

TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI

Radary w teledetekcji lasu

Radars in Forestry Oriented Remote Sensing

Promieniowanie elektromagnetyczne rejestrowane ludzkim okiem stanowi jedynie wąski wycinek spektrum. Jednakże w zdalnym badaniu Ziemi wykorzystuje się także zakresy nie odbierane bezpośrednio przez zmysły człowieka. Obecny poziom techniki umożliwia rejestrowanie całego zakresu widma elektromagnetycznego (tab. 1). W tym także promieniowania mikrofalowego, będącego podstawą funkcjonowania radarów.

TABELA 1
Wykaz zakresów promieniowania elektromagnetycznego

Nazwa zakresu promieniowania	Długość fal
Gamma	0,001 μm
X	0,001 – 0,1 μm
Ultrafiolet	0,1 – 0,4 μm
Widzialne	0,4 – 0,76 μm
Podczerwień	0,76 μm – 1 cm
– bliska	0,76 – 1,3 μm
– średnia	1,3 – 10,0 μm
– daleka	10,0 μm – 1 cm
Mikrofale	1 cm – 1 m
Fale radiowe	10 cm – 10 km

Radar (RADio Detection And Ranging) jest aktywnym systemem teledetekcyjnym, wysyłającym promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym (tab. 2) oraz rejestrującym powracającą wiązkę (zwaną też echem radaru) po jej odbiciu od obiektów znajdujących się na drodze wysyłanych fal. Technika ta uniezależnia pozyskiwanie danych od światła słonecznego, które jest podstawą rejestracji zdjęć przez urządzenia optyczne, umożliwiając rejestrację obrazu zarówno w dzień, jak i w nocy. Ale największy atut teledetekcji radarowej wynika z przenikania promieniowania mikrofalowego przez pokrywę chmur, co pozwala na uniezależnienie zbierania danych od warunków pogodowych.

TABELA 2
Wykaz zakresów mikrofalowych

ZAKRES	f (GHz)	λ (cm)
P	0,225 – 0,39	133 – 76,9
L	0,390 – 1,55	76,9 – 19,4
S	1,55 – 3,9	19,4 – 7,69
C	3,9 – 5,75	7,69 – 5,21
X	5,75 – 10,9	5,21 – 2,75
K	10,9 – 36	2,75 – 0,83
<i>Ku</i>	10,9 – 18	2,75 – 1,67
<i>K</i>	18 – 26,5	1,67 – 1,13
<i>Ka</i>	26,5 – 36,6	1,13 – 0,83
Q	36 – 46	0,83 – 0,063
V	46 – 56	0,063 – 0,053
W	56 – 100	0,053 – 0,3

Teledetekcyjne urządzenia radarowe można podzielić na nieobrazowe (np. altimetr) i obrazowe, np. radary z anteną naturalną (RAR-Real Aperture Radar) i syntetyczną (SAR-Syntetic Aperture Radar). Antena zwana syntetyczną, jest tak skonstruowana, że przechowuje odbierany sygnał przez pewien czas i porównuje go z kolejnymi, rejestrowanymi podczas lotu samolotu lub satelity. Antena syntetyczna daje więc wrażenie wielokrotnie dłuższej niż jest nią w rzeczywistości, co wpływa na poprawę przestrzennej zdolności rozdzielczej zdjęć radarowych, która w przypadku pułapów satelitarnych może wynosić od 5 do 50 metrów.

Radarowe systemy obrazujące wykorzystują promieniowanie mikrofalowe o długości fal od 1 cm do 1 m, emitując sygnały w wiązkach ciągłych lub pulsacyjnych o mikrosekundowej długości, które mają prędkość światła. Promieniowanie to jest charakteryzowane przez długość (λ) oraz częstotliwość (f) fali, amplitudę, fazę, polaryzację anteny i kąt padania na powierzchnię Ziemi (θ). Częstotliwość i długość fali pozostają w stałej zależności (tab. 2), opisaną wzorem: $f = c \lambda^{-1}$, gdzie: f oznacza częstotliwość wyrażoną w Hz ($1 \times \text{sec}^{-1}$), $c = 3 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$, a λ jest długością fal wyrażoną w m.

Systemy radarowe dostarczają zobrazowań, na których każdy piksel, czyli podstawowy element obrazu zapisanego cyfrowo, ma wartość odpowiadającą natężeniu promieniowania odbitego od obiektów oświetlonych wysłaną wiązką mikrofal.

Współczynnik wstecznego odbicia σ_0 zależy od długości fali (częstotliwości), kąta padania promieniowania, polaryzacji anteny oraz własności dielektrycznych i geometrycznych obiektu. Jest on jednostką bezmianową, ale często wyraża się go w decybelach (dB): $\sigma_0(\text{dB}) = 10 \log \sigma_0$.

Długość (częstotliwość) promieniowania determinuje zasięg przenikania fal w głąb obiektu oświetlonego wiązką radaru. Im większa długość fali (mniejsza częstotliwość), tym głębiej sięga penetracja promieniowania mikrofalowego. I tak, w przypadku lasu, fale o długości $\lambda = 3$

cm (zakres X) zatrzymują się przy pierwszym zetknięciu z obiektem, a więc informacje rejestrowane na obrazie są związane z górną powierzchnią koron drzew. Natomiast fale o długości $\lambda = 23$ cm (zakres L) penetrują wewnątrz drzewostanu, więc informacje zarejestrowane na obrazie będą dotyczyły pni drzew i wnętrza lasu. Woda jest całkowicie nieprzezroczysta dla mikrofal, które ulegają silnemu od niej odbiciu, i dlatego zmiana wilgotności powierzchni liści i gałęzi może zmniejszać możliwość przenikania promieni w głąb lasu.

Obok długości fal, innym istotnym czynnikiem opisującym konkretny system radarowy jest polaryzacja anteny, czyli jej ustawienie w stosunku do obserwowanej powierzchni. Polaryzacja może być wertykalna (V) lub horyzontalna (H) i opisywana jest jako HH, VV, HV, lub VH, gdzie pierwsza litera określa polaryzację emisji, a druga odbioru wiązki promieniowania mikrofalowego. Polaryzacja anteny, podobnie jak zakres fal, wpływa na rodzaj informacji pozyskiwanych przez konkretny radar.

Emisja promieniowania mikrofalowego w celach obrazowych, nie jest dokonywana wertykalnie, ale pod pewnym kątem w stosunku do powierzchni Ziemi. Gdyby wiązka mikrofalowa była wysyłana wertykalnie, niewiele informacji udawałoby się wydobyć z zarejestrowanego obrazu, gdyż prawie całe promieniowanie powróciłoby do anteny radaru w tym samym czasie. Aby na zdjęciu radarowym możliwe było rozróżnienie poszczególnych obiektów, sygnały przez nie odbite powinny mieć nie tylko różne natężenie, ale także powinny docierać do anteny w różnym czasie. W przeciwnym razie zostałyby one zarejestrowane jako jeden duży obiekt. To czasowe rozróżnienie promieni odbijanych przez różne obiekty na powierzchni Ziemi jest możliwe jedynie w wypadku emisji promieniowania pod pewnym kątem, określanym jako kąt padania promieniowania radarowego w stosunku do powierzchni Ziemi (θ), którego wielkość ma wpływ na zakres informacji, możliwych do odczytania na zdjęciu radarowym.

Rejestracja promieniowania wysyłanego i odbieranego niewertykalnie powoduje jednak dystorsję zdjęcia, co należy brać pod uwagę przy interpretacji zdjęć radarowych. Dystorsja ta może występować w następujących postaciach:

- skrócenie na zdjęciu faktycznej odległości, w przypadku zdjęć z obszarów o znacznej deniwelacji,
- nakładanie się informacji w wypadku ekstremalnego skrócenia odległości, np. najpierw dotrze do anteny odbiorczej sygnał odbity od grzbietu górskiego lub szczytu, a dopiero później od dolin leżących po jego obu stronach, czego efektem na zdjęciu będzie usytuowanie obu dolin po jednej stronie góry,
- w terenie górskim nie uzyskuje się informacji ze stoków zacienionych (nieoświetlonych przez radar),
- obiekty poruszające się zmieniają częstość wiązki radarowej powodując tzw. **przesunięcie dopplerowskie**, w wyniku którego na zdjęciu obraz pociągu może znajdować się poza szynami, a statku poza kilwaterem.

Innym utrudnieniem w interpretacji zdjęć radarowych jest tekstura obrazu, nazywana efektem "soli z pieprzem". Jest to specyficzna plamistość będąca wynikiem silnego echa, powodowanego przez obiekty o wymiarach porównywalnych z długościami fal radarowych. Obiekty te, mimo że mniejsze od piksela, mogą zdominować wartość jego echa. Charakterystyczny dla obrazu radarowego efekt plamistości wynika z tych właśnie wpły-

wów, których wizualna postać jest podobna do efektu ziarnistości emulsji fotograficznej. Odpowiednie filtracje, bazujące na lokalnych statystykach obrazu, mogą jednak usunąć ten efekt lub złagodzić jego negatywny wpływ na czytelność zdjęcia (Lee, 1981 i 1983).

W teledetekcji radarowej operuje się także pojęciem “szorstkości” powierzchni, czy obiektu, od której zależy kierunek odbijania fal radarowych. Powierzchnie “gładkie” powodują silne odbicie całej wiązki pod jednym kątem, podczas gdy powierzchnie “szorstkie” powodują odbicie wielokierunkowe, co ma wpływ na obraz tych obiektów na zdjęciu. Teren określa się mianem “gładkiego”, gdy: $h < \lambda \times (8 \sin \theta)^{-1}$ (lub mniejsze od $\lambda \times 4^{-1}$), gdzie h opisuje nieregularności terenu, λ długości fal, θ kąt padania promieni radarowych (Leberl, 1990).

Mimo, że mikrofałe przenikają przez chmury, to jednak nie są wolne od wpływu czynników atmosferycznych. Przy niższych częstościach (np. zakres L), na zdjęciach radarowych nie widoczne są ani chmury, ani opady deszczu. Natomiast w zakresie X obfite opady mogą zmieniać echo radaru, a w wypadku częstości K chmury mogą być odwzorowane na zdjęciu. Także silne turbulencje, których natężenie nie jest kompensowane stabilizacją anteny, wywołują niekorzystne efekty (Leberl, 1990).

Potencjalne zastosowania teledetekcji mikrofalowej w leśnictwie dotyczą identyfikacji pokrywy leśnej, typów lasu, gatunków, struktury przestrzennej lasu i jego kondycji, a także określania parametrów drzewostanów, takich jak wysokość, liczba pni, zwarcie, czy zasobność na podstawie analiz współczynników odbicia poszczególnych obiektów (σ), rejestrowanych przez radary. Interpretacja zdjęć radarowych napotyka jednakże trudności wynikające z zupełnie innych, w porównaniu do zakresów optycznych, praw fizycznych rządzących mikrofalami. A ponadto wciąż jeszcze brak jest wystarczającej wiedzy empirycznej, szczególnie w zakresie wstecznego odbicia mikrofal przez różnego rodzaju roślinność.

W celu poznania reguł rządzących rozpraszaniem mikrofal od obiektów leśnych, tworzone są modele symulujące strukturę drzewostanów. Ich zastosowanie umożliwiło określenie najważniejszych parametrów, które wpływają na charakterystyki lasu w zakresach mikrofalowych (Ulaby i in., 1990; Karam i in., 1992). Takim parametrem jest nie tylko wartość bezpośredniego odbicia od drzewostanów, ale także stopień rozproszenia promieni w warstwie roślinności oraz wtórne odbicie fal od gałęzi, pni, liści i podłoża. Zmiennymi są tutaj wielkości liści (porównywalne lub mniejsze od długości mikrofal), przestrzenna dystrybucja drzew, konarów i gałęzi oraz ich rozmiary.

Według Karama i in. (1992) modele wstecznego odbicia lasu muszą uwzględniać, co najmniej, warstwy: koron, pni oraz podłoża. W części modelu dotyczącego koron, gałęzie powinny być pogrupowane według ich rozmiarów i orientacji przestrzennej. Rola gałęzi w wartości odbicia promieniowania mikrofalowego, szczególnie w drzewostanach liściastych, może być większa, niż samych liści. Na obraz lasu na zdjęciu radarowym wpływają też istotnie promienie wtórnie odbite, szczególnie w zakresie interakcji “pień-podłoże”, a ich wpływ zależy od wilgotności gleby oraz jej “szorstkości”. Innym elementem decydującym o charakterystykach rozproszenia mikrofal odbitych od lasu, jest roślinność podokapowa. W przypadku fal krótkich (X, C) ma ona mniejsze znaczenie, ale dla fal długich (L),

jego rola jest istotna. Natomiast cechy morfologiczne drzew mają mniejszy wpływ na wartość echa fal długich (Hoekman, 1990).

Held i in. (1988) uważają, że do analiz wizualnych zdjęć radarowych użyteczne jest tworzenie kompozycji barwnych z zakresów P, L i C, gdyż w każdej z tych częstotliwości występują inne mechanizmy wstecznego odbicia promieni mikrofalowych. Takie podejście jednak jest nie do przyjęcia w operacyjnym stosowaniu zdjęć radarowych, gdyż poza misjami ściśle badawczymi, na pokładzie satelity lub samolotu umieszcza się zazwyczaj aparaturę operującą tylko w jednym zakresie mikrofalowym, a użytkownik zdjęć nie ma możliwości wyboru częstotliwości, które byłyby optymalne dla konkretnych zastosowań.

Wyniki programu MAESTRO-1, realizowanego przez ośrodek badawczy Komisji Wspólnot Europejskich — JRC w Ispra i Europejską Agencję Kosmiczną (Held i in., 1988) wykazują, że istnieją duże różnicowania pomiędzy zobrazowaniami otrzymywanymi w różnych zakresach i przy różnej polaryzacji anteny. Analiza zdjęć drzewostanów iglastych i plantacji topolowych, wykonanych przy polaryzacji anteny HH, dowiodła, że zakres P zawiera więcej informacji o roślinności niż zakres C. Natomiast zakres L jest pośrednim, jednakże większość elementów na takim zdjęciu jest w lepszej relacji do zakresu P, niż C.

W wypadku wykorzystywania zdjęć radarowych do szacowania zasobności drzewostanów, także zauważono większą użyteczność promieniowania o mniejszej częstotliwości. Szczególnie zastosowanie zakresów L i P wydaje się obiecujące. Ogólnie można stwierdzić, że wyniki korelacji wartości σ_0 , otrzymanych ze zdjęć, dla poszczególnych drzewostanów z ich parametrami terenowymi poprawiają się wraz ze wzrostem długości fal promieniowania mikrofalowego.

Mimo że fale o częstotliwości C nie przenikają w głąb lasu, to jednak istnieje możliwość stratyfikacji drzewostanów i w tym zakresie częstotliwości, który pozwala w niektórych przypadkach wyróżnić, na podstawie zmienności σ_0 , drzewostany świerkowe oraz sosnowe zwarte i luźne (Held i in., 1988). Ponadto zakresy C i X powinny znaleźć zastosowanie do określania granic poszczególnych drzewostanów, klasyfikacji typów lasu, monitorowania rozwoju fenologicznego i procesów fizjologicznych, a także do wykrywania stresu i klęsk w lasach (Hoekman, 1990).

Westman i Paris (1987), którzy prowadzili badania nad radarowymi charakterystykami drzewostanów iglastych, stwierdzają, że zakres C jest dosyć czuły na zmiany zasobności aparatu asymilacyjnego, ugałęzienie drzew, biomasę i zasobność wody. Podkreślają również, że powierzchnia aparatu asymilacyjnego odgrywa większą rolę w wartości odpowiedzi spektralnej lasu niż wielkość masy tego aparatu. Natomiast dolne piętra nie wpływają znacząco na wartość współczynnika odbicia drzewostanu, nawet jeżeli charakteryzuje się on luźnym zwarciem. Utworzony przez autorów model lasu pozwolił określić parametry, które mają największy wpływ na wartości współczynnika wstecznego odbicia od lasu, w zakresie C. Są to: obecność wilgotnych pni i gałęzi, kąt nachylenia gałęzi oraz ich grubość. Ta ostatnia cecha może mieć różny wpływ, w zależności od kąta padania promieni radarowych. Ponadto autorzy sugerują, że w drzewostanach iglastych wertykalne polaryzacje anteny umożliwiają określanie powierzchni projekcyjnej liści (LAI-leaf area index) oraz biomasy całkowitej drzewostanu. Natomiast polaryzacja VH może być użyteczna do szacowania biomasy gałęzi, szczególnie w drzewostanach zwartych.

Polaryzacja anteny w istotny sposób wpływa na rozróżnialność obiektów na zdjęciu radarowym. Analizując różne ustawienia anteny stwierdzono dla zakresu P najlepszą rozróżnialność poszczególnych drzewostanów jednogatunkowych przy polaryzacji HV i HH, a najgorszą przy VV (Held i in., 1988; Le Toan i in., 1992). Takie same parametry są najlepsze przy wykorzystywaniu zdjęć radarowych do szacowania zasobności drzewostanów, z tym że dokładność szacunku rośnie wraz ze zmniejszaniem się wartości kąta θ .

Równoległe z kontynuacją badań nad możliwościami zastosowań teledetekcji radarowej, prowadzone są prace aplikacyjne. Pierwsze operacyjne zastosowania zdjęć mikrofalowych w leśnictwie miały miejsce w połowie lat 1960, kiedy to, po seriach eksperymentów, wykorzystywano radary lotnicze RAR (zakres Ka) do kartowania lasów Panamy i Kolumbii, dla których, z powodu stałej pokrywy chmur, nigdy przedtem nie pozyskano danych teledetekcyjnych. Podczas tej inwentaryzacji wydzielono 4 klasy lasów zrzucających liście, 4 klasy wilgotnych lasów tropikalnych oraz 3 klasy przekształceń antropogenicznych, jakie obserwowano na obszarach leśnych. Kolejne operacyjne inwentaryzacje tego typu miały miejsce w Amazonii, gdzie w latach 1973–79, na podstawie lotniczych zdjęć radarowych klasyfikowano lasy w 10 stopniowej skali, a także szacowano zasoby drzewne na podstawie blisko 900 jednohektarowych powierzchni próbnych (Trevett, 1986).

Wraz z zastosowaniem techniki radarowej w teledetekcji środowiska, rozpoczęto prace nad jej wykorzystaniem do wykrywania i śledzenia pożarów. Szczególnie istotne jest tutaj opracowanie modelu promieniowania elektromagnetycznego w celu zdefiniowania mikrofalowych parametrów ognia na różnych etapach rozwoju pożaru. Trudności następcza określenie dielektrycznych charakterystyk palonej materii oraz pasywne pomiary mikrofalowe obiektów o wysokiej temperaturze. Wstępne wyniki tych prac wskazują jednak na możliwość wykorzystania emisji mikrofalowej do wykrywania wzrostu temperatury obiektów (Coppo i in., 1991).

W latach 1981–1993, USA i Niemcy umieszczały radary także na wahadłowcach. Obrazowały one powierzchnię Ziemi ze stosunkowo niskich orbit (225–250 km), wykonując zdjęcia w zakresach L, C i X, przy polaryzacji anteny HH i VV, kącie θ od 15 do 60°, z terenową rozdzielczością od 15 do 40 m.

O zainteresowaniu techniką radarową, jako narzędziem monitorowania środowiska, może świadczyć przygotowywana aktualnie przez ESA i JRC kampania EMAC 94/95 (European Multisensor Airbone Campaign). Jej celem jest sprawdzenie użyteczności szerokiej gamy sensorów do oceny stanu i przekształceń środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem lasów. Testowana będzie aparatura skonstruowana w Danii, Finlandii, Francji, Holandii, Kanadzie, Niemczech, Rosji i USA (8 typów SAR, 5 typów spektrometrów obrazowych i 3 typy radiometrów mikrofalowych, obejmujących w sumie około 15 zakresów spektralnych). Część tych prac będzie prowadzona w Ośrodku Teledetekcji i Informacji Przestrzennej (OPOLIS) Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie, na poligonach badawczych zlokalizowanych m.in. w Sudetach i na pogorzelsku koło Kuźni Raciborskiej.

Próby wykorzystania radarów do monitorowania lasów podjęto także przy okazji 180 dniowej misji amerykańskiego satelity SEASAT w roku 1978. Przeznaczony on był do badania mórz i oceanów, jednakże zdjęcia przez niego wykonywane były również wykorzystywane do oceny lądowych zasobów naturalnych. Stwierdzono wówczas, że z punktu

widzenia kartowania użytkowania Ziemi, SAR jest co najmniej tak samo użyteczny do wydzielenia roślinności, jak optyczny skaner wielospektralny (MSS) zainstalowany na satelicie Landsat (Trevett, 1986), a ponadto ma on tę przewagę nad MSS, że może pozyskiwać informacje niezależnie od warunków pogodowych, co ma szczególne znaczenie nie tylko w tropikach, ale i w naszych szerokościach geograficznych, gdzie często występująca pokrywa chmur stanowi istotną przeszkodę w operacyjnym stosowaniu zdjęć satelitarnych.

Zobrazowania wykonane przez satelitę SEASAT były tak interesujące, że wkrótce rozpoczęto prace nad kolejnymi satelitami wyposażonymi w aparaturę mikrofalową, takimi jak: rosyjski ALMAZ-1 (umieszczony na orbicie w 1991 r.), ERS-1 (European Remote Sensing Satellite — 1991 r.) Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) i japoński JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite — 1992). W ostatniej fazie przygotowań znajdują się: kolejny satelita europejski ERS-2 (przewidziany do wprowadzenia na orbitę w 1995 r.) oraz kanadyjski RADARSAT (1995) i rosyjski ALMAZ-1B (1996). W tabeli 3 przedstawiono wybrane charakterystyki tych satelitów.

TABELA 3
Wybrane charakterystyki satelitów radarowych

Nazwa parametru	Satelita					
	SEASAT (USA)	ERS1/ERS2 (ESA)	JERS-1 (Japonia)	ALMAZ 1 (Rosja)	RADARSAT (Kanada)	ALMAZ 1B (Rosja)
Rok umieszczenia na orbicie	1978	1991/5	1992	1991	1995	1996
Zakres mikrofalowy	L	C	L	S	C	S
Kąt θ	20	23	44	30–60	20–45	25
Polaryzacja anteny	HH	VV	HH	HH	VV	HH
Rozdzielczość terenowa (m)	25	30	20	15	28	15
Wysokość orbity (km)	800	785	568	280	1000	280
Pole widzenia (km)	100	100	75	25–30	130	25–30

Głównym celem wyposażenia satelitów teledetekcyjnych w aparaturę radarową jest badanie mórz i oceanów oraz procesów lodowych. Wspomniany już ERS-1 posiada urządzenia pozwalające mierzyć wiele parametrów, które dotychczas nie były rejestrowane przy wykorzystaniu innych systemów satelitarnych. Są to, między innymi, stan sfalowania morza, prędkość i kierunek wiatrów przy powierzchni morza, kierunki i prędkość prądów morskich oraz stan zlodzenia mórz (Baranowska, 1993). Satelita ERS-1 został wyposażony w cały kompleks urządzeń radarowych do pozyskiwania danych, zarówno w systemie aktywnym, jak i pasywnym. Spośród nich jedynie radiolokator, czyli aktywny system mikrofalowy (AMI-Active Microwave Instrument), w module obrazowym z anteną syntetyczną (Synthetic Aperture Radar Image Mode), przeznaczony jest również do sporządzania wysokorozdzielczych zdjęć obszarów lądowych. Radiolokator SAR wykonuje zdjęcia pasa terenu o szerokości 100 km, po prawej stronie rzutu orbity na powierzchnię Ziemi.

Parametry aparatury obrazującej, zainstalowanej na pokładzie satelity ERS-1 (operującej częstotliwością C i polaryzacją anteny VV), nie są optymalne z punktu widzenia analiz roślinności. JERS-1, rejestrujący zakres L, wydaje się lepiej nadawać do zastosowań lądowych. Jednakże Europejska Agencja Kosmiczna, dostrzegając możliwości wykorzystania zdjęć, wykonywanych przez swego satelitę, uruchomiła wiele pilotowych projektów badawczych, mających na celu określenie przydatności tych zdjęć do badania roślinności i inwentaryzacji przyrodniczych. Dwa z tych projektów są wykonywane w OPOLIS-IGiK, a jeden z nich (No. PP-PL-3) dotyczy wykorzystania zobrażeń ERS-1 do monitorowania lasów. Nasz udział w tych pracach wynika z przekonania, że łatwość pozyskiwania zobrażeń ERS-1 z terenu Polski bez względu na warunki pogodowe, stanowi ogromny atut tego satelity. A ponadto zdjęcia radarowe stwarzają możliwości obrazowania obszarów szczególnego zainteresowania, dla których pozyskanie zdjęć w zakresach optycznych jest niemożliwe, np. zasnuty dymami obszar pożaru i pogorzeliska w pobliżu Kuźni Raciborskiej.

Prace prowadzono na poligonach badawczych zlokalizowanych w Sudetach, Puszczy Kozienickiej i pogorzelisku koło Kuźni Raciborskiej (Karlikowski i Zawila-Niedźwiecki, 1993; Zawila-Niedźwiecki i in., 1994). Analizując zdjęcia z obszaru Sudetów wykorzystywano leśny system informacji przestrzennej (SIP), obejmujący lasy należące do Karkonoskiego Parku Narodowego oraz nadleśnictw: Świeradów, Szklarska Poręba oraz Śnieżka. System ten, sporządzony w systemie INTERGRAPH, posiada m.in. numeryczny model terenu (NMT), który był niezwykle przydatny w analizach przestrzennych zdjęć ERS-1, ze względu na zróżnicowane oświetlenie poszczególnych stoków. Sudecki SIP umożliwił także precyzyjną lokalizację, na zdjęciu satelitarnym, drzewostanów, których parametry, zgromadzone w relacyjnej bazie danych, były porównywane z charakterystykami spektralnymi rejestrowanymi przez radar.

W wyniku tych prac można stwierdzić, że plamistość bardzo utrudnia interpretację zdjęć pojedynczych. Natomiast kompozycje barwne utworzone z wieloterminowych zobrażeń, dostarczają wielu interesujących informacji. Analogicznie do interpretacji zdjęć satelitarnych wykonywanych w zakresach optycznych, wizualne analizy zobrażeń radarowych dają dokładniejsze wyniki z punktu widzenia rozpoznawania i precyzji lokalizacji poszczególnych klas interpretacyjnych. Wykorzystując kompozycje barwne, w skład których wchodzi zdjęcia ERS-1 wykonane w różnych porach roku, można wydzielić drzewostany starszych klas wieku, młodniki, oraz zręby i wylesienia, a także znaczne rozluźnienia zwarcia. Wyraźnie widoczna jest granica polno-leśna. Natomiast nie udaje się stratyfikować drzewostanów o różnym składzie gatunkowym, jak i określać poszczególne parametry drzewostanów. Ponadto interpretacja piętra kosówki i alpejskiego na obszarze Sudetów, w związku z ukształtowaniem terenu i silnym echem od skał i kosodrzewiny, nasuwa wiele trudności i niejednokrotnie wręcz staje się niemożliwa. Na obszarze płaskim te trudności nie występują, a interpretacja kompozycji barwnej jest stosunkowo łatwa. Podczas interpretacji stwierdzono użyteczność filtracji niskich częstotliwości przestrzennych oraz segmentacji obrazu, dzięki którym następuje zredukowanie plamistości i wypuklenie różnych elementów terenowych. Należy podkreślić, że bezpośrednia analiza zdjęcia ERS-1 z obszaru górskiego, bez pomocy NMT, jest niezwykle trudna i wymaga dobrej znajomości obiektu badań. Dystorsja obrazu oraz cień są dużą przeszkodą w interpretacji zdjęć i znacznie utrudniają wykonywanie klasyfikacji cyfrowych.

Podsumowując wyniki pierwszych w Polsce zastosowań teledetekcji radarowej w leśnictwie należy stwierdzić, że zdjęcia mikrofalowe mogą być z powodzeniem stosowane, jako dodatkowe źródło informacji o środowisku leśnym. Szczególną ich rolę można upatrywać w obrazowaniu terenów, dla których pozyskanie zdjęć optycznych jest niemożliwe z powodu warunków atmosferycznych. Z drugiej strony wykorzystanie zdjęć radarowych może być optymalne jedynie z zastosowaniem systemów informacji przestrzennej, w których obrazowa warstwa informacyjna jest uzupełnieniem danych opisowych, zgromadzonych w relacyjnej bazie danych.

Literatura

1. **Baranowska T.**, 1993: Wykorzystanie danych rejestrowanych z satelity ERS-1 w badaniach środowiska geograficznego. *Przegląd Kartograficzny* (w druku).
2. **Coppo P., Fini S., Luzi G., Mazzoni T., Febrazzoli P., Guerriero L. and Lio G.**, 1991: Microwave Radiometry to Monitor Forest Fires: Operational Aspects and Model Analysis. *Proceedings of the 11-th EARSeL Symposium*, Graz: 334–343.
3. **Held D.N., Brown W.E., Freeman A., Klein J.D., Zebker H., Salto T., Miller T., Nguyen J.D. and Lou Y.**, 1988: The NASA/JPL Multifrequency, Multi-Polarisation Airborne SAR System. *Proc. IGARSS'88*, Edinburgh, Scotland, pp. 345–350.
4. **Hoekman D.H.**, 1990: Radar Remote Sensing Data for Applications in Forestry. Ph. D. Thesis, Wageningen Agriculture University, The Netherlands, 279 pp.
5. **Karam M.A., Fung A.K., Lang R.H. and Chauhan N.S.**, 1992: A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, Vol. 30, No. 4, pp. 767–784.
6. **Karlikowski T., Zawila-Niedźwiecki T.**, 1993: Remote Sensing and GIS in Fire Management of Polish Forests. *Proceedings of the International Workshop on Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management*, held in Thessaloniki, Greece, 4–6 November 1993.
7. **Kong J.A. (red.)**, 1990: Polarimetric Remote Sensing. PIER 3 — Progress in Electromagnetics Research. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 520 pp.
8. **Leberl F.W.**, 1990: Radargrammetric image processing. Artech House, Boston-London, 595 pp.
9. **Lee J.S.**, 1981: Speckle analysis and smoothing of syntetic aperture radar images. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 17, pp. 24–32.
10. **Lee J.S.**, 1983: A simple speckle smoothing algorithm for syntetic aperture radar images. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-13, No 1, pp. 85–89.
11. **Le Toan T., Beaudoin A., Riom J. and Guyon D.**, 1992: Relating Forest Biomass to SAR Data. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, Vol. 30, No 2, 403–411.

12. **Lichtenegger J. and Dallemand J.F.**, 1989: Principles of Radar Imagery. FAO, Rome, 42 pp.
13. **Richardson K.A., Sun G.Q. and Simonett D.S.**, 1987: L-Band Radar Backscattering Modelling of Forest Stands. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, Vol. GE-25, No 4.
14. **Trevett J.W.**, 1986: Imaging Radar for Resources Surveys. Chapman and Hall, London-New York, 313 pp.
15. **Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M. and Dobson M.C.**, 1990: Michigan Microwave canopy scattering model. Int. J. Remote Sensing, Vol. 11, No. 7, pp. 1223–1253.
16. **Werle D.**, 1989: Radar Remote Sensing for Application in Forestry. A Literature Review for Investigators and Potential Users of SAR Data in Canada. Canada Centre for Remote Sensing, Technology Transfer Program/Application Division, Ottawa, Ontario, Canada, 42 pp.
17. **Westman W.E. and Paris J.E.**, 1987: Detecting Forest Structure and Biomass with C-Band Multipolarization Radar: Physical Model and Field Tests. Remote Sensing of Environment, No. 22, pp. 249–269.
18. **Zawiła-Niedźwiecki T.**, 1993: Use of satellite data and GIS technology for forest damage monitoring. Final report of the CEC-JRC Project No 2484. Laboratory of Remote Sensing and Forest Management, University of Gent, Belgium.
19. **Zawiła-Niedźwiecki T., Bochenek Z., Strzelecki P.**, 1994: Wykorzystanie zdjęć satelitarnych ERS-1 w inwentaryzacji szkód leśnych. Prace IGiK (w druku).

*Z Ośrodka Teledetekcji i Informacji Przestrzennej — OPOLIS
Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie*

Summary

Paper summarises the use of microwave remote sensing to forestry and presents first Polish experiences with the use of radar satellite data. ERS-1 images from different Polish forests were analysed to verify its utility.

Single radar images are rather difficult to interpret and classify. However multitemporal colour composites permitted to distinguish mature and young stands, clear-cuts, deforestations, afforestations as well as loose canopy closure due to defoliation and mortality of trees. Accuracy was similar to accuracy of TM classifications. No possibility of distinguishing stand composition was found.

In mountainous regions, due to distortion effects, interpretation of ERS-1 images is difficult and the use of DTM and other spatial data stored in a GIS is strongly recommended.