



PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Wykorzystanie szumu cętkowego do klasyfikacji
pokrycia terenu na podstawie obrazów radarowych

Kinga Wołyńska

Praca napisana w Zakładzie Fotogrametrii,
Teledetekcji i SIP pod kierunkiem

dr. inż. Przemysław Kupidury

Podziękowania

Poniższa praca nie powstałaby bez danych udostępnionych przez firmę Astri Polska oraz firmę Geosystems Polska, którym serdecznie dziękuję. Szczególnie chciałabym podziękować mgr. inż. Piotrowi Kozie za kontakt z firmą Astri Polska oraz fachowe rady i niezbędne do pracy materiały dydaktyczne. Największe podziękowania składam opiekunowi mojej pracy dr. inż. Przemysławowi Kupidurze, który przez cały czas powstawania pracy motywował, wspierał i udzielał mi pomocnych rad. Dziękuję mu również za szybkie i szczegółowe odpowiedzi na wszelkie pytania, za nie zawsze motywującą, ale bardzo konstruktywną krytykę oraz za ciekawe rozmowy o muzyce.

Streszczenie

Poniższa praca miała na celu sprawdzenie wpływu użycia szumu cętkowego z obrazów radarowych na klasyfikację pokrycia terenu. Aby zrozumieć dobrze tematykę przeanalizowano w pracy informacje z zakresu fal elektromagnetycznych i ich właściwości, anten, czujników mikrofalowych oraz radarów satelitarnych. Opisano zjawisko rozpraszania wstecznego wiązki radarowej oraz powstawanie szumu cętkowego. Pokrótce wyjaśniono na czym polega klasyfikacja pokrycia terenu oraz w jaki sposób do przetworzeń obrazu można wykorzystać operacje morfologii matematycznej.

Badanie rozpoczęto od analizy związku wybranych typów pokrycia terenu z gęstością i szorstkością cętek w ich obrębie. Następnie wykonano szereg analiz wizualnych oraz ilościowych na dwóch zestawach danych radarowych. Analizy te umożliwiały porównanie klasyfikacji pokrycia terenu na danych radarowych odfiltrowanych z cętek oraz na danych wzbogaconych o mapy granulometryczne cętek. Przeprowadzone doświadczenie potwierdziło tezę, że szum cętkowy jako szum deterministyczny, zawiera potencjalnie użyteczne informacje o obrazowanych obiektach. Szczegółowe wyniki oraz wnioski przedstawiono w poniższej pracy.

Abstract

A purpose of the following work was to examine the influence of using speckle noise from radar images on the land cover classification. To understand the subject well, information in the field of electromagnetic waves and their properties, antennas, microwave sensors and satellite radars have been analyzed in this paper. Also the phenomenon of radar backscatter and the formation of speckle noise have been described. It was briefly explained, what the land cover classification is, and how the operations of mathematical morphology can be used in image processing.

The study started from the analysis of the relationship between selected land cover types and density or roughness of speckles within them. Then number of visual and quantitative analyzes on two sets of radar data have been done. The analyzes allowed a comparison of land cover classifications made with radar dataset filtered out of speckles and dataset enriched with speckles granulometric maps. The experiment confirmed the thesis that the speckle noise, as a deterministic noise, contains potentially useful information about the imaged objects. Detailed results and conclusions have been presented in this paper.

Spis treści

1.	Wstęp.....	10
1.1	Wprowadzenie.....	10
1.2	Znaczenie teledetekcji w pozyskiwaniu danych o terenie.....	11
2.	Fale elektromagnetyczne i ich właściwości	13
2.1	Mikrofale	17
2.1.1	Polaryzacja	20
2.1.2	Interferencja	21
2.1.3	Koherencja.....	22
2.1.4	Radiometria	23
2.2	Źródła i wykrywanie mikrofal	24
2.2.1	Ciało doskonale czarne	24
2.2.2	Inne źródła.....	24
2.2.3	Wykrywanie mikrofal.....	25
2.2.4	Audio - metafora.....	26
3.	Anteny	28
3.1	Typy anten	29
3.2	Charakterystyka promieniowania anteny.....	31
4.	Czujniki mikrofalowe	32
4.1	Sensory aktywne	32
4.1.1	Rozdzielczość zakresów	35
4.1.2	Radary obserwacji bocznej (Side-looking radars)	35
4.1.3	Dystorsje obrazu w radarach obserwacji bocznej	36
4.2	SAR.....	39
4.2.1	Interpretacja obrazów radarowych	39
5.	Radary satelitarne	41
5.1	Satelitarne misje SAR.....	44
6.	Zjawisko rozpraszania wstecznego	46
6.1	Roślinność.....	49
6.2	Czynniki wpływające na rozpraszanie wsteczne wiązki radaru	50
6.2.1	Wpływ częstotliwości	50
6.2.2	Wpływ polaryzacji.....	51
6.2.3	Wpływ szorstkości.....	51
6.2.4	Wpływ wilgotności	52
7.	Szum cętkowy.....	52
7.1	Szum cętkowy.....	55
7.2	Cętki jako źródło informacji	61
8.	Klasyfikacja pokrycia terenu	62
8.1	Klasyfikacja pikselowa	63
8.2	Klasyfikacja obiektowa	67

9. Morfologia matematyczna	68
9.1 Element strukturujący	68
9.2 Podstawowe operacje	68
9.2.1 Erozja	69
9.2.2 Dylacja	70
9.2.3 Otwarcie i domknięcie	72
9.3 Wielokrotny element strukturujący (MSE)	73
9.4 Transformaty top hat i bottom hat	74
9.5 Granulometria	75
9.6 Transformacje geodezyjne	77
10. Metodyka badań i dane testowe	79
10.1 Dane	79
10.2 Oprogramowanie	80
10.3 Metodyka badań	81
11. Badanie zawartości informacji w szumie	82
11.1 Schemat działania	82
11.2 Selekcja cętek	82
11.3 Analiza wzoru cętkowego	85
12. Badanie szumu cętkowego	88
12.1 Schemat pracy	88
12.2 Operacje morfologiczne	91
12.3 Ocena wizualna obrazów	93
12.4 Klasy pokrycia terenu - wybór i analiza próbek	96
12.4.1 Łąki	96
12.4.2 Grunty orne	99
12.4.3 Lasy	105
12.4.4 Wody powierzchniowe	109
12.4.5 Tereny zabudowane i zurbanizowane	112
12.4.6 Podsumowanie	114
12.5 Analiza rozkładu map granulometrycznych cętek	116
13. Cętki w klasyfikacji pokrycia terenu	119
13.1 Porównanie efektów klasyfikacji	122
13.2 Analiza ilościowa	125
13.3 Klasa terenów zabudowanych	129
13.4 Badania na danych jednowarstwowych	131
14. Wnioski	132
Bibliografia	134
strony internetowe:	137
Spis rysunków i tabel	137

1. Wstęp

1.1 Wprowadzenie

„Technologia kosmiczna” dla przeciętnego człowieka może wydawać się pojęciem nie z tej ziemi. Tymczasem cała materia świata emituje energię elektromagnetyczną, a naukowcy już od dawna wykorzystują ten fenomen, konstruując coraz to nowe urządzenia i instrumenty przydatne dla konkretnych celów. Każde kolejne badania pozwalają na odkrycie nowych możliwości jakie za sobą niosą.

Pozyskiwanie danych z radarów satelitarnych w Polsce wciąż jeszcze raczkuje. Na świecie natomiast już wykorzystuje się takie dane w wielu dziedzinach: m.in. zarządzanie kryzysowe, górnictwo, rolnictwo, monitoring stanu lasów itd.

Często, człowiek przechadzając się po znanych mu okolicach przypomina sobie jak wyglądały one za czasów jego dzieciństwa, ile się pozmieniało, a na łące, po której biegał jako dziecko, powstało osiedle mieszkaniowe. Zmiany krajobrazu są ciągłe i nieuniknione. Nowoczesny naród musi posiadać odpowiednie informacje, które pozwolą na podejmowanie odpowiednich decyzji. Sposób użytkowania terenu jest tylko jednym z wielu aspektów, ale wiedza o nim i o pokryciu terenu w ostatnich czasach staje się coraz ważniejsza, szczególnie w sytuacjach kiedy społeczeństwo chce zwalczać przypadkową i niekontrolowaną urbanizację, pogorszenie jakości środowiska, utratę atrakcyjnych gruntów rolnych, zniszczenie ważnych obszarów wodnych oraz utratę siedlisk gatunków fauny i flory. Dane o pokryciu terenu są potrzebne nie tylko w analizie procesów środowiskowych. Pomagają również analizować problemy, związane ze standardami warunków życia w celu ich ustabilizowania lub poprawy.

Jak się okazuje połączenie technologii kosmicznej z tymi przyziemnymi dylematami jest nie tylko możliwe, ale również w niektórych przypadkach zostało już z powodzeniem zastosowane. W poniższej pracy podjęto próbę połączenia procesu klasyfikacji pokrycia terenu z danymi radarowymi i szumem cętkowym, który powstaje na tych danych.

Nauka służy wyjaśnianiu funkcjonowania świata. „Nie istnieje prosta definicja nauki, która obejmuje ją całą. (...) Jest ogólną metodą rozwiązywania problemów. Człowiek zajmuje się nauką wtedy, gdy wie, że używana metoda jest o wiele szersza niż jej zastosowanie” (PRATCHETT I IN., 2002).

1.2 Znaczenie teledetekcji w pozyskiwaniu danych o terenie

Termin „teledetekcja” (ang. *remote sensing*) został wprowadzony w latach 50. XX w. przez Evelyn L. Pruitt, a w 1962 r. zorganizowano pierwsze sympozjum poświęcone teledetekcji środowiska (JOSEPH, 2003). Definicji tego terminu jest wiele. Jedną z ciekawszych jest ta Fischera (FISCHER i in., 1976) opisująca teledetekcję jako sztukę lub naukę pozyskiwania informacji o obiektach bez ich dotykania. W rzeczywistości jednak pojęcia tego używa się w znacznie węższym znaczeniu. „Obecnie pojęciem teledetekcja określa się metody pozyskiwania danych o obiektach, zjawiskach i procesach zachodzących na powierzchni Ziemi za pomocą urządzeń niebędących w bezpośrednim (fizycznym) kontakcie z badanym obiektem, a także metody przetwarzania pozyskanych danych na użyteczne informacje, charakteryzujące te obiekty, zjawiska oraz procesy” (CIOŁKOSZ, 2010).

Od lat na całym świecie rejestruje się zmiany w krajobrazie, aby zapobiec przyszłym katastrofom (powodziom, suszom), monitoruje zasoby naturalne oraz zbiera informacje na temat środowiska. Początkowo, działania te były wykonywane z poziomu naziemnego lub lotniczego. Obecnie bardzo popularnym sposobem obrazowania, ze względu na niską cenę i porównywalną jakość, jest ten z poziomu kosmicznego (satelitarnego). Dzięki użyciu satelitów, istnieje możliwość obserwowania dużych połaci powierzchni Ziemi w krótkim okresie czasu.

Teledetekcja umożliwia szybszy i często łatwiejszy dostęp do danych o pokryciu terenu. Jest obecnie najważniejszym źródłem danych o powierzchni Ziemi. Po orbitach okołoziemskich krąży wiele satelitów obrazujących Ziemię w ramach różnych projektów i misji satelitarnych. Niestety, satelita krążący po takiej orbicie jest w stanie obrazować tylko konkretny pas Ziemi leżący w jego zasięgu. Dlatego na orbity wynoszone są kolejne satelity: w listopadzie 2013 roku wyniesiono na orbitę ósmego już satelitę programu Landsat, a w kwietniu 2014 pierwszego satelitę z Misji Kopernik (Sentinel-1).

Pozyskane dane wykorzystuje się między innymi do tworzenia map pokrycia terenu. Aby jak najbardziej skrócić czas ich wykonywania wykorzystuje się różne półautomatyczne i automatyczne metody klasyfikacji. Mają one również na celu zastąpienie żmudnej pracy człowieka - szybkim i efektywnym algorytmem.

Aby zobrazowania satelitarne stały się użytecznym źródłem danych, potrzebne są odpowiednie warunki atmosferyczne. W tym zakresie plusem są np. radary satelitarne, które obrazują teren niezależnie od oświetlenia słonecznego oraz stopnia zachmurzenia.

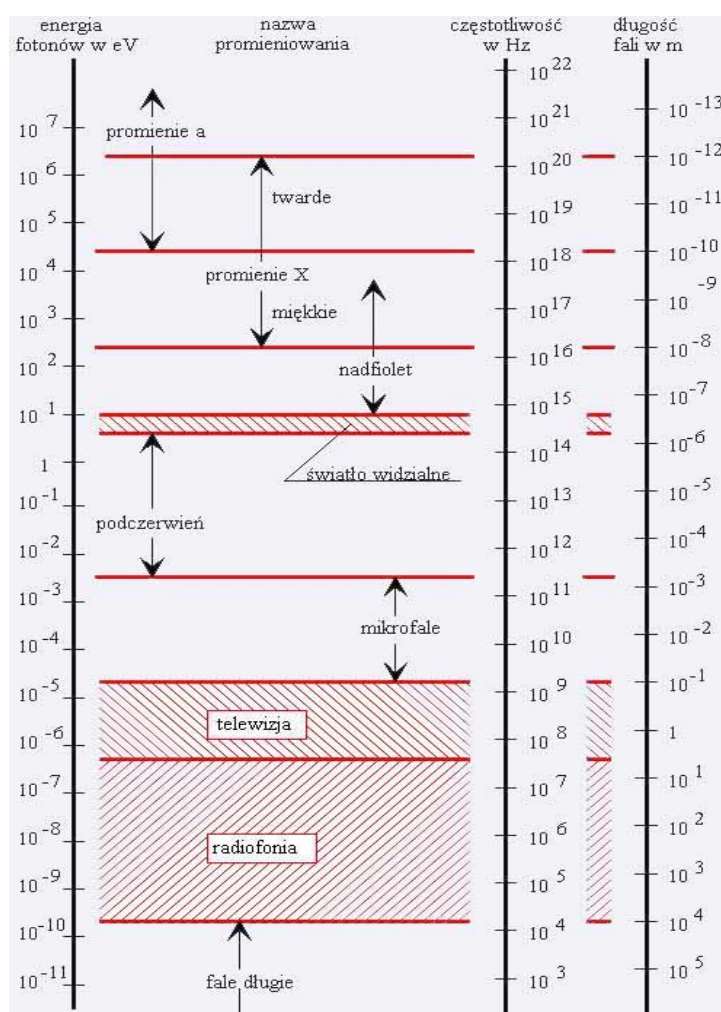
Według raportu fazy projektu Foresight Polskiego Biura ds. Przestrzeni Kosmicznej (styczeń 2007) „W kontekście roku 2012 istotne stanie się zwiększenie udziału satelitów pracujących w technologii radarowej w stosunku do dotychczas przeważających ilościowo satelitów optycznych. (...) Upowszechnianie się technologii radarowej umożliwiającej pozyskiwanie obrazów niezależnie od zachmurzenia ma istotne znaczenie dla polskiego użytkownika za względu na warunki pogodowe, które często ograniczają dostępność zobrazowań optycznych. W polskich warunkach zobrazowania wykonane w technologii radarowej mogą okazać się szczególnie przydatne w zarządzaniu kryzysowym, w sektorze obronnym oraz w zastosowaniach związanych z badaniem i ochroną środowiska (np. sytuacje powodziowe, ocena wilgotności gleb, badanie struktury geologicznej, ocena skażenia terenu).”

Na orbity wynoszone są radary z coraz lepszą rozdzielczością terenową. Dobrym przykładem jest satelita Terra SAR-X, który jako pierwszy w jednym z trybów rejestrujących oferuje obraz z pikselem równym 1m dla sceny o wymiarach 10 km x 5 km.

W kolejnych latach można spodziewać się rosnącej popularności zobrazowań radarowych ze względu na ich zalety oraz pewny wzrost rozdzielczości terenowej.

2. Fale elektromagnetyczne i ich właściwości

Nie ma konkretnych, jednoznacznych punktów, które oddzielają jeden typ fal od drugiego. Wszystkie formy różnego typu promieniowania są spowodowane tym samym fenomenem – przyspieszającymi ładunkami. Nazwy nadane typom promieniowania istnieją dla wygody człowieka, której służy opisanie obszaru spektrum, w którym fale się znajdują (SERWAY, BEICHNER, 2000).

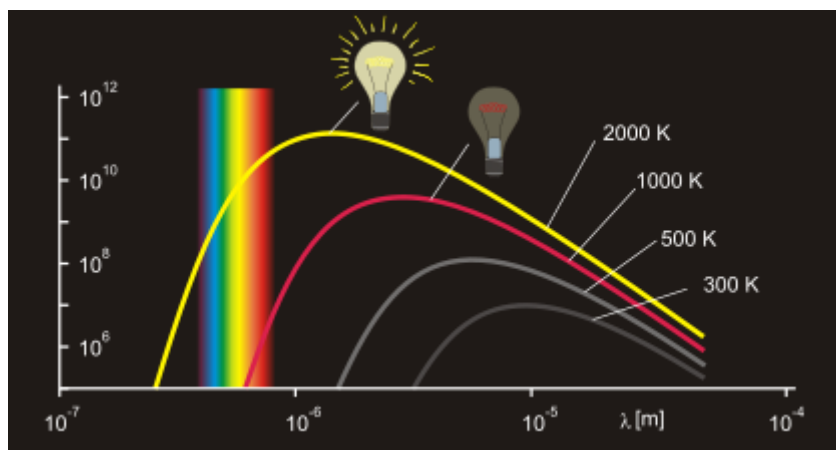


Rys.2.1 Widmo fal elektromagnetycznych (źródło: www.kopernikus.internetdsl.pl)

„Wszystkie pierwiastki pobudzone do świecenia wysyłają promieniowanie, w którym są fale o ściśle określonej długości (częstotliwości), charakterystycznej tylko dla danego pierwiastka. Badając promieniowanie wysyłane przez różne obiekty możemy się dowiedzieć, z jakich pierwiastków są one zbudowane. Całe znane nam promieniowanie elektromagnetyczne nazywamy widmem” (Rys.2.1) (ZEGRODNIK, 2006).

Promieniowanie elektromagnetyczne opisuje się jako energię wysyłaną przez układ materialny w postaci fal elektromagnetycznych, czyli pola elektrycznego i magnetycznego, prostopadłych do siebie i do kierunku przenoszenia się energii, o natężeniach zmieniających się sinusoidalnie. W próżni fale te rozchodzą się ze stałą prędkością (prędkością światła), w materii natomiast poruszają się wolniej. Z drugiej strony taką energię w postaci fal można traktować jako strumień fotonów poruszających się z prędkością światła, przy czym każdy foton ma energię $\frac{hc}{\lambda}$, gdzie h jest stałą Plancka, c jest prędkością światła, a λ długością związanej z tym fotonem fali. Połączenie tych pozornie sprzecznych sposobów opisu promieniowania elektromagnetycznego jest możliwe na gruncie mechaniki kwantowej lub mechaniki falowej.

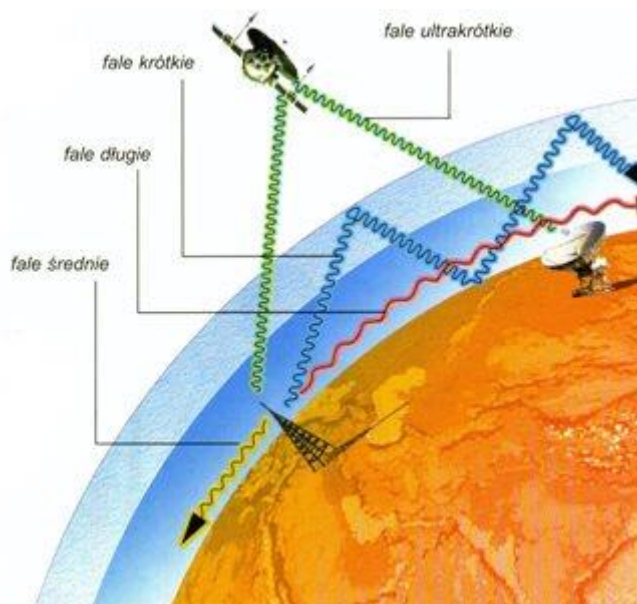
Stała Plancka została nazwana na cześć niemieckiego fizyka Maxa Plancka. Sformułował on prawo promieniowania na podstawie rozkładu energii emitowanej przez ciało doskonale czarne. Jest to hipotetyczne ciało, które pochłania całe promieniowanie, jakie na nie pada. Promieniowanie ciała doskonale czarnego rozciąga się na cały zakres długości fal, a rozkład energii w tym zakresie ma charakterystyczny kształt z maksimum dla pewnej długości fali. Położenie maksimum zależy od temperatury i przesuwa się w kierunku krótszych fal przy wzroście temperatury (Rys.2.2) (RED. ISAACS, 1999).



Rys.2.2 Rozkład Plancka w zależności od zmiany temperatury
(źródło: www.infraredtraininginstitute.com/max-planck-introduces-quantum-mechanics/)

Fale elektromagnetyczne są emitowane zarówno przez urządzenia wytworzone przez człowieka, jak również przez źródła naturalne. Fale radiowe na przykład można zarejestrować dzięki wyładowaniom atmosferycznym, zjawiskom geologicznym we wnętrzu Ziemi, zorom polarnym, gwiazdom oraz radiogalaktykom. Sztucznie są generowane przez radionadajniki

(Rys.2.3). Fale radiowe tak jak inne fale, mogą transportować energię, w przypadku fal elektromagnetycznych jest to transport energii elektrycznej. Fale radiowe wykorzystuje się w różnych dziedzinach - w komunikacji, w łączności radiowej, w telewizji, w systemach nawigacji, w radioastronomii, w kuchenkach mikrofalowych, w budownictwie (WWW.GENIUS.EDU.PL, odczyt z dn. 09.01.2014).



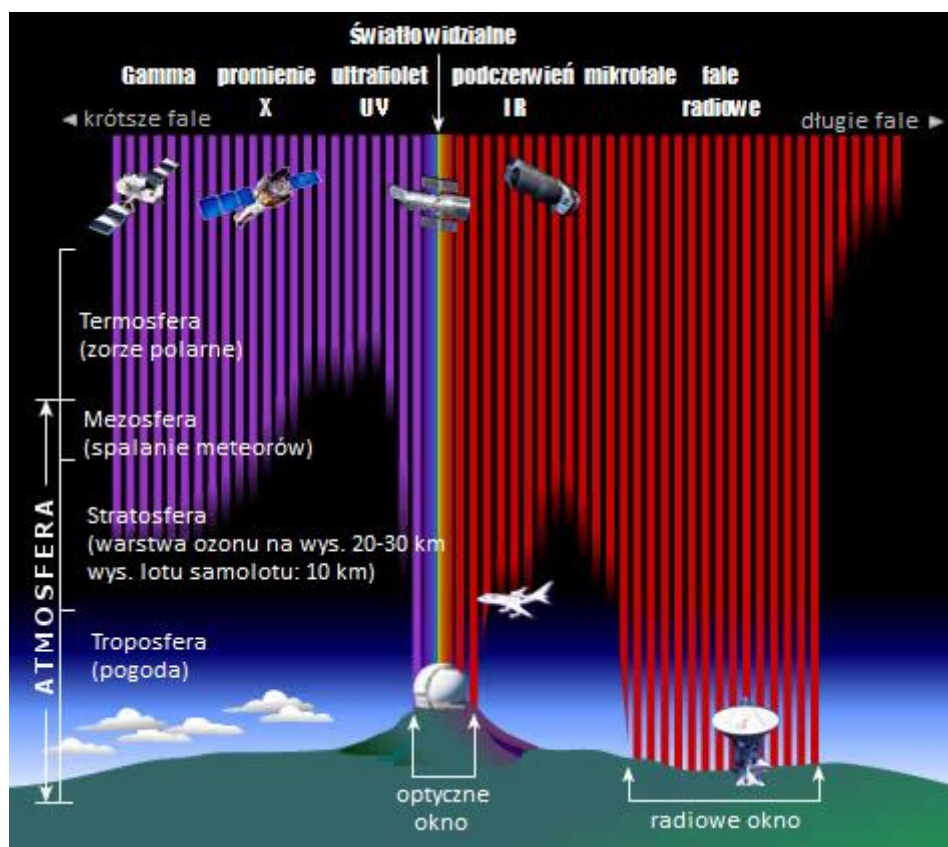
Rys.2.3 Emisja fal radiowych przez radionadajniki

(źródło: www.genius.edu.pl/zastosowanie-widm-fal-elektromagnetycznych)

Wielu ludzi nie wie, jak dużą rolę odgrywają fale elektromagnetyczne w ich życiu. Fale radiowe sprawiają, że w radiu gra muzyka, z kolei mikrofały nie tylko podgrzewają jedzenie w kuchenkach mikrofalowych, ale też pozwalają astronomom dowiedzieć się czegoś więcej o strukturze sąsiednich galaktyk. Zastosowanie podczerwieni w noktowizorach umożliwia widzenie w ciemności a w kosmosie podczerwień pozwala na lokalizację pyłu kosmicznego (są to ziarna węgla i krzemianów o nieregularnym kształcie i rozmiarze ułamka mikrona, które znajdują się między gwiazdami). Światło widzialne jest jedynym, które człowiek potrafi rejestrować dzięki zmysłowi wzroku. Promieniowanie ultrafioletowe emitowane przez słońce jest zazwyczaj powodem opalenizny jak również oparzeń słonecznych. Inne tzw. „gorące” obiekty w kosmosie również emitują promieniowanie UV. Promieni X używa zarówno dentysta, jak i ochroniarz na lotnisku prześwietlający bagaże. Promienie γ natomiast służą lekarzom do oglądania wnętrza ciała pacjenta.

Większość promieniowania elektromagnetycznego z kosmosu nie jest w stanie dotrzeć do powierzchni Ziemi. Częstotliwościom radiowym, światłu widzialnemu i części

promieniowania ultrafioletowego udaje się osiągnąć poziom morza (Rys.2.4). Astronomowie mogą również obserwować pewne długości fal podczerwieni umieszczając teleskopy na szczytach gór (IMAGINE.GSFC.NASA.GOV, 2013).

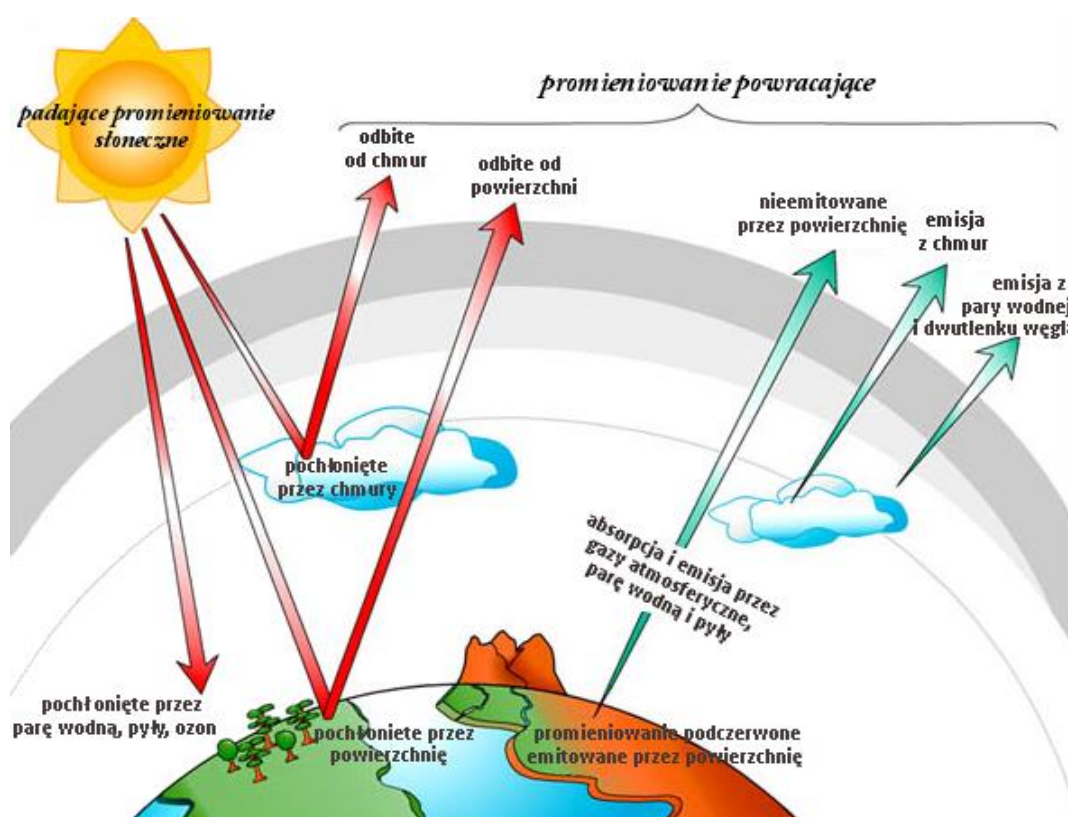


Rys.2.4 Poziomy, do których dociera promieniowanie kosmiczne

(źródło: http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_11/empectrum.html)

Promieniowanie słoneczne bardziej znane jako światło słoneczne, jest mieszaniną fal elektromagnetycznych w zakresie od podczerwieni (IR) przez światło widzialne, do promieni ultrafioletowych (UV). Ponadto tak naprawdę fuzja zachodząca w rdzeniu Słońca generuje również promieniowanie γ o bardzo dużej energii. Jednakże fotony promieniowania gamma podczas uciążliwej drogi do powierzchni słońca są w sposób ciągły pochłaniane przez plazmę słoneczną i ponownie wyemitowane na niższych częstotliwościach. W momencie osiągnięcia powierzchni ich częstotliwości pozostają najczęściej tylko w zakresie podczerwieni, światła widzialnego lub UV. Z kolei podczas rozbłysków słonecznych Słońce emituje również promieniowanie rentgenowskie. Promieniowanie X ze Słońca zostało po raz pierwszy zaobserwowane przez T. Burnight podczas lotu rakiety V-2 i później potwierdzone przez japońskiego Yohkoh, satelitę wystrzelonego w 1991 roku.

Gdy promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez Słońce uderza w atmosferę Ziemi (Rys.2.5), jego część jest pochłaniana, a reszta swobodnie dociera do powierzchni Ziemi. W szczególności promieniowanie UV jest absorbowane przez warstwę ozonową i ponownie emitowane w postaci ciepła. Część tego ciepła jest wypromieniowana w przestrzeń kosmiczną, podczas gdy reszta zostaje odbita w kierunku powierzchni Ziemi. W międzyczasie promieniowanie elektromagnetyczne, które nie jest pochłaniane przez atmosferę dociera do powierzchni Ziemi i ogrzewa ją. Część tego ciepła pozostaje tam, natomiast reszta jest ponownie wyemitowana w przestrzeń. Po dotarciu do atmosfery, część zostaje przez nią pochłonięta, a część przez nią przechodzi (VILLANUEVA, 2010).



Rys.2.5 Zachowanie promieniowania w przestrzeni okołozemskiej

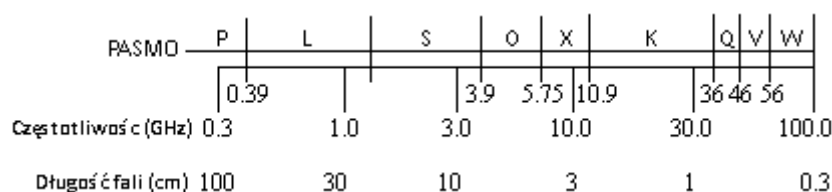
(źródło: www.ux1.eiu.edu/~cxtm/met/sirs.html)

2.1 Mikrofała

Źródła mikrofal obejmują wiele sztucznych urządzeń, takich jak obwody, wieże transmisyjne, radary, masery i kuchenki mikrofalowe, a także naturalnych źródeł takich jak Słońce (to promieniowanie jest blokowane przez Ziemską atmosferę) oraz kosmiczne promieniowanie tła (sądzi się, że jest pozostałością Wielkiego Wybuchu)

(WWW.BOUNDESS.COM/PHYSICS/, odczyt z dn. 11.01.2014). Z powodu ich relatywnie krótkich długości fal, świetnie nadają się dla systemów radarowych oraz prowadzenia badań związanych z atomową i molekularną naturą materii (SERWAY, BEICHNER, 2000).

Nie ma ścisłej definicji dla obszaru mikrofalowego, ale rozsądnym jest określenie zasięgu częstotliwości od ponad 0,3 do 300 GHz (1m do 1 mm długości fali). Poniżej znajduje się schemat literowego opisu kanałów dla okna obejmującego mikrofałe (Rys.2.6) oraz jakie współcześnie używane urządzenia z nich korzystają (Tabela 2.1) (ULABY, MOORE, FUNG, 1982).



Rys.2.6 Nazwy kanałów w oknie mikrofalowym

(źródło: www.esa.int/esapub/sp/sp1199/get21.htm)

Tabela 2.1 Urządzenia wykorzystujące kanały z zakresu mikrofal (źródło: electronicdesign.com)

Kanał	Zakres częstotliwości [GHz]	urządzenie korzystające z kanału
L	1 - 2	satelity, nawigacja (urządzenia GPS), telefony komórkowe
S	2 - 4	satelity, radia satelitarne (SiriusXM), sieci bezprzewodowe (Wi-Fi, Bluetooth), telefony komórkowe
C	4 - 8	satelity, przekaźniki mikrofalowe
X	8 - 12	radary
K _u	12 - 18	telewizja satelitarna, radary policyjne
K	18 - 26.5	mikrofalowe sieci typu backhaul
K _a	26.5 - 40	mikrofalowe sieci typu backhaul
Q	30 - 50	mikrofalowe sieci typu backhaul
U	40 - 60	radary, urządzenia doświadczalne
V	50 - 75	nowa sieć bezprzewodowa 802.11ad/WiGig
E	60 - 90	mikrofalowe sieci typu backhaul
W	75 - 110	radary samochodowe
F	90 - 140	urządzenia doświadczalne, radary
D	110 - 170	urządzenia doświadczalne, radary

Mikrofale są używane już od wczesnych lat 60. XX w. Ich ważnymi zaletami jest to, że są zdolne do penetracji atmosfery szczególnie przy małych częstotliwościach oraz pozostają niezależne w stosunku do Słońca jako źródła oświetlenia.

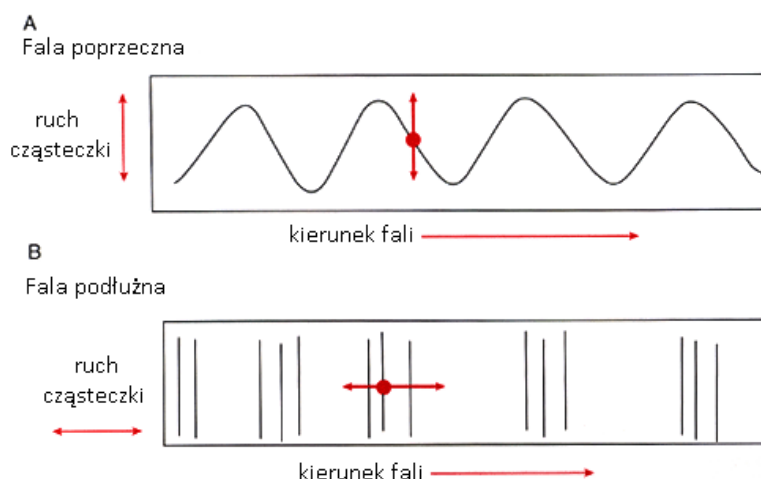
Innym powodem może być to, że mikrofale potrafią penetrować roślinność w większym stopniu niż fale widzialne. Stopień penetracji zależy od współczynnika wilgotności i gęstości roślinności tak samo jak od długości fali. Dłuższe fale lepiej zagłębiają się w roślinność niż krótsze. Oznacza to, że krótsze fale stosowane są dla wyższych pięter roślinności, a dłuższe dla niższych pięter roślinności i ziemi pod nią. Ponadto mikrofale są zdolne do znacznej penetracji samego gruntu. W przypadku suchego gruntu dla istotnej penetracji wystarczą mikrofale krótkie, natomiast dla mokrego gruntu nawet długie fale nie zagłębiają się dalej niż na centymetr. Pomimo tego i tak jest to lepsza penetracja niż jakakolwiek inna uzyskana przy pomocy promieniowania widzialnego i podczerwonego.

Kolejny powód używania mikrofal odnosi się do poprzednich rozważań: informacja uzyskana dzięki nim jest inna niż informacja uzyskana z promieniowania widzialnego i podczerwonego. Dlatego też gdy istnieje sytuacja, w której można wykorzystać wszystkie trzy rodzaje promieniowania, czujniki zbierające informacje wzajemnie się uzupełniają. Dla przykładu: informacja będąca odzwierciedleniem luminancji, uzyskana z promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni zależy przede wszystkim od molekularnych rezonansów w powierzchniowej warstwie roślinności lub gleby, podczas gdy luminancja uzyskana z czujników mikrofalowych wynika z geometrycznych i dielektrycznych właściwości powierzchni. Zatem kombinacja tych trzech rodzajów promieniowania pozwala na badanie geometrycznych, dielektrycznych, jak również molekularno-rezonansowych właściwości powierzchni, gdyż jeden rodzaj promieniowania daje gorszy efekt pod względem zawartości informacji niż połączenie dwóch dowolnych (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

Istnieją dwie główne kategorie sensorów mikrofalowych: aktywne i pasywne. Aktywne sensory, znane jako radary, są odpowiedzialne za transmisję fal elektromagnetycznych i rejestrację sygnału powracającego, rozproszonego wstecz od celu. Natomiast sensory pasywne, np. radiometry, działają tylko na zasadzie rejestracji, podczas gdy źródło promieniowania leży „poza systemem” (pochodzi np. od Słońca).

2.1.1 Polaryzacja

W odróżnieniu od fal dźwiękowych, które są podłużne, tzn. kierunek drgań jest taki sam jak wektora fali (jak w przypadku sprężyny), fale elektromagnetyczne są poprzeczne, tzn. kierunek drgań jest prostopadły do kierunku wektora fali (jak w przypadku sznura) (Rys.2.7).

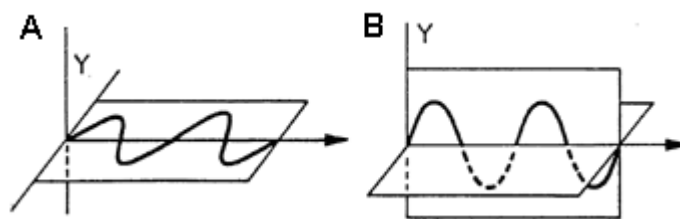


Rys.2.7 Rodzaje fal (A) poprzeczna i (B) podłużna (źródło: web.squ.edu.om)

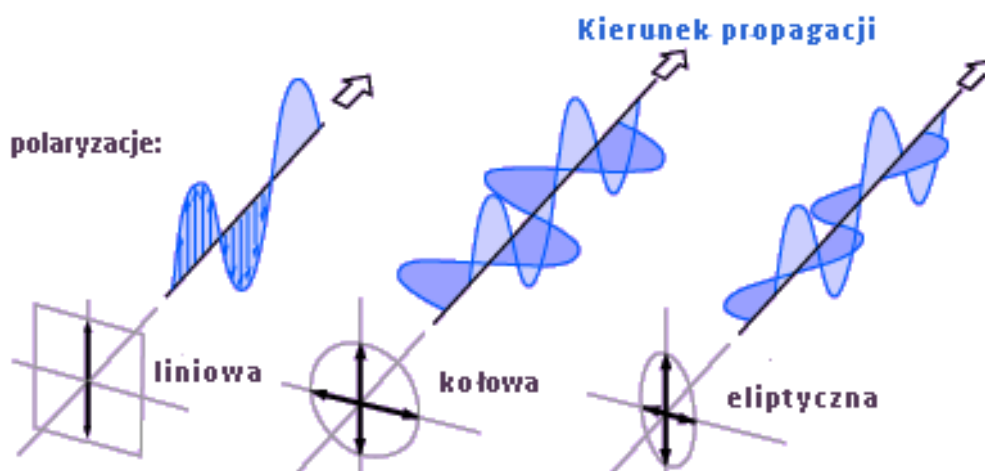
Fale poprzeczne mają unikalną właściwość, mianowicie parametr opisujący kierunek, w którym zachodzą drgania. Dla przykładu sznura: w celu całkowitego opisania fali należy podać kierunek machania liną (np. góra-dół, prawo-lewo). Taki właśnie opis w falach elektromagnetycznych określa się mianem polaryzacji.

Wiele zjawisk falowych tak jak interferencja czy dyfrakcja może zachodzić na każdym rodzaju fal, m.in. dźwiękowych, powierzchniowych występujących na wodzie czy elektromagnetycznych. Te zjawiska wpływają na fale niezależnie od tego czy są one podłużne, czy poprzeczne. Polaryzacja jednak ma znaczenie tylko i wyłącznie dla fal poprzecznych.

Każda fala poprzeczna może być reprezentowana jako złożenie dwóch fal składowych. Jedna prezentuje przesunięcia wzdłuż osi x (jest liniowo spolaryzowana w kierunku x), a druga wzdłuż osi y (jest liniowo spolaryzowana w kierunku y) (Rys.2.8). W obu przypadkach propagacja fali zachodzi wzdłuż osi z . Liniowość oznacza, że drgania zachodzą w linii prostej. Roboczo fale składowe określamy jako pionowe i poziome. W teledetekcji mikrofalowej polaryzacja pionowa jest opisywana literką V (ang. *vertical*), natomiast polaryzacja pozioma (ang. *horizontal* opisywana literką H) oznacza, że wektor natężenia pola elektrycznego E jest zorientowany równoległe do powierzchni Ziemi. Polaryzacja może być również kołowa lub eliptyczna (Rys.2.9), jednak w każdym przypadku jest opisywana poprzez kombinację tylko dwóch składowych, zwykle fali horyzontalnej i wertykalnej.



Rys.2.8 Fala spolaryzowana w kierunku x (A) i w kierunku y (B) (źródło: www.optics4kids.org)

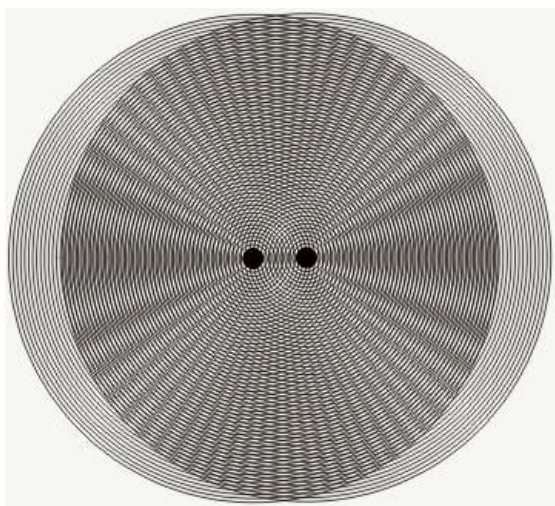


Rys.2.9 Przykłady rodzajów polaryzacji (źródło: www.air-stream.org)

Dla promieniowania elektromagnetycznego przyjmuje się umownie kierunek polaryzacji taki jaki ma wektor pola elektrycznego, a nie magnetycznego. Dzieje się tak dlatego, że większość typowych dla tego promieniowania zjawisk jest spowodowana głównie przez oddziaływanie pola elektrycznego (WOODHOUSE, 2006).

2.1.2 Interferencja

Nałożenie fal nazywa się interferencją (Rys.2.10). W danym czasie i miejscu, fala która powstaje w wyniku dodania dwóch fal o identycznej częstotliwości i amplitudzie, jest sumą chwilowych amplitud tych dwóch fal. Fale te mogą być w różnych względnych momentach cyklu oscylacji, tj. mogą mieć różne fazy wstępne. To właśnie różnica faz determinuje ostateczną amplitudę. Jeśli fale są identyczne i nie występuje przesunięcie fazowe, to poprzez nałożenie ich na siebie w momentach maksimum - maksimum i analogicznie minimum - minimum, powstaje zjawisko wzmocnienia fali. Mówi się wtedy, że fale interferują konstruktywnie, czyli ostateczna amplituda jest dwa razy większa niż początkowa. W przypadku przesunięcia fazowego o połowę cyklu fale nakładają się maksimum-minimum, co daje wygaszenie fali. Takie zjawisko nazywa się interferencją destruktywną, gdyż w każdym miejscu daje amplitudę równą zero (WOODHOUSE, 2006).



Rys.2.10 Interferencja dwóch fal kulistych (z lewej) (źródło: kluczedopracowni.w.interia.pl) oraz przykład interferencji na wodzie (z prawej) (źródło: gabrielascienceblog.blogspot.com)

2.1.3 Koherencja

Warunkiem interferencji fal jest ich spójność (koherencja). Faktycznie koherencja może być określana jako warunek umożliwiający interferencję, ale nie jest to pomocna definicja, gdy chce się zrozumieć co tak naprawdę oznacza, dlatego też należy zagłębić się w detale. O dwóch falach z przesunięciem fazowym, które pozostaje stałe w czasie, mówi się, że są koherentne. To oznacza, że ich częstotliwości są identyczne, nawet jeśli amplitudy i fazy początkowe są różne. Ten warunek do teraz pozwalał na rozważanie o falach jako o wektorach stacjonarnych i ignorowanie faktu, że tak naprawdę fale z czasem się obracają. Jeśli są obracane w różnych częstotliwościach kątowych, wynik dodawania wektora będzie różnił się w czasie, co oznacza, że efekty interferencji są mniej przewidywalne. W tym kontekście koherencja może być rozumiana jako miara przewidywalności – im wyższa koherencja dwóch fal, tym łatwiej jest przewidzieć właściwości jednej z fal bazując na znajomości tej drugiej.

Z matematycznego punktu widzenia można obliczyć taką przewidywalność używając miary podobieństwa dwóch fal, zmierzonej w określonym skończonym wymiarze przestrzeni lub czasu. Koherencja zespolona dwóch fal (E_1 i E_2) jest opisywana grecką literą gamma $\Gamma_{12}[E_1 \text{ i } E_2^*]$. W tym równaniu nawiasy określają całkowitą średnią, która dokładniej mówiąc oznacza, że wartości są uśrednione dla różnych realizacji tego samego pomiaru – np. wiele razy w tych samych warunkach. Gwiazdka natomiast zaznacza sprzężoną liczbę zespoloną, czyli znak urojonej części uległ zmianie.

Γ_{12} może ulec zmianie w przypadku zmiany wartości amplitudy fali. Dlatego też częściej używa się bardziej ogólnego parametru, który nie jest zależny od bezwzględnych wartości amplitud fal. Jest to znormalizowana wersja Γ_{12} opisywana przy pomocy małej litery gamma γ_{12} (WOODHOUSE, 2006).

$$\gamma_{12} = \frac{\Gamma_{12}}{\sqrt{\Gamma_{11}\Gamma_{22}}} = \frac{\langle E_1 E_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |E_1|^2 \rangle \langle |E_2|^2 \rangle}} \quad (1)$$

W praktyce mierząc wielokrotnie, pomiar teledetekcyjny nigdy nie dotyczy dokładnie tego samego miejsca, tak jakby tego ściśle wymagała całkowita średnia, dlatego też uśrednianie zachodzi w sposób przybliżony (uwzględnia się pomiary, które są bardzo zbliżone do oryginału). Można brać pod uwagę pomiary, które odbyły się w niewielkich interwałach czasu lub pomiary do miejsc, które są niewiele od siebie oddalone pod względem przestrzennym. Wartość γ może wahać się od 0 (niespójność) do 1 (kompletna spójność). Koherencja równa 1 występuje tylko gdy $E_1=E_2$. Należy zauważyć, że γ jest liczbą zespoloną, a więc zawiera w sobie również wartość fazy.

Cały czas rozpatrywane tu są fale z pojedynczą konkretnie określoną wartością częstotliwości. Taki hipotetyczny przypadek fali nosi nazwę fali monochromatycznej. Wiadomo jest, że krótkie monochromatyczne impulsy odpowiadają szerokim pasmom, a długie impulsy krótkim. Innymi słowy, im jest krótszy pożądany impuls, tym jest szersze spektrum niezbędne do wygenerowania impulsu w obrębie nadajnika radarowego i wykrycia go za pomocą odbiornika. Dla radaru krótszy impuls oznacza wyższą rozdzielczość dystansu, a co za tym idzie uzyskanie więcej informacji na jednostkę czasu. Taka jakość informacji z kolei potrzebuje większej przepustowości (WOODHOUSE, 2006).

2.1.4 Radiometria

Podczas gdy przy falach koherentnych ważnymi wielkościami są wektory pola elektrycznego i magnetycznego, dla fal niekoherentnych takim odpowiednikiem jest natężenie fali.

Termin „radiometria” odnosi się do pomiarów energii promieniowania elektromagnetycznego. Wszystkie istniejące stany skupienia materii (gazy, płyny, ciała stałe i plazma) emitują taką energię. Pośród różnych wielkości opisujących radiometrię ciał, jasność (opisywana literą L) jest tą najważniejszą. Powodem jest jej niezmiennosc wzdłuż całej drogi promienia (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

2.2 Źródła i wykrywanie mikrofal

2.2.1 Ciało doskonale czarne

Cała materia świata emituje energię elektromagnetyczną. Promieniowanie jest konsekwencją interakcji między atomami a molekułami wewnątrz konkretnego przedmiotu. Ciało doskonale czarne jest zdefiniowane jako rzecz, która pochłania całe padające na nią promieniowanie, nic z niego nie odbijając. W momencie absorpcji nagromadzona energia powoduje wzrost temperatury ciała (jeśli nie nastąpi w tym czasie żadna emisja). To powoduje, że doskonale absorbujące ciało staje się też świetnym emitery energii (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

2.2.2 Inne źródła

Bez wchodzenia w szczegóły techniczne w elektrotechnice, warto wspomnieć jak mikrofae mogą być generowane sztucznie. Najważniejsze jest to, że podobnie jak w przypadku naturalnie występujących fal elektromagnetycznych, te sztucznie wytworzone są również generowane przez przekształcenie energii z innych form kinetycznych, chemicznych, termicznych, elektrycznych, magnetycznych lub jądrowych. We wszystkich tych przypadkach formy energii powodują przepływ ładunku elektrycznego. Ten ruch ładunku (lub ściślej przyspieszenie, które jest zmianą w ruchu) jest podstawowym inicjatorem wszystkich pól elektromagnetycznych. W przypadku sztucznego wytwarzania fal potrzebny jest sposób kontrolowania tej przemiany energii. Mechanizmy transformacji mają zupełnie inny charakter niż elektromagnetyczne spektrum. Niektóre mechanizmy są bardzo uporządkowane tak jak laser, który produkuje koherentne światło z bardzo dokładnym zakresem częstotliwości. Inne za to są chaotyczne lub losowe i produkują światło niekoherentne (potrzebują większej przepustowości).

Promień lasera powstaje na zasadzie wzmocnienia światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Lasery używają wzbudzenia elektronów w cząsteczkach i atomach, aby wymusić wybitnie selektywną emisję promieniowania w bardzo wąskim paśmie promieniowania elektromagnetycznego, które w efekcie jest mocno spójne. Lasery potrafią wytworzyć światło zarówno w zakresie widzialnym jak i podczerwonym. Takim odpowiednikiem dla mikrofal jest maser. Działa on na zasadzie wzmocnienia mikrofal poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Został wynaleziony w 1953 roku przez Charles'a

Townes'a. Maser różni się od lasera tym, że zamiast wzbudzania elektronów na energetycznych poziomach atomu, używa pobudzania różnych poziomów energii rotacyjnej w cząsteczce. Molekuła jest wzbudzana z jednego poziomu na drugi, a gdy spada z powrotem do swojego pierwotnego poziomu, emituje energię wzbudzenia jako falę elektromagnetyczną – w tym przypadku mikrofalę.

Mikrofale są zwykle wytwarzane przy użyciu lamp elektronowych wykorzystujących ruch elektronów wysokiej prędkości w specjalnie zaprojektowanych konstrukcjach generujących zmienne pole elektryczne lub magnetyczne, które jest następnie prowadzone przez światłowody do struktury promieniowania (np. anteny). Magnetron jest najlepiej znanym tego typu urządzeniem, które wykorzystuje pole magnetyczne, aby zmusić elektrony do rotacji - taki obrót oznacza, że elektrony są przyspieszane, co powoduje wytwarzanie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie mikrofalowego widma. Magnetron wyróżnia wysoka wydajność przy konwersji energii elektrycznej do energii promieniowania mikrofalowego, stąd jego znaczenie w rozwoju praktycznych urządzeń radarowych.

Dla celów radarowych jednym z najważniejszych wymogów podczas tworzenia mikrofal jest ich koherencja lub mówiąc bardziej szczegółowo, możliwość wygenerowania strumienia spójnych impulsów, które na starcie mają tę samą fazę. Na ogół im bardziej zorganizowany mechanizm transformacji, tym bardziej spójne jest otrzymane promieniowanie (WOODHOUSE, 2006).

2.2.3 Wykrywanie mikrofal

W najprostszej formie pierwszym celem systemu teledetekcji radarowej jest wykrycie i określenie ilości promieniowania elektromagnetycznego, które dociera do detektora. W dużej mierze zwraca się uwagę na średnią intensywność (energię) promieniowania o określonej częstotliwości, ale równie dobrze można mierzyć inne właściwości promieniowania, takie jak polaryzacja czy faza. Zatem istnieją dwa zagadnienia wymagające zastanowienia: po pierwsze, w jaki sposób gromadzić to promieniowanie w pierwszej kolejności, a po drugie, jak później zmierzyć i obliczyć, z odpowiednim stopniem dokładności, właściwości nagromadzonego promieniowania.

Większość systemów mikrofalowych składa się z dwóch podstawowych elementów: z anteny, która gromadzi docierające do niej promieniowanie przede wszystkim z wąskiego zakresu kątów widzenia, oraz z odbiornika, który wzmacnia i wykrywa promieniowanie zebrane w obrębie określonego zakresu częstotliwości. Trzecim niezbędnym elementem zależnym od techniki pomiaru jest system obsługi danych. Pozwala on na przeprowadzanie digitalizacji, formatowania i kalibracji oraz rejestruje inne dane takie jak orientacja instrumentu czy kierunek wycelowania anteny. W prostych układach element ten może również obsługiwać przetwarzanie danych. W przypadku bardziej skomplikowanych instrumentów, takich jak do obrazowania radarowego, szybkość transmisji danych jest tak duża, że całość przetwarzania musi być wykonywana przez oddzielny układ w segmencie naziemnym (pokładowe przetwarzanie jest ograniczone przestrzenią, mocą i czasem). Kolejnym wymaganym elementem w aktywnych systemach radarowych jest generator impulsów oraz nadajnik. Mimo że nadajnik może używać drugiej anteny do ukierunkowania mikrofal, sposobem bardziej efektywnym jest użycie tej samej anteny zarówno do nadawania wąskich promieni jak i do odbierania sygnału zwrotnego (WOODHOUSE, 2006).

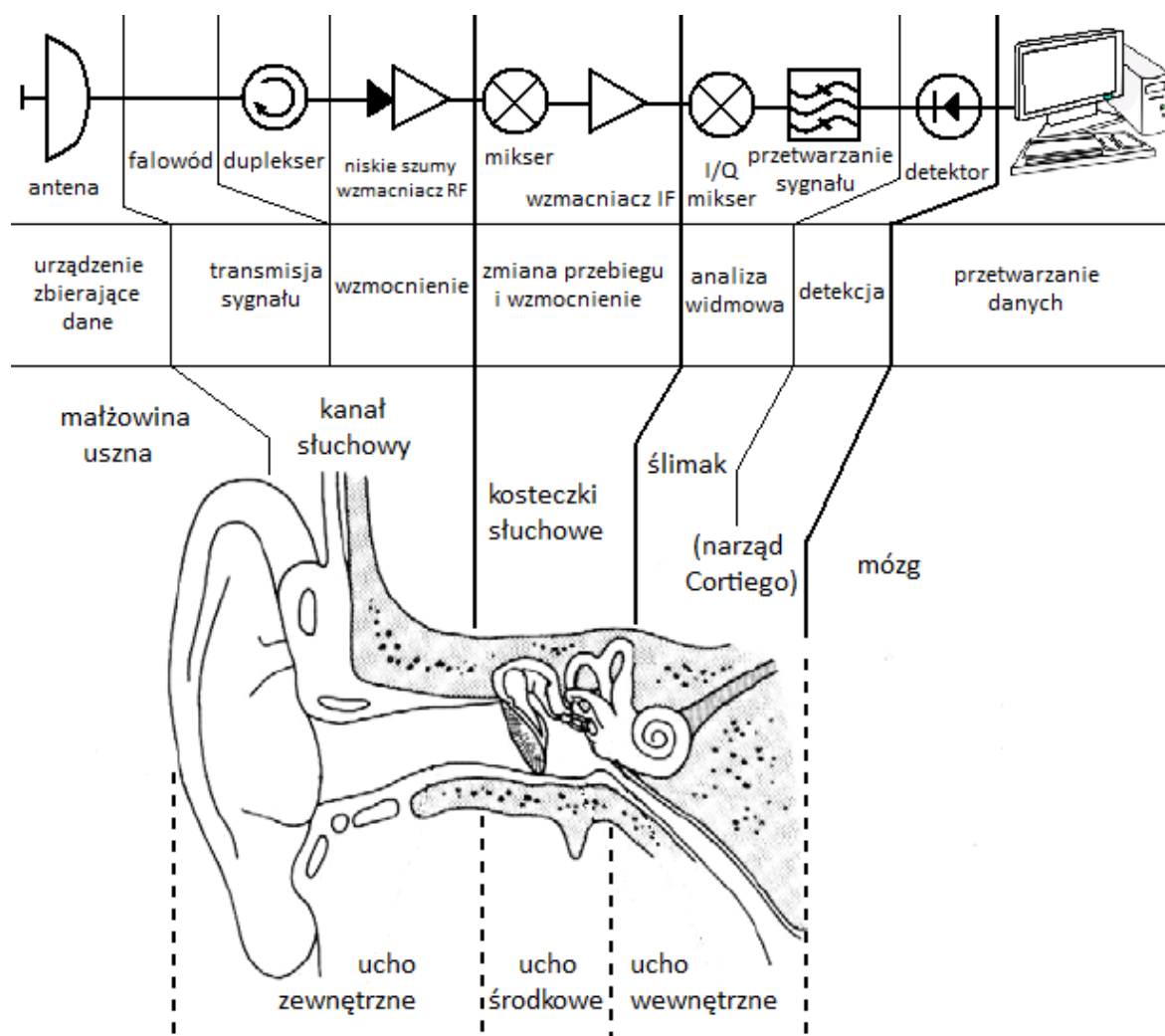
2.2.4 Audio - metafora

Wizualne metafory dominują w teledetekcyjnej literaturze (przynajmniej w tekstach dotyczących głównie teledetekcji terenowej). Dość typowe jest dla wprowadzających podręczników i kursów wykładowych, aby wzmocnić ten wizualny kontekst poprzez prezentację oka lub soczewki kamery, jako prostego przykładu "instrumentu teledetekcyjnego". W teledetekcji wizualne elementy są powszechne - jasność, kolor, cień, itp. - nawet wtedy, gdy odnoszą się do nie-optycznych systemów takich jak radar lub sonar. Niestety znajomość metod wizualnych - wykresów, map, fotografii, telewizji i tak dalej - w naturalny sposób prowadzi do konceptualizacji informacji 2-D w strukturze wizualizacji. Może to być problem dla tych czytelników, którzy następnie zgłębiają teledetekcję mikrofalową, gdzie oczy i soczewki kamery obnażają małe podobieństwo funkcjonowania wielu układów mikrofalowych. W niektórych przypadkach, wizualny kontekst może być nawet szkodliwy dla uzyskania jasnego zrozumienia, co się dzieje - jak na ironię, może to być najważniejsze w kontekście zobrazowania radarowego.

Jako alternatywę można wziąć pod lupę odniesienie systemów mikrofalowych do ucha ludzkiego oraz to w jaki sposób ludzie wykrywają i analizują dźwięki.

Ogólnie rzecz biorąc, w poszczególnych częściach ucha zachodzą analogiczne funkcje do każdego z etapów w mikrofalowym radiometrze lub części przyjmującej w systemie aktywnym (Rys.2.11). Być może najbardziej oczywistym podobieństwem między uchem i systemem mikrofalowym jest to, że ucho zewnętrzne (małżowina uszna) jest zasadniczo akustyczną anteną, gromadzącą energię dźwięku i zapewniającą pewien stopień ukierunkowania. Ponieważ długość fali dźwiękowej jest o sześć rzędów wielkości większa niż długość fali światła, akustyczny mechanizm skupiający z podobną do oka zdolnością rozdzielczą wymagałby uszu, które byłyby od siebie oddalone o kilometr! Jest to zjawisko wyraźnie niemożliwe i dlatego też natura włączyła do pracy inny mechanizm. Systemy teledetekcyjne mają ten sam problem - długości fal powszechnie stosowanych dla zakresu obrazowania radarowego od 1 mm do 1 m (pasmo P), znowu są prawie sześć rzędów wielkości większe niż długości fal stosowane do obrazowania widzialnego i podczerwonego (0,3-10 μm). Jest to największe wyzwanie w mikrofalowej teledetekcji: osiągnięcie rodzaju zdolności rozdzielczej, która jest standardem dla czujników optycznych, ale przy użyciu technologii, które są odpowiednie dla dłuższych fal.

Istnieją dwie zasadnicze różnice pomiędzy wrażeniami wizualnymi i słuchowymi. Pierwsza jest taka, że wzrok określa z dużą dokładnością intensywność (energię) jako funkcję kierunku lub kąta widzenia, podczas gdy słuch jest o wiele lepszy w mierzeniu intensywności w funkcji czasu i częstotliwości. Drugą być może ważniejszą dla niektórych systemów różnicą jest to, że dźwięk jest koherentnym zjawiskiem falowym (tj. zarówno amplituda jak i faza jest ważna, nie tylko średnia energia). Te podstawowe różnice są także kluczowe dla optycznej i (większości form) mikrofalowej teledetekcji. Dużą zaletą używania odczuć słuchowych jako analogii jest to, że wprowadza niektóre z trudniejszych pojęć teledetekcji mikrofalowej w kontekście, który wszyscy znamy z codziennego doświadczenia, ale oczywiście trzeba uważać, aby nie nadużywać takich analogii (WOODHOUSE, 2006).



Rys.2.11 Schemat pokazujący podobieństwo ucha i systemu mikrofalowego
(źródło: opracowanie własne na podstawie WAGNER, s. 51)

3. Anteny

Antena może być zdefiniowana jako miejsce transmisji pomiędzy falą elektromagnetyczną propagującą w wolnej przestrzeni a przewodnikiem falowym rozprzestrzeniającym się w linii przesyłowej lub odwrotnie. Działa jak łącznik między dwoma mediami wykonując te same funkcje, które spełnia obiektyw w czujnikach optycznych. Funkcją mikrofalowej anteny radiometrycznej jest odebranie energii elektromagnetycznej wypromieniowanej przez miejsce poddane obserwacji. W systemach radarowych oddzielne anteny mogą być używane do nadawania i odbioru sygnałów lub też ta sama antena może spełniać obie funkcje (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

3.1 Typy anten

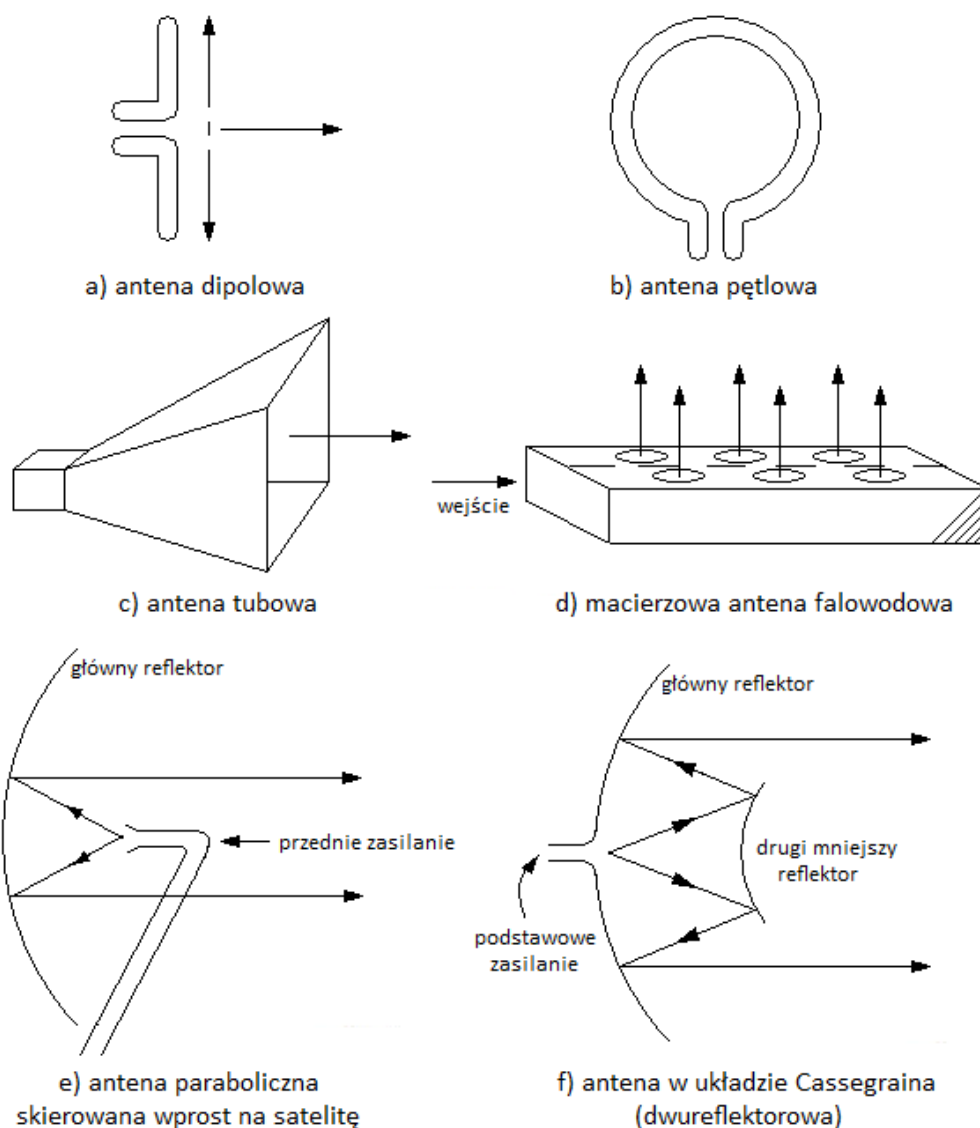
Prosta antena dipolowa (Rys.3.1a) stanowi najbardziej podstawowe mikrofalowe urządzenie nadawania i odbioru. Anteny dipolowe mogą nadawać i odbierać tylko fale elektromagnetyczne, które są spolaryzowane w kierunku osi dipola. W kontekście teledetekcji kierunkowość anteny dipolowej jest niewystarczająca.

Antena paraboliczna jest odblaskowym urządzeniem, które skupia padającą energię z konkretnego kierunku na detektorze (lub na falowodzie, który następnie przenosi sygnał do detektora) (Rys.3.1e i f). Element odbijający jest zakrzywioną powierzchnią wykonaną z materiału, który jest wysoce odblaskowy na odpowiednich częstotliwościach. Dla fal o krótkich długościach antena może być zrobiona z jednolitego metalu, ale dla większych fal taka antena może być wykonana w postaci drucianej siatki. Wybór jest czysto praktyczny, gdyż drucziana siatka jest o wiele lżejsza i ma mniejszy opór powietrza.

Antena matrycowa ma pewną liczbę nadajników mikrofalowych (i/lub odbiorników) umieszczonych na powierzchni płyty będącej sztywną konstrukcją. W tak zwanych "fazowanych" antenach, tymi nadajnikami są elementy elektroniczne, które mogą przesyłać mikrofałe o konkretnej częstotliwości z również określoną fazą. Ważną cechą anteny fazowanej w kontekście radarów jest to, że zdolność do określania fazy (i amplitudy) z każdego przetwornika umożliwia kontrolę kierunku szczytu w charakterystyce czułości anteny. Jest to określane jako elektroniczne skanowanie lub kierowanie charakterystyką promieniowania anteny.

Ta sama zasada była stosowana już od wczesnego rozwoju mikrofal i radia, ale działa się to przez bardziej brutalne podejście "szczelinowego falowodu" na antenach macierzowych. W tych systemach, zamiast z poszczególnych nadajników/odbiorników, na panel anteny składa się tablica falowodów z wylotami (Rys.3.1d). Falowody są mikrofalowymi równoważnikami światłowodów. Są budowane z wąskich metalowych rurek o przekroju prostokątnym, które pozwalają na ukierunkowanie i kontrolowanie mikrofal. Zastosowanie falowodów oznacza, że dla transmisji konieczne jest jedynie istnienie jednego centralnego źródła, które wytwarza mikrofałe kierowane różnymi falowodami do układu antenowego. W takim przypadku mikrofałe opuszczające tablicę anteny każdym wylotem są spójne (ponieważ pochodzą z tego samego źródła) i tak długo, jak każdy falowód jest tej samej

długości, emitowane fale będą wszystkie miały tę samą fazę. Należy jednak zauważyć, że w przeciwieństwie do fazowanych tablic, nie jest rozwiązaniem praktycznym natychmiastowe przesunięcie fazy każdej fali emitowanej z matrycy, gdyż mogłoby to wymagać fizycznej zmiany długości falowodów. Jest to przewaga technologii mikrofalowej, która oznacza, że obecnie jest możliwe, aby mieć kilka niezależnych małych odbiorników lub nadajników, które mogą działać koherentnie w obrębie matrycy.



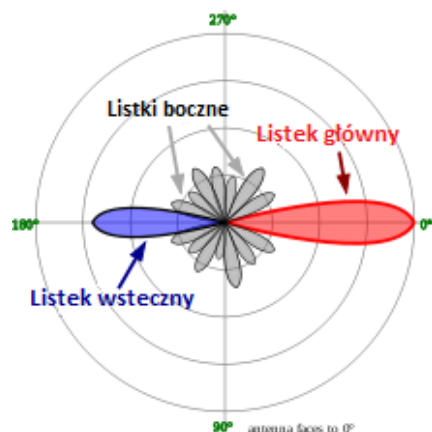
Rys.3.1 Przykładowe typy anten
(źródło: opracowanie na podstawie WAGNER, s. 53)

Ze względu na wymóg większości systemów obrazowania radarowego, posiadania stosunkowo dużej anteny (czyli więcej niż kilka metrów), antena z matrycą fazowaną jest częstym wyborem. Matryca panelu może ogólnie być proporcjonalnie większa bez znaczącego wzrostu kosztów, a całość jest również lekka - znaczące ograniczenie projektowe w szczególności dla systemów kosmicznych. Nie jest wymogiem stosowanie anteny tablicowej (matrycowej) dla radarów obrazujących. W rzeczywistości rejestrator obrazów w radarze pokładowym sondy kosmicznej Magellan badającej planetę Wenus, używa okrągłej anteny parabolicznej o długości 2.3 m, ale często jest to najbardziej skuteczny sposób, aby budować duże anteny (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

3.2 Charakterystyka promieniowania anteny

W zakresie konstrukcji anteny określenie „charakterystyka promieniowania” (lub wzorec anteny) odnosi się do kierunkowej (kątownej) zależności siły fal wypromieniowanych z anteny lub innego źródła (BALANIS, 2005). Hipotetyczna antena promieniująca równomiernie we wszystkich kierunkach nazywa się anteną izotropową. Jednak ze względu na charakter wektora pola elektromagnetycznego taka antena nie może istnieć. Charakterystyka promieniowania to najważniejszy obok kąta połowy mocy, kierunkowości i zysku energetycznego parametr anteny (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

W większości anten promieniowanie jej poszczególnych elementów powoduje interferencje pod różnymi kątami. Wynikiem tego jest zerowe promieniowanie na pewnych kierunkach, gdzie fale radiowe z różnych części nadchodzą w przeciwfazie oraz maksima promieniowania na innych kierunkach, gdzie fale radiowe nadchodzą w fazie. Dlatego wykres promieniowania większości anten daje wzór maksimów, czyli tak zwanych listków (wiązek) pod różnymi kątami, rozdzielonych "zerami", w których promieniowanie zbliża się do zera. Im większa jest antena w porównaniu do długości fali, tym więcej będzie miała listków. W antenie kierunkowej, gdzie celem jest skierowanie fal radiowych w jednym konkretnym kierunku, listek na tym kierunku jest większy niż inne i zwany jest wówczas listkiem głównym (Rys.3.2). Oś promieniowania maksymalnego, przechodząca przez środek listka głównego jest zwana osią wiązki lub osią optyczną anteny. Inne listki, reprezentujące promieniowanie niepożądane w innych kierunkach są zwane listkami bocznymi. Listek boczny o kierunku przeciwnym (180°) do listka głównego jest zwany listkiem wstecznym (SZÓSTKA, 2001).



Rys.3.2 Przykładowa charakterystyka emisji anteny (źródło: autor Timothy Truckle, pobrano z http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Char_ant.png na licencji CC-BY-SA-3.0)

4. Czujniki mikrofalowe

Sygnał odebrany przez antenę odbiorczą radaru składa się z energii rozproszonej wstecznie przez cel, który został oświetlony przez antenę nadawczą radaru. Dla radiometru "źródło transmisji" jest celem samym w sobie, a radiometr jest tylko odbiornikiem pasywnym. W momencie gdy scena taka jak teren jest obserwowana za pomocą radiometru mikrofalowego (poprzez wiązkę z anteny), promieniowanie odebrane przez antenę jest złożone częściowo z emisji własnej sceny, a częściowo z odbitego promieniowania pochodzącego z otoczenia, np. z atmosfery. Ziemska mikrofalowa teledetekcja radiometryczna ma swoje początki w latach 50. XX w. Od tego czasu zakłada się, że nauka radiometrii mikrofalowej jest integralną częścią ogólnie pojętej teledetekcji środowiska. W tym procesie uzyskała również nową nazwę - pasywna teledetekcja mikrofalowa, w przeciwieństwie do techniki radarowej, która zaczęła być znana jako aktywna teledetekcja mikrofalowa (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

4.1 Sensory aktywne

Jak już wspomniano w rozdziale 2.1, istnieją dwie główne kategorie sensorów mikrofalowych: aktywne i pasywne. Aktywne sensory, znane jako radary, są odpowiedzialne za transmisję fal elektromagnetycznych i rejestrację sygnału powracającego, rozproszonego wstecz od celu. Natomiast sensory pasywne, np. radiometry, działają tylko na zasadzie

rejestracji, podczas gdy źródło promieniowania leży „poza systemem” (pochodzi np. od Słońca).

Kosmiczne systemy radarowe zazwyczaj są sklasyfikowane w trzech kategoriach, w zależności od rodzaju potrzebnych pomiarów geofizycznych:

- Altimetr
- Skaterometr
- Radar z syntetyczną aperturą (SAR)

Altimetry są stosowane do pomiaru wysokości nad powierzchnią wzdłuż toru satelity. Są one używane do sporządzania map topograficznych terenu oraz do bardzo dokładnych (kilka cm) map topograficznych oceanu, które z kolei są wykorzystywane w badaniach cyrkulacji oceanicznej. Osiąga się to przez bardzo dokładny pomiar opóźnienia czasowego impulsu radarowego rozprzestrzeniającego się od czujnika do powierzchni i z powrotem.

Skaterometry są stosowane do bardzo dokładnego pomiaru współczynnika odbicia powierzchni jako funkcji częstotliwości, polaryzacji, oraz kierunku oświetlenia sygnału pomiarowego. Cechuje je wysoka dokładność kalibracji. Najlepiej sprawdzają się w przypadkach pomiaru wiatrów na morzu.

Radary z syntetyczną aperturą - czasem określane jako radary obrazujące - używane są do pozyskania obrazów powierzchni o wysokiej rozdzielczości (kilka do kilkudziesięciu metrów). Są one wykorzystywane do badania właściwości powierzchni, jak np. struktur geologicznych, fal oceanu, polarnej pokrywy lodowej, użytkowania gruntów. Trójwymiarowe obrazowanie i widoki perspektywiczne mogą być generowane przy użyciu konfiguracji stereo (technika interferometrii SAR). Systemy te charakteryzują się bardzo wysoką szybkością transmisji danych, okazałymi antenami i dużymi wymaganiami energetycznymi.

Skaterometry i radary SAR są radarami obserwacji bocznej, co oznacza, że ich anteny kierują w bok wiązkę, która jest szeroka w pionie i wąska w poziomie.

Radar jest oparty na zasadzie echolokacji - wysyła sygnał i mierzy echo, które powraca nieco później. Mierząc czas potrzebny na powrót echa można oszacować odległość, o ile prędkość sygnału jest znana. Echolokacji używa się w wielu formach teledetekcji (sonar, LIDAR, sejsmologia, ultradźwięki). Jest to technika dość powszechna również wśród wielu zwierząt, np. wśród nietoperzy, ssaków morskich i niektórych ptaków. Najlepszym przykładem wykorzystania echolokacji do analizy sceny są nietoperze - naturalne, aktywne systemy teledetekcyjne. Nietoperze używają ich bardzo dobrze rozwiniętego słuchu do

wysłuchiwania echa własnych odgłosów, które odbijają się od obiektów i otoczenia lub od przyszłej ofiary. W rzeczywistości nietoperze posiadają wiele funkcji w ich technikach echolokacyjnych, które są podobne do tych w systemach radarowych, w tym *CHIRP* (technika skompresowanego pulsu radarowego o wysokiej intensywności) i interferometrię. Dla nietoperzy świat jest odbierany nie dzięki barwom, lecz dzięki chropowatości powierzchni, akustycznym odbiciom i ruchowi względnemu (nietoperze potrafią wywnioskować obecność zjawiska ruchu przez zmiany częstotliwości sygnału powrotnego w wyniku efektu Dopplera). Takie postrzeganie świata jest bardzo zbliżone do sposobu, w jaki systemy radarowe odbierają środowisko.

Termin „radar” jest zarezerwowany dla echolokacji używającej fal radiowych (lub mikrofal) i oznacza „*radio detection and ranging*” (detekcja radiowa). Ten termin powstał w czasach, gdy wykrywanie statków morskich i powietrznych oraz określanie ich zakresu było głównym celem radaru. Dzisiaj niektóre urządzenia radiowe mierzą tylko amplitudę, inne mierzą jedynie prędkość. W wielu przypadkach położenie celu, na przykład ziemi, jest znane, tak więc, "detekcja" jest czynnością zbędną. Termin „radar” jednak ma zastosowanie w dowolnych urządzeniach radiowych, w których nadajnik oświetla obiekt lub powierzchnię odbicia czy rozpraszania a odbiornik mierzy pewne właściwości sygnału, który powrócił do radaru z przedmiotu lub powierzchni.

Podstawowym podejściem w przypadku działania systemu radarowego jest skuteczna akceptacja słabej rozdzielczości związanej z długimi falami, ale zastosowanie strategii optymalizacji wykorzystania dokładnych pomiarów odległości służących dostarczeniu nowych informacji jak również w celu poprawy efektywności rozdzielczości przestrzennej. Podejście to opiera się na dwóch kluczowych właściwościach systemów mikrofalowych jako alternatywnej podstawy do wykonywania pomiarów. Mianowicie chodzi o możliwość transmisji stosunkowo dużej mocy impulsów mikrofalowych w celu aktywnego oświetlania powierzchni (a nie wykorzystywanie o wiele słabszego emitowanego lub odbijanego promieniowania mikrofalowego) jak również o zdolność do określania bardzo dokładnego czasu na podstawie opóźnienia echa (ULABY, MOORE, FUNG, 1981).

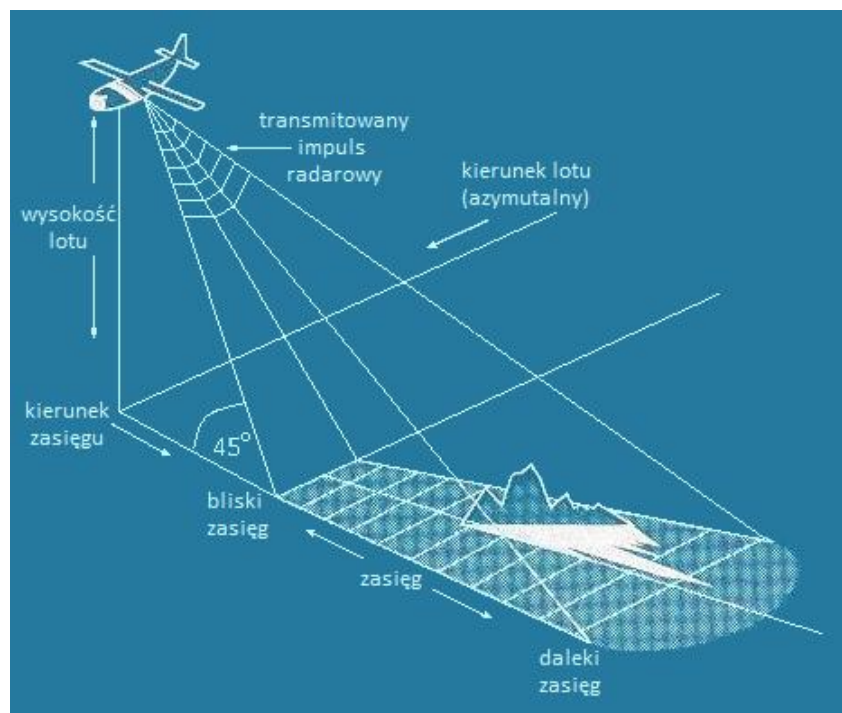
4.1.1 Rozdzielczość zakresów

Rozdzielczość zakresów w systemach radarowych definiuje się jako zdolność do rozróżniania impulsów powrotnych z dwóch idealnych celów punktowych. Radar impulsowy jest najczęstszym typem radaru i wysyła on krótkie impulsy energii. Jego przeciwieństwem jest radar szumowy (ang. *frequency-modulated radar*), który z kolei pracuje z falą ciągłą. Na koniec radar *CHIRP* (w dosłownym tłumaczeniu ćwierkający) wykorzystuje obie techniki i pracuje na sygnale z liniowo modulowaną częstotliwością. Używa się ich, gdy długość impulsu wymagana dla radaru impulsowego jest tak mała, że transmisja musi mieć bardzo dużą moc szczytową tak, aby odebrany impuls wybił się ponad istniejące w tle szumy o określoną wartość (ULABY, MOORE, FUNG, 1981). Częstotliwość nośna każdego impulsu sondującego jest zwiększana w sposób liniowy w czasie jego generowania (WOLIŃSKI, odczyt z dn. 11.01.2014)

4.1.2 Radary obserwacji bocznej (*Side-looking radars*)

Większość radarów stosowanych w teledetekcji jest typu obserwacji bocznej. Antena wycelowana w bok generuje wiązkę, która jest szeroka w pionie i wąska w poziomie. Obraz wytwarzany jest przez ruch platformy (powietrznej lub satelitarnej) mijającej dany obszar (Rys.4.1). Krótki impuls jest transmitowany z radaru, przede wszystkim w obrębie poziomo wąskiej wiązki. Gdy impuls uderza w jakiś cel, sygnał powraca do platformy. Czasowe opóźnienie związane z tym odebrany sygnałem, tak samo jak w przypadku innych radarów impulsowych, daje odległość między celem a radarem.

Radary obserwacji bocznej dzieli się na dwie grupy: systemy z rzeczywistą aperturą, które zależą od szerokości wiązki zdeterminowanej rzeczywistą anteną oraz systemy z syntetyczną aperturą, które zależą od przetwarzania sygnału w celu osiągnięcia znacznie węższej wiązki wzdłuż toru niż ta osiągalna z rzeczywistą anteną (REES, 2001).

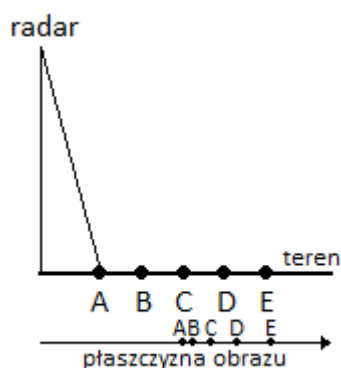


Rys.4.1 Schemat dla radaru obserwacji bocznej

(źródło: www.navcen.uscg.gov/?pageName=iipHowDoesIIPDetectNorthAtlanticIcebergs)

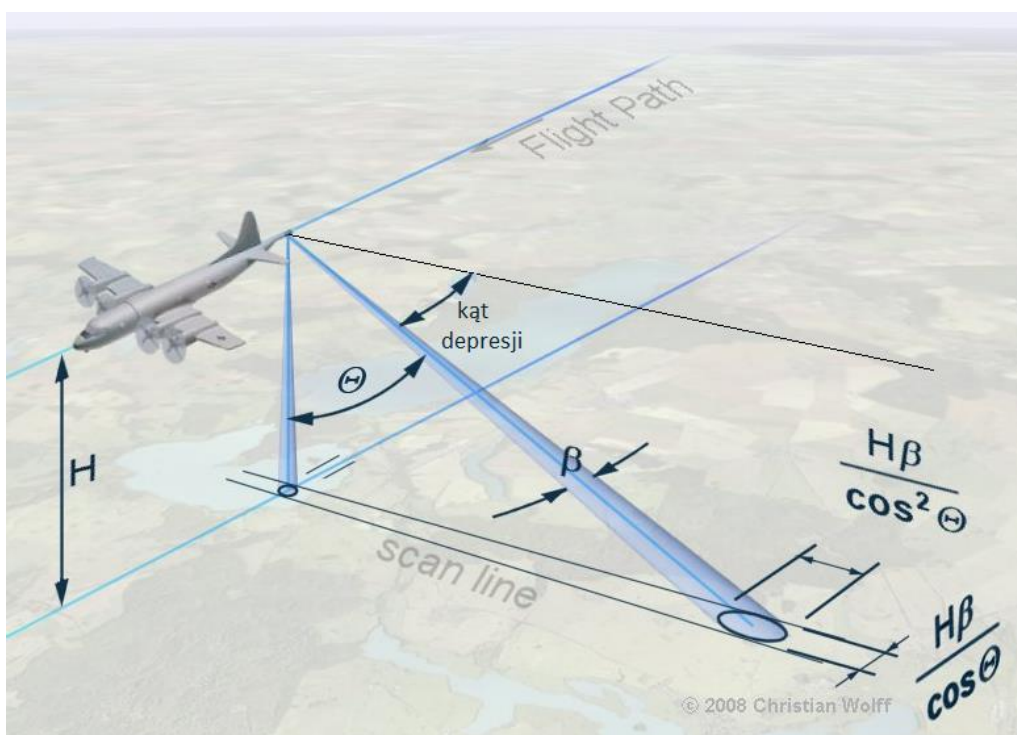
4.1.3 Dystorsje obrazu w radarach obserwacji bocznej

Geometria obrazowania skośnego oraz fakt, że zakres współrzędnych (w poprzek toru) jest zdeterminowany zakresem nachylenia, wprowadza charakterystyczne zniekształcenia geometryczne i radiometryczne do obrazów z radarów obserwacji bocznej (Rys.4.3). Najprostszym z nich jest dystorsja wynikająca z odległości punktów pomiarowych na gruncie (Rys.4.2). Ta dystorsja jest relatywnie łatwa do skorygowania, ponieważ może być opisana za pomocą małej liczby zmiennych. Niektóre systemy radarowe bocznej obserwacji stosują korektę dla tej dystorsji już na etapie przetwarzania sygnału radarowego w odpowiedzialnej za to jednostce.



Rys.4.2 Dystorsja wynikająca ze skośnego zobrazowania

(źródło: opracowanie własne na podstawie WAGNER, s. 81)

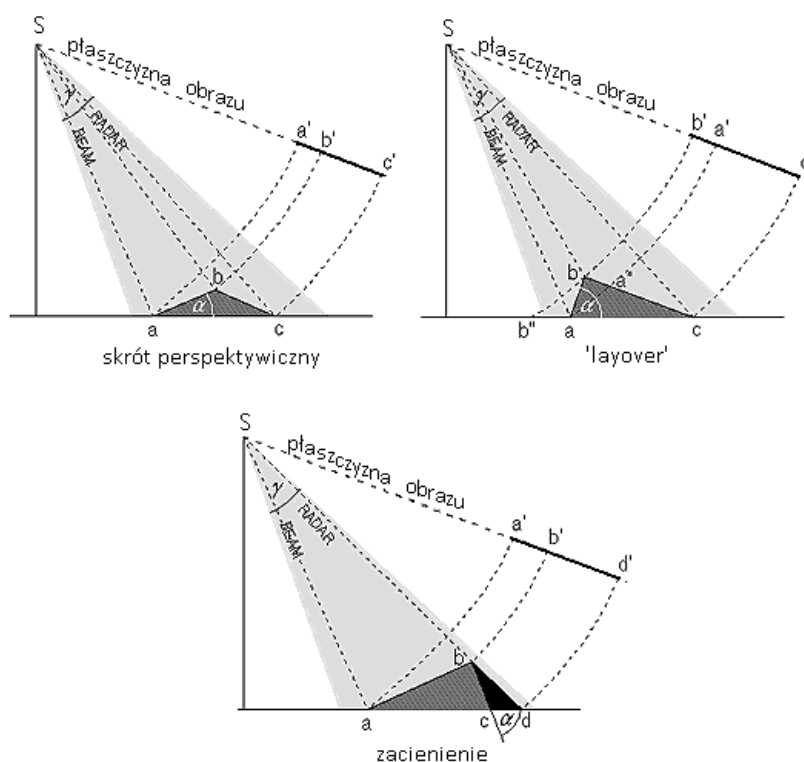


Rys.4.3 Geometria radaru obserwacji bocznej. H - wysokość, Θ - kąt patrzenia, β - szerokość wiązki (źródło: www.radartutorial.eu/20.airborne/ab06.en.html)

Jeśli powierzchnia Ziemi ma znaczące wypukłości terenu, pojawią się kolejne dystorsje wynikające z tej metody obrazowania. Jedną z nich obejmuje skrót perspektywiczny, a druga efekt zacieniania terenu. Skrót perspektywiczny powoduje, że na zobrazowaniach terenów górskich ma się wrażenie, iż wszystkie wzniesienia są z jednej strony prawie pionowe, a z drugiej mają łagodne stoki. Dzieje się tak, ponieważ radar rejestrując wiązki z punktów u podnóża góry i na jej szczycie, dostaje podobne wartości odległości. Natomiast sygnał z drugiej strony wzniesienia, jeśli punkt jest dla radaru widoczny, pochodzi z miejsca, które nie dość, że jest niżej to jeszcze dalej i radar rejestruje o wiele większą wartość odległości.

Efekt zacienienia z kolei powstaje gdy punkt po drugiej stronie wzniesienia nie jest widoczny dla radaru, gdyż jest zasłonięty innym fragmentem terenu. Do zacienionego regionu nie dociera oświetlenie radaru i w konsekwencji nie ma sygnału powrotnego. W przeciwieństwie do zdjęć optycznych, cienie radarowe są całkowicie ciemne, ponieważ rozpraszanie promieniowania mikrofalowego z atmosfery w obszarze zacienionym jest całkowicie nieistotne. Zacienienie powstaje głównie w przypadku terenów wysokogórskich.

W przypadku zjawiska nazywanego w języku angielskim *layover* problemem z kolei jest to, że w na terenach górskich czasem sygnał odbity u podnóża góry okazuje się być położonym dalej niż sygnał odbity od szczytu góry. W ten sposób na obrazie punkty te są odwzorowane w złej kolejności (Rys.4.4) (REES, 2001).



Rys.4.4 Geometria opisanych dystorsji obrazów

(źródło: www.cwr.utexas.edu/gis/gishydro03/Classroom/trmproj/Teng/Summary.htm)

Na podstawie rozważań na temat geometrii obrazu SAR, można manipulować kątem padania wiązki w celu lepszej wydajności interpretacji:

- dla regionów o małym zróżnicowaniu wysokości, większy kąt padania wiązki bardziej podkreśla rzeźbę terenu, dlatego też dla takich terenów raczej nie stosuje się małych kątów padania wiązki,
- dla regionów o dużym zróżnicowaniu wysokościowym zjawiska *layover* oraz zacienienia są o wiele bardziej widoczne przy dużych kątach padania wiązki, dlatego też w tych wypadkach preferowane są mniejsze kąty padania wiązki,
- pośrednie kąty padania wiążą się z niskim zniekształceniem chropowatości terenu oraz z dobrą detekcją cech ziemi,
- małe kąty padania są z kolei niezbędne dla zapewnienia akceptowalnego poziomu rozpraszania od powierzchni oceanu (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

4.2 SAR

Wiele procesów biologicznych i geofizycznych odbywa się przy użyciu skal przestrzennych rzędu kilku do kilkudziesięciu metrów. Dlatego systemy radarowe wysokiej rozdzielczości są potrzebne, aby obserwować parametry powiązane z tymi procesami. Radary z syntetyczną aperturą powstają w celu osiągnięcia wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Aktualne systemy misji SAR mają rozdzielczość w zakresie od 10 do 30 m, następne pokolenie będzie w stanie pozyskać obrazy o rozdzielczości od 1 do 5 metrów.

Zazwyczaj wysoka rozdzielczość przestrzenna jest osiągnięta kosztem niższej częstotliwości przestrzennej. Systemy SAR ze sterowalną wiązką - jak te na satelitach Radarsat 1 i 2 - pokazują, że jeden punkt na powierzchni Ziemi może być obserwowany częściej, choć pod różnymi kątami padania wiązki. Oznacza to, że częstotliwość przestrzenna jest wyższa, jednak wiązki padają pod różnymi kątami, a to z kolei nie pozwala na osiągnięcie wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Zasięg obszaru, na którym działają systemy SAR o bardzo wysokiej rozdzielczości, jest zwykle zawężony przez ograniczone zasoby energii w kosmosie i ogromne ilości danych.

Technika syntetycznej apertury opiera się na tym, że cel pozostaje oświetlany wiązką przez znaczny okres czasu i jest obserwowany przez radar z wielu miejsc wzdłuż drogi satelity (ULABY, MOORE, FUNG, 1982).

Spójny charakter pomiarów SAR ma znaczący wpływ na wygląd zobrazowań. Patrząc na obrazy SAR od razu poprzez zróżnicowanie jasności oraz struktury można rozpoznać kształty, niektóre obiekty, linie i obszary. Jeśli jednak zwróci się uwagę na jeden z większych regionów, np. pole, można zaobserwować pewną zmienność, która powoduje ziarnisty wygląd na obrazach SAR. Taki efekt nazywa się cętkami (ang. *speckles*); został on opisany nieco szerzej w rozdziale 7).

4.2.1 Interpretacja obrazów radarowych

Obrazy radarowe mają pewne cechy, które różnią się zasadniczo od obrazów uzyskanych przy pomocy czujników optycznych, takich jak te w satelitach Landsat, SPOT lub w kamerach lotniczych. Te szczególne cechy są konsekwencją techniki obrazowania radarowego i są związane z radiometrią (cętki, tekstura, geometria).

Podczas analizy obrazu radarowego, obserwator musi mieć na uwadze fakt, że nawet jeśli obraz jest prezentowany w postaci analogowego produktu na papierze fotograficznym, to radar "widzi" analizowaną scenę w bardzo odmienny sposób od ludzkiego oka lub czujnika optycznego; poziomy szarości sceny są powiązane z względną siłą energii mikrofalowej rozproszonej wstecz przez elementy krajobrazu.

Jak już wspomniano wcześniej cienie na obrazach radarowych są związane z ukośnym kątem padania promieniowania mikrofalowego emitowanego przez system radarowy, a nie od geometrii słonecznego oświetlenia. Czasem jest to dezorientujące dla początkujących obserwatorów.

Poziomy szarości na obrazach radarowych są związane z właściwościami rozpraszania mikrofalowego odbitego od powierzchni. Intensywność rozproszonego sygnału zmienia się w zależności od szorstkości, właściwości dielektrycznych i lokalnego nachylenia. Tak więc sygnał radarowy odnosi się głównie do geometrycznych właściwości celu.

W przeciwieństwie do tego, pomiary w zakresie światła widzialnego/podczerwieni wykorzystują czujniki optyczne, które dostają odpowiedź od celu związaną z kolorem, składem chemicznym i temperaturą.

Następujące parametry są stosowane podczas interpretacji obrazu radarowego:

- barwa
- tekstura
- kształt
- struktura
- rozmiar

Do interpretacji zdjęć radarowych można wykorzystać kilka zasad stosowanych w interpretacji zdjęć lotniczych. Można przy tym wyróżnić trzy etapy:

- czytanie zdjęcia:

odpowiada rozpoznaniu granic obiektów na podstawie określonych wyżej parametrów,

- analiza zdjęcia:

odpowiada rozpoznaniu tego co jest we wcześniej zidentyfikowanych granicach,

- dedukcyjna interpretacja obrazu:

na tym etapie, obserwator wykorzystuje całą swoją wiedzę i doświadczenie w celu interpretacji danych.

W interpretacji można również posłużyć się poniższymi definicjami:

Barwa: średnie natężenie sygnału rozproszonego wstecz. Wysokie natężenie odwzorowuje się w jasnych kolorach, a niskie przybiera ciemne kolory.

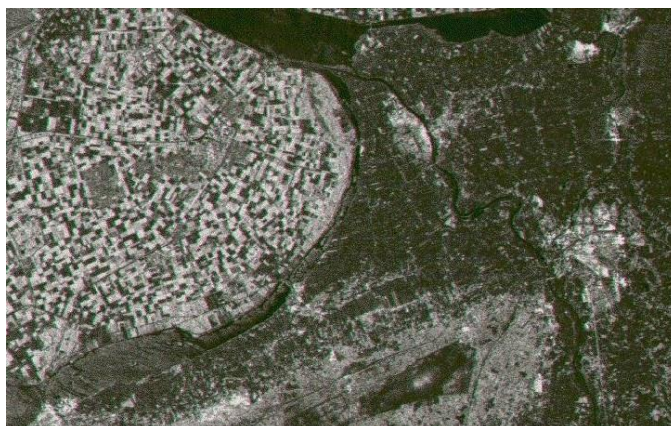
Kształt: można go określić jako formę przestrzenną w odniesieniu do względnie stałej granicy lub po prostu kontur obiektu. Niektóre obiekty (ulice, mosty, lotniska) można rozróżnić właśnie dzięki ich kształtom. Należy oczywiście pamiętać o tym, że kształt jest również zdeterminowany ukośnym oświetleniem.

Struktura: Układ przestrzenny obiektów w całym regionie z uwzględnieniem konfiguracji rekurencyjnych.

Rozmiar: Rozmiar obiektu może być stosowany jako cecha jakościowa rozpoznawalności na obrazach radarowych. Rozmiar znanych obiektów na obrazie daje względną ocenę skali i wymiarów innych obiektów w terenie (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

5. Radary satelitarne

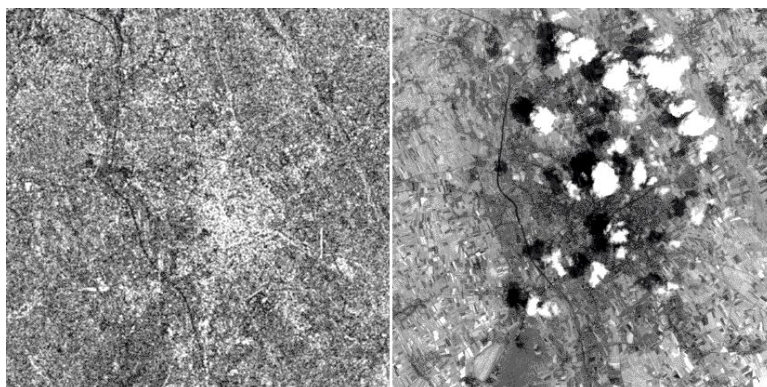
Jako narzędzie obrazujące radar ma bardzo wiele zalet, m.in. nie jest zależny od oświetlenia. Radar oświetla powierzchnię Ziemi i mierzy odbity od jej powierzchni sygnał. Dlatego obrazy mogą być pozyskane zarówno w dzień jak i nocy (Rys.5.1), całkowicie niezależnie od oświetlenia słonecznego, co jest szczególnie ważne na dużych szerokościach geograficznych (kiedy ma się do czynienia z nocą polarną) (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).



Rys.5.1 Obraz SAR pozyskany 02.08.1991 przez satelitę ERS-1 z fragmentu Holandii o godzinie 23:40 czasu lokalnego

(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

Innym plusem jest obojętność w stosunku do chmur. Mikrofałe emitowane i odbierane przez ERS SAR mają znacznie większą długość fali (5,6 cm) niż fale światła widzialnego lub podczerwone. Dlatego mikrofałe łatwo przenikają przez chmury, a zdjęcia mogą być pozyskiwane niezależnie od aktualnych warunków pogodowych (Rys.5.2) (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).



Rys.5.2 Obrazy zostały pozyskane nad miastem Udine, przez satelitę ERS-1 (z lewej) 04.07.1993 r. o 9.59 rano oraz przez satelitę Landsat-5 (z prawej) tego samego dnia o godzinie 9.14 (GMT). Na zdjęciu optycznym wyraźnie widać chmury nad miastem.
(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

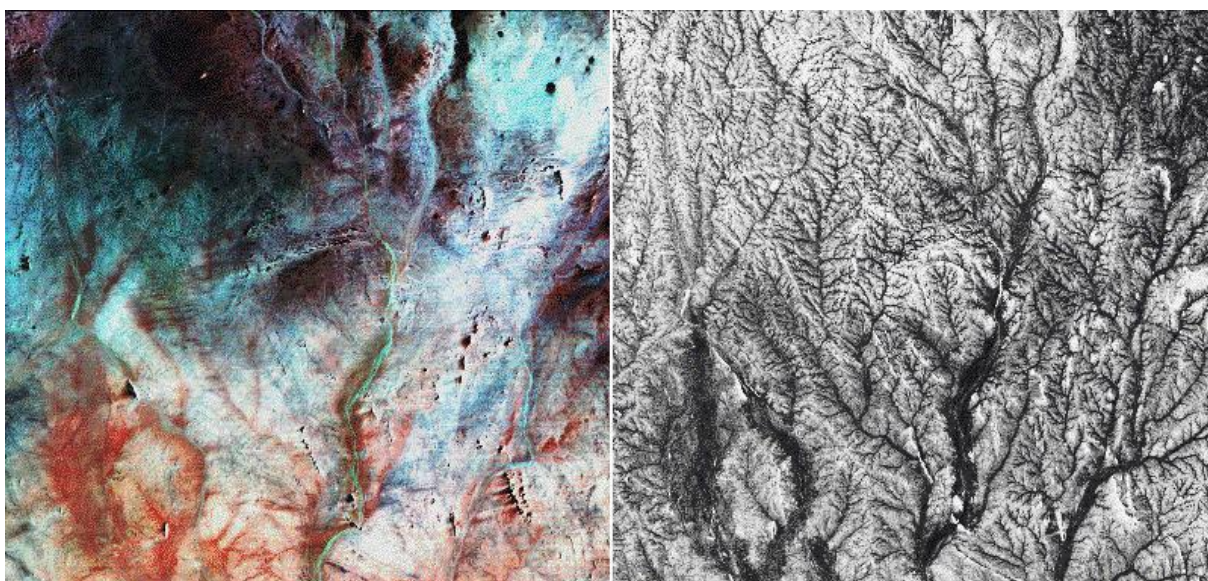
Ponieważ radar obrazujący jest systemem aktywnym, właściwości nadawanego i odbieranego promieniowania elektromagnetycznego (moc, częstotliwość, polaryzacja) mogą być optymalizowane w zależności od specyfikacji celów misji (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

Radary SAR wysyłają sygnały o polaryzacji poziomej (H) i pionowej (wertykalnej opisywanej literką V). Dzięki temu można stworzyć cztery zobrazowania o polaryzacjach VV, HH, VH i HV (WWW.CRISP.NUS.EDU.SG/, odczyt z dn. 11.01.2014). Dodatkowo obrazy VH i HV są bardzo podobne, dlatego też stosuje się zabieg, w którym wybieramy jeden z nich. Następnie wspólnie z obrazami w polaryzacji VV oraz HH tworzy on złożenie 3 kanałów, które można podłożyć pod kanały RGB generując w ten sposób barwny obraz SAR (Rys.5.3) .



Rys.5.3 Lewy obraz przedstawia kombinację RGB trzech kanałów (P-RED, L-GREEN i C-BLUE) z obrazu SAR pozyskanego przez samolot JPL¹ podczas kampanii MAESTRO-1. Na prawym z kolei widać obraz RGB złożony z różnych polaryzacji (HH -> RED, VV -> GREEN i HV -> BLUE), który może dostarczyć innych informacji o tym samym miejscu.
(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

Z powodu dużych długości fal, mikrofałe są w stanie przenikać nie tylko chmury, ale także np. ziemię, piasek, śnieg (tylko gdy jest on suchy) lub leśne zadaszenia, zapewniając tym samym informacje o niewidocznych elementach.



Rys.5.4 Porównanie obrazów tego samego obszaru z satelity Landsat TM w kompozycji barwnej RGB 754 (z lewej) i ERS-1 (z prawej)

(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

¹ JPL - Jet Propulsion Laboratory czyli Laboratorium Napędu Odrzutowego, jest jednym z centrów badawczych NASA. Znajduje się w miejscowości Pasadena w stanie Kalifornia. Jest odpowiedzialny za prowadzenie lotów bezzałogowych dla NASA.

Na Rys.5.4 widać z lewej kompozycję barwną RGB 754 z satelity Landsat TM. Pokazuje ona główny przebieg koryt rzek (wady) na czerwono. Może być to związane z rzadkim pokryciem roślinnością. Osady (piasek) są pokazane w jasnych kolorach a różne rodzaje skał i minerałów w ciemnych.

Z kolei z prawej strony widać obraz z kanału C satelity ERS-1. Daje on więcej różnych informacji na tym samym obszarze. Głównie dotyczą one szorstkości powierzchni i być może jej penetracji, ale też widać bardzo dobrze dokładną sieć koryt rzecznych (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

5.1 Satelitarne misje SAR

(źródło: WWW.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014)

SAR może dostarczyć zobrazowania Ziemi zarówno z pory dziennej jak i nocnej. Dodatkowo jak już wspomniano wcześniej chmury, mgła, opady nie mają znaczącego wpływu na mikrofałę, więc zdjęcia mogą być również wykonywane niezależnie od warunków pogodowych.

Powstało wiele misji zapewniających obrazowanie radarowe z poziomu kosmosu. Poniżej znajduje się opis misji obecnych, które w przyszłości mają wesprzeć misję Kopernik, polegających na systemach radarowych z aperturą syntetyczną. Misja Kopernik ma głównie opierać się na satelitach Sentinel, z których pierwszy został wystrzelony 3 kwietnia 2014 roku i już dostarczył pierwsze zobrazowania Ziemi.

Misja Kopernik jest jak do tej pory najbardziej ambitnym program obserwacji Ziemi. Zapewni to dokładne, aktualne i łatwo dostępne informacje, w celu poprawy zarządzania środowiskiem, zrozumienia i łagodzenia skutków zmian klimatu oraz zapewnienia bezpieczeństwa cywilnego. Copernicus to nowa nazwa dla Globalnego Monitoringu Środowiska i Bezpieczeństwa wcześniej znanego jako GMES.

ERS-2

Satelita został wprowadzony na rynek w roku 1995. ERS-2 zawiera czujnik z kanałem C, który został zaprojektowany do pracy w dwóch trybach. Tryb szerokiego pasma ma szerokość 100 km i rozdzielczość przestrzenną 26 m w poprzek toru i 6-30 m wzdłuż toru. Tryb fali zapewnia generowanie małych obrazów o wymiarach 5 × 5 km w odstępach 200 km wzdłuż całego toru.

Envisat/ASAR

Satelita został wprowadzony na rynek w 2002 roku. Był on największym satelitą służącym do obserwacji Ziemi jaki kiedykolwiek zbudowano. Zawierał w sobie 10 instrumentów pomiarowych, z których jednym był Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). ASAR został zaprojektowany do pracy w paśmie C i w czterech trybach: obraz, fala, szerokie pasmo oraz globalny monitoring. Rozdzielczość terenowa w pierwszych dwóch trybach miała wymiar około 30×30 m. W trybie szerokiego pasma wynosiła około 150×150 m, a w trybie globalnego monitoringu 1000×1000 m. Niestety 8 kwietnia 2012 roku stracono łączność z satelitą Envisat.

Cosmo-SkyMed

Misja włoskiego Cosmo-SkyMed jest konstelacją czterech satelitów, z których każdy wyposażony jest w czujnik pasma X. Czwarty satelita został wypuszczony w 2010 roku. Misja działa w trzech różnych trybach: StripMap, z pasmem o szerokości 3040 km i rozdzielczości terenowej między 3 a 15 m, ScanSar z pasmem o wymiarach $100 \times 100 \times 200 \times 200$ km oraz o rozdzielczości terenowej od 30×30 m do 100×100 m i Spotlight-2 z pasmem o wymiarach 10×10 km oraz rozdzielczości terenowej 1×1 m.

COSMO-SkyMed został przemyślany jako narzędzie podwójnego zastosowania, aby sprostać zarówno potrzebom cywilnym jak i obronnym. Usługi wynikające z Cosmo-SkyMed zawierają m.in. nadzór, inteligencję, ocenę szkód, zarządzanie ryzykiem dla zdarzeń takich jak powódzie, susze, pożary lasów, a także usługi dotyczące środowiska morskiego i przybrzeżnego.

Radarsat-2

Kanadyjski satelita Radarsat-2 został uruchomiony w 2007 roku i jest kontynuacją satelity Radarsat-1. Zaawansowany tryb obrazowania radarowego działający w paśmie C zapewnia powszechnie dostępne dane o wysokiej jakości mające wiele zastosowań. Może pracować w wielu trybach o rozdzielczości w zakresie od 3 do 100 m i szerokości pasma od 20 do 500 km.

TerraSAR-X

Niemiecki TerraSAR-X, który został uruchomiony w 2007, zawiera czujnik o wysokiej rozdzielczości w paśmie X. TerraSAR-X działa w trzech alternatywnych trybach: SpotLight dający 1 m rozdzielczość terenową dla obszaru o wymiarach 5×10 km, StripMap dający 3 m

rozdzielczość terenową dla powierzchni 30×50 km i ScanSAR dający 16 m rozdzielczość terenową dla powierzchni 100×150 km.

TanDEM-X

Niemiecki TanDEM-X został uruchomiony w 2010 roku i jest prawie identyczny jak TerraSAR-X. Dwa satelity latają w ściśle kontrolowanej formacji z odległością 250 a 500 m między nimi. Misja ma zapewnić spójne globalne numeryczne modele terenu z niespotykaną dokładnością (WWW.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

Sentinel-1

Misja Sentinel-1 ma opierać się na obrazowaniu radarowym w paśmie C. Jej głównym celem ma być zapewnienie danych bez względu na pogodę oraz porę dnia. Pierwszy satelita Sentinel-1 został wyniesiony na orbitę 3 kwietnia 2014 roku, a następny ma dołączyć do niego kilka lat później. Czujnik SAR ma działać w dwóch głównych trybach: w interferometrycznym szerokim paśmie i falowym. Pierwszy z nich ma obejmować 250 km, z rozdzielczością terenową 5×20 m. Te dwa tryby powinny zaspokoić większość planowanych wymagań serwisowych.

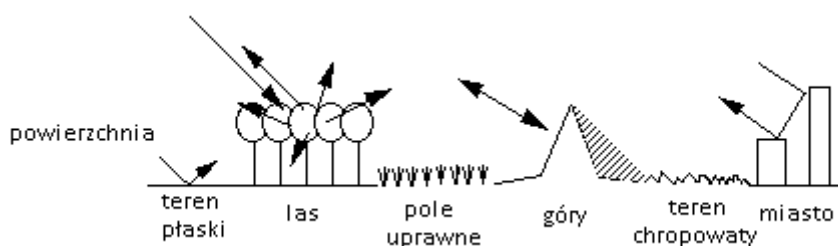
6. Zjawisko rozpraszania wstecznego

Treść cyfrowych obrazów radarowych jest reprezentowana przez piksele. Każdy piksel obrazu radarowego przedstawia szacunkową wartość promieniowania rozproszonego wstecz dla danego obszaru na ziemi. Ciemniejsze obszary obrazu reprezentują m.in. niski stopień rozproszenia, a jaśniejsze obszary wysoki. Jasne miejsca oznaczają, że duża część energii radaru została odbita z powrotem do radaru, podczas gdy ciemne miejsca oznaczają, że duża część energii wysłanej została pochłonięta przez cel (Rys.6.1).

Ilość promieniowania rozproszonego wstecz na obszarze docelowym przy określonej długości fali będzie się różnić w zależności od warunków takich jak fizyczny rozmiar rozpraszaczy w obszarze docelowym, właściwości elektryczne celu i wilgotność: bardziej wilgotne elementy zostają zobrazowane na jasno, a te suche na ciemno (wyjątkiem jest gładka masa wody, która zachowuje się jak płaska powierzchnia i odbija padające wiązki sygnałów. Na obrazie taka woda będzie ciemna). Różne rodzaje powierzchni inaczej reagują na padające wiązki sygnałów radarowych (Rys.6.2) (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

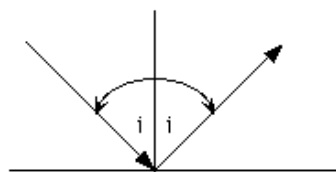


Rys.6.1 Radiometria na obrazie radarowym, czyli intensywność rozpraszania w zależności od rodzaju powierzchni: **tereny miejskie**, **las**, **spokojna woda**, **wzburzone morze**
(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

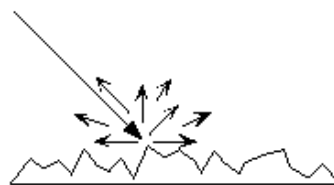


Rys.6.2 Rozpraszanie w zależności od rodzaju powierzchni
(źródło: earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR1-1-2.htm)

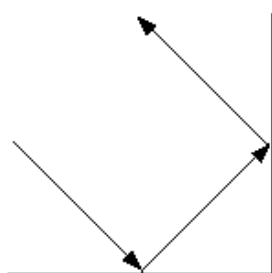
Kiedy fala elektromagnetyczna pada z góry na granicę dwóch pół-nieskończonych ośrodków, część fali padającej jest rozproszona z powrotem, a reszta jest przekazywana dalej do niżej położonej warstwy. W sytuacji gdy taki ośrodek jest jednorodny lub gdy promieniowanie wnika tylko niewiele w głąb powierzchni, wtedy mamy do czynienia z rozpraszaniem powierzchniowym, gdyż odbywa się ono tylko na granicy ośrodków. Naturalnymi powierzchniami, które działają jak takie właśnie rozpraszacze są: woda, gleba (z wyjątkiem bardzo suchej gleby, takiej jak piasek na pustyni) i mokry śnieg. Z drugiej strony, gdy dolna warstwa jest niejednorodna a głębokość penetracji z kolei wysoka, to część fali transmitowanej rozproszonej wstecz przez niejednorodności może przekroczyć granicę powierzchni aż do górnego nośnika. W takim przypadku rozpraszanie zachodzi w obrębie dolnego podłoża i jest traktowane jako rozpraszanie objętościowe. Poszycie roślinne i zbitki suchego śniegu są przykładem rozpraszaczy objętościowych (Rys.6.3) (ULABY, MOORE, FUNG, 1982).



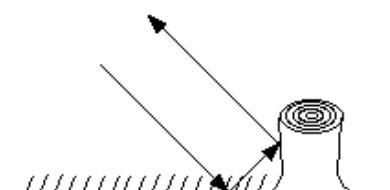
Rozpraszanie na gładkiej powierzchni
kąt padania 'i' jest równy
kątowni odbicia



Rozpraszanie na chropowatej powierzchni
różnica w wysokościach powierzchni jest
rzędu długości fali padającego impulsu

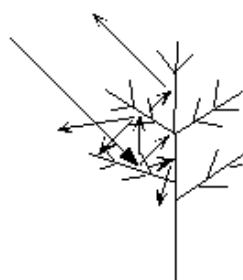


Podwójne odbicie
(reflektor narożny)

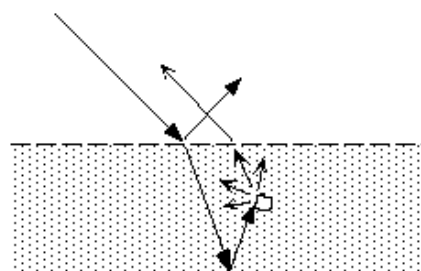


Podwójne odbicie

jedyne możliwe występowanie w naturze
- odbicie od dwóch gładkich powierzchni:
trawy i pnia po świeżo ściętym drzewie



Rozpraszanie objętościowe
przykład rozpraszania: drzewo



Rozpraszanie objętościowe

W tym przykładzie padające promieniowanie jest odbite jak i załamane/przekazywane dalej w głąb warstwy suchego śniegu. To promieniowanie następnie odbija się od leżącego pod spodem lodu, rozprasza wstecz od kawałków lodu zawartych w śniegu, a wreszcie powraca w stronę odbiornika.

Rys.6.3 Rodzaje rozpraszania

(źródło: earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR1-1-2.htm)

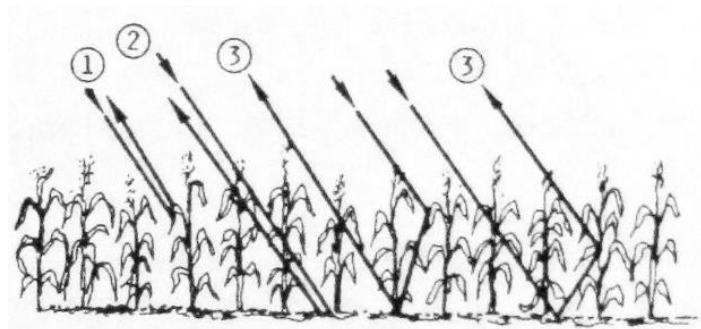
Oba rodzaje rozpraszania zwykle są obecne w tym pochodzącym z terenu. Jednakże jest to wygodne, aby pominąć jeden z nich, za każdym razem gdy jest to praktyczne. Na przykład w zakresie mikrofalowym morze ma dużą stałą dielektryczną i jest traktowane jako jednorodny ośrodek zdolny jedynie do rozpraszania powierzchniowego. W zakresie widzialnym z kolei stała dielektryczna wody morskiej jest znacznie mniejsza, a cząsteczki pyłu w wodzie mogą sprawić, że rozpraszanie objętościowe staje się ważne.

Promieniowanie padające na szorstką powierzchnię jest częściowo absorbowane przez ośrodek powierzchniowy a częściowo rozproszone jak odbite od lustra lub w formie zawiesiny rozproszonej we wszystkich kierunkach. Im bardziej chropowata jest powierzchnia, tym większa część promieniowania zostanie rozproszona we wszystkich kierunkach. Również im większa różnica właściwości ośrodka powietrznego i terenowego, tym jest silniejsze promieniowanie rozproszone w porównaniu z promieniowaniem docierającym do powierzchni nośnika.

W naturze różne materiały są niejednorodne, chociaż niektóre z nich mogą być traktowane tak, jakby były jednorodne dla danej częstotliwości, kąta padania, lub stanu ośrodka. Niejednorodności (np. liście, gałązki, poszycie roślinne, płatki suchego śniegu, pęcherzyki powietrza w lodzie) mogą wywołać fale, które rozprowadzają część padającej energii we wszystkich kierunkach (ULABY, MOORE, FUNG, 1982).

6.1 Roślinność

Poszycie roślinne jest rozpraszaczem objętościowym. Jednak zadaszenie utworzone z roślin jest często niecałkowicie zamknięte i część docierającego promieniowania przenika w głąb warstwy roślinności. Dlatego też rozpraszanie powierzchniowe należy również rozważyć pod względem gleby, z której wyrasta roślinność. W ten sposób wyróżnia się trzy główne składowe tego typu rozpraszania: bezpośrednie pochodzące od roślin, bezpośrednie pochodzące od gleby (zawiera podwójne osłabienie przez mijane po drodze rośliny) oraz mieszane (wiązka odbija się zarówno od gleby jak i od roślin) (Rys.6.4) (ULABY, MOORE, FUNG, 1986).



Rys.6.4 Rozpraszanie w przypadku roślinności, 1 - bezpośrednie od roślin, 2 - bezpośrednie od gleby, 3 - mieszane (źródło: WAGNER, s. 138)

6.2 Czynniki wpływające na rozpraszanie wsteczne wiązki radaru

6.2.1 Wpływ częstotliwości

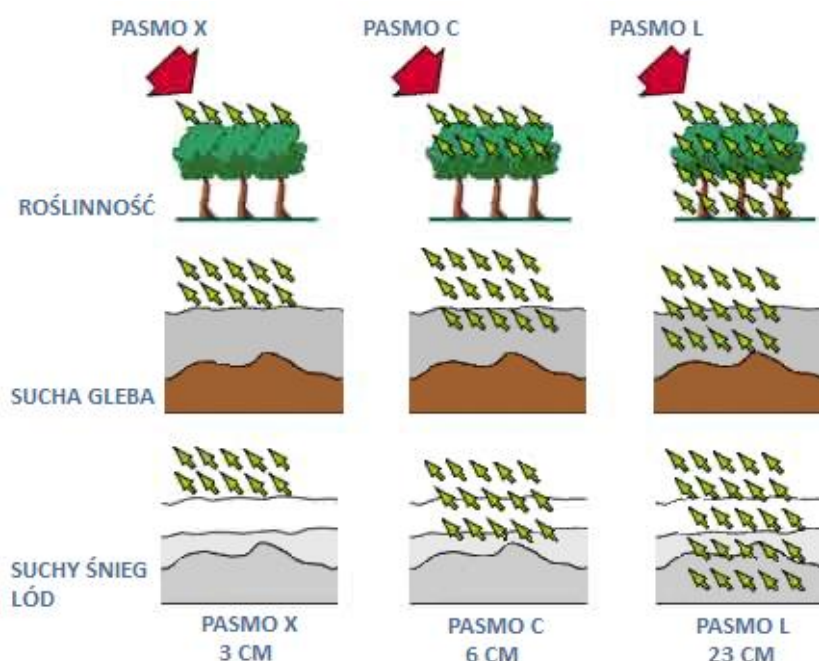
Częstotliwość padającego promieniowania określa:

- głębokość penetracji fal dla obrazowanego obiektu,
- względną szorstkość rozważanej powierzchni.

Głębokość penetracji zazwyczaj tym dłuższa, im dłuższe są padające fale. Jeśli weźmie się pod uwagę las jako przykład, to padające promieniowanie będzie penetrować tylko wierzchnią warstwę liści na szczycie drzewa w przypadku korzystania z pasma X ($\lambda = 3$ cm). Zawartość informacji o obrazie jest powiązana jedynie z warstwą górną i koroną drzew. Z drugiej strony w przypadku użycia pasma L ($\lambda = 23$ cm), promieniowanie spenetruje liście oraz małe gałązki, a co za tym idzie zawartość informacji o obrazie będzie powiązana z gałęziami oraz ewentualnie z pniami drzew.

To samo zjawisko ma zastosowanie na różnych typach powierzchni. (Rys.6.5) Jednak oczywiście należy przypomnieć, że:

- głębokość penetracji jest również związana z wilgocą obrazowanych obiektów
- mikrofałe nie penetrują wody więcej niż na kilka milimetrów (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).



Rys.6.5 Rozpraszanie w zależności od długości fali

(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

6.2.2 Wpływ polaryzacji

Polaryzacja określa orientację wektora pola elektrycznego fali elektromagnetycznej. Radary obrazujące mogą mieć różne konfiguracje polaryzacji, jednak najpowszechniej stosowane są konfiguracje: HH, VV, HV, VH. Pierwsza składowa tych kombinacji odnosi się do polaryzacji wyemitowanego promieniowania, druga składowa z kolei do tego odebranego, tak że np. X_{HV} odnosi się do pasma X, dla fali nadanej o polaryzacji H a odebranej V.

W pewnych szczególnych przypadkach, polaryzacja może dostarczyć informacji na temat różnych warstw obiektu, np. zalanej roślinności. Głębokość wnikania fali radaru zależy od wybranej polaryzacji (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

6.2.3 Wpływ szorstkości

Szorstkość jest pojęciem względnym zależnym od długości fali i kąta padania wiązki. Powierzchnia jest uważana za szorstką, jeżeli jej struktura ma wymiary porównywalne do długości fali padającej wiązki. Zgodnie z kryterium Rayleigha, powierzchnia jest uważana za gładką jeżeli (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014):

$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

a za szorstką w przypadku gdy:

$$h > \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

gdzie: h - średnia deniwelacja terenu
 λ - długość fali
 θ - kąt padania wiązki

Przykład wpływu chropowatości powierzchni można zaobserwować w strefach styku ziemi i wody. Wody śródlądowe wydają się być stosunkowo gładkie, gdyż większość energii odbija się w inne strony, a tylko niewielka część rozpraszania wraca w kierunku radaru. Wręcz przeciwnie na obrazie wygląda powierzchnia ziemi, która ma zwykle większą chropowatość.

Zbiorniki wodne generalnie mają ciemną tonację na obrazach radarowych, z wyjątkiem sytuacji wietrznych lub gdy jakiś prąd zwiększa chropowatość powierzchni wody. Takie sytuacje zwiększają stopień rozpraszania wstecznego.

W obszarze działalności mikrofalowej, różnica pomiędzy konkretnymi właściwościami ziemi i wody może być bardzo przydatna dla takich sytuacji jak: pomiar zasięgu powodzi lub erozji strefy wybrzeża (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

6.2.4 Wpływ wilgotności

Złożona stała dielektryczna jest miarą elektrycznych właściwości materiałów powierzchniowych. Składa się ona z dwóch części (przenikalności i przewodności), które są wysoce zależne od zawartości wody w rozważanej powierzchni.

W zakresie mikrofalowym, większość naturalnych materiałów ma stałą dielektryczną między 3 a 8 w suchych warunkach. Woda ma wysoką stałą dielektryczną (80), co najmniej 10 razy większą niż w przypadku suchej gleby.

W wyniku tego, zmiany w wilgotności ogólnie wywołują znaczącą zmianę właściwości dielektrycznych materiałów naturalnych. Wzrost wilgotności powoduje zwiększenie się współczynnika odbicia wiązki radaru. Głębokość penetracji falami elektromagnetycznymi obiektu jest funkcją odwrotną do zawartości wody w badanej powierzchni (EARTH.ESA.INT, odczyt z dn. 11.01.2014).

7. Szum cętkowy

Łatwym do zaobserwowania na obrazach powierzchni oświetlonych wysoko koherentną wiązką lasera CW (ang. *continuous wave* - fala ciągła) jest to, że nabywają one specyficzny ziarnisty wygląd. Ten nadzwyczaj skomplikowany wzór nie ma żadnego oczywistego związku z właściwościami makroskopowymi oświetlanej powierzchni. Wydaje się dość chaotyczny i nieuporządkowany, a najlepszym sposobem opisu ilościowego są metody prawdopodobieństwa i statystyki.

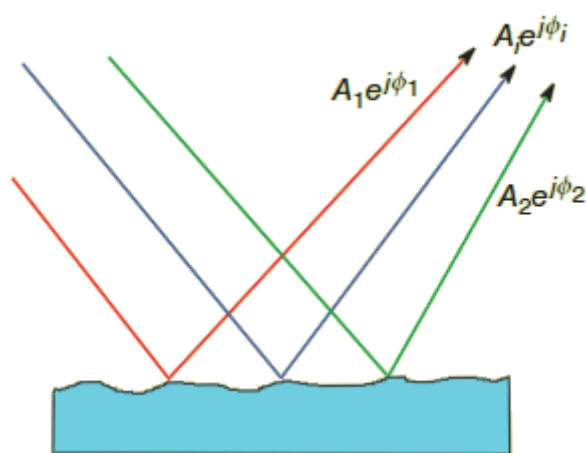
Źródło takiej ziarnistości zostało szybko rozpoznane przez wczesnych badaczy dziedziny laserowej. Zdecydowana większość powierzchni, syntetycznych czy naturalnych, jest bardzo chropowata według skali długości fal optycznych. Po oświetleniu takiej powierzchni światłem spójnym, fala odbita od niej jest składową kilku niezależnych obszarów rozpraszania. Propagacja odbitej wiązki do odległego punktu obserwacji powoduje dodanie tych różnych czynników rozpraszania do względnych opóźnień, które mogą wahać się od kilku do wielu długości fal, w zależności od powierzchni mikroskopowej i geometrii. Interferencja tych koherentnych fal o różnych fazach powoduje właśnie ten ziarnisty wzór, który określa się mianem „cętek”. Należy zauważyć, że jeśli punkt obserwacji zostanie przeniesiony, to długości dróg przebytych przez rozproszone wstecz wiązki ulegną zmianie. W ten sposób niezależna,

nowa wartość intensywności może wynikać z procesu interferencji. Zatem cętkowa struktura składa się z wielu jasnych punktów, w których interferencja miała charakter konstruktywny, z ciemnych punktów, wynikających z interferencji destrukcyjnej oraz z poziomów natężenia napromienienia pomiędzy wspomnianymi skrajnościami (GOODMAN, 1976).

Według wielu osób największym mankamentem obrazowań radarowych są właśnie cętki - ziarnisty szum nieodłączny we wszystkich aktywnych koherentnych systemach obrazujących, który wizualnie degraduje wygląd obrazowań. Cętki mogą poważnie obniżyć jakość wykonywania automatycznych analiz sceny oraz technik ekstrakcji informacji, jak również są niepożądane w aplikacjach wymagających wielokrotnych obserwacji, np. w przypadku automatycznej detekcji zmian w czasie. Dlatego tak wielu użytkowników stosuje różnego rodzaju filtracje. Algorytmów odszumiających powstało bardzo wiele, ponieważ proces redukcji cętek powinien zachodzić tak, aby jak najmniej informacji z obrazu zostało rozmytych czy utraconych (obiekty punktowe, liniowe, tekstury).

SAR jako system aktywny zbiera dane poprzez wysyłanie wytworzonego promieniowania i przechwycenie wracających sygnałów rozproszonych wstecz od celów naziemnych. Jeśli założyć, że w obrębie jednego piksela znajdzie się więcej niż jeden rozpraszacz i żaden z nich nie odbije mocniej padającego promieniowania, to wiązka wracająca będzie niekoherentną sumą tych kilku odbitych fal (Rys.7.1) (ARGENTI i in., 2013):

$$Ae^{j\Phi} = \sum_i A_i e^{j\Phi_i} \quad (4)$$



Rys.7.1 Model rozpraszania wyjaśniający powstawanie cętek
(źródło: ARGENTI i in., s.8)

Amplitudy A_i i fazy Φ_i są rezultatem kilku czynników, m.in. tłumienia propagacji, rozpraszania wstecznego oświetlanych celów, kierunkowości anteny. W obrębie piksela nie da

się jednak rozważyć wpływu każdego czynnika z osobna. Dlatego też zaczęto tworzyć różne modele cętek, które miałyby pomóc w lepszym zrozumieniu całego zjawiska. Jeden z nich bazuje na równaniach Maxwella uwzględniając w nich geometrię propagacji i ośrodek rozpraszający. W tej metodzie sposób w jaki każda ścieżka propagacji interferuje, daje podstawowe informacje o obserwowanej scenie. Z drugiej strony, jeśli rozważy się to, że fazy każdej ścieżki są wysoce różne i mogą sumować się w sposób zarówno destruktywny jak i konstruktywny, to wtedy amplituda odebranego sygnału zmienia się losowo. To pokazuje, że jeśli nawet oświetlana scena jest jednolita, to i tak na obrazie będzie wyglądała na zaszumioną. Dla oceny wizualnej i konkretnych aplikacji dotyczących wizualnego zbierania informacji, jak na przykład mapowanie czy segmentacja, takie wysokie zróżnicowanie natury sygnału może być uznane jako zakłócenie i najczęściej jest określane mianem „szumu cętkowego” (ARGENTI i in., 2013).

Wszystkie czujniki z koherentnym promieniowaniem, w tym systemy triangulacji laserowej, mają problem cętkowy, jeśli powierzchnia badana jest optycznie szorstka (DRESEL i in., 1992).

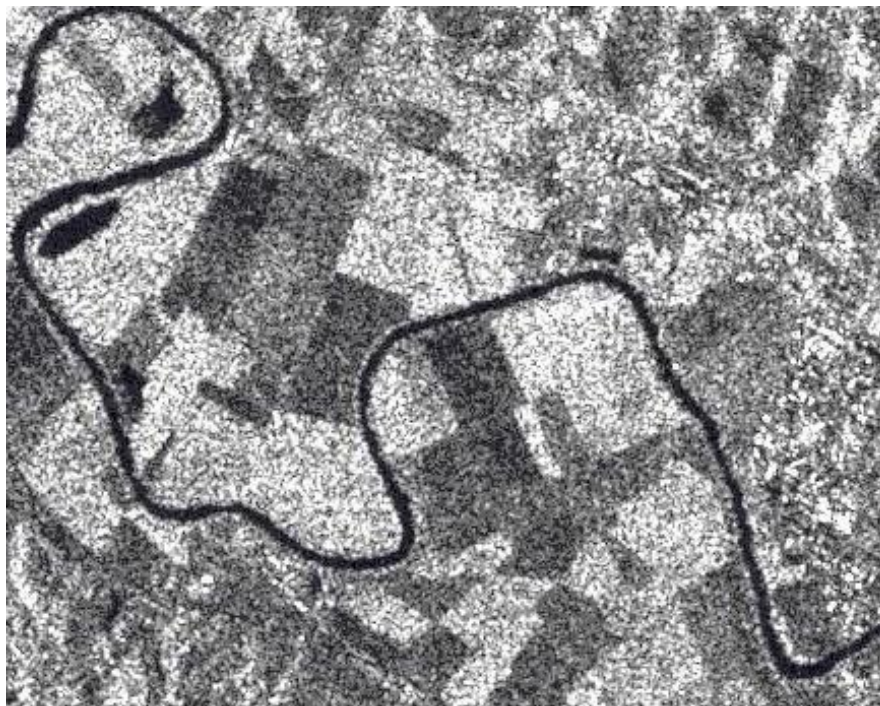
Cętki radarowe powstają wskutek koherentnego rozpraszania pewnej liczby przypadkowych rozpraszaczy w każdym pikselu. Fale emitowane przez aktywne czujniki poruszają się w zgodnej fazie i minimalnie reagują między sobą na drodze do obszaru docelowego. Po interakcji z obiektami na powierzchni, fale te nie są już w zgodnej fazie. Po utraceniu tej zgodności echa radarowe interferują albo konstruktywnie, albo destruktywnie tworząc jasne i ciemne piksele znane jako cętki. Wiadomo, że cętki radarowe są mnożne (XIA, SHENG, 1996):

$$R_{ij} = R0_{ij} \cdot SP_{ij} \quad (5)$$

gdzie ij to numery wiersza i kolumny, R_{ij} jest zarejestrowaną wartością sygnału powrotnego, $R0_{ij}$ jest wartością prawdziwą bez koherentnej interferencji, a SP_{ij} to współczynnik cętkowy (XIA, SHENG, 1996).

Szczegółowa analiza obrazu radarowego pokazuje, że nawet w przypadku jednego rodzaju nawierzchni, zazwyczaj występują istotne różnice poziomu szarości pomiędzy sąsiadującymi zbitkami pikseli. Różnice te tworzą ziarnistą teksturę, charakterystyczną dla obrazów radarowych. Efekt wyglądający jak „sól i pieprz” to właśnie szum cętkowy (Rys.7.2).

Z powodu cętek widać, szczególnie na jednorodnych obszarach reprezentujących pola, dużą zmienność rozpraszania odbitego. Powoduje to ziarnisty obraz, co często czyni go trudnym do interpretacji głównych cech powierzchni zobrazowanych przez SAR.



Rys.7.2 Fragment sceny z 21.04.1994 r. pokazujący dolinę Tybru w centralnej części Włoch
(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

7.1 Szum cętkowy

Istnieje mnóstwo publikacji naukowych na temat zjawiska cętek na obrazach radarowych (m. in. LEE i in. 1999; NOVAK, BURL 1990; SAAD 1996; BOUCHEMAKH i in., 2008; RUSSEL, GONZELO, 1991; CHEN, KASILINGAM, 1999; CHENG, TIAN, 2009; DONG i in., 1997). Można zauważyć, że w większości przypadków dotyczą one ich filtracji. Cętki w takich artykułach są uznawane za szum, który należy usunąć z obrazu w celu uzyskania jednolitych tekstur przy jednoczesnym zachowaniu drobnych detali obrazu. Powstało bardzo dużo algorytmów filtracji, a każdy z nich ma swoje wady i zalety.

Dla radarów polarymetrycznych stosuje się np. filtr *boxcar*, który polega na obliczeniu dla każdego piksela średnią wartość dla okna filtrującego wyśrodkowanego na danym pikselu. Z kolei podejście Lee kładzie nacisk na zachowanie właściwości polarymetrycznych i statystycznej korelacji pomiędzy kanałami. Nie wprowadza zakłóceń i nie powoduje znacznej degradacji jakości obrazu (Rys.7.3) (LEE i in., 1999). Filtr Lee jest filtrem adaptacyjnym

działającym na podstawie kryterium najmniejszego błędu średniokwadratowego (MMSE) oraz na obliczeniach parametrów statystycznych obrazu. Cętki w podejściu Lee uważa się za szum mnożnikowy, statystycznie niezależny od obrazowanej sceny (NOVAK, BURL 1990). W celu zastosowania filtru Lee lub *boxcar*, należy skorzystać z macierzy $[S]$ danego ośrodka rozpraszającego wstecz dla czterech kombinacji polaryzacji (LEE i in., 1999):

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (6)$$

W przypadku, gdy $S_{vh} = S_{hv}$ zamiast macierzy $[S]$ można zastosować wektor $\vec{K}$ (LEE i in., 1999):

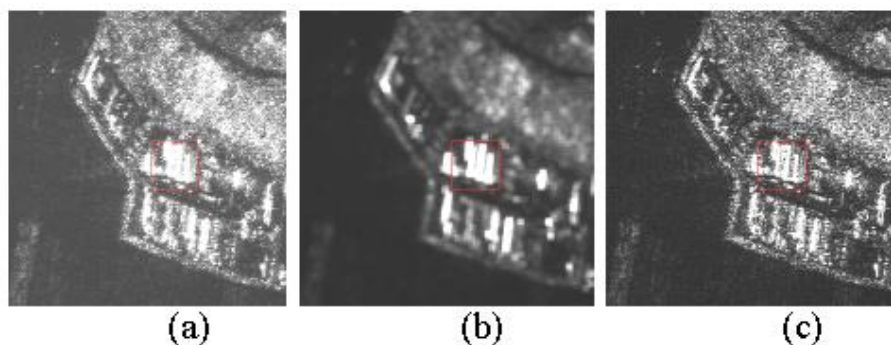
$$\vec{K} = [S_{hh}, \sqrt{2}S_{hv}, S_{vv}]^T \quad (7)$$

Drugą potrzebną wartością jest rozpiętość (ang. *span*), którą oblicza się z elementów przekątnej macierzy kowariancji (LEE i in., 1999):

$$span = |S_{hh}|^2 + 2|S_{hv}|^2 + |S_{vv}|^2 \quad (8)$$

Aby zachować właściwości polarymetryczne, cele punktowe i ostrość krawędzi, filtr Lee powinien być stosowany na jednorodnych obszarach z wybranych sąsiadujących ze sobą pikseli. W celu określenia parametrów filtracji (współczynnik filtracji b oraz okno wyboru), najpierw należy obliczyć wektor $\vec{K}$, a następnie z macierzy kowariancji wyliczyć wartość *span*. Ta wartość daje obraz rozpiętości średniej intensywności dla kanałów HH, HV i VV a co za tym idzie zawiera ona niższy poziom cętek niż każdy z obrazów HH, HV i VV indywidualnie.

Najlepszy efekt filtru Lee można osiągnąć stosując okno o rozmiarze 7x7 pikseli. Większy rozmiar może bardziej wygładzić cętki, jednak może również spowodować usunięcie mniejszych detali z obrazu. Mniejsze okno z kolei może być stosowane jeżeli wymagane jest zachowanie tekstury obiektów. Różne podejścia w obrębie tego filtru, Lee przedstawił w swojej publikacji (LEE, 1999).



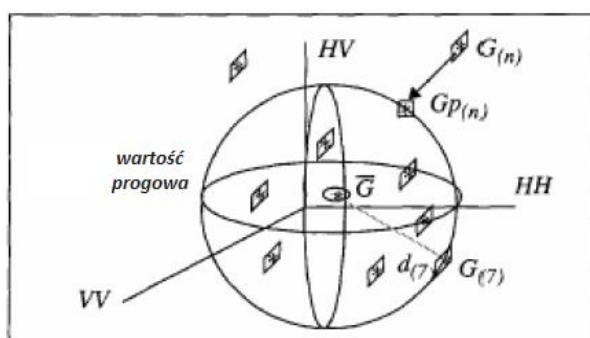
Rys.7.3 Fragment obrazu: a) oryginalnego, b) po filtracji *boxcar*, c) po filtracji Lee
(źródło: BOUCHEMAKH i in., s. 5)

Polarymetryczny filtr wybielający (PWF z ang. *Polarimetric Whitening Filter*) został zaproponowany przez Novaka w 1990 r. i ulepszony przez Belhadj w 1995 r. Filtr ten wykorzystuje trzy złożenia polarymetryczne tego samego obrazu (HH, HV, VV). Głównym założeniem jest to, że obraz VH (czy HV) nie jest skorelowany z obrazami HH i VV. Wektor $\vec{G}$ utworzony z trzech złożów polarymetrycznych HH, HV i VV jest poddawany obliczeniom macierzowym szerzej opisanym w dostępnej literaturze (SAAD, 1996).

Inny filtr zaproponowany przez Russela charakteryzuje się ustalonym progiem (FT z ang. *Fixed Threshold*). Podstawą jest wybór wartości progu ufności, który jest hipersferą będącą trójwymiarową reprezentacją trzech polaryzacji obrazu: HH, HV, VV (Rys.7.4). Odległości ($D_0, \dots, d_{n-1}$) z różnych wektorów ($G_0, \dots, G_{n-1}$) oblicza się w stosunku do środka ciężkości G związanego z oknem filtra (W_{ij}) przy pomocy odległości euklidesowej (SAAD, 1996). Wektory następnie zostają uporządkowane w porządku rosnącym, zgodnie z ich odległościami w stosunku do środka ciężkości G . Wartość progowa $k \in \{0, \dots, n-1\}$ (gdzie n to liczba wszystkich pikseli w oknie filtra) zostaje wybrana tak, by wektory poniżej tej wartości nie były zakłócone. Wszystkie takie wektory przedstawić można w poniższej formie (RUSSEL, GONZELO, 1991):

$$W_k[n] = \{G_{(0)}, \dots, G_{(k)}, \dots, G_{(n-1)}\} \quad (9)$$

Wektory, które spełniają powyższe założenie pozostaną na obrazie bez zmian, a te z zewnątrz (zaszumione) zostaną zastąpione swoimi projekcjami radialnymi na granicy hipersfery.



Rys.7.4 Hipersfera dla $n=9$ i $k=7$; $Gp_{(n)}$ jest projekcją $G_{(n)}$ (źródło: BOUCHEMAKH i in., s. 3)

Parametr k pozwala określić wielkość hipersfery w celu określenia selektywności filtra. Jeżeli wartość k jest duża, bardzo mało pikseli zostanie zastąpiona przez działanie filtra, co oznacza zachowanie więcej detali obrazu. Konieczne jest zatem określenie takiej wartości progowej, aby filtracja zachodziła na odpowiednim poziomie z jednoczesnym zachowaniem szczegółów bez pogarszania jakości zebranych danych (RUSSEL, GONZELO, 1991).

Niektóre filtry implementuje się w oprogramowaniach teledetekcyjnych. W programie ERDAS IMAGINE można wybrać najlepszą dla siebie metodę usuwania szumu spośród kilku różnych filtrów. Podstawą każdego z nich jest ruchome okno o wymiarach $k \times k$. Filtruje ono zmiany intensywności centralnego piksela w zależności od intensywności wszystkich pikseli wewnątrz okna. Używa się różnych kształtów i rozmiarów okna w celu uzyskania jak najlepszych efektów

1. Filtr uśredniający - cętki radarowe traktowane są jako składniki obrazu radarowego o wysokiej częstotliwości przestrzennej. Filtr uśredniający jest powszechnie stosowanym filtrem dolnoprzepustowym, który w tym przypadku może mieć zastosowanie w tłumieniu szumu cętkowego.

2. Filtr medianowy - piksele o niskiej i wysokiej wartości traktowane są odpowiednio jako cętki destruktywne i konstruktywne. Użycie tego filtra powoduje redukcję rozmiaru zróżnicowania między wartościami pikseli.

3. Filtr Lee-Sigma - bazujący na rozkładzie normalnym Gaussa filtr uśrednia tylko te piksele, które mieszczą się w zakresie $m \cdot \sigma$ (np. wynosi 95,5% dla $m = 2$), według poniższych założeń (XIA, SHENG, 1996):

$$\hat{R}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i}, \text{ gdzie } \delta_i = \begin{cases} 1, & \text{jeśli } R_i \in (R_i - m \cdot \sigma, R_i + m \cdot \sigma) \\ 0, & \text{w innym przypadku} \end{cases} \quad (10)$$

4. Filtr lokalny (LR - *Local Region*) - dzieli ruchome okno na osiem części ze względu na położenie kątowe. Algorytm porównuje wartości wariancji w regionach okalających piksel ze środkowej części okna. Następnie wartość piksela jest wymieniana na średnią ze wszystkich wartości położonych w regionie o najniższej wariancji.

5. Filtr Lee (ten wspomniany wcześniej dotyczył radarów polarymetrycznych) - bazuje na mnożnikowym modelu szumu cętkowego, w którym średnia początkowa i wariancja są obliczane następująco (XIA, SHENG, 1996):

$$\bar{R}_0 = \bar{R}, \quad Var(R_0) = \frac{Var(R) + \bar{R}^2}{\sigma^2 + 1} - \bar{R}_0^2 \quad (11)$$

Estymator dla R_0 uzyskuje się poprzez minimalizację średniego błędu kwadratowego lub ważonej estymacji najmniejszych kwadratów (XIA, SHENG, 1996):

$$R_0 = \bar{R} + k \cdot (R - \bar{R}), \text{ gdzie } k = \frac{Var(R)}{\bar{R}^2 \sigma^2 + Var(R)} \quad (12)$$

6. Filtr Frosta - podobnie jak w filtrze Lee - jest oparty na lokalnych statystykach i modelu mnożnikowym. Różni się tym, że współczynnik odbicia sceny jest estymowany

poprzez powiązanie ze sobą obserwowanego obrazu z odpowiadającym sygnałem systemu SAR. W ten sposób filtr ma mniejsze działanie uśredniające na obszarach z krawędziami w celu ich zachowania.

7. Filtr MAP (*Maximum a Posteriori*) - jest adaptacyjnym filtrem cętek. Ma on tendencję do maksymalizacji prawdopodobieństwa a posteriori wystąpienia oryginalnego sygnału z sygnału zaszumionego. Filtr MAP zakłada, że sygnał oryginalny ma rozkład Gaussa (XIA, SHENG, 1996).

Autorzy coraz to nowych algorytmów starają się podejść do zagadnienia z różnych stron. Kolejny filtr potrafi rozpoznawać różne regiony na obrazie, co pozwala na pewnego rodzaju klasyfikację. Cętki są następnie zastępowane przez uśrednienie wartości piksela w obrębie utworzonej klasy. Takie podejście eliminuje efekt nadmiernego wygładzania krawędzi i w tym względzie działa lepiej niż filtry lokalnych statystyk (CHEN, KASILINGAM, 1999).

Również filtr oparty na rozmytej logice (ang. *fuzzy logic*) stawia na zachowanie istniejących krawędzi. Filtracja zachodzi dwuetapowo. Najpierw oblicza się tzw. krawędzie rozmyte dla każdego piksela w danym oknie filtrującym, tzn. sprawdza się wartość, która wyraża stopień zróżnicowania między sąsiadującymi pikselami. Służy do tego prosty opis numeryczny możliwych krawędzi dla okna filtrującego 3x3. Drugi etap polega na wykorzystaniu tych wartości do zważowania wkładu sąsiadujących pikseli w faktyczne istnienie krawędzi a następnie wyliczenie wartości zamiennych dla pikseli, które filtr ocenia jako niewchodzące w skład krawędzi. W celu zwiększenia skuteczności filtr można stosować iteracyjnie (CHENG, TIAN, 2009).

Innym podejściem w filtrowaniu obrazu jest prosta technika polegająca na czasowym uśrednianiu. Ma tę przewagę do wcześniej wspomnianych metod, że redukcja cętek następuje bez utraty rozdzielczości przestrzennej. Sama technika nie nadaje się do badań, które należy wykonać dosyć szybko, gdyż uzyskanie tej samej sceny z kilku terminów obrazowania, najlepiej zbytnio nie odbiegających od siebie, zazwyczaj nie jest sprawą łatwą. Ponadto, o czym wspomniano już wcześniej, krajobraz się zmienia, powstają nowe budowle, dlatego też daty pozyskiwania obrazów radarowych używanych w tej technice nie powinny odbiegać od siebie więcej niż o rok w celu uniknięcia niezgodności w pokryciu terenu. Technika czasowego uśredniania wydaje się być odpowiednia dla badań długofalowych, w których można zaplanować pozyskiwanie pożądanych scen obrazów radarowych.



Rys.7.5 Fragment sceny z Flevoland (Holandia)

(źródło: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/)

Na Rys.7.5 widać efekt tej właśnie metody. Z lewej strony obserwator ma do czynienia z obrazem z satelity ERS zrobionym 23 maja 1993 roku. Po prawej stronie z kolei znajduje się obraz uśredniony składający się z 11 nałożonych scen SAR z tego samego roku (po jednym z każdego miesiąca z wyjątkiem lipca). W rezultacie, pola stają się bardziej jednorodne i ich granice są lepiej zdefiniowane. Technika powoduje dobre odszumienie obrazu, co znacznie ułatwia jego interpretację.

Złagodzenie szumu cętkowego można również uzyskać stosując rekurencyjne transformaty falkowe (DONG i in., 1997), ale ogólnie rodzajów filtrów i ich wariacji do tej pory powstało mnóstwo. Amator filtrów na zobrazowaniach SAR powinien sięgnąć do artykułu „*A Tutorial on Speckle Reduction In Synthetetic Aperture Radar Images*”, w którym autor dzieli metody filtracji na podejścia Bayesa w zakresie przestrzennym (m.in. Lee, Frosta, MAP) oraz te w zakresie transformacji (np. korzystanie z transformat falkowych) i podejścia nie odnoszące się do statystyki (np. filtry morfologiczne). Dodatkowo opisuje również inne filtry niepodlegające powyższej klasyfikacji (LMMSE, Probabilistic Patch-Based, SAR Block Matching 3D) (ARGENTI i in., 2013).

Istnieje również możliwość użycia filtrów z dziedziny morfologii matematycznej opierających się na zastosowaniu naprzemiennie operacji domknięcia i otwarcia, które usuwają z obrazu małe obiekty o wysokich lub niskich wartościach pikseli. Takie filtry zwykle nazywane filtrami naprzemiennymi różnią się od siebie typami zastosowanych operacji otwarcia i domknięcia. Najczęściej stosuje się filtry podstawowe OC (*opening - closing*) lub

CO (*closing - opening*) oraz bardziej złożony filtr z wielokrotnym elementem strukturującym (ang. *multi structuring element* - MSE). Filtr MSE pozwala na usunięcie drobnych elementów, zachowując przy tym krawędzie i obiekty liniowe na obrazie (KUPIDURA, KOZA, 2008). W badaniu Kupidury i Jakubiak (2009) pokazano, że morfologia matematyczna ma znaczący wpływ na poprawę jakości filtrowanego obrazu. Zaznaczono jednak, że wyniki filtracji są zależne od prawidłowego rozpoznania rodzaju szumu oraz wyboru odpowiedniego rodzaju filtra.

Podczas wykonywania badania, któremu poświęcona jest dalsza część pracy, do filtracji cętek z obrazu SAR użyto filtra MSE z dziedziny morfologii matematycznej opisanego szerzej w rozdziale 9.3.

7.2 Cętki jako źródło informacji

Biorąc jednak pod uwagę przyczynę z jakiej powstają cętki, niektórzy naukowcy postanowili ich nie usuwać, a przynajmniej nie traktować tylko jako szum. Wykorzystano cętki np. do rozróżnienia podstawowych klas pokrycia terenu takich jak woda, gleba odkryta, las i tereny zurbanizowane. Dla tego celu określono charakterystyki cętek dla tych klas pokrycia poprzez nienadzorowaną analizę wykresów punktowych i znormalizowanych histogramów lokalnego współczynnika zmienności. Następnie połączono informacje lokalnego zachowania cętek z lokalną intensywnością rozpraszania wstecznego. Rezultaty takiego działania pokazują, że analiza nienadzorowana cętek dostarcza wartościowych informacji dla rozróżnienia wcześniej wymienionych klas pokrycia terenu (ESCH i in., 2011).

Obecność cętek w obrazie zmniejsza wykrywalność celów naziemnych, zasłania tekstury obiektów powierzchniowych i zmniejsza dokładność automatycznej klasyfikacji obrazu. W cyfrowym przetwarzaniu obrazu oraz jego interpretacji, cętki radarowe zostały umownie uznane za szum.

Jednakże, z fizycznego punktu widzenia, cętki są wynikiem interakcji pomiędzy rozpraszaczami wewnątrz piksela na poziomie subpikselowym. Dlatego też wzór cętkowy powinien odzwierciedlać warunki na powierzchni Ziemi. Patrząc z tej perspektywy można stwierdzić, że cętki mogą zawierać również pewną ilość znaczących informacji o celach naziemnych. Jak dotąd jednak, bardzo niewiele wiadomo na temat rodzaju i ilości informacji, które mogą być pozyskiwane z analizy cętek.

W celu analizy wzoru, cętkowane piksele muszą być odróżnione od tych normalnych pikseli. Cętki radarowe mają pewną właściwość ułatwiającą to odróżnienie - reprezentujące je piksele dość mocno różnią się od pikseli sąsiednich, mają mianowicie znacznie wyższą lub znacznie niższą wartość jasności (XIA, SHENG, 1996).

8. Klasyfikacja pokrycia terenu

Klasyfikacja jest to podział obrazu na określone obszary (klasy), przy zastosowaniu określonych kryteriów diagnostycznych (klasyfikatorów). Sokal (1974) określa klasyfikację jako układanie lub porządkowanie obiektów do grup lub zestawów na podstawie ich relacji. Klasyfikacja wymaga zdefiniowania jasnych, precyzyjnych granic klas na podstawie odpowiednich kryteriów.

Przed użyciem danych satelitarnych do tworzenia map pokrycia terenu, należy zdefiniować klasy pokrycia terenu, które chce się wydzielić ze zdjęć. Są to po prostu typy terenu, które operator stara się wydzielić na podstawie posiadanych danych. Mogą one się znacznie różnić na różnych mapach. Dla map powodziowych, można wydzielić na przykład tylko dwie klasy - teren zalany i niezalany, podczas gdy typowa globalna mapa pokrycia terenu może mieć ich o wiele więcej, m.in. zamknięte tereny krzewiaste, sawanny, wiecznie zielone lasy iglaste, obszary miejskie i regiony lodowe/śniegowe. W pikselowym podejściu klasyfikacji jedynym z wymogów dla wydzielania klas pokrycia terenu jest to, że muszą się wyraźnie różnić w zakresie spektralnym tak, aby czujnik satelity mógł to zarejestrować. Istnieją jednak również podejścia polegające na zróżnicowaniu teksturalnym, kształtach obiektów i informacjach o sąsiedztwie.

Ogólna mapa pokrycia terenu jest podstawowym założeniem projektu Corine Land Cover. Celem projektu jest dokumentowanie zmian w pokryciu terenu, jak również gromadzenie i aktualizacja porównywalnych danych w Europie (CLC.GIOS.GOV.PL odczyt z dn. 13.07.2014). Innym podstawowym rodzajem mapy pokrycia terenu jest mapa roślinności. Pokazuje ona rozkład ogólnych typów roślinności na dużych obszarach ziemi i zazwyczaj zawiera ponad tuzin kategorii, które obejmują m.in. las liściasty, las iglasty, pole, krzewy pustynne. Aby określić jaki typ roślinności występuje w danym regionie, badacze

używają obrazów satelitarnych w zakresie podczerwieni i światła czerwonego (EARTH OBSERVATORY.NASA.GOV, odczyt z dn. 14.01.2014).

Dostępne są różne algorytmy dla klasyfikacji pokrycia terenu, z których każdy ma swoje ograniczenia i zalety dla różnych typów środowisk. Oprócz tradycyjnych algorytmów klasyfikacji pikselowej, również zaczęto stosować fraktale, techniki sieci neuronowych oraz metody z podejściem obiektowym.

8.1 Klasyfikacja pikselowa

Najstarsza a zarazem najprostsza z metod klasyfikacji opiera się na analizie pikselowej. Polega ona na przyporządkowaniu pikseli do klas na podstawie wartości radiometrycznych w różnych zakresach spektrum. Istnieją dwa podejścia jej stosowania: nadzorowane i nienadzorowane. Klasyfikacja nadzorowana polega na zdefiniowaniu przez operatora pól treningowych reprezentujących dany typ pokrycia terenu. Podczas wyboru pól treningowych można wspierać się innymi źródłami np. istniejącymi mapami. Podczas klasyfikacji, dla wybranych pól treningowych i dla poszczególnych zakresów spektralnych, określone są główne parametry statystyczne takie jak: wartość średnia, wartość minimalna i maksymalna oraz dodatkowo: odchylenie standardowe, wariancja i kowariancja. Następnie program, w którym klasyfikacja jest wykonywana analizuje cały obraz, tak aby każdy jego piksel został zakwalifikowany do odpowiedniej klasy.

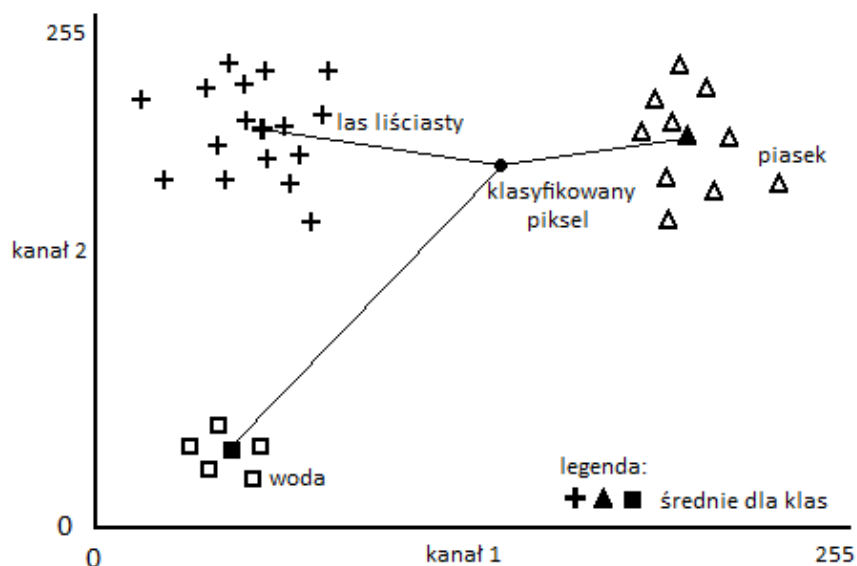
Przypisanie piksela czy grupy pikseli do pewnej klasy w oparciu o rejestrację tylko w jednym zakresie spektrum jest najczęściej bardzo trudne. Jednak już informacja dotycząca drugiego zakresu ułatwia ten proces. Informacje z kolejnych kanałów zwiększają szansę poprawnego, automatycznego sklasyfikowania obrazu.

Klasyfikacja nadzorowana jest metodą, za pomocą której można w sposób automatyczny przeprowadzić generalizację obrazu zgodnie z przyjętym przez użytkownika wzorcem.

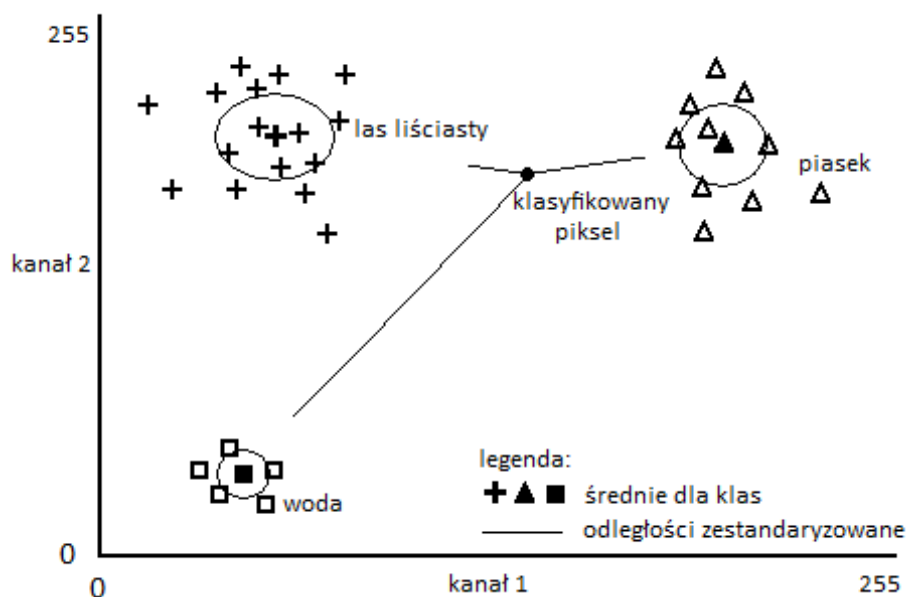
Wyróżnia się 3 podstawowe reguły decyzyjne stosowane w klasyfikacji nadzorowanej: metoda najkrótszej odległości, największego prawdopodobieństwa i równoległoboków.

Klasyfikacja metodą najkrótszej odległości polega na przyporządkowaniu piksela do tej kategorii, dla której odległość do obliczonej dla klasy wartości średniej jest najmniejsza (Rys.8.1). Jednakże zmienność wartości pikseli dla poszczególnych klas może się znacznie

różnić (np. las liściasty charakteryzuje się dużą zmiennością, a tereny pustynne małą), co powoduje, że mogą wystąpić błędy w klasyfikacji. Aby uniknąć tego czynnika, wprowadza się tzw. odległości standaryzowane (znormalizowane), które oblicza się, dzieląc odległości od średniej przez wartość odchylenia standardowego dla poszczególnej klasy (Rys.8.2).

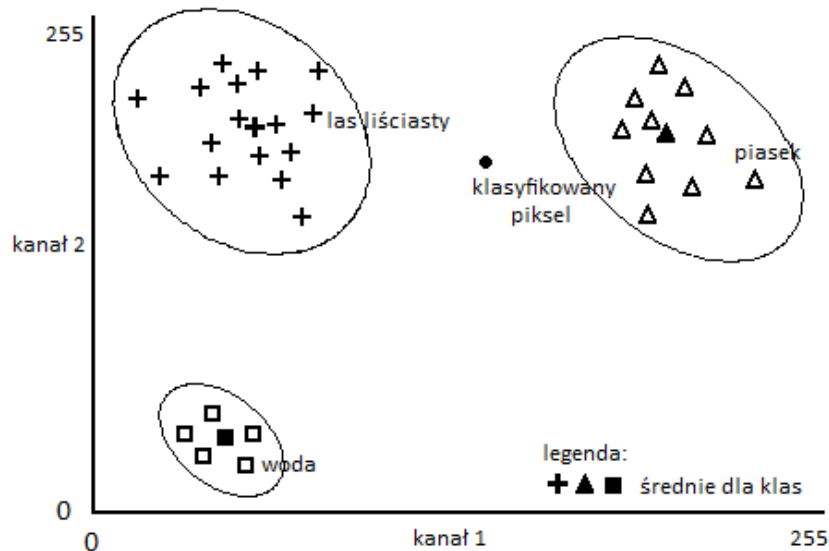


Rys.8.1 Metoda najmniejszej odległości od średniej. Analizowany piksel zostanie przypisany do klasy „piasek” (źródło: opracowanie własne na podstawie WRÓBEL, s.2)

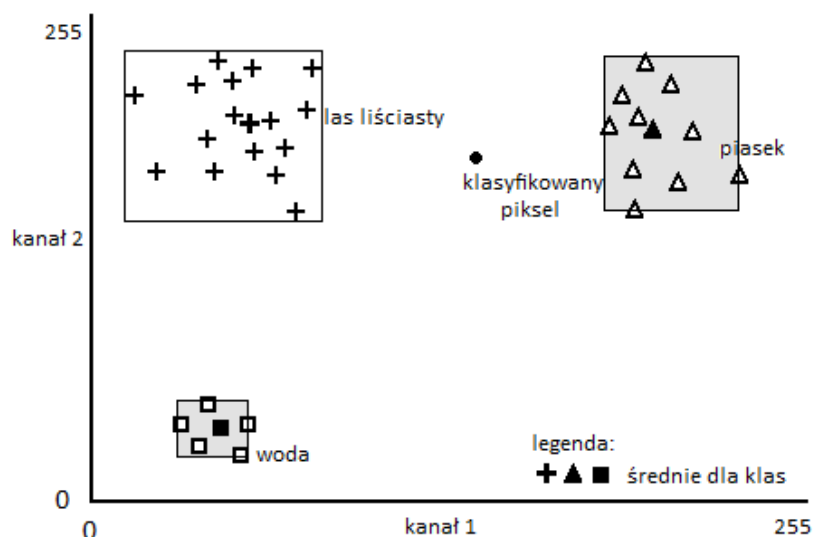


Rys.8.2 Metoda najmniejszej odległości zestandaryzowanej od średniej dla danej klasy. Analizowany piksel zostanie przypisany do klasy „las liściasty” (źródło: opracowanie własne na podstawie WRÓBEL, s.3)

Podczas klasyfikacji metodą największego prawdopodobieństwa obliczane jest dla każdego piksela prawdopodobieństwo należenia do każdej z klas i piksel jest przydzielany do tej kategorii, dla której jest największe prawdopodobieństwo (Rys.8.3). Dla każdej klasy obliczana jest wartość średnia oraz macierz wariancyjno-kowariancyjna, która pozwala na zakwalifikowanie piksela do danej klasy.



Rys.8.3 Metoda największego prawdopodobieństwa. Analizowany piksel zostanie przypisany do klasy „las liściasty” (źródło: opracowanie własne na podstawie WRÓBEL, s.3)



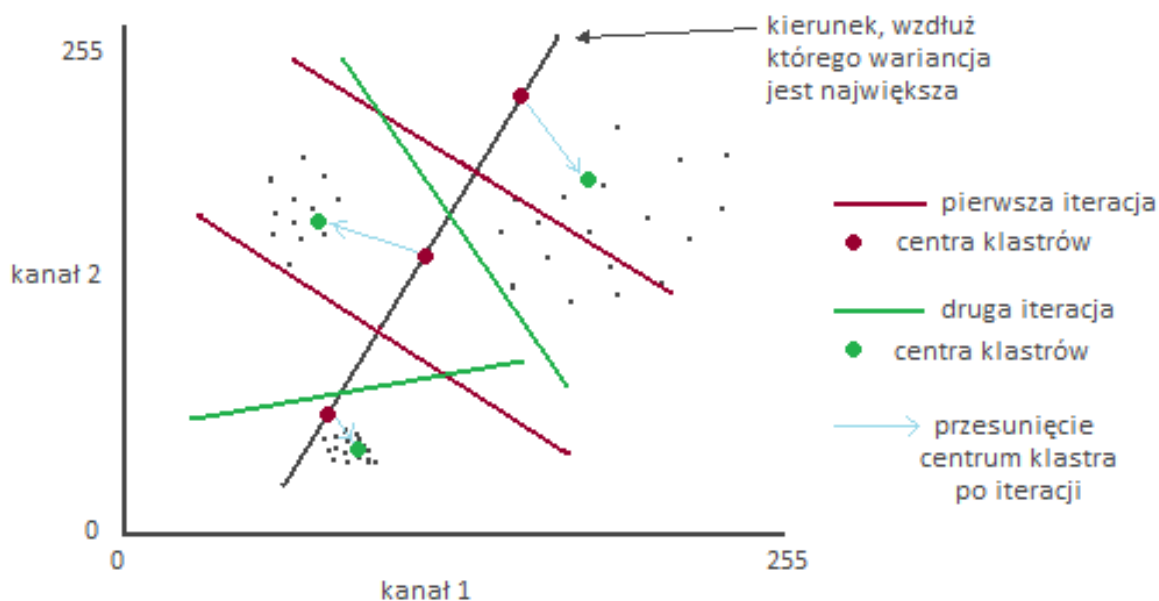
Rys.8.4 Metoda równoległoboków. analizowany piksel nie zostanie przypisany do żadnej klasy, gdyż nie jest zawarty w żadnym równoległoboku. (źródło: opracowanie własne na podstawie WRÓBEL, s.2)

Najszybszą metodą, ale też najmniej wiarygodną jest metoda równoległoboków, która ma praktycznie jedynie dydaktyczne zastosowanie. Polega ona na zdefiniowaniu dla każdej wyróżnionej kategorii i zakresu spektralnego granic przedziału wartości piksela. Dla analizowanych dwóch kanałów spektralnych piksele zakwalifikowane do danej klasy muszą się znaleźć wewnątrz prostokąta (Rys.8.4). Przy analizie trzech kanałów będzie to graniastosłup (WRÓBEL, odczyt z dn. 14.01.2014).

Klasyfikacja nienadzorowana jest w pełni automatycznym podejściem. Operator ustala tylko kilka parametrów wstępnych, które definiują działanie algorytmu. Najpopularniejszą metodą takiej klasyfikacji jest ISODATA. Na początku ustala się w niej kierunek, wzdłuż którego wariancja jest największa. Następnie dzieli się przestrzeń spektralną na naturalne zgrupowania pikseli, zwane klastrami, w zależności od ustalonej liczby klas. Poszczególne piksele są przypisywane do klastrów na zasadzie najmniejszej odległości. Z każdą kolejną iteracją zmieniają się centra klastrów (Rys.8.5). Przed rozpoczęciem tego procesu operator ustala liczbę iteracji lub/oraz współczynnik zbieżności:

$$\text{współczynnik zbieżności} = \frac{\text{piksele, które nie zmieniły swojej przynależności}}{\text{wszystkie piksele}} \quad (13)$$

Po osiągnięciu jednego z tych wymogów proces zatrzymuje się i wtedy można ocenić wynik klasyfikacji.



Rys.8.5 Przykład działania klasyfikacji nienadzorowanej ISODATA
(źródło: opracowanie własne)

8.2 Klasyfikacja obiektowa

Podstawowymi elementami podejścia obiektowego nie są już piksele, a obiekty na obrazie. Można je zdefiniować jako sąsiadujące ze sobą regiony. Analizę obiektową przeprowadza się w dwóch etapach (Rys.8.6). Najpierw wykonuje się segmentację obrazu, a następnie klasyfikację w zakresie spektralnym i przestrzennym opartą na wyselekcjonowanych obiektach (GAO, MAS, 2008).

Segmentacja obrazu jest rodzajem regionalizacji, która wyznacza obiekty zgodnie z określonymi kryteriami jednorodności równocześnie zachowując zależności przestrzenne. Dzięki segmentacji obraz zostaje podzielony na jednorodne, ciągłe i sąsiadujące ze sobą obiekty. W celu pokierowania segmentacją ustala się kilka parametrów. Wynik segmentacji również zależy od rodzaju danych. Dla danego zestawu parametrów segmentacji, niejednorodny obraz da w rezultacie mniejszą liczbę obiektów niż obraz jednorodny.

Obiekty mogą być definiowane i klasyfikowane przez bardzo wiele cech, takich jak kolor, tekstura, forma oraz właściwości kontekstualne. Można to zrobić za pomocą dwóch klasyfikatorów: najbliższego sąsiada (*Nearest Neighbour*) oraz funkcji rozmytej przynależności (*fuzzy membership function*) lub kombinacji obu z nich. Pierwszy klasyfikator opisuje klasę używając do tego próbek zdefiniowanych przez użytkownika, podczas gdy drugi klasyfikator analizuje odstępów atrybutów liniowych. Różnorodność cech obiektów pozwala na zastosowanie obu typów klasyfikatorów (GAO, MAS, 2008).



Rys.8.6 Przykład segmentacji i klasyfikacji wysokiej zabudowy wykonanej na podstawie wysokorozdzielczego zdjęcia satelitarnego QuickBird (źródło: LEWIŃSKI, 2007)

9. Morfologia matematyczna

„Morfologia matematyczna stanowi zbiór obserwacji umożliwiających uwzględnienie kontekstowych cech obrazu, pozwalając choć trochę przybliżyć proces cyfrowego przetwarzania obrazów do procesu spostrzegania. To jej pierwsza zaleta. Druga to prostota działania i jej elastyczność - tworzenie nowych operacji jest jak budowanie kompozycji z klocków. Wystarczy mieć tylko pomysł i chęć” (KUPIDURA i in., s.15, 2010).

9.1 Element strukturujący

Podstawowym pojęciem morfologii matematycznej jest element strukturujący. Przetworzenie morfologiczne dokonuje się w wyniku jego interakcji z obrazem cyfrowym. Kształt i wielkość elementu strukturującego determinuje zasięg działania funkcji morfologicznej. Zadaniem elementu jest modyfikacja kształtu obiektu w celu ujawnienia jego struktury.

W przypadku większości operacji morfologicznych najbardziej odpowiednim kształtem elementu strukturującego jest koło, gdyż jest to figura idealnie symetryczna. Jednak w związku z tym, że obraz cyfrowy jest złożony z pikseli, element strukturujący może przybrać jedynie kształt aproksymujący koło. Najmniejszym tego typu elementem jest kwadrat o boku 3 pikseli z punktem centralnym znajdującym się w środku tego kwadratu. Taki element strukturujący nazywany jest często elementem jednostkowym. Idąc tym tropem kwadrat o boku 5 pikseli będzie elementem o rozmiarze 2. Stosowanie symetrycznego elementu strukturującego nie jest regułą, w przypadku niesymetrycznego elementu zostaje opisany jego kształt oraz rozmiar w pikselach (KUPIDURA i in., 2010).

9.2 Podstawowe operacje

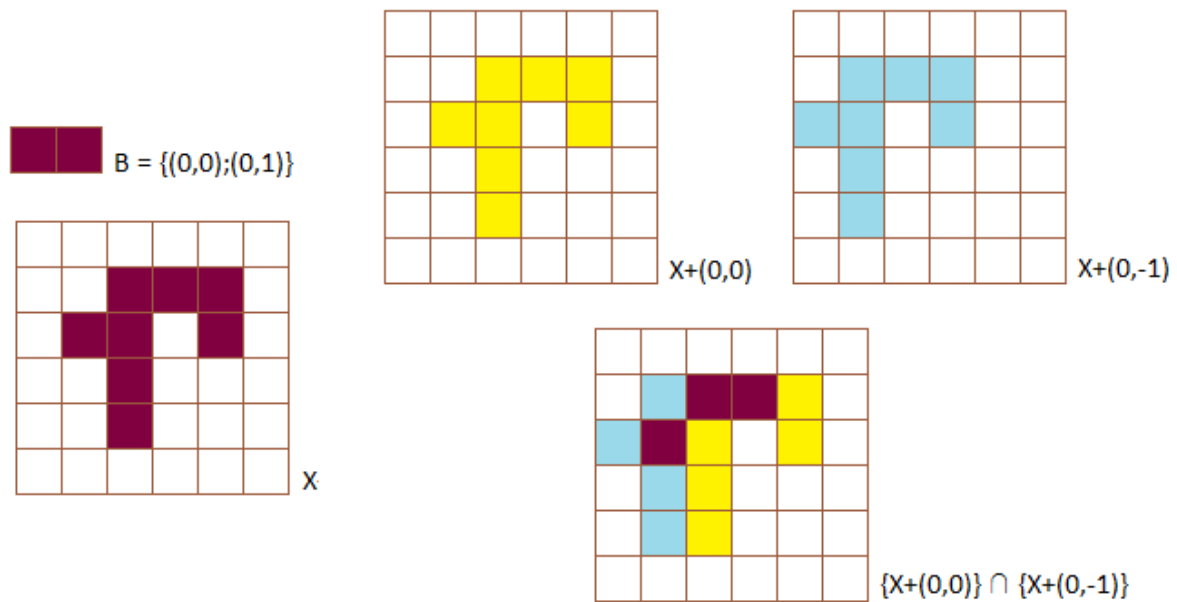
Głównymi operacjami, na których opierają się te inne, bardziej złożone, są erozja i dylacja. Erozję można zdefiniować jako proces niszczenia wierzchniej warstwy obiektu. Termin dylacja z kolei nie ma odpowiedniej definicji w języku polskim. W morfologii jest przeciwieństwem erozji i dotyczy zwiększania objętości obiektu.

9.2.1 Erozja

Proces erozji w sposób matematyczny można zapisać następująco (KUPIDURA i in., 2010):

$$\varepsilon_B(X) = \bigcap_{y \in B} X_y \quad (14)$$

Wzór pokazuje, że erozję stanowi iloczyn logiczny zbiorów uzyskanych w wyniku translacji zbioru X o wektory (y) opisane współrzędnymi elementów składających się na odwrotność $(\hat{B})$ elementów strukturujących (B) . Przykład erozji zbioru X za pomocą zbioru $B = \{(0,0);(0,1)\}$ przedstawia Rys.9.1.

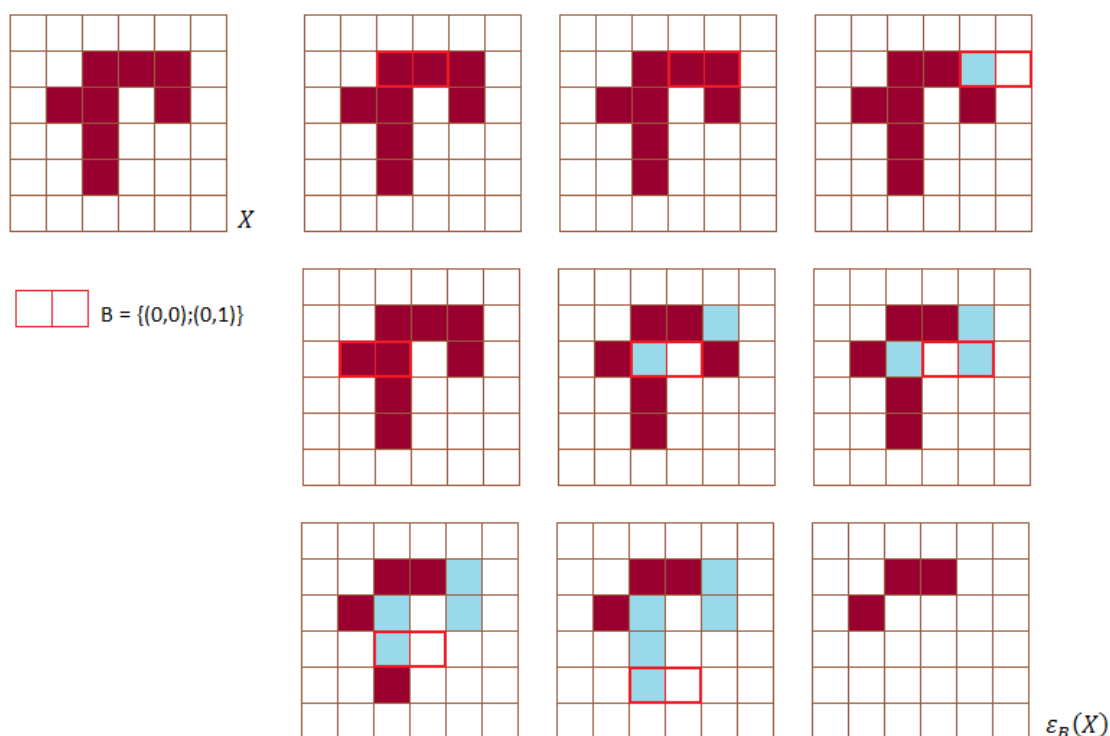


Rys.9.1 Przykład erozji zbioru X przy pomocy elementu strukturującego B

(źródło: opracowanie własne na podstawie: KUPIDURA i in., s.19)

Taki sam efekt można uzyskać interpretując element strukturujący jako wzorec, który przykładamy kolejno do każdego piksela zbioru X i usuwamy te części zbioru, w których po przyłożeniu wzorca nie mieści się on całkowicie. Taką interpretację erozji przedstawia Rys.9.2.

Oba przedstawione sposoby zrozumienia procesu erozji dotyczą obrazów binarnych. Dopiero 20 lat po powstaniu morfologii matematycznej określono metody przetworzeń morfologicznych dla obrazów w skali szarości. Na takich obrazach erozja powoduje powiększanie się zasięgu ciemnych obiektów w stopniu zależnym od kształtu i wielkości elementu strukturującego (KUPIDURA i in., 2010).



Rys.9.2 Erozja interpretowana jako zmiana struktury obrazu w zależności od wyniku porównania jej z elementem strukturującym

(źródło: opracowanie własne na podstawie: KUPIDURA i in., s.20)

9.2.2 Dylacja

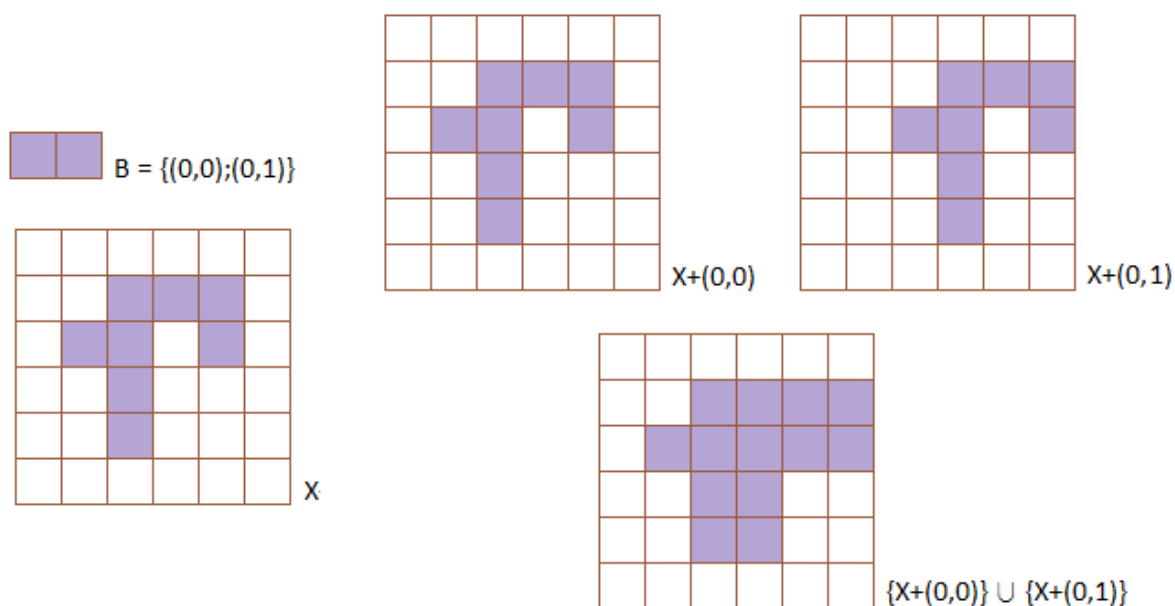
Jak już wspomniano wcześniej, drugim fundamentalnym procesem morfologicznym jest dylacja. Matematycznie można ją opisać wzorem (KUPIDURA i in., 2010):

$$\delta_B(X) = \bigcup_{y \in B} X_y \quad (15)$$

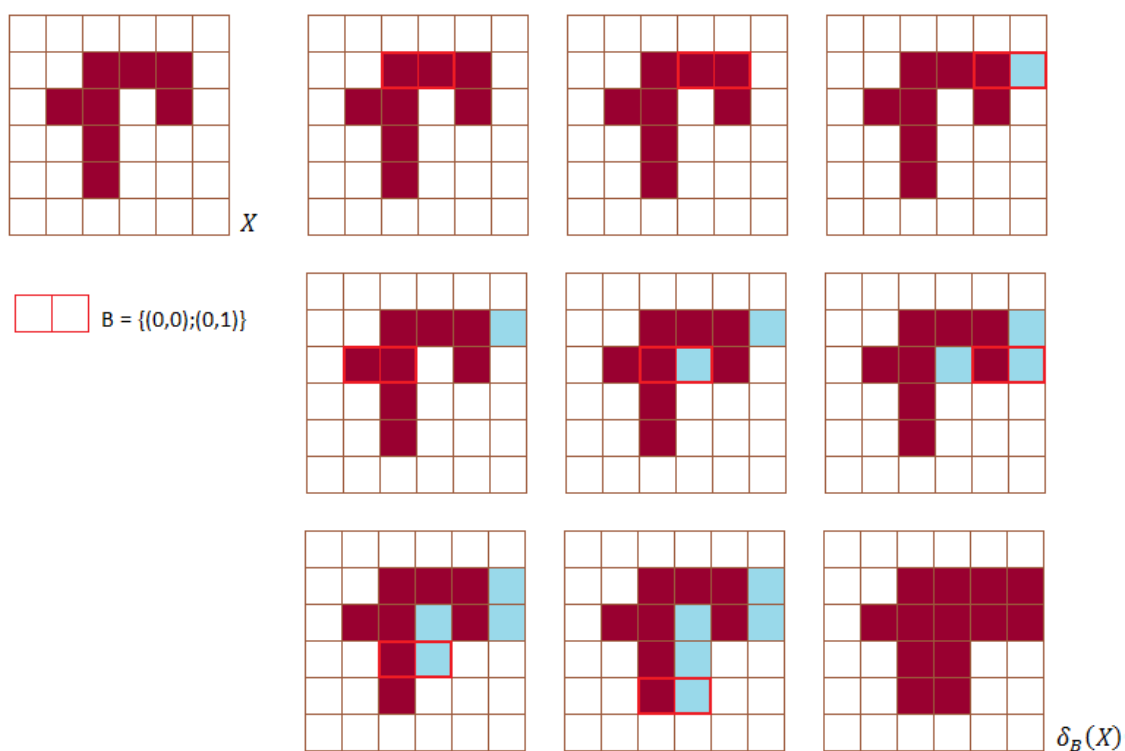
Pokazuje on, że dylacja jest sumą logiczną zbiorów X przemieszczonych o wektory (y) należące do zbioru (B) elementu strukturującego. Rys.9.3 pokazuje przykład graficzny dylacji z użyciem zbioru $B = \{(0,0);(0,1)\}$.

Tak samo jak erozję, dylację również można wyobrazić sobie jako proces, w którym element strukturujący pełni rolę wzorca określającego obszary zgodności ze strukturą obrazu. W tym wypadku do każdego fragmentu zbioru przykładła się wzorzec i tworzy nową część zbioru tam, gdzie element strukturujący sięgnie. Tak rozumiana dylacja przedstawiona jest na rys.Rys.9.4.

W przeciwieństwie do erozji, dylacja na obrazach w skali szarości sprawia rozszerzanie jasnych elementów obrazu w stopniu również zależnym od kształtu i wielkości elementu strukturującego.

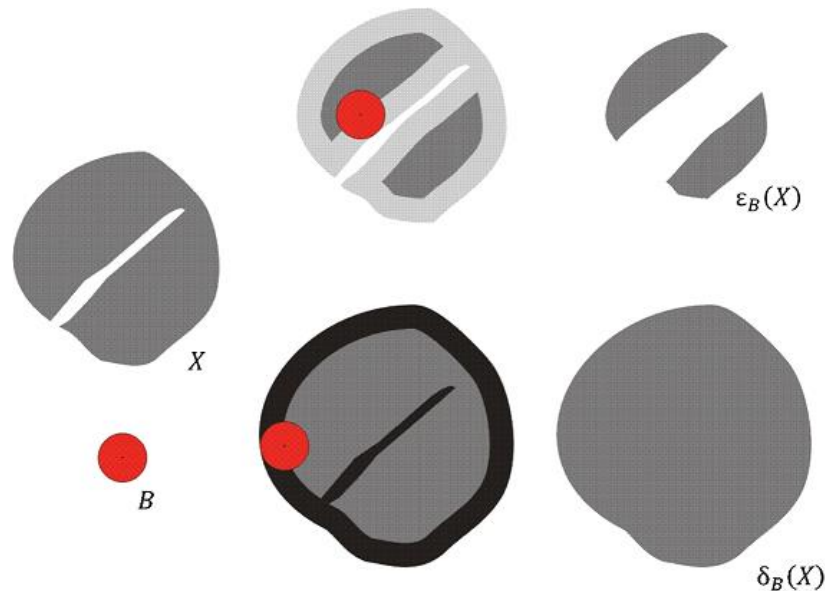


Rys.9.3 Przykład dylacji zbioru X przy pomocy elementu strukturującego B
 (źródło: opracowanie własne na podstawie: KUPIDURA i in., s.22)



Rys.9.4 Dylacja jako zmiana struktury obrazu przez porównanie jej
 z elementem strukturującym
 (źródło: opracowanie własne na podstawie: KUPIDURA i in., s.23)

Obie opisane operacje są integralnymi składnikami każdej operacji morfologicznej, jednak prawie nigdy nie występują samodzielnie, gdyż powodują zbyt duże zmiany obiektów zawartych na obrazie (Rys.9.5).



Rys.9.5 Erozja i dylacja zbioru X przy pomocy elementu strukturującego B
(źródło: KUPIDURA i in., s. 25)

9.2.3 Otwarcie i domknięcie

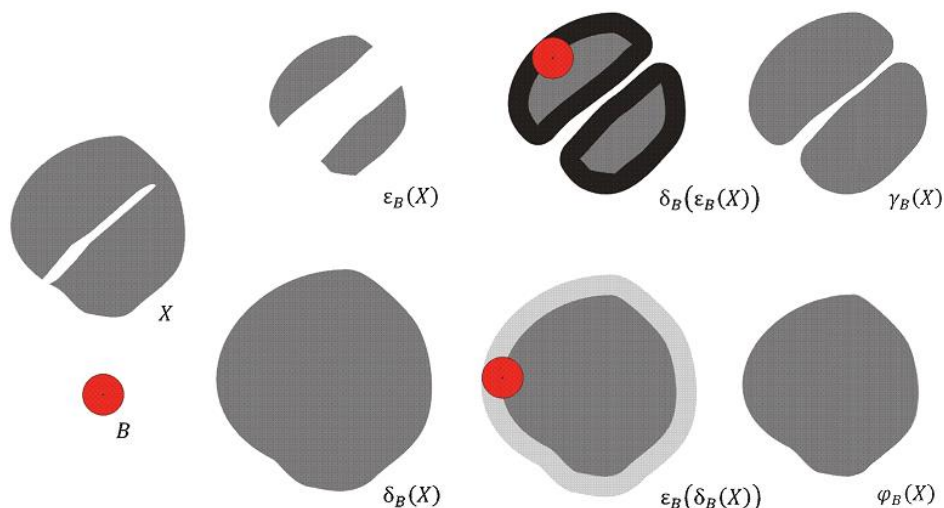
Zarówno otwarcie jak i domknięcie są procesami podstawowymi w morfologii matematycznej jednak o stopień wyżej od erozji i dylacji. Tak naprawdę są złożeniami tych dwóch wcześniej już opisanych operacji. Otwarcie można opisać następująco (KUPIDURA i in., 2010):

$$\gamma_B(X) = \delta_B(\varepsilon_B(X)), \quad (16)$$

co oznacza, że na zbiorze X najpierw wykonywana jest erozja, a potem na wyniku przeprowadza się dylację. W odwrotnej kolejności wykonuje się domknięcie, co przedstawia poniższy wzór (KUPIDURA i in., 2010):

$$\varphi_B(X) = \varepsilon_B(\delta_B(X)). \quad (17)$$

Obie operacje przedstawione są na Rys.9.6.



Rys.9.6 Otwarcie i domknięcie na zbiorze X
(źródło: KUPIDURA i in., s.26)

Zbiór X na Rys.9.6 może być zarówno obiektem, w który wkradło się pęknięcie lub też może być dwoma błędnie połączonymi obiektami. Domknięcie sprawia, że pęknięcie zostaje załatanie, z kolei otwarcie dzieli zbiór X na dwa obiekty. Po wykonaniu operacji zbiór X pozostaje w swoim pierwotnym rozmiarze, co pokazuje, że obie operacje nie tylko przejmują zalety erozji i dylacji, ale też redukują ich wady (KUPIDURA i in., 2010).

9.3 Wielokrotny element strukturujący (MSE)

Na element wielokrotny składa się wiele pojedynczych elementów strukturujących. Otwarcie i domknięcie przy pomocy wielokrotnego elementu strukturującego przedstawiają poniższe wzory (KUPIDURA i in., 2010):

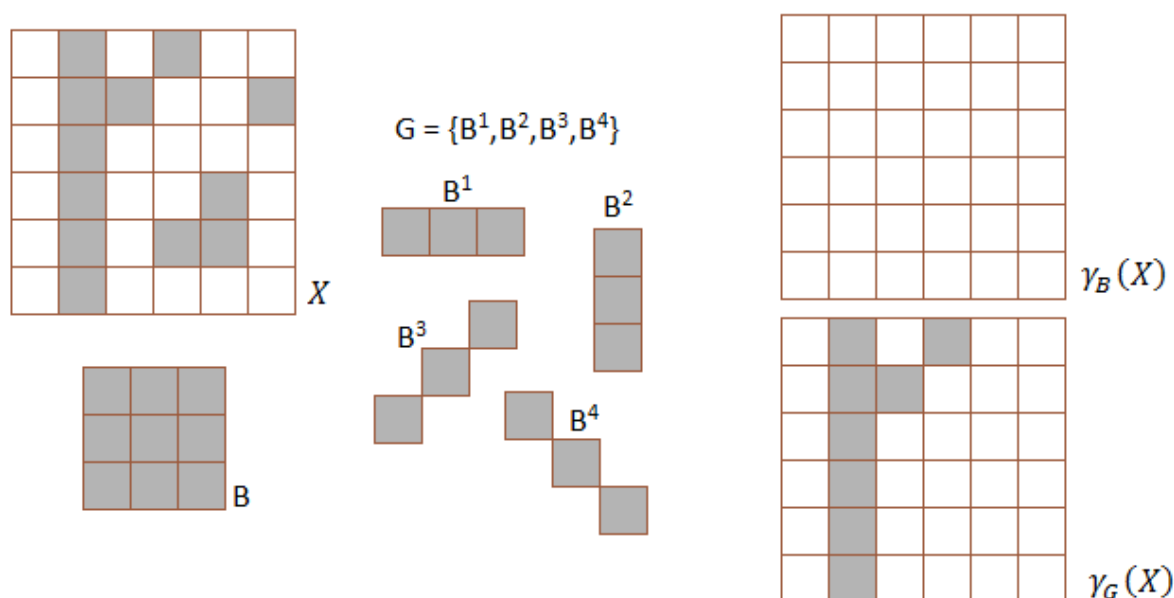
$$\gamma_G(X) = \max_{B^k \in G} \left(\gamma_{B^k \in G}(X) \right) \quad (18)$$

$$\phi_G(X) = \max_{B^k \in G} \left(\phi_{B^k \in G}(X) \right) \quad (19)$$

Dla otwarcia wartość piksela wynikowego będzie maksymalną wartością spośród otrzymanych. Wynika z tego, że jeśli choćby jeden z szeregu elementów strukturujących nie otworzy obiektu, czyli nie usunie go z obrazu, obiekt ten pozostanie jako część obrazu wynikowego. Domknięcie wielokrotnym elementem strukturującym wygląda analogicznie różni się tylko tym, że wartość piksela wynikowego będzie minimalną wartością spośród otrzymanych. W zależności od specyfiki struktury, którą chcemy otrzymać na obrazie wynikowym, można dowolnie projektować kształty i wielkości poszczególnych elementów strukturujących składających się na ten wielokrotny.

Klasyczne podejście wielokrotnego elementu strukturującego polega na rozbiciu symetrycznego kształtu na wszystkie linie, które się w nim zawierają i przechodzą przez środek jego układu współrzędnych. Dzięki temu zostają zachowane liniowe obiekty. Rys.9.7 pokazuje graficzne przedstawienie takiej operacji. Na obrazach w skali szarości taki proces świetnie nadaje się do usuwania punktowych szumów, a przy tym nie zmniejsza przejrzystości obrazu.

Drugim podejściem wielokrotnego elementu strukturującego jest podejście powierzchniowe. Podstawowy element rozbija się wtedy na wszystkie możliwe subelementy o określonej powierzchni zawierające środek układu współrzędnych. Pozwala to na usuwanie elementów struktury obrazu w zależności od ich powierzchni w pikselach. Wynik operacji zatem nie zależy od kształtu obiektu (KUPIDURA i in., 2010).



Rys.9.7 Porównanie otwarcia elementem strukturującym B oraz wielokrotnym elementem strukturującym G (źródło: opracowanie własne na podstawie: KUPIDURA i in., s.29)

9.4 Transformaty *top hat* i *bottom hat*

Opisane wcześniej operacje można sklasyfikować jako dolnoprzepustowe. Następnym krokiem jest poznanie morfologicznych operacji górnoprzepustowych, które zazwyczaj oblicza się różnicą między operacjami dolnoprzepustowymi a obrazem wejściowym. W ten sposób wyróżnia się fragmenty obrazu charakteryzujące się dużą częstotliwością przestrzenną.

Transformatę *top hat* przeprowadza się przez odjęcie od zbioru wyjściowego X wynik

otwarcia elementem B , co opisuje poniższy wzór (KUPIDURA i in., 2010):

$$TH_B(X) = X - \gamma_B(X) \quad (20)$$

W efekcie obraz wynikowy zawiera właśnie te elementy, które zostały usunięte przez operację otwarcia. Z kolei transformatę *bottom hat* uzyskuje się odejmując zbiór wyjściowy od wyniku przeprowadzonego na nim domknięcia elementem B (KUPIDURA i in., 2010):

$$BH_B(X) = \varphi_B(X) - X \quad (21)$$

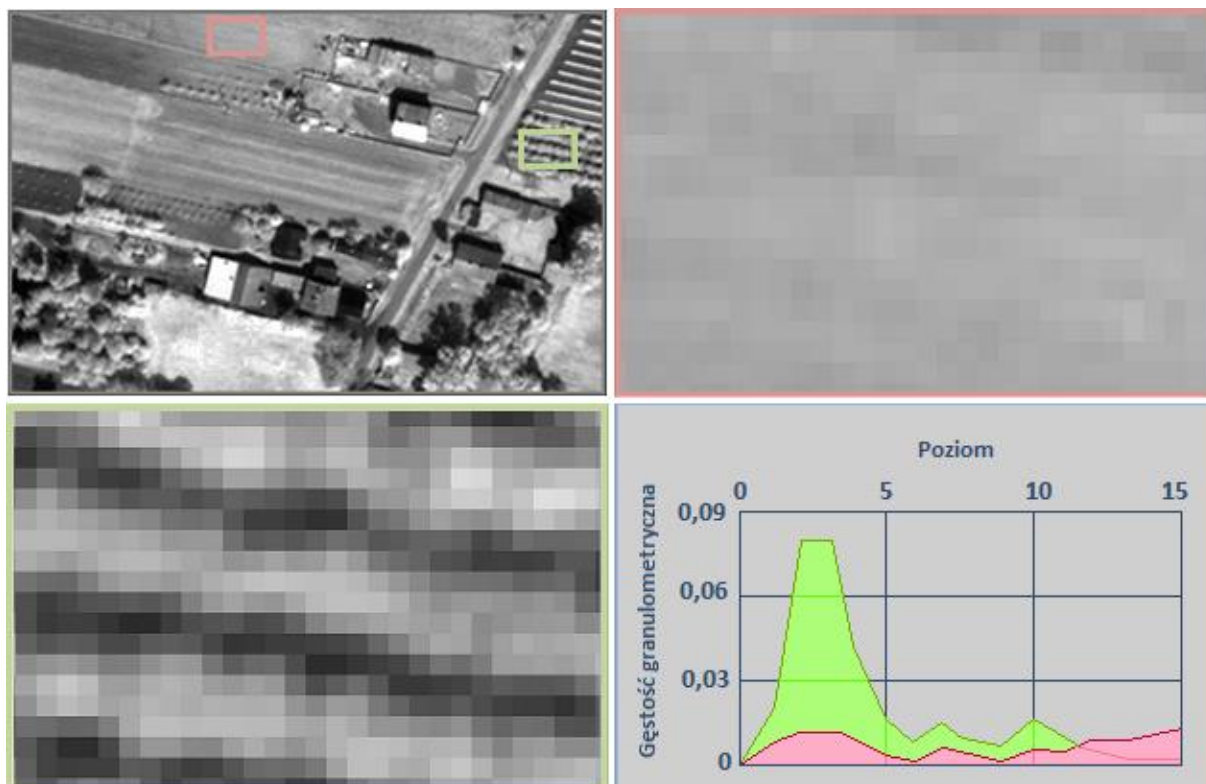
Ta operacja daje w efekcie ciemne elementy (przestrzenie międzyobiektywne) usunięte (zasklepione) w procesie domknięcia. Obie transformaty można przeprowadzać wykorzystując operacje otwarcia i domknięcia z użyciem wielokrotnego elementu strukturującego. Pozwala to na wykrywanie obiektów o określonej wielkości i punktowym (czy *quasi*-punktowym) charakterze (KUPIDURA i in., 2010).

9.5 Granulometria

Definicja granulometrii określa ją jako badanie procentowej zawartości ziaren o różnej wielkości w rozdrobnionym materiale. Pomijając ten rozdrobniony materiał, opis znakomicie oddaje istotę granulometrii morfologicznej.

Proces granulometrii można sobie wyobrazić jako analogię do odsiewania kamyków o różnej wielkości przy użyciu kolejnych sit o coraz większych oczkach. Odsiewanie zaczyna się od najmniejszych kamyków a potem zwiększa się oczka kolejnych sit. To co robi operator sita zamyka się w sprawdzeniu, ile kamyków zostało odsiane jakim sitem.

W morfologii funkcję sita pełni sekwencja operacji otwarcia przy użyciu coraz większych elementów strukturujących. Przykład granulometrii na obrazie w skali szarości przedstawia Rys.9.8. Widać na nim jak różni się wynik granulometrii dla dwóch różnych fragmentów. Obraz w różowej ramce jest bardziej jednorodny. Charakteryzuje się płaskim wykresem funkcji, gdyż kolejne otwarcia niewiele w nim zmieniają. Wycinek w jasnozielonej ramce natomiast jest bardziej zróżnicowany. Wykres wyraźnie wzrasta dla kroków 2 i 3, co oznacza, że właśnie elementów o rozmiarach kolejno 2 i 3 jest na wycinku najwięcej. Dalej wykres opada i przypomina ten dla obrazu z różowej ramki. Większość jasnych obiektów zniknęła z obrazu po wcześniejszych etapach granulometrii.



Rys.9.8 Granulometria dla dwóch fragmentów o różnej częstotliwości przestrzennej
(źródło: KUPIDURA i in., s. 36)

Przydatnym narzędziem w przetworzeniach morfologicznych są mapy granulometryczne. Ukazują przestrzenny układ struktury obrazu w różnych jego fragmentach. Pozwalają na uzyskanie obrazów, w których wartości pikseli mają charakter kontekstowy.

Na podstawie operacji granulometrycznych można obliczyć parametr zwany rozkładem wielkości (KUPIDURA i in., 2010):

$$SD_n = \frac{S(X) - S(X_n)}{S(X)} \quad (22)$$

Rozkład wielkości służy następnie do obliczenia gęstości granulometrycznej (KUPIDURA i in., 2010):

$$dSD_n = SD_{n+1} - SD_n \quad (23)$$

Tworzenie map granulometrycznych polega na obliczaniu funkcji granulometrii dla każdego piksela w ściśle określonym otoczeniu i przypisaniu mu jako wartości gęstości granulometrycznej dSD_n . W ten sposób tworzy się N obrazów, których licznosci (suma wartości pikseli) świadczą o ilości obiektów usuniętych w N -tym etapie granulometrii. W ten sposób duże licznosci obrazów o niskim indeksie N można interpretować jako duże

rozdrobienie obrazu w określonym otoczeniu piksela. Z kolei duże liczności obrazów o wysokim indeksie będą wskazywały na obecność dużych obiektów w sąsiedztwie piksela (KUPIDURA i in., 2010).

9.6 Transformacje geodezyjne

Transformacje geodezyjne różnią się od innych operacji morfologicznych tym, że wymagają dwóch niezależnych od siebie obrazów - znacznika i maski. Zadaniem maski jest wyznaczenie przestrzeni, w której można się poruszać, natomiast znacznik to obraz poddawany operacjom morfologicznym.

Dylacja geodezyjna jest operacją dylacji z użyciem jednostkowego elementu strukturującego, działającą jedynie w ramach zbioru określonego przez maskę. Definiuje się ją jak poniżej (KUPIDURA i in., 2010):

$$\delta_{gM}^{(1)}(X) = \min(\delta_{B^{(1)}}(X), (M)) \quad (24)$$

Analogicznie do dylacji geodezyjnej, na obrazach można przeprowadzać operację erozji geodezyjnej (KUPIDURA i in., 2010):

$$\varepsilon_{gM}^{(1)}(X) = \max(\varepsilon_{B^{(1)}}(X), (M)) \quad (25)$$

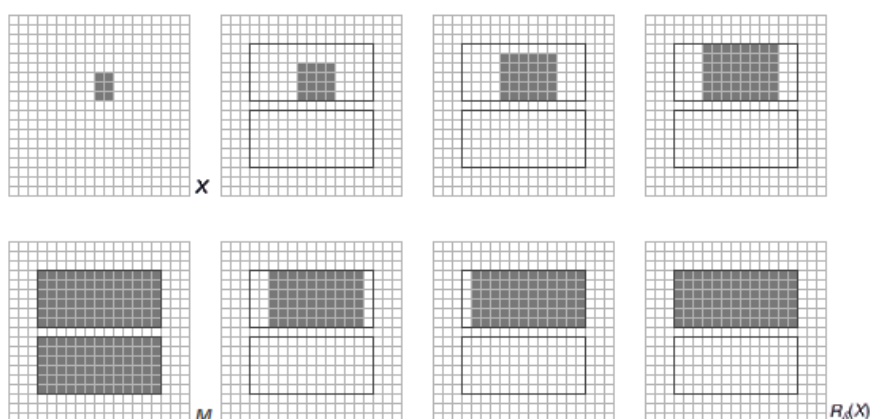
Można również zdefiniować erozję i dylację geodezyjną o wielkości n . Nie chodzi tu jednak o rozmiar n elementu strukturującego, tylko o iteracyjne wykonywanie jednostkowej erozji lub dylacji geodezyjnej.

Takie iteracyjne podejście prowadzi do osiągnięcia krawędzi maski i dalsze ponawianie operacji nic w obrazie już nie zmienia. W takiej sytuacji można wprowadzić rekonstrukcję geodezyjną (Rys.9.9). Istnieje zarówno rekonstrukcja przez dylację jak i erozję (KUPIDURA i in., 2010):

$$R_{\delta_M}(X) = \delta_{gM}^{(i)}(X) \quad (26)$$

$$R_{\varepsilon_M}(X) = \varepsilon_{gM}^{(i)}(X) \quad (27)$$

gdzie i oznacza najmniejszą taką liczbę, dla której $proces_{gM}^{(i)}(X) = proces_{gM}^{(i+1)}(X)$.



Rys.9.9 Rekonstrukcja przez dylację

(źródło: opracowanie własne na podstawie: KUPIDURA i in., s. 45)

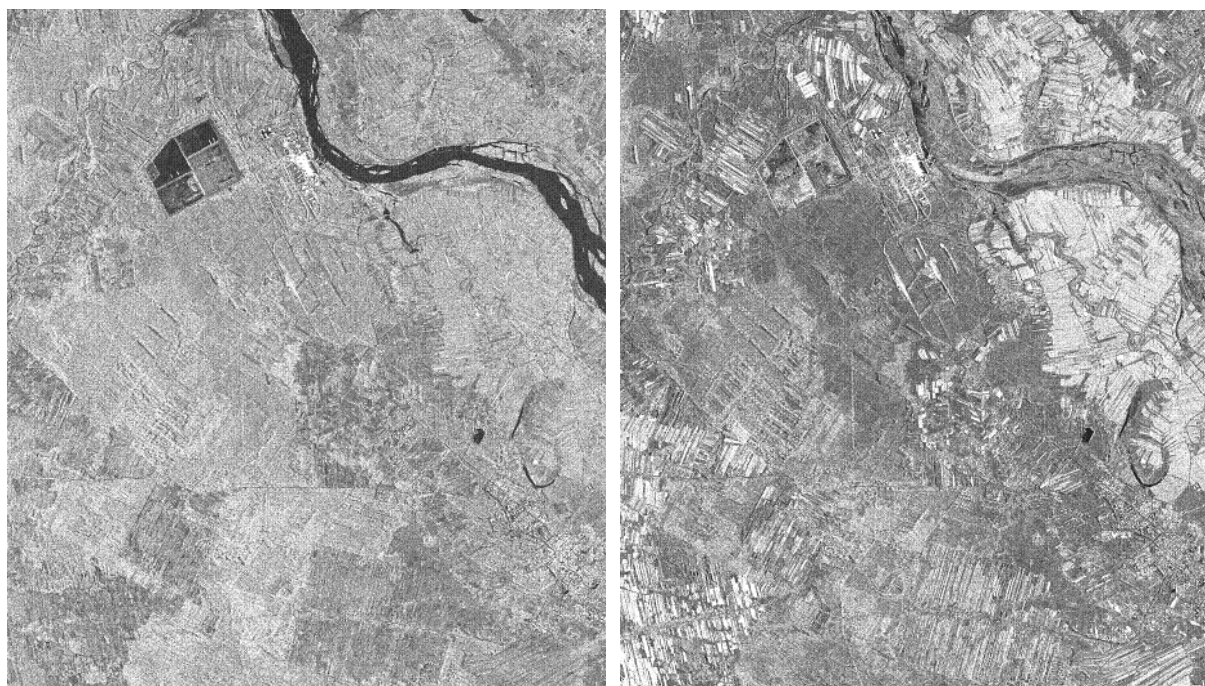
Rekonstrukcja geodezyjna jest wykorzystywana również w operacjach otwarcia i domknięcia przez rekonstrukcję. W klasycznym podejściu procesy te mają jedną zasadniczą wadę - wprowadzają do obrazu ziarno zależne od kształtu i wielkości elementu strukturującego. Wadę tę można wykluczyć przez zastosowanie właśnie rekonstrukcji geodezyjnej. Całość polega na użyciu obrazu inicjalnego jako maski, a wyniku erozji czy dylacji jako znacznika. W ten sposób usuwamy jedne obiekty a inne rekonstruujemy. Różnica między operacjami przez rekonstrukcję, a ich klasycznymi odpowiednikami polega na tym, że o ile pierwszy etap przebiega standardowo, o tyle drugi etap zastąpiony zostaje odpowiednią transformacją geodezyjną (KUPIDURA i in., 2010).

10. *Metodyka badań i dane testowe*

10.1 Dane

Jako materiał doświadczalny posłużyły obrazy z satelity Terra SAR-X z dn. 27.11.2007 r. z okolic Kozienic wykonane w polaryzacjach VV i VH cechujące się rozmiarem piksela 4,75 m x 4,75 m (Rys.10.1).

W dalszych analizach również wykorzystano te same obrazy. Reprezentują one doskonale różne typy pokrycia terenu. Obrazy przedstawiają rzekę Wisłę, jak również mniejsze zbiorniki wodne zarówno naturalne jak i sztuczne (osadniki na terenie elektrowni Kozienice). Jest też spora połać lasu (Puszcza Kozienicka) z widocznymi leśnymi uprawami, duże powierzchnie gruntów ornych, łąki, szczególnie na terenach przy rzece oraz zabudowa zarówno miejska (fragment Kozienic) jak i wiejska (okoliczne wsie) oraz zabudowa przemysłowa (elektrownia Kozienice).



Rys.10.1 Zdjęcia Terra SAR-X w polaryzacjach VH (z lewej) i VV (z prawej)

Dla fal pasma X powierzchnie roślin, gruntu i innych obiektów są nieprzenikalne, dzięki temu rejestrowany przez TerraSAR-X obraz jest łatwy do interpretacji wizualnej.

Obrazy zostały wykonane w polaryzacjach VV i VH, co oznacza, że wysłane przez nadajnik fale miały polaryzację pionową natomiast fale odebrane w jednym wypadku były spolaryzowane również pionowo, a w drugim poziomo. Dwie kombinacje polaryzacji dostarczają więcej informacji o właściwościach polarymetrycznych obiektów niż którakolwiek kombinacja samodzielnie. Większa zawartość informacyjna takich danych pozwala na pełniejszą i dokładniejszą interpretację obrazów.

W dalszej części pracy wykorzystano również obraz radarowy w polaryzacji HH Warszawy i okolic (Rys.10.2) z satelity TanDEM-X, wykonane w trybie pasmowym (stripmap) w dniu 22.08.2011 r.



Rys.10.2 Zdjęcie Warszawy z satelity TanDEM-X z dn. 22.08.2011 r.

10.2 Oprogramowanie

Wszelkie operacje morfologiczne przeprowadzono w programie BlueNote, który swoje algorytmy opiera na przetworzeniach morfologicznych. Możliwości programu zostały opisane w książce pt. „Morfologia matematyczna w teledetekcji” autorstwa P. Kupidury, P. Kozy i J. Marciniaka z 2010 r. na stronach 139 - 158. BlueNote jest programem bardzo intuicyjnym. Dodatkową jego zaletą jest to, że jest darmowy.

Część operacji na plikach rastrowych i wektorowych wykonano w programie Erdas Imagine. Jego producentem jest amerykańska firma Intergraph. Na swojej stronie opisuje ten właśnie program jako bramę do wielu zintegrowanych technologii geoprzestrzennych, stosując intuicyjną dla użytkownika obsługę oraz wiele zaawansowanych narzędzi i funkcjonalność. Erdas zapewnia dużą liczbę operacji zaimplementowanych odgórnie, jak również istnieje możliwość stworzenia własnych modeli operacji na danych.

Pozostałe operacje na rastrach i danych wektorowych wykonano w programie Quantum GIS, który jest projektem typu *Open Source*. Jest to darmowa odpowiedź użytkowników na popularny *software* firmy Esri - ArcGIS. QGIS jest współtworzony przez użytkowników i oprócz podstawowych funkcji w nim zawartych w dużej mierze opiera się na wtyczkach dostępnych w repozytorium. Z każdą wersją program staje się coraz bardziej funkcjonalny, a w przypadku braku jakiejś funkcji, można napisać własną wtyczkę i udostępnić ją społeczności użytkowników.

Analizy chmur punktów zostały wykonane w CloudCompare, który również jest programem typu *Open Source*.

10.3 Metodyka badań

Całość pracy podzielono na dwa etapy. Pierwszy miał na celu potwierdzenie tezy, że rozkład cętek na obrazie jest uzależniony od przedstawionego pokrycia terenu. Był on w rzeczywistości powtórzeniem badań przeprowadzonych przez Xia i Shenga (1996), w których badano gęstość oraz szorstkość cętek w obrębie wybranych poligonów reprezentujących kilka typów pokrycia terenu. Analiza ilościowa miała pokazać czy i w jakim stopniu można odróżnić od siebie konkretne typy pokrycia terenu, bazując na rozmieszczeniu i ilości cętek wyselekcjonowanych z obrazów radarowych.

Drugi etap, będący podstawowym badaniem przeprowadzonym w pracy, dotyczył sprawdzenia, czy zakładaną zależność rozkładu cętek od klas rodzajów pokrycia lub użytkowania terenu można wykorzystać w procesie klasyfikacji. Sprawdzone, jak cętki wpływają na rozróżnienie klas pokrycia terenu i wydzielenie innych rodzajów pokrycia w obrębie danej klasy. W tym celu z podstawowych danych poddanych filtracji oraz z danych wzbogaconych o morfologicznie przetworzone obrazy wcześniej wyodrębnionych cętek pozyskano wartości pikseli dla wybranych próbek różnych klas pokrycia terenu. Z tak

przygotowanych danych wygenerowano chmury punktów, na których później wykonano analizę porównawczą. Następnie wykonano również klasyfikacje pokrycia terenu dla tych dwóch zestawów danych w celu analizy ilościowej.

11. *Badanie zawartości informacji w szumie*

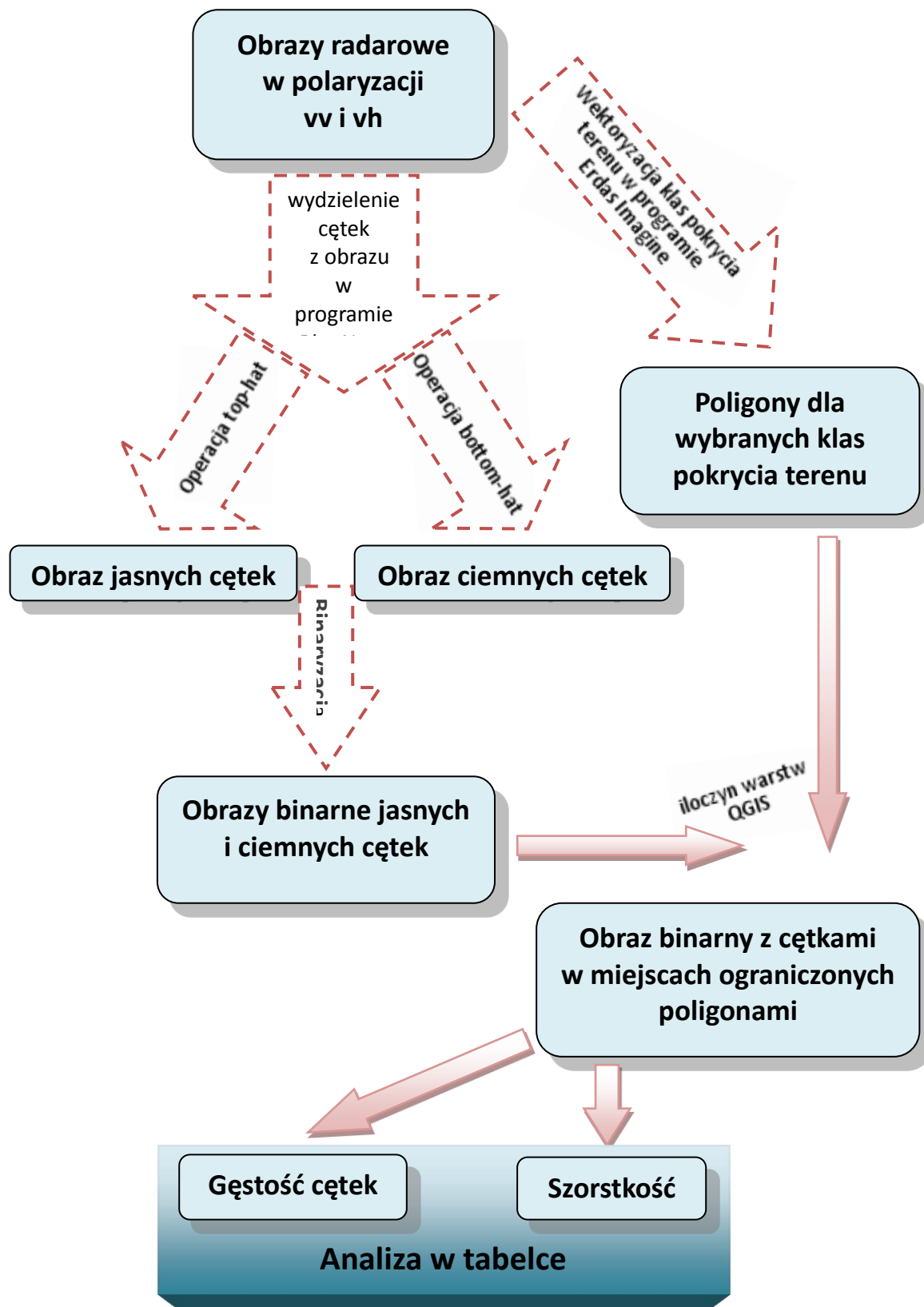
11.1 *Schemat działania*

O filtrach tłumiących cętki i liczbie powstałych algorytmów wspomniano już w rozdziale 7.1. Ogólne oględziny obrazów radarowych wskazują na to, że jasne cętki i ciemne cętki układają się w różne wzory. W rezultacie rozważane są oddzielnie.

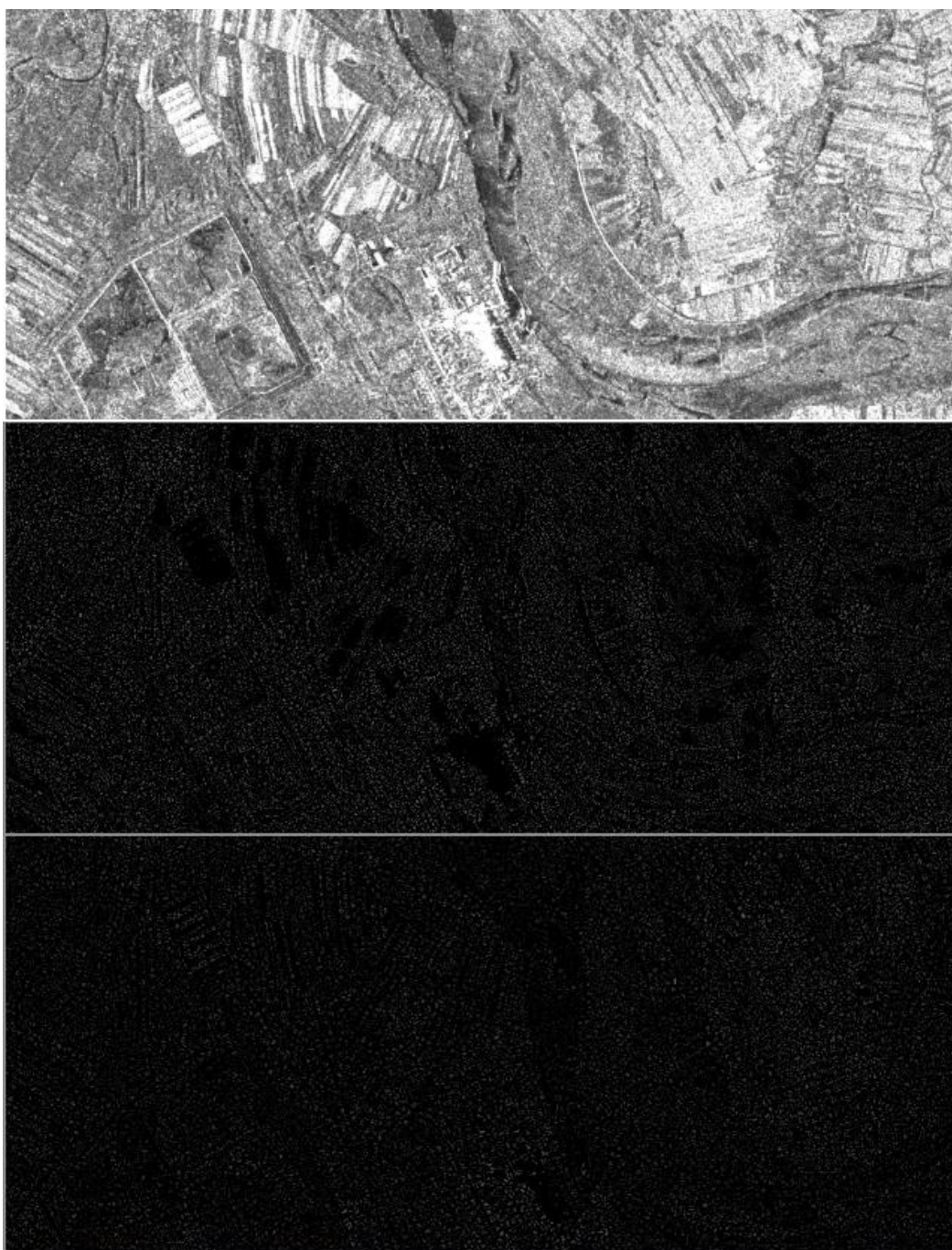
Opierając się na badaniach Xia i Shenga (1996) dotyczących rozważań na temat szumu cętkowego jako nośnika informacji o terenie, wykonano podobne działania w celu poparcia wysnutego przez nich wniosku i postawienia tezy będącej podstawą dalszych badań w tej pracy. Doświadczenie wykonano na danych z okolic Kozienic (Rys.10.1) używając programów BlueNote, Erdas Imagine oraz Quantum GIS 2.2 Valmiera wg schematu przedstawionego na Rys.11.1.

11.2 *Selekcja cętek*

W odróżnieniu od pomysłodawców tego badania, którzy zastosowali filtr medianowy z czterema kierunkowymi ruchomymi oknami, do selekcji cętek wykorzystano operacje morfologiczne. W menu rozwijalnym *Morphology* programu BlueNote można znaleźć opcje *top-hat* i *bottom-hat* (rozd. 9.4). Każda z nich posłużyła do wygenerowania obrazu z samymi cętkami, *top-hat* dla jasnych cętek, a *bottom-hat* dla ciemnych cętek. Po kilku eksperymentach z kształtem elementu strukturującego i jego rozmiarem, do dalszej pracy wybrano obrazy, na których zastosowano kształt elementu *lines on circle* o rozmiarze 6 i zaznaczono opcję *Multi SE* (rozd. 9.3). Efekt wyodrębnienia cętek z obrazu VV przedstawia Rys.11.2.



Rys.11.1 Schemat działania dla badania zawartości informacji w szumie opisanego w rozdz. 11



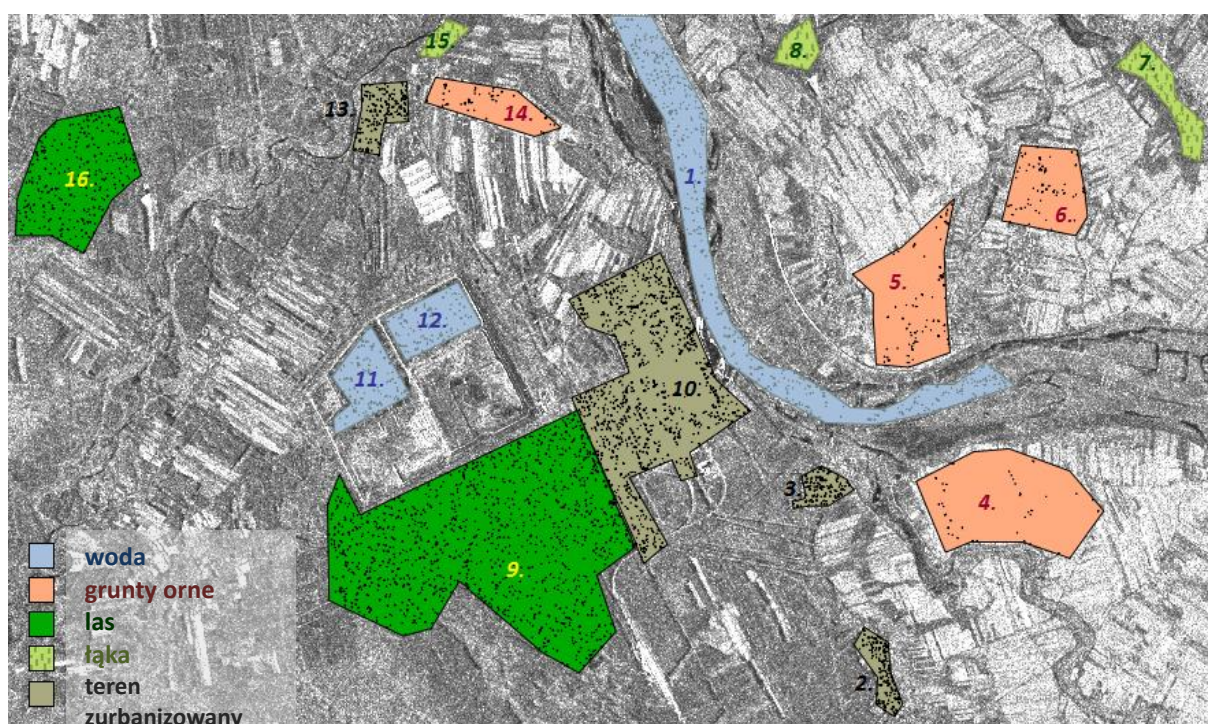
Rys.11.2 *Od góry: fragment obrazu VV, obraz po filtracji cętek:, jasne cętki, ciemne cętki*

Następnie obrazy z wyselekcjonowanymi cętkami przekonwertowano na obrazy binarne (czarne cętki na białym tle).

Po takich operacjach możliwą staje się analiza zależności pomiędzy wzorem cętkowym a typami pokrycia terenu. W takiej wstępnej analizie, gęstość i chropowatość cętek zostaje scharakteryzowana dla wybranych jednolitych obszarów różnych typów pokrycia terenu (XIA, SHENG, 1996).

11.3 Analiza wzoru cętkowego

W celu analizy wzorów cętkowych dla różnych typów terenu, wydzielono 5 klas pokrycia terenu (woda, grunty orne, las, łąka i tereny zurbanizowane), wspomagając się mapą pokrycia terenu z 2006 r. zamieszczoną na oficjalnej stronie projektu Corine Land Cover (clc.gios.gov.pl). Poligony reprezentujące wybrane klasy pokrycia zostały zdigitalizowane w programie Erdas Imagine, a następnie zaimportowane do programu QGIS (Rys.11.3).



Rys.11.3 Wybrane klasy pokrycia terenu. W tle fragment obrazu w polaryzacji VV.

Gęstość cętek:

Dla każdego z obszarów gęstość jest zdefiniowana jako stosunek liczby cętkowanych pikseli do całkowitej liczby pikseli w analizowanym obszarze. Poniżej wzory dla gęstości jasnych, ciemnych i wszystkich cętek (XIA, SHENG, 1996):

$$gęstość_{jasne} = \frac{\sum_{jasne_cętki \in obszar}}{\sum_{piksele \in obszar}} \quad (28)$$

$$gęstość_{ciemne} = \frac{\sum_{ciemne_cętki \in obszar}}{\sum_{piksele \in obszar}} \quad (29)$$

$$gęstość_{wszystkie} = gęstość_{jasne} + gęstość_{ciemne} \quad (30)$$

Tabela 11.1 Wyniki obliczeń gęstości cętek

typ pokrycia	nr poligonu	VH				VV			
		gęstość c	gęstość jc	gęstość cc	$\frac{g_{jc}}{g_{cc}}$	gęstość c	gęstość jc	gęstość cc	$\frac{g_{jc}}{g_{cc}}$
woda	1	0,003	0,003	0,000	-	0,015	0,013	0,002	7,412
woda	11	0,001	0,001	0,000	-	0,020	0,019	0,001	16,951
woda	12	0,001	0,001	0,000	-	0,016	0,015	0,001	22,092
gr. orne	4	0,020	0,014	0,006	2,353	0,014	0,001	0,013	0,085
gr. orne	5	0,024	0,018	0,006	2,809	0,015	0,004	0,011	0,339
gr. orne	6	0,023	0,018	0,005	3,782	0,015	0,005	0,010	0,521
gr. orne	14	0,021	0,016	0,005	3,613	0,010	0,005	0,005	1,050
las	9	0,026	0,022	0,005	4,607	0,014	0,013	0,000	30,600
las	16	0,028	0,023	0,005	4,148	0,012	0,012	0,000	28,700
zabud.	2	0,044	0,037	0,007	5,127	0,078	0,066	0,012	5,511
zabud.	3	0,058	0,051	0,007	7,828	0,084	0,076	0,008	9,155
zabud.	10	0,035	0,024	0,011	2,299	0,035	0,026	0,009	2,833
zabud.	13	0,056	0,045	0,011	4,168	0,059	0,054	0,005	11,188
łąka	7	0,012	0,011	0,001	12,091	0,008	0,008	0,000	18,800
łąka	8	0,006	0,006	0,000	-	0,008	0,008	0,000	-
łąka	15	0,008	0,008	0,000	-	0,032	0,032	0,000	-

W Tabeli 11.1 przedstawiono wyniki dotyczące gęstości cętek w wybranych klasach pokrycia terenu. Jak widać dosyć mocno od reszty klas odcina się woda. Na obrazie VH ciemnych cętek praktycznie nie ma, co skutkuje pustym polem w kolumnie stosunku jasnych cętek do ciemnych. Jasnych cętek też jest niewiele, dlatego całkowita gęstość cętek jest najmniejsza spośród przedstawionych. Na obrazie VV z kolei można wyraźnie wskazać klasę lasu - stosunek jasnych cętek do ciemnych jest tu wyraźnie największy. Dla gruntów ornych ten stosunek jest najmniejszy, więc też można tę klasę wyróżnić z pozostałych. Ogólnie porównując wartości między sobą w obrębie danej klasy widać, że są one dosyć mocno zbliżone. Jedynie tereny zurbanizowane charakteryzują się dużą rozbieżnością wartości - jednak nie powinno to dziwić z racji tego, że takie tereny mają bardzo złożoną strukturę, co na obrazie odzwierciedla wyraźna tekstura. Zazwyczaj jest to mieszanka wszystkich klas - znajdują się tu nie tylko budynki i drogi, ale też zielone podwórka, przydrożne zadrzewienia czy małe przydomowe stawy. Można jednak zwrócić uwagę na to, że tereny zabudowane mają największą gęstość jasnych cętek zarówno na obrazie VV jak i VH. Jedynym odchyleniem w Tabeli 11.1 jest obszar 7, który zupełnie nie pasuje do pozostałych wydzielonych łąk. Faktycznie po sprawdzeniu na ortofotomapie, można zauważyć, że tereny te wizualnie różnią się od siebie znacząco. Można więc stwierdzić, że na obszarze 7 sklasyfikowanym jako łąka (tak jak 8 i 15), występują czynniki, które powodują różnice w wynikach obliczeń zamieszczonych w Tabeli 11.1.

Szorstkość:

Jest to cecha pozwalająca na określenie podobieństwa wartości pikseli cętek w obrębie danego poligonu. Dzięki niej można sprawdzić czy dla kilku klas wartości cętek różnią się między sobą. Im mniejsza jest wartość szorstkości tym bardziej jednorodny jest rozkład cętek w ramach badanego obszaru. Wzór na odchylenie standardowe od wartości cętki służy do czerpania informacji na temat szorstkości cętek w każdym obszarze (XIA, SHENG, 1996):

$$\text{szorstkość} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} \quad (31)$$

gdzie n to liczba cętek na danym obszarze, R_i to wartość radiometryczna cętek z obrazu radarowego, a $\bar{R}$ jest średnią wartością tych cętkowanych pikseli (XIA, SHENG, 1996).

Tabela 11.2 Wyniki obliczeń szorstkości dla obrazów z cętkami

typ pokrycia	nr poligonu	vh jc		vh cc		vv jc		vv cc	
		średnia	szorstkość	średnia	szorstkość	średnia	szorstkość	średnia	szorstkość
woda	1	218,037	43,159	0,000	0,000	240,002	19,732	102,990	25,778
woda	11	221,167	48,161	0,000	0,000	222,613	30,665	73,722	18,484
woda	12	175,714	33,087	0,000	0,000	229,293	24,406	74,700	13,572
gr. orne	4	252,697	5,152	111,680	14,334	249,473	11,555	149,549	22,269
gr. orne	5	251,146	7,802	110,296	17,045	251,354	10,600	138,035	27,077
gr. orne	6	250,732	8,596	112,918	14,269	253,046	4,892	129,047	26,121
gr. orne	14	246,982	12,707	99,754	14,391	246,625	13,513	127,920	27,754
las	9	249,071	9,926	101,451	14,574	218,076	22,864	72,964	13,466
las	16	250,144	8,850	105,101	12,168	214,847	21,563	71,579	14,302
zabud.	2	247,201	13,561	86,914	20,515	251,624	10,285	86,068	21,194
zabud.	3	245,585	16,890	86,767	13,896	248,536	11,737	73,730	23,520
zabud.	10	249,464	11,673	102,567	26,642	246,742	15,101	97,326	29,186
zabud.	13	251,802	8,157	96,216	14,988	248,374	13,583	87,766	20,125
łąka	7	229,103	18,528	80,273	11,402	206,846	23,507	67,000	17,170
łąka	8	196,150	15,461	0,000	0,000	220,588	27,099	0,000	0,000
łąka	15	212,067	24,605	0,000	0,000	226,360	25,018	0,000	0,000

W Tabeli 11.2 zamieszczono wyniki obliczeń szorstkości dla obrazów cętek. Do analizy można wykorzystać zarówno średnią wartość cętkowanych pikseli w obrębie poligonu jak i obliczoną szorstkość. Patrząc na te wartości na pewno można swobodnie wskazać klasę gruntów ornych na podstawie obrazu vv_{cc}. Średnia dla tej klasy jest najwyższa i osiąga wartości ponad 120. Żadna inna klasa w tej kolumnie takich wartości nie osiąga. Dla innych poligonów wyniki są zbliżone do siebie (np. średnia dla klasy gruntów ornych i terenów zurbanizowanych na obrazie vv_{jc}). Jednak zestawiając te wyniki z wynikami z Tabeli 11.1, można po krótkiej analizie łatwo wyróżnić większość wybranych klas. Wartości zerowe oznaczają, że w obrębie danego poligonu w ogóle nie zaobserwowano szumu cętkowego.

Przeprowadzone badania potwierdzają tezę o zależności rozkładu cętek na obrazie radarowym od typów pokrycia lub użytkowania terenu, związanym z deterministycznym charakterem szumu cętkowego. Można więc podjąć dalsze badania w celu lepszego rozpoznania tematyki szumu cętkowego.

12. Badanie szumu cętkowego

Doświadczenie z poprzedniego rozdziału pokazało, że szum cętkowy jest szumem deterministycznym. Dalsze badania mają na celu udowodnienie, że wykorzystanie cętek może poprawić jakość klasyfikacji pokrycia terenu.

12.1 Schemat pracy

Poniżej znajduje się wypunktowany schemat działań, które wykonano, by potwierdzić tezę oraz zrealizować postawiony cel (Rys.12.1).

1. Filtracja cętek na obrazach radarowych.
2. Wydzielenie jasnych i ciemnych cętek na osobnych obrazach.
3. Stworzenie map granulometrycznych cętek.
4. Stworzenie kompozycji barwnych w celu wizualnego porównania.
5. Wybranie pól treningowych dla 5 klas pokrycia terenu.
6. Pozyskanie wartości pikseli dla wybranych próbek z 4 kompozycji barwnych z mapami cętek w kanale *Blue* (dla RGB), obrazem *vv* w *Red* i obrazem *vh* w *Green*.
7. Porównanie pozyskanych wartości (pkt. 6) pod względem wpływu map granulometrycznych na rozróżnialność w obrębie danej klasy pokrycia terenu.
8. Analiza próbek ze względu na rozkład chmur punktów z map granulometrycznych na osi *z*.
9. Porównanie chmur punktów różnych klas pokrycia terenu.
10. Wykonanie klasyfikacji pokrycia terenu metodą ISODATA.
11. Porównanie ilościowe efektów klasyfikacji.
12. Wnioski z przeprowadzonych badań.

Celem badań było sprawdzenie, w jakim stopniu wykorzystanie szumu cętkowego poprawi jakość klasyfikacji pokrycia terenu. W tym doświadczeniu wykorzystano zarówno obrazy w polaryzacji VV i VH okolic Koźienic (Rys.10.1) jak również obraz HH okolic Warszawy (Rys.10.2).

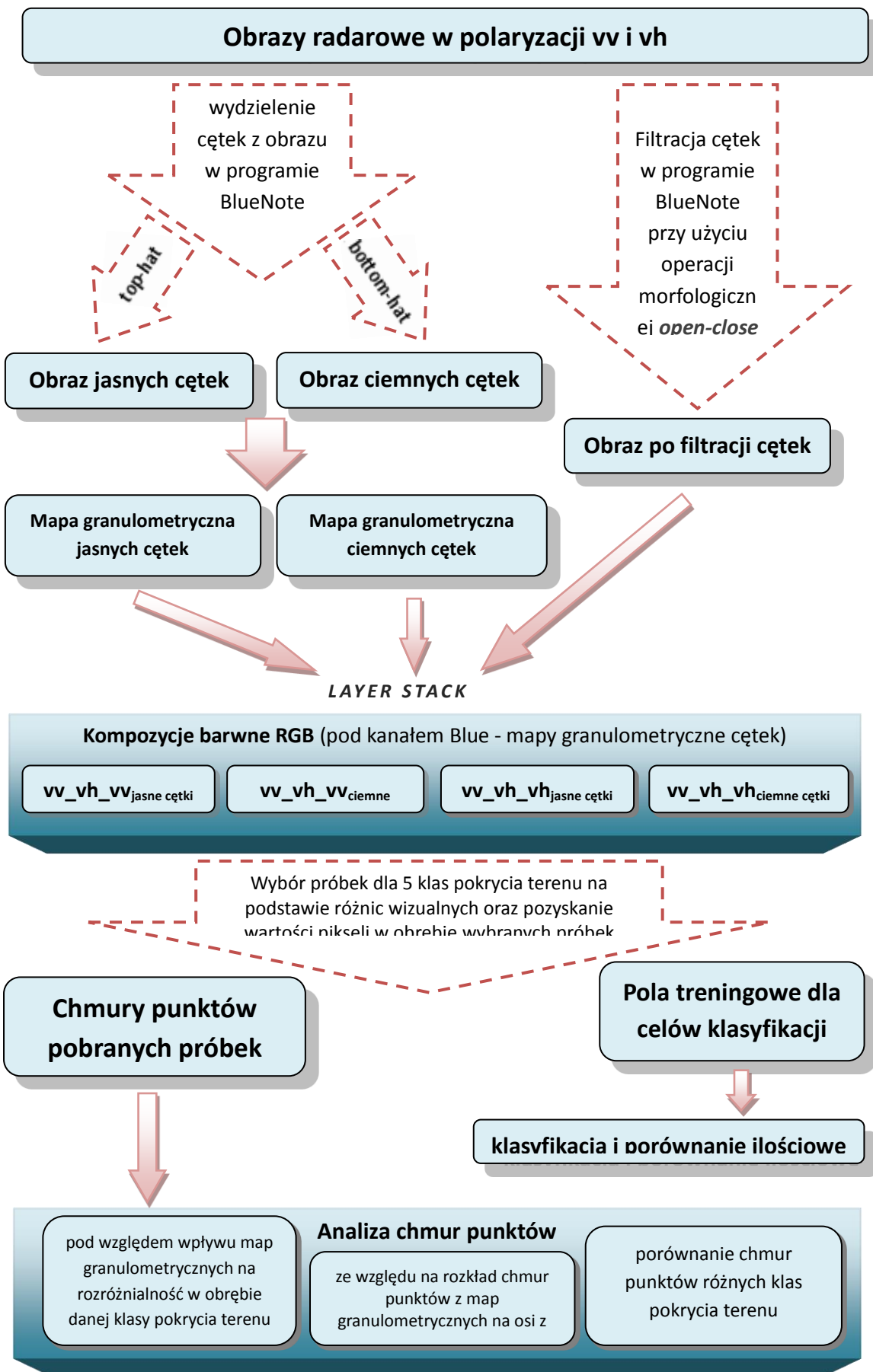
Filtrację cętek przeprowadzono w celu sprawdzenia, jakie informacje zawierają podstawowe obrazy radarowe. Cętki zostały w ten sposób potraktowane jako szum, a tak przetworzone obrazy zostały pierwszym zestawem danych poddanym późniejszej analizie porównawczej.

Drugi zestaw danych miał się składać z informacji podstawowych wzbogaconych o te zawarte w szumie cętkowym. W tym celu operacjami morfologicznymi wyselekcjonowano cętki (dla każdego obrazu jasne i ciemne). Można stwierdzić, że efektem były obrazy cętek, które usunięto podczas pierwszego etapu badania czyli filtracji.

Jako, że szum ma charakter punktowy, to następnym krokiem było uzyskanie obrazów, w których wartości pikseli mają charakter kontekstowy. Osiągnięto to dzięki przetworzeniom granulometrycznym. Mapy granulometryczne jasnych i ciemnych cętek wchodziły w skład drugiego zestawu danych. W ten sposób dla obrazów radarowych z satelity TerraSAR-X otrzymano dwuwarstwowy zestaw podstawowy (odszumione obrazy VV i VH) oraz wzbogacony o informacje zawarte w cętkach zestaw sześciowarstwowy (odszumione obrazy VV i VH oraz mapy granulometryczne jasnych i ciemnych cętek z obrazów VV i VH). Natomiast dla obrazu z satelity TanDEM-X otrzymano jednowarstwowy zestaw podstawowy (odszumiony obraz HH) oraz trzywarstwowy zestaw danych wzbogaconych o informacje zawarte w cętkach (odszumiony obraz HH oraz mapy granulometryczne jasnych i ciemnych cętek z obrazu HH).

Takie zestawy danych pozwoliły na podjęcie działań prowadzących do analiz porównawczych. Po porównaniu wizualnym kompozycji barwnych wybrano pola treningowe dla wybranych 5 klas pokrycia terenu. Dla wybranych próbek pozyskano wartości pikseli w celu zwizualizowania chmur punktów, które porównano później w programie CloudCompare.

Na koniec wykonano klasyfikacje pokrycia terenu dla wszystkich zestawów danych i porównano z polami testowymi dla danego obszaru. W celu uzyskania wyników liczbowych jakości klasyfikacji wykonano analizę ilościową dla wszystkich zestawów danych.



Rys.12.1 Metodyka działania wg której wykonano badania szumu cętkowego.

Czynności od 1 do 3, zgodnie z metodyką pracy przedstawioną w rozdziale 12.1, zostały przeprowadzone w programie BlueNote, przy wykorzystaniu wiedzy opisanej w rozdziale 9. Wykonując czynności od 4 do 6 posłużono się programem Erdas Imagine. Niektóre czynności techniczne przeprowadzono w programie QGIS Valmiera 2.2. Resztę działań dotyczących analiz porównawczych wykonano w programie CloudCompare.

12.2 Operacje morfologiczne

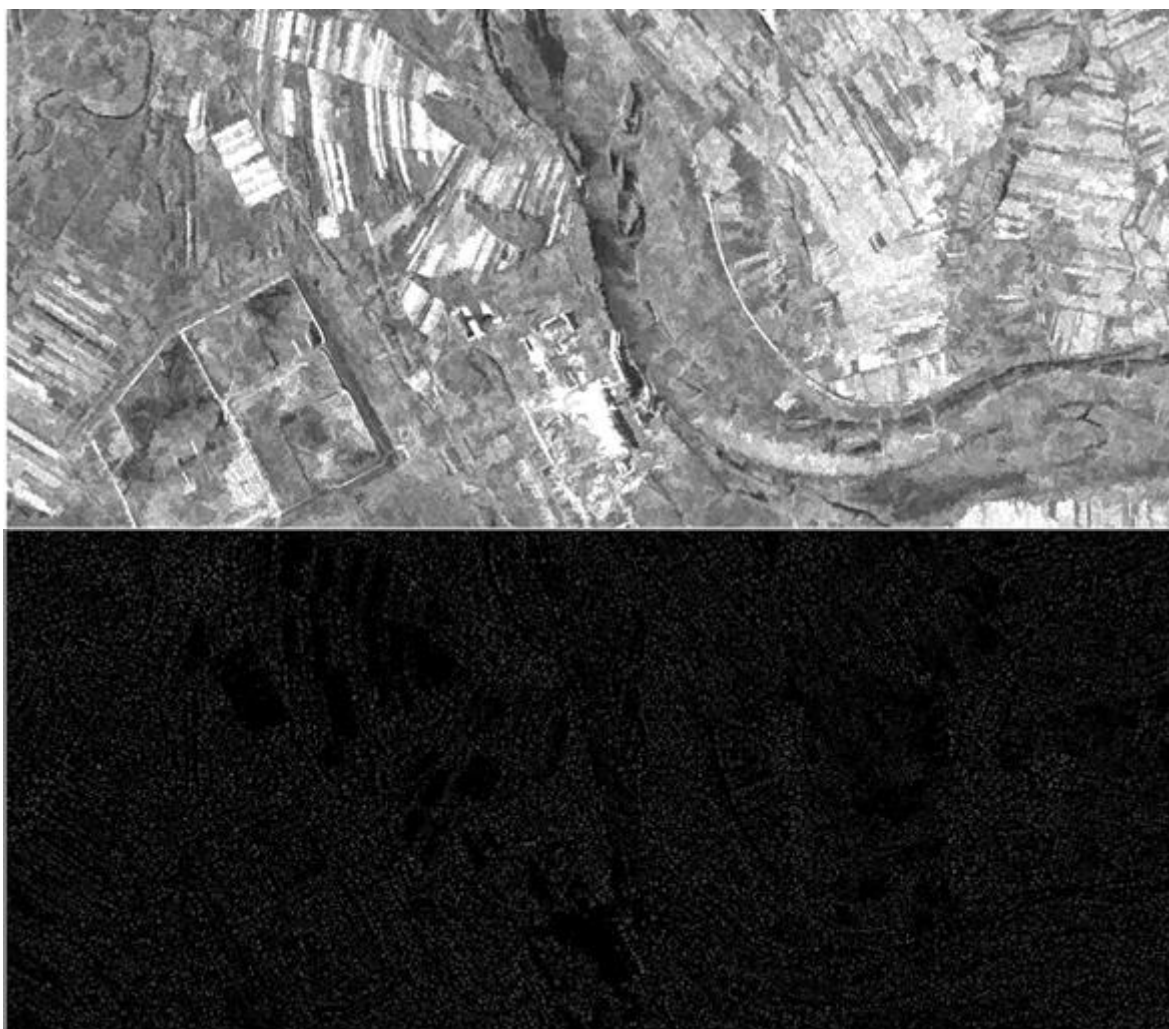
Pierwszym etapem było usunięcie cętek z oryginalnych obrazów, jak również wyodrębnienie ich na osobnym obrazie w celu stworzenia mapy granulometrycznej. Na tym etapie czynności wykonano w programie BlueNote.

Do filtracji obrazów użyto filtru naprzemiennego otwarcie-domknięcie (*open-close*) z wielokrotnym elementem strukturującym. Po kilku próbach ustalono kształt elementu: *lines on circle* o rozmiarze 6 i zaznaczono opcje *Multi SE* i *by reconstruction*, co oznacza, że operacje zostały wykonane nie w podejściu klasycznym a przez rekonstrukcję. Tak przefiltrowane zostały oba obrazy: i VV, i VH (Rys.12.2).



Rys.12.2 Fragment obrazu VH przed i po filtracji

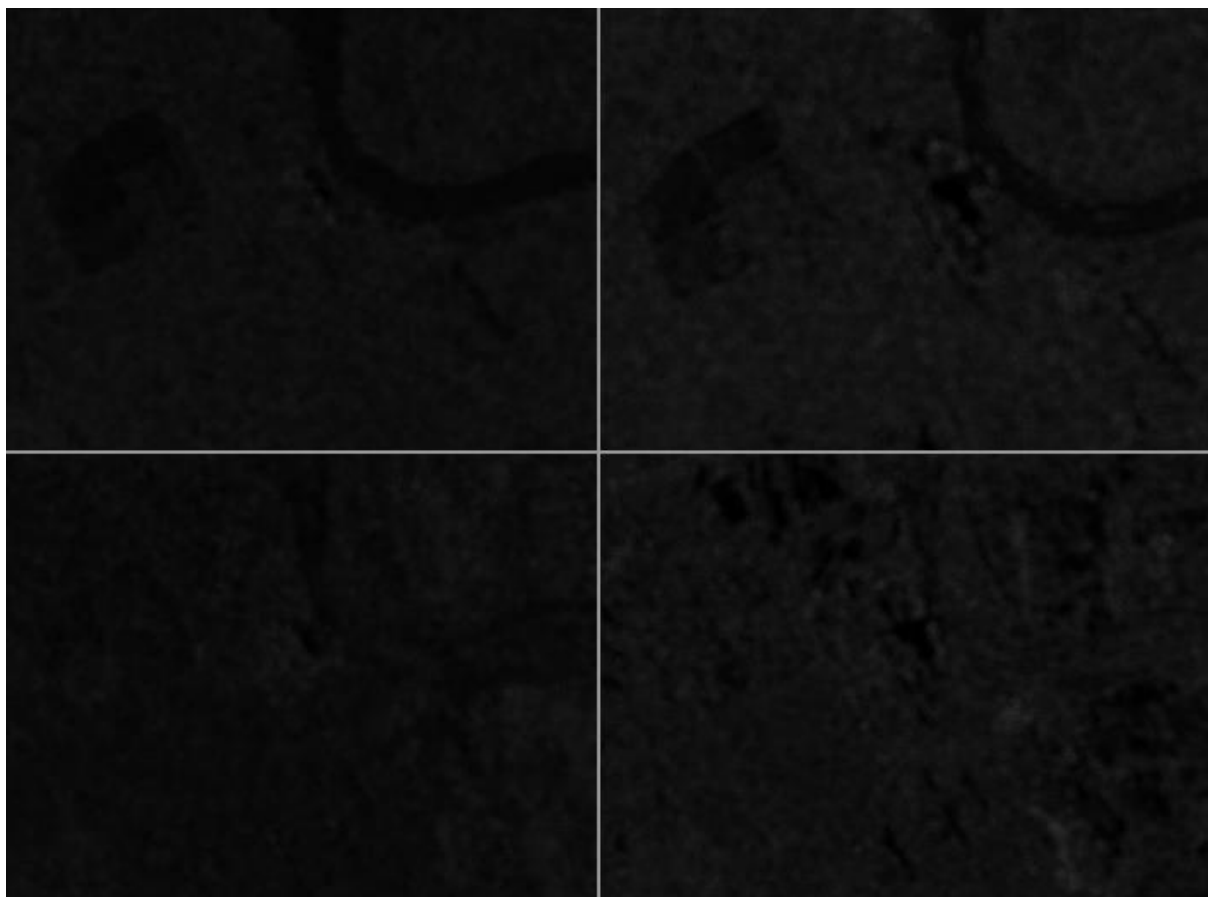
Kolejnym krokiem było wydzielenie z obrazów ciemnych i jasnych cętek, co zrobiono już na potrzeby doświadczenia opisanego w rozdziale 10. Do dalszej pracy użyto więc wygenerowanych już wcześniej obrazów z cętkami (Rys.12.3).



Rys.12.3 Fragment obrazu VV po przetworzeniach, od góry: obraz po filtracji cętek, jasne cętki

Ostatnim etapem działań w programie BlueNote było stworzenie mapy granulometrycznej (Rys.12.4) na podstawie obrazów wyodrębnionych cętek. „Biorąc pod uwagę punktowy charakter cętek, nie ma sensu obliczanie map granulometrycznych przy użyciu elementu strukturującego o rozmiarze większym niż 1. Po otwarciu takim elementem nie zostanie już nic do usunięcia elementem o większym rozmiarze” (KUPIDURA i in., s. 108). Jeśli zaś chodzi o rozmiar okna granulometrycznego, czyli określenie sąsiedztwa danego piksela, to w tym przypadku „dobrym wyborem będą mapy granulometryczne o oknie granulometrii

o promieniu 15. Zastosowanie mniejszego okna granulometrii powoduje bowiem zbyt punktowy charakter uzyskanej informacji, natomiast większe okno granulometrii prowadzi do jej zbyt dużego rozmycia” (KUPIDURA i in., s. 110).

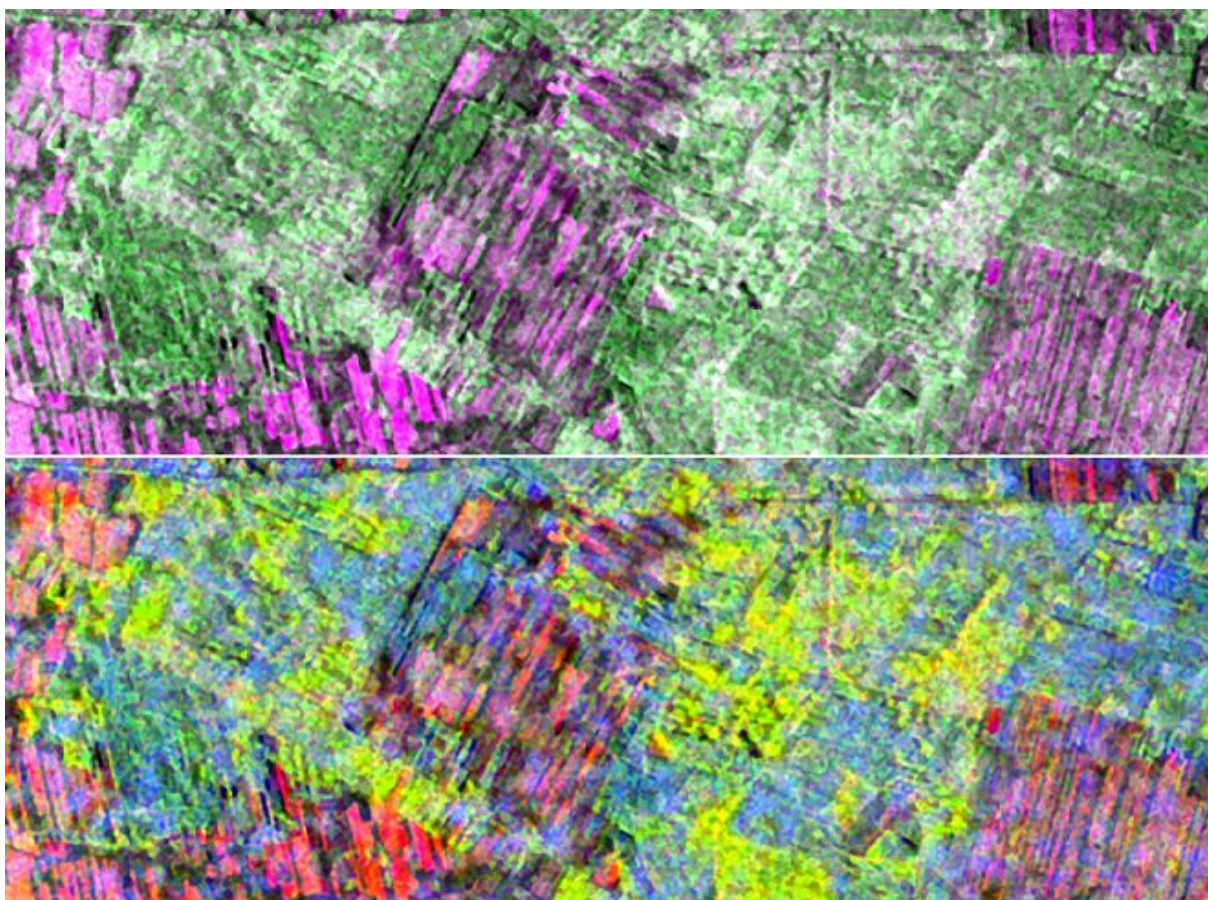


Rys.12.4 Fragment mapy granulometrycznej dla obrazów VH (na górze) i VV (na dole), wygenerowanej dla ciemnych cętek (z lewej) i jasnych cętek (z prawej)

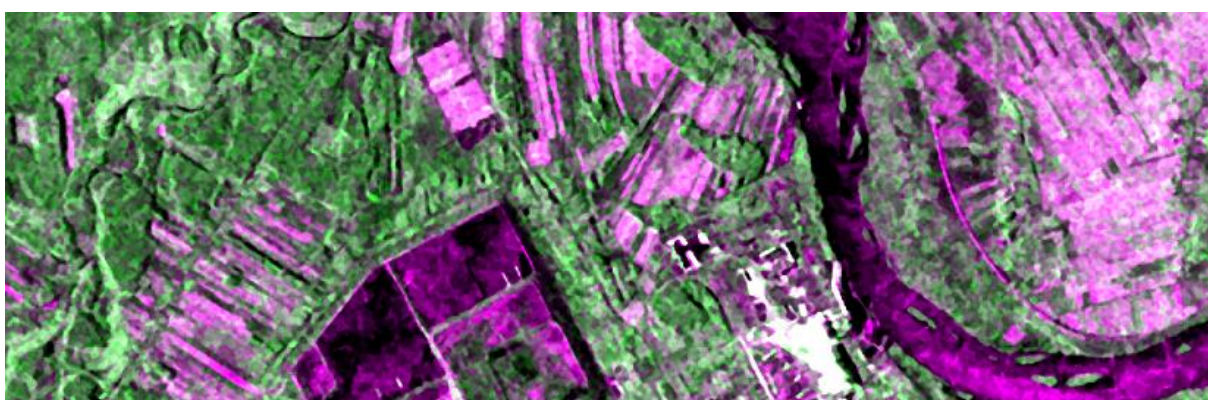
12.3 Ocena wizualna obrazów

Ocenę wizualną danych radarowych przeprowadzono w programie Erdas Imagine. Mając odfiltrowane obrazy radarowe oraz mapy granulometryczne, zastosowano opcję *layer stack* znajdującą się w module *Interpreter*, w celu stworzenia kilku kompozycji barwnych RGB. W dalszej części pracy dla map granulometrycznych cętek zastosowano nazewnictwo vvjc, vvcc, vhhc i vvcc.

Jak pokazuje Rys.12.6 kompozycja vv_vh_vv utrzymana jest w tonacji zielono - fioletowo - różowej. Dodanie map granulometrycznych cętek do kompozycji barwnej ułatwia analizę obrazu już na poziomie wizualnym.



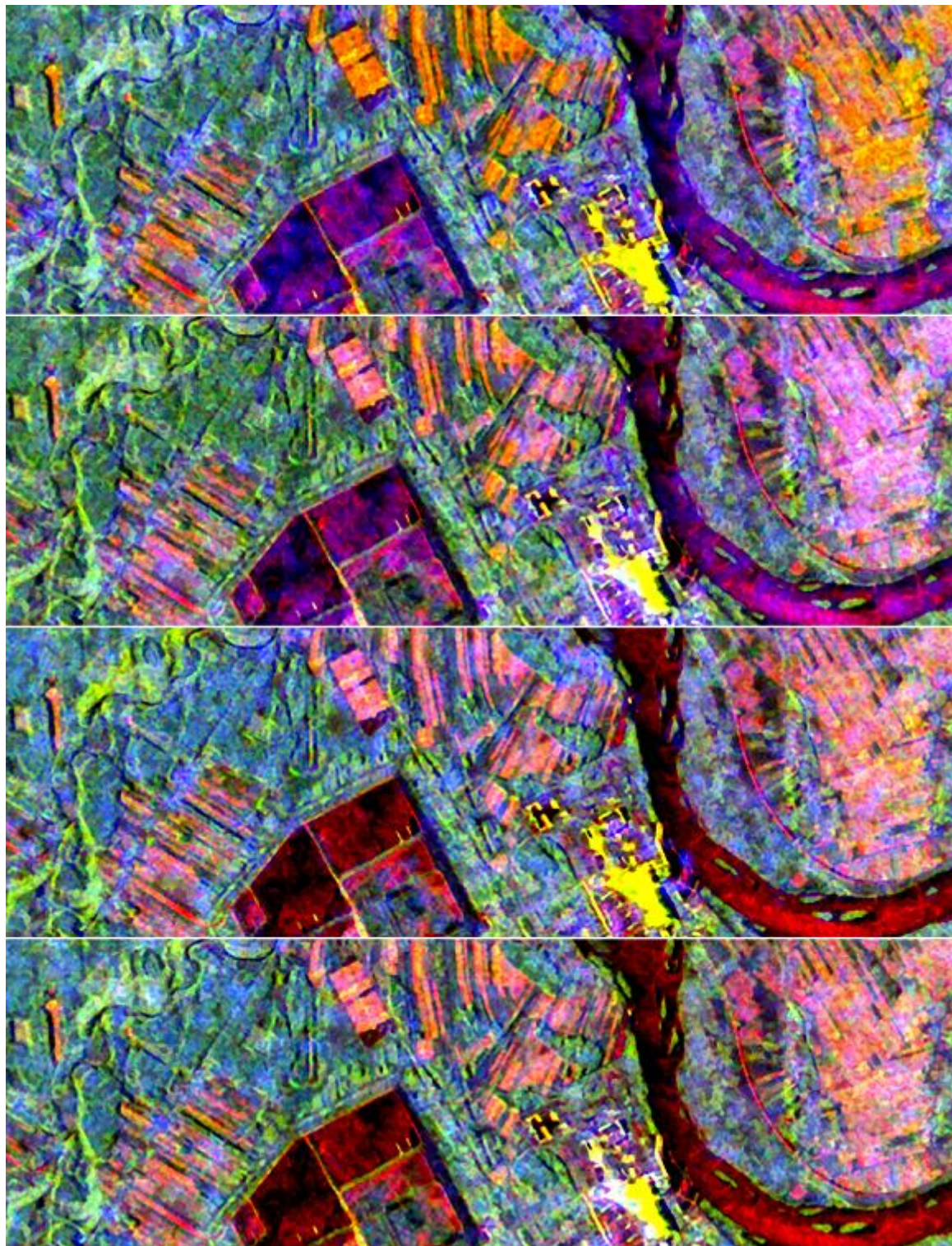
Rys.12.5 Wyraźne różnice barwne na terenach zalesionych na kompozycjach RGB, od góry: vv_vh_vv, vv_vh_vhjc



Rys.12.6 Przykład kompozycji barwnej RGB vv-vh-vv

Na fragmentach z mapami granulometrycznymi (Rys.12.7) widać większe zróżnicowanie kolorystyczne. Już sam ten fakt daje do myślenia. Zmiany układu warstw w obrębie kanałów RGB pokazuje, że przy różnych kombinacjach można o wiele łatwiej wyodrębnić niektóre

klasy pokrycia terenu. Na terenach zalesionych widać wyraźne zmiany barwne (Rys.12.5). Co więcej, obszary pól już nie wyglądają jak różowe plamy. Można rozróżnić wiele fragmentów o zmiennym nasileniu np. barwy pomarańczowej, żółtej, różowej i kilku innych.



Rys.12.7 Przykład kompozycji barwnych RGB od góry: vv-vh-vvjc, vv-vh-vvcc, vv-vh-vhjc, vv-vh-vhcc

12.4 Klasy pokrycia terenu - wybór i analiza próbek

Na podstawie oceny wizualnej wybrano po kilka próbek dla pięciu rodzajów pokrycia terenu. W pracy zamieszczono tylko najbardziej reprezentatywną część z nich. Poniżej znajduje się opis każdej z tych klas oraz wybrane próbki, ich odzwierciedlenia na ortofotomapie i analiza pozyskanych danych.

W celu pozyskania wartości pikseli dla wybranych próbek użyto funkcji *Profile Tools* z menu *Raster* (Erdas Imagine), a następnie po zaznaczeniu próbki wybrano opcję *View Tabular Data*. Te czynności wykonywano na pliku, który składał się ze wszystkich 6 warstw. To pozwoliło na uzyskanie odpowiedniej porównywalności ze względu na pozyskanie danych ze wszystkich warstw (zarówno obrazów VV i VH, jak i map granulometrycznych cętek) dla tej samej próbki. Rys.12.8 przedstawia znaczniki, które są umieszczone w rogu każdego wykresu chmur punktów. Ułatwiają one określenie rodzaju zestawienia obrazów poddanego analizie. Pod obrazkami zastosowano również opisy mające postać: *oś pozioma_oś pionowa*.

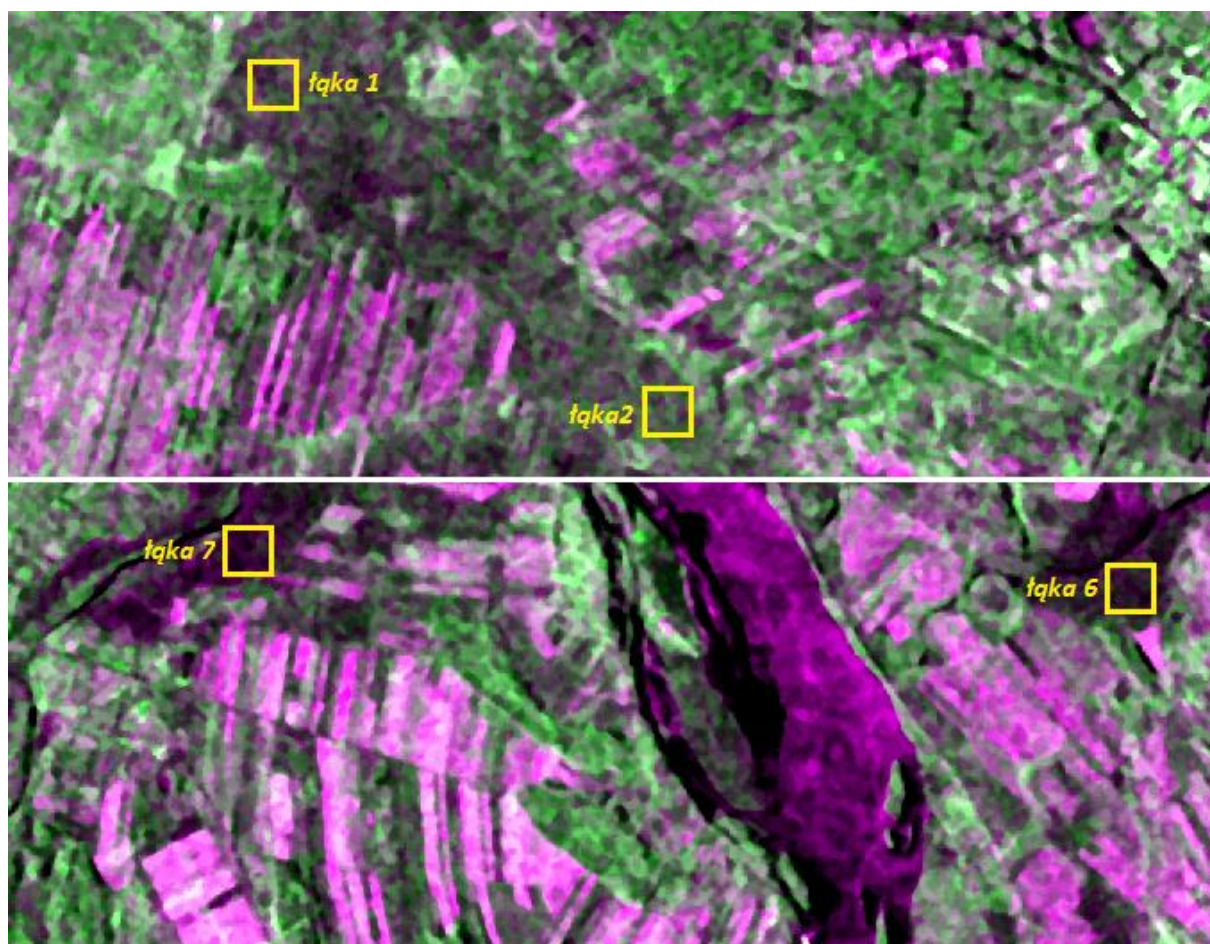


Rys.12.8 Znaczniki osi z programu Cloud Compare; oś czerwona - vv, oś zielona - vh, oś niebieska - jedna z map granulometrycznych cętek (vvjc, vvcc, vhcj, vhcc)

12.4.1 Łąki

Według definicji łąka jest bezdrzewnym zbiorowiskiem roślinnym tworzoną przez byliny ze znacznym udziałem traw. Stosowane są różne kryteria przy definiowaniu i wyodrębnianiu łąk odwołujące się do składu i struktury pokrywy roślinnej (SZWEYKOWSKA, SZWEYKOWSKI, 2003), sposobu użytkowania i funkcjonowania w krajobrazie. W szerokim znaczeniu termin obejmuje wszelkie formacje trawiaste występujące na Ziemi, w tym stepy i sawanny (ROGAŁSKI, 2004). Łąki i pastwiska zwykle określa się mianem użytków zielonych.

Rys.12.9 przedstawia miejsca, które wybrano do analizy porównawczej w obrębie klasy pokrycia „łąki”. Na Rys.12.10 z kolei widać jak wybrane miejsca różnią się barwnie między sobą, ale też w ramach danej próbki przy zmianie kompozycji barwnej. Zastosowane oznaczenia wskazują na to, że podstawą każdej wykorzystanej do porównania kompozycji RGB jest obraz VV w kanale *Red* i obraz VH w kanale *Green*. Pod kanał *Blue* są kolejno podstawiane obrazy: VV, oraz mapy granulometryczne jasnych cętek z obrazu VV (vvjc), ciemnych cętek z obrazu VV (vvcc), jasnych cętek z obrazu VH (vhjc) i ciemnych cętek z obrazu VH (vhcc). W dalszej części pracy użyto tych samych oznaczeń. Rys.12.11 pokazuje jak wybrane miejsca wyglądają na ortofotomapie (odczyt z geoportal.gov.pl z dn. 14.04.2014).



Rys.12.9 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy pokrycia „łąki”

	vvvh-	vv	vvjc	vvcc	vhjc	vhcc
łąka 1						
łąka 2						
łąka 6						
łąka 7						

Rys.12.10 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek łąk w zależności od kompozycji barwnej



Rys.12.11 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie (źródło: www.geoportal.gov.pl)

Następnym zadaniem była analiza porównawcza wybranych próbek pod względem wpływu użycia map granulometrycznych cętek na rozróżnialność w obrębie danej klasy pokrycia terenu. W tym celu pozyskane dane przeanalizowano w programie CloudCompare.

Na początku wykonano zestawienie wszystkich pobranych próbek dla danej klasy pokrycia terenu. Dla klasy łąk zestawienie w zależności vv (oś pozioma) do vh (oś pionowa), czyli takie, w którym nie wykorzystuje się cętek, przedstawia Rys.12.12a.

Na zestawieniu vv-vh da się całkiem sprawnie oddzielić grupę próbek 1 i 2 (zielona i czerwona) od grupy próbek 6 i 7 (różowa i żółta). Jednak między sobą punkty są wyraźnie pomieszane i gdyby nie kolory, nie dałoby się ich rozróżnić.

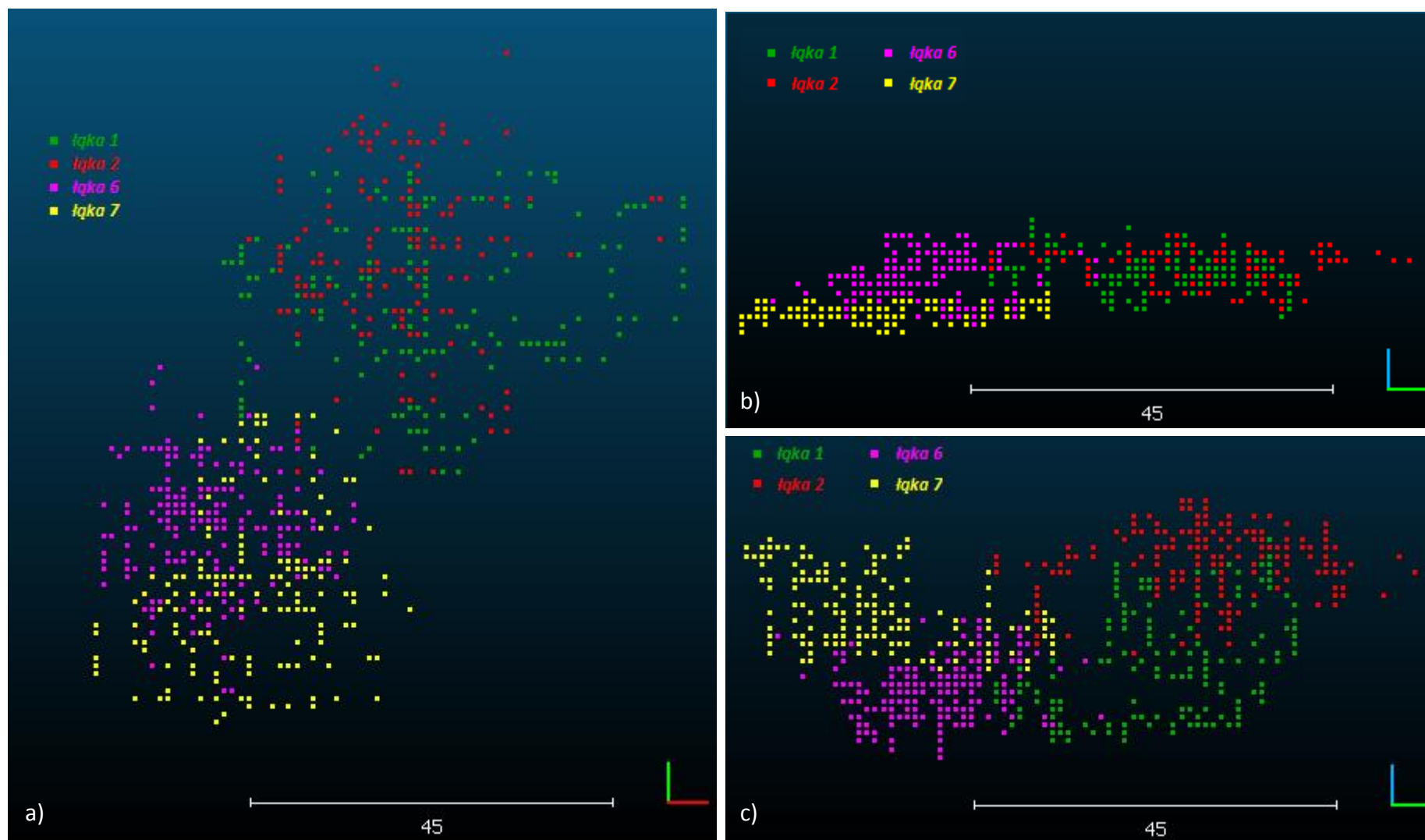
Rys.12.12 pokazuje porównanie chmur punktów danych podstawowych i przykładów danych wzbogaconych o mapy granulometryczne cętek. Te drugie dość znacząco wpływają na rozróżnialność próbek. Nie wszystkie zestawienia przydają się do rozróżniania zmieszanych na obrazie vv-vh próbek. Jednak przykłady na Rys.12.12b i 12.12c ze składową vvcc i vvjc pokazują, że próbki 1 i 2 da się odróżnić tak samo jak próbki 6 i 7. Próbką żółtą wyraźnie odbiega od reszty punktów na Rys.12.12c. W zestawieniach z mapami granulometrycznymi z obrazu vv udaje się rozróżnić poszczególne próbki, które wcześniej na zestawieniu vv-vh były ze sobą mocno pomieszane. Dla klasy łąk cętki z obrazu vh nie wnoszą żadnych zmian w rozróżnialności.

11.4.2 Grunty orne

Do gruntów ornych zalicza się grunty:

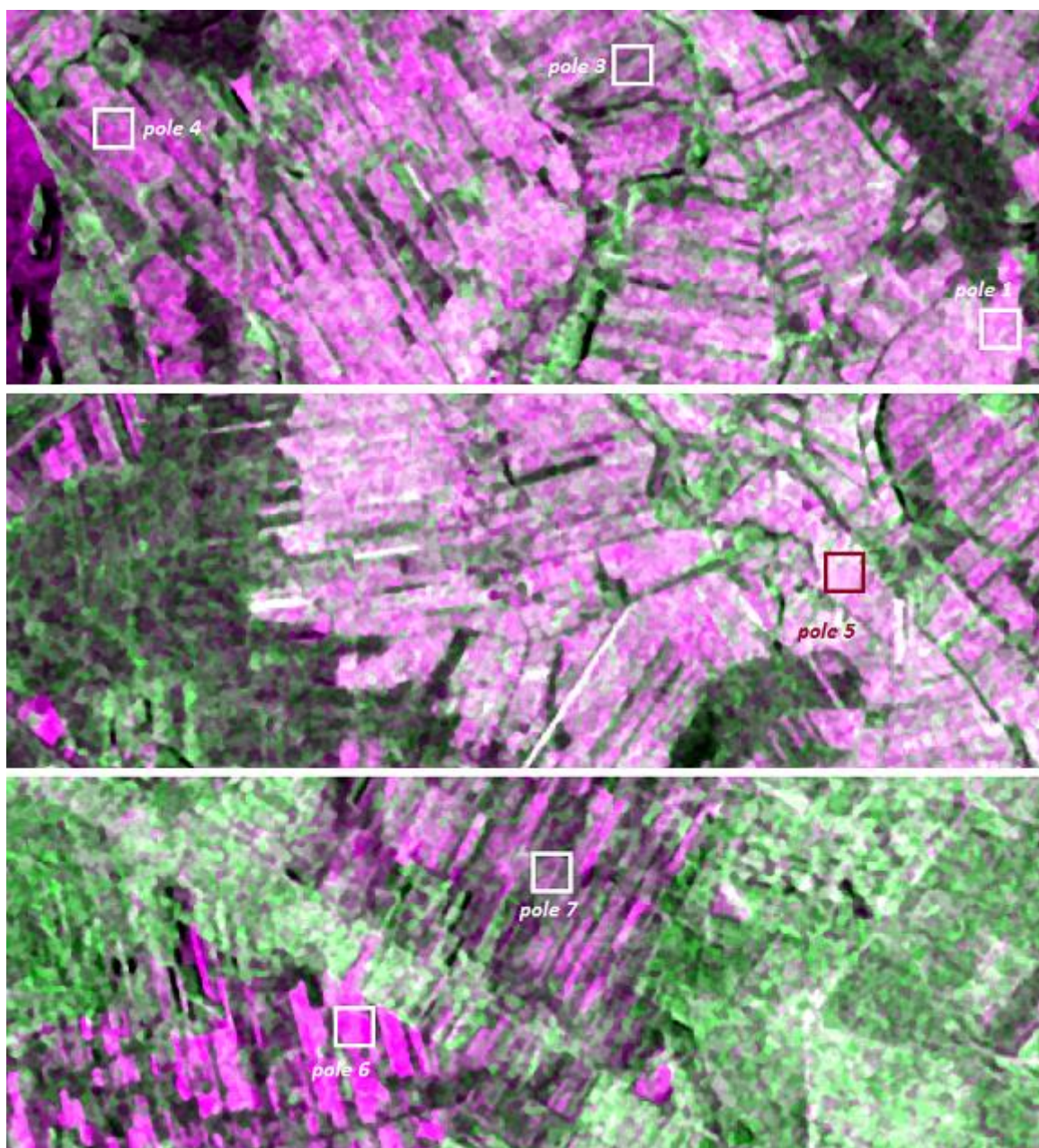
- a) poddane stałej uprawie mechanicznej mającej na celu produkcję ziemiopłodów rolniczych lub ogrodniczych, w tym grunty, na których urządzone zostały ogrody działkowe oraz szklarnie i inspekty,
- b) nadające się do uprawy, o której mowa pod lit. a), ale zajęte pod plantacje chmielu, wikliny, drzew (np. choinek) oraz szkółki drzew ozdobnych i krzewów,
- c) ugory, odłogi (ROZP. Z DN. 29.03.2001 R. W SPRAWIE EGIB).

Zarówno łąki jak i grunty orne w klasyfikacji ogólnej pokrycia terenu zalicza się do terenów rolnych.



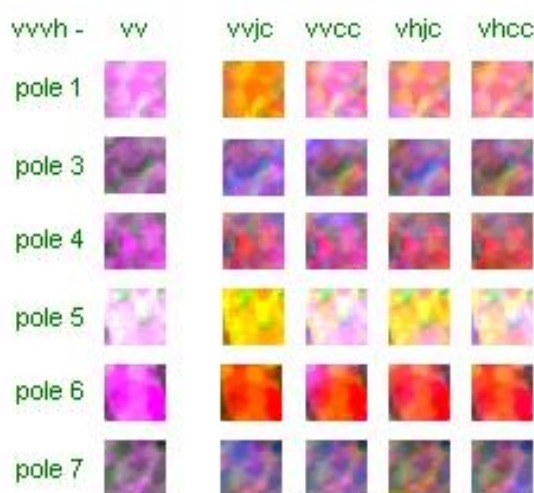
Rys.12.12 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy lqk: a) vv-vh, b) vh-vvcc, c) vh-vvjc

Rys.12.13 wskazuje miejsca, z których zostały pobrane próbki obrazu dla klasy gruntów ornych. Zazwyczaj przy interpretacji zdjęć pod względem pokrycia terenu, należy mieć szeroką wiedzę na temat upraw rolniczych - jakie rośliny sieje się w których miesiącach i kiedy rolnik zbiera plony i zostawia puste pole. Tutaj problem o tyle jest rozwiązany, iż zdjęcia radarowe pochodzą z listopada i jest to miesiąc, w którym upraw na polach nie ma. Można więc stwierdzić, że pobrane próbki dla klasy gruntów ornych w tym przypadku dotyczą gleby odkrytej.



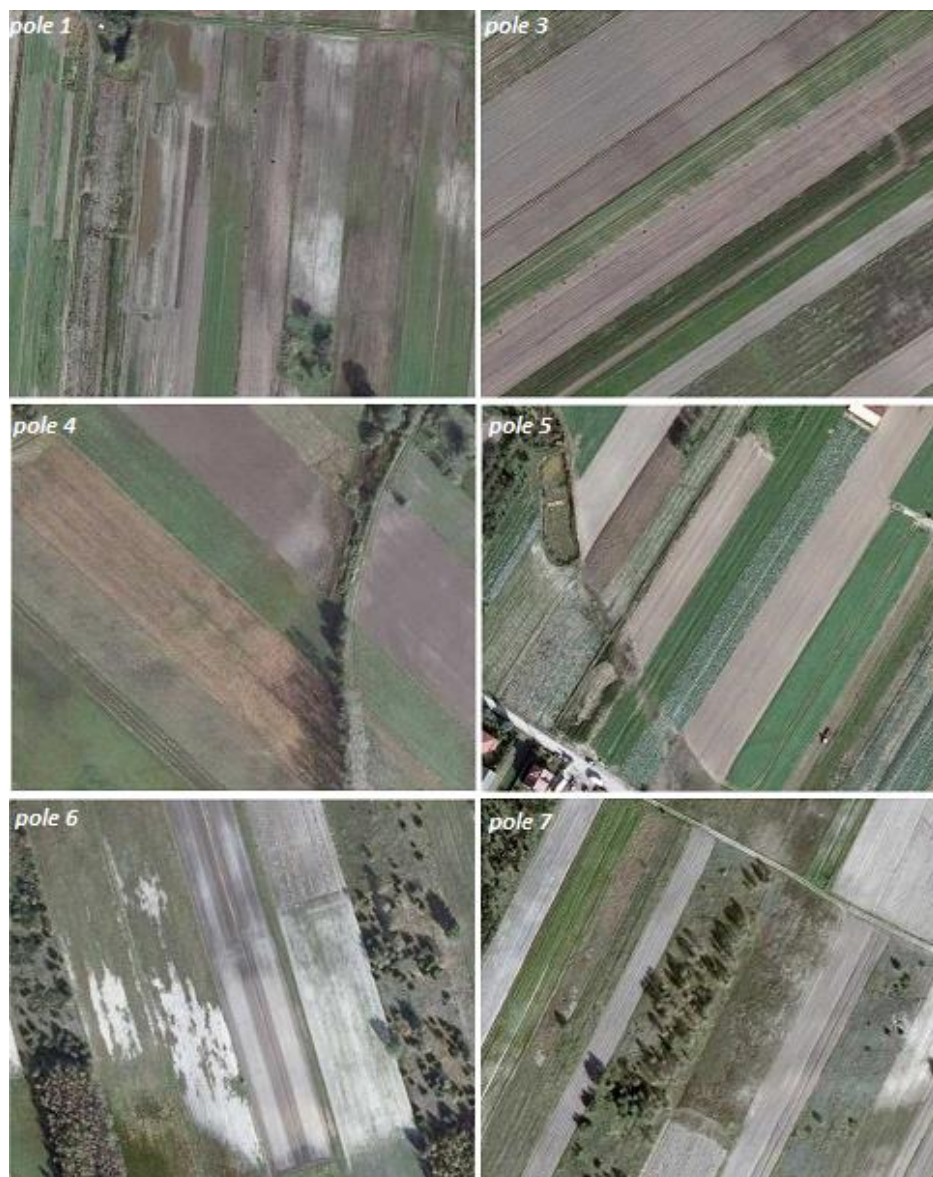
Rys.12.13 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy pokrycia „grunty orne”

Tak jak poprzednio dla klasy łąk, tak i dla próbek gruntów ornych wykonano zestawienie porównawcze zróżnicowania barwnego w zależności od kompozycji barwnej (Rys.12.14). Porównując niektóre próbki można zauważyć różnice barwne wyraźniejsze niż w przypadku klasy łąk. Kontrasty widać również w obrębie tych samych próbek dla różnych kompozycji barwnych. Oceniając je wizualnie, na przykład próbki 1 i 6 w kompozycji vvvh_vv mają zbliżony do siebie odcień różu, natomiast w kompozycji vvvh_vvcc próbka 6 ma wyraźne pomarańczowo czerwone zabarwienie podczas gdy próbka 1 pozostaje przy odcieniu różowym.



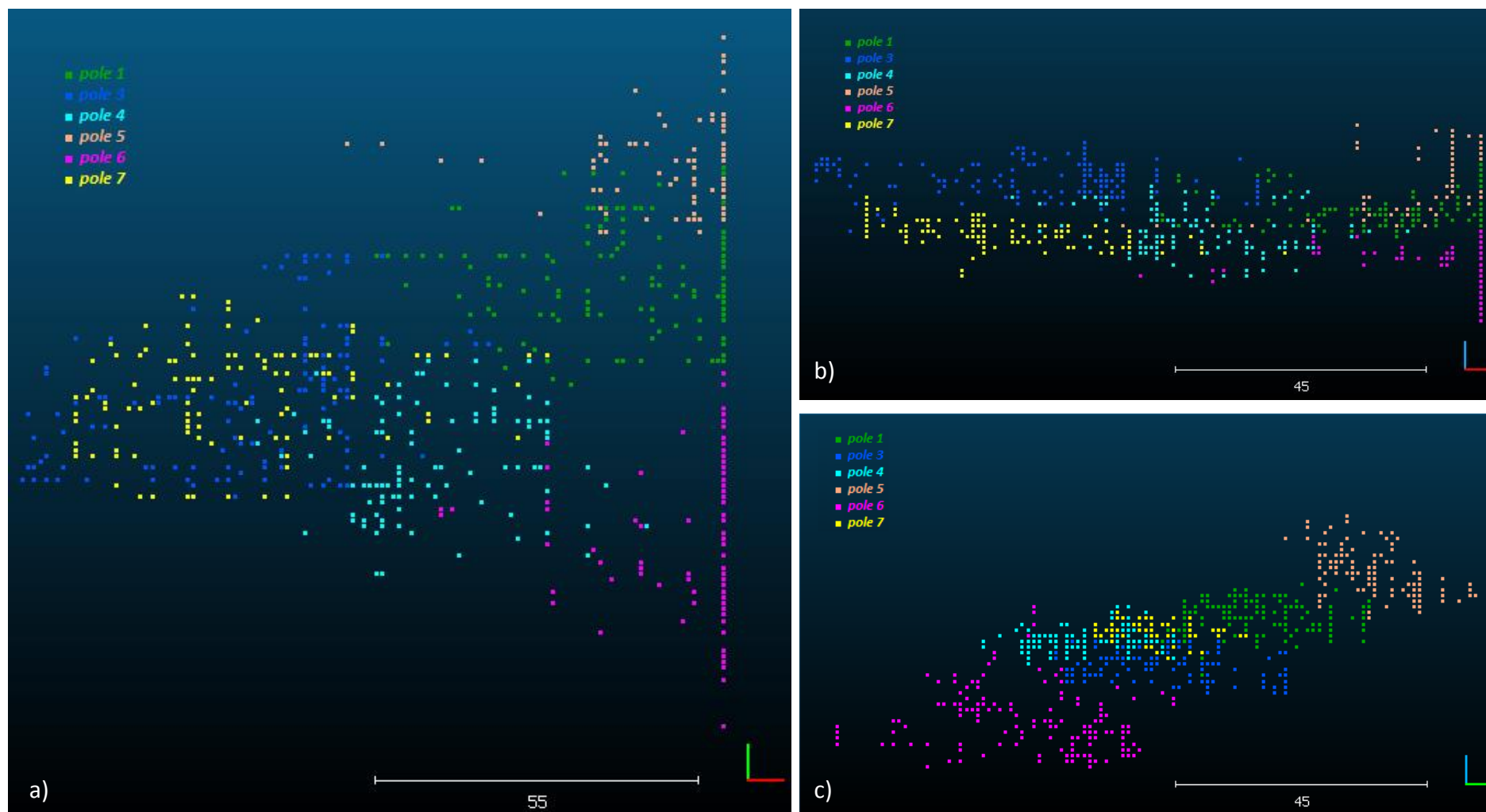
Rys.12.14 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek gruntów ornych w zależności od kompozycji barwnej

Rys.12.15 pozwala porównać wygląd wybranych próbek na ortofotomapie. Niestety, data wykonania zdjęć wykorzystanych do stworzenia ortofotomapy różni się od daty wykonania obrazów radarowych. Jak już wspomniano wcześniej, w listopadzie grunty orne można uznać za glebę odkrytą, gdyż plony zostały zebrane i roślin na polach już nie ma, natomiast na Rys.12.15 widać zielone płyty ziemi. Z powodu takich różnic rysunek ten ma charakter poglądowy i jego celem jest raczej zwrócenie uwagi na orientację pól oraz ich rozmieszczenie i rozdrobnienie.



Rys.12.15 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie (źródło: www.geoportal.gov.pl)

Na zestawieniu vv-vh próbek gruntów orných (Rys.12.16a) widać jak bardzo zróżnicowana jest ta klasa pokrycia terenu. Próbkki są bardzo rozrzucone i każda praktycznie znajduje się w innym miejscu chmury punktów. Piksele żółte i niebieskie mieszają się ze sobą i nie da się wyodrębnić jednoznacznie żadnej z próbek, do której należą. Za to na Rys.12.16b ze składową vhjc na osi y widać jak próbkki 3 i 7 łatwo od siebie oddzielić, gdyż układają się warstwowo. Na Rys.12.16c (oś y - vvcc) można również zauważyć, że próbkki układają się warstwowo - każda leży na innym poziomie. Chmury w danym kolorze na zestawieniach z mapami cętek nie są już tak rozrzucone jak na zestawieniu vv-vh, tworzą skupiska, które ułatwiają oddzielenie poszczególnych próbek.



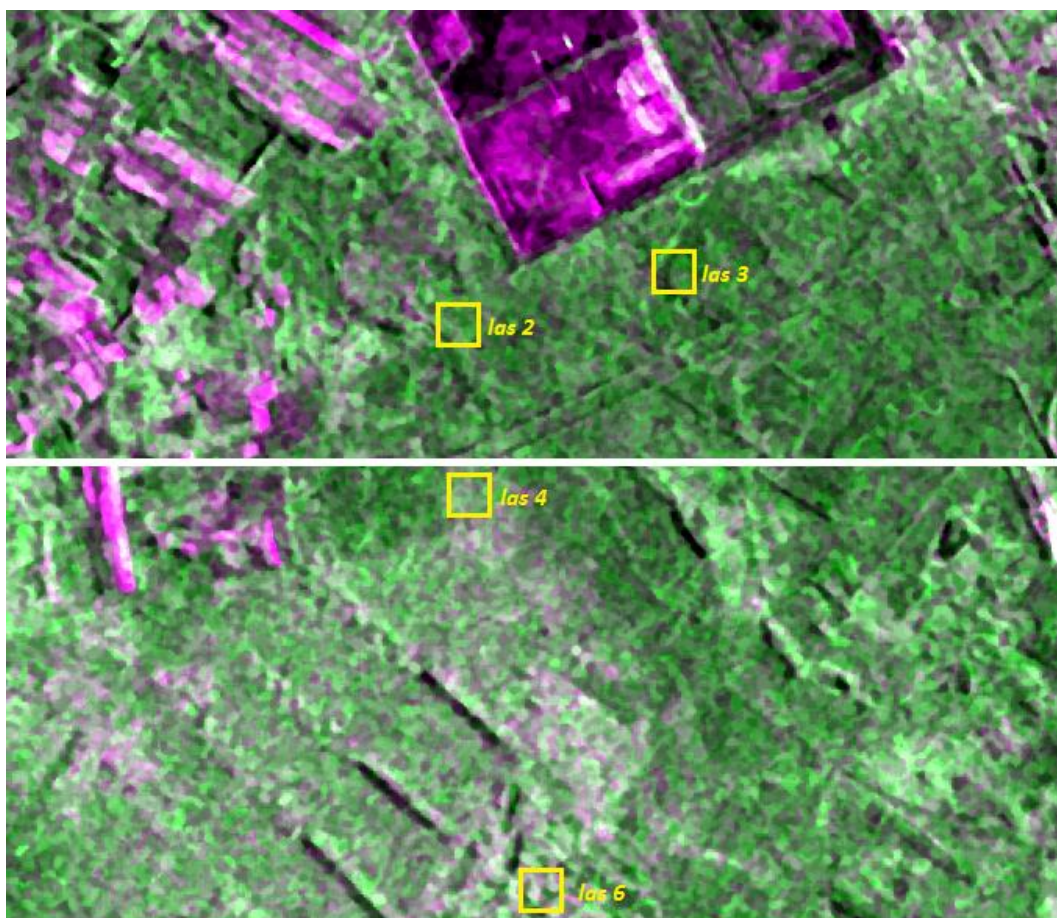
Rys.12.16 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy gruntów ornych: a) vv-vh, b) vv-vhjc, c) vh-vvcc

12.4.3 Lasy

Według ustawy o lasach z 1991 roku las jest gruntem o zwartej powierzchni co najmniej 0,10 ha pokrytym roślinnością leśną - drzewami i krzewami oraz runem leśnym lub przejściowo jej pozbawionym.

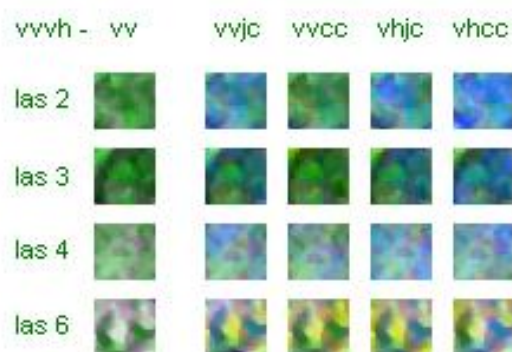
Las jest odnawialnym zasobem przyrody, powstającym i rozwijającym się w wyniku procesu lasotwórczego. Wykształca się on jako kompleks bioekologiczny, w którym roślinność swoista dla danego regionu biogeograficznego, a wyróżniająca się wybitnym ilościowym udziałem zwarcie rosnących drzew i odpowiedni świat zwierzęcy, klimat lokalny, stosunki wodne, gleba związane są ze sobą wzajemnymi wpływami i współzależnościami. Proces lasotwórczy może przebiegać w przyrodzie spontanicznie lub może być inicjowany i kierowany przez zabiegi gospodarcze (OBMIŃSKI, 1977).

Pod pojęciem lasu rozumiemy nie tylko powierzchnię gruntu pokrytą dziko rosnącymi drzewami, lecz cały skomplikowany ekosystem obejmujący świat roślin, zwierząt istniejący w określonych warunkach siedliska, powiązany systemem bardzo zróżnicowanych zależności (BERNADZKI, 1991).



Rys.12.17 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy „lasy”

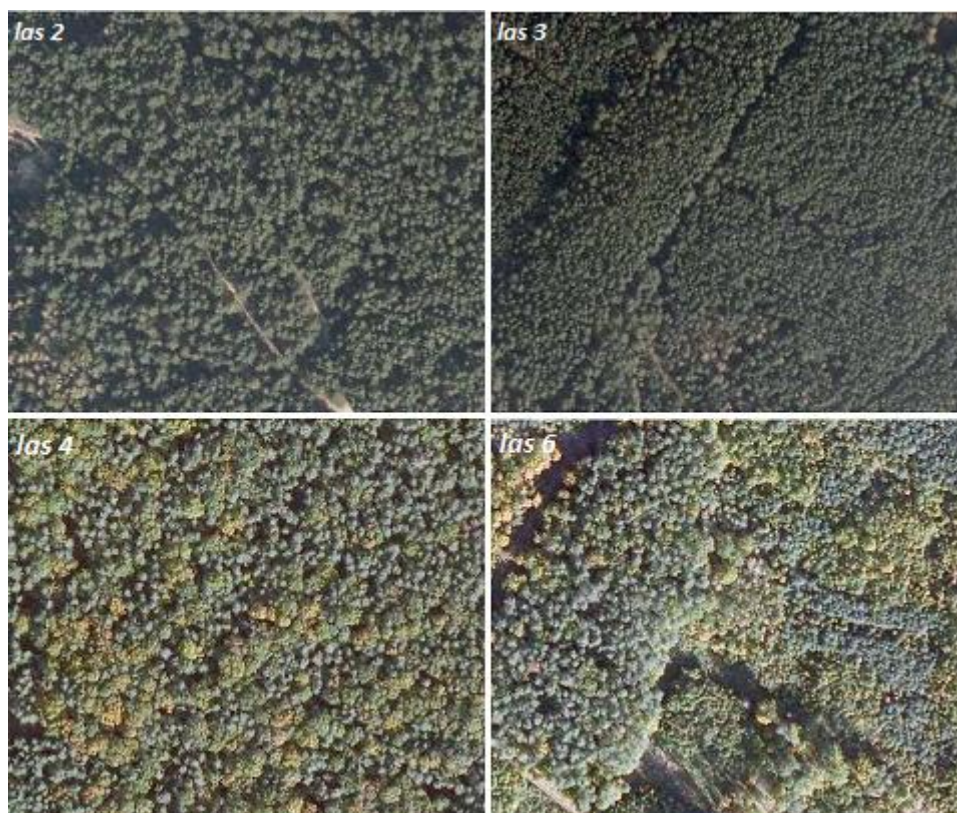
Tak jak w przypadku klas łąk i gruntów ornych, w pierwszej kolejności wskazano miejsca, z których pobrano próbki do analizy klasy lasów (Rys.12.17). Następnie wykonano zestawienie zróżnicowania barwnego próbek w zależności od kompozycji barwnej (Rys.12.18). Na tym etapie widać, że np. próbki 2 i 3 w zestawie podstawowym mają podobny zielony kolor, a w zestawie wzbogaconym o cętki zmieniają barwę w różny sposób.



Rys.12.18 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek lasów w zależności od kompozycji barwnej

Poniżej przedstawiono również, w charakterze poglądowym, fragmenty ortofotomapy z miejsc, z których wybrano próbki (Rys.12.19). Jak wiadomo obrazy radarowe pochodzą z listopada, natomiast zdjęcia optyczne z Rys.12.19 wyglądają na zrobione na przełomie sierpnia i września. Wskazują na to żółte miejsca świadczące o zbliżającej się jesieni. Dlatego też rysunek ten można wykorzystać jedynie do określenia czy na danym fragmencie występuje zwarta korona drzew, czy też jak na próbce 6, drzewa pokrywające dany fragment mają różną wysokość i tworzą bardziej złożoną strukturę.

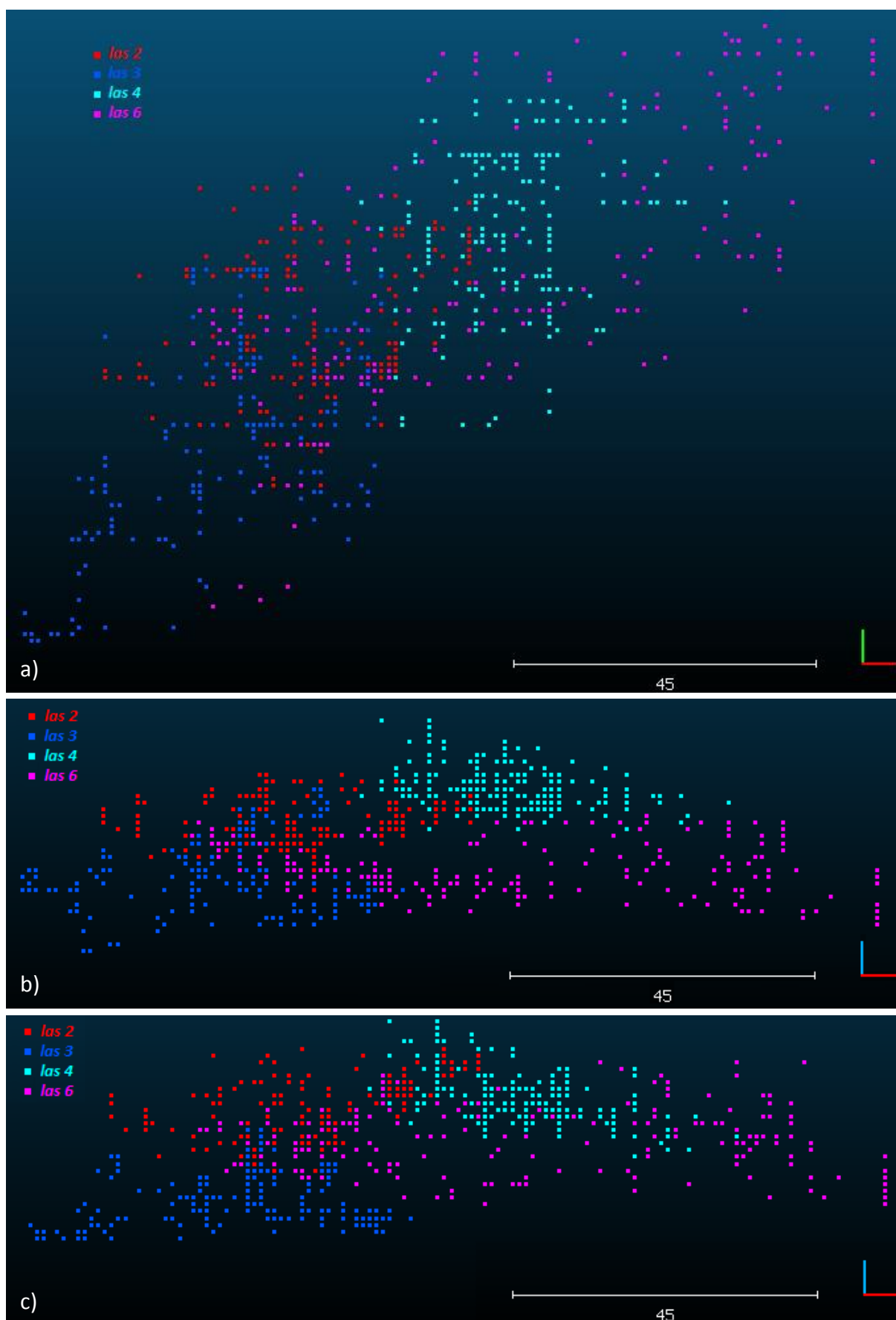
Obrazy radarowe poddawane analizie zostały wykonane pod koniec listopada. Na tej podstawie można stwierdzić, że większość drzew na terenie lasów liściastych nie miała już liści. Zatem struktura wierzchniej warstwy lasu liściastego na zimę ulega diametralnej zmianie. Inaczej będzie zachowywała się wiązka odbita od zwartej liściastej pokrywy lasu, a inaczej odbita od gałęzi i pni drzew pozbawionych liści.



Rys.12.19 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie (źródło: www.geoportal.gov.pl)

Jak widać na zestawieniu vv-vh dla próbek z klasy lasów (Rys.12.20a) chmura punktów przechodzi stopniowo od próbki niebieskiej, przez czerwoną i cyjan do różowej. Każdy kolor w zasadzie w pewnym stopniu nakłada się na siebie. Na zestawieniach b) i c) z Rys.12.20 widać jednak, że jest to wrażenie złudne. Próbka 6 dalej próbuje wmieszać się pomiędzy inne barwy, jednak na Rys.12.20a widać już, że różowa chmura punktów nie leży na tym samym poziomie co chmura w kolorze cyjan. Na Rys.12.20b widać też, że próbki niebieska i czerwona nie mieszają się już ze sobą w tak dużym stopniu jak na zestawieniu vv-vh.

Chmury punktów z mapami cętek pokazują warstwowość pozyskanych danych. Dzięki nim *płaskie* dane nabierają przestrzennego charakteru, a piksele danej próbki nie są już rozrzucone po całym obrazie tylko układają się w warstwy.

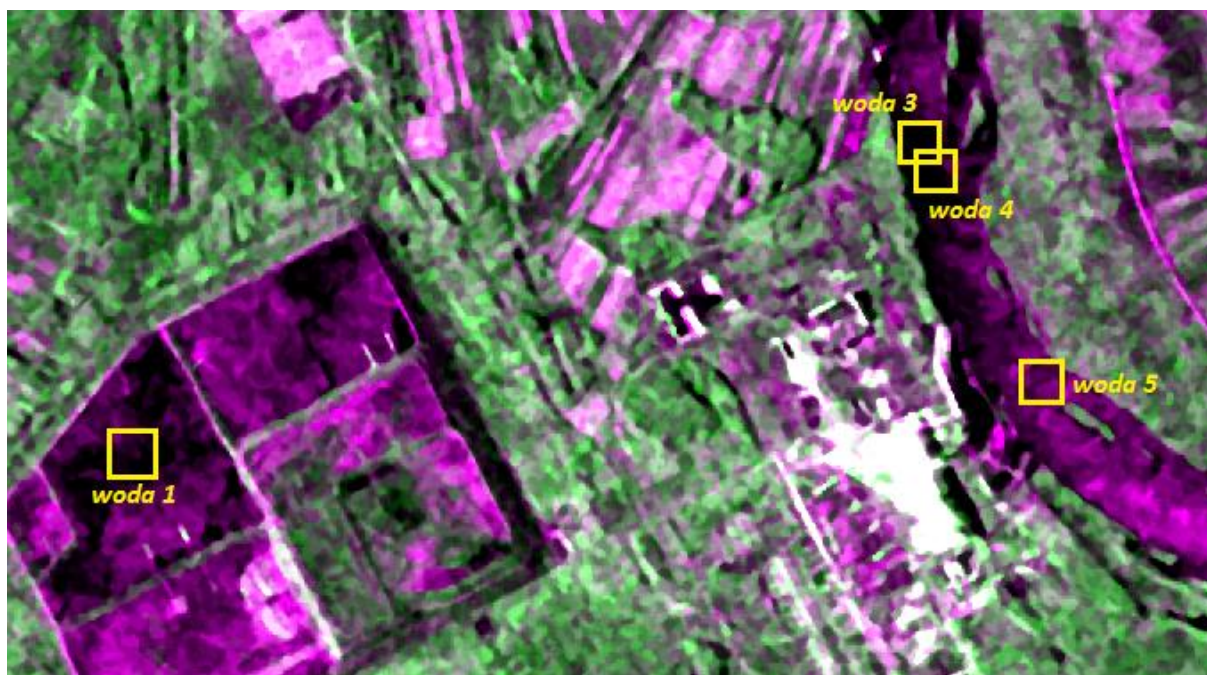


Rys.12.20 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy lasów: a) *vv-vh*, b) *vv-vhjc*, c) *vv-vvjc*

12.4.4 Wody powierzchniowe

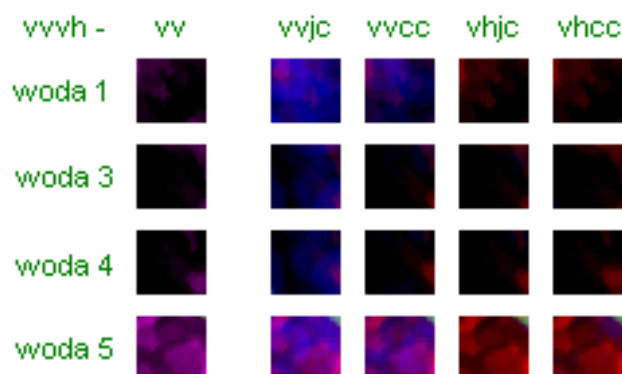
Na grunty pod wodami składają się:

- 1) Grunty pod morskimi wodami wewnętrznymi (...)
- 2) Grunty pod wodami powierzchniowymi płynącymi, do których zalicza się grunty pod wodami płynącymi w rzekach, potokach górskich, kanałach i innych ciekach, o przepływach stałych lub okresowych, oraz źródła, z których cieki biorą początek, a także grunty pod wodami znajdującymi się w jeziorach i zbiornikach sztucznych, z których cieki wypływają lub do których wpływają.
- 3) Grunty pod wodami powierzchniowymi stojącymi, do których zalicza się grunty pod wodami w jeziorach i zbiornikach innych niż określone w punktach 1 i 2 (ROZP. Z DN. 29.03.2001 R. W SPRAWIE EGİB).



Rys.12.21 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy „wody powierzchniowe”

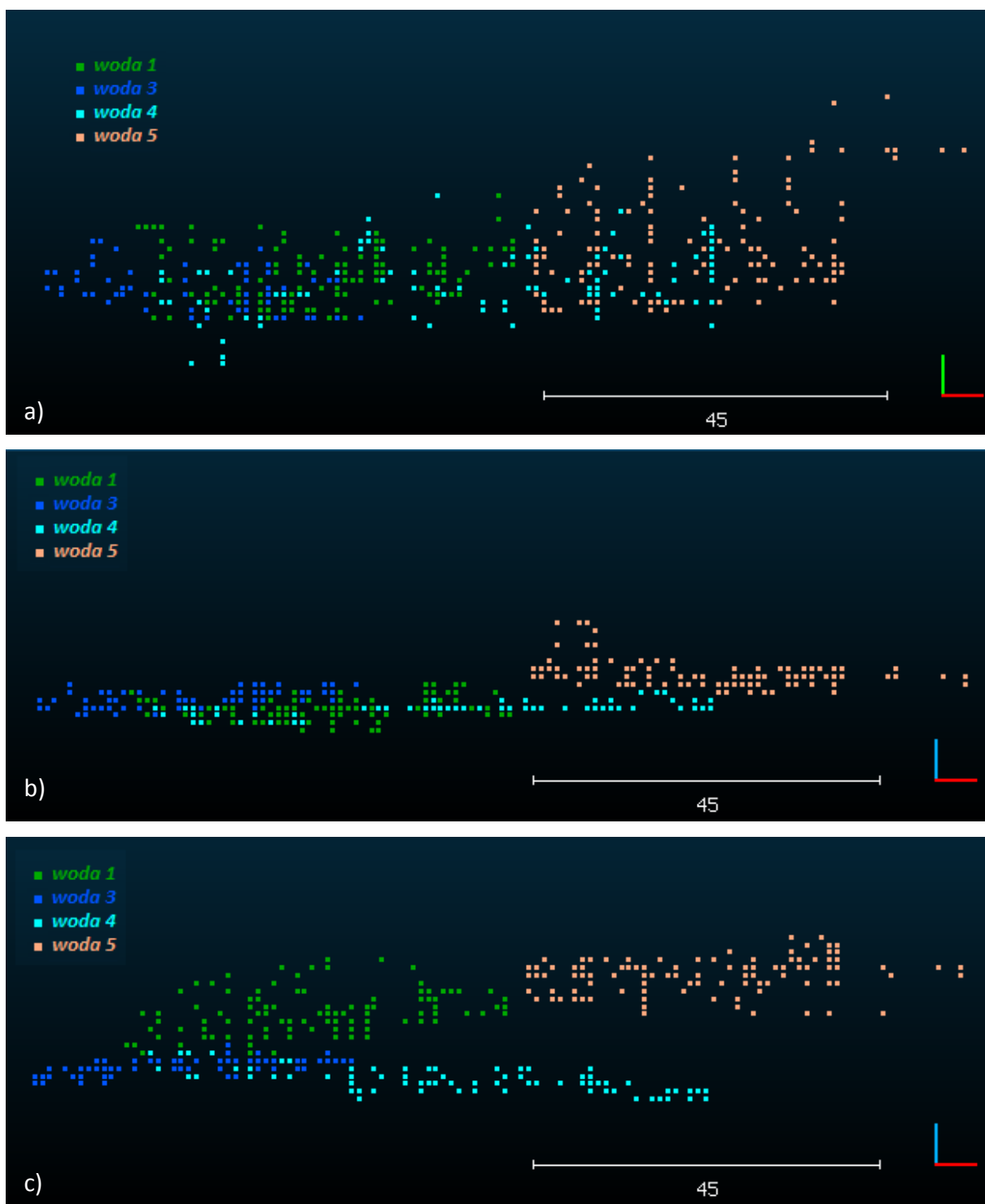
Tak jak we wcześniej omawianych klasach, zamieszczono rysunek z miejscami, z których pobrano próbki dla klasy wód (Rys.12.21) oraz porównanie barwne próbek w zależności od zastosowanej kompozycji barwnej (Rys.12.22). Widać tutaj, że próbki, które w kompozycji podstawowej były czarne, po dodaniu cętek nabierają niebieskich i czerwonych odcieni.



Rys.12.22 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek wód w zależności od kompozycji barwnej

Poniżej znajduje się zestawienie vv-vh wybranych próbek dla klasy wód powierzchniowych (Rys.12.23a). Tak jak w przypadku klasy łąk można, według zestawienia vv-vh, podzielić próbki na dwie grupy: jedna z próbkami 1 i 3 (zielona i niebieska), a druga z próbkami 4 i 5 (cyjan i łososiowa). Jedna grupa pozostaje wyraźnie z lewej strony, druga z prawej. W obrębie danej grupy różnokolorowe piksele mieszają się ze sobą i obserwator nie byłby w stanie rozdzielić próbek. Na Rys.12.23b (vhcc) widać już, że próbki leżą względem siebie warstwami, natomiast zestawienie 12.23c (vvcc) pozwala na jednoznaczne wskazanie właściwie wszystkich próbek (jedynie punkty w kolorze cyjanu nieco wchodzą na obszar niebieskich).

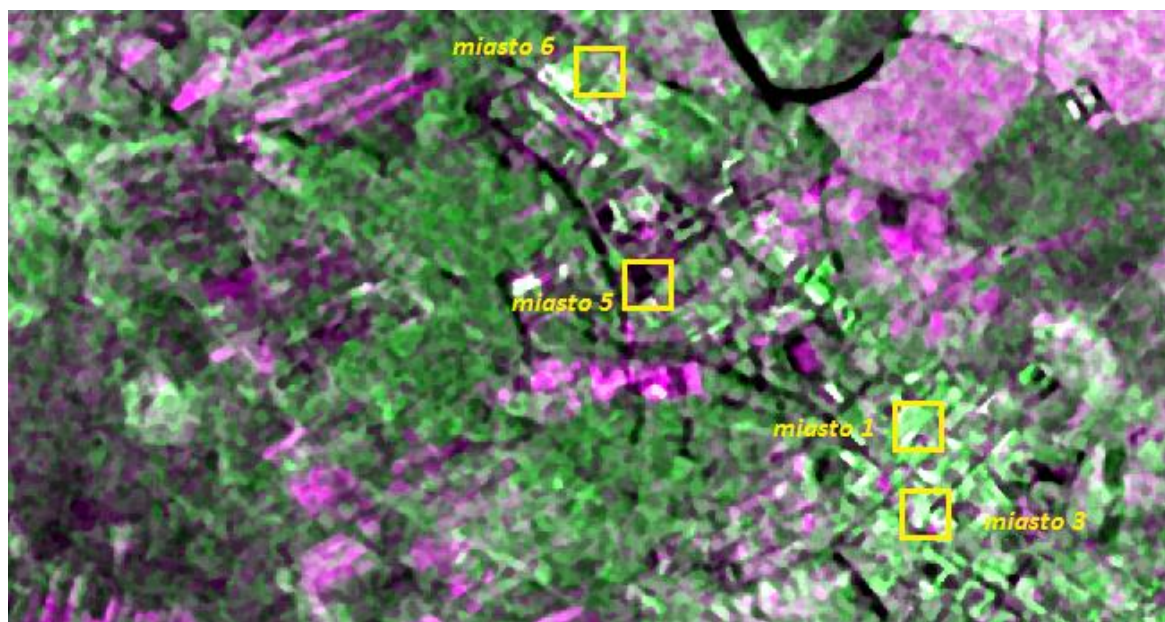
Jak widać dla próbek wody, większy wkład w rozróżnialność wniosły mapy ciemnych cętek. Należy się jednak zastanowić jaki wpływ na wygląd i rozmieszczenie cętek ma powierzchnia wody. Jest ona przecież bardzo zmienna i zależna od panującej pogody. Czasem woda może przybrać formę płaskiej tafli lustra, a innym razem pozostaje wzburzona przy każdym powiewie wiatru. Próbką 1 została pobrana z osadnika elektrowni „Kozienice” a zachowuje się podobnie do próbki 3 pobranej z rzeki Wisły. Należy zastanowić się, co spowodowało takie podobieństwo.



Rys.12.23 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy wód: a) vv-vh, b) vv-vhcc, c) vv-vvcc

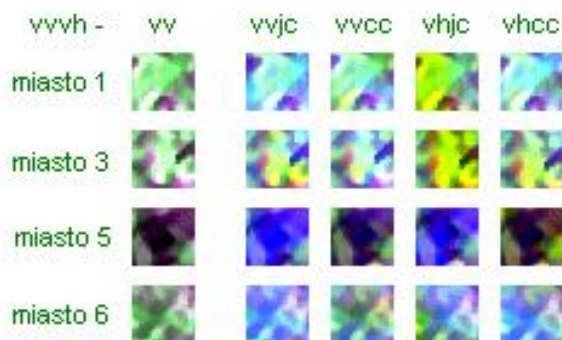
12.4.5 Tereny zabudowane i zurbanizowane

Do terenów zabudowanych zalicza się tereny mieszkaniowe, przemysłowe oraz inne tereny zabudowane. Również pod tę kategorię podchodzą zurbanizowane tereny niezabudowane przeznaczone w planach zagospodarowania przestrzennego pod zabudowę. Za tereny zabudowane i zurbanizowane również uważa się tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, użytki kopalne (kopalnie odkrywkowe), tereny komunikacyjne w tym wszelkie drogi oraz place postojowe i manewrowe, tereny kolejowe jak również inne tereny komunikacyjne zajęte pod porty lotnicze, urządzenia portowe, przystanie, naziemne obiekty i budowle górskich kolei linowych, torowiska tramwajowe poza pasami ulic i dróg, parkingi, dworce autobusowe, wały ochronne dróg przystosowane do ruchu kołowego (ROZP. Z DN. 29.03.2001 R. W SPRAWIE EGİB).



Rys.12.24 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy „tereny zurbanizowane”

Ostatnią analizowaną klasą są tereny zurbanizowane. Do analizy wybrano próbki pochodzące z terenu miasta Kozienice. Rys.12.24 pokazuje ich umiejscowienie w terenie, a Rys.12.25 zróżnicowanie barwne w zależności od kompozycji barwnej. Próbki na Rys.12.25 wykazują się dużą różnorodnością barwną. O ile próbki z kompozycji barwnej vvvh-vv pozostają w tonacji zielono - fioletowej, o tyle inne kompozycje dostarczają wiele innych odcieni m.in. niebieskiego czy żółtego.



Rys.12.25 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek terenów miejskich w zależności od kompozycji barwnej

Na Rys.12.26 można zauważyć jak wyglądają badane tereny. Próbka 5 charakteryzuje się zabudową blokową, próbka 1 i 3 zwartą zabudową domków jednorodzinnych, a na terenie 6 znajdują się zarówno domki jednorodzinne w zwartej zabudowie jak również w nieco luźniejszej.



Rys.12.26 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie (źródło: www.geoportal.gov.pl)

Rys.12.27a przedstawia zestawienie vv-vh wybranych próbek dla terenów miejskich. Próbkę są wyraźnie rozrzucone, chmura punktów w danym kolorze zajmuje swoje miejsce, ale również zachodzi częściowo na chmurę sąsiednią. Nie powinno to dziwić z racji tego jak wygląda miejski krajobraz. Oprócz zabudowy, płaskich ulic, można znaleźć również tereny zielone, takie jak przydrożne zadrzewienia czy parki miejskie lub też przydomowe ogródki.

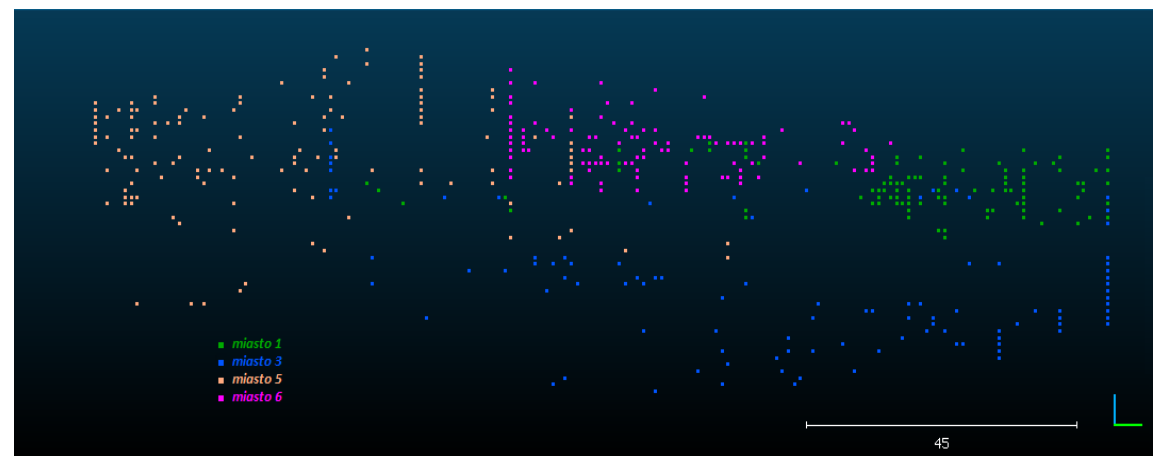
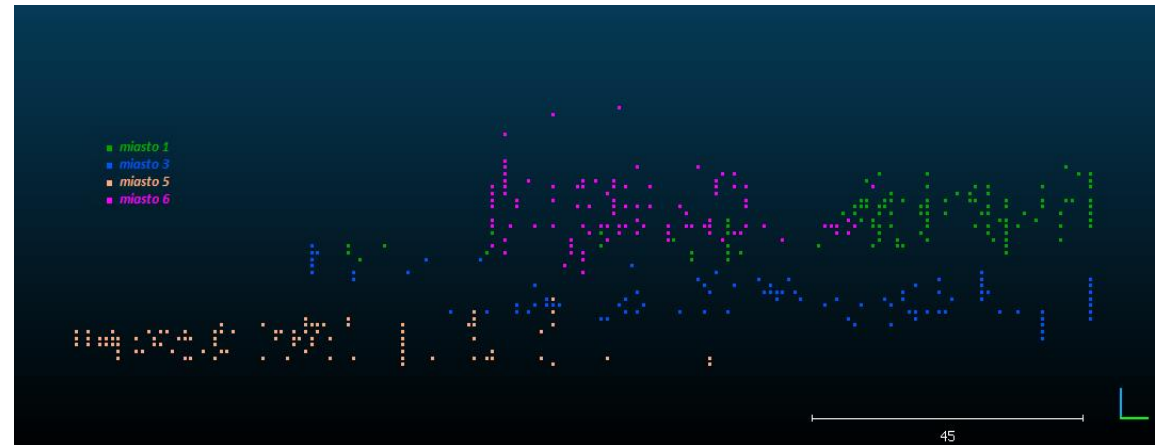
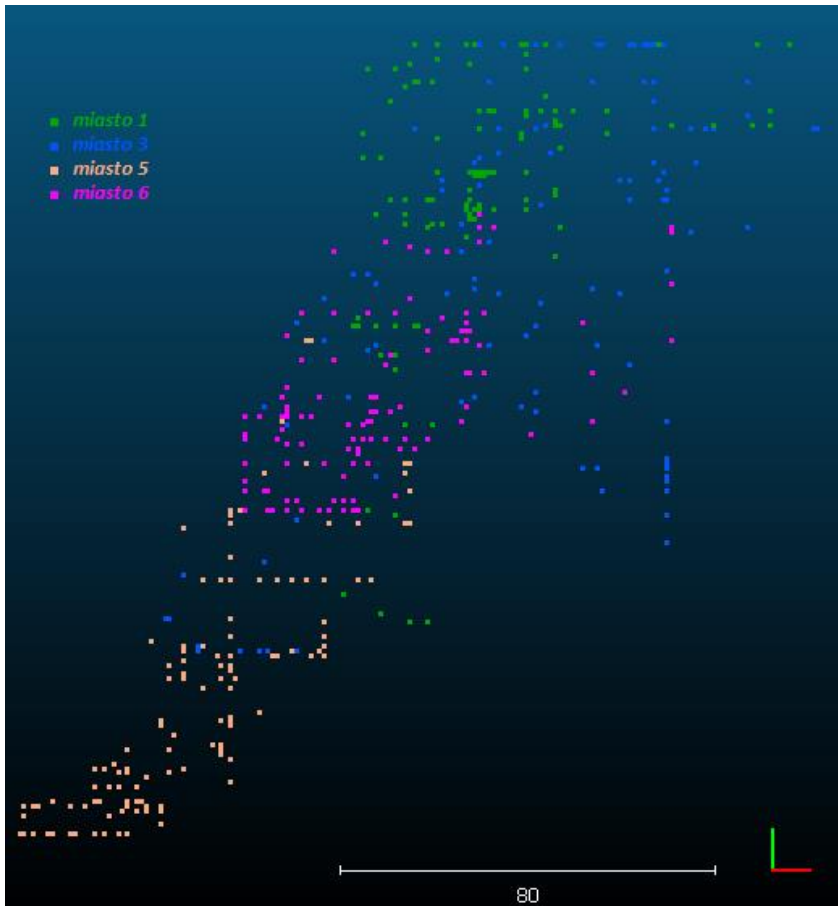
Na zestawieniach z Rys.12.27b i c można zauważyć w jak dobrym stopniu wszystkie próbki się od siebie oddzielają. Każda leży praktycznie na innym poziomie. Próbka 5 jest najlepiej rozróżnialna, zapewne właśnie dlatego, że tak bardzo różni się strukturą zabudowy od innych wybranych terenów. Inne próbki jednak mimo tego, że zajmują sporo miejsca w poziomie (czyli na osi z obrazem vv lub vh) to w pionie (na osi z mapami cętek) również wyznaczają pewne granice, dzięki którym można swobodnie odróżnić je od pozostałych. Ta rozróżnialność może wynikać również z bardzo dużego rozdrobnienia analizowanego terenu, który zmienia się strukturalnie o wiele bardziej niż na przykład zwarte pokrycie leśne.

W przypadku terenów miejskich dalsze badania powinny dotyczyć tego, czy rozróżnialność próbek po dodaniu map cętek zależy np. od powierzchni budynków, od stopnia pokrycia budynkami/terenami zielonymi, wysokości budynków czy od zupełnie czegoś innego.

12.4.6 Podsumowanie

Na podstawie wykonanych analiz można stwierdzić, że w obrębie danej klasy pokrycia terenu da się wyodrębnić kilka rodzajów pokrycia bazując na mapach granulometrycznych cętek z obrazów radarowych. Należałoby wykonać więcej badań, w celu sprawdzenia czy dana klasa pokrycia jest lepiej rozróżnialna przy zastosowaniu konkretnych map cętek z obrazu o konkretnej polaryzacji. Wg przeprowadzonego badania np. ustalono, że próbki z klasy łąki da się od siebie odróżnić przy zastosowaniu map cętek z obrazu o polaryzacji VV.

Jeśli chodzi o analizę klasy wód powierzchniowych, to powinny zostać przeprowadzone próby na zdjęciach z różnych dni (ze zróżnicowaniem pogodowym), w celu sprawdzenia czy wydzielone cętki faktycznie określają różne miejsca w terenie czy tylko różne wzburzenie powierzchni wody. Badania dotyczące terenów miejskich proponuje się zostawić na koniec, gdyż struktura miejska jest bardzo złożona i skomplikowana. Dlatego też należy dokładniej poznać charakter szumu cętkowego na innych, nieco prostszych terenach (łąki, grunty orne, lasy), a dopiero później zastosować zebraną wiedzę do analiz terenów zurbanizowanych.



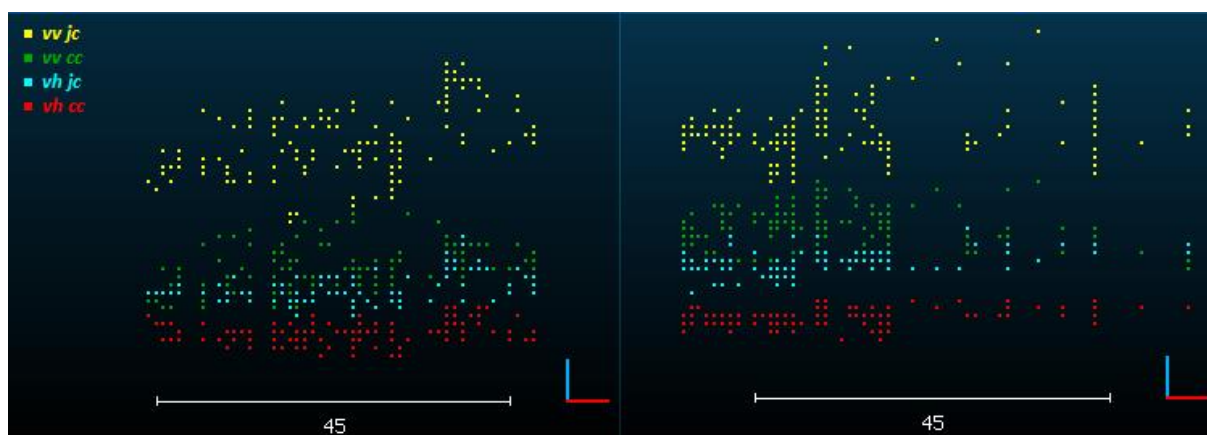
Rys.12.27 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy terenów miejskich: a) vv-vh, b) vh-vhcc, c) vh-vvjc

12.5 Analiza rozkładu map granulometrycznych cętek

Kolejnym etapem pracy było wykonanie analizy rozkładu punktów z map granulometrycznych cętek na osi z dla danej próbki, mającą na celu sprawdzenie czy jest on różny dla konkretnej klasy pokrycia terenu. Powtarzający się schemat pozwoliłby na automatyzację wydzielania podstawowych typów pokrycia terenu bazując jedynie na mapach granulometrycznych cętek.

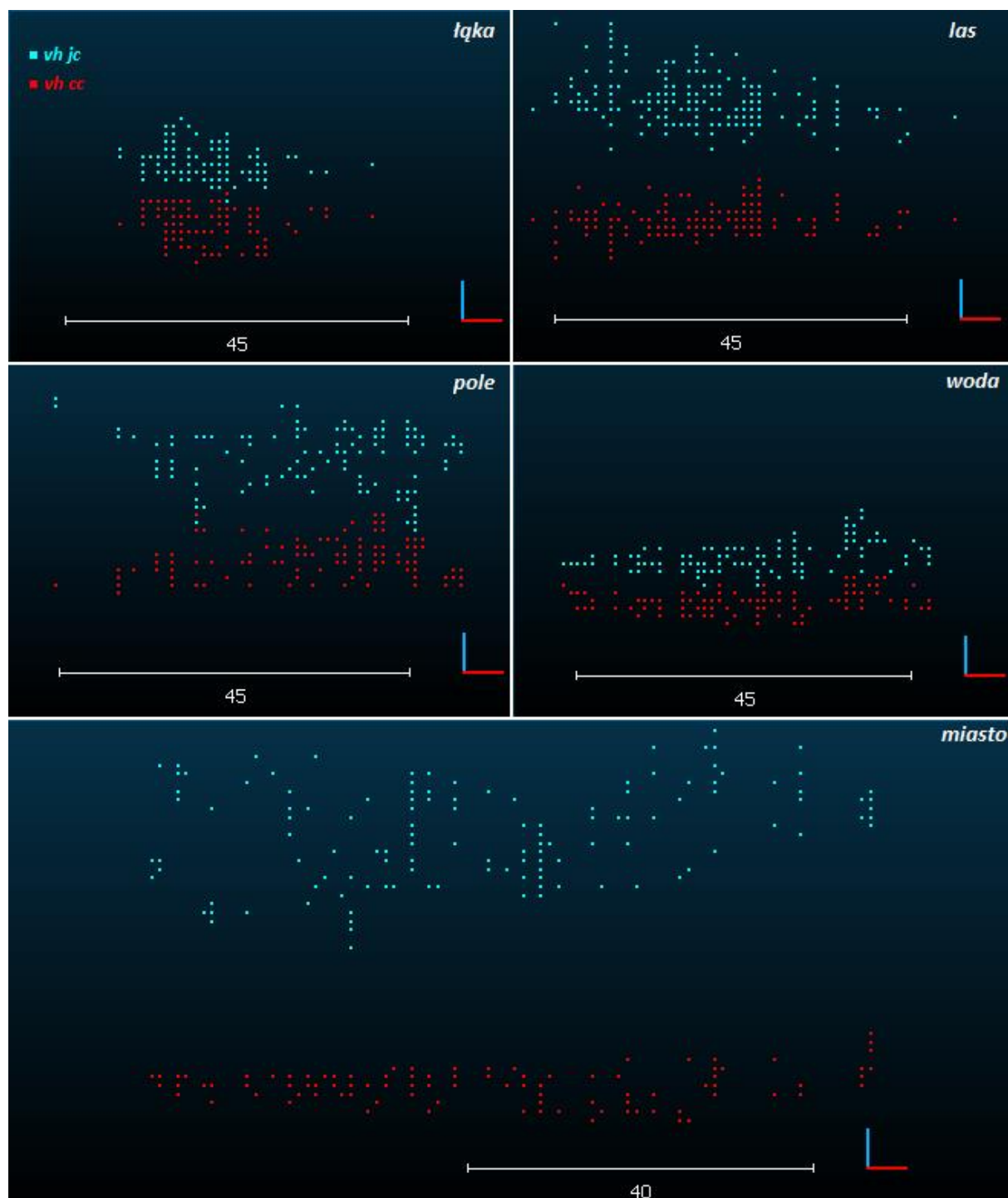
W przypadku cętek z obrazu vh dla pól, łąk, lasów i wód jasne cętki były wyżej niż ciemne lub pozostawały na zbliżonym poziomie (Rys.12.29). Natomiast dla terenu zurbanizowanego w dwóch z sześciu przypadków miała miejsce sytuacja odwrotna. Z kolei dla łąk, lasów, wód i terenów miasta jasne cętki z obrazu vv były wyżej niż ciemne lub pozostawały na zbliżonym poziomie (Rys.12.30), natomiast dla pól w trzech z ośmiu przypadków miała miejsce sytuacja odwrotna. Można jeszcze wspomnieć, że dla próbek z terenów zurbanizowanych jasne cętki z obrazu vv były znacznie bardziej oddalone od ciemnych w porównaniu z próbkami innych klas (Rys.12.29).

W zestawieniu wszystkich czterech warstw cętek dosyć regularnym wzorcem odznaczają się próbki ze zbiorników wodnych (Rys.12.28). Również próbki gruntów ornych mają powtarzalny rozkład danych na osi z. Różnice wkradają się we wspomnianych wcześniej trzech z ośmiu przypadków. Jednak również w tych trzech przypadkach układ jest ten sam.

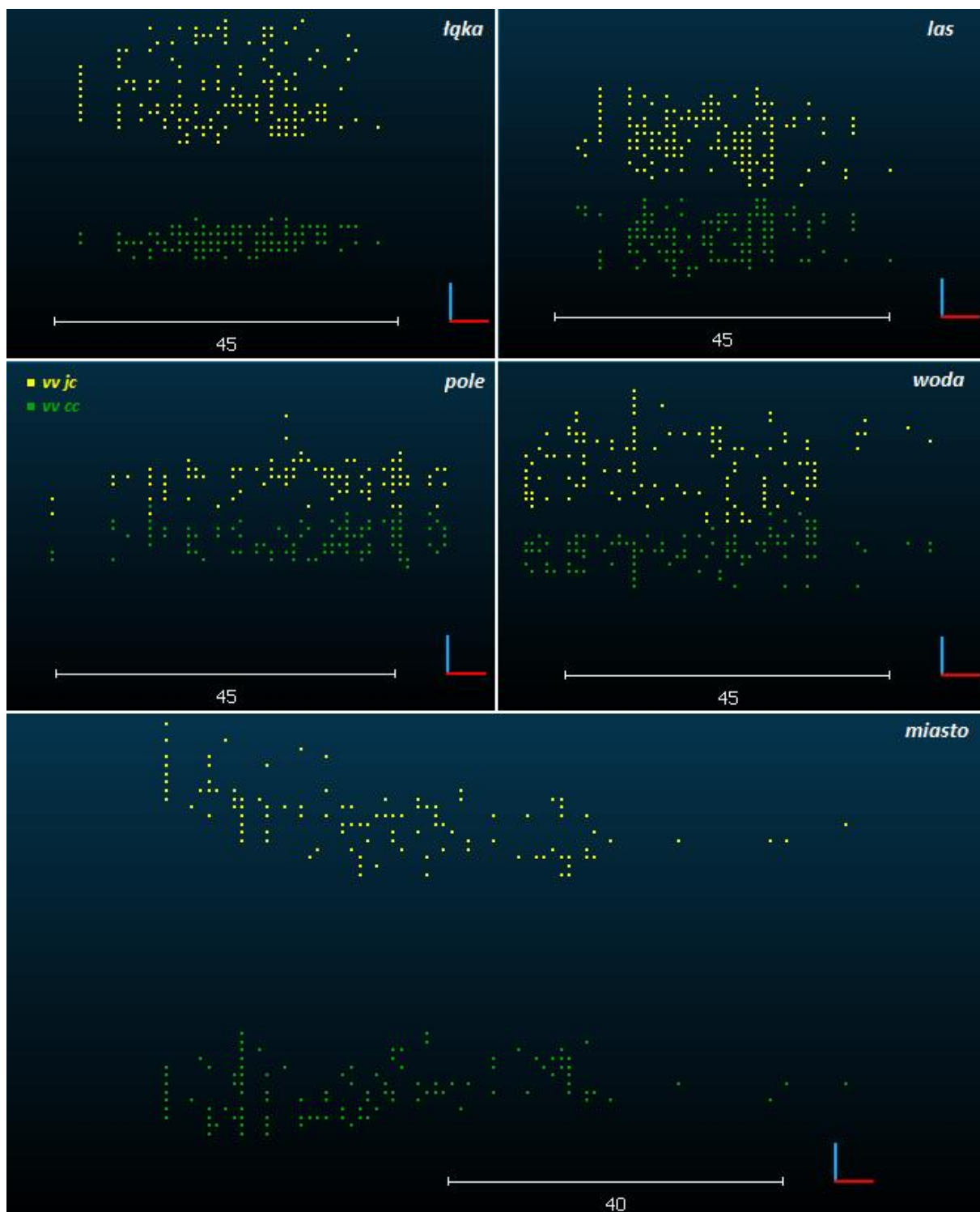


Rys.12.28 Rozkład wszystkich warstw cętek dla dwóch próbek wody; oś pozioma - vv, oś pionowa - cętki

Przeprowadzona analiza wykazała, że rozkład położenia na osi z danych z map granulometrycznych cętek ma znikomy wpływ na rozróżnialność poszczególnych klas pokrycia terenu.



Rys.12.29 Rozkład map granulometrycznych z obrazu *vh* na osi *z* dla wybranych próbek pięciu klas pokrycia terenu; oś czerwona - *vh cc*, oś niebieska - cętki z obrazu *vh*

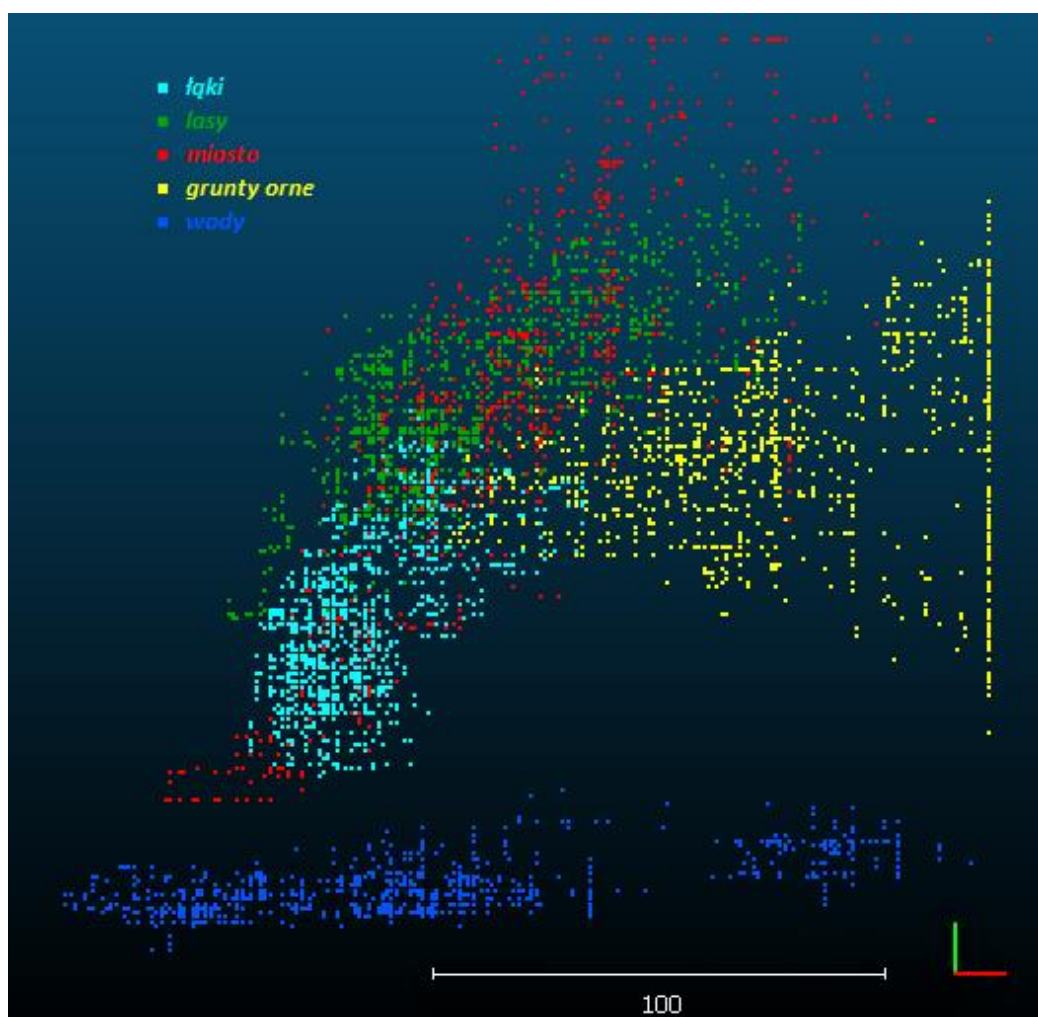


Rys.12.30 Rozkład map granulometrycznych z obrazu vv na osi z dla wybranych próbek pięciu klas pokrycia terenu; oś czerwona - vv, oś niebieska - cętki z obrazu vh

13. Cętki w klasyfikacji pokrycia terenu

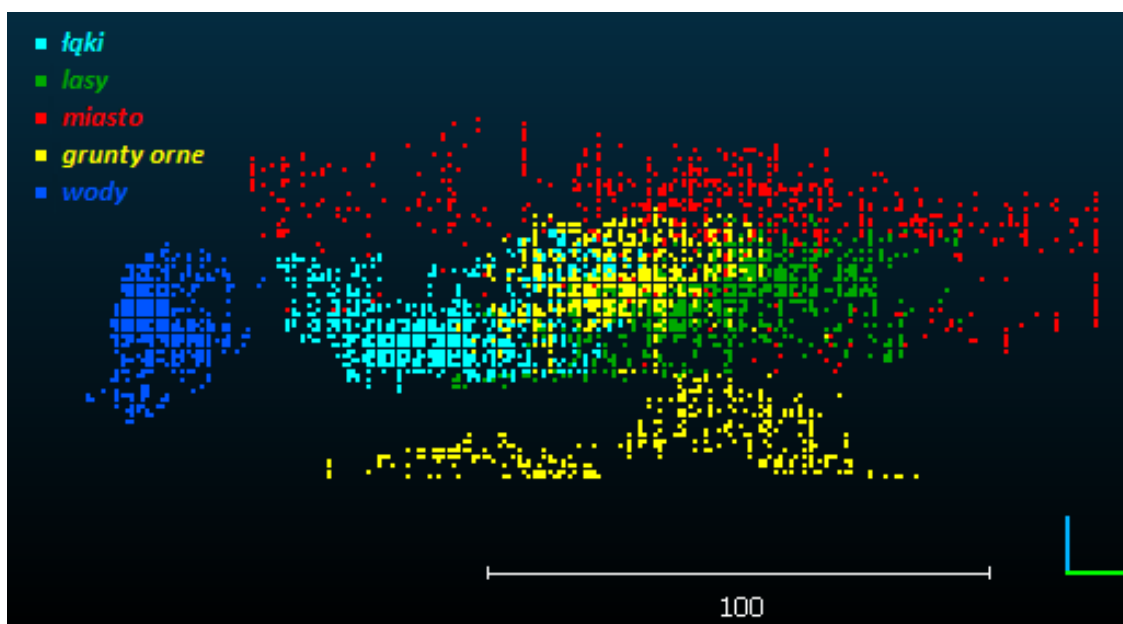
Na koniec sprawdzono czy wykorzystanie map granulometrycznych cętek wpływa na rozróżnialność poszczególnych klas pokrycia terenu. W tym celu wszystkie pobrane próbki danej klasy pokrycia terenu oznaczono jednym kolorem i porównano z innymi klasami. Wyniki takiego zestawienia przedstawiają rysunki poniżej.

Rys.13.1 przedstawia pełne zestawienie wszystkich próbek dla wszystkich klas pokrycia terenu. Po wstępnych oględzinach najłatwiej wyróżnić klasę wody. Grunty orne, łąki i lasy mają swoje miejsce na wykresie, jednak nie ma między tymi klasami wyraźnej granicy. Najbardziej chaotyczną klasą na wykresie jest klasa terenów miejskich oznaczona kolorem czerwonym. Można jednak zauważyć, że w dużej mierze pokrywa się z klasami lasów i łąk, co przypomina o złożonej strukturze miasta, w której obok budynków są też tereny zielone.



Rys.13.1 Zestawienie vv-vh dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu

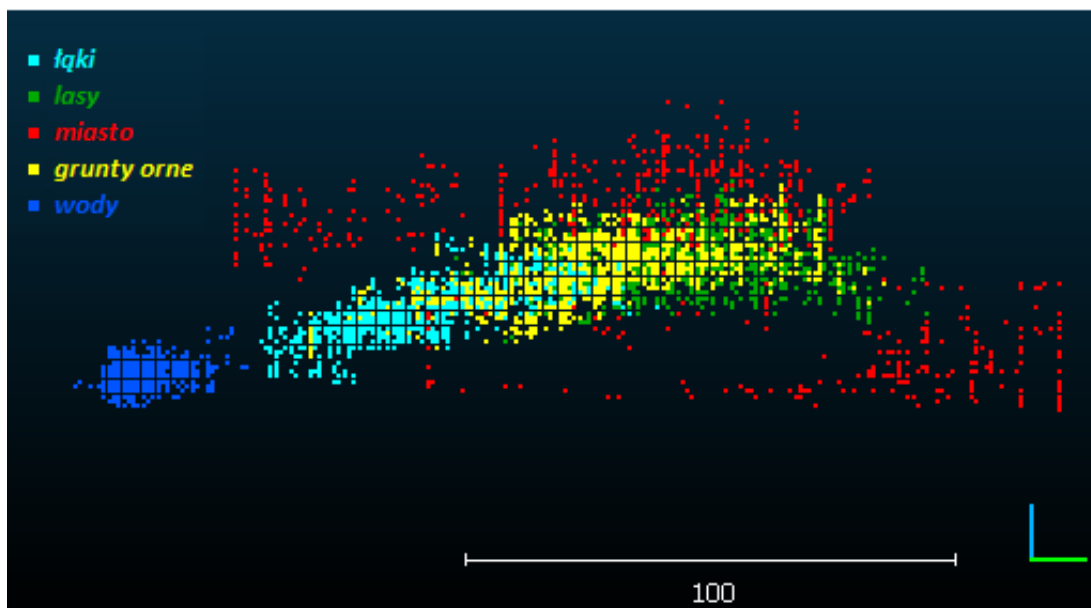
Zestawienie na Rys.13.2 pokazuje, że wykorzystanie mapy granulometrycznej jasnych cętek z obrazu vv w pewien sposób polepsza jakość rozróżnialności. Widać wyraźnie, że część próbek z gruntów ornych leży wyraźnie poniżej innych klas. Natomiast bardzo pomocna jest różnica poziomów między próbką terenów miejskich, a próbkami łąk i lasów. Większość czerwonych punktów znajduje się wyżej od reszty klas. Wracając do Rys.13.1 gdzie kolor czerwony przeważnie miesza się z kolorem zielonym i cyjan, można swobodnie stwierdzić, że w tym przypadku jasne cętki z obrazu vv mogą wspomóc wyróżnienie klasy terenów miejskich spośród innych.



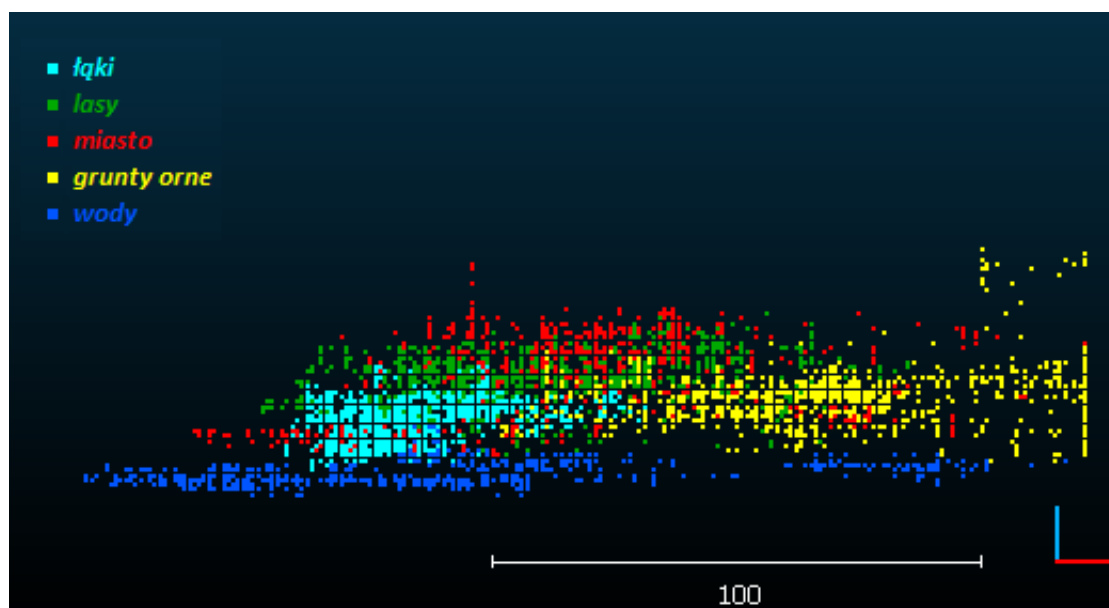
Rys.13.2 Zestawienie $vh-vvjc$ dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu

Rys.13.3 ze składową $vhjc$ z kolei pokazuje, że część klasy łąk znajduje się na innym poziomie niż pozostałe klasy. Na tym zestawieniu również klasa terenów zurbanizowanych została podzielona na dwie części. Leżą one na dwóch różnych poziomach, ale również są to poziomy inne niż te, na których leżą klasy lasów i gruntów ornych oraz część łąk.

Ostatni przykład zestawienia ze składową $vhcc$ (Rys.13.4) umożliwia łatwe odróżnienie wody od reszty próbek. Niebieska klasa leży wyraźnie niżej niż chmury punktów w innych kolorach.



Rys.13.3 Zestawienie $vh-vh_{jc}$ dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu



Rys.13.4 Zestawienie $vv-vh_{cc}$ dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu

Informacja zapewniona tylko z szumu cętkowego wpływa minimalnie na rozróżnialność klas pokrycia terenu. Jednak przy połączeniu tych informacji z informacjami z zestawienia vv_vh (Rys.13.1) efekty w wydzielaniu poszczególnych klas pokrycia terenu mogą być o wiele lepsze niż w przypadku zastosowania którejś z tych informacji samodzielnie.

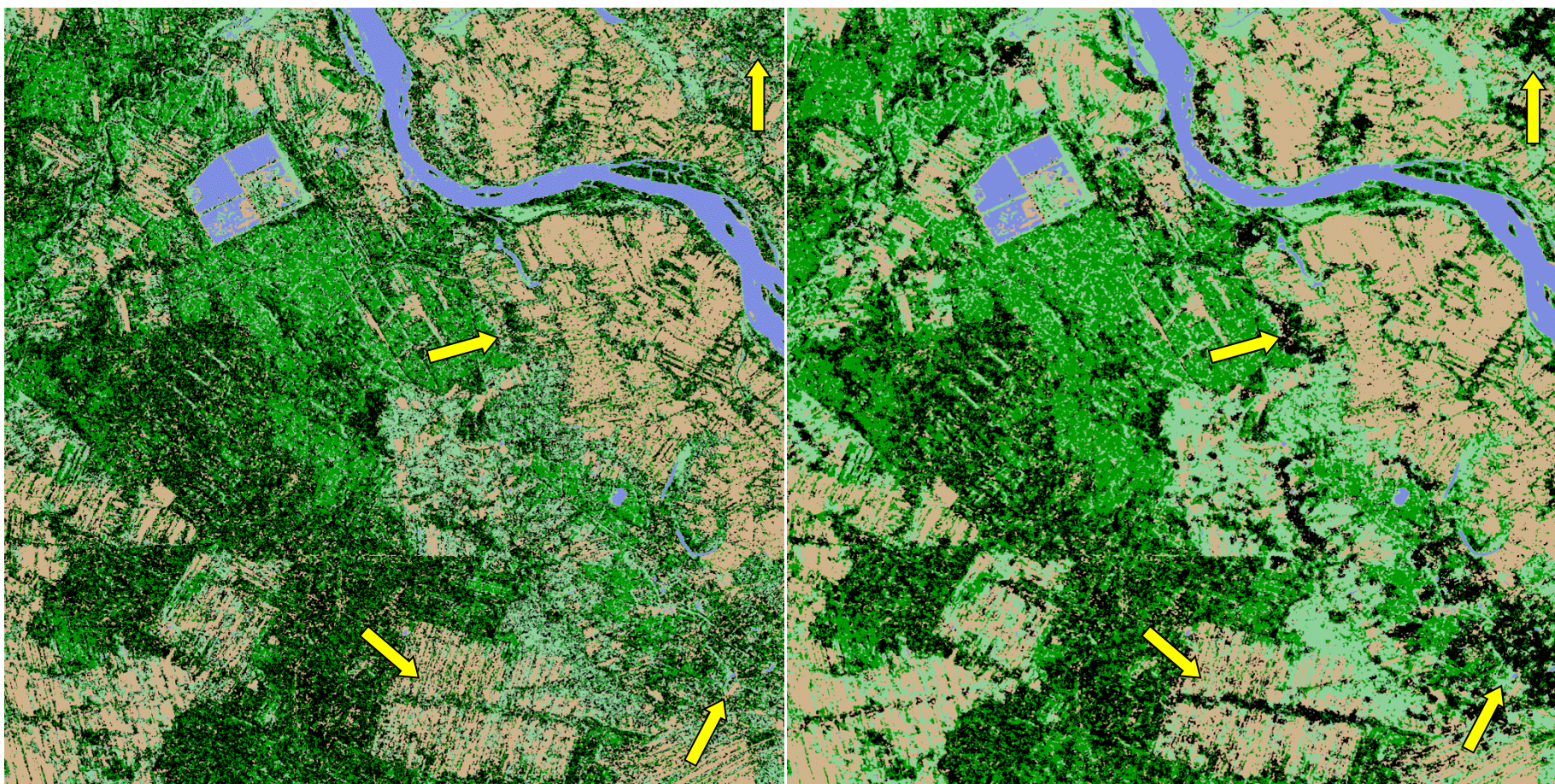
13.1 Porównanie efektów klasyfikacji

Po analizie chmur punktów postanowiono wykonać klasyfikację pokrycia terenu dla danych składających się z dwóch warstw (obraz VV i VH) oraz dla danych sześciowarstwowych (vv, vh, vv_{jc}, vv_{cc}, vh_{jc}, vh_{cc}).

Klasyfikację wykonano w programie Erdas Imagine przy pomocy opcji klasyfikacji nienadzorowanej z możliwością wykorzystania wybranych przez siebie pól treningowych. Do tego celu posłużyły próbki wybrane wcześniej do analizy chmur punktów. Klasyfikację przeprowadzono również na tych samych danych wybierając opcję *GrowRegion* do zaznaczania pól treningowych, znajdującą się w narzędziach rastrowych. Ustawiono *Spectral Euclidean Distance* na 20 czyli ok. 10% rozpiętości spektralnej danych. W wyniku przeprowadzonych klasyfikacji otrzymano cztery obrazy tematyczne (Rys.13.5 i Rys.13.6).

Od razu można dostrzec różnice między obrazami wynikowymi. Lewy obraz z Rys.13.5 jest wynikiem klasyfikacji przeprowadzonej na danych dwuwarstwowych czyli na odfiltrowanych obrazach VV i VH. Klasa zabudowań oznaczona kolorem czarnym rozprzestrzeniła się po całym obrazie jak szum. Zaciemnia rozróżnienie innych klas jak również nie wskazuje jednoznacznie gdzie klasa zabudowań mogłaby się znajdować. Obraz prawy pokazuje jak mapy cętek wpłynęły na poprawę klasyfikacji. Żółte strzałki na Rys.13.5 wskazują miejsca, gdzie ta poprawa jest najwyraźniejsza. Szczególną uwagę należy zwrócić na fragment miasta Kozienice (prawy dolny róg), który na obrazie lewym jest zupełnie niewidoczny. Obraz prawy umożliwia za to wskazanie dosyć dokładnego obrysu tego fragmentu miasta.

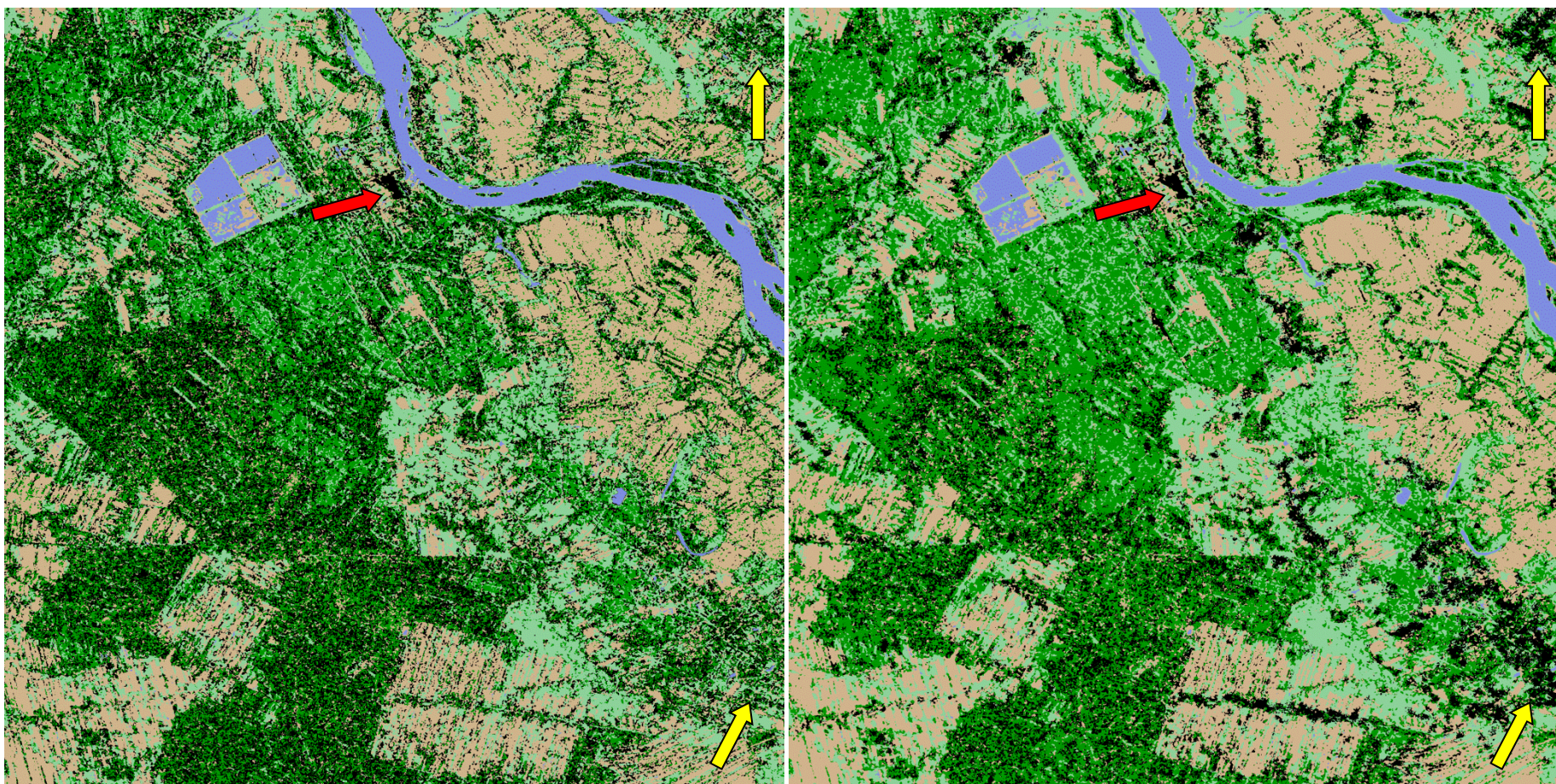
Rys.13.6 przedstawia wyniki klasyfikacji z użyciem funkcji *GrowRegion* do zaznaczania pól treningowych. Obrazy są podobne do tych z Rys.13.5, jednak są pewne różnice. Największą z nich jest to, że wcześniej dach budynku elektrowni „Kozienice” jako duży płaski obszar został zakwalifikowany do klasy gruntów ornych. Funkcja *GrowRegion* pozwoliła na poprawę tego błędu i już na Rys.13.6 na obu obrazach obszar ten zakwalifikował się do klasy zabudowań (czerwona strzałka).



Rys.13.5 Wynik klasyfikacji metodą ISODATA z użyciem wcześniej wybranych prostokątnych próbek jako pól treningowych. Klasyfikacja przeprowadzona na danych podstawowych (z lewej) i wzbogaconych o mapy granulometryczne (z prawej). Strzałki wskazują miejsca wyraźnej poprawy klasyfikacji klasy zabudowań.

Legenda:





Rys.13.6 Wynik klasyfikacji metodą ISODATA z użyciem pól treningowych pobranych opcją GrowRegion z miejsc, z których pobrano wcześniej próbki prostokątne. Klasyfikacja przeprowadzona na danych podstawowych (z lewej) i wzbogaconych o mapy granulometryczne (z prawej). Żółte strzałki wskazują miejsca wyraźnej poprawy klasyfikacji klasy zabudowań, czerwona strzałka pokazuje dach elektrowni „Kozienice”.

Legenda:

	grunty orne		zabudowania		woda		łąki		lasy
---	-------------	---	-------------	---	------	--	------	---	------

13.2 Analiza ilościowa

Aby poznać stopień poprawy klasyfikacji należało stworzyć macierz błędów i na jej podstawie obliczyć całkowitą dokładność klasyfikacji, współczynnik Kappa, który wyraża łączny błąd klasyfikacji oraz błędy przeszacowania i niedoszacowania dla poszczególnych klas.

Współczynnik κ Cohena (1960) określa stopień zgodności pomiędzy dwoma pomiarami wykonanymi w różnych warunkach. Pierwsza wzmianka o statystyce podobnej do współczynnika κ przypisywana jest Galtonowi (1892). Wartość współczynnika κ opisująca łączny błąd klasyfikacji zawiera się w przedziale od -1 do 1. Wartość 1 oznacza pełną zgodność, wartość 0 oznacza zgodność na poziomie takim samym jaki powstałby dla losowego rozłożenia danych, poziom pomiędzy 0 a -1 jest w praktyce nie wykorzystywany.

$$\kappa = \frac{n \sum_{p=1}^k n_{pp} - \sum_{p=1}^k \left(\sum_{j=1}^k n_{pj} \sum_{i=1}^k n_{ip} \right)}{n^2 - \sum_{p=1}^k \left(\sum_{j=1}^k n_{pj} \sum_{i=1}^k n_{ip} \right)} \quad (32)$$

Wersja (32) wzoru (HEJMANOWSKA, 2008) jest wygodna do obliczeń, można jednak przekształcić wzór tak by wyglądał przejrzystej (COHEN, 1960):

$$\kappa = \frac{Pr(a) - Pr(e)}{1 - Pr(e)} \quad (33),$$

gdzie $Pr(a)$ oznacza względną zgodność między badanymi rastrami, a $Pr(e)$ określa hipotetyczne prawdopodobieństwo możliwej zgodności, z użyciem pozyskanych danych do obliczenia prawdopodobieństwa każdego piksela przypadkowo przydzielanego do każdej z klas (COHEN, 1960).

Na podstawie macierzy błędów, która jest zestawieniem poprawnie oraz niepoprawnie sklasyfikowanych pikseli do poszczególnych klas, bardzo często oprócz obliczenia współczynnika Kappa oblicza się również całkowitą dokładność klasyfikacji (w pracy określono skrótem *CDK*). Wyraża się ją ilorazem sumy pikseli poprawnie sklasyfikowanych (czyli tych znajdujących się na przekątnej macierzy) przez całkowitą liczbę wszystkich pikseli.

$$CDK = \frac{\sum_{p=1}^k n_{pp}}{n} \quad (34)$$

Wzór (34) (HEJMANOWSKA, 2008) w porównaniu ze wzorem na współczynnik κ (32) jest o wiele prostszy, dlatego tak często się go stosuje we wstępnej analizie.

Dodatkowo obliczono również błąd przeszacowania E_C (z tytułu nadmiaru, *error of commission*) oraz błąd niedoszacowania E_O (z tytułu pominięcia, *error of omission*). Dzięki temu można było ocenić, która z klas powoduje spadek jakości procesu klasyfikacji (HEJMANOWSKA, 2008):

$$E_C = 1 - \frac{n_{ii}}{\sum_{j=1}^k n_{ij}} \quad (35)$$

$$E_O = 1 - \frac{n_{jj}}{\sum_{i=1}^k n_{ij}} \quad (36)$$

Do stworzenia macierzy błędów potrzebne jest pole testowe, z którym można porównać wynik klasyfikacji. W tym celu w programie QGIS zwektoryzowano obszar objęty badaniem. Wektoryzację wykonano na podstawie posiadanych zdjęć radarowych, jak również wspomagano się ortofotomapą ze strony *geoportal.gov.pl* oraz mapą pokrycia terenu z projektu Corine Land Cover z 2006 roku dostępną na stronie *clc.gios.gov.pl*. Porównanie obrazów natomiast wykonano w programie Erdas Imagine przy pomocy opcji *Summary* z zakresu analiz GISowych z modułu *Interpreter*.

Tabela 13.1 Analiza ilościowa klasyfikacji dla zdjęcia okolic elektrowni „Kozienice”

	dane podstawowe	dane wzbogacone	dane podstawowe <i>GrowRegion</i>	dane wzbogacone <i>GrowRegion</i>
CDK	47,273 %	56,575 %	49,632 %	59,119 %
κ	0,30705	0,40755	0,33062	0,43235

Tabela 13.1 pokazuje, że dla danych sześciowarstwowych jakość klasyfikacji wzrosła o ok. 10 %, a współczynnik Kappa podniósł się o 0,1. Jest to duża poprawa, na której można oprzeć dalsze badania w celu jeszcze większej efektywności.

Tabela 13.2 Błąd przeszacowania (z tytułu nadmiaru)

E_C [%]	dane podstawowe	dane wzbogacone	dane podstawowe <i>GrowRegion</i>	dane wzbogacone <i>GrowRegion</i>
gleba odkryta	26,62	24,82	26,49	24,52
zabudowania	93,29	84,62	92,82	82,65
woda	11,83	9,99	9,85	9,74
łąka	69,67	65,08	67,02	65,80
las	27,62	24,03	27,20	23,15

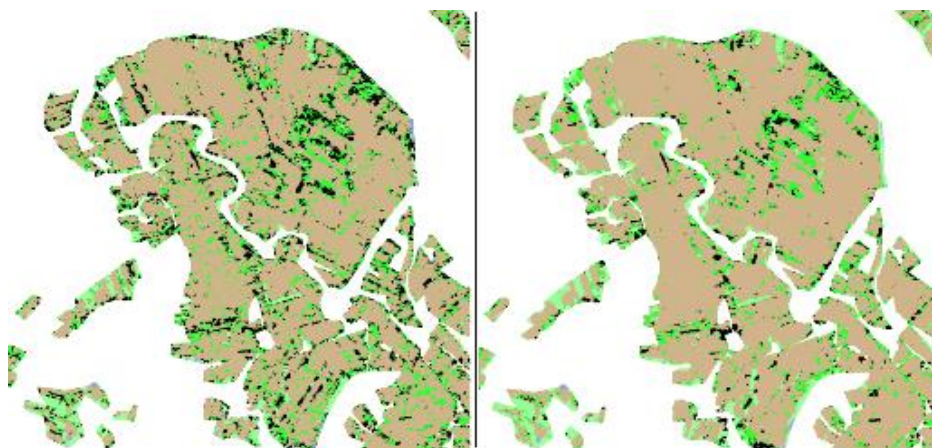
Największy spadek błędu przeszacowania widać w klasie zabudowań (ok. 10%). Reszta wartości również spadła, choć tylko minimalnie. Tabela 13.2 pokazuje jednak, że największym

problemem jest klasa zabudowań. Dodanie szumu cętkowego pozwala na spory spadek błędów, ale wciąż jest to bardzo duży błąd.

Tabela 13.3 Błąd niedoszacowania (z tytułu pominięcia)

E_o [%]	dane podstawowe	dane wzbogacone	dane podstawowe <i>GrowRegion</i>	dane wzbogacone <i>GrowRegion</i>
gleba odkryta	41,40	35,64	39,73	34,68
zabudowania	68,35	49,88	69,57	53,83
woda	11,15	10,70	12,20	10,61
łąka	54,14	42,91	47,97	42,93
las	60,98	50,30	58,42	45,05

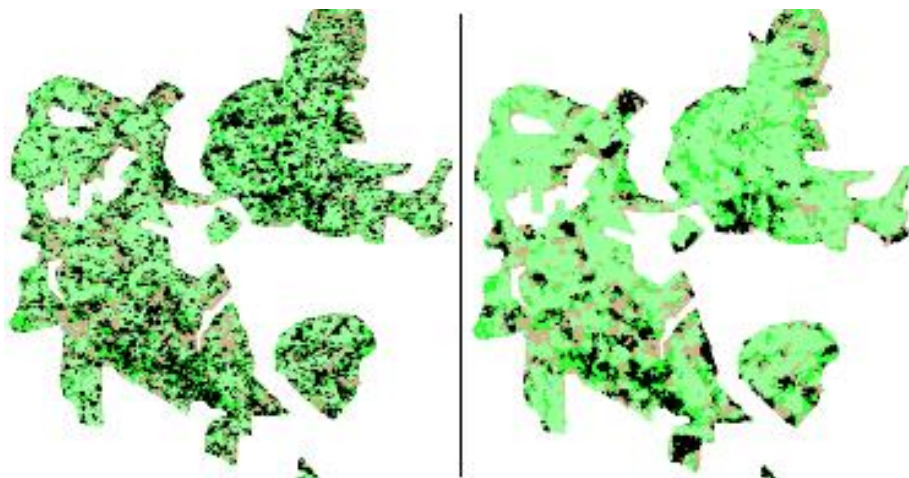
W Tabeli 13.3 również największy spadek można zauważyć w klasie zabudowań (16 - 19%). W klasie lasów też udało się osiągnąć spory spadek (10 - 13%). Reszta błędów, jak poprzednio, zmniejszyła się po dodaniu do danych podstawowych warstw z mapami granulometrycznymi cętek. Dla klasy zabudowań dziewiętnastoprocentowy spadek błędów jest naprawdę dużą poprawą. Jednak dalej widać, że to rozdrobniona i bardzo zróżnicowana klasa zabudowań jest największym problemem automatycznej klasyfikacji przeprowadzanej na zdjęciach radarowych.



Rys.13.7 Fragment klasyfikacji na danych podstawowych (z lewej) i wzbogaconych o mapy granulometryczne (z prawej) z funkcją *GrowRegion*, wycięty poligonami pól testowych dla klasy gruntów ornych. Legenda jak na Rys.13.6.

Na Rys.13.7 po prawej widać wyraźne zmniejszenie występowania koloru czarnego czyli klasy zabudowań. Niestety widać również, że pola testowe zostały zgeneralizowane na tyle, że najprawdopodobniej również były przyczyną słabszych wyników liczbowych jeśli chodzi o jakość klasyfikacji. Występujący miejscami kolor zielony może być oczywiście błędem klasyfikacji, ale również może oznaczać zadrzewienia śródpolne, które podczas tworzenia

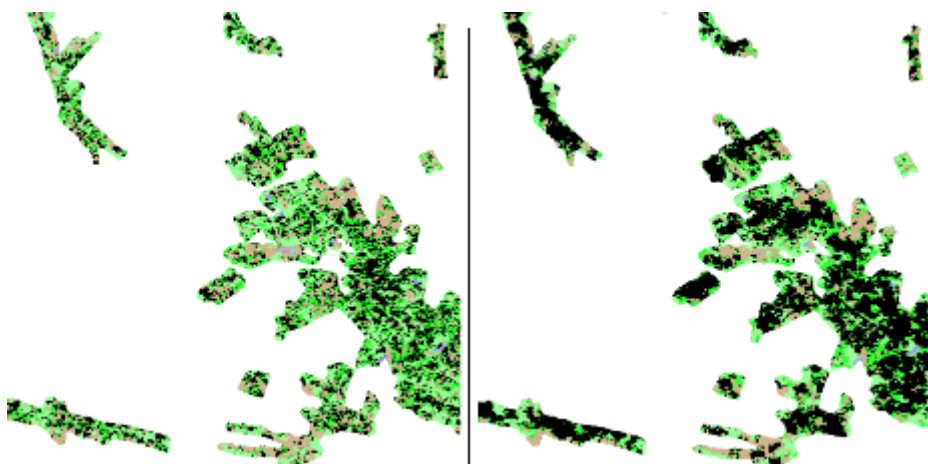
warstwy wektorowej zostały uznane za zbyt małe, by zostały wzięte pod uwagę jako osobny poligon.



Rys.13.8 Fragment klasyfikacji na danych podstawowych (z lewej) i wzbogaconych o mapy granulometryczne (z prawej) dla próbek prostokątnych, wycięty poligonami pól testowych dla klasy łąk. Legenda jak na Rys.13.6.

Rys.13.8, podobnie jak Rys.13.7, pokazuje, że dodanie warstw z cętkami dosyć skutecznie poprawia jakość klasyfikacji w tym wypadku klasy łąk. Z lewej strony czarny kolor klasy zabudowań ma charakter szumu zaciemniającego obraz klasyfikacji, natomiast z prawej strony kontur łąki jest już bardziej widoczny.

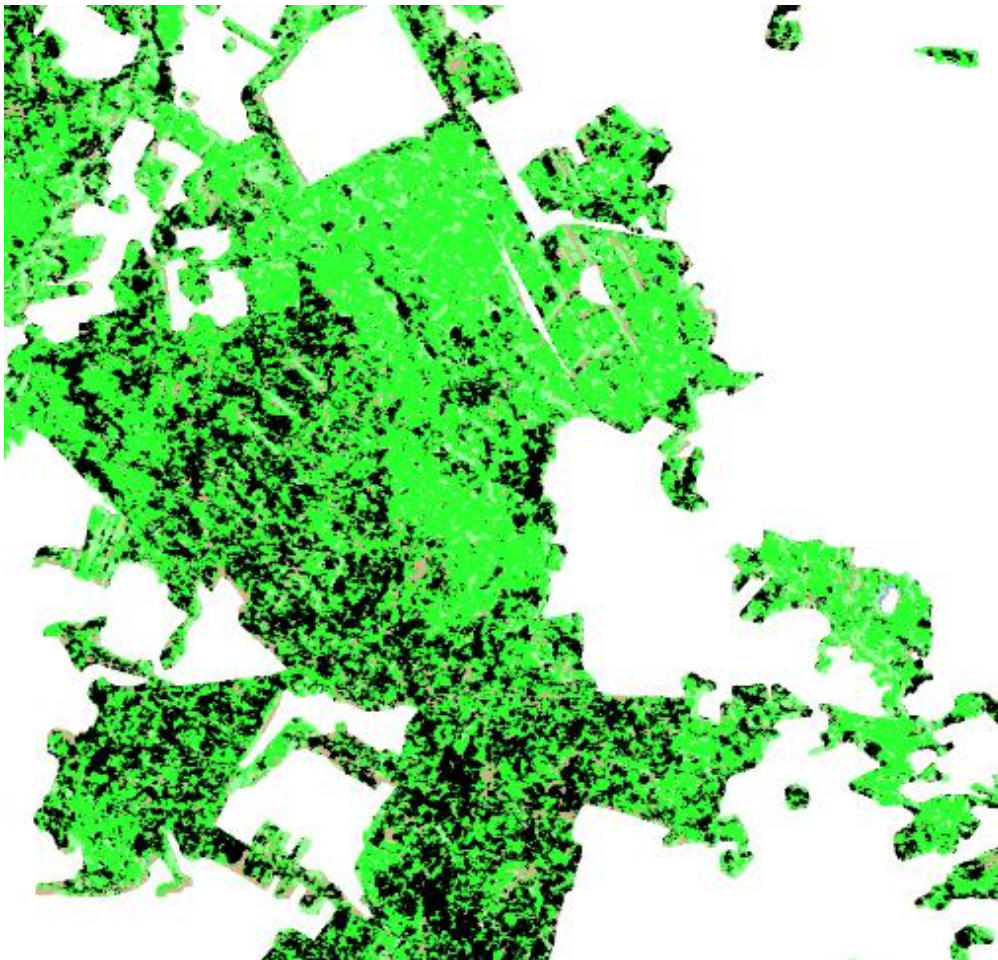
Najlepiej zmiany klasyfikacji terenów zabudowanych widać na Rys.13.9. Z lewej strony obszar, który powinien zostać sklasyfikowany jako zabudowania wygląda prawie tak samo jak obszar łąki na Rys.13.8 z lewej strony. Po dodaniu warstw z cętkami kontury o wiele lepiej wypełniły się czarnym kolorem.



Rys.13.9 Fragment klasyfikacji na danych podstawowych (z lewej) i wzbogaconych o mapy granulometryczne (z prawej) z funkcją GrowRegion, wycięty poligonami pól testowych dla klasy zabudowań. Legenda jak na Rys.13.6.

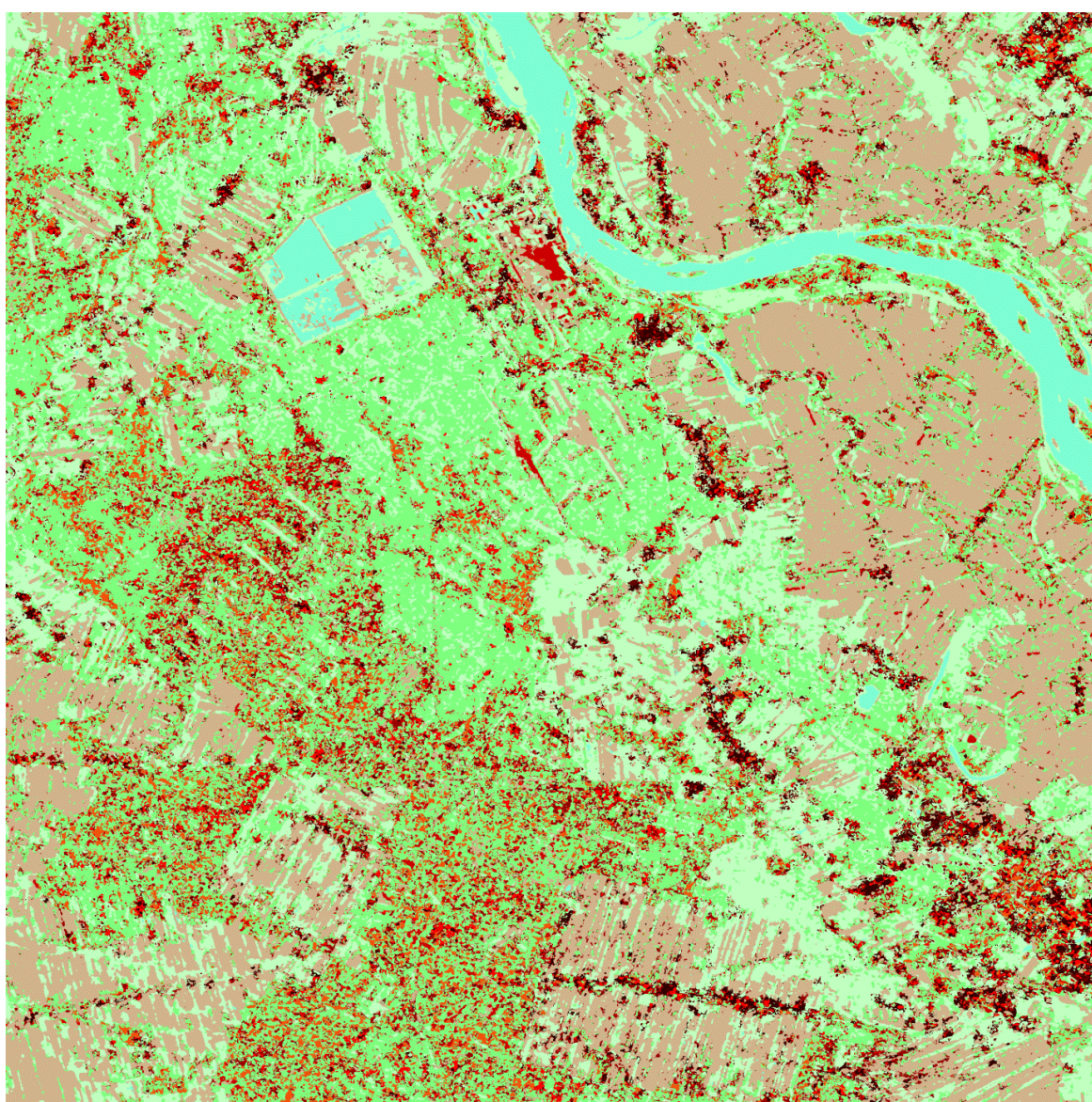
13.3 Klasa terenów zabudowanych

Biorąc pod uwagę problemy związane z klasyfikacją terenów zabudowanych postanowiono przeanalizować rozkład pikseli przydzielonych do tej klasy. Zauważono, że część terenów leśnych pokryta jest dosyć równomiernie pikselami z klasy lasów i zabudowań (Rys.13.10). Zdjęcie radarowe zostały wykonane pod koniec listopada, co oznacza, że w lasach liściastych drzewa były pozbawione liści. Korony drzew lasów liściastych miały więc inną, bardziej złożoną strukturę niż lasów iglastych. Być może znalazło to odzwierciedlenie w klasyfikacji, a zdjęcia radarowe mogłyby pomóc w odróżnieniu jednego rodzaju lasu od drugiego. Aby to sprawdzić należałoby znaleźć odpowiednią mapę drzewostanów lub też stworzyć własną na podstawie innych danych (zdjęć lotniczych, satelitarnych) i porównać z wynikiem klasyfikacji.



Rys.13.10 Fragment klasyfikacji na danych wzbogaconych o mapy granulometryczne z funkcją *GrowRegion*, wycięty poligonami pól testowych dla klasy lasów.
Legenda jak na Rys.13.6.

W tej pracy sprawdzono jedynie wizualnie jak rozkładają się piksele zaklasyfikowane do kategorii zabudowań. Klasa ta powstała na podstawie sześciu próbek użytych jako pola treningowe. Rys.13.11 przedstawia wynik klasyfikacji, w którym rozjaśniono kolory innych klas, a barwę czarną zmieniono na różne odcienie czerwieni. Można zauważyć, że piksele z klasy zabudowań o jaśniejszym odcieniu czerwieni w dużej mierze znajdują się na terenach leśnych, natomiast piksele w ciemniejszych odcieniach skupiają się bardziej na terenach zabudowanych. Aby sprawdzić czy ten wizualny efekt ma swoje odzwierciedlenie w liczbach, należałoby przeprowadzić kolejną analizę ilościową tylko dla klasy lasów i klasy zabudowań podzielonej na sześć kategorii związanych z próbkami, z których utworzono pola treningowe.



Rys.13.11 Wynik klasyfikacji danych wzbogaconych o mapy granulometryczne z funkcją *GrowRegion* ze zróżnicowaniem barwnym dla terenów zurbanizowanych (odcienie czerwieni).

13.4 Badania na danych jednowarstwowych

Po zadowalających wynikach analizy ilościowej postanowiono wykonać doświadczenie na innym zestawie danych w celu sprawdzenia możliwości wykorzystania danych jednokanałowych. Wykorzystano obraz radarowy w polaryzacji HH Warszawy i okolic (Rys.10.2) z satelity TanDEM-X, wykonany w trybie pasmowym (stripmap) w dniu 22.08.2011 r. Już na wstępie widać różnice w stosunku do poprzednich danych. Po pierwsze, zdjęcie jest tylko w jednej polaryzacji więc dane podstawowe będą miały jedną warstwę (obraz HH) a dane z mapami cętek tylko 3 warstwy. Po drugie, obraz został wykonany w sierpniu, a więc w miesiącu, w którym cała roślinność jest bujna i zielona, a na niektórych polach trwają żniwa.

Oba te punkty w tym wypadku spowodowały słabą jakość klasyfikacji co pokazują poniższe tabele. W celu poprawy zwiększono liczbę próbek do 47 (dla porównania dla zdjęć okolic Kozienic użyto 33 próbek), jednak nawet to nie dało zadowalającego efektu.

Tabela 13.4 Analiza ilościowa klasyfikacji dla zdjęcia okolic Warszawy

	dane podstawowe	dane wzbogacone	dane podstawowe <i>GrowRegion</i>	dane wzbogacone <i>GrowRegion</i>
CDK	30,652%	32,471%	30,993%	32,898%
κ	0,09914	0,12254	0,09547	0,11891

Jak pokazuje Tabela 13.4 wzrost całkowitej dokładności klasyfikacji następuje zaledwie o 2%, a współczynnik κ wynosi ok. 0,1, co jest bardzo niską wartością.

Tabela 13.5 Błąd przeszacowania (z tytułu nadmiaru)

E_c [%]	dane podstawowe	dane wzbogacone	dane podstawowe <i>GrowRegion</i>	dane wzbogacone <i>GrowRegion</i>
grunty orne	59,45	57,88	58,95	58,49
zabudowania	76,20	70,36	75,06	72,65
woda	40,53	41,40	35,15	31,90
łąka	83,34	82,58	83,41	82,79
las	67,89	67,43	68,05	67,00

W Tabeli 13.5 błąd przeszacowania minimalnie spada po dodaniu dwóch warstw z cętkami. W Tabeli 13.6 natomiast w wynikach z funkcją *GrowRegion* można zauważyć wzrost błędu dla klasy łąk i minimalny wzrost dla klasy gruntów ornych.

Tabela 13.6 Błąd niedoszacowania (z tytułu ominięcia)

E_o [%]	dane podstawowe	dane wzbogacone	dane podstawowe GrowRegion	dane wzbogacone GrowRegion
grunty orne	76,41	75,42	69,23	70,55
zabudowania	76,65	74,40	84,18	78,81
woda	39,34	35,42	55,27	40,86
łąka	75,14	73,39	71,24	75,62
las	60,79	58,83	60,34	57,24

W przypadku tego zdjęcia klasyfikacja wyszła bardzo słabo. Należałoby sprawdzić czy klasyfikacja innymi metodami pozwoliłaby na osiągnięcie lepszych wyników. Dodatkowo na tę słabą jakość mogła wpłynąć również polaryzacja zdjęcia, zbyt mała ilość danych oraz data wykonania (w sierpniu gruntów ornych nie można traktować jako gleby odkrytej, a roślinność na polach może być odbierana tak samo jak roślinność na łąkach czy innych terenach zielonych.)

14. Wnioski

Przedstawiona praca miała na celu sprawdzenie postawionej na początku tezy, że szum cętkowy jako szum deterministyczny, zawiera potencjalnie użyteczne informacje o obrazowanych obiektach.

W ramach badań, przeprowadzono doświadczenie, które potwierdziło powyższą tezę, co poparto zaprezentowanymi w pracy wynikami. Przeprowadzone badania wykazały, że dla każdej z pięciu wybranych klas pokrycia terenu, zastosowanie map granulometrycznych cętek pozwoliło na poprawę rozróżnienia wybranych próbek obrazu, a w niektórych przypadkach w ogóle umożliwiło takie rozróżnienie, ponieważ wartości pikseli różnych klas pokrycia lub użytkowania terenu na oryginalnych obrazach były w tych przypadkach bardzo zbliżone, często nawet identyczne. Dopiero, ze względu na różny rozkład cętek na obrazach tych klas, zastosowanie przedstawionych przetworzeń pozwoliło uzyskać pożądany efekt. Użyteczność

szumu cętkowego znalazła więc potwierdzenie w przeprowadzonej klasyfikacji treści obrazów radarowych. Na przedstawionym przykładzie stwierdzono, że dodatkowe wykorzystanie map granulometrycznych wyodrębnionych wcześniej obrazów cętek, zaowocowało ok. 10% wzrostem dokładności klasyfikacji.

W przypadku terenów miejskich, ze względu na złożoną strukturę ich obrazów, należy przeprowadzić dalsze badania dotyczące tego, na ile stwierdzona poprawa jest wynikiem wykorzystania samego szumu, a na ile zbadanej w ten sposób tekstury obrazu.

Temat możliwości wykorzystania szumu cętkowego w klasyfikacji obrazów radarowych nie został jeszcze w pełni zbadany. Można powiedzieć, że to dopiero jeden z pierwszych kroków, pozwalających w pełni stwierdzić całkowity potencjał przedstawionej metody. Wydaje się jednak, że jest to krok ważny, m.in. właśnie dlatego, że jeden z pierwszych, ale także dlatego, że udowodnił, że szum cętkowy może zawierać istotne dla nas informacje, a odpowiednio przetworzony, np. poprzez utworzenie map granulometrycznych, może być z powodzeniem wykorzystany.

Bibliografia

ARGENTI F., LAPINI A., ALPARONE L., BIANCHI T., (2013) *A tutorial on speckle reduction in Synthetic Aperture Radar Images*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Magazine, 1(3), 6-35.

BALANIS C.A., (2005) *Antenna Theory, Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc., wyd. 3, Hoboken, New Jersey, 1136.

BELHADJ Z., (1995) *Apport de la polarimétrie multifréquence pour la classification en télédétection radar*, Doctorat de l'Université de Nantes, IRESTE.

BERNADZKI E., (1991) *Dogłądanie lasu wyzwanie i szansa*, Echa leśne, 4, 10-11.

BOUCHEMAKH L., SMARA Y., BOUTARFA S., HAMADACHE Z., (2008) *A Comparative Study of Speckle Filtering In Polarimetric Radar SAR Images*, Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008, ICTTA 2008, 3rd International Conference on, 1-6.

CHEN H., KASILINGAM D., (1999) *k-means classification filter for speckle removal in radar images*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings, IEEE 1999 International, 2, 1244-1246.

CHENG H., TIAN J., (2009) *Speckle Reduction of Synthetic Aperture Radar Images Based on Fuzzy Logic*, Education Technology and Computer Science, 2009, ETCS '09, 1st International Workshop on, 1, 933-937.

CIOŁKOSZ A., (2010) *Krótki wykład: Teledetekcja; Wstęp do teledetekcji*, dostępne na: <http://geoforum.pl/?menu=46816,46858,46958&link=wstep-do-teledetekcji>

COHEN J., (1960) *A coefficient of agreement for nominal scales*, Educational and Psychological Measurement, 20, 37-46.

DONG Y., FOISTER B., MILNE A., TICEHURST C., (1997) *The Application of Wavelet Transform for Speckle Suppression in Radar Imagery*, Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International, 2, 1057-1059.

DRESEL T., HÄUSLER G., VENZKE H., (1992) *Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar*, Applied Optics, 31(7), 919-925.

ESCH T., SCHENK A., ULLMANN T., THIEL M., ROTH A., DECH S., (2011) *Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information*, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 49(6), 1911-1925.

FISCHER W.A., HEMPHILL W.R., KOVER A., (1976) *Progress in Remote Sensing*. Photogrametria, 32(2), 33-72.

GALTON F., (1892) *Finger Prints*, Macmillan and Co., Londyn, 216.

GAO Y., MAS J.F., (2008) *A comparison of the performance of pixel-based and object-based*

classifications over images with various spatial resolutions, Online Journal of Earth Sciences, 2(1), 27-35.

GOODMAN J.W., (1976) *Some fundamental properties of speckle*, The Journal of the Optical Society of America, 66(11), 1145-1150.

HEJMANOWSKA B., *materiały uzupełniające do wykładów; analiza dokładności klasyfikacji*, 2008, dostępne na: <http://home.agh.edu.pl/~galia/students/NS/Analiza%20dokladnosci%20klasyfikacji.pdf>

ISAACS A. - (red.) (1999) *Słownik Fizyki*, Prószyński i S-ka, Warszawa, 462.

JOSEPH G., (2003) *Fundamentals of Remote Sensing*, Universities Press, Hyderabad, 433.

KUPIDURA P., JAKUBIAK M., (2009) *The morphological filtering of the remote sensing images for the noise reduction comparing to traditional filters*, Annals of Geomatics, 7(2), 63-68.

KUPIDURA P., KOZA P., MARCINIAK J., (2010) *Morfologia matematyczna w teledetekcji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 250.

KUPIDURA P., KOZA P., (2008) *Radar Imagery Filtering with Use of the Mathematical Morphology Operations*, Polish J. of Environ. Stud. 17(1C), 31-35.

LEE J.S., GRUNES M.R., DE GRANDI G., (1999) *Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification*, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 37(5), 2363-2373.

NOVAK L.M., BURL M.C., (1990) *Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR Imagery*, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions On, 26(2), 293-305.

OBMIŃSKI Z., (1977) *Ekologia lasu*, PWN, 48-49, 480.

PRATCHETT T., STEWART I., COHEN J., (2002) *Nauka Świata Dysku II. Glob*, Prószyński i S-ka, Warszawa, 328.

REES W. G., (2001) *Physical principles of remote sensing*, Cambridge University Press, wyd. 2, Cambridge, 360.

ROGAŁSKI M. (red.) (2004) *Łąkarstwo*. Wydawnictwo Kurpisz, Poznań, 10-13, 270.

ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ROZWOJU REGIONALNEGO I BUDOWNICTWA z dnia 29 marca 2001 r. w sprawie ewidencji gruntów i budynków, Dz. U. Nr 38, poz. 454, załącznik nr 6: ZALICZANIE GRUNTOW DO POSZCZEGÓLNYCH UŻYTKÓW GRUNTOWYCH.

RUSSEL C.H., GONZELO R.A., (1991) *Ranking in R^p and its use in multivariate image estimation*, Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, 1(2), 197-209.

RYZENKO J., BADURSKA A., KOBIERZYCKA A., *Raport I Fazy Projektu Foresight; Kierunki rozwoju systemów satelitarnych; Satelitarna obserwacja Ziemi* (2007), Polskie Biuro ds. Przestrzeni Kosmicznej.

SAAD A., EL ASSAD S., (1996) *Filtrage d'ordre vectoriel dans les images ROS polarimétriques: comparaison avec une classe de filtres*, IEEE Trans, SEI (Systèmes Electroniques et Informatiques) IRESTE.

SERWAY R.A., BEICHNER R.J., (2000) *Physics for scientists and engineers*, Saunders College Publishing, wyd. 5, Fort Worth, 1551.

SOKAL R., (1974) *Classification: purposes, principles, progress, prospects*. Science 185 (4157), 1115 – 1123.

SZÓSTKA J., (2001) *Fale i anteny*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 480.

SZWEYKOWSKA A., SZWEYKOWSKI J. (red.) (2003), *Słownik botaniczny*, Warszawa: Wiedza Powszechna, 476-477, 800.

ULABY F. T., MOORE R. K., FUNG A. K., (1981, 1982, 1986) *Microwave Remote Sensing: Active and passive*, 3 tomy, Artech House, Norwood, 456, 608, 1120.

USTAWA Z DNIA 28 WRZEŚNIA 1991 R. O LASACH, Dz.U. 1991 nr 101 poz. 444, Rozdz. 1, Art. 3

VILLANUEVA J.C. (2010) *Radiation from the Sun*, dostępne na stronie internetowej: <http://www.universetoday.com/60065/radiation-from-the-sun>.

WOLIŃSKI K. *Budowa radaru: Liniowa modulacja częstotliwości (LFM)*, dostępne na stronie internetowej: <http://www.radary.az.pl/kompresja.php>.

WOODHOUSE I. H., (2006) *Introduction to microwave remote sensing*, CRC Press, Boca Raton, 400.

WRÓBEL A., materiały dydaktyczne: *Klasyfikacja nadzorowana obrazu cyfrowego*, dostępne na stronie internetowej: <http://home.agh.edu.pl/~awrobel/resources/klasyfikacja.pdf>.

XIA Z.-G., SHENG Y., (1996) *A Comprehensive Evaluation of Filters for Radar Speckle Suppression*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future', International, 3, 1559-1561.

XIA Z.-G., SHENG Y., (1996) *Radar speckle: noise or information*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGRASS '96, 'Remote Sensing for a Sustainable Future', International, 1, 48-50.

ZEGRODNIK B., ZEGRODNIK M., (2006) *Fizyka (SMS - system mądrego szukania)*, Wydawnictwo Park, Bielsko-Biała, 96.

strony internetowe:

clg.gios.gov.pl/index.php?IdCss=0&IdStr=1228813529

earthobservatory.nasa.gov/Features/LandCover/

earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/

earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR1-1-2.htm

imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_l1/emspectrum.html

www.boundless.com/physics/electromagnetic-waves/the-electromagnetic-spectrum/microwaves/

www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/SAR_missions

www.genius.edu.pl/zastosowanie-widm-fal-elektromagnetycznych.php

Spis rysunków i tabel

<i>Rys.2.1 Widmo fal elektromagnetycznych</i>	13
<i>Rys.2.2 Rozkład Plancka w zależności od zmiany temperatury</i>	14
<i>Rys.2.3 Emisja fal radiowych przez radionadajniki</i>	15
<i>Rys.2.4 Poziomy, do których dociera promieniowanie kosmiczne</i>	16
<i>Rys.2.5 Zachowanie promieniowania w przestrzeni okołozemskiej</i>	17
<i>Rys.2.6 Nazwy kanałów w oknie mikrofalowym</i>	18
<i>Rys.2.7 Rodzaje fal (A) poprzeczna i (B) podłużna</i>	20
<i>Rys.2.8 Fala spolaryzowana w kierunku x (A) i w kierunku y (B)</i>	21
<i>Rys.2.9 Przykłady rodzajów polaryzacji</i>	21
<i>Rys.2.10 Interferencja dwóch fal kulistych oraz przykład interferencji na wodzie</i>	22
<i>Rys.2.11 Schemat pokazujący podobieństwo ucha i systemu mikrofalowego</i>	28
<i>Rys.3.1 Przykładowe typy anten</i>	30
<i>Rys.3.2 Przykładowa charakterystyka emisji anteny</i>	32
<i>Rys.4.1 Schemat dla radaru obserwacji bocznej</i>	36
<i>Rys.4.2 Dystorsja wynikająca ze skośnego zobrazowania</i>	36
<i>Rys.4.3 Geometria radaru obserwacji bocznej</i>	37
<i>Rys.4.4 Geometria opisanych dystorsji obrazów</i>	38

<i>Rys.5.1 Obraz SAR pozyskany 02.08.1991 przez satelitę ERS-1 z fragmentu Holandii o godzinie 23:40 czasu lokalnego</i>	<i>41</i>
<i>Rys.5.2 Obrazy zostały pozyskane nad miastem Udine, przez satelitę ERS-1 04.07.1993 r. o 9.59 rano oraz przez satelitę Landsat-5 tego samego dnia o godzinie 9.14 (GMT). Na zdjęciu optycznym wyraźnie widać chmury nad miastem</i>	<i>42</i>
<i>Rys.5.3 Lewy obraz przedstawia kombinację RGB trzech kanałów (P-RED, L-GREEN i C-BLUE) z obrazu SAR pozyskanego przez samolot JPL podczas kampanii MAESTRO-1. Na prawym z kolei widać obraz RGB złożony z różnych polaryzacji (HH -> RED, VV -> GREEN i HV -> BLUE), który może dostarczyć innych informacji o tym samym miejscu</i>	<i>43</i>
<i>Rys.5.4 Porównanie obrazów tego samego obszaru z satelity Landsat TMw kompozycji barwnej RGB 754 i ERS-1</i>	<i>43</i>
<i>Rys.6.1 Radiometria na obrazie radarowym, czyli intensywność rozpraszania w zależności od rodzaju powierzchni: tereny miejskie, las, spokojna woda, wzburzone morze</i>	<i>47</i>
<i>Rys.6.2 Rozpraszanie w zależności od rodzaju powierzchni</i>	<i>47</i>
<i>Rys.6.3 Rodzaje rozpraszania</i>	<i>48</i>
<i>Rys.6.4 Rozpraszanie w przypadku roślinności, 1 - bezpośrednie od roślin, 2 - bezpośrednie od gleby, 3 - mieszane</i>	<i>49</i>
<i>Rys.6.5 Rozpraszanie w zależności od długości fali</i>	<i>50</i>
<i>Rys.7.1 Model rozpraszania wyjaśniający powstawanie cętek</i>	<i>53</i>
<i>Rys.7.2 Fragment sceny z 21.04.1994 r. pokazujący dolinę Tybru w centr. cz. Włoch</i>	<i>55</i>
<i>Rys.7.3 Fragment obrazu: a) oryginalnego, b) po filtracji boxcar, c) po filtracji Lee</i>	<i>56</i>
<i>Rys.7.4 Hipersfera dla $n=9$ i $k=7$; $G_{p(n)}$ jest projekcją $G_{(n)}$</i>	<i>57</i>
<i>Rys.7.5 Fragment sceny z Flevoland (Holandia)</i>	<i>60</i>
<i>Rys.8.1 Metoda najmniejszej odległości od średniej. Analizowany piksel zostanie przypisany do klasy „piasek”</i>	<i>64</i>
<i>Rys.8.2 Metoda najmniejszej odległości zestandaryzowanej od średniej dla danej klasy. Analizowany piksel zostanie przypisany do klasy „las liściasty”</i>	<i>64</i>
<i>Rys.8.3 Metoda największego prawdopodobieństwa. Analizowany piksel zostanie przypisany do klasy „las liściasty”</i>	<i>65</i>
<i>Rys.8.4 Metoda równoległoboków. analizowany piksel nie zostanie przypisany do żadnej klasy, gdyż nie jest zawarty w żadnym równoległoboku</i>	<i>65</i>
<i>Rys.8.5 Przykład działania klasyfikacji nienadzorowanej ISODATA</i>	<i>66</i>
<i>Rys.8.6 Przykład segmentacji i klasyfikacji wysokiej zabudowy wykonanej na podstawie</i>	<i>67</i>
<i>Rys.9.1 Przykład erozji zbioru X przy pomocy elementu strukturującego B</i>	<i>69</i>
<i>Rys.9.2 Erozja interpretowana jako zmiana struktury obrazu w zależności od wyniku porównania jej z elementem strukturującym</i>	<i>70</i>
<i>Rys.9.3 Przykład dylacji zbioru X przy pomocy elementu strukturującego B</i>	<i>71</i>
<i>Rys.9.4 Dylacja jako zmiana struktury obrazu przez porównanie jej z elementem strukturującym</i>	<i>71</i>
<i>Rys.9.5 Erozja i dylacja zbioru X przy pomocy elementu strukturującego B</i>	<i>72</i>
<i>Rys.9.6 Otwarcie i domknięcie na zbiorze X</i>	<i>73</i>

<i>Rys.9.7 Porównanie otwarcia elementem strukturującym B oraz wielokrotnym elementem strukturującym G</i>	<i>74</i>
<i>Rys.9.8 Granulometria dla dwóch fragmentów o różnej częstotliwości przestrzennej</i>	<i>76</i>
<i>Rys.9.9 Rekonstrukcja przez dylację</i>	<i>78</i>
<i>Rys.10.1 Zdjęcia Terra SAR-X w polaryzacjach VH i VV.....</i>	<i>79</i>
<i>Rys.10.2 Zdjęcie Warszawy z satelity TanDEM-X z dn. 22.08.2011 r.</i>	<i>80</i>
<i>Rys.11.1 Schemat działania dla badania opisanego w rozdz. 11</i>	<i>83</i>
<i>Rys.11.2 Od góry: fragment obrazu VV, obraz po filtracji cętek:, jasne cętki, ciemne cętki.....</i>	<i>84</i>
<i>Rys.11.3 Wybrane klasy pokrycia terenu. W tle fragment obrazu w polaryzacji VV.</i>	<i>85</i>
<i>Rys.12.1 Metodyka działania wg której wykonano badania szumu cętkowego.</i>	<i>90</i>
<i>Rys.12.2 Fragment obrazu VH przed i po filtracji</i>	<i>91</i>
<i>Rys.12.3 Fragment obrazu VV po przetworzeniach, obraz po filtracji cętek, jasne cętki</i>	<i>92</i>
<i>Rys.12.4 Fragment mapy granulometrycznej dla obrazów VH i VV</i>	<i>93</i>
<i>Rys.12.5 Wyraźne różnice barwne na terenach zalesionych na kompozycjach RGB.....</i>	<i>94</i>
<i>Rys.12.6 Przykład kompozycji barwnej RGB vv-vh-vv.....</i>	<i>94</i>
<i>Rys.12.7 Przykład kompozycji barwnych RGB</i>	<i>95</i>
<i>Rys.12.8 Znaczniki osi z programu Cloud Compare</i>	<i>96</i>
<i>Rys.12.9 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy pokrycia „łąki”</i>	<i>97</i>
<i>Rys.12.10 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek łąk w zależności od kompozycji barwnej</i>	<i>98</i>
<i>Rys.12.11 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie</i>	<i>98</i>
<i>Rys.12.12 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy łąk</i>	<i>100</i>
<i>Rys.12.13 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy pokrycia „grunty orne”</i>	<i>101</i>
<i>Rys.12.14 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek gruntów ornych w zależności od kompozycji barwnej</i>	<i>102</i>
<i>Rys.12.15 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie</i>	<i>103</i>
<i>Rys.12.16 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy gruntów ornych</i>	<i>104</i>
<i>Rys.12.17 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy „lasy”</i>	<i>105</i>
<i>Rys.12.18 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek lasów w zależności od kompozycji barwnej</i>	<i>106</i>
<i>Rys.12.19 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie</i>	<i>107</i>
<i>Rys.12.20 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy lasów.....</i>	<i>108</i>
<i>Rys.12.21 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy „wody powierzchniowe”</i>	<i>109</i>
<i>Rys.12.22 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek wód w zależności od kompozycji barwnej</i>	<i>110</i>
<i>Rys.12.23 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy wód</i>	<i>111</i>
<i>Rys.12.24 Miejsca, z których pobrano próbki dla klasy „tereny zurbanizowane”</i>	<i>112</i>
<i>Rys.12.25 Zróżnicowanie barwne dla wybranych próbek terenów miejskich w zależności od kompozycji barwnej</i>	<i>113</i>
<i>Rys.12.26 Wygląd wybranych próbek na ortofotomapie</i>	<i>113</i>
<i>Rys.12.27 Przykłady zestawienia wszystkich próbek dla klasy terenów miejskich.....</i>	<i>115</i>
<i>Rys.12.28 Rozkład wszystkich warstw cętek dla dwóch próbek wody</i>	<i>116</i>

<i>Rys.12.29 Rozkład map granulometrycznych z obrazu vh na osi z dla wybranych próbek pięciu klas pokrycia terenu</i>	<i>117</i>
<i>Rys.12.30 Rozkład map granulometrycznych z obrazu vv na osi z dla wybranych próbek pięciu klas pokrycia terenu</i>	<i>118</i>
<i>Rys.13.1 Zestawienie vv-vh dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu</i>	<i>119</i>
<i>Rys.13.2 Zestawienie vh-vvjc dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu</i>	<i>120</i>
<i>Rys.13.3 Zestawienie vh-vhjc dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu.....</i>	<i>121</i>
<i>Rys.13.4 Zestawienie vv-vhcc dla wszystkich zebranych próbek pod kątem zróżnicowania klas pokrycia terenu.....</i>	<i>121</i>
<i>Rys.13.5 Wynik klasyfikacji metodą ISODATA z użyciem wcześniej wybranych prostokątnych próbek jako pól treningowych</i>	<i>123</i>
<i>Rys.13.6 Wynik klasyfikacji metodą ISODATA z użyciem pól treningowych pobranych opcją GrowRegion z miejsc, z których pobrano wcześniej próbki prostokątne.....</i>	<i>124</i>
<i>Rys.13.7 Fragment klasyfikacji na danych podstawowych i wzbogaconych o mapy granulometryczne z funkcją GrowRegion, wycięty poligonami pól testowych dla klasy gruntów ornych.....</i>	<i>127</i>
<i>Rys.13.8 Fragment klasyfikacji na danych podstawowych i wzbogaconych o mapy granulometryczne dla próbek prostokątnych, wycięty poligonami pól testowych dla klasy łąk</i>	<i>128</i>
<i>Rys.13.9 Fragment klasyfikacji na danych podstawowych i wzbogaconych o mapy granulometryczne z funkcją GrowRegion, wycięty poligonami pól testowych dla klasy zabudowań</i>	<i>128</i>
<i>Rys.13.10 Fragment klasyfikacji na danych wzbogaconych o mapy granulometryczne z funkcją GrowRegion, wycięty poligonami pól testowych dla klasy lasów</i>	<i>129</i>
<i>Rys.13.11 Wynik klasyfikacji danych wzbogaconych o mapy granulometryczne z funkcją GrowRegion ze zróżnicowaniem barwnym dla terenów zurbanizowanych</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 2.1 Urządzenia wykorzystujące kanały z zakresu mikrofal)</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 11.1 Wyniki obliczeń gęstości cętek</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 11.2 Wyniki obliczeń szorstkości dla obrazów z cętkami</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 13.1 Analiza ilościowa klasyfikacji dla zdjęcia okolic elektrowni „Kozienice”</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 13.2 Błąd przeszacowania (z tytułu nadmiaru).....</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 13.3 Błąd niedoszacowania (z tytułu pominięcia).....</i>	<i>127</i>
<i>Tabela 13.4 Analiza ilościowa klasyfikacji dla zdjęcia okolic Warszawy.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 13.5 Błąd przeszacowania (z tytułu nadmiaru).....</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 13.6 Błąd niedoszacowania (z tytułu ominięcia).....</i>	<i>132</i>