

KLASYFIKACJA TREŚCI POLARYMETRYCZNYCH OBRAZÓW RADAROWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD DEKOMPOZYCJI NA PRZYKŁADZIE SYSTEMU F-SAR (X/S)

CLASSIFICATION OF FULLY POLARIMETRIC F-SAR (X/S) AIRBORNE RADAR IMAGES USING DECOMPOSITION METHODS

Magdalena Mleczko ¹

¹Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

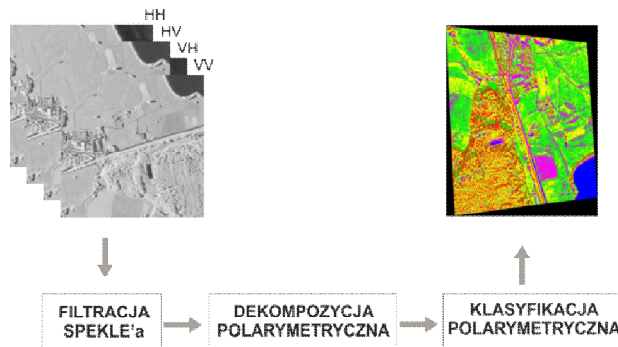
SŁOWA KLUCZOWE: polarymetryczne rejestracje SAR, dekompozycje.

STRESZCZENIE Polarymetryczne obrazy radarowe nie są szerzej stosowane w praktyce, gdyż nie są jeszcze dostępne operacyjnie z pułapu satelitarnego. Obecnie w obszarze zastosowania technologii POL-In-SAR z powodów technologicznych wyodrębnia się dwa podejścia: obrazowanie alternatywno-polaryzacyjne (Alt-Pol) oraz pełnopolarymetryczne (QuadPol). To pierwsze będąc podzbiorem drugiego ma charakter bardziej operacyjny, drugie natomiast zalicza się do badań eksperymentalnych, ponieważ cyfrowa klasyfikacja takich danych wymaga w pierwszym etapie przeprowadzenia dekompozycji polarymetrycznej macierzy rozpraszania. W literaturze spotykamy się z dwoma typami dekompozycji: dekompozycją koherentną i dekompozycją niekoherentną. Dekompozycją koherentną nazywana jest każda dekompozycja macierzy rozpraszania Sinclair'a np. dekompozycja metodą Pauli'ego. Dekompozycją niekoherentną, z kolei jest każda dekompozycja momentów centralnych drugiego rzędu, czyli macierzy kowariancji i koherencji. Do tego typu dekompozycji należy między innymi metoda oparta na wektorach i wartościach własnych macierzy rozpraszania (np. H/A/a). W niniejszej pracy przedstawione metody dekompozycji są testowane z wykorzystaniem danych z wysokorozdzielczego systemu lotniczego F-SAR, obrazującego w pasmach X i S. Wyniki dekompozycji i klasyfikacji są interpretowane w kontekście potencjału kartograficznego ww. zdjęć radarowych.

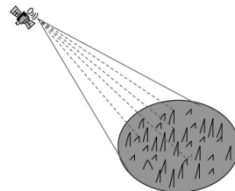
1. WPROWADZENIE TEORETYCZNE I CEL PRACY

Metodyka przetwarzania danych pełnopolarymetrycznych obejmuje trzy etapy: filtrację, dekompozycję oraz klasyfikację (rys. 1)

Etapem rozpoczynającym proces przetwarzania danych pełnopolarymetrycznych jest filtracja. Filtracja wykonywana jest w celu zredukowania zjawiska plamkowania, ujawniającego się w postaci zmienności jasności sąsiednich pikseli wynikającego z wektorowego sumowania rejestrowanych sygnałów dla danej komórki, tzw. zjawiska plamkowania (*speckle effect*) (rys. 2). Jest to istotny element w całym procesie przetwarzania ze względu na możliwość straty zbyt wielu istotnych informacji niesionych z echem radarowym lub odwrotnie zachowaniu „informacji”, które są jedynie szumem.



Rys. 1. Metodyka przetwarzania danych polarymetrycznych



Rys. 2. Zjawisko plamkowania (Lee i Pottier, 2009)

Od ponad 20 lat badacze aktywnie eksplorują obszar tematyczny jakim jest filtracja obrazów radarowych. Powszechnie stosowanym i zarówno najprostszym filtrem jest filtr uśredniający tzw. filtr *boxcar*, pozwalający na redukcję szumu na obszarach homogenicznych, kosztem rozmycia granic i zmniejszenia rozdzielczości przestrzennej. Z tego względu nie zaleca się używania filtra uśredniającego do terenów zabudowanych. Jednak celem, jaki postawili sobie naukowcy jest wygładzenie szumu "speckla" z zachowaniem wyraźnych konturów obiektów. Dlatego Lee w latach 80 ubiegłego wieku rozwinął koncepcję wykorzystania lokalnych statystyk, a mianowicie średniej i wariancji, które stały się podstawą dla innych do tworzenia metod filtracji (Lee, Pottier 2009). Jednym z typów filtracji wykorzystujących statystyki lokalne jest metoda minimalnego średniego błędu kwadratowego MMSE (*Minimum Mean Square Error*) lub jej wersja redefiniowana przez Lee (*Refined Lee Filter*). Wymienione metody uwzględniają filtrację obrazów reprezentujących jedną polaryzację. Istnieją również algorytmy filtracji dedykowane danym pełnopolarymetrycznym. Algorytmy te bazują na macierzach korelacji i kowariancji, w rezultacie czego wszystkie współczynniki macierzy kowariancji są ze sobą skorelowane. Do takich metod należą na przykład metoda *Wishart Gamma MAP*, *Wishart DE MAP*. Metoda *Wishart Gamma MAP* jest najbardziej skuteczna na obszarach o regularnej teksturze i umiarkowanej rzeźbie terenu, z kolei metoda *Wishart DE MAP* jest bardziej skuteczna na obszarach o różnorodnej teksturze i zmiennej rzeźbie terenu. (Lee i Pottier, 2009).

Najbardziej jednak istotnym elementem w procesie przetwarzania polarymetrycznych danych jest proces dekompozycji. Jest to rekonstrukcja transformacji fali padającej do fali rozproszonej wyrażona wektorowo (Lee i Pottier, 2009). Wybór efektywnej metody dekompozycji uzależniony jest od konkretnej klasy obiektów, charakteryzującej się

specyficznymi własnościami rozproszenia. W literaturze spotykamy się z dwoma typami dekompozycji: dekompozycją koherentną (*coherent decomposition*) i dekompozycją niekoherentną (*incoherent decomposition*). Dekompozycją koherentną nazywana jest każda dekompozycja macierzy rozpraszania Sinclair'a np. dekompozycja metodą Pauli'ego, Krogagera czy Camerona. Dekompozycją niekoherentną, z kolei jest każda dekompozycja momentów centralnych drugiego rzędu, czyli macierzy kowariancji i koherencji. Do tego typu dekompozycji należą metody: metoda Freemana – oparta na modelu rozpraszania, metoda Huynen'a - opisywana jako identyfikacja celu lub metody oparte na wektorach i wartościach własnych macierzy rozpraszania (np. H/A/ α - metoda Entropii, Alfry i Anizotropii). Poniżej opisane są szczegółowe charakterystyki przykładowych dekompozycji.

Metoda Pauli'ego

Dekompozycja Pauli'ego wyznacza cztery mechanizmy rozpraszania: pierwszy jest odbiciem od płaskiej powierzchni (odbicie pojedyncze albo nieparzyste), drugi i trzeci - (odbicie podwójne albo parzyste) występuje na obszarach zabudowanych tzw. *corner reflectors*, gdzie kąt orientacji wynosi odpowiednio 0° i 45° , ostatni stanowi niesymetryczne komponenty macierzy rozpraszania S.

Macierz rozpraszania **S** jest wyrażana jako złożona suma macierzy Pauli'ego (Lee, Pottier 2009 (1))

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{b}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \frac{c}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie

$$a = \frac{S_{HH} + S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad b = \frac{S_{HH} - S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad c = \frac{S_{HV} + S_{VH}}{\sqrt{2}} \quad d = j \frac{S_{HV} - S_{VH}}{\sqrt{2}}$$

W przypadku danych monostatycznych, gdzie $S_{HV} = S_{VH}$ parametr $d = 0$ powłoka liniowa (*Span*) określająca całkowitą wartość odbicia przyjmuje (*total scattered power*) postać:

$$Span = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 = |a|^2 + |b|^2 + |c|^2 \quad (2)$$

Dekompozycja H/A/ α

Jest to metoda oparta na wektorach i wartościach własnych macierzy koherencji $\langle [T] \rangle$, którą można przedstawić w postaci (Earth EO ESA, 2011) (3)

$$\langle [T] \rangle = [U_3][\Sigma_3][U_3]^{-1} \quad (3)$$

gdzie Σ_3 jest macierzą diagonalną o nieujemnych współczynnikach rzeczywistych będących wartościami własnymi macierzy koherencji $\langle [T] \rangle$ (4)

$$[\Sigma_3] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\infty > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$$

$[U_3]$ jest to unitarna macierz dekompozycji z grupy SU(3) zawierająca wektory własne macierzy koherencji $\langle [T] \rangle$ i mająca postać: $[U_3] = [u_1 \ u_2 \ u_3]$

i może być sformułowana: $[U_3] = [\cos\alpha_i \ \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{j\delta_i} \ \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{j\gamma_i}]$

Macierz koherencji według powyższych wzorów można zapisać w postaci (5):

$$\langle [T_3] \rangle = \sum_{j=1}^3 \lambda_j u_j u_j^{*T} \quad (5)$$

gdzie symbol *T oznacza sprzężenie liczby zespolonej.

Wyszczególnione wektory własne i wartości własne są podstawowymi parametrami tej dekompozycji. W celu uproszczenia analiz wyników dekompozycji definiuje się dodatkowe parametry będące funkcjami wartości i wektorów własnych. Do tych parametrów należą:

Entropia (H) określająca stopień losowości procesu rozpraszania (przyjmuje wartości od 0 do 1, 0 - pure target, 1- random) (6)

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log_N(p_i) \quad (6)$$

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k}$$

gdzie p_i nazywane jest prawdopodobieństwem wartości własnej i określa znaczenie tej wartości w stosunku do całkowitej wartości odbicia (7)

$$Span = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \quad (7)$$

Alfa (α) – określa typ mechanizmu rozpraszania (przyjmuje wartości o 0° do 90°) (8)

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (8)$$

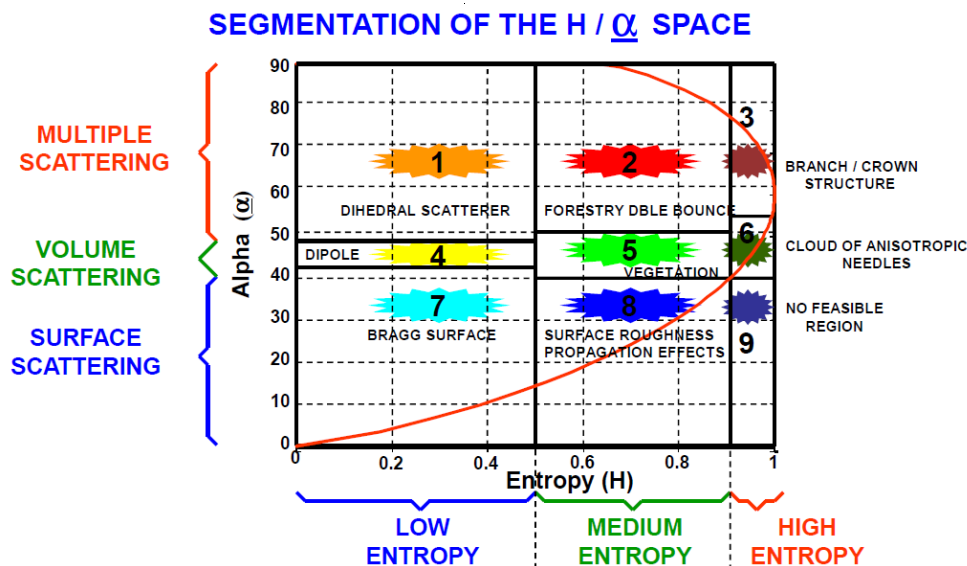
α_i - wyliczane jest z pierwszego elementu macierzy unitarnej $[U_3]$

Anizotropia (A) – określa względną istotność drugiej i trzeciej wartości własnej (przyjmuje wartości od 0 do 1) (9)

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (9)$$

Klasyfikacja

W 1997 roku Cloude i Pottier zaproponowali nowy schemat klasyfikacji nienadzorowanej oparty na płaszczyźnie H/ α (Lee i Pottier, 2009). Obszar ten został podzielony na 9 stref, które reprezentują konkretne klasy obiektów (rys.3). Usytuowanie granic konkretnych klas jest określane na podstawie ogólnych właściwości mechanizmów rozpraszania. Granice te mogą ulegać zmianom w zależności od badanego zestawu danych.



Rys. 3. Płaszczyzna H/ α (Lee J-S., Pottier E., 2009)

Celem niniejszej pracy było przetestowanie metod dekompozycji z wykorzystaniem danych z wysokorozdzielczego systemu lotniczego F-SAR, obrazującego w pasmach X i S. Wyniki dekompozycji i klasyfikacji zostały poddane analizie wizualnej oraz wstępnie zinterpretowane w kontekście potencjału kartograficznego ww. zdjęć radarowych.

2. MATERIAŁY

Lotniczy system F-SAR następcą systemu E-SAR został zainstalowany na pokładzie samolotu Dornier DO228-212. Pierwszy lot z rejestracją w paśmie X odbył się pod koniec 2006. Od 2007 prowadzone były przeloty mające na celu skalibrowanie systemu, a z początkiem 2009 roku testowano rejestrację w pasmach S i C. Obecnie system F-SAR umożliwia rejestrację w pasmach X, C, S, L, P zapewniając:

- rejestrację pełnopolarymetryczną we wszystkich wcześniej wymienionych długościach fal,
- jednoczesną rejestrację danych w maksymalnie 4 długościach fali (dane wielospektralne SAR),
- rejestrację danych w kanale X lub S do zastosowań POL-In-SAR w trybie tzw. XTI (single-pass, across track),
- rejestrację danych w kanale X do zastosowań POL-In-SAR w trybie tzw. ATI (single-pass, along track), fizyczna długość bazy wynosi odpowiednio 1.60 m dla XTI i 0.85 m dla ATI (Reigber *et al.*, 2010).

Szczegółową charakterystykę systemu F-SAR przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Charakterystyka systemu F-SAR (Reigber *et al.*, 2010)

Pasma	X	C	S	L	P
Częstotliwość [GHz]	9.60	5.30	3.25	1.325	0.35
PRF [kHz]	5	5	5	10	12
Rozdzielczość przestrzenna w kierunku zasięgu [m]	0.3	0.6	0.75	1.5	2.25
Rozdzielczość przestrzenna w kierunku azymutalnym [m]	0.2	0.3	0.35	0.4	1.25
Szerokość obrazowania [km]	12.5				
Wysokość przelotu [m]	6000				
Kąt padania [°]	25-55				

Dane testowe zostały udostępnione przez Niemiecką Agencję Kosmiczną (DLR) w formacie RAT (RADAR Tools) (F-SAR Demo Data Takes, 2012). Charakterystykę wykorzystanych danych przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Charakterystyka danych wykorzystanych w opracowaniu.

Parametr	Pasma X	Pasma S
Polaryzacja	HH/HV/VH/VV	HH/HV/VH/VV
Długość fali [m]	0.031	0.092
PRF [Hz]	1008	1008
Data rejestracji [rrrr:mm:dd hh:mm:ss]	2010-06-08 9:20:44	2010-06-08 8:59:46
Wysokość lotu n.p.m [m]	3044	3045
Wysokość terenu [m]	780	780
Prędkość samolotu [m/s]	85	85
Rozdzielczość przestrzenna w kierunku zasięgu [m]	0.25	0.65
Rozdzielczość przestrzenna w kierunku azymutalnym [m]	0.25	0.50
Wielkość sceny [piksele]	5000x5000	2500x2500
Format danych	.rat (RADAR Tools)	.rat (RADAR Tools)

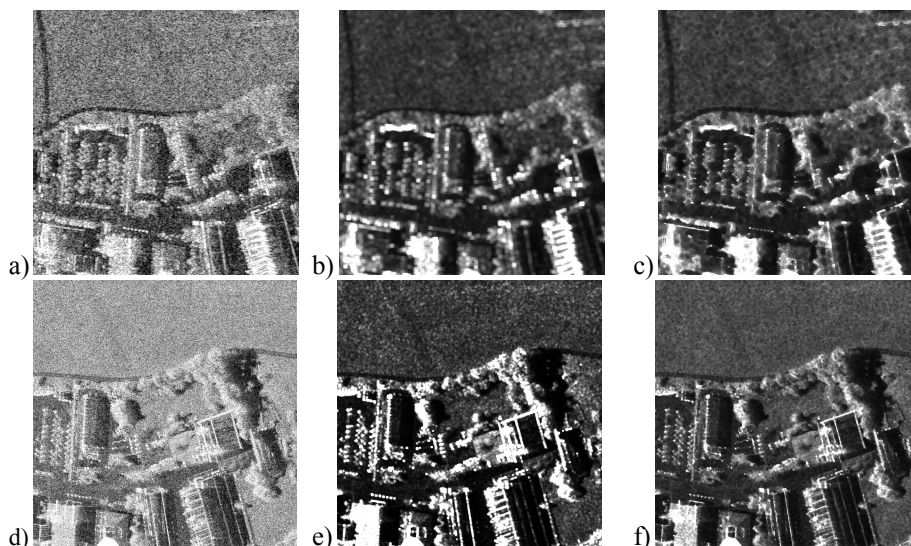


Rys. 4. Lokalizacja obszaru badań (po lewej) oraz zasięg przestrzenny wykorzystanych obrazów

Obszar opracowania znajduje się w południowej Bawarii (Niemcy), niedaleko miasta Kaufbeuren i obejmuje około 1,5 km² (rys. 4). Rzeźba terenu ma charakter równinny i jest to obszar, na którym można wyróżnić kilka podstawowych rodzajów pokrycia terenu tj. tereny rolne, leśne, zurbanizowane oraz akwen.

3. WYNIKI I WNIOSKI

Prezentowane wyniki są wynikami wstępnymi opartymi na analizach wizualnych przetworzeń obrazów systemu F-SAR. Według schematu przetwarzania danych polarymetrycznych w pierwszej kolejności przeprowadzono filtrację speckle'a. Wyniki filtracji metodą uśredniania (*boxcar*) oraz metodą Lee przedstawione są na rysunku 5, zarówno dla pasma S jak i X. Przeprowadzono również filtrację metodą *Wishart Gamma MAP*, jednak ze względu na ograniczenia narzędzi wykorzystywanego oprogramowania nie mogły zostać wykorzystane do dalszych prac. Wykonana filtracja dowodzi, że w przypadku kartowania terenów zurbanizowanych należy wybrać metodę Lee, zachowującą wyraźne granice. W przypadku kartowania obszarów homogenicznych zaleca się stosowanie filtra uśredniającego.



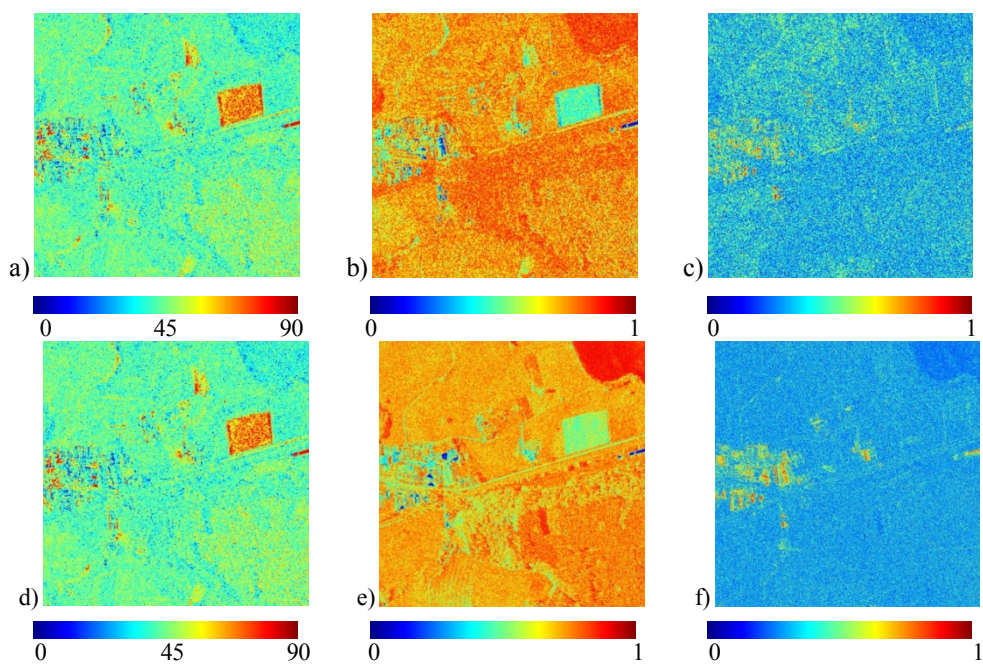
Rys. 5. Wyniki filtracji speckle'a dla pasma X a) obraz przed filtracją b) filtracja metodą uśredniającą c) filtracja metodą Lee; dla pasma S d) obraz przed filtracją e) filtracja metodą uśredniającą f) filtracja metodą Lee

Kolejnym etapem była próba dekompozycji danych metodą Pauli'ego. Wynikiem są kompozycje RGB, które przedstawia rysunek 6. Wyraźnie zostały wyróżnione podstawowe rodzaje pokrycia terenu tj. tereny rolne, leśne, zurbanizowane oraz akwen. Jest to metoda odpowiednia w przypadku analizy obiektów, które nie zmieniają swojej charakterystyki powierzchniowej, sztucznych konstrukcji np. budynków, dróg.



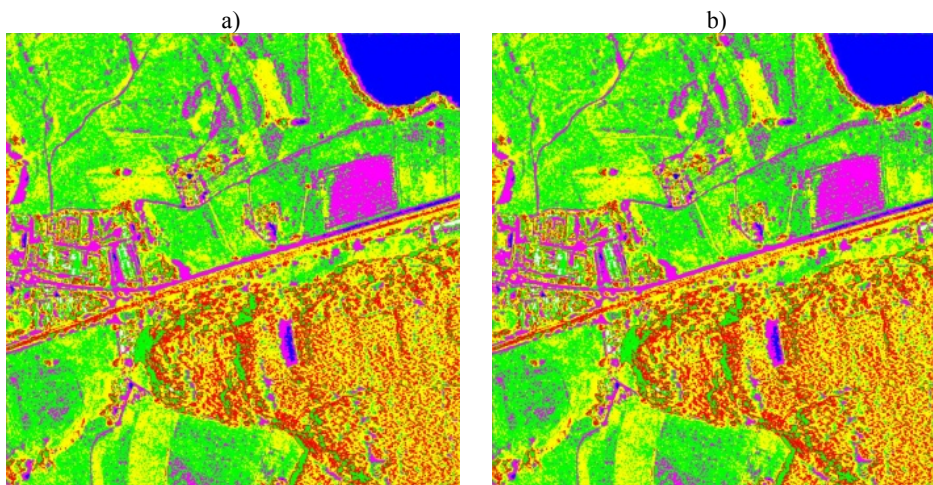
Rys. 6. Wyniki dekompozycji metodą Pauli'ego a) pasmo S b) pasmo X gdzie R:(HH-VV) G:(HV+VH) B:(HH+VV)

W przypadku kartowania obiektów naturalnych takich jak lasy, użytki rolne, wody zaleca się wykorzystać metodę opartą na wektorach i wartościach własnych macierzy rozpraszania. Wyniki tej dekompozycji przedstawia się w postaci parametrów będących funkcjami wartości i wektorów własnych $H/A/\alpha$ (rys. 7).



Rys. 7. Wyniki dekompozycji metodą $H/A/\alpha$ dla pasma S a) alfa b) entropia c) anizotropia; dla pasma X d) alfa e) entropia f) anizotropia

Wartości α bliskie zero oznaczają pojedyncze odbicie od powierzchni szorstkiej. W naszym przypadku przy długości fali 3 cm w paśmie X i 9 cm w paśmie S jest to teren akwenu i część terenu zurbanizowanego. Wartości α bliskie 45° oznaczają rozproszenie objętościowe a więc tereny lasów i upraw rolniczych. Wysoka wartość α występuje na terenach zurbanizowanych i oznacza odbicie podwójne. Z kolei entropia określająca stopień losowości procesu rozpraszania przyporządkowuje tereny zurbanizowane do klasy czystych, koherentnych rozpraszaczy (*pure targets*), a tereny przeznaczone pod uprawę, tereny leśne oraz akwen do klasy rozpraszaczy rozciągniętych (*distributed targets*). Anisotropia jest parametrem uzupełniającym entropię i może być źródłem informacji kiedy $H > 0.7$ w tym przypadku jedynie na terenach zabudowanych.



Rys. 8. Wyniki klasyfikacji a) pasmo S b) pasmo X

Po przeprowadzonej dekompozycji metodą $H/A/\alpha$ przystąpiono do klasyfikacji jej wyników. Wyniki klasyfikacji nienadzorowanej przedstawia rysunek nr 8. Wydzielone zostały 4 główne klasy: kolorem niebieskim - powierzchni zbiornika wodnego, kolorem różowym - odbicie podwójne w tym przypadku tereny zabudowane, kolorem zielonym i żółtym tereny upraw oraz kolorem czerwonym i żółtym tereny leśne. Ze względu na brak danych kontrolnych nie została prowadzona analiza dokładności.

Podsumowując wybór efektywnej metody dekompozycji uzależniony jest od konkretnej klasy analizowanych obiektów, charakteryzującej się specyficznymi własnościami rozproszenia a prezentowane wyniki oparte na analizach wizualnych wykazały potencjał kartograficzny wykorzystania obrazów pełnopolarymetrycznych wysokiej rozdzielczości. Dalsze badania wymagałyby porównania z pomiarami in-situ.

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana z projektu współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

LITERATURA

Reigber A, Horn R., Nottensteiner A., Prats P., Scheiber R, Bethke K-H and Baumgartner S. 2010. *Current status of DLR's new F-SAR sensor EUSAR 2010*.

Lee J-S., Pottier E., 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to applications* CRC Press Taylor & Francis Group ISBN 978-1420054972.

Microwaves and Radar Institute, 2012. *F-SAR Demo Data Takes*.

Earth EO ESA, 2011: http://earth.eo.esa.int/polsarpro/Manuals/4_Polarimetric_Decompositions.pdf (14.08.2014)

CLASSIFICATION OF FULLY POLARIMETRIC F-SAR (X/S) AIRBORNE RADAR IMAGES USING DECOMPOSITION METHODS

KEY WORDS: Polarimetric SAR, decomposition

Summary

Polarimetric SAR data is not widely used in practice, because it is not yet available operationally from the satellites. Currently we can distinguish two approaches in POL-In-SAR technology: alternating polarization imaging (Alt-POL) and fully polarimetric (QuadPol). The first represents a subset of another and is more operational, while the second is experimental because classification of this data requires polarimetric decomposition of scattering matrix in the first stage. In the literature decomposition process is divided in two types: the coherent and incoherent decomposition. In this paper the decomposition methods have been tested using data from the high resolution airborne F-SAR system. Results of classification have been interpreted in the context of the land cover mapping capabilities.

Dane autorki:
mgr inż. Magdalena Mleczko
e-mail: magdalena.mleczko@uwm.edu.pl
telefon: 89 523 38 41
fax: 89 523 32 10

Przesłano 20.10.2014
Zaakceptowano 20.12.2014