

## **ADWENT METOD TELEDETEKCJI AKTYWNEJ DO MONITOROWANIA ZJAWISK PRZYRODNICZYCH**

Kazimierz Bęcek

Universiti Brunei Darussalam

**Streszczenie.** Ostatnie dwudziestolecie rozwoju technologii pozyskiwania danych o zjawiskach przyrodniczych można uznać za advent metod teledetekcji aktywnej. Niezwykle spektakularnym wytworem tego okresu jest globalny numeryczny model pokrycia obszarów lądowych naszej planety, znany pod angielskim skrótem SRTM. SRTM powstał przy wykorzystaniu instrumentu zainstalowanego na pokładzie amerykańskiego wahadłowca Endeavour i z wykorzystaniem metody interferometrii radarowej. Metoda ta jest jedną z metod teledetekcji aktywnej, która bazuje na wykorzystaniu promieniowania mikrofalowego emitowanego i odbieranego przez satelitę. Pomiary mogą być dokonywane w każdych warunkach meteorologicznych i niezależnie od oświetlenia słonecznego. Powodzenie programu SRTM oraz unikalny charakter dostarczanych danych stały się poważnym czynnikiem stymulującym rozwój systemów teledetekcji aktywnej w krajach takich jak Japonia, Kanada, Niemcy, USA i Włochy. Mimo że w wielu sytuacjach metody teledetekcji aktywnej są nadal na etapie eksperymentów, już teraz można z całą pewnością stwierdzić, że obecnie orbitujące satelity takie jak ALOS PALSAR, TerraSAR-X, TanDEM-X, RADARSAT, ERS, ENVISAT-ASAR oraz szereg planowanych misji dostarczają i będą dostarczały cennych danych, pozwalających na uzupełniające, a czasami i nowe spojrzenie na zjawiska przyrodnicze. Wążąc powyższe, wydaje się pożytecznym dokonanie przeglądu najważniejszych zagadnień i metod teledetekcji aktywnej. Jest to celem niniejszego opracowania.

**Słowa kluczowe:** teledetekcja aktywna, SAR, InSAR, DInSAR, PolInSAR, RWR, radar

### **WSTĘP**

Termin teledetekcja pojawił się w języku polskim w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Pierwowzorem słowa teledetekcja jest angielski termin *remote sensing*. Został on wprowadzony do użytku w połowie lat pięćdziesiątych minionego wieku przez panią Evelyn Pruitt. Pracowała ona wtedy jako geograf i oceanograf w amerykańskim biurze badań morskich (Office of Naval Research) [Short 2010].

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Kazimierz Bęcek, Geography & Development and Environmental Studies Programme, Faculty of Arts and Social Science, Universiti Brunei Darussalam, Jalan Tungku Link, Gadong, BE 1410, Brunei Darussalam

Teledetekcja określa zbiór technik pozyskiwania danych o oddalonym obiekcie na podstawie analizy własności fal elektromagnetycznych, emitowanych lub odbitych od tego obiektu. Zasadnicza różnica pomiędzy teledetekcją a znacznie od niej starszą fotointerpretacją polega na tym, że w teledetekcji obiekt podlega identyfikacji na podstawie badania intensywności odbicia fali elektromagnetycznej w kilku wąskich zakresach długości. Kształt, rozmiary, kolor, odcień szarości, tekstura, długość cienia oraz relacje przestrzenne pomiędzy obiektami stanowią kluczowe cechy wykorzystywane do identyfikacji obiektu za pomocą fotointerpretacji. Ważną cechą odróżniającą teledetekcję od fotointerpretacji jest do minimum ograniczone zaangażowanie człowieka. Właściwie wykorzystuje się wyłącznie wyspecjalizowane oprogramowanie komputerowe. Rola człowieka ogranicza się do ustalenia warunków początkowych dla algorytmu oraz weryfikacji wyników.

Pierwotne rozumienie teledetekcji, która polegała na identyfikacji obiektów na podstawie własności spektralnych odbitej lub emitowanej fali elektromagnetycznej, uległo znacznemu rozszerzeniu wraz z wprowadzeniem do użycia metody iluminacji obiektów za pomocą sztucznego źródła fali elektromagnetycznej. Przykładem takiego źródła oświetlenia jest radar. Teledetekcyjne opracowanie obrazów uzyskanych dzięki iluminacji obiektu radarem przypomina fotointerpretację, ponieważ opracowaniu podlega obraz uzyskany w jednym wąskim zakresie fali elektromagnetycznej. Zastosowanie radaru w teledetekcji stało się możliwe dzięki odkryciu techniki wielokrotnego powiększania rozdzielczości przestrzennej radaru zwanej w języku angielskim *Synthetic Aperture Radar* (SAR) [Cutrona i in. 1966]. Podejmując próbę przetłumaczenia tej nazwy na język polski powinno się brać pod uwagę główną cechę SAR, tj. wysoką rozdzielczość przestrzenną. Stąd, proponuje się, że polskim odpowiednikiem SAR powinien być przetłumaczony funkcjonalnie jako „radar wysokiej rozdzielczości” (RWR). Obecne w języku polskim tłumaczenie „radar z anteną syntetyzowaną” ma charakter tłumaczenia dosłownego. Zostało ono jednak dokonane bez wzięcia pod uwagę skrótu w oryginalnej nazwie angielskiej. Pełna nazwa SAR w języku angielskim brzmi bowiem „*synthetic (antenna) aperture radar*”, co można rozumieć jako „radar z anteną o przysłonie wirtualnej”.

Fakt wykorzystania RWR do pozyskiwania obrazów do celów teledetekcji spowodował powstanie nowej gałęzi teledetekcji zwanej teledetekcją aktywną dla podkreślenia, że źródło fali elektromagnetycznej jest częścią systemu pozyskiwania obrazu. W teledetekcji pasywnej wykorzystuje się obrazy oświetlone za pomocą promieniowania słońca lub naturalnego promieniowania obiektów.

Planowane liczne przedsięwzięcia w tym zakresie uzasadniają pogląd, że teledetekcja aktywna jest w początkowej fazie rozwoju, czyli znajduje się w okresie adwentu.

Teledetekcja aktywna rozpoczęła swój rozwój w 1978 r. po umieszczeniu na orbicie ziemskiej amerykańskiego satelity SEASAT [Curlander i McDonough 1991]. RWR na pokładzie SEASAT pracował w paśmie L (fala o długości 23.5 cm). Od tego momentu obserwuje się pogłębione zainteresowanie teledetekcją aktywną w trzech podstawowych obszarach, tj.:

- a) zastosowań,
- b) źródeł danych do opracowań teledetekcyjnych i gotowych opracowań teledetekcyjnych,
- c) rozwoju metod.

Wcześniejsze, tj. przed 1978 r. próby z techniką RWR miały głównie wojskowy charakter. Stąd też były one ściśle tajne. RWR zastosowano w czasie wojny wietnamskiej z niezadowalającymi wynikami.

Jednym z głównych czynników ograniczających stosowanie techniki RWR była optyczna metoda przetwarzania danych odbieranych z anteny radaru [Cutrona i in. 1960]. Sytuacja uległa radykalnej zmianie dzięki rozwojowi zminiaturyzowanych systemów komputerowych, co nastąpiło mniej więcej w połowie lat 70. ubiegłego wieku.

Wydaje się, że na tym wczesnym etapie rozwoju teledetekcji aktywnej istnieje potrzeba omówienia i usystematyzowanie kluczowych pojęć, metod, zastosowań i kierunków jej rozwoju. W niniejszym opracowaniu wykorzystuję jedynie niektóre czasopisma naukowe znane z publikowania prac związanych z teledetekcją aktywną, na czele z IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Prezentacja dotyczy danych pozyskiwanych za pomocą fal elektromagnetycznych z zakresu mikrofalowego, tj. o długości od około 1 mm do około 1 m. Z uwagi na fakt, że radary wykorzystują pasmo mikrofalowe, często teledetekcję aktywną nazywa się teledetekcją radarową. Określenie to będzie się przewijało w niniejszym tekście jako synonim teledetekcji aktywnej. W pracy pomijam całkowicie pomiar techniką laserową, zwaną LiDAR, mimo że niektóre źródła zaliczają tę technologię do teledetekcji aktywnej. Moim zdaniem nie jest to uzasadnione. Pogląd ten wyprowadza się z faktu, że technologia LiDAR ma na celu wyznaczanie współrzędnych (x, y, z) punktów obiektów znajdujących się w przestrzeni, przez co jest tożsama z pomiarem za pomocą np. tachymetru elektronicznego. Oznacza to, że LiDAR wykorzystuje się do całkiem innej klasy zadań obserwacji środowiskowych (precyzyjne pomiary) niż teledetekcja aktywna (identyfikacja obiektów). Ponadto, pasmo fal elektromagnetycznych wykorzystywanych w LiDAR nie ma zdolności penetrowania chmur, co jest jedną z fundamentalnych cech teledetekcji aktywnej.

## RADAR

Jedną z podstawowych części systemu wykorzystywanego w teledetekcji aktywnej jest radar [Skolnik 1988] iluminujący obiekt na powierzchni Ziemi. Odbiera odbity od obiektu sygnał. Dokonuje obliczeń odległości i położenia. Rejestruje intensywność powracającego sygnału. Radar do celów teledetekcji został pierwszy raz użyty w końcu lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku podczas przedwcześnie zakończonej w wyniku awarii misji satelity SEASAT. Niepowodzenie tego programu nie spowolniło prac nad kolejnymi projektami wykorzystującymi radar instalowany na pokładach statków powietrznych i kosmicznych. Fakt ten należy przypisać niewielkiej absorpcji mikrofal przez atmosferę Ziemi, co oznacza, że nawet pokrywa chmur nie stanowi przeszkody, by odbierać odbite od powierzchni Ziemi mikrofałe. Para wodna i tlen są głównymi składnikami atmosfery Ziemi, odpowiedzialnymi za absorpcję mikrofal. Pochłanianie mikrofal w atmosferze rozpoczyna się od częstotliwości większych od 2.7GHz (~11 cm). Absorpcja przez parę wodną stromo zwiększa się wraz ze wzrostem częstotliwości, podczas gdy absorpcja przez tlen pozostaje prawie na takim samym poziomie w zakresie częstotliwości mikrofal wykorzystywanych w teledetekcji [Skolnik 1988]. Mikrofałe w zależności od częstotliwości są z różną intensywnością odbijane od tego samego obiektu. Mikrofałe o tej samej częstotliwości są różnie odbijane przez różne materiały. Własność ta jest szczególnie ważna w teledetekcji, bo umożliwia podstawowe rozróżnienie rodzaju materiału (woda, las, minerały itp.). Mikrofałe o niższych częstotliwościach (300 MHz – 1 GHz) mają własność odbijania się z różną intensywnością od materiału w zależ-

ności od zawartości w nim wody. Pozwala to na określanie zawartości wody w gruncie [Müllenhoff 2003].

Do charakterystyki radaru potrzebnych jest wiele parametrów technicznych. Częstotliwość mikrofal wykorzystywanej przez radar jest jednym z nich. W tabeli 1 przedstawiono częstotliwości mikrofal najczęściej wykorzystywanych w teledetekcji. Warto wspomnieć, że do 2010 r. nie powstała platforma satelitarna wykorzystująca pasmo P do celów teledetekcyjnych, co nie oznacza, że nie powstanie ona w przyszłości.

Tabela 1. Częstotliwości i równoważne im długości fal i pasma używane w teledetekcji aktywnej  
Table 1. Frequencies and corresponding wavelengths and microwave bands used in the active remote sensing

Częstotliwość Frequency band [GHz]	Długość fali Wavelength [cm]	Pasmo Band
0.3–1	100–30	P
1–2	30–15	L
4–8	7.5–3.75	C
8–12	3.75–2.5	X

Zaleca się zainteresowanym teledetekcją aktywną zapamiętanie danych z tabeli 1, ponieważ stanowią one istotną część terminologii obowiązującej w tej dziedzinie.

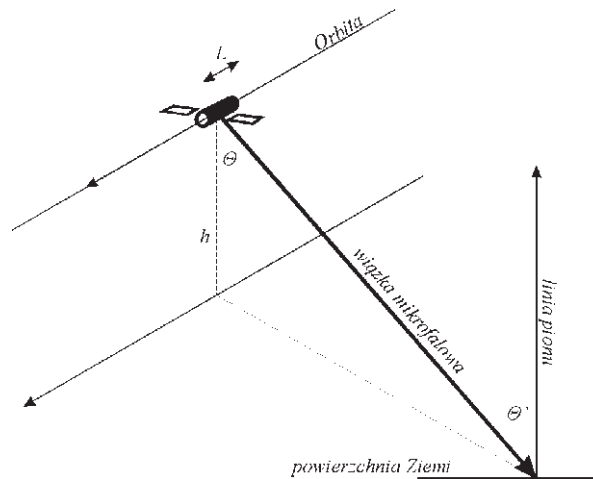
Ważną częścią radaru jest antena. Służy do emisji, krótkich, trwających  $t$  [s] porcji energii, w odstępach o trwaniu  $T$  [s]. W odstępach  $T$  radar oczekuje i odbiera sygnał odbity od obiektu. Z tego wynika, że odstępy między sygnałami muszą być dłuższe niż czas trwania nadawanego sygnału plus czas potrzebny na powrót sygnału do radaru –  $\tau$  [s], czyli  $T \geq t + \tau$ . Łatwo zauważyć, że ze związku  $r = c \tau/2$ , gdzie  $c$  [km/s] oznacza prędkość światła w próżni, wylicza się odległość obiektu od radaru. Należy zwrócić uwagę, że rozwiązanie polegające na dodaniu dodatkowej anteny przeznaczonej tylko do odbierania sygnału nie rozwiązuje problemu, ponieważ wysyłane impulsy muszą być możliwie krótkie, by uniknąć „zamazywania” obrazu w wyniku szybkiego przemieszczania się satelity. Wynika stąd, że kolejnego pomiaru nie można dokonać wcześniej niż pomiar poprzedzający nie został całkowicie zakończony (sygnał odbity od powierzchni Ziemi nie został odebrany).

Wskaźnikiem charakteryzującym radar jest rozdzielczość, czyli zdolność do dostarczenia odpowiednich danych pozwalających rozróżnić dwa podobne obiekty, położone w pewnej krytycznej odległości, zwanej właśnie rozdzielczością radaru. Rozdzielczość radaru odnosi się do kierunku lotu i dlatego jest nazywana rozdzielczością podłużną (ang. *azimuth resolution*)  $R_{az}$ . Wylicza się według (1):

$$R_{az} = \frac{h\lambda}{L \cos \Theta} \quad (1)$$

gdzie:  $h$  – wysokość radaru nad powierzchnią Ziemi,  
 $\lambda$  – długość mikrofal,  
 $L$  – długość anteny,  
 $\Theta$  – kąt padania mikrofal na powierzchnię Ziemi.

Rysunek 1 przedstawia widok perspektywiczny typowej instalacji radaru na pokładzie satelity.



Rys. 1. Podstawowe elementy geometryczne radaru umieszczonego na pokładzie satelity  
Fig. 1. Geometry of the side-looking radar installed on board of a satellite

Warto zauważyć, że rozdzielczość podłużna radaru jest zmienna w zależności od wysokości. Przykład: rozdzielczość podłużna radaru zainstalowanego na satelicie obiegającego Ziemię na wysokości 600 km, przy założeniu, że długość anteny wynosi 3 m, kąt padania  $60^\circ$ , radar wykorzystuje mikrofałe o długości 5.6 cm, wynosi około 24 km. Niewielka rozdzielczość podłużna radaru czyniła to urządzenie mało przydatnym w teledetekcji.

Intensywność odbitego od powierzchni Ziemi sygnału wyraża się za pomocą współczynnika odbicia, najczęściej wyrażanego jako stosunek mocy sygnału odebranego ( $P_1$ ) do mocy sygnału nadanego ( $P_0$ ), który najczęściej oznacza się jako  $\sigma_0$  i wylicza według wzoru (2):

$$\sigma_0 = 10 \log_{10} (P_1 / P_0) \quad (2)$$

Jednostką tak zdefiniowanego współczynnika odbicia  $\sigma_0$  jest decybel [dB] [Kingsley i Quegan 1993].

## RADAR WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI (RWR)

Radar wysokiej rozdzielczości (ang. *Synthetic Aperture Radar – SAR*) konstrukcyjnie nie różni się istotnie od radaru omówionego powyżej. Ogromna zaleta RWR wynika z faktu, że kluczową dla rozdzielczości podłużnej radaru (patrz wzór (1)) długość anteny (albo przysłone) udało się „wygenerować” do rozmiarów daleko przekraczających możliwości współczesnych materiałów i ograniczeń konstrukcyjnych satelity czy samo-

lotu. Cel ten osiągnięto za pomocą złożonego procesu numerycznego przetwarzania wielu sygnałów wyemitowanych (i odbieranych) z (przez) poruszającą się antenę. Dzięki tym obliczeniom uzyskuje się bardzo wysoką rozdzielczość podłużną systemu RWR.

Znajomość położenia źródła promieniowania mikrofal (antenę radaru) w przestrzeni umożliwia obliczanie współrzędnych fragmentu Ziemi odbijającego sygnał z radaru. Rejestruje się również intensywność odbitego sygnału (patrz wzór (2)).

Radar może być tak skonstruowany, że fala elektromagnetyczna zostanie wyemitowana w określonej płaszczyźnie. Najczęściej jest to płaszczyzna pozioma, oznaczana (H – ang. *horizontal*), lub pionowa (V – ang. *vertical*). Odbity sygnał może zostać zarejestrowany przez antenę odbierającą tylko część energii sygnału znajdującej się w płaszczyźnie poziomej (H) lub pionowej (V). Ten rodzaj wybiórczej aktywności radaru nazywa się polaryzacją. Możliwych jest kilka kombinacji w nadawaniu i odbieraniu sygnału. Na przykład: tryb HH pracy radaru oznacza emisję H i odbiór H. Tryb VH oznacza emisję V i odbiór H. W praktyce wykorzystane bywają wszystkie cztery możliwe kombinacje emisji i odbioru sygnału. Są to: HH, HV, VH i VV. Udowodniono, że istnieje związek pomiędzy własnościami fizycznymi obiektów a własnościami spolaryzowanej fali elektromagnetycznej odbitej od obiektu. Zjawisko to znacznie poszerza liczbę charakterystyk radarowych obiektu, co przyczynia się do poprawy identyfikacji i pozyskania niektórych własności obiektów.

Podsumowując, można zauważyć, że obiekt na powierzchni Ziemi może być charakteryzowany za pomocą RWR przy wykorzystaniu następujących parametrów tego systemu:

- a) Długość (częstotliwość lub pasmo) fali elektromagnetycznej.
- b) Rozdzielczość przestrzenna (wielkość piksela).
- c) Położenie obiektu w przestrzeni.
- d) Polaryzacja fali emitowanej i polaryzacja anteny odbierającej.
- e) Kąt padania wiązki radarowej.
- f) Szerokość/długość pasa na powierzchni Ziemi podlegające pomiarowi.

W dalszej części omówię przykłady zastosowań RWR w teledetekcji.

Pierwszym satelitą wyposażonym w system RWR był amerykański SEASAT, który został umieszczony na orbicie w 1978 r. SEASAT pracował w paśmie L (1.275 GHz/~23.5 cm) i pojedynczej polaryzacji (HH). Rozdzielczość przestrzenna wynosiła 25 m. Akwizycja danych dokonywana była w pasie o szerokości ok 100 km. Z uwagi na ograniczenia technologiczne w rejestracji danych czas akwizycji mógł być dłuższy niż 10 minut na pojedynczej orbicie. RWR w misji SEASAT wykorzystano do badania falowania powierzchni oceanów, pomiarów siły i kierunku wiatrów, monitorowania pokrywy lodowej akwenów podbiegunowych oraz obserwacji pokrywy lądów. Mimo że misja SEASAT została zakończona po nieco ponad 100 dniach, dostarczyła ona wystarczająco dużo danych, by ostatecznie przekonać sceptyków do podejmowania kolejnych eksperymentów z RWR [McCandles 2003].

Dzięki SEASAT i późniejszym satelitom wyposażonych w RWR stało się możliwe przygotowywanie aktualnych map pól lodowych w obszarach pokrytych chmurami i/lub pograżonych w ciemnościach nocy polarnej, co niewątpliwie znacznie podniosło bezpieczeństwo żeglugi oraz umożliwiło optymalne planowanie szlaków dla statków [Curlander i in. 1985, Lipa i in. 1986, Nichols i in. 1986].



Wykorzystanie obrazów RWR do badania powierzchni łądów wymaga ustalenia związków pomiędzy rodzajem pokrywy powierzchni Ziemi a cechami odbitej mikrofal. Znajomość tych związków jest niezbędna do rozróżnienia np. roślinności od innych typów pokrycia terenu (woda, gleba, beton, asfalt, itp.).

Przeszło trzydziestoletnia historia prac nad wykorzystaniem RWR w badaniach zjawisk przyrodniczych została udokumentowana w postaci 1520 publikacji, licząc tylko te, które ukazały się w sekcji Nauka o Ziemi (ang. *Geoscience*) jednego z najpoważniejszych czasopism naukowych w zakresie teledetekcji, tj. "IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing". Oto krótki przegląd zastosowań RWR w badaniach przyrodniczych.

Stwierdzono, że współczynnik odbicia mikrofal z RWR (pasmo L – 25 cm) koreluje się z poziomem wilgotności gleby do 30 cm głębokości. Eksperyment przeprowadzono na wolnych od pokrywy roślinnej polach uprawnych. Wykorzystanie tej metody do wyznaczania wilgotności gleby związane jest z kłopotliwą kalibracją danych z RWR [Chang i in. 1980]. Mapy pokazujące różnice wilgotności gleby mogłyby okazać się przydatne w rolnictwie [Ulaby i in. 1983].

W 1979 roku podjęto próbę poszukania związków pomiędzy przyrostem ilości trawy a zmianami współczynnika odbicia (pasmo X, polaryzacja VV). W tym celu wykorzystano symulowane obrazy radarowe przygotowane dla kilku stadiów wzrostu trawy. Błąd wyznaczenia przyrostu masy trawy wahał się w granicach od 5 do 20% [Smit 1979]. Eksperymenty z obrazami uzyskanymi w paśmie X, C i L w celu zbadania możliwości identyfikacji różnych upraw wykazały, że współczynniki odbicia tej samej uprawy uzyskane w różnych pasmach zależą od własności dielektrycznych roślin. Badania przeprowadzono na szeregu polach testowych na terenie Niemiec z pokładu samolotu [Sieber i Trevett 1983].

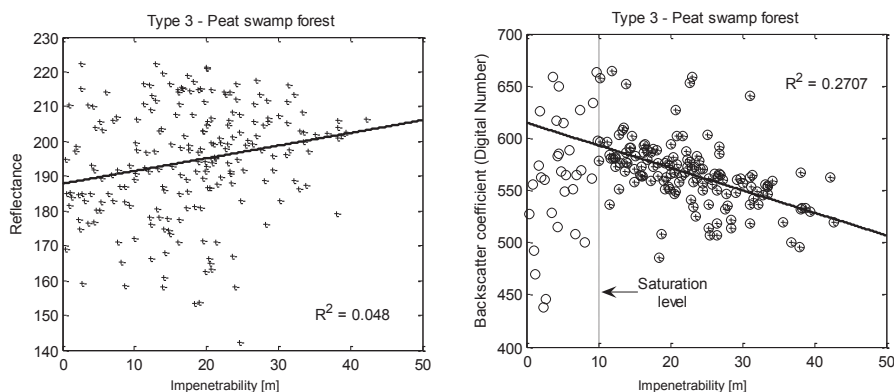
Pierwsze próby wykorzystania RWR (pasmo L) do oceny stanu lasów zostały przeprowadzone z danymi uzyskanymi z misji SIR-B. Okazało się, że penetracja lasu radarem jest znaczna i nie zależy od kąta padania wiązki radarowej. Spekulowano, że sygnał może zawierać informacje dotyczące struktury lasu [Imhoff i in. 1986].

W innym eksperymencie stwierdzono, że najbardziej wrażliwe na biomasa są pasma P i L (niskie częstotliwości) naprzemiennie spolaryzowane (HV i VH). Znacznie mniejsze znaczenie w zakresie oceny ilości biomasy ma pasmo C, a szczególnie pasmo X [Le Toan i in. 1992].

Zagadnieniem, któremu poświęcono szereg prac, było ustalenie granicznej ilości biomasy, powyżej której sygnał nie ulega zmianom wynikającym z przyrostu biomasy. Poziom ten zwany jest punktem nasycenia sygnału. Punkt nasycenia sygnału dla kilku pasm zestawiono w tabeli 2 [Imhoff 1995]. Wyszczególnione gęstości graniczne biomasy są stosunkowo nieduże, bo gęstość biomasy (lasów) w wielu miejscach na świecie osiąga poziom wyższy niż  $500 \text{ t ha}^{-1}$ . Oznacza to, że RWR nie nadaje się do oceny ilości biomasy w każdych warunkach, a w szczególności w gęstych lasach.

Konsekwencją zjawiska wysycenia sygnału jest brak możliwości oceny stopnia degradacji lasu za pomocą RWR, szczególnie w paśmie X. Stąd, należy uznać za nieporozumienie wykorzystanie danych z niemieckiego satelity TerraSAR-X, pracującego w paśmie X, do oceny pokrywy i stanów lasu, która prowadzona jest na potrzeby Organizacji Narodów Zjednoczonych do Spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) przez jeden z uniwersytetów w Niemczech. Problem polega na tym, że RWR identyfikuje pokrywę jako las nawet wtedy, gdy jest on bardzo poważnie zdegradowany (niska gęstość bio-

masy). Na brak wyraźnego związku pomiędzy gęstością biomasy a współczynnikiem odbicia mikrofal w paśmie X (TerraSAR-X) wskazuje lewy diagram na rysunku 2. Prawy diagram ujawnia związek z danymi z pasma L (PALSAR). Warto zwrócić uwagę, że pasmo L zaczyna być wrażliwe na gęstość biomasy, poczynając od pewnego poziomu i nie wykazuje zjawiska nasycenia sygnału przy wzrastającej gęstości biomasy. Obserwacja ta jest sprzeczna z danymi podanymi w tabeli 2. Problem ten jest przedmiotem szczegółowych badań prowadzonych przez autora opracowania. Temat pomiaru biomasy za pomocą wskaźnika nazwanego nieprzenikalność (ang. *impenetrability*) dyskutowany jest w publikacji Bęcka [2010].



Źródło – Source: [Bęcek 2010]

Rys. 2. Wrażliwości mikrofal na biomasę mierzoną za pomocą wskaźnika "Impenetrability". Diagram po lewej stronie dotyczy TerraSAR-X (brak wrażliwości). Diagram po prawej stronie dotyczy ALOS PALSAR (wyraźna wrażliwość). Wyniki dotyczą tego samego typu lasu tropikalnego

Fig. 2. Sensitivity of microwaves on biomass measured by "Impenetrability". The TerraSAR-X data do not exhibit any sensitivity to biomass (left pane). A clear sensitivity is present in the ALOS PALSAR data (right pane)

Tabela 2. Gęstość biomasy wysycająca sygnał radarowy

Table 2. The biomass density levels saturating the radar signal

Pasma częstotliwości Band density	Gęstość biomasy wysycająca sygnał The biomass density levels saturating signal [tha <sup>-1</sup> ]
P (0.44 GHz)	100
L (1.25 GHz)	40
C (5.3 GHz)	20

Źródło – Source: [Imhoff 1995]



Tabela 3. Kluczowe cechy biofizyczne i geofizyczne podlegające obserwacji przy użyciu RWR  
 Table 3. Biophysical and geophysical products for SAR

Cecha obserwowana – Observed feature	Jednostka miary – Unit
Typ roślinności – Vegetation type	Klasa – Class
Powierzchnia zajmowana przez roślinność i jej zmiany Vegetation extent – deforestation	Pokrycie [m <sup>2</sup> ]; zmiana [%] Extent [m <sup>2</sup> ], % change
Biomasa roślinności – Vegetation biomass	[kgm <sup>-2</sup> ] – Mass/Area [kg/m <sup>2</sup> ]
Geometria korony drzew – Canopy geometry	[deg] i [m] – Angular and linear [deg. m]
Zawartość wody w roślinności – Vegetation water content	[%] (objętościowo) – % by volume
Punkt nasycenia roślinności wodą Vegetation water potential	[bar] – Bars
Wilgotność gleby pod pokrywą roślinną Soil moisture – vegetated	[%] (objętościowo) – % by volume
Wilgotność gleby pozbawionej roślinności Soil moisture – bare soil	[%] (objętościowo) – % by volume
Obszar powodzi – Land-water boundaries/floods	[m <sup>2</sup> ] – Area [m <sup>2</sup> ]
Rozmieszczenie sieci drenów – Drainage patterns	Rozmieszczenie przestrzenne – liniowe [m] Linear extent [m]
Równoważnik wody dla śniegu – Snow water equivalent	[mm] – Height [mm]
Obszar pokrywy śniegowej – Snow extent	[m <sup>2</sup> ] – Areal extent [m <sup>2</sup> ]
Położenie pokrywy lodowej na powierzchni oceanu Sea ice extent	Współrzędne geograficzne – Lat/Long
Koncentracja pokrywy lodowej (Sea ice concentration)	[%] – Fraction
Typ pokrywy lodowej na powierzchni oceanu Sea ice type	Klasa – Class
Ruchu pokrywy lodowej – Sea ice motion	[km/dzień] – Velocity [km/day]
Pokrywa lodowa jezior i rzek Ice sheet, lake and river ice extent	Współrzędne geograficzne – Lat/Long
Pola lodowe i dynamika szelfu Ice sheets and shelf dynamics	[m/rok] – Velocity [m/year]
Prądy, fronty i zawirowania – Current, fronts, eddies	Współrzędne geograficzne – Lat/Long
Fale wewnętrzne – Internal waves	Współrzędne geograficzne – Lat/Long
Pole wiatru przy powierzchni terenu – Surface wind field	[ms <sup>-1</sup> ] – Velocity [m/s]
Falowanie powierzchniowe – Surface waves	[deg] i [m] – Length [m], direction [deg]
Wysokość fal powierzchniowych (Surface wave height)	[m] – Height [m]
Szorstkość powierzchni terenu (wolny od pokrywy roślinnej) Surface roughness nonvegetated	Odchylenie standardowe rzędnych przekroju poprzecznego terenu [m] – RMS height [m]
Granice występowania materiałów na powierzchni Surficial material boundaries	[m] – Extent [m]
Topografia – Topography	[m] – Height [m]
Erozja – Erosion	[m <sup>2</sup> ] – Area [m <sup>2</sup> ]
Formacje geomorfologiczne – Landform patterns	[m <sup>2</sup> ] – Area [m <sup>2</sup> ]
Mięższość warstwy piasku – Sand depth	[m] – Depth [m]

Źródło – Source: [Way i Smith 1991]

Trwają prace nad wykorzystaniem RWR do oceny ilości biomasy i innych parametrów roślinności, np. próby wykorzystania synergii oczekiwanej w wyniku równoczesnego opracowania danych RWR z obrazami multispektralnymi [Amini i Sumantyo 2009].

Dane z różnych systemów RWR wykorzystywano także do oceny stopnia zniszczenia lasów w wyniku pożaru. Okazało się, że ocena jest bardziej precyzyjna, jeśli kąt padania mikrofal na obiekt jest także uwzględniony [Tanase i in. 2010].

Przechodząc do zastosowań RWR w badaniach atmosfery, warto wspomnieć o próbach oceny intensywności cyklonów [Reppucci i in. 2010] czy ocenie intensywności pola opadów nad lądami [Marzano i Weinman 2008].

Niezwykle przydatne są próby wykorzystania naziemnego RWR do ustalania stopnia zagrożenia lawinowego [Martinez-Vazquez i Fortuny-Guasch 2008].

Dane z RWR (pasmo X) były wykorzystane do określenia zasięgu powodzi na terenach zurbanizowanych. Uznano, że mimo niekorzystnych zjawisk, jak cienie i gęsta roślinność, dokładność wyników jest wystarczająca do celów modelowania i oceny zjawiska powodzi. W eksperymencie wykorzystano dane z TerraSAR-X [Mason i in. 2010].

Na koniec krótkiego przeglądu zastosowań RWR do monitorowania zjawisk przyrodniczych warto wspomnieć, że co trzy lata odbywa się międzynarodowa konferencja pod nazwą BioGeoSAR. Poświęcona jest ona zastosowaniom RWR w monitorowaniu zjawisk przyrodniczych [Mattia i in. 2009].

Zestawienie kluczowych cech biofizycznych i geofizycznych powierzchni lądów i oceanów naszej planety, które mogą być monitorowane za pomocą RWR, zawiera tabela 3 [Way i Smith 1991].

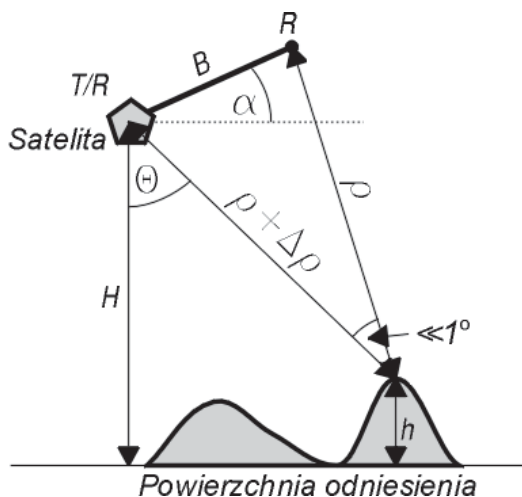
## METODA INTERFEROMETRII RWR (INRWR)

Radaru wysokiej rozdzielczości można użyć w konfiguracji pozwalającej wykorzystanie zjawiska interferometrii. Sposób ten nosi miano interferometrii radaru wysokiej rozdzielczości (InRWR) (ang. *InSAR*). Zjawisko interferencji światła znane jest w optyce. Interferometria szczególnie intensywnie badana i rozwijana w radioastronomii [Rosen i in. 2000].

Metoda InRWR wymaga dwóch obrazów radarowych pozyskanych z dwóch różnych punktów w przestrzeni. Rysunek 3 przedstawia podstawowy schemat InRWR. Na rysunku „T/R” oznacza antenę nadawczo-odbiorczą umieszczoną np. na satelicie, a „R” oznacza antenę tylko odbierającą. Z uwagi na odległość „B” – tzw. bazę pomiędzy antenami sygnał odbity od powierzchni Ziemi dotrze do obu anten po upływie innego czasu  $\rho$  i  $\rho + \Delta\rho$ . Różnicę czasu  $\Delta\rho$  można zmierzyć bardzo precyzyjnie przez pomiar różnicy faz, która pojawia się w sygnale odebrany przez różne anteny. Znajac  $\Delta\rho$ , można wyliczyć wysokość  $h$  obiektu ponad przyjętą powierzchnię odniesienia. Oznacza to, że InRWR może być wykorzystywany do opracowania numerycznych modeli terenu.

Jednym z warunków wykonania poprawnego pomiaru jest pozyskanie koherentnej pary obrazów. Najkorzystniejsze jest pozyskanie obu obrazów równocześnie. Odbywa się to jednak kosztem technicznie skomplikowanej operacji umieszczenia jednej z anten w znacznej odległości od satelity na specjalnym ramieniu o długości np. 60 m. Innym rozwiązaniem jest umieszczenie na podobnych orbitach dwóch satelitów, które pracują w tandemie (jeden z nich wyposażony jest w antenę nadawczą i odbiorczą, drugi – tylko

w antenę odbiorczą). Takie rozwiązanie zostało zastosowane w niemieckim projekcie o nazwie TanDEM-X zbudowanym dzięki satelicie TerraSAR-X, który znajduje się na orbicie od połowy 2007 r., oraz bliźniaczemu systemowi, który został umieszczony na orbicie w połowie 2010 roku.



Źródło – Source: [Bęcek 2010]

Rys. 3. Geometria pomiaru metodą interferometrii RWR (InRWR)

Fig. 3. Geometry of the synthetic aperture radar interferometry

Kolejnym rozwiązaniem jest pozyskanie obrazów przez jednego satelitę, który powraca nad wyznaczony obszar na nieco innej orbicie (z uwagi na zachowanie bazy –  $B$ ), i w jakimś czasie po pierwszej akwizycji. Jednak w wyniku czynników środowiskowych, szczególnie zmian pokrywy roślinnej, niemożliwe jest uzyskanie tzw. koherentnej pary obrazów niezbędnych do opracowania interferometrycznego. Okazuje się, że InRWR bazujące na paśmie L są mniej podatne na utratę koherencji w wyniku wpływów środowiskowych.

Rozwiązanie InRWR, w którym obrazy nie są pozyskiwane równocześnie, określane jest mianem dwuprzebiegowego (ang. *repeat-pass*), w odróżnieniu od poprzednio omówionego rozwiązania zwanego jednoprzebiegowym (ang. *single pass*).

Eksperymenty z RWR doprowadziły do wniosku, że głębokość penetracji lasów przez mikrofałę zależy od długości mikrofały. Im dłuższe fale, tym penetracja roślinności jest lepsza. I tak np. powszechnie przyjmuje się, że pasmo X ( $\lambda \sim 3$  cm) właściwie nie penetruje roślinności; pasmo C ( $\lambda \sim 5$  cm) penetruje „trochę” roślinność, podczas gdy pasmo P ( $\lambda \sim 80$  cm) dociera do powierzchni gleby. Stąd wynika, że numeryczny model terenu uzyskany InSAR, pracujący w paśmie X, obarczony jest błędem systematycznym równym wysokości lasu. Oznacza to, że wynik InRWR z pasma P powinien być pozbawiony błędu systematycznego. Istnieją przesłanki, że o głębokości penetracji roślinności przez radar nie decyduje tylko pasmo, ale również gęstość pokrywy roślinnej. Zagadnienie doprecyzowania mechanizmów interakcji radaru z roślinnością jest obecnie jednym z klu-

czowych zagadnień badawczych w zakresie InRWR [Bęcek 2010]. Wynika to z potrzeby eliminowania wspomnianego błędu systematycznego z numerycznych modeli terenu. Z drugiej zaś strony, błąd ten może zawierać informacje dla specjalistów zainteresowanych charakterystyką (gęstością) pokrywy roślinnej [Tebaldini 2010, Brown i in. 2010].

Za jedno z największych i najważniejszych przedsięwzięć w dotychczasowej historii monitorowania zjawisk przyrodniczych należy uznać stworzenie za pomocą metody jedno-przebiegowej InRWR globalnego numerycznego modelu terenu [Bęcek 2006]. Model ten znany pod skrótem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) powstał w roku 2000 w rezultacie jedenastodniowej wyprawy amerykańskiego wahadłowca Endeavour [Farr i in. 2007]. SRTM znajduje zastosowanie w szeregu dyscyplin naukowych takich jak archeologia, ekologia, geofizyka, geodezja, geologia i wielu innych. Z ważnych zalet tego unikalnego zbioru danych o naszej planecie można wymienić: jednorodność danych pod względem metody ich pozyskania, mały piksel 1'' terytorium USA) lub 3'' (prawie cały świat), mały błąd rzędnej (instrumentalna składowa błędu) wynoszący około  $\pm 1.55$  m [Bęcek 2008], rzędne zawierają błąd systematyczny zależny od gęstości roślinności, co pozwala na globalną ocenę zasobów leśnych [Bęcek 2010], a także fakt, że zbiór ten jest dostępny bezpłatnie.

Sukces misji SRTM stał się niewątpliwie ważnym argumentem, który zadecydował o uruchomieniu znacznie bardziej zaawansowanego programu InRWR zwanego TanDEM-X (pasma X). Program TanDEM-X realizowany jest na bazie dwóch satelitów (TerraSAR-X i TanDEM-X) poruszających się po bardzo podobnych orbitach. Ich ruch względem siebie jest tak kontrolowany, by uzyskiwać optymalną bazę dla danych InRWR. TanDEM-X zalicza się do jednoprzebiegowej InRWR. Oczekuje się, że TanDEM-X zacznie dostarczać numeryczne modele powierzchni terenu o wysokiej rozdzielczości przestrzennej ( $< 1''$ ), przy jednocześnie wysokiej dokładności rzędnych o błędzie średnim poniżej  $\pm 1.0$  m (instrumentalny składnik błędu). Wysoka rozdzielczość przestrzenna, wysoka dokładność rzędnych, oraz fakt, że pomiar będzie mógł być dokonany nad tym samym obszarem nawet wielokrotnie w okresie trwania tej kilkuletniej misji, dostarczą bardzo dużo materiału do badań środowiskowych.

Na bazie interferometrii RWR powstała metoda różnicowej interferometrii radaru o wysokiej rozdzielczości (RInRWR) (ang. *Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry – DInSAR*) [Zebker i in. 1994]. Metoda RInRWR nadaje się do pomiaru przemieszczeń rzędu pół długości mikrofal (i większych) – 1.6 cm w przypadku pasma X. Wyznaczone przemieszczenia są składowymi wektora przemieszczeń w kierunku wiązki radaru. Pomiaru dokonuje się przy użyciu obrazów radarowych pozyskanych przed i po zdarzeniu, które mogło spowodować przemieszczenie. W obliczeniach przemieszczeń pomocny jest numeryczny model terenu badanego obszaru. Chodzi o eliminację wpływu topografii z wyników przemieszczeń. Odsyłając Czytelnika do literatury odnośnie szczegółów RInRWR, w znacznym skrócie omówię przykłady monitorowania zjawisk przyrodniczych przy zastosowaniu RInRWR.

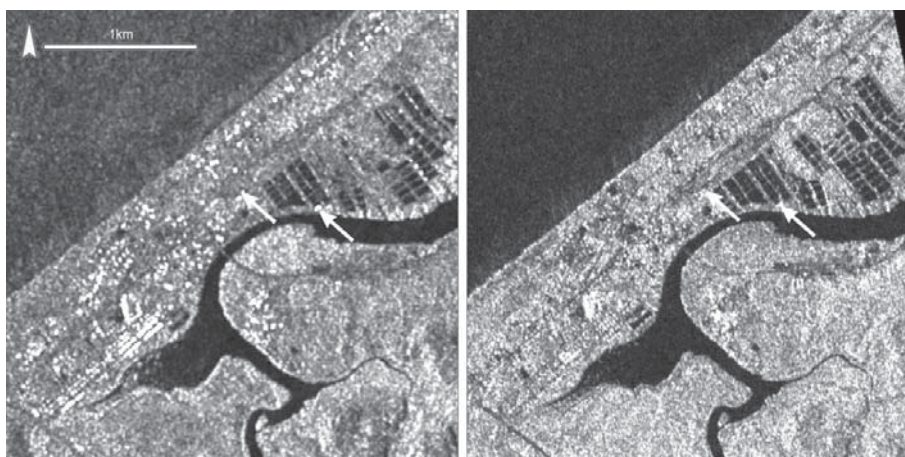
Osiadanie górotworu wywołane pracami górnictwymi wymaga ustalenia dynamiki oraz obszaru dotkniętego tym zjawiskiem. Szereg prac demonstruje przykłady zastosowań dwuprzebiegowej RInRWR na bazie obrazów satelitarnych. Zalety wykorzystania do celów monitorowania osiadania górotworu obrazów dostarczanych przez japońskiego satelitę ALOS PALSAR (pasma L) [Wang i in. 2010] wynikają z faktu, że obrazy te są mało wrażliwe na dekorelację wywołaną warunkami meteorologicznymi (ruch roślinności) oraz

niskiej ceny (około 200 euro/obraz). Dane z tego samego źródła wykorzystywano także do oceny przemieszczeń wywołanych silnym trzęsieniem ziemi, które miało miejsce w prowincji Sichuan (Chiny), w maju 2008 [Chini i in. 2010].

Metodę RInRWR zastosowano do pomiaru deformacji terenu wywołanych aktywnością wulkanu [Kim i in. 2001] oraz do pomiaru prędkości i kierunku przesuwania się jeziora lodowca na Spitsbergenie [Wangensteen i in. 1999].

Wspomniane zjawisko dekorelacji, które pojawia się w trakcie przetwarzania pary obrazów radarowych, uniemożliwia uzyskanie rzędnych za pomocą InRWR, a także pomiaru zmian rzędnych terenu za pomocą RInRWR. Okazuje się, że te niedogodności można częściowo złagodzić dzięki technice „naturalnych zwierciadeł” (ang. *permanent scatterers – PS*) [Ferretti i in. 2001]. W literaturze angielskojęzycznej używa się również określenia *persistent scatterers*. W polskim piśmiennictwie używane jest określenie „rozpraszacze stabilne”. Wydaje się jednak, że tłumaczenie to jest niewłaściwe, bowiem nie oddaje ono w pełni sensu zjawiska, które ma opisywać. Istotą radaru jest pomiar czasu, który upływa pomiędzy wysłaniem wiązki energii a odebraniem jej echa odbitego od obiektów. Stąd polskie tłumaczenie terminów *scatter* oraz *backscatterer* w ich czasownikowym znaczeniu powinno nawiązywać do odbijania (w znaczeniu np. światła od zwierciadła – ang. *to reflect*), a nie do „rozpraszania”, co proponuje powyższe tłumaczenie – „rozpraszacze”. Również termin „stabilne” nie wydaje się być trafny, ponieważ w omawianym kontekście przymiotniki *permanent* i *persistent* lepiej jest tłumaczyć jako *trwały* lub nawet *naturalny*. Niniejsza propozycja tłumaczenia wyraźnie informuje o naturalnym pochodzeniu własności odbijających zwierciadeł.

Mianem naturalnych zwierciadeł (NZ) określa się obiekty, które odbijają sygnał radaru, stąd są one widoczne na obrazie radarowym jako jasne piksele. Ten sam punkt NZ powinien być dostrzegalny na każdym obrazie radarowym danego obszaru przez długi czas (lata). Na terenach zurbanizowanych punktami NZ są najczęściej budynki. Na innych obszarach mogą to być np. odkryte skały.



Rys. 4. Przykłady naturalnych zwierciadeł wskazują strzałki. Na lewo obraz TerraSAR-X. Na prawo obraz ALOS PALSAR (pasma L) tego samego obszaru

Fig. 4. Examples of permanent scatterers are indicated by pointers. Left pane shows a TerraSAR-X image, while right pane shows an ALOS PALSAR image of the same area



Na rysunku 4 przedstawiono dwa przykłady NZ na obrazach wykonanych w paśmie X i L prawie w tym samym czasie. Punkty NZ można przyrównać do „naturalnej” sieci punktów geodezyjnych. Jak wspomniano, stwarzają one możliwość uzyskania wektorów przemieszczeń w określonej liczbie punktów, co jest szczególnie cenne w sytuacji, gdy dla dużej części pary obrazów radarowych nie można uzyskać odpowiedniego poziomu skorelowania. Okazuje się, że dokładność przemieszczeń wyznaczanych w punktach NZ osiąga poziom jednego milimetra.

Literatura zawiera szereg przykładów zastosowań NZ. Metodę RInRWR z punktami NZ wykorzystano do pomiaru przemieszczeń i deformacji termicznych budynków [Ferretti i in. 2000]. Metodę tę wykorzystano również w pomiarach deformacji wywołanych aktywnością sejsmiczną i polodowcową [Dehls i in. 2002]. Metoda RInRWR z punktami NZ znajdzie w przyszłości niewątpliwie jeszcze wiele zastosowań, np. do monitorowania osuwisk gruntów i erozji.

## PODSUMOWANIE

W pracy dokonano przeglądu najważniejszych metod teledetekcji aktywnej, która polega na wykorzystaniu radaru jako źródła iluminacji powierzchni Ziemi. Jedną z głównych zalet radaru z punktu widzenia teledetekcji jest to, że może on pozyskać dane w każdych warunkach oświetleniowych i pogodowych.

W ciągu trzech dekad, które upłynęły od momentu umieszczenia na orbicie okołozemskiej pierwszego satelity wyposażonego w system RWR, powstało kilka jakościowo nowatorskich metod monitorowania zjawisk przyrodniczych. Jest wiele powodów, by sądzić, że okres ten jest dopiero początkiem otwierającym dalsze poszukiwania zmierzające do usprawniania istniejących metod i poszukiwania nowych rozwiązań. Postęp jest w dużym stopniu uzależniony od rozwoju systemów do szybkiej transmisji, zapisu i przetwarzania ogromnych zbiorów danych pozyskiwanych w trakcie pomiarów RWR czy InRWR. Niewątpliwie zagadnienia takie jak konstrukcja wielopasmowych, w pełni spolaryzowanych systemów RWR i InRWR będą jednym z kierunków rozwojowych teledetekcji aktywnej. Równocześnie badania mechanizmów interakcji pomiędzy mikrofalami i roślinnością będą kontynuowane. Należy również oczekiwać rozwoju sposobów wykorzystania RWR i InRWR do przewidywania plonów rolnych. Ocena taka będzie się stawała coraz bardziej istotna z uwagi na przyrost ludności z jednej strony a coraz bardziej niestabilne warunki klimatyczne w wielu rejonach świata.

Warto zwrócić uwagę, że technologia RWR w obecnej formie ma więcej wspólnego z fotointerpretacją niż z teledetekcją. Podobnie technika InRWR służy w zasadzie do wyznaczenia wysokości. Stąd InRWR jest bliższy metodzie LiDAR niż teledetekcji. Zważywszy na fakt, że wartość rzędnej pozyskanej metodą InRWR zależy od własności biofizycznych identyfikowanego obiektu (roślinność), InRWR powinna być rozważana na gruncie teledetekcji. Również metoda RWR może być dyskutowana w ramach teledetekcji, ponieważ RWR posiada znaczny potencjał rozwojowy. Dlatego też nie można wykluczyć, że w przyszłości rozwój RWR nie doprowadzi do stworzenia wielopasmowej metody RWR, która będzie polegała na analizie informacji dostarczanych przez kilka kanałów spektralnych, co jest właśnie paradygmatem teledetekcji.



**PIŚMIENNICTWO**

- Amini J., Sumantyo J.T.S., 2009. Employing a Method on SAR and Optical Images for Forest Biomass Estimation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 47, 4020–4026.
- Bęcek K., 2006. W 10 dni Dookoła Świata, *Geodeta*, Vol. 132, Nr 5.
- Bęcek K., 2008. Investigating error structure of shuttle radar topography mission elevation data product. *Geophys. Res. Lett.* 35, L15403.
- Bęcek, K., 2010. Biomass Representation in Synthetic Aperture Radar Interferometry Data Sets. *Rozprawa habilitacyjna, Uniwersytet Techniczny w Dreźnie, październik (w druku)*.
- Brown C.G., Sarabandi K., Pierce L.E., 2010. Model-Based Estimation of Forest Canopy Height in Red and Austrian Pine Stands Using Shuttle Radar Topography Mission and Ancillary Data: A Proof-of-Concept Study. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 48, 1105–1118.
- Chang A.T.C., Atwater S.G., Salomonson V.V., Estes J.E., Simonett D.S., Bryan M.L., 1980. L-Band Radar Sensing of Soil Moisture. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on GE-18*, 303–310.
- Chini M., Atzori S., Trasatti E., Bignami C., Kyriakopoulos C., Tolomei C., Stramondo S., 2010. The May 12, 2008, (Mw 7.9) Sichuan Earthquake (China): Multiframe ALOS-PALSAR DInSAR Analysis of Coseismic Deformation. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 7, 266–270.
- Curlander J.C., McDonough R.N., 1991. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. John Wiley, Sons, Inc. New York, Chinchester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Curlander J.C., Holt B., Hussey K., 1985. Determination of sea ice motion using digital SAR imagery. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 10, 358–367.
- Cutrona L.J., Leith E.N., Palermo C., Porcello L.J., 1960. Optical data processing and filtering systems. *Information Theory, IRE Transactions on*, 6(3), 386–400.
- Cutrona L.J., Leith E.N., Porcello L.J., Vivian W.E., 1966. On the Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic-Aperture Radar. *Proceedings of the IEEE*, 54(8), 1026–1032.
- Dehls J. F., Basilio M., Colesanti C., 2002. Ground deformation monitoring in the Ranafjord area of Norway by means of the permanent scatterers technique. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '02*, 203–207.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, Vol. 45, RG2004.
- Ferretti A., Ferrucci F., Prati C., Rocca F., 2000. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 3219–3221.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 39, 8–20.
- Imhoff M.L., Story M., Vermillion C., Khan F., Polcyn F., 1986. Forest Canopy Characterization and Vegetation Penetration Assessment with Space-Borne Radar. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on GE-24*, 535–542.
- Imhoff M.L., 1995. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 33, 511–518.
- Kim S., Joong-Sun W., Jeong W.K. Moon W.M., 2001. Application of differential SAR interferometry over the Baegdu stratovolcanic mountain. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2001. IEEE 2001 International*, 2424–2426.
- Kingsley S., Quegan S., 1993. *Understanding Radar System*. McGraw-Hill Book Company, Singapore.

- Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D., 1992. Relating forest biomass to SAR data. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 30, 403–411.
- Lipa B., Crissman R., Barrick D., 1986. HF radar observations of Arctic pack-ice breakup. *Oceanic Engineering*, IEEE Journal of 11, 270–275.
- Martinez-Vazquez A., Fortuny-Guasch J., 2008. A GB-SAR Processor for Snow Avalanche Identification. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 46, 3948–3956.
- Marzano F.S., Weinman J.A., 2008. Inversion of Spaceborne X-Band Synthetic Aperture Radar Measurements for Precipitation Remote Sensing Over Land. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 46, 3472–3487.
- Mason D.C., Speck R., Devereux B., Schumann G.J.P., Neal J.C., Bates, P.D., 2010. Flood Detection in Urban Areas Using TerraSAR-X. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 48, 882–894.
- Mattia F., Floury N., Moreira A., 2009. Foreword to the Special Issue on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters From SAR Data for Land Applications. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 47, 379–380.
- McCandles S.W. Jr., 2003. The origin, evolution and legacy of SEASAT, 32–34.
- Müllenhoff O., 2003. Evaluation of Multi-Frequency and Multi-Polarization Airborne SAR data for Marsh Land and River Dyke Analysis. In Fritsch, D. (Ed.). *Photogrammetric Week'03*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Nichols A.D., Wilhelm J.W., Gaffield T.W., Inkster D.R., Leung S.K., 1986. A SAR for Real-Time Ice Reconnaissance. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on GE-24, 383–389.
- Reppucci A., Lehner S., Schulz-Stellenfleth J., Brusch S., 2010. Tropical Cyclone Intensity Estimated From Wide-Swath SAR Images. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 48, 1639–1649.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE* 88, 333–382.
- Short N.M.Sr., 2010. Remote Sensing Tutorial. Źródło internetowe: <http://rst.gsfc.nasa.gov/Front/tofc.html>.
- Sieber A.J., Trevett J.W., 1983. Comparison of Multifrequency Band Radars for Crop Classification. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on GE-21, 285–294.
- Skolnik M.I., 1988. *Introduction to Radar Systems*, 2nd ed. McGraw-Hill Company, Singapore.
- Smit M.K., 1979. Preliminary Results of an Investigation into the Potential Application of X-Band SLR Images for Crop-Type Inventory Purposes. *Geoscience Electronics*, IEEE Transactions on 17, 303–308.
- Tanase M.A., Perez-Cabello F., de la Riva J., Santoro M., 2010. TerraSAR-X Data for Burn Severity Evaluation in Mediterranean Forests on Sloped Terrain. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 48, 917–929.
- Tebaldini S., 2010. Single and Multipolarimetric SAR Tomography of Forested Areas: A Parametric Approach. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 48, 2375–2387.
- Ulaby F.T., Brisco B., Dobson C., 1983. Improved Spatial Mapping of Rainfall Events with Spaceborne SAR Imagery. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on GE-21, 118–121.
- Wang Z., Liu G., Chen T., Zhang J., Huang G., 2010. Detecting and assessing the land subsidence in coal mining area using PALSAR data based on D-InSAR technique, V3–222.
- Wangensteen B., Weydahl D. J., Hagen J.O., 1999. Mapping glacier velocities at Spitsbergen using ERS tandem SAR data, 1954–1956.
- Way J., Smith E.A., 1991. The evolution of synthetic aperture radar systems and their progression to the EOS SAR. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 29, 962–985.
- Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M., Gabriel A. & Werner C.L., 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *J. Geophys. Res.* 99, 19617–19634.

## **THE ADVENT OF THE ACTIVE REMOTE SENSING FOR MONITORING OF NATURAL ENVIRONMENT**

**Abstract.** The last thirty years of environment monitoring witnessed a rapid development of the active remote sensing technology. Therefore, it is appropriate to consider this period as an advent of the active remote sensing. This paper offers a quick outline of the basics terms, approaches and typical applications of the technology which includes radar, synthetic aperture radar, synthetic aperture radar interferometry and methods which are derived from the synthetic aperture radar interferometry including the differential synthetic aperture radar interferometry and permanent scatterers. The polarimetric synthetic aperture radar interferometry and LiDAR were omitted from this review.

**Key words:** active remote sensing, radar, SAR, InSAR, DInSAR, PSInSAR

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.06.2010

Do cytowania – For citation: Bęcek K., 2010. Advent metod teledetekcji aktywnej do monitorowania zjawisk przyrodniczych. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.*, 9(2), 3–20.