

**PODSTAWY TEORETYCZNE I PRZEGLĄD METOD ORAZ ALGORYTMÓW  
KOREKCJI RADIOMETRYCZNO-TOPOGRAFICZNEJ RADAROWYCH  
OBRAZÓW SATELITARNYCH**

**THEORETICAL BASIS AND REVIEW OF CORRECTION METHODS AND  
ALGORITHMS OF TOPOGRAPHICALLY INDUCED RADIOMETRIC EFFECTS  
ON SATELLITE RADAR IMAGES**

**Magdalena Mleczko, Marek Mróz, Piotr Sawicki**

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

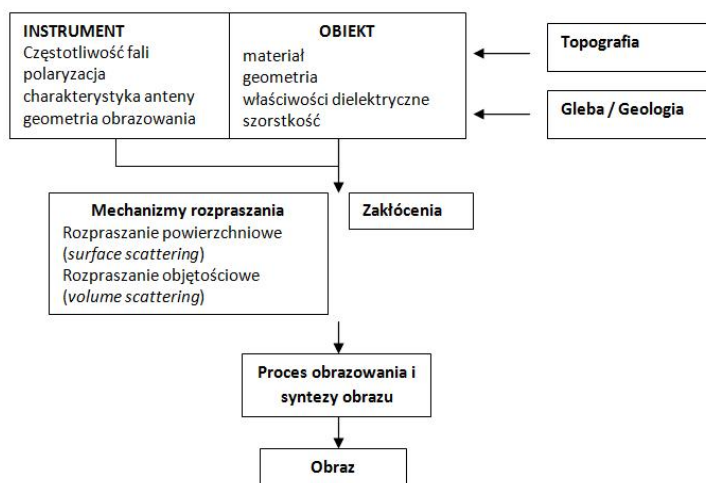
SŁOWA KLUCZOWE: korekcja radiometryczno-topograficzna, model cosinusowy, obrazy radarowe

STRESZCZENIE: W artykule dokonano przeglądu modeli i algorytmów korekcji radiometryczno-topograficznej satelitarnych obrazów radarowych. Jest to wstępny etap prac badawczych prowadzących do skutecznej korekcji „efektu topograficznego” wpływającego na jakość automatycznej klasyfikacji obrazów. Artykuł systematyzuje modele i podejścia w procedurach korekcji dając bazę teoretyczną do prac eksperymentalnych z różnymi rodzajami obrazów radarowych. Na przestrzeni lat od momentu rozwoju techniki obrazowania w zakresie mikrofal prowadzone były badania na temat korekcji radiometryczno-topograficznych. Badania dotyczyły obrazów pochodzących z różnych sensorów, obrazujących w różnych pasmach, dla terenów o różnym zróżnicowaniu terenu i różnym rodzaju pokrycia terenu. Modele korekcji głównie opierają się na funkcji cosinus lokalnego kąta padania, zgodnie z prawem Lamberta stosowanym w optyce do powierzchni idealnie rozpraszających. Funkcja cosinus lokalnego kąta padania uwzględnia takie parametry jak spadek terenu, orientację prostej największego spadku oraz azymut płaszczyzny padania wiązki radarowej, a więc dobrze opisuje rzeźbę terenu. Przegląd literatury dotyczącej modeli wstecznego rozpraszania prowadzi do jednego wniosku. Teoria tylko w ograniczonym zakresie może wytłumaczyć mechanizmy rozpraszania od naturalnych powierzchni. A dodatkowo efekt zniekształcenia radiometrycznego wynikającego z topografii jest często zaniedbywany.

## **1. PODSTAWY TEORETYCZNE I PRZEGLĄD METOD ORAZ ALGORYTMÓW**

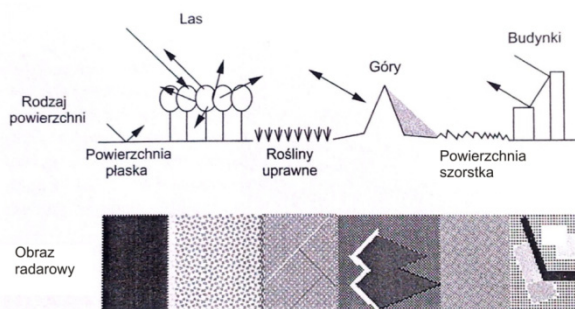
Jednym z najważniejszych i najbardziej trudnych problemów w teledetekcji radarowej jest dokładna ocena interakcji mikrofal z powierzchnią Ziemi. Wiele czynników składa się na formowanie obrazu radarowego. Są to głównie czynniki charakteryzujące instrument i obrazowane obiekty, a także czynniki zewnętrzne (Holecz 1993). Rysunek 1 przedstawia relację parametrów pełniących kluczową rolę w procesie tworzenia obrazów SAR.

Obraz radarowy jest rozkładem stosunku energii sygnału wysłanego do energii odbitej (echa radarowego). Stosunek ten nazywany jest współczynnikiem rozpraszania wstecznego (*backscattering coefficient*). Współczynnik określający rozpraszanie wsteczne w rzucie nachylonym nosi nazwę beta zero (*radar brightness, beta naught*) i jest wielkością bezwymiarową. Sigma zero (*sigma naught*) jest współczynnikiem odbicia w rzucie poziomym, najczęściej wyrażany w decybelach (dB). Wyróżnia się również gamma zero, czyli znormalizowany współczynnik sigma zero poprzez funkcję cosinus kąta padania.



Rys. 1. Istotne parametry w formowaniu obrazu SAR (Holecz 1993)

Obraz radarowy reprezentuje energię sygnału odbitego od poszczególnych obiektów analizowanego obszaru. Ciemniejsze obszary obrazu monochromatycznego reprezentują niski poziom rozproszenia wstecznego, natomiast jaśniejsze obszary reprezentują wysoki poziom rozproszenia wstecznego. Innymi słowy jasne piksele, czyli te o wyższych wartościach oznaczają, że duża część energii odbiła się z powrotem w kierunku radaru, podczas gdy ciemne elementy o niższych wartościach oznaczają, że bardzo mało energii wróciło w kierunku radaru. Wartość wstecznego rozpraszania radarowego przede wszystkim zależy od rodzaju powierzchni, na którą pada wiązka fali. Powierzchnie o dużej szorstkości odbijają znacznie większe ilości energii niż powierzchnie płaskie. Zależność zobrazowania radarowego od typu powierzchni ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Wpływ rodzaju powierzchni na jej obraz radarowy (Southport, 2011. <http://southport.jpl.nasa.gov/>)

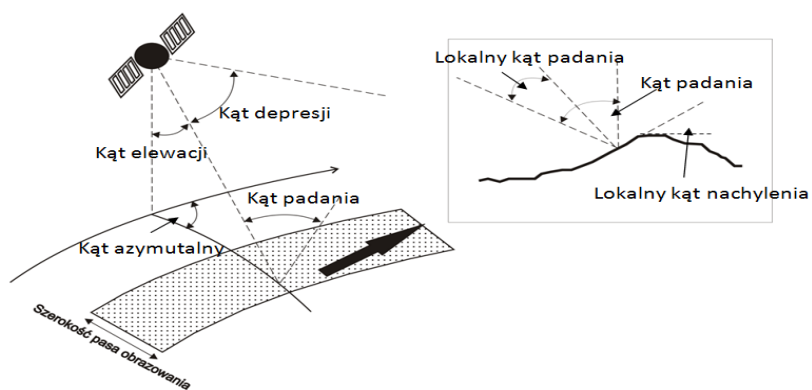
Istotny wpływ na poziom sygnału odbitego mają także właściwości dielektryczne powierzchni odbijającej. Jaśniejsze są piksele obrazujące tereny o wyższej wilgotności. Wyjątkiem jest powierzchnia zbiorników wodnych, która jako powierzchnia gładka (przy braku spadków) nie odbija energii w kierunku anteny.

Jednym z czynników wpływających na współczynnik odbicia jest również topografia, określająca rozmieszczenie obiektów i opisująca rzeźbę terenu (relief). Wpływ ukształtowania terenu ujawnia się na obszarach jednorodnie pokrytych, poprzez szeroką zmienność radiometryczną, wizualnie interpretowaną jako zmiany tonalne lub barwne. Rysunek 3 przedstawia przykład działki, na której występują zmiany tonalne wywołane rzeźbą terenu.



Rys. 3. Wpływ ukształtowania terenu na obraz działki pokrytej jednorodnie

Wpływ ukształtowania terenu na wartość współczynnika odbicia w literaturze angielskiej określany jest mianem efektu topograficznego (*topographic effect*). Tak więc, korekcję wpływu rzeźby terenu (reliefu) precyzuje się jako korekcję radiometryczno-topograficzną. W celu zrozumienia istoty korekcji radiometryczno-topograficznej obrazów radarowych, należy poznać i usystematyzować pojęcia opisujące geometrię obrazowania radarowego i sposób tworzenia obrazów.

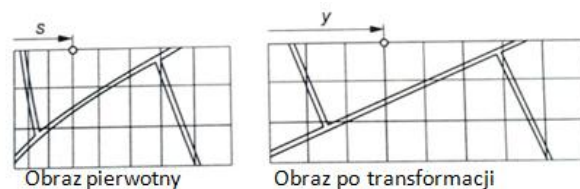


Rys. 4. Geometria obrazowania systemu radarowego (Schreier 1993)

Głównym parametrem opisującym geometrię obrazowania (Rys. 4) jest kąt padania (*incidence angle*) definiowany jako kąt pomiędzy kierunkiem padania wiązki radarowej a kierunkiem pionowym w odniesieniu do geoidy. Pojęcie „w odniesieniu do geoidy” jest

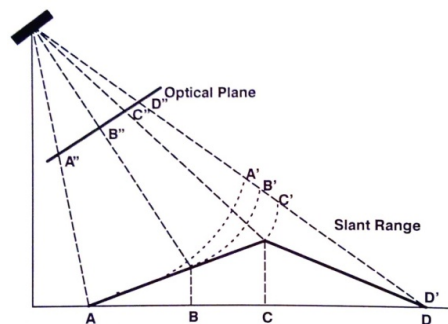
istotnym wyrażeniem, gdyż na kąt padania należy spojrzeć szerzej (globalnie), w celu odróżnienia go od lokalnego kąta padania (*local incidence angle*), uwzględniającego lokalne nachylenie powierzchni terenu. Lokalny kąt padania jest kątem pomiędzy promieniem padającej wiązki a normalną do powierzchni w „punkcie” obrazowania. W literaturze pojawia się również pojęcie kąta depresji (*depression angle*), nazywanego również kątem obserwacji (*looking angle*). Kąt depresji jest kątem między płaszczyzną poziomą, „na której” znajduje się satelita do kierunku padania wiązki. Kąt depresji jest dopełnieniem kąta elewacji (*elevation angle*), inaczej kąta wertykalnego, również nazywanego kątem obserwacji. W prostokątnym układzie współrzędnych, nie uwzględniającym krzywizny Ziemi, kąt padania jest równy kątowi elewacji (Henderson 1998).

Sposób formowania obrazów techniką aktywną znacznie różni się od techniki pasywnej. Podczas, gdy pasywna (optyczna) technika obrazowania przedstawia teren w rzucie środkowym, technika aktywna (radarowa) jest projekcją odległościową lub rzutem nachylnym (*slant range*) (Rys. 6). Skutkiem projekcji odległościowej jest zmienna skala odwzorowania, dlatego też obraz pierwotny wymaga odpowiedniej transformacji współrzędnych każdego punktu w celu prawidłowego odwzorowania odległości terenowych (Rys. 5). Eliminacja tego efektu prowadzi do rzutu poziomego (*ground range*) (Schreier 1993).



Rys. 5. Schemat obrazu radarowego pierwotnego i transformowanego (Kurczyński 2006)

Obrazy radarowe w stosunku do obrazów optycznych odwrotnie prezentują odległości terenowe. Na rysunku 6 punkty A'', B'', C'', D'' są rzutami punktów terenowych A, B, C, D na obrazie optycznym a punkty A', B', C', D' są odwzorowaniem na obrazie radarowym w rzucie nachylnym. Odległość punktu C''D'' jest znacznie mniejsza niż C'D'.



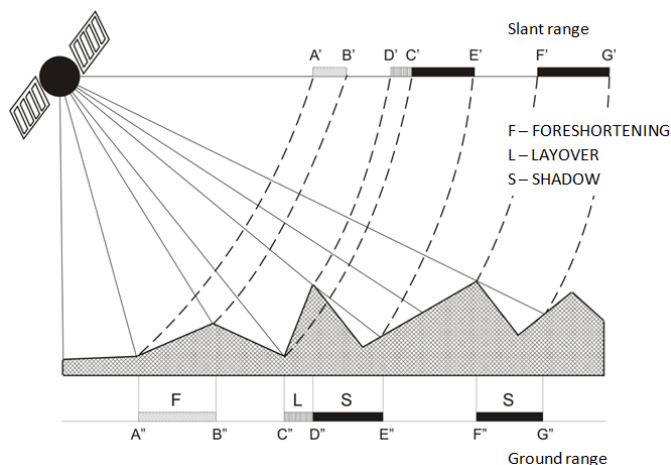
Rys. 6. Porównanie techniki obrazowania aktywnej i pasywnej (Schreier 1993)

W przypadku terenów o dużej deniwelacji powierzchni uwidaczniają się zniekształcenia wynikające z faktu, iż odległość między dwoma punktami terenowymi jest określana na podstawie opóźnień pochodzących od nich sygnałów echa. Zjawisko to nosi nazwę

*foreshortening* i ilustruje je rysunek 7. Odległości  $A'B'$  oraz  $B'C'$  rzutów prostopadłych są sobie równe. Natomiast odległość rzutu nachylonego  $A''B''$  jest mniejsza niż odległość  $B''C''$ . Omawiane zjawisko jest zauważalne szczególnie wyraźnie w momencie, gdy największy spadek terenu występuje w kierunku prostopadłym do kierunku poruszania się radaru.

Szczególnym przypadkiem *foreshortening*'u jest *layover*. Zniekształcenie to objawia się tym, iż kolejność występowania obiektów terenowych na obrazach radarowych jest inna niż w rzeczywistości. Wynika to z tego, iż szczyt wysokiego obiektu jest położony bliżej anteny radaru, co w konsekwencji powoduje jego wcześniejsze rejestrowanie. Sytuacja ta pokazana jest na rysunku 7. Punkt  $D'$  leży wcześniej niż punkt  $C'$ . Jasność pikseli na obszarach, gdzie występują te zniekształcenia powodowana jest przez dwa efekty. Po pierwsze cała energia skierowana na większy obszar odbierana jest w krótszym czasie i kompresowana jest do kilku pikseli. Po drugie wartość lokalnego kąta padania jest zbliżona do kąta prostego, co według modeli rozpraszania oznacza odbicie lustrzane, a zatem współczynnik odbicia jest większy, niż w innych rejonach.

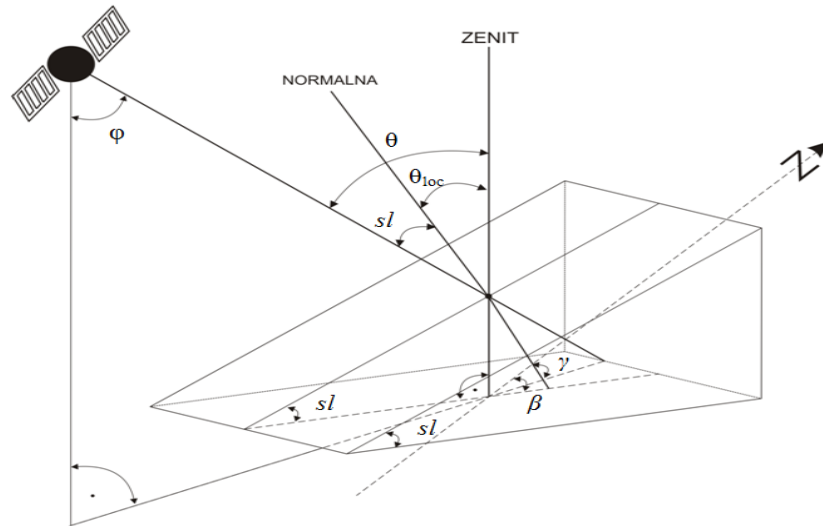
Na obrazach radarowych może również występować zjawisko zacienienia (*shadow*), które jest efektem niedocierania fal radarowych do tylnych zboczy wzniesień. Obszary zaciemnione są reprezentowane przez ciemne fragmenty, ze względu na brak sygnału. A ponadto cienie radarowe obiektów o tych samych wysokościach wzrastają wraz ze wzrostem odległości obiektu do radaru.



Rys. 7. Zniekształcenia obrazów radarowych wywołane znacznym zróżnicowaniem terenów (Schreier 1993)

Na przestrzeni lat od momentu rozwoju techniki obrazowania w zakresie mikrofal prowadzone były badania na temat korekcji radiometryczno-topograficznych. Badania dotyczyły obrazów pochodzących z różnych sensorów, obrazujących w różnych pasmach, dla terenów o różnym zróżnicowaniu terenu i różnym rodzaju pokrycia terenu. Modele korekcji głównie opierają się na funkcji cosinus lokalnego kąta padania, zgodnie z prawem Lamberta stosowanym w optyce do powierzchni idealnie rozpraszających. Prawo mówi o tym, że energia odbita przez fragment powierzchni w danym kierunku jest proporcjonalna do cosinusa kąta między kierunkiem padania światła i normalną do powierzchni. Funkcja cosinus lokalnego kąta

padania uwzględnia takie parametry jak spadek terenu, orientację prostej największego spadku oraz azymut płaszczyzny padania wiązki radarowej (Rys. 8), a więc dobrze opisuje rzeźbę terenu. Zależność ta wynika z twierdzenia cosinusów dla sfery (1).



Rys. 8. Zależności geometryczne parametrów opisujących rzeźbę terenu i wiązkę radarową. (sl – nachylenie, spadek terenu (slope),  $\beta$  – orientacja prostej największego spadku, azymut spadku (aspect),  $\gamma$  – azymut płaszczyzny padania wiązki radarowej,  $\theta_{loc}$  – lokalny kat padania wiązki radarowej,  $\theta$  – kąt padania wiązki radarowej,  $\phi$  – kąt elewacji)

$$\cos \theta_{loc} = \cos \theta \cos sl - \sin \theta \sin sl \cos(\beta - \gamma) \quad (1)$$

Przegląd literatury dotyczącej modeli wstecznego rozpraszania prowadzi do jednego wniosku. Teoria tylko w ograniczonym zakresie może wytłumaczyć mechanizmy rozpraszania od naturalnych powierzchni. A dodatkowo efekt zniekształcenia radiometrycznego wynikającego z topografii jest zanedbywany.

Hinse (1988) opisuje, że część tonalnych zmian na obrazach radarowych spowodowana jest przez łączny efekt wynikający z topografii terenu, geometrii obrazowania oraz orientacji obiektów obrazowanych. Najważniejszą konsekwencją wynikającą z tego zjawiska jest niewłaściwa interpretacja obiektu w klasyfikacji pokrycia terenu. Hinse stwierdza, że ta zmienność tonalna, czyli zmienność w rozpraszaniu wstecznym nie ma związku z typem pokrycia terenu a jest widoczna szczególnie wtedy, gdy duże zróżnicowanie nachyleń i kierunków tworzy wiele lokalnych kątów padania. Holben i Justice (1981) definiują skutki wpływu rzeźby terenu jako zmiany otrzymanej energii od powierzchni nachylonej w porównaniu do energii otrzymanej od płaszczyzny poziomej. Zmienność jest funkcją orientacji powierzchni względem źródła oświetlenia i położenia w stosunku do detektora.

Hinse w swoje pracy wykorzystał dane radarowe SAR-580 w paśmie C o rozdzielczości terenowej  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ . Badany region głównie pokryty lasami liściastymi, użytkami rolnymi i pastwiskami został podzielony na pięć klas, które tworzyły lasy liściaste, lasy iglaste, kukurydza, pozostałe użytki rolne oraz klasa złożona ze wszystkich wymienionych.

Parametry: współczynnik odbicia wstecznego ( $R$ ), nachylenie stoku ( $sl$ ), azymut spadku ( $\beta$ ), azymut wysłanej wiązki radarowej ( $\gamma$ ), kąt depresji ( $\theta_{dep}$ ), lokalny kąt padania ( $\theta_{loc}$ ) zostały wymienione jako opisujące zastosowane modele. Wartości nachylenia stoku i azymut spadku obliczone zostały na podstawie DEM opracowanego ze zdigitalizowanej mapy w skali 1:50 000. Lokalny kąt padania został obliczony ze wzoru:

$$\cos \theta_{loc} = \cos \theta_{dep} \cos sl + \sin \theta_{dep} \sin sl \cos(\beta - \gamma) \quad (2)$$

Hinse ze względu na złożoność czynników tj. gatunek, gęstość, wysokość, szorstkość i inne parametry oddziałujące na współczynnik rozpraszania, nie ujął ich w procedurze korekcji topograficznej. Wykorzystał semiempiryczne modele bazujące na modelu cosinowym Teilleta. Modele te posiadają tę zaletę, że opisują trygonometryczne zależności związane z kątami charakteryzującymi powierzchnię terenu, bez uwzględnienia określania typu pokrycia terenu, które w praktyce jest trudne do odizolowania. Zależność między współczynnikiem rozpraszania wstecznego ( $R$ ) i zmienną określającą wpływ rzeźby terenu opisał wzorem:

$$R = m \cos^q \theta_{loc} + b \quad (3)$$

gdzie  $m$ ,  $b$  – stałe,  $q$  – otrzymuje się obliczając nachylenie prostej regresji między  $R$  a  $\cos \theta_{loc}$  dla każdej klasy.

Badane były również inne wartości  $q$  (0.5, 1, 2), niebędące wynikiem analizy regresji.

Na podstawie równania (3) wprowadzono trzy algorytmy korekcji:

$$Rh = R \frac{\cos^q \theta_{dep}}{\cos^q \theta_{loc}} \quad (4)$$

$$Rh = R \left( \frac{\cos^q \theta_{dep} + c}{\cos^q \theta_{loc} + c} \right) \quad (5)$$

$$Rh = (R - b) \left( \frac{\cos^q \theta_{dep}}{\cos^q \theta_{loc}} \right) + b \quad (6)$$

gdzie:  $c = \frac{b}{m}$  a  $Rh$  to skorygowana wartość  $R$ .

W pierwszym etapie analiz obliczono korelację pomiędzy wartościami pikseli obrazu SAR a cosinusem lokalnego kąta padania w celu obliczenia i przypisania odpowiedniej wartości wykładnika. Zależności we wszystkich klasach okazały się słabe, chociaż statystycznie są znaczące. Zgodnie z oczekiwaniami, analiza regresji liniowej dała niewielkie ujemne wartości wykładnika. Do zmierzenia dyspersji wartości pikseli obliczono wariancję, która określa zróżnicowanie jednostek zbiorowości statystycznej. Tak więc, zmniejszenie wariancji wskazuje na zredukowanie wpływu rzeźby terenu. Innymi słowy obserwowane zmiany wariancji przed korekcją i po korekcji można przypisać wpływowi nachylenia i kierunku każdego piksela. Uzyskano redukcję wariancji w granicach 3–9% w zależności od typu pokrycia terenu i wartości wykładnika  $q$ . Wyniki korekcji funkcji pierwszej i trzeciej okazały się nieprzydatne, gdyż wariancja każdej klasy istotnie wzrosła, a zatem nie nastąpiła eliminacja efektu topograficznego. Natomiast zastosowanie modelu korekcji z obliczonymi wartościami wykładnika, a nie z przypisanymi wartościami przyniosło lepsze rezultaty.

Hinse w swojej pracy pokazuje, że możliwa jest redukcja co najmniej części niekształceń radiometrycznych na obrazach radarowych spowodowanych umiarkowaną rzeźbą terenu. Rezultaty są funkcją nieodłącznych naturalnych elementów terenu oraz są zależne od badanej klasy.

Holecz i inni (1993) w swojej pracy przedstawiają analizę zależności właściwości radiometrycznych obrazowania satelitarnego SAR w paśmie L satelity SEASAT (rozdziel-

czość terenowa 25 m × 25 m) dla obszarów płaskich wykorzystywanych rolniczo i gór pokrytych łąkami i lasami od ukształtowania powierzchni terenu. Wymienia się trzy główne czynniki korygujące efekt topograficzny: geometrię obrazowania, model rozpraszania i dokładność DEM. Geometrię obrazowania stanowi położenie i orientacja anteny oraz kształt terenu (nachylenie – *slope* i kierunek – *aspect* w stosunku do pozycji satelity). Kształt terenu opisany jest lokalnym kątem padania, lokalnym kątem padania rzutowanym na płaską powierzchnię oraz lokalną rozdzielczością przestrzenną w kierunku zasięgu (*in slant range*) i kierunku azymutalnym (*in azimuth*). Aplikacje teledetekcji mikrofalowej wymagają obszernej wiedzy uzyskanej z obserwacji in-situ (*ground true information*) dotyczącej wysokości uprawy/koron drzew, stałej dielektrycznej gałęzi/pnia, stałej dielektrycznej gleby, szorstkości, a która jest często niedostępna. Dlatego Holecz proponuje zastosowanie empirycznych lub semiempirycznych modeli do wykonania korekcji radiometrycznych. Prezentowane modele terenu rozpatrują zmiany radiometryczne jako funkcje parametrów opisujących rzeźbę (relief, ukształtowanie terenu). Podczas gdy lokalna rozdzielczość azymutalna ma niewielki wpływ na wsteczne rozpraszanie, lokalna rozdzielczość w kierunku zasięgu oraz lokalne kąty padania mają ogromny wpływ na mechanizmy rozpraszania. Holecz proponuje wykorzystanie trzech grup modeli: modeli cosinusowych, opartych tylko na funkcjach trygonometrycznych, modeli semiempirycznych, opartych na funkcjach trygonometrycznych i wzajemnie oddziałujących mechanizmach, a także modeli statystycznych opartych na wielomianach i transformacjach nieliniowych.

Modele cosinusowe:

$$1. \quad y = S \frac{\cos \theta}{\cos \theta_{loc}} \quad (\text{Clapp 1946}) \quad (7)$$

Semiempiryczne modele korekcji oparte na funkcjach trygonometrycznych:

$$2. \quad y = S \left( \frac{\cos \theta}{\cos \theta_{loc}} \right)^q \quad (8)$$

$$3. \quad y = S \left( \frac{\cos \theta + z}{\cos \theta_{loc} + z} \right)^q \quad (\text{Teillet et al. 1985}) \quad (9)$$

$$4. \quad y = (S - b) \left( \frac{\cos \theta}{\cos \theta_{loc}} \right)^q + b \quad (\text{Teillet et al. 1985}) \quad (10)$$

Modele statystyczne:

$$5. \quad y = a \cos \theta_{loc} + b \quad (11)$$

$$6. \quad y = a \cos i_r + b \quad (12)$$

$$7. \quad y = a + b\theta_{loc} + c\theta_{loc}^2 \quad (13)$$

$$8. \quad y = a + b\theta_{loc} + c\theta_{loc}^2 + d\theta_{loc}^3 \quad (14)$$

$$9. \quad y = a + bi_r + ci_r^2 \quad (15)$$

$$10. \quad y = a + bi_r + ci_r^2 + di_r^3 \quad (16)$$

$$11. \quad y = \overline{DN}(\theta_{loc}) \quad (\text{Domik et al. 1988}) \quad (17)$$

$$12. \quad y = a + br_r + cr_r^2 \quad (18)$$

$$13. \quad y = a + br_r + cr_r^2 + dr_r^3 \quad (19)$$

$$14. \quad y = a + bi + cr_r + di^2 + ei_r + fr_r^2 \quad (20)$$

gdzie

$\theta_{loc}$  = lokalny kąt padania

$i_r$  = lokalny kąt padania rzutowany na płaską powierzchnię

$r_r$  = lokalna rozdzielczość w kierunku zasięgu

$\theta$  = kąt padania do środka sceny

a, b, c, d, e, f, q, z = współczynniki



Holecz rozpoczął analizę rezultatów korekcji od interpretacji wizualnej, następnie przeprowadził podstawową analizę statystyczną (średnia, odchylenie standardowe, wariancja) kończąc na porównaniu separatywności klas przed i po zastosowaniu korekcji. Interpretacja wizualna pokazała wyraźnie pozytywny efekt korekcji radiometrycznej uwzględniający lokalne zmiany nachylenia i orientacji stoków. Najlepsze rezultaty uzyskał wykorzystując statystyczne podejście (modele 7–11) uwzględniające lokalne kąty padania. Poprawę radiometrii potwierdził współczynnik separatywności klas – CSF (*class separability factor*) definiowany jako iloraz bezwzględnej różnicy średnich wartości dwóch klas przez sumę ich wartości odchylenia standardowego. Wartość współczynnika równa zeru oznacza, że klasy są jednakowe. Wartość CSF dwóch obszarów leśnych położonych na płaskiej i nachylonej powierzchni przed korekcją wynosiła 1.8 a po zastosowaniu korekcji 0.2. Wyniki wyraźnie wskazują, że dokładność DEM silnie wpływa na dokładność korekcji radiometrycznych.

Bayer (1993) przetestował 11 różnych modeli korekcyjnych na dwóch typach użytkowania terenu: obszarach leśnych i rolnych.

Modele korekcyjne (Bayer 1993):

$$1. \quad g = m \cos \theta_{loc} \quad (\text{Clapp 1946}) \quad (21)$$

$$2. \quad g = m \cos^2 \theta_{loc} \quad (\text{Clapp 1946}) \quad (22)$$

$$3. \quad g = m \cos^q \theta_{loc} + b \quad (\text{Teillet 1985}) \quad (23)$$

$$4. \quad g = m \cos^q(\theta_{loc} + \text{offset}) + b \quad (24)$$

$$5. \quad g = 10 \log \left( \frac{\cos^{v+1} \theta_{loc}}{\sin^{\mu} \theta_{loc}} \right) + b \quad (\text{Keydel 1976}) \quad (25)$$

$$6. \quad g = a\theta_{loc}^2 + b\theta_{loc} + c \quad (26)$$

$$7. \quad g = a\theta_{loc}^3 + b\theta_{loc}^2 + c\theta_{loc} + d \quad (27)$$

$$8. \quad g = \begin{cases} a\theta_{loc}^2 + b\theta_{loc} + c & , \theta_{loc} \leq r \\ d\theta_{loc} + e & \theta_{loc} > r \end{cases} \quad (\text{Rauste 1989}) \quad (28)$$

$$9. \quad g = a \cdot i_r^2 + b \cdot i_a^2 + c \cdot i_r + d \cdot i_a + e \cdot i_r \cdot i_a + f \quad (29)$$

$$10. \quad g = a \cdot sl^2 + b \cdot \beta^2 + c \cdot sl + d \cdot \beta + e \cdot sl \cdot \beta + f \quad (30)$$

$$11. \quad g = \bar{g}(\theta_{loc}) \quad (31)$$

a, b, c, d, e, f, m, q, offset,  $\mu$ ,  $\nu$  = współczynniki, wykładniki modeli korekcyjnych.

Danymi wejściowymi były obrazy z satelity SEASAT. Większość z tych modeli oparta była na lokalnym kącie padania (*local incidence angle*), który wykazuje silną korelację ze zmianami tonalnymi na obszarach jednorodnie pokrytych. Lokalny kąt padania został obliczony na podstawie DEM (Digital Elevation Model). Współczynniki modeli dobrane zostały empirycznie (metodą najmniejszych kwadratów).

Bayer wyróżnia osiem parametrów mających znaczenie dla wyjaśnienia różnic poziomów szarości przy założeniu, że badany obszar jest jednorodny. Te parametry to:

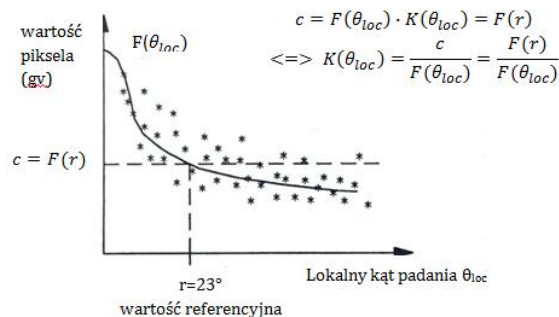
- wysokość n.p.m (np. wartości DEM)
- maksymalne nachylenie (sl)
- składowa kąta nachylenia w kierunku zasięgu
- azymut linii największego spadku ( $\beta$ )
- azymut linii największego spadku względem kierunku zasięgu
- lokalny kąt padania ( $\theta_{loc}$ )
- składowa lokalnego kąta padania w kierunku zasięgu ( $i_r$ )
- składowa lokalnego kąta padania w kierunku azymutalnym ( $i_a$ )

Zależność między wyszczególnionymi parametrami a wartościami pikseli ma naturę głównie nieliniową. To oznacza, że prosta regresja liniowa nieadekwatnie opisuje tę zależność. Dlatego zostały zaaplikowane modele oparte na funkcji cosinus. Ponadto zostały przetestowane modele wielomianowe drugiego i trzeciego stopnia oraz prosty model „mean grey value”. Współczynniki modelu zostały wyestymowane empirycznie iteracyjną aproksymacją najmniejszych kwadratów.

Funkcje korekcyjne zostały określone na podstawie schematu na rysunku 9.  $F(\theta_{loc})$  jest funkcją lokalnego kąta padania,  $r$  jest wartością odniesienia (wartością referencyjną) lokalnego kąta padania,  $c = F(r)$  jest funkcją referencyjnego lokalnego kąta padania. Z zależności (32) obliczono  $K(\theta_{loc})$  funkcję modelu korekcji.

$$c = F(\theta_{loc}) \cdot K(\theta_{loc}) = F(r) \quad (32)$$

Wartość kąta referencyjnego dla danego terenu wynosiła 23°.



Rys. 9. Podejście tworzenia funkcji korekcyjnych  $K(\theta_{loc})$  z modeli  $F(\theta_{loc})$  (na podstawie Bayer 1993)

Numeryczna analiza polegała na porównaniu wariancji wartości pikseli oddzielnie dla klasy lasów i klasy terenów rolnych, a także dla klasy zawierającej je obie na obrazie nieskorygowanym i skorygowanym. Wyniki pokazały, iż zastosowane korekcje zredukowały wariancje pikseli. Najlepsze rezultaty na poziomie 13% uzyskano dla klasy lasów wykorzystując model wielomianowy trzeciego stopnia. Prosty model (*mean grey value*) zmniejszył zakres wartości pikseli o 12%. Oznacza to, że porównując te wyniki ze współczynnikiem determinacji, 30% efektu topograficznego może być skorygowane przy wykorzystaniu tego podejścia.

Goering (1995) na podstawie analogicznego podejścia co w pracy Bayer’a (1993), przeanalizował dane radarowe w paśmie C satelity ERS-1 (rozdzielczość terenowa 25 m) dla terenów arktycznej tundry. Wybrał trzy modele:

$$1. \quad y = a \cos \theta_{loc} + b \quad (33)$$

$$2. \quad y = a \cos^2 \theta_{loc} + b \quad (34)$$

$$3. \quad y = a + b\theta_{loc} + c\theta_{loc}^2 \quad (35)$$

Podobnie jak poprzednio, wyniki analizowane były wizualnie i numerycznie (statystycznie). Modele zredukowały wariancję odpowiednio 7.1%, 12.2%, 19.7%.

Kellendorfer (1998) opisał wykorzystanie obrazów radarowych z europejskiego ERS-1 (pasmo C, polaryzacja VV) i japońskiego JERS-1 (pasmo L, polaryzacja HH) w celu klasyfikacji roślinności. Jednym z etapów prowadzonych badań była korekcja radiome-

tryczna. Dane z ERS-1 wymagały korekcji ze względu na lokalny kąt padania za pomocą równania ogólnego:

$$I_{cor} = I \frac{\sin \theta_{loc}}{\sin \theta_{ref}} \quad (36)$$

gdzie  $I$  – natężenie sygnału,  $I_{cor}$  natężenie sygnału skorygowane,  $\theta_{loc}$  lokalny kąt padania obliczony z DEM a  $\theta_{ref}$  – referencyjny kąt padania ( $23^\circ$ )

W przypadku danych JERS-1 level 2.1, które są skorygowane ze względu na lokalny kąt padania w odniesieniu do powierzchni elipsoidy, a nie ze względu na rzeczywiste kąty padania na powierzchni terenu, korekcja przebiegła na podstawie wzoru:

$$I_{cor} = I \frac{\sin \theta_{loc}}{\sin \theta_{ell}} \quad (37)$$

gdzie  $\theta_{ell}$  lokalny kąt padania obliczony do powierzchni elipsoidy.

## 2. WNIOSKI

Większość opublikowanych prac dotyczących tej korekcji powstała w okresie wzmożonej eksploatacji satelitów ERS-1 i ERS-2 oraz ENVISAT/ASAR czyli w latach 1995–2005. Były to systemy o rozdzielczości przestrzennej rzędu 20–30 m. Obecnie nastąpiła era satelitów VHR SAR, których rozdzielczości wzrosły 5-cio a nawet 10-krotnie i problem tych korekcji pojawił się na nowo.

Modele korekcji głównie opierają się na funkcji cosinus lokalnego kąta padania, zgodnie z prawem Lamberta stosowanym w optyce do powierzchni idealnie rozpraszających (Riano 2003). Funkcja cosinus lokalnego kąta padania uwzględnia takie parametry jak spadek terenu, orientację prostej największego spadku oraz azymut płaszczyzny padania wiązki radarowej, a więc dobrze opisuje rzeźbę terenu. Przegląd literatury dotyczącej modeli wstecznego rozpraszania prowadzi do jednego wniosku. Teoria tylko w ograniczonym zakresie może wytłumaczyć mechanizmy rozpraszania od naturalnych powierzchni. A dodatkowo efekt zniekształcenia radiometrycznego wynikającego z topografii jest często zaniedbywany.

## 3. LITERATURA

- Bayer T., Winter R., Schreier G., 1991, Terrain Influences in SAR Backscatter and Attempts to their Correction IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, No. 3.
- Bayer T., Muschen B., Oberstadler R., Winter R., 1993, Airborne and Spaceborne SAR Application Studies SAR Geocoding: Data and Systems, editor Schreier G., p. 271–298.
- Franklin S. E., Lavigne M. B., Hunt E. R., Wilson B. A., Peddle D. R., McDermid G. J., Giles P. T., 1995, Topographic dependence of Synthetic Aperture Radar Imagery Computers & Geosciences vol.21 pp. 521–532.
- Goering D., Che H., Hinzman L., Kane D., 1995, Removal of Terrain Effects from SAR Satellite Imagery of Arctic Tundra IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, No. 1.
- Hinse M., Gwyn Q. H. J., Bonn F., 1988, Radiometric Correction of C-Band Imagery for Topographic Effects in Regions of Moderate Relief IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 26, No. 2.
- Holecz F., Meier E., Nuesch D., 1993, Postprocessing of Relief Induced Radiometric Distorted Spaceborne SAR Imagery Geocoding: Data and Systems, editor Schreier G., p. 299–352.

Kellndorfer J., Pierce L., Dobson M., Ulaby F. T., 1998, Toward Consistent Regional-to-Global-Scale Vegetation Characterization Using Orbital SAR Systems IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5.

Luckman A. J., 1998, The Effects of Topography on Mechanisms of Radar Backscatter from Coniferous Forest and Upland Pasture IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5.

Meyer P., Itten K. I., Kellenberger T., Sandmeier S., Sandmeier R. 1993, Radiometric correction of topographically induced effects on Landsat TM data in alpine terrain ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 48, Issue 4, Pages 17–28.

Riaño D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I., 2003, Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 5.

Small D., Holecz F., Meier E., Nüesch D., 1998, Absolute Radiometric Correction in Rugged Terrain: A Plea for Integrated Radar Brightness Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. IEEE International.

#### **THEORETICAL BASIS AND REVIEW OF CORRECTION METHODS AND ALGORITHMS OF TOPOGRAPHICALLY INDUCED RADIOMETRIC EFFECTS ON SATELLITE RADAR IMAGES**

**KEY WORDS:** topographically induced radiometric effects, radar images, cosine model

**SUMMARY:** In this paper a review of correction methods and algorithms of atmospherically induced radiometric effects on satellite radar images has been presented. It is a first step in research approach leading to efficient elimination of “topographic effect” influencing the quality of automatic image classification. The paper arranges the models and approaches in correction procedures chains giving the theoretical base for further experimental works on different types of radar images. Generally, the correction methods rely on cosine models fulfilling Lambert’s law for visible range of solar spectra and for ideal, diffusely reflecting surface. The review of scientific papers on that matter leads to conclusions that theory is explaining only some aspects of natural surfaces backscattering mechanisms and that in many cases and approaches this topographic influence on radiometry is neglected by radar images users. For these reasons the next step of our research work will be testing and validating described algorithms on several radar datasets.

mgr inż. Magdalena Mleczko  
e-mail: magdalena.mleczko@uwm.edu.pl  
tel.: +48 89 523 35 49  
fax: +48 89 523 32 10

dr hab. inż. Marek Mróz  
e-mail: marek.mroz@uwm.edu.pl  
tel.: +48 89 523 49 15, +48 89 523 38 41  
fax: +48 89 523 32 10

dr inż. Piotr Sawicki  
e-mail: piotr.sawicki@geodezja.pl  
tel.: +48 89 523 32 82  
fax: +48 89 523 32 10