do numerycznej syntezy obrazowań, zawierających informacje o charakterze i rodzaju obiektów występujących w badanym obszarze terenu. Efektem wstępnego etapu przetwarzania, którym jest kompresja azymutalna, są dane numeryczne stanowiące w swej istocie rodzaj czterowarstwowej mapy o wysokiej rozdzielczości, w której każdemu pikselowi lokalizacji przestrzennej przyporządkowane są cztery składowe polarymetrycznej macierzy rozpraszania. W kolejnym etapie realizowana jest dalsza konwersja danych, prowadząca do struktur opartych na macierzach kowariancji lub koherencji. Ostatni, najbardziej istotny etap przetwarzania realizowany jest na podstawie tzw. polarymetrycznej dekompozycji obiektu. Jednym z wariantów dekompozycji jest metoda oparta na diagonalizacji macierzy koherencji z wykorzystaniem jej wektorów własnych. W artykule przedstawiono rezultaty eksperymentów numerycznych, przeprowadzonych z użyciem algorytmu wykorzystującego wariant ww. metody zwany dekompozycją Cloude'a.

Słowa kluczowe: elektronika, radiolokacja, teledetekcja własności fizycznych

Symbole UKD: 621.396.9

1. Wstęp

Dane uzyskiwane w trakcie misji lotniczej bądź kosmicznej z zastosowaniem radaru obserwacji bocznej z syntetyczną aperturą w wariacie polarymetrycznym stanowią podstawę do numerycznej syntezy obrazowań, pozwalających uzyskać informacje o charakterze i rodzaju obiektów występujących w analizowanym obszarze terenu. Pierwszym etapem przetwarzania danych polarymetrycznych uzyskiwanych w technice POL-SAR jest tzw. kompresja azymutalna, której rezultatem są dane numeryczne stanowiące w swej istocie rodzaj czterowarstwowej

mapy o wysokiej rozdzielczości azymutalnej, w której każdemu pikselowi lokalizacji przestrzennej przyporządkowane są cztery składowe polarymetrycznej macierzy rozpraszania Sinclaira [1]. Złożoność procesów rozproszeniowych, którym podlegają fale elektromagnetyczne, oddziałując z obiektami różnego typu, ogranicza bezpośrednio wykorzystanie uzyskanych na tym etapie tzw. „surowych” obrazowań. Obrazowania te w większości przypadków dotyczą obiektów będących, w kontekście reprezentacji numerycznej, statystycznie jednorodnymi rozkładami przestrzennymi przypadkowo rozlokowanych centrów rozpraszających o cechach deterministycznych. Dla pełnego wykorzystania zgromadzonej informacji polarymetrycznej stosuje się konwersję struktury danych, opartej na macierzy Sinclaira, do struktur opartych na macierzach kowariancji lub koherencji [2], stanowiących efekt uśredniania przestrzennego własności obiektów. W dalszym etapie przetwarzania uzyskuje się informacje o naturze zawartych w obrazowaniu obiektów, umożliwiające ich klasyfikację i charakteryzację. Ten istotny z punktu widzenia precyzyjnego i wiarygodnego „odczytywanie” danych polarymetrycznych etap, realizowany jest na podstawie algorytmów bazujących na tzw. polarymetrycznej dekompozycji obiektu [3, 4]. Zazwyczaj wybór efektywnej metody dekompozycji zastosowanej w algorytmie przetwarzania uzależniony jest od ukierunkowania tego procesu na detekcję i charakteryzację konkretnej klasy obiektów, charakteryzujących się specyficznymi, szczególnie w sensie statystycznym, własnościami rozproszeniowymi. Jedną z często wykorzystywanych jest metoda dekompozycji oparta na diagonalizacji macierzy koherencji z wykorzystaniem jej wektorów własnych. W dalszej części pracy przedstawiono rezultaty eksperymentów numerycznych przeprowadzonych z użyciem algorytmu wykorzystującego jedną z odmian ww. metody: dekompozycję Cloude’a [3].

2. Opis zastosowanej metody dekompozycji

2.1. Rozpraszanie w ujęciu polarymetrycznym

W polarymetrii mikrofalowej proces rozpraszania może być rozpatrywany jako transformacja fali padającej do fali rozproszonej, realizowana przez obiekt rozpraszający. Rozważana transformacja, przy wykorzystaniu reprezentacji wektora Jonesa \mathbf{E}^i — dla fal padających oraz \mathbf{E}^s — dla fal odbitych [1], może być scharakteryzowana przez macierz Sinclaira $[S]$ 2×2 [1], co wyraża poniższy zapis

$$\mathbf{E}^s = [S]\mathbf{E}^i \rightarrow \begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \frac{e^{ikr}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Typowy eksperyment polarymetryczny z użyciem dwukanałowego radaru SAR pozwala dla założonego w ramach danej misji (np. lotniczej) obszaru obserwacji uzyskać „obraz” będący zapisem zespolonych wartości macierzy Sinclaira dla każdego piksela wykonanego w ramach misji zapisu zobrazowania. Typowe dane z misji mają postać macierzy o liczbie wierszy adekwatnej do przyjętej w badanym obszarze rozdzielczości azymutalnej oraz ilości wierszy wynikającej z rozdzielczości zobrazowania w odległości, przy czym dany plik w formacie binarnym zawiera jedną macierz odpowiadającą „obrazowi”, której każdy element reprezentuje wartość jednego elementu macierzy Sinclaira przypisaną danemu pikselowi. Jak wynika z powyższego, pełna informacja ze standardowej misji polarymetrycznej zawiera cztery pliki binarne, z których każdy opisuje rozkład przestrzenny wartości jednego elementu macierzy Sinclaira $[2 \times 2]$.

2.2. Pomiar polarymetryczny a rozpraszanie na obiektach rozłożonych

W wielu zastosowaniach teledetekcji polarymetrycznej z użyciem SAR mamy do czynienia nie z pojedynczymi, zdeterminowanymi co do własności, obiektami rozpraszającymi, ale z obiektami ułożonymi w ośrodku dynamicznym, charakteryzującym się zmianami parametrów zależnych od czasu i/lub przestrzeni. Tak rozumiane obiekty rozpraszające, nazywane rozpraszaczami parcjalnymi, charakteryzowane są za pomocą polarymetrycznej macierzy koherencji $[T_3]$, definiowanej na podstawie iloczynu trójwymiarowego wektora rozpraszania Pauliego [2].

$$[T] := \langle \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{k}_p^* \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2\langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie $\langle \dots \rangle$ oznaczają uśrednienie przestrzenne, zakładające jednorodność statystyczną ośrodka rozpraszającego. Dane w macierzy koherencji (lub kowariancji) mają, z uwagi na uśrednianie przestrzenne, zredukowaną w stosunku do macierzy $[S]$ rozdzielczość. Ta strata rozdzielczości jest szczególnie krytyczna dla rozpraszaczy punktowych, jednak dla rozpraszaczy rozłożonych jest kompensowana znaczną redukcją zakłóceń typu „speckle”.

2.3. Dekompozycja oparta na wartościach własnych macierzy koherencji

Ponieważ macierz koherencji $[T]$ jest macierzą hermitowską dodatnio półokreśloną, jest więc diagonalizowalna poprzez transformację unitarną [3] zgodnie z relacjami

$$[T] = [U_3][\Lambda][U_3]^{-1} \quad \text{gdzie} \quad [\Lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, \quad [U_3] = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3]^T. \quad (3)$$

Macierz $[L]$ jest macierzą diagonalną, której elementy niezerowe są nieujemnymi wartościami własnymi $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ macierzy $[T]$ ($0 \leq \lambda_3 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1$), natomiast $[U_3]$ jest macierzą unitarną przejścia, której kolejne kolumny odpowiadają ortonormalnym wektorom własnym $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ macierzy $[T]$. Zastosowanie wektorów własnych do opisywanej diagonalizacji możliwe jest w przypadku, gdy $[T]$ opisuje rozpraszacz rozłożony, będąc w ogólnym przypadku macierzą rzędu trzeciego, której dekompozycja daje niekoherentną sumę trzech niezależnych macierzy koherencji $[T_i]$

$$\begin{aligned} [T] &= [U_3][\Lambda][U_3]^{-1} = \lambda_1 (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_1^{*T}) + \lambda_2 (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_2^{*T}) + \lambda_3 (\mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}_3^{*T}) = \\ &= [T_1] + [T_2] + [T_3]. \end{aligned} \quad (4)$$

Wyrażenie (4) można interpretować jako dekompozycje macierzy $[T]$ do trzech pojedynczych, nieskorelowanych składników rozpraszania opisanych przez macierze $[T_1]$, $[T_2]$ oraz $[T_3]$. Informacja, jaki rodzaj rozpraszacza jest reprezentowany przez macierz $[T_1]$, $[T_2]$ oraz $[T_3]$ zawarta jest w odpowiadających im wektorach własnych.

2.4. Dekompozycja Cloude'a

Jednym z wariantów wykorzystania wektoryzacji macierzy koherencji bazującej na wektorach i wartościach własnych jest dekompozycja Cloude'a [4]. Metodę tę nazwano od nazwiska brytyjskiego naukowca, który jako pierwszy zaproponował określanie dominującego w danym obszarze mechanizmu rozpraszania, opierając się na największej z trzech wyznaczonych wartości własnej macierzy koherencji. Wyekstrahowana macierz koherencji $[T_{01}]$ jest rzędu pierwszego, ma ekwiwalentną macierz rozpraszania $[S]$ i może być wyrażona jako produkt iloczynu wektora rozpraszania pojedynczego rozpraszacza \mathbf{k}_1

$$[T_{01}] = \lambda_1 (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_1^{*T}) = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_1^{*T}. \quad (5)$$

Wyznaczona, niezerowa największa wartość własna λ_1 jest kwadratem normy wektora \mathbf{k}_1 , który w kontekście dekompozycji Cloude'a wyrażony może być w postaci

$$\mathbf{k}_1 = \sqrt{\lambda_1} \mathbf{e}_1 = \frac{e^{j\phi}}{\sqrt{A_0}} \begin{bmatrix} 2A_0 \\ C + jD \\ H - jG \end{bmatrix}, \quad (6)$$

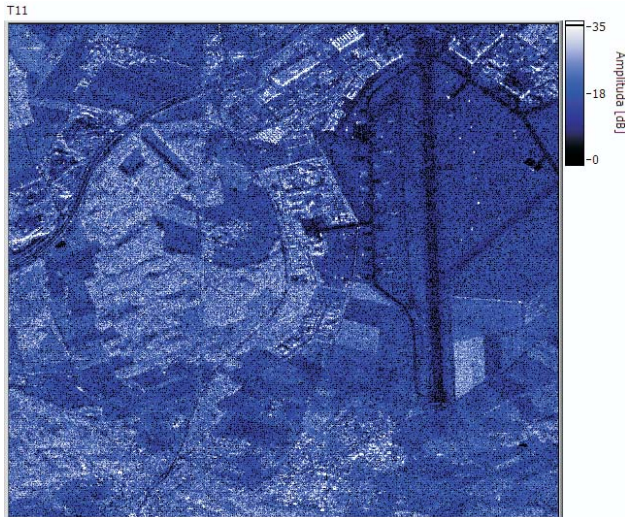
gdzie ϕ odpowiada tzw. absolutnej fazie obiektu. W praktyce, parametryzacja polarymetryczna oparta na wartościach elementów wektora celu \mathbf{k}_1 wprowadza kombinację trzech prostych mechanizmów rozpraszania, charakteryzowanych składowymi wektora \mathbf{k}_1 . Jednym z wariantów wizualnego przedstawiania efektów przetwarzania danych zgodnie z rozpatrywaną metodą są wykresy intensywności dla trzech diagonalnych elementów macierzy $[T_{01}]$, których wartości określają poniższe relacje

$$T_{11} = 2A_0, \quad T_{22} = \frac{|C + jD|^2}{2A_0}, \quad T_{33} = \frac{|H - jG|^2}{2A_0}, \quad (7)$$

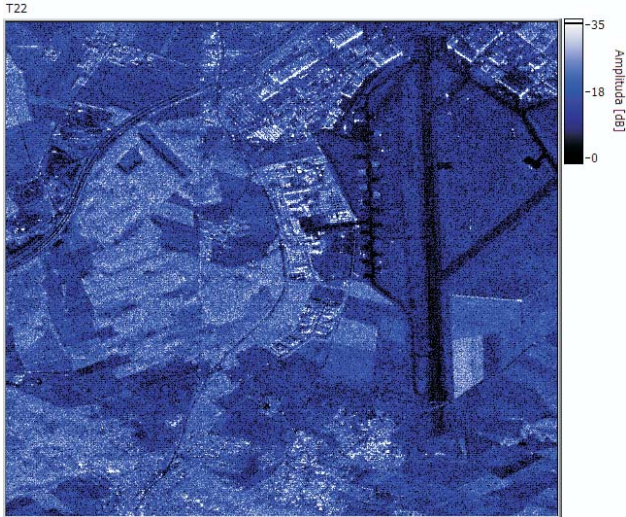
stanowiące trzy „generatory obiektu” ekwiwalentnego pojedynczego rozpraszacza dla rozpraszania powierzchniowego, dwuściennego oraz objętościowego.

3. Symulacja numeryczna

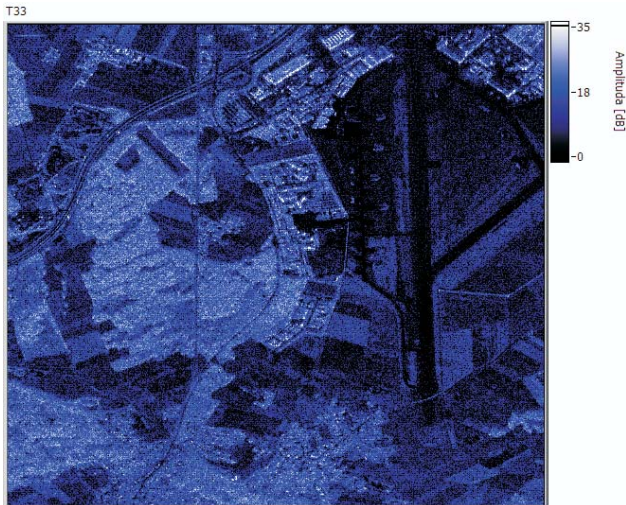
Zgodnie z metodą dekompozycji obiektu, przedstawioną w p. 2.4, opracowano algorytm obliczeniowy oraz wykonano aplikację działającą w środowisku LabView 8.6. W zrealizowanych symulacjach wykorzystano udostępnione w Internecie dane polarymetryczne [5] pochodzące z rzeczywistych dwukanałowych pomiarów polary-



Rys. 1. Zobrazowanie przedstawia wartości elementu T_{11} macierzy $[T_{10}]$ będącej rezultatem dekompozycji Cloude'a. „Generator celu” T_{11} reprezentuje rozpraszanie powierzchniowe, związane z mechanizmem rozpraszania charakterystycznym dla kalibracyjnych struktur odbiciowych typu „trihedral”. Wykres intensywności wykonano z logarytmiczną skalą amplitud



Rys. 2. Zobrazowanie przedstawia wartości elementu T_{22} macierzy $[T_{10}]$ będącej rezultatem dekompozycji Cloude'a. „Generator celu” T_{22} reprezentuje rozpraszanie dwuścienne, związane z mechanizmem rozpraszania charakterystycznym dla kalibracyjnych struktur odbiciowych typu „dihedral”. Wykres intensywności wykonano z logarymiczną skalą amplitud



Rys. 3. Zobrazowanie przedstawia wartości elementu T_{33} macierzy $[T_{10}]$ będącej rezultatem dekompozycji Cloude'a. „Generator celu” T_{33} reprezentuje rozpraszanie objętościowe, związane z mechanizmem rozpraszania charakterystycznym dla struktur charakteryzujących się wielokrotnymi odbiciami. Wykres intensywności wykonano z logarymiczną skalą amplitud

metrycznych realizowanych techniką SAR. Użyte dane zawierają macierz Sinclaira (2816×1540) dla rejonu lotniska specjalnego w Oberpfaffenhofen w Niemczech i pochodzą z projektu E-SAR, realizowanego przez Instytut Mikrofal i Radiolokacji działający w ramach German Aerospace Center.

Powyższe rysunki przedstawiają wyniki obliczeń numerycznych w postaci wykresów intensywności zobrazowujących wartość jednego z diagonalnych elementów macierzy T_{01} dla każdego piksela zobrazowania radaru polarymetrycznego SAR.

4. Podsumowanie

Zasadniczym celem zrealizowanych eksperymentów była ocena przydatności metody dekompozycji Cloude'a dla potrzeb ogólnej charakteryzacji obiektów odwzorowanych w danych polarymetrycznych pochodzących z rejestracji z użyciem lotniczej platformy polarymetrycznego radaru SAR oraz określenie optymalnego zakresu jej zastosowań pod kątem wiarygodnej klasyfikacji obiektów. Jednocześnie dokonano weryfikacji oprogramowania LabView 8.6 pod kątem sprawności obliczeń związanych z przetwarzaniem danych polarymetrycznych. Badany algorytm potwierdził przydatność opisywanej metody dekompozycji oraz wykorzystanego środowiska programowego do wstępnej parametryzacji obserwowanych obiektów terenowych, jednakże ograniczoność metody, wynikająca z liczby uzyskiwanych tutaj trzech „generatorów celu” dla prostych mechanizmów rozpraszania zdaje się potwierdzać ogólnie uznawaną tezę, że pełną informację o obiektach powinno się uzyskiwać, opierając się na jednoczesnym wykorzystywaniu kilku algorytmów przetwarzania, z zastosowaniem różnych metod parametryzacji obiektu.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy zamawiany PBZ-MNiSW-DBO-04/I/2007.

Artykuł wpłynął do redakcji 30.09.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2009 r.

LITERATURA

- [1] G. SINCLAIR, *The Transmission and Reception of Elliptically Polarized Waves*, Proceedings of the IRE, 38, 2, 1950, 148-151.
- [2] W. M. BOERNER et al., *Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts*, Chapter 5 in: F. M. Henderson, and A. J. Lewis (ed.), *Principles and Applications of Imaging Radar*, vol. 2 of Manual of Remote Sensing, (ed. R. A. Reyerson), Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [3] S. R. CLOUDE, E. POTTIER, *A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34, 2, 1996, 498-518.

- [4] S. R. CLOUDE, *Uniqueness of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry*, in: W. M. Boerner et al. (eds.) *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992, 267-398.
- [5] <http://earth.esa.int/polsarpro/datasets.html#ESAR>

B. LILA, J. KAPELEWSKI

Simulation of object polarimetric classification process based on target decomposition technique

Abstract. In microwave remote sensing of many types of physical objects located at a ground surface, the technique using synthetic aperture radar (SAR) installed on an airborne or spaceborne platform, in view of output information, seems to be the most effective. A special variant of the mentioned technique is a technique basing on a polarimetric, two-channel SAR (POL-SAR) use.

Polarimetry basing on this technique is probably one of the more significant directions to expand the range of information, gained with "classic" SAR. At present, polarimetric SAR is still improved and widely accepted remote sensing technique.

The data, obtained with the mentioned technique using from airborne or spaceborne mission, are the base for numerical imaging synthesis, and allow us to get a wide range of information about character and type of objects appearing in the analyzed terrain area.

The first stage of a data processing, based on the data obtained with POL-SAR technique, is the azimuthal compression. The product of this process is numerical data, being in fact a four-layer numerical map with high azimuthal resolution. In this map, the four elements of Sinclair's polarimetric scattering matrix for each pixel are assigned.

Complexity of scattering processes, which, in general, characterizes interaction between electromagnetic waves and many target types, considerably limits the usage of the "raw" images, obtained from this processing stage.

The majority of obtained image cases are related to objects, being, from the standpoint of numerical representation, statistically homogeneous spatial distribution of accidentally located scattering centers, having deterministic characteristics.

For full utilization of the obtained polarimetric information, a structure data conversion is used, ranging from data based on a Sinclair matrix to data based on coherency (or covariance) matrix. Coherency and covariance matrices are the result of object properties spatial averaging.

In the next stage of the processing, the information about the nature of the objects, included in numerical images, is obtained. Such information already enables characterization and classification of registered objects. In reference to precision and accuracy of polarimetric SAR data reading, this most important stage of processing is realized, basing on polarimetric target decomposition algorithms. Generally, a choice of the most effective decomposition method, which will be used in a processing algorithm, depends on an assumed class of detected and characterized object. The class of the objects is determined, in statistical terms, by their special scattering characteristics.

One of often taken treatments is a decomposition method, which bases on eigenvector coherency matrix diagonalization. The paper presents the results of numerical experiments, carried out with the algorithm based on Cloude's decomposition, being a variety of eigenvector decomposition method. The basic target of these experiments was evaluation of considered method in reference to its usefulness for vague objects characterization. A very important advantage of realized simulations was the ability to define, in view of objects classification reliability, the optimal scope of the considered method's application. The numerical processing was realized with the use of authentic polarimetric SAR mission data.

Keywords: electronics, radar technology, microwave remote sensing

Universal Decimal Classification: 621.396.9