

Historia i wykorzystanie zdjęć radarowych

History and application of imaging radar

Maria GRUSZCZYŃSKA

RADAR is an acronym for **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging. It measures the strength and round-trip time of the microwave signals that are emitted by a radar antenna and reflected off a distant surface or target. Imaging radars operate at a specific wavelength in the range 1 cm to 1 m, which corresponds to a frequency range of about 300 MHz to 30 GHz and polarizations (in a single vertical or horizontal plane). Given that the radar pulse travels at the speed of light, it is relatively straightforward to use the measured time for the roundtrip of particular pulse to calculate the distance or range to the reflecting target. As an active sensor, radar is independent of the sun and can operate day or night independently of weather conditions. Imaging radar can be considered a relatively new remote sens-

ing system in comparison to aerial photography. Civilian applications in the geosciences have been widely investigated since the 1960s. However, the history of radar exploration and reflection of radio waves from targets predates this time by many years. The first experiment that used radio waves close to microwaves frequency was presented by Hertz in 1886. The first patent for using radar as a ship detector was obtained by Hulsmeyer in 1904. Significant advances in radar have been made during World War II. From this time the expansion of imaging radar research continues due to increasing requirements of multi-dimensional digital radar data. The paper presents a history of imaging radar and its application in geosciences.

Słowo RADAR jest akronimem pochodzącym od słów *Radio Detection And Ranging*. Po raz pierwszy użyli tej nazwy oficerowie marynarki wojennej USA F.R. Furth i S.M. Tucker w latach 30. dla prostego urządzenia zastosowanego do wykrywania statków i samolotów. Oznacza ono urządzenie zdolne do wykrywania obiektów na podstawie pomiaru różnicy czasu i energii wysłanej i odebranej fali elektromagnetycznej poruszającej się z prędkością światła. W Polsce przyjęła się nazwa radiolokator. Należy do systemów aktywnych, ponieważ wytwarza i transmituje własną energię elektromagnetyczną, w odróżnieniu od systemów pasywnych rejestrujących promieniowanie pochodzące z innych źródeł. Radiolokatory wykorzystują wąski zakres mikrofalowy promieniowania elektromagnetycznego oznaczany kodami literowymi. Zakresy te przedstawione są w tabeli 1.

Główne części urządzenia to: antena, nadajnik, modulator drgań, odbiornik i system rejestracji (optyczny, cyfrowy). Umieszczony na pokładzie samolotu lub satelity umożliwia w sposób ciągły obrazowanie pasa powierzchni Ziemi, dlatego w Polsce przyjęła się nazwa radiolokator obrazowy (*imaging radar*).

Tabela 1.

Zakresy promieniowania mikrofalowego stosowane w radiolokatorach (Schreier, 1993)

Microwave frequencies and bands (Schreier, 1993)

Kod Band	Częstotliwość Frequency [GHz]	Długość fali Wavelength [cm]
P	0,225–0,390	133–76,9
L	0,390–1,550	76,9–19,3
S	1,55–4,20	19,3–7,1
C	4,20–5,75	7,1–5,2
X	5,75–10,90	5,2–2,7
K	10,9–36,0	2,7–0,83
Q	36,0–46,0	0,83–0,65
V	46,0–56,0	0,65–0,53
W	56–100	0,53–0,30

Właściwości wysłanego i odbitego od różnych obiektów promieniowania elektromagnetycznego po raz pierwszy zademonstrował w roku 1886 roku w Niemczech H. Hertz. W 1903 roku C. Hulsmeyer przedstawił skonstruowane przez siebie proste urządzenie radarowe. Był to tak zwany telemobiloskop. Zastosował je do określa-

nia pozycji statków przy złej widoczności. Urządzenie to zostało przez C. Hulsmeyera opatentowane w 1904 r. Lata 20. i 30. naszego stulecia przyniosły rozwój naziemnych radiolokatorów pulsacyjnych, których pionierami byli naukowcy skupieni wokół A.H. Taylora z U.S. Naval Research Laboratory (USA) oraz wokół R. Watson-Watta (Wlk. Brytania). Zastosowali oni promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali 25 m do wykrywania odległych obiektów wojskowych, torując tym samym drogę do szybkiego rozwoju techniki radarowej dla celów militarnych. Wymagania stawiane przez wojsko doprowadziły wkrótce do stosowania fal krótszych o długości około 10 cm.

Pierwszy radiolokator, obrazujący powierzchnię ziemi użyty był podczas II wojny światowej. Antena radiolokatora zainstalowanego na pokładzie samolotu obracała się wokół osi o 360° , dając w rezultacie kołowy obraz powierzchni ziemi. Sygnały odbieranej energii mikrofalowej były wyświetlane na ekranie lampy katodowej CRT (*Cathode Ray Tube*). Do dziś stosuje się nadane wtedy kody literowe zakresów promieniowania mikrofalowego (tabela 1).

Po II wojnie światowej, w latach 50. nastąpił dalszy rozwój techniki radarowej. Jego efektem było skonstruowanie na Uniwersytecie Michigan (USA) w 1953 roku lotniczego radaru bocznego wybierania o nazwie SLAR (*Side-Looking Airborne Radar*) z anteną o rzeczywistej aperturze RAR (*Real Aperture Radar*), dającego ciągły obraz pasa powierzchni Ziemi, równoległego do lotu samolotu. Urządzenie przeznaczone było do celów militarnych, do rekonesansu terenu. Wymagania związane z dużą rozdzielczością obrazu ograniczały jednak zakres działania radaru z anteną rzeczywistą do niskiej wysokości nad terenem, krótkiego zasięgu rejestrowanego pasa powierzchni Ziemi i użycia fal krótkich. Pierwsze dwa ograniczenia limitują wielkość obrazowanego terenu, a stosowanie fal krótkich powoduje, że są one tłumione i rozpraszane w atmosferze. Udoskonaleniem techniki RAR, która wymaga użycia anten o dużych rozmiarach w celu otrzymania obrazów o wysokiej rozdzielczości azymutalnej (wzdłuż lotu), jest radiolokator z anteną syntetyczną SAR (*Synthetic Aperture Radar*) skonstruowany przez C. Wileya z Goodyear Aerospace (USA). System ten stosuje antenę krótką, lecz dzięki modyfikacji techniki zapisu i przetwarzania odbieranych sygnałów mikrofalowych syntetyzuje efekt bardzo długiej anteny. Sygnały pochodzące od tego samego obiektu, rejestrowane w czasie przesuwania się radiolokatora nad nim, są zapamiętywane, a następnie sumowane koherentnie (zgodnie z fazą i amplitudą) powodując zwiększenie rozdzielczości azymutalnej, która nie zależy już od odległości pomiędzy anteną i obiektem. Koncepcja ta miała również zastosowanie w latach 70. przy konstrukcji pierwszego satelitarnego radiolokatora obrazowego przeznaczonego do celów cywilnych. W latach 60. oba systemy radarowe SLAR-RAR i SAR zostały udostępnione w celach cywilnych, a w latach 70. pracowały już na skalę komercyjną w wielu misjach lotniczych, głównie dla celów kartograficznych i geologicznych. W tabeli 2 przedstawiono ważniejsze z nich,

w tym również misje planowane (Lo, 1986; Werle, 1988; Simonett, Ulaby, 1983; Freeman, 1996).

System Westinghouse APQ-97 RAR został skonstruowany w USA pod koniec lat 50. i wykorzystywał zakres K promieniowania mikrofalowego. W warunkach operacyjnych, umieszczony na pokładzie samolotu DC-6B dostarczał w czasie rzeczywistym obrazów, udostępnionych w postaci fotograficznej w skali 1:250 000. Zdjęcia te były wykorzystywane w wielu projektach z zakresu geologii, leśnictwa i użytkowania ziemi w USA i Kanadzie. Charakteryzowały się szerokim zakresem tonalnym i wysoką rozdzielczością. System pracował do 1973 r.

System Motorola skonstruowany w USA w latach 60., zaraz po deklasyfikacji radiolokatora jako narzędzia zwiadu wojskowego, podobnie jak Westinghouse, wykorzystywał antenę rzeczywistą (RAR), lecz różnił się zakresem generowanej fali elektromagnetycznej — X, zamiast K. Ponadto posiadał dwie anteny (długości 5 m każda), umożliwiające obrazowanie pasa powierzchni terenu znajdującego się po obu stronach samolotu (*dual imaging radar*). Dostarczał on zdjęcia wykonywane również w czasie rzeczywistym w skali 1:250 000, 1:500 000 lub 1:1 000 000, w zależności od przyjętego zasięgu padania wiązki mikrofalowej (25, 50 lub 100 km). Zdjęcia były równocześnie przekazywane do stacji naziemnej, a operator sprawujący kontrolę jakości lotu mógł decydować, które z nich usunąć z powodu zbyt dużych zniekształceń. Firma Motorola nie była zainteresowana dalszym wykorzystywaniem systemu i sprzedała go w 1975 roku firmie *Motorola Aerial Remote Sensing Inc.* System ten działał później pod nazwą MARS (akronim od pierwszych liter nazwy firmy), a zdjęcia, które dostarczał wykorzystywane były w wielu dziedzinach gospodarki. W 1984 roku do istniejącego systemu rejestracji optycznej obrazów dodano system rejestracji cyfrowej. Działał do 1985 roku, kiedy to był ostatni raz wykorzystany do rozpoznania stopnia zlodzenia wschodniego wybrzeża północnej Kanady.

System Goodyear skonstruowany pod koniec lat 60. w USA, posiadał radiolokator z anteną syntetyczną SAR i znany jest jako GEMS (*Goodyear Electronic Mapping System*). System ten, podobnie jak system MARS, wykorzystywał również zakres X promieniowania mikrofalowego. Jak wynika z istoty działania radiolokatora typu SAR, nie miał on możliwości dostarczania zdjęć powierzchni rejestrowanej w czasie rzeczywistym, a więc i kontroli ich jakości, jak miało to miejsce w przypadku systemu MARS. Zdjęcia generowane były w skali 1:400 000, a produkowane w zależności od zamawiającego poprzez powiększanie lub zmniejszanie filmu źródłowego, będącego zapisem holograficznym (film barwny zamiast dotychczas stosowanego czarno-białego). System stosowany był z wielkim sukcesem w wielu badaniach, nie tylko w USA, ale także w innych krajach (Brazylia, Australia, Filipiny, Kolumbia, Boliwia i innych).

Jednym z najbardziej rozwiniętych lotniczych systemów radarowych SAR był system ERIM (*Earth Resources Institute of Michigan*) skonstruowany w 1973 roku w USA. Wykorzystywał on dwa zakresy promieniowania

Tabela 2.

Lotnicze radiolokatory obrazowe (wybrane)
Airborne imaging radar

Producent, Kraj, Rok <i>Company, Country, Launch date</i>	Model <i>Model</i>	Typ <i>Type</i>	Długość fali [cm], <i>Wave- length,</i>	Kod Band	Rozdzielczość azymu- talna zasięgu [m] <i>Resolution</i>		Szerokość pasa wybiera- nia [km] <i>Swath width</i>	Rodzaj polaryzacji <i>Polarization</i>
					azimuth <i>range</i>			
Westinghouse, USA, 1961	APQ-97	RAR	0,86	K	25	8	21	HH i HV
Goodyear, USA, koniec lat 60.	APD-10 APQ- 102 GEMS	SAR	3,1	X	10	10		HH
		SAR	3,1	X	15	15	37	HH
		SAR	3,2	X	10	12	37	HH
Motorola, USA od 1975 MARS	APS-85 APS- 94 APS-94D	RAR	2,5	X	116	75	100	HH
		RAR	2,5	X	116	75	100	HH
		RAR	2,5	X	116	30	100	HH
General Dynamics, USA	APQ-69	RAR	3,1	X	380	15	25	
Philco-Ford, USA	DPD-2	RAR/SAR	1,8	K	30-60	12-25	18	HH i VV
EMI, Wlk. Brytania	P 391	RAR	0,86	K	52	15	28	HH
Thomson CSF, Francja	VIGIE	SAR	3,22	X	30	15	21	HH
ERIM, USA, 1973	CV-580	SAR	3,2	X	1,5-5	2-5	5,4-20	HH i VV
CCRS, Kanada, 1986	SAR-580		5,7	C				
			23,5	L				
JPL NASA, USA, 1985	CV-990	SAR	23,5	L	10	20	8-15	HH, VV, HV, VH
JPL NASA, USA, 1987	DC-8 AIRSAR	SAR	5,6	C	10	7,5	5-15	HH i VV
			24,0	L	10	7,5	5-15	HH i VV
			67,0	P	10	7,5	5-15	HH i VV
CCRS, Kanada, 1987	C/X SAR	SAR	5,66	C	6-10	6-20	pionowe: 22 ukośne: 18	HH, VV, HV, VH
			3,24	X				
TOROS, ZSRR		RAR	2,5	X				HH i VV
INTERA, Kanada, 1983-1993	STAR1 STAR2	SAR	3,2	X	6/5	6-12/ 8-18	22,4/19 44,7/65, 63	HH
IEAS, Chiny, 1990	CASSAR- 4401A	SAR			10	10	35	HH, VV, HV, VH
NIVR, Holandia, 1990	PHARUS	SAR	56	C	1	3,75	3-14	HH, VV, HV, VH
DLR, Niemcy, 1994	ESAR	SAR	5,6	C	4	4		HH i VV
			24	L				
EMI, Dania, 1994	EMISAR	SAR	5,6	C	2	2	12	HH, VV, HV, VH
			24	L				
IRSA, EU, 1995	EARSEC-SAR	SAR	5,6	C				HH, VV, HV, VH
			24	L				
JPL NASA, USA, 1996	TOPSAR	SAR	6,0	C	10	10	12	HH, HV, VH, VV
			24,0	L				
			68,0	P				
Calgis Inc., JPL NASA, USA, 2000	GeoSAR	SAR	3,0	X	1-3	1-3	20	VV
			86,0	P	2-5	2-5	20	HH i HV lub VV i VH

RAR — radar z anteną rzeczywistą (*Real Aperture Radar*)

H — polaryzacja pozioma (*horizontal polarisation*)

GEMS — *Goodyear Electronic Mapping System*

JPL — *Jet Propulsion Laboratory*

ERIM — *Earth Resources Institute of Michigan*

INTERA — *Intera Technologies of Calgary, Alberta*

NIVR — *Netherlands Agency for Aerospace Programs*

DLR — *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt*

IRSA — *Institute for Remote Sensing Applications*

TOPSAR — *Topographic Mapping Synthetic Aperture Radar*

SAR — radar z anteną syntetyczną (*Synthetic Aperture Radar*)

V — polaryzacja pionowa (*vertical polarisation*)

MARS — *Motorola Aerial Remote Sensing Inc.*

NASA — *National Aeronautics and Space Administration*

CCRS — *Canada Centre for Remote Sensing*

IEAS — *Institute of Electronics Academia Sinica*

STAR — *Sea and Ice Terrestrial Assessment Radar*

EMI — *Department of Electromagnetic Systems of the Technical University of Denmark*

EARSEC — *European Airborne Remote Sensing Capability*

GeoSAR — *Geographic Synthetic Aperture Radar*

mikrofalowego — X i L, jak również oba rodzaje polaryzacji (pionową i poziomą). W 1978 roku system ten został zamontowany na samolocie Convair CV-580 należącym do CCRS (*Canada Centre for Remote Sensing*) i od tej pory znany jest pod nazwą SAR-580. W 1982 dodano jeszcze jeden zakres promieniowania mikrofalowego — C, nie stosowany dotąd w radiolokatorach lotniczych. Poza tym możliwość sterowania anteną pozwalała na wybór szerokości rejestrowanego pasa powierz-

chni terenu. System posiadał zarówno optyczny jak i cyfrowy zapis obrazu. Wykorzystywany był głównie w Kanadzie (CCRS) oraz w Europie (ESA) i Japonii w wielu kampaniach badawczych. System przyczynił się do przeprowadzenia niedostępnych wcześniej istotnych badań naukowych dotyczących zastosowania fal mikrofalowych o różnej częstotliwości i polaryzacji w wielu dziedzinach gospodarki.

Doświadczenia zdobyte przy budowie i działaniu

systemu SAR-580 przyczyniły się do skonstruowania przez naukowców z Intera Technologies Ltd. (Calgary, Kanada) radiolokatorów obrazowych STAR-1 i STAR-2, działających w zakresie X promieniowania mikrofalowego spolaryzowanego poziomo. Jedną z zalet radiolokatora typu STAR była możliwość jego montażu na różnego typu samolotach, czym różnił się od systemu SAR-580, wymagającego odpowiednio przystosowanej platformy nośnej. Był to pierwszy system typu SAR rejestrujący obrazy w czasie rzeczywistym na pokładzie samolotu i to zarówno metodą optyczną jak i cyfrową, przy możliwości przesyłania danych do stacji naziemnej. Działał zarówno w trybie bliskiego jak i dalekiego zasięgu (mniejsza rozdzielczość) z możliwością przełączania w trakcie lotu. Stosowany był na skalę operacyjną w ponad 35 krajach przez 10 lat. Zobrazowano za jego pomocą ponad 226 mln km² powierzchni Ziemi. Zdobyte doświadczenia przyczyniły się do rozwoju prac badawczych nad przyszłym systemem satelitarnym RADARSAT.

Naukowcy z JPL w Pasadenie (USA) skonstruowali lekki radiolokator obrazowy działający w zakresie L promieniowania mikrofalowego spolaryzowanego poziomo lub pionowo, który został zainstalowany na samolocie Convair CV-990, należącym do NASA. System ten znany powszechnie pod nazwą CV-990 SAR posiadał zarówno optyczną jak i cyfrową możliwość generowania obrazu. Pracował w wielu misjach badawczych, głównie nad obszarami arktycznymi. Po wypadku w 1985 roku, w czasie którego uległ zniszczeniu, został zastąpiony w 1987 roku przez bardziej rozbudowany system znany pod nazwą DC-8, od typu samolotu, na którym był zainstalowany, lub AIRSAR (*Airborne Synthetic Aperture Radar*). System ten był prototypem satelitarnego radiolokatora obrazowego SIR-C (*Spaceborne Imaging Radar-C*). AIRSAR działał w trzech zakresach promieniowania mikrofalowego: C, L, i P dostarczając wysokorozdzielczych zdjęć pasa powierzchni terenu przy różnych kombinacjach polaryzacji fali elektromagnetycznej (HH, HV, VH, VV). System AIRSAR wykorzystany był między innymi w europejskiej kampanii MAC (*Multi Sensor Airborne Campaign*) w 1991 roku.

W 1987 r. w Kanadzie w CCRS skonstruowano system C/X-SAR, który zainstalowany na pokładzie samolotu Convar CV-580 pracował pod różnymi kątami od 0° do 90° dostarczając zdjęcia o różnej rozdzielczości, od wysokiej tj. 6 × 6 m do rozdzielczości rzędu 20 × 10 m (odpowiednio w kierunku zasięgu i azymutu). Zdjęcia generowane były w czasie rzeczywistym na pokładzie samolotu i zapisywane w trojaki sposób: na taśmie magnetycznej HDDT (*High Density Digital Tape*), na papierze fotograficznym (tzw. *quick-look*) oraz na kasecie video. Na uwagę zasługują również systemy europejskie: ESAR (DLR, Niemcy) zainstalowany na pokładzie samolotu Do-228 i EMISAR (*Technical University*, Dania) zainstalowany na pokładzie samolotu Gulfstream G-3, które brały udział w kampanii EMAC (*European Multi Sensor Airborne Campaign*) w 1994 i 1995 roku. Zdjęcia, których dostarczyły, charakteryzowały się dużą rozdzielczością — odpowiednio 6 × 6 m i 2 × 2 m i były

wykorzystane w wielu badaniach, głównie z dziedziny rolnictwa i leśnictwa.

W 1996 roku naukowcy ze znanego konsorcjum NASA/JPL skonstruowali następny radarowy system lotniczy o nazwie TOPSAR (*Topographic Mapping Synthetic Aperture Radar*), który był zainstalowany na pokładzie samolotu DC-8. System ten może jednocześnie obrazować powierzchnię terenu w dwojaki sposób. W pierwszym z nich we wszystkich wariantach polaryzacji (HH, HV, VH, VV) w trzech zakresach promieniowania mikrofalowego — C, L, P, w drugim, we wszystkich wariantach polaryzacji w dwóch zakresach — L i P oraz oddzielnie w zakresie C jako interferometr (dwie anteny rejestrujące ten sam obiekt) służący do jednoczesnego generowania obrazu wysokości rejestrowanego terenu z dokładnością 1 m na obszarach płaskich i 5 m na obszarach górskich. Typowe zdjęcie TOPSAR przedstawia obszar o wymiarach 12 × 12 km i charakteryzuje się rozdzielczością 10 × 10 m. Następnym urządzeniem, nad którym pracują naukowcy konsorcjum, wykorzystując doświadczenia zdobyte przy budowie TOPSAR, jest system GeoSAR (*Geographic Synthetic Aperture Radar*), którego pierwszą misję zaplanowano na rok 2000. Jest to całkowicie nowe narzędzie służące do generowania trójwymiarowych (dzięki technice interferometrii), wysokorozdzielczych map, które będą wykorzystane w wielu dziedzinach gospodarki.

Sukcesy lotniczych radiolokatorów obrazowych pociągnęły za sobą prace nad budową urządzeń radarowych, które mogą być umieszczone na pokładzie satelity. W tabelach 3 i 4 zamieszczono krótkie charakterystyki radiolokatorów satelitarnych (Koopmans, 1993), w tym misje planowane w najbliższej przyszłości (Evens, 1995; Simonett, Ulaby, 1983; Trevett, 1986; Werle, 1988; Winokur, 1996).

Pierwszy satelita operacyjny wyposażony w radiolokator obrazowy typu SAR został skonstruowany w USA przez naukowców z NASA i JPL i wystrzelony 28 czerwca 1978 roku. Jego nazwa SEASAT wskazuje, że przeznaczony był do badań mórz i oceanów, jednak jako satelita orbitalny rejestrował również ląd. Radiolokator pracował w paśmie L i obrazował pod kątem 20°, 100-kilometrowy pas powierzchni Ziemi, znajdujący się po prawej stronie, wzdłuż kierunku lotu satelity. Satelita zakończył swoją misję w październiku 1978 roku z powodu awarii zasilania. Zdjęcia otrzymane z satelity SEASAT okazały się użyteczne w wielu dziedzinach nauki, co pociągnęło za sobą dalszy rozwój radarowej techniki satelitarnej. Stosowano je między innymi do określania kierunku rozprzestrzeniania się fal oceanicznych, ruchu lodów polarnych, kartowania struktur geologicznych, wilgotności gleby, charakterystyki roślinności i w innych dziedzinach nauk o Ziemi. Cieszą się one ciągle dużą popularnością i są wykorzystywane przez naukowców jako źródło historyczne lub do celów porównawczych z obecnie działającymi systemami.

W latach 80. rozpoczęła się seria amerykańskich wahadłowców kosmicznych (JPL, NASA) wyposażonych w radiolokatory obrazowe SAR, które pracowały na or-

Tabela 3.

Wahadłowce kosmiczne wyposażone w radiolokator obrazowy
Shuttle imaging radar

Parametry Parameters	SIR-A (USA)	SIR-B (USA)	SIR-C (USA)	SIR-C/X-SAR (USA, Niemcy, Włochy)	SRTM (USA)
Rok Launch date	1981	1984	1991, 1992	1994—dwukrotnie	1999
Rozdzielczość terenowa [m] Resolution	40	25*	15*	10–200	10–200
Szerokość pasa wybierania [km] Swath width	50	20–50	30–100	15–90 — L, C 15–40 — X	15–90
Częstotliwość, kod [GHz] Frequency, Band	1,28 L	1,28 L	1,28, 5,3, L, C	1,28, 5,3, 9,6 L, C, X	1,28, 5,3 L, C
Rodzaj polaryzacji Polarisation	HH	HH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH-L, C VV-X	VH, VV, HV, VH
Kąt widzenia [°] Incidence angle	47	15–60*	15–60*	20–65	20–65
Zapis danych Processing	optyczny	cyfrowy	cyfrowy	cyfrowy	cyfrowy
Wymiary anteny [m] Antenna size	9,4 × 2,16	10,7 × 2,16	12,1 × 2,8 (L) 12,1 × 0,8 (C)	12 × 4	12 × 4
Wysokość orbity [km] Altitude	259	225	225	225	225

* Zależy od kąta padania wiązki promieniowania na powierzchnię ziemi Depending on incidence angle

SIR — Shuttle Imaging Radar

V — polaryzacja pionowa (vertical polarisation)

H — polaryzacja pozioma (horizontal polarisation)

SRTM — Shuttle Radar Topography Mission

Tabela 4.

Satelity operacyjne wyposażone w radiolokator obrazowy (wybrane)
Satellite imaging radar

Parametry Parameters	SEASAT	ERS-1 ERS-2	ALMAZ 1	ALMAZ-1B	JERS-1	RADARSAT	ENVISAT	LightSAR
Kraj Country	USA	ESA	ZSRR	Rosja	Japonia	Kanada	ESA	USA
Rok wystrzelenia Launch date	1978	1991 1995	1991	1998	1992	1995	2000	2002
Rozdzielczość azymutalna zasięgu [m] Resolution azimuth range	25 25	7–30 11–33	10–30 12–30	5/7–30 4/7–22/40	18 18	28 (10–100) 28 (10–100)	30 30	3–100 3–100
Szerokość pasa wybierania [km] Swath width	100	100	40	20–450	75	35–500	100–400	15–250
Częstotliwość, kod [GHz] Frequency, Band	1,28 L	5,3 C	3,1 S	X, S, L	1,2 L	5,3 C	5,331 C	1,26 L
Rodzaj polaryzacji Polarisation	HH	VV	HH	X, S: VV L: HH, VV, HV, VH	HH	HH	HH, VV	HH, VV, HV, VH
Kąt widzenia [°] Incidence angle	20–26	23	20–65	20–65	35	20–59	13–39	20–52
Wymiary anteny [m] Antenna size	10,7 × 2,16	10 × 1	15 × 1,5	15 × 1,5	12 × 2,2	15 × 1,5	10 × 1,3	10,8 × 2,9
Wysokość orbity [km] Altitude	795	785	295	405	568	798	800	600

H — polaryzacja pozioma (horizontal polarisation)

ERS — European Remote Sensing Satellite

EOS — Earth Observation System

ESA — European Space Agency

V — polaryzacja pionowa (vertical polarisation)

JERS — Japanese Earth Resources Satellite

ENVISAT — Environment Satellite

bicie okołozemskiej około tygodnia każdy. Pierwszy z nich SIR-A został umieszczony przez NASA na wahadłowcu Columbia, na orbicie odległej od powierzchni Ziemi o 259 km w listopadzie 1981 roku. Podobnie jak SEASAT, SIR-A posiadał radiolokator bocznego wybierania pracujący w paśmie L. Różnił się natomiast kątem

wysyłania wiązki promieniowania mikrofalowego, który w przypadku SIR-A był większy i wynosił 50°. Dzięki temu zdjęcia wykonane w terenach górzystych były pozbawione dystorsji spowodowanych odwróceniem rzeczywistego kształtu obiektu (*layover*). Na takim zdjęciu najpierw zarejestrowany jest np. szczyt góry, potem jej

podstawa. Odbierane sygnały rejestrowane były metodą optyczną na filmie umieszczonym w kasecie, który po zakończeniu misji przetwarzany był w laboratorium w Pasadenie (JPL, USA). Zdjęcia radarowe SIR-A wykorzystywane były głównie do badań geologicznych i do celów kartograficznych. Wykazały możliwość penetracji promieniowania L nawet do kilku metrów w terenach pustynnych. W październiku 1984 roku rozpoczęła się misja wahadłowca kosmicznego Challenger, który wyniósł na orbitę następny system radarowy SIR-B, w celu kontynuacji badań geologicznych. W odróżnieniu od swego poprzednika, SIR-B wyposażony był w urządzenie pozwalające zarówno na optyczny jak i cyfrowy zapis odbieranych sygnałów. Poza tym, antena posiadała mechanizm pozwalający na zmianę kąta wysyłania wiązki promieniowania (od 20° do 50°). Dzięki temu, ten sam obiekt po raz pierwszy (z kosmosu) mógł być zobrazowany pod różnymi kątami. Kluczowym efektem misji wahadłowca SIR-B było otrzymanie radarowych zdjęć stereoskopowych dynamicznych zjawisk oceanicznych oraz zbadanie wpływu kąta padania wiązki promieniowania mikrofalowego (pasmo L) na wielkość sygnału odbitego od powierzchni odsłoniętych i pokrytych roślinnością. Zdjęcia otrzymane z SIR-B okazały się też niezwykle przydatne do kartowania lasów i do wykonywania map topograficznych jak również do oceny wilgotności gleb. Następny system radarowy tej serii SIR-C umieszczony został na takiej samej orbicie okołoziemskiej co SIR-B (225 km) dwukrotnie, w 1991 i 1992 roku. Jego prototypem był lotniczy radiolokator obrazowy AIR-SAR. W odróżnieniu od swych poprzedników, SIR-C miał możliwość transmisji i odbioru fali elektromagnetycznej spolaryzowanej poziomo lub pionowo we wszystkich kombinacjach (HH, VV, HV, VH), w dwu zakresach spektralnych, tj. L i C. To nowe narzędzie dostępne z pułapu satelitarnego wniosło duży wkład w badaniu Ziemi. Następny radarowy system satelitarny SIR-C/X-SAR jest wspólnym przedsięwzięciem NASA (USA), DARA (*Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten*, Niemcy) i ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*, Włochy). Powstał w wyniku połączenia amerykańskiego systemu SIR-C z niemiecko-włoskim X-SAR. Został umieszczony na wahadłowcu Endeavour dwukrotnie: 9 IV i 30 IX 1994 roku. Jego dziesięciodniowe misje dostarczyły setek zdjęć powierzchni Ziemi, wykonanych w trzech zakresach tj. L, C i X, we wszystkich kombinacjach polaryzacji i pod różnymi kątami padania wiązki mikrofalowej. Wykorzystywane one były do badania zmian klimatu i środowiska, w tym ruchu lądów i wód. Dostępność różnych typów polaryzacji pozwoliła na dokładniejsze pomiary wilgotności gleb obszarów nie pokrytych roślinnością, biomasy, na wykonanie dokładnych map pokrywy śniegowej, zasięgu powodzi, map litologicznych. Zastosowanie techniki interferometrii do badania obszarów wulkanicznych okazało się niezwykle przydatne do wykonywania prognoz wybuchów wulkanów i trzęsień ziemi oraz map szkód powstałych na skutek erupcji wulkanów i trzęsienia ziemi. Planowana na koniec 1999 r. amerykańska misja SRTM (*Shuttle Radar Topography*

Mission) jest wspólnym przedsięwzięciem NASA i Departamentu Obrony USA i powstała na bazie sukcesu misji SIR-C/X-SAR. Czas trwania misji wyniesie 11 dni. Jej głównym zadaniem jest wykonanie map topograficznych powierzchni Ziemi o dokładności, do tej pory niemożliwej do osiągnięcia na taką skalę. Radar ten wykona zobrazowanie prawie 80% powierzchni ziemi, z wyjątkiem obszarów okolicybiegunowych, o rozdzielczości przestrzennej 30 metrów i z dokładnością pomiarów wysokościowych 9–12 metrów. SRTM wykorzysta ten sam instrument, który znajdował się na wahadłowcu Endeavour w 1994 roku (SIR-C). W celu wykonania trójwymiarowych zdjęć topograficznych, system zostanie dodatkowo wyposażony w maszt o długości 60 metrów, na którym będzie zamontowana antena odbiorcza sygnałów mikrofalowych w paśmie C, jak również w dodatkowe anteny, umożliwiające otrzymywanie obrazów podobnych do stereoskopowych przez zastosowanie techniki interferometrii. Z uwagi na fakt, że aż 40% powierzchni Ziemi jest ciągle przykryte przez chmury (np. obszary międzyzwrotnikowe) i do tej pory nie posiada żadnych map, planowa misja ma olbrzymie znaczenie naukowe, cywilne i wojskowe.

Pierwszy europejski satelita operacyjny przeznaczony do badań środowiska ERS-1 (tabela 4) wyposażony między innymi w radiolokator obrazowy, został wystrzelony w lipcu 1991 roku przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA, 1989). W jego budowie, która rozpoczęła się w roku 1985, uczestniczyło 60 firm z 14 krajów. Satelita znajdował się na orbicie okolicybiegunowej zsynchronizowanej ze Słońcem, co umożliwiło obserwację całej kuli ziemskiej o jednakowej porze dnia (średni czas słoneczny przecięcia równika na orbicie zstępującej przypadał na godz. 10:30 GMT). Jako system operacyjny pracował od stycznia 1992 roku i choć czas jego pracy wyznaczono na 2–3 lata, działał do maja 1996 (od sierpnia 1995 wspólnie z satelitą ERS-2). Zainstalowany na pokładzie satelity aktywny system mikrofalowy AMI (*Active Microwave Instrument*) pracował w trzech trybach: jako radiolokator SAR z wysoką rozdzielczością obrazów (30 m) — tryb obrazowy (*SAR Image Mode*), jako radiolokator SAR z mniejszą rozdzielczością obrazów (5 × 5 km) — tryb falowy (*SAR Wave Mode*) oraz jako skaterometr wiatrowy (rozdzielczość 50 km). Mimo że misja satelity ERS-1 skierowana była głównie do badań oceanów i strefy przybrzeżnej oraz zlodzień, to podobnie jak w przypadku satelity SEASAT, zdjęcia radarowe wykorzystywane były dla lądów, w wielu dziedzinach nauki. Kompozycje barwne utworzone ze zdjęć wykonanych w różnych terminach okazały się cennym materiałem do badania roślin uprawnych i lasów. Zniekształcenia terenu (*layover*), spowodowane małym kątem (23°) padania promieniowania mikrofalowego okazały się jednak poważnym ograniczeniem stosowania tych zdjęć w terenach górskich.

W kwietniu 1995 roku ESA wystrzeliła drugiego satelitę tej serii ERS-2, który okrążył Ziemię po tych samych orbitach, następnego dnia po działającym jeszcze satelicie ERS-1 (Duchossois, Zobl, 1996). Na jego

pokładzie znajdują się takie same urządzenia radarowe jak na ERS-1. Wspólna praca obu systemów radarowych (*tandem mode*) umożliwiła maksymalne pokrycie powierzchni Ziemi, jak również zebranie par zdjęć wykorzystywanych w technice interferometrii do badań łądów i wód, a także do wykonywania map topograficznych. Misja satelity ERS-2 ma się zakończyć w 1999 roku. W roku 2000 ESA wystrzelił następnego satelitę — ENVISAT, wyposażonego w unowocześniony radiolokator obrazowy ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*). W porównaniu do instrumentu AMI znajdującego się na satelitach ERS-1 i -2, ASAR jest urządzeniem o nowej, rozbudowanej technologii. Zastosowanie techniki skanowania (*ScanSAR*) pozwoli na obrazowanie 400-kilometrowego pasa powierzchni Ziemi, a możliwość zmiany polaryzacji wiązki mikrofalowej umożliwi równoczesną rejestrację danego obszaru w polaryzacji pionowej i poziomej. Instrument ASAR będzie działał w pięciu różnych trybach: obrazowy (rozdzielczość 30 m), falowy (rozdzielczość 5×5 km), szerokiego zasięgu (rozdzielczość 150 m), zmiennej polaryzacji (rozdzielczość 30 m) oraz globalnego monitoringu (niska rozdzielczość, poniżej 1000 m). Satelita ten zapewni: całkowite pokrycie powierzchni Ziemi zdjęciami radarowymi, dużą powtarzalność zobrazania tego samego obszaru, ciągłość pomiarów w sezonie i roku oraz stabilność i wielokrotność pomiarów. Misja ma na celu kontynuację i poprawę pomiarów zapoczątkowanych przez jego europejskich poprzedników ERS-1 i ERS-2 oraz wniesienie wkładu w badania Ziemi i jej środowiska w ramach międzynarodowych programów dotyczących geosfery, biosfery, hydrosfery i klimatu. Praca satelity planowana jest na pięć lat.

Pierwszy radziecki satelita wyposażony w radar typu RAR, KOSMOS-1500, został skonstruowany przez naukowców z NPO Mašinostroenija i wystrzelony w grudniu 1983 roku. Pracował w zakresie X, a rozdzielczość wykonywanych przez niego zdjęć wynosiła 1 km. Radar rejestrował pas powierzchni ziemi o szerokości 450 km. Zdjęcia te były wykorzystywane głównie do rozpoznawania zlodzień wzdłuż pasa arktycznego w celu prawidłowego kierowania ruchem statków. W lipcu 1987 wystrzelony był następny satelita tej serii pod nazwą KOSMOS-1870, wyposażony w radar typu SAR, pracujący na fali o długości 9,6 cm z rozdzielczością 25–30 m. Satelita ten funkcjonował ponad dwa lata. Informacje, które zbierał z różnych obszarów lądowych i oceanicznych były transmitowane drogą radiową do centrum przetwarzania w Moskwie. W marcu 1991 roku ZSRR wystrzelił następnego satelitę z unowocześnionym urządzeniem radarowym i systemem przekazywania danych o nazwie ALMAZ-1. Rozdzielczość zdjęć radarowych również zwiększyła się do 10–12 m. Dzięki dwóm antenom możliwe było jednoczesne skanowanie terenu po lewej i prawej stronie wzdłuż kierunku lotu. Sygnały rejestrowane metodą cyfrową (na taśmie magnetycznej) na pokładzie satelity, były następnie przekazywane do stacji odbiorczej, gdzie przetwarzano je na fotonegatywy i zdjęcia w skali 1:150 000. Satelita ten pracował do

października 1992 roku. Na bazie doświadczeń zdobytych przy budowie KOSMOS-1870 i ALMAZ-1, naukowcy z NPO Mašinostroenija skonstruowali nowoczesnego satelitę ALMAZ-1B, który został wystrzelony w 1998 roku a jego czas pracy wyniesie 3 lata. Na pokładzie satelity znajduje się system urządzeń radarowych składający się z trzech niezależnych radarów (SAR/SLR-3, SAR-10 i SAR-70), połączonych w celu umożliwienia jednoczesnych, wielozakresowych (3,49, 9,58 i 70 cm) obserwacji tego samego obszaru na powierzchni Ziemi. Urządzenia te mogą pracować w wielu trybach, dostarczając zdjęć o rozdzielczości od 5 do 40 m w przypadku urządzenia SAR i 1200–2000 m w przypadku urządzenia SLR. Instrumenty SAR-3 i SAR-10 transmitują i odbierają fale spolaryzowane pionowo, natomiast SAR-70 posiada wszystkie możliwe kombinacje polaryzacji.

Japoński satelita operacyjny przeznaczony do badań środowiska JERS-1 (*Japanese Earth Resource Satellite*), wyposażony w radiolokator obrazowy, został wystrzelony przez NASDA (*National Space Development Agency*) w lutym 1992 roku i pracował do 1998 r. Instrument SAR znajdujący się na pokładzie satelity wykorzystywał zakres L promieniowania mikrofalowego spolaryzowanego poziomo (HH). Zastosowanie fali dłuższej od stosowanej w systemie SAR satelitów ERS-1 i -2 umożliwiło głębszą penetrację roślinności czy gleby, natomiast względnie duży kąt padania promieniowania mikrofalowego pozwalał na zminimalizowanie zniekształceń terenu w obszarach górzystych. Cykl obrazowania był tutaj dłuższy niż w przypadku satelity ERS czy ENVISAT (35 dni) i wynosił 44 dni. Szerokość rejestrowanego pasa na powierzchni Ziemi wynosiła 75 km. Przeznaczony był on do dostarczania informacji dla rolnictwa, leśnictwa, rybołówstwa i ochrony środowiska. Japończycy planują wystrzelenie w 2003 roku nowego satelity operacyjnego o nazwie ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) wyposażonego w unowocześniony radar działający również w zakresie L (*PALSAR-Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), z możliwością zmiany kąta wysyłania wiązki promieniowania ($20\text{--}50^\circ$). Urządzenie będzie pracować zarówno w trybie o wysokiej rozdzielczości do szczegółowych obserwacji regionalnych (10 m) jak i w trybie mniejszej rozdzielczości — 100 m tzw. skanowania (*ScanSAR mode*). Tryb skanowania pozwoli na otrzymanie zdjęć o zasięgu 250–350 km, niezwykle przydatnych do badania lodów i lasów tropikalnych. Cykl obrazowania wyniesie 45 dni. Satelita ten będzie przeznaczony głównie do celów kartograficznych oraz do monitorowania środowiska i klęsk żywiołowych (Wakabayashi i in., 1996). Japończycy planują wystrzelenie następnych satelitów tej serii: ALOS-A1 w 2004 r., ALOS-B1 w 2006 r., ALOS-A2 w 2007 r., ALOS-B2 w 2009 r.

W listopadzie 1995 r. został wystrzelony przez Kanadę satelita operacyjny RADARSAT, na którego pokładzie znajduje się radar typu SAR. Jest to pierwszy w świecie wyłącznie radarowy system satelitarny, pracujący w 6 trybach. W każdym trybie jest możliwość wyboru kąta padania wiązki promieniowania, od 20° do ponad 50° . Dostarczają one zdjęć o rozdzielczości od 10 do 100 m, przy

szerokości rejestrowanego pasa powierzchni Ziemi wynoszącej od 35 do 500 km. Cykl obrazowania wynosi 24 dni, a więc jest znacznie krótszy niż w przypadku satelitów ERS czy JERS. Przy zastosowaniu trybu skanowania rejestrowany jest pas powierzchni Ziemi o szerokości 500 km. Obszary arktyczne obrazowane są codziennie, a tereny wokół równika co sześć dni (Polska co 3 dni). Tak duża powtarzalność obserwacji jest niezwykle przydatna do monitorowania ruchu statków, przemieszczania się plam ropy na wodzie, rozwoju roślinności oraz rozwoju i zasięgu powodzi. Satelita RADARSAT ma pracować pięć lat (RADARSAT, 1995).

LightSAR to część amerykańskiej misji MTPE (*Mission to Planet Earth*) kierowanej przez NASA, planowanej na rok 2002. Projektowany satelita będzie mniejszy i tańszy od dotychczasowych. Na jego pokładzie znajdzie się radar nowej generacji, działający w trzech różnych zakresach: L, X, C oraz wszystkich możliwych kombinacjach polaryzacji fali, osiągając rozdzielczość od 3 do 100 m, w zależności od zastosowanego trybu pracy, których ma być sześć. Cykl obrazowania wyniesie 8–10 dni, a więc znacznie przewyższy pod tym względem istniejące satelitarne systemy radarowe. Przeznaczony jest głównie do: mierzenia ruchów skorupy ziemskiej w celu lepszego poznania zjawisk trzęsienia ziemi i erupcji wulkanów, badania ruchu lodowców, wykonania szczegółowych map wysokościowych, monitoringu rozwoju powodzi, oceny zdrowotności upraw rolnych i lasów, badania zmian pokrycia i użytkowania terenu, w planowaniu przestrzennym. Z innych planowanych satelitów wyposażonych w system radarowy należy wymienić satelitę indyjskiego IRS-3, który zostanie wyrzucenony w 2004 r., satelity rosyjskie ALMAZ 1C i ALMAZ 2, które powinny się znaleźć na orbitach odpowiednio w latach 2001 i 2004 oraz satelity japońskie ALOS, ALOS-A1, ALOS-B1 i ALOS-B2 planowane na lata 2002–2009. Projektowane przez Rosjan urządzenia radarowe umieszczane na satelitach serii ALMAZ będą pracowały w zakresie S, natomiast urządzenia japońskie w zakresie L.

Spośród wielu zakresów promieniowania elektromagnetycznego stosowanych w teledetekcji satelitarnej, mikrofałe wykazują największą skuteczność, dzięki możliwości ich wykorzystania niezależnie od warunków pogodowych i pory dnia. Główne dziedziny, w których wykorzystuje się zdjęcia radarowe to: ekologia i leśnictwo, hydrologia, rolnictwo, oceanografia, glaciologia, geologia i topografia (Institute..., 1995). Zdjęcia SAR dostarczają unikalnych informacji o naszej planecie, włączając dane o kłękach żywiołowych czy zasobach naturalnych. Pomiary interferometryczne wykonywane dzięki systemom radarowym są dziś stosowane do generowania globalnych map topograficznych, do monitorowania zmian topografii terenu, do śledzenia ruchu lodowców i różnych zjawisk oceanicznych. Wieloterminowe kompozycje zdjęć mikrofalowych są cennym źródłem informacji w klasyfikacji różnych form pokrycia terenu, szacowaniu biomasy, pomiarach wilgotności śniegu i gleby, monitoringu grubości pokrywy lodowej i prze-

mieszczania się plam ropy na wodzie (Dallemand i in., 1993). Poniżej przedstawiono szczegółowy zakres wykorzystania danych radarowych w wymienionych wyżej dziedzinach.

W ciągu ostatnich dziesięciu lat zaobserwowano wzrost badań nad wykorzystaniem zdjęć radarowych w ekologii i leśnictwie (Kasischke i in., 1997; Pulliainen i in., 1995). Przełomem w rozwoju satelitarnych radiolokatorów obrazowych okazała się misja SIR-C/X-SAR, dzięki której otrzymano dane mikrofalowe w różnych zakresach spektralnych i typach polaryzacji, niezwykle przydatne do oceny wielu zjawisk powierzchniowych, wpływających na zachodzące w przyrodzie procesy ekologiczne. Obecnie istniejące systemy radarowe ekolodzy (Kasischke i in., 1997) wykorzystują w badaniach ekosystemów, głównie w celu: klasyfikacji i wykrywania zmian pokrycia terenu, szacowania biomasy ekosystemów leśnych, zawartości wody w koronach drzew i w glebie oraz monitorowania wylesień, monitorowania zasięgu i kierunku rozprzestrzeniania się powodzi, pożarów i innych kłęk żywiołowych, monitorowania innych procesów dynamicznych, np. zamarzanie i topnienie lodów czy rozwój lub zarastanie bagien. Klasyfikacja form pokrycia terenu daje najlepsze rezultaty przy zastosowaniu systemów wielozakresowych, szacowanie biomasy ekosystemów leśnych przez zastosowanie fal o niskiej częstotliwości np. P czy L i polaryzacji krzyżowej (HV lub VH), do wykrywania zalanych obszarów leśnych optymalne są zakresy P i L, a zalanych łąk — C, przy polaryzacji podłużnej (HH lub VV). Monitorowanie różnych procesów dynamicznych (np. wylesienia, pożary, zalewy powierzchniowe, wilgotność gleb) okazało się możliwe dzięki zastosowaniu danych w pasmie C, przy polaryzacji VV (Holz, 1982).

Jednym z głównych zainteresowań hydrologów jest kriosfera — część hydrosfery, ważnego elementu ziemskiego systemu klimatycznego. Około 10% powierzchni Ziemi jest stale pokryte lodem lub śniegiem, a ponad 30% sezonowo. Hydrolodzy stosują wieloparametrowe systemy radarowe do kartowania tych obszarów, jak również do szacowania zasobów wody zmagazynowanej w śniegach i lodach. Znajomość zasobów wody oraz wilgotności gleb ułatwia kontrolę cyklu hydrologicznego oraz pozwala na modelowanie zjawisk zachodzących w zlewni. Zdjęcia radarowe wykorzystywane są również do wykonywania map śródlądowych wód powierzchniowych i monitoringu powodzi. Informacja o zasięgu zlodzenia rzek i jezior, otrzymana na podstawie zdjęć radarowych wykorzystywana jest do prognozowania możliwości wystąpienia powodzi.

Kontrola zasobów rolnictwa za pomocą metod teledetekcji odbywa się tradycyjnie przy wykorzystaniu systemów optycznych. Ostatnie dziesięciolecie wykazało możliwość stosowania systemów radarowych w rolnictwie dzięki zaletom, jakie mają zdjęcia radarowe, to jest możliwości ich wykonywania niezależnie od warunków pogodowych i pory dnia. Dodatkową zaletą jest fakt, że odzwierciedlają one geometrię, wilgotność i szorstkość rejestrowanych obiektów, jak również uwzględniają

ją głębokość penetracji fali mikrofalowej w głąb gleby i roślinności. Ze zdjęć radarowych można otrzymać informacje dotyczące: rodzaju uprawy, uszkodzeń roślin i wilgotności gleby (Lichtenegger, 1993; Ulaby, 1982; van Gendersen, 1993).

Głównym celem wykorzystania zdjęć radarowych w oceanografii jest określenie kierunku oceanicznych prądów powierzchniowych. Wpływają one na klimat, żeglugę, kształt wybrzeży, życie biologiczne w wodzie, kształt lodów. Równie ważne jest określenie: kierunku przepływu wód w morzach pokrytych lodem, wysokości fal, lokalizacji i natężenia ruchu statków, zmian linii brzegowych, obszarów pokrytych lodem, z podaniem typu lodu, topografii dna, lokalizacji plam ropy na wodzie. Wiele z nich wymaga zastosowania techniki interferometrii czy systemów wieloparametrowych, SIR-C/X-SAR.

Systemy radarowe SAR, okazały się niezastąpionym narzędziem dla glaciologów, między innymi dzięki możliwości rejestrowania obszarów podbiegunowych, nawet w czasie trwania nocy polarnych. W odróżnieniu od systemów optycznych, promieniowanie mikrofalowe wnika w głąb lodu i śniegu umożliwiając zbadanie jego właściwości, dlatego zdjęcia radarowe stosuje się między innymi do klasyfikacji typologicznej lodów. Informacja o wieku lodu, określana na podstawie zdjęć radarowych wspartych danymi historycznymi i aktualnymi danymi meteorologicznymi ma kapitalne znaczenie dla prawidłowej nawigacji. Zastosowanie techniki interferometrii¹ pozwala określić kierunek i prędkość przemieszczania się lodów, a także ich wysokość względną. Informacje te są niezbędne między innymi do ukierunkowywania pracy lodolamaczy. W wielu przypadkach ważna jest również częstotliwość wykonywania zdjęć. Dużą częstotliwość rejestracji obszarów arktycznych umożliwia technika ScanSAR, zastosowana np. na satelicie RADARSAT. Dzięki niej obszary leżące powyżej 75° szerokości geograficznej rejestrowane są codziennie, obszary między 65 a 70° co drugi dzień, a tereny między 45 i 55° co trzeci lub czwarty dzień. Do określania granicy pomiędzy lodem i wodą najlepsze efekty daje zastosowanie fali spolaryzowanej poziomo (HH).

Geolodzy najwcześniej stosowali zdjęcia radarowe do swoich badań. Początkowo wykorzystywano je do wykrywania i kartowania lineamentów oraz eksploracji ropy naftowej i innych surowców mineralnych. Obecnie wykorzystuje się je do wykonywania map struktur geologicznych i złóż powierzchniowych, wykrywania stref sejsmicznych, uszkodzeń spowodowanych erupcją wulkanów, obsunięć ziemi, przesunięć płyt tektonicznych i innych ruchów skorupy ziemskiej oraz monitoringu erozji linii brzegowej. Większość tych aplikacji wymaga zastosowania systemów wieloparametrowych,

posiadających kilka zakresów spektralnych, typów polaryzacji, kątów padania wiązki mikrofalowej oraz danych interferometrycznych. Możliwości takie mają systemy JPL AIRSAR i SIR-C/X-SAR.

Duża część aplikacji wymaga zastosowania map topograficznych o dokładności zależnej od celu, jakiego ma służyć. W większości przypadków wystarczająca jest rozdzielczość przestrzenna rzędu 25–30 m i pionowa rzędu 2–5 m. Pomiary topografii terenu wykonywane na podstawie zdjęć radarowych są ciągle w stadium rozwo-

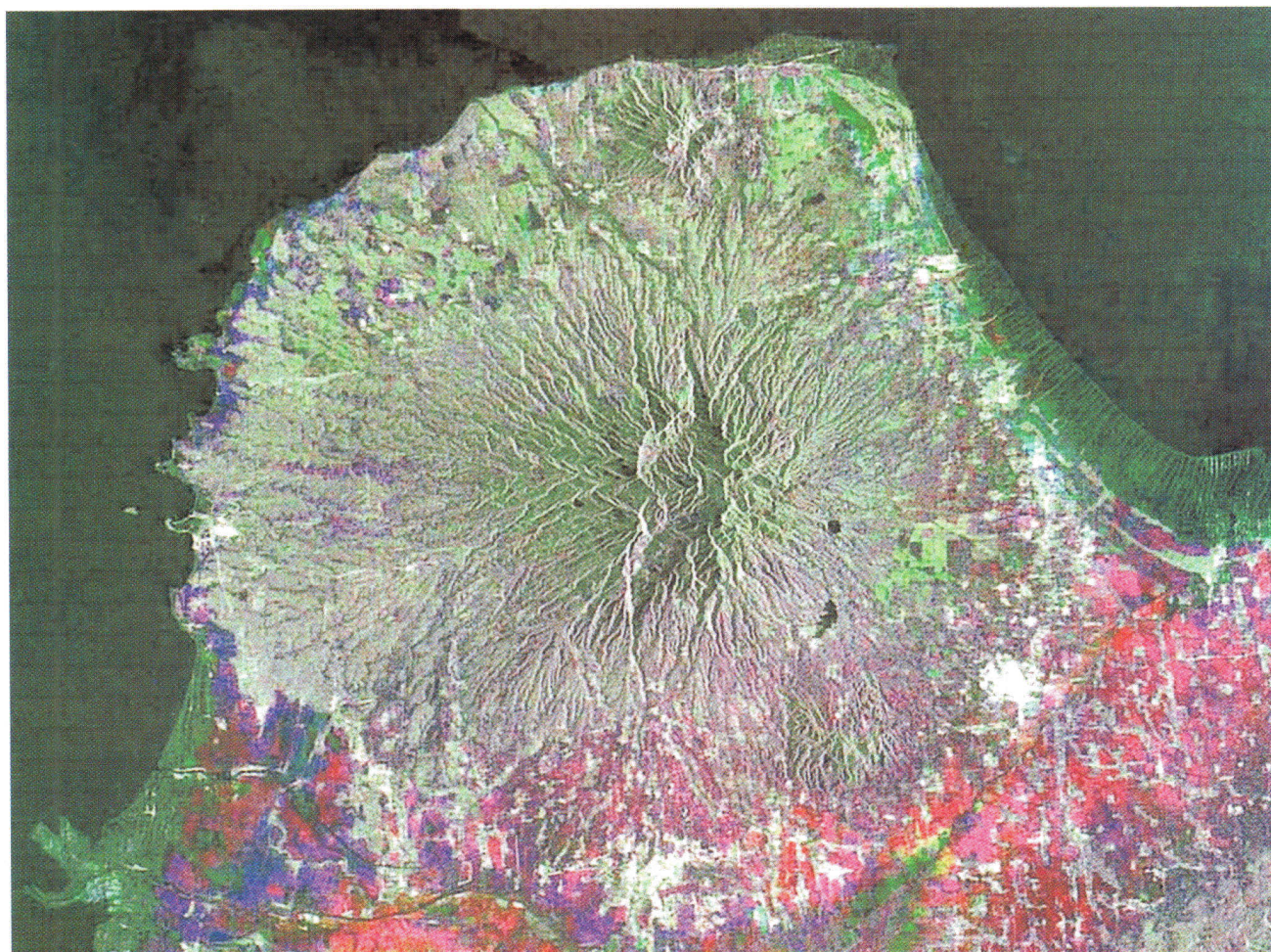


Ryc. 1. Zdjęcie ERS-2.SAR.PRI wykonane w dniu 29 IX 1998 r. nad Wolsztynem (jasna nierównomierna plama w środku zdjęcia)

Fig. 1. ERS-2.SAR.PRI image registered on 29 IX 1998 over Wolsztyn (bright irregular spot in the middle of the image)

ju. Pomiary te możliwe są do przeprowadzenia za pomocą urządzeń wykorzystujących technikę interferometrii. Dane interferometryczne z ERS-1.SAR (cykl 3-dniowy) wykorzystywane były między innymi do oceny deformacji powierzchni w wyniku trzęsienia ziemi w Kalifornii w 1992 r. oraz do kartowania lądolodów. Na podstawie danych z SIR-C/X-SAR dotyczących wysp hawajskich, możliwe było uchwycenie zmian morfologicznych wulkanów. Dane interferometryczne dostępne dzięki lotniczemu systemowi TOPSAR są obecnie najlepszym źródłem pomiarów topograficznych. Dzięki zainstalowaniu

¹ Są to pomiary fazy odbitego impulsu na kolejnych zdjęciach, wykonywanych zwykle co 3–5 dni, a następnie stworzenie obrazu będącego ich różnicą, zwanego interferogramem.



Ryc. 2. Kompozycja barwna z trzech zdjęć JERS-1 (czerwony — 29 IX 1996, zielony — 7 V 1997, niebieski — 28 II 1998) wykonana nad Mount Murjo, 1602 m n.p.m., Jawa

Fig. 2. JERS-1 multitemporal colour composite (red — 29 IX 1996, green — 7 V 1997, blue — 28 II 1998) registered over Mount Murjo, 1602 m, Java

dwu anten odbiorczych dane te są zbierane jednocześnie z tego samego pasa powierzchni Ziemi, dzięki czemu unika się rozbieżności wynikających z różnic czasowych. W przyszłości będą dostępne dane z systemów specjalnie stworzonych do wykonywania map topograficznych — GeoSAR, STRM i LightSAR.

Jak wynika z powyższego opisu, zdjęcia radarowe są dziś stosowane w wielu dziedzinach gospodarki, a ich wielka przydatność powoduje ciągły rozwój techniki radarowej. Wymagania związane z rozdzielczością czasową i przestrzenną oraz zastosowaniem wielu zakresów spektralnych, typów polaryzacji i kątów padania wiązki promieniowania, niezbędnych w badaniach Ziemi są motorem tego rozwoju.

Literatura

- Dallemand J. F., Lichtenegger J., Raney R. K., Schumann R., 1993: *Radar imagery: Theory and interpretation*. Lecture notes, FAO, Rome.
- Duchossois G., Zobl R., 1996: ERS-2: A Continuation of the ERS-1 Success. *ESA Bulletin*, No. 83, Europea Space Agency.
- ESA, 1989: ERS-1 — A new tool for global environmental monitoring in the 1990's. *Bulletin*, No. 36.
- Evans D. L. et al. 1995: *Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions*. NASA Technical Memorandum, No. 4679, *A Report to the Committee on Earth Sciences*.
- Freeman T., 1996: *What is Imaging Radar*. *Jet Propulsion Laboratory Bulletin*, California Institute of Technology.
- Holz R. K., 1982: *The Surveillant Science: Remote Sensing of the Environment*, John Wiley and Sons, New York.
- Institute for Remote Sensing Applications, 1995: Annual Report 1994*, Joint Research Centre, European Union, Luxembourg.
- Kasischke E. S., Melack J. M., Dobson M. C., 1997: The use of imaging radars for ecological applications — A review. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, No. 2.
- Koopmans B. N., 1993: Present and Future Satellite Radar Programs. *Proceedings of the Workshop on Synthetic Aperture Radar Systems and It's Application in Natural Resources*, Warsaw.
- Lichtenegger J., 1993: Overview of optical and microwave Remote Sensing. *Proceedings of the Workshop FAO/CEC/Telespazio/ESA*, Frascati.
- Lo C. P., 1986: *Applied remote sensing*. Longman Inc., New York.
- Pullianen J., Mikkela P., Hallikainen M., Tomppo E., 1995: Combined estimation of forest biomass, soil moisture and forest canopy moisture using ERS-1 SAR data. *ACTES/Proceedings*, Toulouse, France.
- RADARSAT, 1995: RADARSAT illuminated Your guide to products and services. *RADARSAT International Bulletin*.

- Schreier G., 1993: *SAR geocoding: data and systems*. Wichmann, Karlsruhe.
- Simonett D. S., Ulaby F. T., 1983: *Manual of Remote Sensing*. The Sheridan Press, Virginia.
- Trevett J. W., 1986: *Imaging Radar for Resources Surveys*. Chapman and Hall, London.
- Ulaby F. T., 1982: Radar signatures of terrain: Useful monitors of renewable resources. *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, No. 12.
- Van Genderen J. L., 1993: Operationalization of Radar Remote Sensing. *Proceedings of the International Symposium*, vol. 5, Enschede.
- Wakabayashi H., Osawa Y., Toda K., Hamazaki T., Kuramasu R., 1996: A SAR system on the ALOS. *Proceedings of the XVIII ISPRS Congress*, Vienna.
- Werle D., 1988: *Radar Remote Sensing. A Training Manual*. Ottawa.
- Winokur R. S., 1996: Operational use of civil space-based Synthetic Aperture Radar (SAR). *NOAA Document*.



Mgr inż. Maria Gruszczyńska ukończyła studia na Wydziale Melioracji Wodnych Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w 1976 r. Pracę magisterską pt. *Hydrologiczna interpretacja zdjęć lotniczych terenów przyległych do projektowanego zbiornika wodnego* wykonała w Instytucie Budownictwa Melioracyjnego i Rolniczego pod kierunkiem doc. dr hab. Reginy Poźniak. Od 1976 r. pracuje w Instytucie Geodezji i Kartografii w OPOLiS.

Zajmuje się wykorzystaniem technik teledetekcji w rolnictwie i ochronie środowiska. W latach 1992–1999 brała udział m. in. w trzech projektach badawczych Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) dotyczących wykorzystania zdjęć radarowych w badaniach rolniczych. W 1999 r. Rada Naukowa IGiK podjęła uchwałę o otwarciu przewodu doktorskiego i zatwierdziła temat rozprawy o brzmieniu *Zastosowanie zdjęć mikrofalowych ERS do szacowania wilgotności gleby pod zbożami*. Instytut Geodezji i Kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa, tel. (22) 828 02 69 w. 104, e-mail: mary@igik.edu.pl