

Marek MRÓZ

Metody kalibracji radiometrycznej oraz wstępnego przetwarzania obrazów radarowych SAR systemów ERS-1/2 oraz RADARSAT

Radiometric calibration and preprocessing of SAR images issued from ERS-1/2 and RADARSAT systems

Almost always SAR applications scientists need to easily relate pixel values in SAR images to backscattering coefficient of corresponding distributed targets in the scene.

Backscattering coefficient so may be used to retrieve of some geo- and biophysical properties of the objects on the Earth surface.

The main aim of this paper is to describe and compare the

derivation methods of σ^0 in ERS 1/2 SAR PRI and RADARSAT SGF images.

At present these systems are the most popular sources of spaceborne radar imageries.

Following the steps mentioned in the procedure described below user can calculate easily σ^0 and if necessary correct it for incidence angle (without terrain topography correction).

Wprowadzenie

Jednym z podstawowych celów przetwarzania obrazów teledetekcyjnych jest wydobycie z wartości radiometrycznych informacji o ilościowych cechach obrazowanych obiektów. Z reguły metodyka sprowadza się do konstruowania mniej lub bardziej złożonych modeli, gdzie jednym z parametrów (często podstawowym, ale jednym z wielu) jest luminancja L (lub reflektancja) dla zakresów „optycznej” rejestracji albo współczynnik wstępnego rozpraszania σ^0 dla aktywnej rejestracji mikrofalowej — radarowej (odpowiednik reflektancji).

Pierwszym krokiem jest powiązanie wartości cyfrowych pikseli obrazu (DN) z wielkościami radiometrycznymi charakteryzującymi obiekty w procesie tzw. kalibracji radiometrycznej. W artykule zostały omówione kolejne etapy prowadzące do wyznaczenia współczynnika wstępnego rozpraszania radarowego (*backscattering coefficient*) dla obrazów ERS-1/2 SAR PRI oraz RADARSAT Path Image (SGF), produktów obecnie najczęściej wykorzystywanych w zastosowaniach z zakresu kartowania użytkowania Ziemi (*land use/land cover*).

Współczynnik σ^0 charakteryzuje w sposób ilościowy właściwości odbiciowe i rozpraszające komponentów środowiska, umożliwia również porównywanie ich między sobą przy wielokrotnych rejestracjach satelitarnych dla zmieniających się w czasie parametrów bio- i geofizycznych tych komponentów (gleb, roślinności, powier-

zchni wodnych, ...). Obrazy radarowe wymagają też odpowiedniej filtracji pozbawiającej je widocznego efektu plamkowania (*speckle*) związanego z koherentną techniką obrazowania.

Kalibracja radiometryczna obrazów systemu ERS-1/2 SAR

W celu zapewnienia użytkownikom obrazów ERS-1 (i ERS-2) SAR możliwości pracy z danymi precyzyjnie skalibrowanymi, pozyskiwanymi przez długi okres, ESA połączyła elementy kalibracji wewnętrznej urządzenia z dokładnymi pomiarami „na gruncie”. Pomiary te dotyczą analizy stabilności sygnału odbijanego przez specjalne reflektory w formie otwartych ostrosłupów tzw. *corner reflectors*.

Obliczenie współczynnika wstępnego rozpraszania radarowego dla obrazu ERS-1 SAR PRI

PRI (*precision image*) jest standardem ESA stworzonym z myślą o dokładnych analizach radiometrii obrazu SAR w zastosowaniach kartografii tematycznej. Dokładny opis obrazu PRI można znaleźć w *ERS-1 ESA Products Specifications*, ER-IS-EPO-GS-0501, Iss.2, Rev. 1, August 1991 lub w *ERS User Handbook* ESA SP-1148, Rev.1, Sept. 1993.

Niektóre parametry obrazu PRI:

- obraz „wielokrotnej obserwacji” w kierunku azy-mutalnym (*multi-look 3Az*),
- odniesiony do śladu orbity satelity (*ground range*),
- skorygowany ze względu na diagram anteny (*SAR antenna pattern*),
- skorygowany na różnice odległości na skrajach wiązki (*range-spreading loss*),
- nie jest geokodowany i nie ma usuniętych wpływów deniwelacji terenu na radiometrię (np. *layover*),
- rozdzielczość terenowa — 25 m *in ground range* × 22 m *in Azimuth*,
- wymiary piksela obrazu w mierze terenowej: 12,5 × 12,5 m,
- reprezentacja radiometryczna: amplituda $A = (\text{moc})^{0.5}$ (może być też niekiedy moc; należy zwrócić na to uwagę w nagłówku zbioru cyfrowego),
- długość słowa bajtowego przy kodowaniu (*pixel depth*) — 16 bitów,
- wielkość zbioru ~ 131 MB,
- wielkość sceny: 100 × 100 km.

Parametry kalibracji wewnętrznej

Dwa rodzaje parametrów kalibracji wewnętrznej są mierzone w instrumencie ERS-1 SAR AMI. Na początku i na końcu każdej sekwencji obrazowania SAR są mierzone wartości mocy czterech impulsów wysyłanych oraz prowadzony jest 8-krotny pomiar szumów (termicznych) w czasie gdy nie są nadawane impulsy. Daje to wewnętrzną zbiór kalibracyjny.

Oprócz tego podczas sekwencji obrazowania tworzone są kopie transmitowanych impulsów (repliki) i dodawane co 24 rekordy do danych źródłowych.

Zapewnia to wewnętrzną kalibrację produktów SAR, zwłaszcza że AMI nie ma automatycznego systemu kontroli wzmocnienia (*automatic gain control system*). *Gain* (zysk anteny) może mieć dryft spowodowany zmianami temperatury i starzeniem się systemu. Dryft ten może być monitorowany właśnie przez wielokrotną analizę replik mocy impulsów emitowanych.

Kalibracja na obszarze testowym Flevoland (ESA Transponders)

Użytkownicy obrazów SAR żądają poprawnej kalibracji czyli porównania obrazów wieloczasowych ze stabilnym wzorcem. Takim wzorcem są transpondery ESA umieszczone na polderze Flevoland w Holandii. Taką kalibrację można uzyskać przez porównanie replik impulsów wysyłanych w czasie generowania danego obrazu z replikami impulsów wysyłanych dla zgenerowania obrazu odniesienia na obszarze Flevolandu, z którego jest wyliczana stała kalibracyjna publikowana do danych PRI. Wartość *replica pulse power* użyta dla generowania danego obrazu jest podana w nagłówku zbioru zawierającego ten obraz.

Wyrażenie używane do tej korekcji jest następujące:

$$\frac{\text{image replica pulse power (irp)}}{\text{reference replica pulse power (rrp)}}$$

Jest to konieczne ponieważ stała kalibracyjna jest podawana przy innej mocy sygnału niż tworzony jest dany obraz. Rząd wielkości dryftu impulsów: do 1,5 dB w pewnym okresie 1992 roku i tylko ok. ± 0,1 dB dla roku 1993. Przykładowa stabilność radiometryczna dla szeregów czasowych przed korekcją dryftu mocy impulsu wynosiła 0,43 dB, a po korekcji 0,38 dB (transponder nr 2). Podobnie było dla transponderów 1 i 3.

Równanie kalibracyjne dla danych ERS-1 SAR PRI

Wyrażenie pełne pozwalające na obliczenie σ^0 dla dowolnego obrazu przy lokalnym kącie padania α .

$$\sigma^0 = \frac{\langle I \rangle}{K} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{\text{ref}}} \cdot \frac{\text{image replica pulse power}}{\text{reference replica pulse power}} \quad (1)$$

gdzie: $\langle I \rangle$ — średnia wartość piksela (wartość oczekiwana), wypadkowa dla wszystkich dyfuzorów elementarnych obejmowanych powierzchnią piksela, σ^0 — współczynnik odbicia radarowego dla źródła rozciągniętego (*backscattering coefficient of the distributed target*), K — współczynnik proporcjonalności — stała kalibracyjna.

Stać kalibracyjna jest ważna tylko dla jednego rodzaju produktu np. PRI i jednego procesora (np. D-PAF, UK-PAF lub ESA/ESRIN),

α_{ref} — kąt padania dla środka wiązki (*mid range incidence angle*) równy 23 stopnie,

α — lokalny kąt padania (obliczany na podstawie zależności geometrycznych przedstawionych w dalszej części rozdziału).

Reference replica power (Flevoland) jest podawane na określonej dacie np. 13 X 1991 21:40 UTC *rrp* = 205229. Należy więc znać wartość *rrp* obowiązującą w czasie rejestracji jakiegoś obrazu i, jak to powiedziano wyżej, wartość *irp* dla tego konkretnego obrazu.

Przyjmuje się jednak, że dla ogromnej większości aplikacji ten element kalibracji może być pominięty, gdyż jego wpływ na precyzję radiometryczną jest na ogół znikomy, chyba że stwierdzi się znaczną różnicę.

Precyzję radiometryczną wyznaczaną średnią odchyłką z szeregu czasowego między nominalną wartością *radar cross section* a pomierzoną przez radar oszacowuje się przy tej samej stałej kalibracji na ± 0.4 dB. Tę wartość można uważać praktycznie za dokładność z jaką wyznacza się σ^0 dla obiektów rozciągniętych (naturalnych).

Dalsze rozważania na temat kalibracji będą dotyczyły obrazów PRI tworzonych po 1 września 1992, skorygowanych na *antenna pattern* i *range spreading loss*. Wszystkie szczegóły można znaleźć w pracy H. Laura (1992).

Praktyczne obliczenie σ^0 opiera się na realizacji uproszczonego wzoru:

$$\sigma^0 = \frac{\langle I \rangle}{K} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{\text{ref}}} \quad (2)$$

gdzie: $\langle I \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} DN_i^2$

a DN_i jest wartością cyfrową (*digital number*) danego

piksela i , która jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z natężenia (mocy) odbieranego w danym momencie sygnału. $DN_i \sim (I_i)^{0,5}$

Reprezentacja radiometryczna obrazu PRI jest wyrażona w jednostkach amplitudy odbieranego sygnału, która jest pierwiastkiem kwadratowym z natężenia (mocy).

Stałe kalibracyjne są jednak podawane dla obrazów mocy, należy więc wartości pikseli podnieść do kwadratu.

Ze względu na zjawisko *speckle'a* pojedyncza wartość radiometryczna piksela nie jest reprezentatywna dla danego obiektu rozciągniętego, z którego pochodzi, należy więc do obliczeń statystycznie akceptowalnej wartości estymatora I wziąć średnią $\langle I \rangle$ z kilkuset pikseli (więcej niż pięćset).

Sposób obliczenia α lokalnego jest podany w opracowaniu Laura (1992). Dla całej szerokości sceny kąt zmienia się od $19,5^\circ$ przy *near range* do $26,6^\circ$ przy *far range*, co daje wartości korekcyjne na skrajach rzędu $-0,7$ dB i $+0,6$ dB.

Często σ^0 podaje się w decybelach ze względu na znaczną dynamikę sygnału:

$$\sigma^0 \text{ [dB]} = 10 \log_{10} \sigma^0 \quad (3)$$

Dla obrazu w jednostkach amplitudy:

$$\sigma^0 \text{ [dB]} = 20 \log_{10} \sigma^0 \quad (4)$$

Przy opuszczeniu poprawek na kąt padania ostateczny wzór na obliczenie estymatora σ^0 w dB dla obrazu PRI jest następujący:

$$\hat{\sigma}^0 \text{ [dB]} = 20 \log_{10} \frac{\langle A \rangle}{(K)^{0,5}} \quad (5)$$

Tabela 1 zawiera wartości obowiązujące na dzień 17 X 1992 dla wszystkich produktów PRI przetworzonych po 1 IX 1992.

Tabela 1.

Wartości stałej K dla różnych procesorów
Values of constant K for different processors (PAF-s)

ERS-1 SAR PRI przetworzone po 1 IX 1992 ERS-1 SAR PRI processed after 1 IX 1992		
ESRIN/EECF	D-PAF	UK-PAF
$K = 666110$ $= 58,24$ dB	$K = 666110$ $= 58,24$ dB	$K = 890107,2$ $= 59,49$ dB

Należy tu podkreślić, że współczynnik σ^0 charakteryzujący obiekt musi być liczony dla reprezentatywnej grupy pikseli (jak powiedziano wyżej).

Kalibracja radiometryczna obrazów systemu RADARSAT na podstawie pracy Shepherd'a (1996)

„Filozofia” kalibracji radiometrycznej RADARSAT

System satelitarny RADARSAT składa się z urządzenia SAR umieszczonego na satelicie oraz stacji naziemnej zapewniającej przetwarzanie sygnałów i syntezę obrazów (*Canadian Data Processing Facility — CDPF*).

System kalibracji radiometrycznej jest procesem, który zapewnia, że czasowa i przestrzenna stabilność pomiarów mocy rozproszonego wstecznie przez powierzchnię promieniowania (*surface radar reflectivity*) jest utrzymana w pewnym określonym reżimie.

Kalibracja radiometryczna może być rozpatrywana na dwu poziomach:

I. Względna kalibracja radiometryczna, która dotyczy krótko- i długookresowej stabilności i powtarzalności pomiarów. Sama znajomość precyzji kalibracji względnej może być wystarczająca dla niektórych zastosowań, gdzie zmiany właściwości odbiciowych powierzchni są większe niż bezwzględne wartości współczynnika odbicia.

W tym zakresie system zmierza do uzyskania następujących dokładności:

- 1 dB pomiędzy dwiema dowolnymi powierzchniami o jednakowych właściwościach rozpraszających obserwowanymi wewnątrz pojedynczej sceny o wymiarach 100×100 km;
- 1,5 dB pomiędzy dwiema obserwacjami tej samej powierzchni z interwałem czasowym jednej orbity (orbita kolejna);
- 2 dB pomiędzy dwiema obserwacjami tej samej powierzchni z interwałem 3-dniowym;
- 3 dB dla wszystkich obserwacji tej samej powierzchni w czasie całej misji satelity.

W powyższych definicjach zakłada się, że powierzchnie są jednorodne, o stabilnych właściwościach odbiciowych, o polach powierzchni (wielkościach) wystarczających do statystycznych ocen wpływu zjawiska *speckle'a*. *Speckle* i tzw. artefakty powinny być wyeliminowane w stopniu wystarczającym dla żądanych dokładności kalibracji względnej.

II. Bezwzględna (absolutna) kalibracja radiometryczna, która jest procesem wiążącym moc sygnału elektrycznego (wartość cyfrowa piksela obrazu) z właściwymi wartościami odbicia radarowego (*radar reflectivity*) charakteryzującymi obiekt w sposób ilościowy. Kalibracja bezwzględna jest konieczna w tych zastosowaniach, w których *radar reflectivity* jest związane z pewnymi parametrami geofizycznymi, takimi jak np. wilgotność gleby czy biofizycznymi, jak np. biomasa roślin.

Precyzja bezwzględnej kalibracji radiometrycznej jest funkcją stabilności użytych naziemnych wzorców referencyjnych oraz osiągalnej precyzji kalibracji względnej. Przećiętne dokładności kalibracji bezwzględnej wynoszą około:

- ± 3 dB wyznaczone z pomiarów przed wystrzeleniem satelity,
- $\pm 1,5$ dB *Corner reflector arrays*
- $\pm 1,5$ dB *Transponders*

Corner reflectors i *transponders* (odbłyśniki katowe i transpondery) są skalibrowane w tym znaczeniu, że mają wyznaczony tzw. przekrój skuteczny rozpraszania RCS — *Radar Cross Section* (parametr charakteryzujący rozpraszacze punktowe), podczas gdy system RADARSAT jest skonfigurowany i zaprojektowany dla pomiarów rozpraszania wstecznego tzw. obiektów rozciągniętych (*distributed target reflectivity*). Oszacowane powyżej błędy kalibracji bezwzględnej zawierają poprawki na błędy

spowodowane przeniesieniem wyznaczeń RCS dla rozpraszaczy punktowych na pomiary współczynnika rozpraszania dla obiektów rozciągłych (naturalnych). Ostateczna dokładność kalibracji radiometrycznej dla danego pomiaru mocy powracającego sygnału zależy więc od dokładności oceny RCS dla kalibratorów, precyzji kalibracji względnej oraz poprawności założenia, że RCS wyznaczony dla silnego rozpraszacza punktowego jest adekwatny dla obiektów rozciągłych takich jak obiekty naturalne na powierzchni Ziemi (Raney, 1994; Shepherd, 1996).

Należy podkreślić dwa specyficzne aspekty procesu kalibracji wykonywanego przez CDPF:

1. CDPF nie wykonuje żadnych wewnętrznych korekcyj na kąt padania wiązki. Są natomiast wykonywane kompensacje takich elementów jak *range spreading loss* (R^3) i *antenna gain* (straty wynikające z szerokości wiązki i zysku kierunkowego anteny).

Wynik tego jest taki, że odebrany od obiektu sygnał radarowy przetworzony po zastosowaniu wyżej wymienionego procesu skalowania sygnału jest skalibrowany w jednostkach beta zero (β^0) lub inaczej jako *radar brightness*.

Konwersja do sigma zero (σ^0) wymaga obliczenia dodatkowego składnika — sinusa kąta padania w ostatecznym, wyjściowym równaniu kalibracyjnym.

2. CDPF nie wykonuje też estymacji i eliminacji szumu termicznego.

Proste stosowanie równań skalowania sygnału wyjściowego skutkuje obciążoną estymacją β^0 , z błędem estymacji odwrotnie proporcjonalnym do stosunku sygnał/szum termiczny w danych obrazowych.

Stała systemowa C i współczynnik kontrolny GCF

Główny element w procesie kalibracji bezwzględnej systemu RADARSAT stanowi zdefiniowanie i utrzymywanie ostatecznej, końcowej stałej kalibracyjnej oznaczanej przez C , obliczanej zgodnie ze wzorem:

$$C = V^2 / \beta^0 \quad (6)$$

gdzie: V — jest wartością cyfrową piksela na wejściu do procesora, przed zastosowaniem skalowania sygnału, β^0 — odpowiadająca mu wartość *radar brightness* dla danego piksela.

C wyrażana jest w voltach do kwadratu C [Volt²], natomiast β^0 jest wartością niemianowaną. Wartość C jest utrzymywana możliwie blisko jedności podczas działania systemu i jest justowana jeżeli pomiary dla obiektów referencyjnych (wzorcowych) wskazują taką potrzebę. C jest korygowane przez zmianę wartości zewnętrznego parametru GCF (*Gain Control Factor*), który z reguły, co ważne, nie ma wartości bliskiej jedności. Na przykład jeżeli rzeczywiste napięcie prądu pojawiające się w urządzeniu, wywołane detekcją pewnej porcji powracającego promieniowania mikrofalowego ma wartość S , to wartość GCF musi być tak dobrana, aby spełniony był warunek:

$$S^2 \times GCF^2 = C = 1 \quad (7)$$

Z punktu widzenia użytkownika obrazów systemu RADARSAT wartości stałej systemowej C oraz współczynnika GCF nie muszą być mu znane jako wartości charakteryzujące proces kalibracji radiometrycznej danych.

Segment naziemny systemu RADARSAT (*RADARSAT Mission Management*) zapewnia justację wartości GCF , co prowadzi do utrzymania wyżej wymienionych reżimów dokładnościowych kalibracji względnej i bezwzględnej.

Rycina 1 przedstawia fragment sceny satelitarnej RADARSAT dla obszaru północnej Polski (RADARSAT 1, 5 VIII 1996, Standard 6, 3925 orbita zstępująca, *Path Image*). W jej części północnej (Zatoka Gdańska i fragment wybrzeża) widać wyraźnie wadliwe działanie systemu kalibracji radiometrycznej (niewłaściwa wartość GCF).

Skalowanie wartości wyjściowych

Opisany powyżej proces ustala bezpośredni związek między β^0 i rejestrowanym napięciem prądu, dlatego możemy mówić o systemie skalibrowanym. Jednakże wynikowe amplitudy sygnału nie mogą być na ogół właściwie reprezentowane i zapisane na nośnikach w typowych formatach ze względu na bardzo dużą ich dynamikę (przedział). Dlatego konieczne jest dokonanie pewnej korekcji poziomu sygnału.

Przed zapisaniem danych na nośnik wykonuje się skalowanie (*output scaling*) wartości piksela obrazu przez wprowadzenie parametrów *gain* i *offset* (stała mnożenia i dodawania), aby zapewnić optymalne wykorzystanie całego dostępnego zakresu wartości dopuszczanego przez wybrany typ słowa (*byte, unsigned integer, signed integer,...*).

Offset przyjmuje stałą wartość, a *gain* wartość, która zależy od odległości piksela w kierunku zasięgu (poziomej lub ukośnej). Skoro współczynnik *gain* zmienia się w funkcji zasięgu, może być również użyty do wyrównania zmian poziomu sygnału wyjściowego na całej szerokości pasa obrazowania, które wynikają z naturalnej tendencji do przyjmowania wartości malejących wraz ze wzrostem kąta padania fali, a więc do utrzymywania bardziej jednolitej jasności obrazu na całej jego szerokości.

Pewna liczba współczynników skalowania *gain* w postaci tak zwanych tablic LUT (*Look-Up-Table*) wraz z towarzyszącą im wartością *offset*-u jest podawana dla różnych typów obrazowanej powierzchni (powierzchnie oceanów, lodowców, obszarów lądowych i mieszanych).

Uzyskanie radiometrycznie skalibrowanych danych z zapisanego obrazu wymaga odwrócenia opisanego procesu skalowania. W tym celu plik zawierający dane obrazowe zapisane w strukturze (standardzie) CEOS uzupełniony jest o dane pomocnicze zawierające właściwe wartości *offset*-u i współczynników zależnych od zasięgu.

Poniżej przedstawiono proces obliczania wartości skalibrowanych oraz metodę skalowania różnych typów produktów RADARSAT.

Działanie systemu

Procesor urządzenia nadawczo-odbiorczego prowadzi wszystkie wewnętrzne operacje obliczeniowe używając 32-bitowego zapisu zmiennoprzecinkowego, na tym poziomie nie występują więc żadne ograniczenia z tytułu zakresu wartości rejestrowanego sygnału. Inaczej ma się sprawa z zapisem produktu wyjściowego na typowych nośnikach w standardzie CEOS. Zapis jest ograniczony do jednego z trzech typów reprezentacji binarnej wartości piksela (długości słowa bitowego):

Tabela 2.

Formaty zapisu obrazów Radarsat
Format of records of RADARSAT data

Nazwa produktu	Format zapisu
Single Beam Detected Products (SGF, SGX, SGC)	16 bit unsigned integer (liczba całkowita bez znaku)
ScanSAR Swath Products (SCN, SCW)	8 bit unsigned integer (bajt)
Single Look Complex (SLC)	16 bit I + 16 bit Q, signed integer (liczba całkowita ze znakiem +/-)

Przetwarzanie w stacji naziemnej

Kalibracja wartości wyjściowych pikseli obrazu SAR jest kontrolowana w każdym z trzech bloków funkcjonalnych tworzących ciąg syntezy obrazu:

1. Blok syntezy w kierunku zasięgu (*range processing*)
2. Blok syntezy azymutalnej (*azimuth processing*)
3. Blok skalowania sygnału wyjściowego.

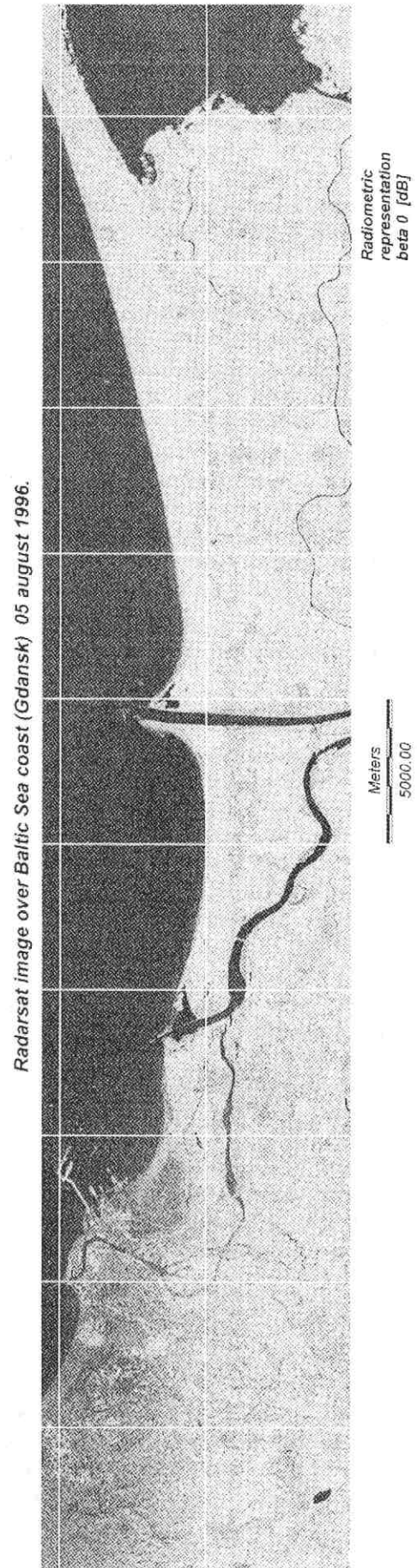
1. Blok *range processing*

Istotnym dla procesu kalibracji elementem tego etapu syntezy obrazu jest wprowadzanie korekcji ze względu na diagram anteny nadawczo-odbiorczej (*antenna beam shape correction*). Skompresowany w kierunku zasięgu sygnał jest korygowany w celu skompensowania zmian zysku anteny wynikającego z kształtu wiązki padającej na całą szerokość obrazowanego pasa terenu. Zmienny kierunkowo zysk anteny jest normalizowany do zysku wzorcowego G_0 odpowiadającego środkowi wiązki, tj. nominalnemu kątowi padania równemu 33.7° (dla wariantu rejestracji *Beam 3*).

Na tym etapie korygowane są również straty mocy sygnału powracającego związane ze zwiększeniem odległości (dystansu) na skrajach wiązki w stosunku do jej środka (*range spreading loss*). Dokonuje się tego przez pomnożenie mocy sygnału przez wartość normalizującą $(R/R_0)^{3/2}$ gdzie R jest odległością ukośną do danego punktu, a R_0 — odległością ukośną odpowiadającą nominalnemu środkowi wiązki (dla wariantu rejestracji *Standard Beam 3*) gdy satelita znajduje się na 45° szer. geogr. północnej (nominalnie 951 km).

2. Blok *azimuth processing*

Blok syntezy azymutalnej zapewnia kompresję azymutalną, korekcje migracji (*range curvature*) oraz konwersję odległości ukośnej do zredukowanej (*slant to ground*).



Ryc. 1. Obraz RADARSAT — fragment wybrzeża Bałtyku
Fig. 1. RADARSAT image — Baltic Sea coastal

3. Blok skalowania sygnału wyjściowego

Po kompresji azymutalnej sygnał zapisany zostaje w formie zespolonej (I , Q) i w dalszej kolejności jego przetwarzanie przebiega dwutorowo, niezależnie dla części I (*in phase*) oraz Q (*in quadrature*):

$$I = |A| \cos \varphi \quad (8)$$

$$Q = |A| \sin \varphi \quad (9)$$

w przypadku produktów typu SLC (*Single Look Complex*).

Zależny od odległości współczynnik $Ac_{(r)}$ jest stosowany dla kanału I i Q , a wynik mnożenia zaokrąglany do 16-bitowej liczby całkowitej ze znakiem (*signed integer*) przed zapisaniem na nośniku. Wartości $Ac_{(r)}$ są zestawione w tabeli wraz z odpowiadającymi im odległościami ukośnymi r i zapisane w nagłówku zbioru obrazowego (struktura CEOS) w części *Radiometric Data Record*.

Dla obrazów typu PRI, gdzie wartość piksela $DN \sim A = (I^2 + Q^2)^{0.5}$ współczynnik $Ac_{(r)}$ jest podawany w funkcji odległości zredukowanej (*ground range*) i oznaczany przez $A_{(r)}$ zapisywany na odpowiednim polu *Radiometric Data Record* w strukturze CEOS. Dodatkowo zapisywana jest również wartość *offset*-u A_0 , niezależna od odległości, po przekształceniu do formatu 8 lub 16 bitów.

Równania kalibracyjne

Uzyskanie wartości skalibrowanych sygnału radarowego na podstawie wartości cyfrowych poszczególnych pikseli obrazu wymaga odwrócenia procesu skalowania wyjściowego opisanego poprzednio. W zależności od typu produktu (*PRI* lub *SLC*) każdy piksel jest reprezentowany przez jedną lub dwie wartości liczbowe (DN). *Radiometric Data Record* zawiera potrzebne informacje do ich przekształcenia w wartości β^0 (*radar brightness*):

— liczba współczynników $A_{(r)}$ lub $Ac_{(r)}$, najczęściej jest to liczba 512.

— liczba pikseli $samp_inc$ (przedział w kierunku zasięgu — *increment*) korygowanych tą samą wartością $A_{(r)}$,

— stabelaryzowane wartości $A_{(r)}$ lub $Ac_{(r)}$ w postaci tzw. *Look Up Tables* (LUT),

— poziom szumu termicznego,

— *offset* A_0

Pierwsza wartość $A_{(r)}$ z tabeli LUT odpowiada pierwszemu pikselowi w linii, druga pikselowi $1 * samp_inc$, trzecia $2 * samp_inc$, itd. Użytkownik może interpolować wartości współczynnika dla każdego kolejnego piksela w linii, ale różnice między kolejnymi współczynnikami w tabeli są tak niewielkie, że błąd braku interpolacji może być zaniedbywalny.

Równanie kalibracyjne dla obrazu SGF

Jeżeli przez DN oznaczymy wartość piksela obrazu położonego w pewnej odległości terenowej RG (*ground range*) od śladu orbity, to odpowiadająca jej wartość sygnału radarowego (*radar brightness*) dana jest równaniem:

$$\beta^0(RG) = 10 * \log_{10} \{ [DN^2 + A_0] / A_{(r)} \} \text{ dB} \quad (10)$$

gdzie: $A_{(r)}$ — współczynnik z tablicy LUT dla danego RG , A_0 — *offset*.

Odległość RG (*ground range*) danego piksela dana jest równością:

$$RG = pix_spacing * N \quad (11)$$

gdzie: „ $pix_spacing$ ” jest wymiarem piksela w [m], N — liczba pikseli obrazu od początku linii.

Odpowiadający jej numer współczynnika z tabeli LUT oblicza się następująco:

$$i = \text{integer} (pix_spacing * N / samp_inc) \quad (12)$$

Równanie kalibracyjne dla obrazu SLC

Jeżeli DN_i jest wartością cyfrową odpowiadającą składowej I oraz DN_q jest wartością cyfrową odpowiadającą składowej Q obrazu w formie zespolonej SLC (*Single Look Complex*), to odpowiadająca jej wartość sygnału radarowego (*radar brightness*) przy danej odległości ukośnej RS (*slant range*) dana jest równaniem:

$$\beta^0(RS) = 10 * \log_{10} \{ [DN_i / Ac_{(r)}]^2 + [DN_q / Ac_{(r)}]^2 \} \text{ dB} \quad (13)$$

$$\beta^0(RS) = 20 * \log_{10} [DN / Ac_{(r)}] \text{ dB} \quad (14)$$

gdzie $DN^2 = DN_i^2 + DN_q^2$,

$A_{(r)}$ — współczynnik z tablicy LUT dla danego RS .

Odległość RS (*slant range*) danego piksela dana jest równością:

$$RS = pix_spacing * N \quad (15)$$

gdzie: „ $pix_spacing$ ” jest wymiarem piksela w [m], N — liczba pikseli obrazu od początku linii

$$i = \text{integer} (pix_spacing * N / samp_inc) \quad (16)$$

Konwersja do σ^0

Aby przekształcić wynik kalibracji do postaci σ^0 wartości β^0 dane powyższymi równaniami muszą być skorygowane na kąt padania wiązki, $I(R)$:

$$\sigma^0(R) = \beta^0(R) + 10 * \log_{10} \{ \sin I(R) \} \text{ dB} \quad (17)$$

gdzie R — *slant range* albo *ground range*, I — odpowiadający kąt padania.

Ścisłe mówiąc dla dokładnej konwersji sygnału radarowego do postaci σ^0 musi być znany lokalny kąt padania dla każdego piksela znajdującego się w obrazowanym pasie terenu. Kąt ten musi zawierać w sobie poprawkę na ukształtowanie terenu (kąt nachylenia terenu). W praktyce, dla terenów płaskich wystarczająco dokładne oszacowanie σ^0 może być dokonane przy założeniu elipsoidalnego kształtu Ziemi.

Następujące dane pomocnicze zapisane w strukturze CEOS są niezbędne, aby policzyć kąt padania $I(R)$:

- duża półoś elipsoidy ziemskiej (*ellip_major*) [km],
- mała półoś elipsoidy ziemskiej (*ellip_minor*) [km],
- szerokość geodezyjna satelity (*plat_lat*) [deg.],
- wymiar piksela obrazu (*pix_spacing*) [m],
- duża półoś orbity satelity — pierwszy z 6 parametrów orbity (*eph_orb_data*) [km],

— zbiór 6 współczynników transformacji *slant to ground* (*srgr_coeff*),

— liczba współczynników LUT (*n_samp*),

— interwał *samp_inc*.

Dla obrazów typu *PRI* należy postępować wg procedury opisanej w następnym punkcie, aby obliczyć następujące parametry:

— promień Ziemi *r* i wysokość orbity *h*,

— interwał *dRG* (*ground range increment*) odpowiadający przedziałowi w pikselach *samp_inc*,

— odległość ukośną RS_i (*slant range*) odpowiadająca każdej z odległości terenowych, dla których podane są wartości współczynników w tabeli LUT,

— kąt padania I_i dla każdego piksela, dla którego podane są wartości $A_{(i)}$ w tabeli LUT.

Uwzględnienie kąta padania $I(R_i)$ pozwoli na przejście od wartości β^0 do wartości σ^0 dla każdego z pikseli, dla którego znane są wartości $A_{(i)}$. Szerokość geodezyjna satelity oraz współczynniki *srgr* użyte w obliczeniach odpowiadają środkowi sceny.

Obliczenie promienia Ziemi *r* i wysokości satelity *h*

Obliczenia wykonano dla sceny RADARSAT z obszaru Polski północnej zarejestrowanej 5 VIII 1996 r. Dane:

<i>a</i>	ellip_maj:	6378,14	km
<i>b</i>	ellip_min:	6356,755	km
<i>B</i>	plat_lat:	52,947	deg
α	eph_orb_data (1):	7,167046 * 10 ³	km
	<i>n_samp</i> :	512	
	<i>samp_inc</i> :	17	
	<i>pix_spacing</i> :	12,5	

Promień Ziemi dla danej szerokości geodezyjnej (promień wodzący punktu na elipsoidzie ziemskiej) można obliczyć następująco (Czarnecki 1996):

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (18)$$

$$e^2 = 0,00669447$$

$$\tan \psi = (1 - e^2) \tan B$$

e — pierwszy mimośród elipsoidy

ψ — szerokość geocentryczna

$$\tan \psi = 1,3156271$$

$$\psi = 52,76176$$

$$r^2 = a^2 \frac{(1 - e^2)}{(1 - e^2 \cos^2 \psi)} \quad (19)$$

$$r = 6364,5608 * 10^3 \text{ [m]}$$

Taki sam wynik otrzymuje się poprzez realizację nieco innego wzoru podawanego w publikacji ESA (Laur, 1992):

$$r^2 = a^2 \frac{\cos^2 B + (b/a)^4 \sin^2 B}{\cos^2 B + (b/a)^2 \sin^2 B} \quad (20)$$

Wysokość orbity:

$$h = \alpha * 10^3 - r \text{ lub} \quad (21)$$

$$h = (r^2 + RS_0^2 + 2rRS_0 \cos I_0)^{0,5} - r \quad (22)$$

gdzie: RS_0 — odległość ukośna dla pierwszego piksela w linii, I_0 — kąt padania dla pierwszego piksela

$$h = 7,167046 * 10^6 - 6364,5608 * 10^3 = 802\,485,2 \text{ [m]}$$

Obliczenie odległości ukośnej RS_i (*slant range*) dla każdego piksela o znanym współczynniku $A_{(i)}$ w tabeli LUT

$$dRG = \text{samp_inc} * \text{pixel_spacing} \quad (23)$$

$$dRG = 17 * 12,5 = 212,5 \text{ m}$$

$$RS_i = a + i dRG b + (i dRG)^2 c + (i dRG)^3 d + (i dRG)^4 e + (i dRG)^5 f \quad (24)$$

$$i = 0 \dots, n_samp - 1$$

Wartości *srgr* odczytane z nagłówka zbioru są następujące:

$$srgr1 = a \quad a = 1,0250637 * 10^6$$

$$srgr2 = b \quad b = 6,293555 * 10^{-1}$$

$$srgr3 = c \quad c = 3,3197409 * 10^{-7}$$

$$srgr4 = d \quad d = -2,1751703 * 10^{-13}$$

$$srgr5 = e \quad e = 8,7712074 * 10^{-20}$$

$$srgr6 = f \quad f = -1,7820751 * 10^{-27}$$

Dlatego kąty padania dla każdego z pikseli wyżej określonych obliczamy następująco:

1) na podstawie (Shepherd, 1996)

$$I_i = \arccos \left[\frac{h^2 - (RS_i)^2 + 2rh}{2RS_i r} \right] \quad (25)$$

2) lub na podstawie innego przekształcenia tej zależności (Laur, 1992)

$$I_i = \arccos \left[\frac{(r+h)^2 - (RS_i)^2 - r^2}{2RS_i r} \right] \quad (26)$$

Dla analizowanej sceny wartości $A_{(i)}$, dla $i = 1$ do 511 są takie same i wynoszą $1,358314 * 10^7$.

Obliczone odległości ukośne dla pierwszego piksela w linii, środkowego i najdalszego są następujące:

$$RS_0 = 1,0250637 * 10^6 \quad RS_{sr} = 1,0619274 * 10^6$$

$$RS_{511} = 1,1006983 * 10^6$$

Odpowiednie kąty padania:

$$I_0 = 41,263 \quad I_{sr} = 44,205 \quad I_{511} = 46,483$$

oraz poprawki do β^0 ($10 * \log_{10} \{ \sin I(R) \}$ dB) wynoszą odpowiednio: -1,8 dB, -1,5 dB oraz -1,4 dB.

Podsumowanie

W pracy opisano procedurę obliczania wartości współczynnika σ^0 , charakteryzującego właściwości obrazowanych w zakresie mikrofalowym obiektów, dla najczęściej wykorzystywanych typów obrazów radarowych z systemów najpowszechniej w chwili obecnej dostępnych — ERS 1/2 oraz RADARSAT.

Na podstawie wyników powyższych obliczeń można stwierdzić co następuje.

1. Obrazy ERS 1/2 SAR PRI, dostarczane przez dystrybutorów są skalibrowane wystarczająco, aby w prosty sposób wyznaczyć σ^0 na podstawie znanej stałej kalibracyjnej *K*. Dla większości zastosowań obrazów ERS jest to dostateczny poziom kalibracji. W zastosowaniach wymagających precyzyjnych analiz radiometrycznych (w modelach szacowania biomasy, wilgotności, analizie struktury upraw rolniczych) dla obszaru całej szerokości pasa obrazowania należałoby wprowadzić dodatkowe poprawki ze względu na kąt padania wiązki. Przy obrazowaniu wielokrotnym z tej samej or-

bity poprawki dla bliskiego i dalekiego zasięgu są wprawdzie niewielkie ($-0,7$ i $+0,6$ dB) (kąąt zmienia się od $19,5^\circ$ przy *near range* do $26,6^\circ$ przy *far range* co daje ww. wartości korekcyjne na skrajach), ale przy analizie scen zarejestrowanych z orbity zstępujących oraz wstępujących różnice z tego tytułu osiągają wartości rzędu $1,3$ dB.

Poprawka na kąąt padania dla ERS SAR jest stosunkowo niewielka również dlatego, że jego wartość dla środka sceny jest nieduża ($23,3^\circ$).

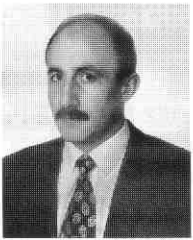
2. W przypadku obrazów RADARSAT-a konieczne jest przeprowadzenie całego toku opisanego postępowania ponieważ system ten charakteryzuje możliwość zmiany kąąąt „oświetlania” powierzchni Ziemi dla kolejnych scen rejestrowanych z tej samej orbity stosownie do wymagań użytkownika. Nawet w obrębie tej samej sceny różnice dochodzą do 2 dB przy dużych kąąątach (44°), dla orbity zstępującej i wstępującej różnica z obu rejestracji może być dwukrotnie większa.

3. W wielu zastosowaniach wykorzystuje się obrazy ERS i RADARSAT łącznie ze względu na ich komplemen-

tność konfiguracyjną (polaryzacja pionowa ERS i pozioma RADARSAT oraz inne kąąąt obrazowania), w takim wypadku przeprowadzenie opisanych procedur pełnej kalibracji radiometrycznej jest nieodzowne aby można było „porównywać wartości porównywalne”.

Literatura

- Czarnecki K., 1996: *Geodezja współczesna w zarysie*. Wydawnictwo Wiedza i Życie.
- Laur H., 1992: ERS-1 SAR Calibration. Derivation of Backscattering Coefficient sigma zero in ERS-1 SAR PRI Products. *Technical Note*, Issue 1, Rev.0 17 October 1992.
- Laur H. et al., 1993: ERS-1 SAR Radiometric Calibration. *Proceedings of the CEOS SAR Calibration Workshop ESA WPP — 048*.
- Raney R.K. et al., 1994: A plea for Radar Brightness. *Proceedings of IGARSS, Pasadena CA, 8–12 VIII 1994*, pp. 1090–1092.
- Shepherd N.W., 1996: CDPF output data calibration. *Technical Note*, No. 4.2. RSI 30 March.



Dr inż. Marek Mróz jest absolwentem Wydziału Geodezji i Urządzeń Rolnych ART w Olsztynie (1988). W roku 1992 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie geodezji i kartografii (specjalność teledetekcja) na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, a w roku 1994 uzyskał DESS (dyplom wyższych studiów specjalistycznych) z zakresu teledetekcji na Uniwersytecie PARYS VI (Francja). Obecnie jest adiunktem w Katedrze Fotogrametrii i Teledetekcji ART w Olsztynie. Zajmuje się problemami przetwarzania, interpretacji i wykorzystania satelitarnych obrazów mikrofalowych SAR w rolnictwie i kartowaniu użytkowania ziemi (*land cover*). Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Akademia Rolniczo-Techniczna w Olsztynie, 10-718 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 1, tel. (+89) 523-49-15, fax (+89) 527-32-10, e-mail: marekm@moskit.art.olsztyn.pl