

RAPORT KOŃCOWY

z realizacji tematu „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi” (ver. 2)

CZĘŚĆ I - POTRZEBY I MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA WYBRANYCH TECHNIK GEOMATYCZNYCH W INWENTARYZACJI LASU

OPIS OBIEKTU I WYKORZYSTANEGO MATERIAŁU BADAWCZEGO

Spis treści

1. Wstęp.....	3
2. Potrzeby inwentaryzacyjne leśnictwa a możliwości ich realizacji wybranymi technikami geomatycznymi	9
3. Możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego do określania parametrów drzewostanu w świetle dostępnej literatury.	37
3.1 Wprowadzenie.....	37
3.2 Opis technologii lotniczego skaningu laserowego	38
3.3 Potencjalne zastosowanie lotniczego skaningu laserowego w leśnictwie - dotychczasowe wyniki.....	45
3.4 Możliwości integracji skaningu lotniczego ze zdjęciami cyfrowymi.....	69
3.5 Metody i algorytmy wykorzystywane przy określaniu parametrów drzewostanu.....	76
3.6 Wymagania sprzętowe i możliwości zastosowania określonego oprogramowania.	123
4. Możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie	130
4.1 Wstęp	130
4.2 Technologia skaningu laserowego (LIDAR)	131
4.3 Parametry drzew możliwe do określenia za pomocą skaningu naziemnego	139
4.4 Integracja z innymi metodami	141
5. Wykorzystanie zobrażeń satelitarnych w inwentaryzacji lasu	143
5.1 Wstęp	143
5.2 Możliwości zastosowania zobrażeń satelitarnych przy określaniu wybranych charakterystyk drzewostanów	145
5.3 Potencjalne zastosowanie wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych w Lasach Państwowych.....	161
6. Zdjęcia radarowe	163
7. Opis obiektu badawczego oraz wykorzystane w analizach materiały.....	173

1. Wstęp

Prowadzenie zrównoważonej gospodarki leśnej wymaga dostępu do pełnej i wszechstronnej informacji o lesie. Dlatego też współczesne zarządzanie lasu musi polegać na dokładnych metodach pomiaru lasu. Z jednej strony wymaga to doskonalenia statystycznych podstaw metod pomiaru, z drugiej zaś - stosowania nowych, dokładniejszych i wydajniejszych technik pomiaru drzew i drzewostanów.

Wychodząc z takiego założenia, w kwietniu 2006 roku Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych zleciła Wydziałowi Leśnemu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego wykonanie pracy naukowo-badawczej *Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi*. Jej celem było wyselekcjonowanie sposobów zdalnej rejestracji obrazu lasu użytecznych w leśnictwie opartych na wybranych technikach geomatycznych, takich jak: lidar (naziemny i lotniczy), zdjęcia hemisferyczne, zdjęcia cyfrowe naziemne i lotnicze, system kartowania mobilnego, wysokorozdzielcze zdjęcia satelitarne. Zamiarem podjętych badań było doprowadzenie do opracowania obrębowej metody pomiaru lasu dla potrzeb planowania okresowego z wykorzystaniem technik geomatycznych. Ten kompleksowy program realizowany był przez wielodyscyplinarny zespół, który podjął próbę opracowania metod inwentaryzacji lasu opartych na nowoczesnych danych geomatycznych.

Analizy były prowadzone w odniesieniu do cech inwentaryzacyjnych drzewostanów, określonych metodą pomiarów terenowych. Poszukiwane były nowe kierunki inwentaryzacji z wykorzystaniem współczesnych narzędzi teledetekcyjnych. Założeniem pracy było, aby nowa metoda wykorzystywała techniki geomatyczne w powiązaniu z SILP, Leśną Mapą Numeryczną i modelami symulacyjnymi. Wykorzystywano przy tym wyniki prac badawczych dotyczących geomatyki, finansowane równolegle przez DGLP, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego i Unię Europejską.

Podjęte badania objęły:

- konfrontację potrzeb dotyczących inwentaryzacji lasu z aktualnymi możliwościami teledetekcji,
- selekcję rozwiązań technicznych i stosowanych typów zobrazowań,
- organizację badań empirycznych na wybranych poligonach badawczych,

- pomiary terenowe, obrazowanie z poziomu terenowego, lotniczego i satelitarnego,
- analiza pozyskanych danych w SIP,
- wnioskowanie dotyczące użyteczności poszczególnych typów zobrazowań, ich dokładności i dostępności (możliwości stosowania operacyjnego, mobilność sprzętu, jego użyteczność w warunkach terenowych),
- opracowanie koncepcji zastosowań praktycznych,
- analiza ekonomiczna,
- opracowanie scenariuszy aplikacji.

Prace wykorzystywały dane zbierane z następujących poziomów:

1. Dane referencyjne – inwentaryzacja terenowa
2. Dane naziemne
 - Lidar
 - Zdjęcia hemisferyczne
 - Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści (Leaf Area Index-LAI)
 - System kartowania mobilnego (Mobile Mapping System-MMS)
3. Dane lotnicze
 - Lidar
 - Wielospektralne zdjęcia cyfrowe

Jest to pierwsza w Polsce próba zintegrowanego wdrażania fragmentarycznych dotychczas badań nad wykorzystaniem szczególnych technik geomatycznych. Zamiarem wykonawców było sprawdzenie możliwości kompleksowego ich wykorzystania. Wyniki tej pracy dają odpowiedź na pytania, czy jest to możliwe, celowe i korzystne ze względów ekonomicznych? Mając na uwadze obszerny zakres prac zaproponowano podzielenie go na etapy.

Pierwszy etap prac (2006 – 2008), którego dotyczy niniejsze sprawozdanie, to projekt pilotowy, który poświęcono na:

1. Analizę potrzeb inwentaryzacji lasu w zestawieniu ze współczesnymi narzędziami teledetekcyjnymi.

2. Przeprowadzenie prac pilotowych dotyczących zastosowania danych optycznych (lidarowych, zdjęć hemisferycznych oraz zdjęć wykonywanych kamerami cyfrowymi, a także rozpocząć pracę nad wysokorozdzielczymi zdjęciami satelitarnymi) na poligonach badawczych.

Etap ten kończy się:

- opracowaniem propozycji zastosowania wyselekcjonowanych technik teledetekcyjnych w inwentaryzacji lasu,
- wstępną analizą ekonomiczną proponowanych rozwiązań.

Drugi etap, który trzy lata temu proponowano rozpocząć z końcem 2008 roku, poświęcony miał być następującym zagadnieniom:

1. Przetestowanie technik radarowych (zarówno lotniczych, jak i satelitarnych).
2. Kontynuacja prac nad danymi optycznymi, bazując na wynikach etapu I.2. - uszczegółowienie metod.
3. Kontynuacja prac nad satelitarnymi zdjęciami optycznymi.
4. Wytyczne dla praktyki leśnej.

Obecne zlecenie DGLP obejmuje zakres I etapu. Był on realizowany na poligonie badawczym zlokalizowanym w Nadleśnictwie Milicz z wykorzystaniem wyników badań prowadzonych w przez Nadleśnictwo Świeradów (inicjatywa Nadleśnictwa, finansowana przez fundusz Inicjatywy Wspólnotowej – Interreg i DGLP).

Prace odbywały się według następujących założeń ogólnych:

1. Wykorzystane zostały dane z istniejących powierzchni próbnych.
2. Założono szereg nowych, uzupełniających referencyjnych powierzchni próbnych (zakres inwentaryzacji: gatunek drzewa, pierśnica, wysokość, azymut i odległość od środka powierzchni próbnej, wysokość podstawy korony, szerokość korony, rzut korony, grubość na 5 metrach, zdjęcia stereoskopowe).
3. Analizy obrazowań lotniczych (lidar i zdjęcia wielospektralne) dokonywano w odniesieniu do terenowych powierzchni próbnych.
4. Analizy obrazowań terenowych (lidar, zdjęcia hemisferyczne, LAI, MMS) dokonywane były w odniesieniu do referencyjnych powierzchni próbnych.

5. Analizy wykonywane w relacji do LMN w pierwszej kolejności odnosiły się do parametrów mierzonych na powierzchniach próbnych podczas okresowych inwentaryzacji lasu, a w dalszych analizach były rozszerzane o inne parametry, z uwzględnieniem:

- możliwości określenia parametrów drzew (gatunek, pierśnica, wysokość, średnice na różnych wysokościach) i drzewostanów (stopień zagęszczenia, przeciętna wysokość, zwarcie, skład gatunkowy, forma zmieszania) na podstawie danych obrazowych,
- dokładności pomiarów na danych obrazowych,
- opracowania algorytmów przetwarzania i analizy danych obrazowych.

Prace w ramach sprawozdawanego tematu wykonywał ponad 50-osobowy zespół w składzie:

- Prof. dr hab Tomasz Zawila-Niedźwiecki (Uniwersytet Nauk Stosowanych w Eberswalde i IBL) i dr hab. Michał Zasada (SGGW) – koordynacja tematu
- Mgr inż. Radomir Bałazy (Nadleśnictwo Świeradów)
- Marcin Beza (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Dr inż. Michał Brach (SGGW)
- Mgr inż. Agnieszka Bronisz (SGGW)
- Mgr inż. Karol Bronisz (SGGW)
- Prof. dr hab. Arkadiusz Bruchwald (SGGW)
- Prof. dr hab. Bogdan Brzeziecki (SGGW)
- Mgr inż. Andrzej Choromański (Geoinvent)
- Mateusz Glista (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Inż. Dariusz Górski (SGGW)
- Inż. Natalia Grala (SGGW)
- Mgr Sandeep Gupta (Uniwersytet we Freiburgu)
- Mgr Johannes Heinzel (Uniwersytet we Freiburgu)
- Dr inż. Andrzej Jagodziński (Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu)

- Mgr inż. Barbara Joniec (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Dr hab. Bronisław Kłapeć (SGGW)
- Prof. dr Barbara Koch (Uniwersytet we Freiburgu)
- Mgr inż. Adam Konieczny (Taxus SI Sp.z o.o.)
- Paweł Konieczny (Taxus SI Sp. z o.o.)
- Dr inż. Krystian Koziół (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Prof. dr hab. Stanisław Miścicki (SGGW)
- Prof. dr hab. Jerzy Mozgawa (SGGW)
- Garret Mullooly (Treemetrics Ltd.)
- Prof. dr hab. Heronim Olenderek (SGGW)
- Marcin Pierzchalski (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Dr inż. Grzegorz Rączka (Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu)
- Mgr inż. Robert Rutkowski (Geoinvent)
- Radosław Seweryn (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Adam Siczka (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Radosław Sroga (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Mgr inż. Krzysztof Stereńczak (SGGW)
- Mgr Christoph Straub (Uniwersytet we Freiburgu)
- Dr inż. Paweł Strzeliński (Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu)
- Dr inż. Marta Szostak (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Huber Szostecki (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Piotr Szwed (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Piotr Tompalski (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Mgr Yunsheng Wang (Uniwersytet we Freiburgu)
- Elżbieta Wawrzeczko (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)

- Dr Holger Weinacker (Uniwersytet we Freiburgu)
- Mgr inż. Agata Wencel (Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu)
- Dr inż. Piotr Wężyk (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie)
- Dr inż. Rafał Wojtan (SGGW)
- Dr Grzegorz Zajączkowski (IBL)
- Prof. dr hab. Henryk Żybura (SGGW)
- oraz pracownicy BULiGL w Brzegu i Taxus SI Sp. z o.o.

W pierwszym etapie prac dokonano rozpoznania potrzeb inwentaryzacji lasu oraz zestawiono je z technikami geomatycznymi technologicznie dostępnymi do badań i wdrożeń. W analizie tej uwzględniono lotniczy i terenowy skaningu laserowy, cyfrowe zdjęcia lotnicze oraz zdjęcia satelitarne wykonywane w zakresach optycznych i mikrofalowych. Nie uwzględniono w tym opracowaniu zobrazowań tworzonych na podstawie satelitarnego skaningu laserowego, gdyż obecnie technika ta jest zaledwie w fazie testowania przez agencje kosmiczne, zobrazowania są drogie, a rozdzielczość terenowa rzędu kilkudziesięciu metrów nie spełnia oczekiwań leśnictwa. Jednakże w perspektywie kilku najbliższych lat można się spodziewać ciekawych rozwiązań technologicznych w tym zakresie.

Prace w ramach tego etapu sprawozdawanego tematu wykonywał zespół: prof. dr hab. Jerzy Mozgawa (1), mgr inż. Krzysztof Stereńczak (2), mgr inż. Agata Wencel (3), dr inż. Piotr Wężyk (3), dr hab. Michał Zasada (3), dr inż. Grzegorz Zajączkowski (4), prof. dr hab. Tomasz Zawila-Niedźwiecki (5), dr inż. Rafał Wojtan (redakcja)

2. Potrzeby inwentaryzacyjne leśnictwa a możliwości ich realizacji wybranymi technikami geomatycznymi

2.1 Przesłanki sposobu opracowania zagadnienia

Problematyka rozpoznania potrzeb dotyczących inwentaryzacji lasu w relacji do aktualnych możliwości teledetekcji została wyszczególniona jako jedno z zadań badawczych tematu „*Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych geomatycznych*”. Szczegółowe analizy literatury przedmiotu prowadzono kierując się podanymi poniżej kilkoma przesłankami generalnymi.

Przesłanka pierwsza przyjmuje za oczywiste stwierdzenie, że potrzeby inwentaryzacyjne są zmienne. Ustalanie zakresu niezbędnych inwentaryzacji jest więc procesem, a nie jednorazowym aktem zaś zakres i stosowane metody inwentaryzacyjne są w danym momencie czasowym wypadkową co najmniej dwóch procesów.

Proces pierwszy to uszczegółowione w przepisach prawnych i rozporządzeniach wykonawczych cele główne, ustalone dla lasów jako elementów środowiska. Cele główne są dla lasów krajowych ustalane w zgodzie z koncepcjami przyjętymi przez gremia międzynarodowe. Zasada hierarchii celów w leśnictwie powinna być rozumiana w ten sposób, że cele niższego rzędu nie mogą być sprzeczne z celami rzędu wyższego. Kończącym łańcuchem artykułowanych potrzeb inwentaryzacyjnych, mających zrealizować konkretną grupę celów, są wewnątrz resortowe akty prawne, przyjmujące dla Lasów Państwowych postać instrukcji i zarządzeń Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych.

Aktualny stan potrzeb inwentaryzacyjnych jest zawarty w obowiązujących w LP instrukcjach i zarządzeniach DG i w stosunku do zapisów tam zawartych można byłoby podejmować próby doskonalenia metod inwentaryzacji w oparciu o zintegrowane dane geomatyczne. Powyższe stwierdzenie zawiera daleko idące uproszczenia, dotyczące bardzo obszernej merytorycznie treści działań inwentaryzacyjnych, podlegających regulacjom instrukcyjnym. Jako przykład wskazujemy tu programy ochrony przyrody dla nadleśnictw, będące integralną częścią planu urządzania lasu. Program ochrony przyrody obliuguje między innymi do rozpoznanie funkcjonowania przyrody poza gruntami własności LP, pośrednio określając nietypowy zakres prac inwentaryzacyjnych.

Proces drugi to ścieranie się poglądów różnych szkół naukowych i struktur zawodowych w dyskusjach nad wyborem metody inwentaryzacji, zapisanej następnie w obowiązujących aktach prawnych. Wybór metody inwentaryzacji z reguły jest kompromisem pomiędzy dostępną już technologią i stanem wiedzy naukowej w zakresie metod inwentaryzacyjnych a względami ekonomicznymi, organizacyjnymi, a nawet społecznymi, które regulują działanie organizacji gospodarczej, jaką są Lasy Państwowe. Truizmem byłoby twierdzenie, że nauka i technologia zawsze wyprzedzają rozwiązania praktyczne. Poza tym, kształt zapisów prawnych jest często interpretowany jako forma sukcesu określonej grupy, partycypującej w przygotowaniu przepisów obowiązujących.

Wnioski z pierwszej przesłanki generalnej przedstawiono poniżej.

1. Opracowanie ramowych założeń metody inwentaryzacji opartej na integracji danych geomatycznych musi bazować zarówno na obowiązujących zapisach instrukcyjnych jak i na dobrym rozpoznaniu hierarchii celów, stawianych teraz i w przyszłości przed leśnictwem jako całością. Innymi słowy, dla potrzeb przyszłej metody inwentaryzacji lasu, świadomie otwartej na prognozowanych rozwiązaniach technologicznych w sferze geomatyki, należało przede wszystkim zidentyfikować generalny paradygmat współczesnego leśnictwa, który z wysokim prawdopodobieństwem będzie obowiązywał w czasie stosowania metody. Zasadnicze ramy naszego leśnictwa określa polityka leśna państwa (1997) w postaci modelu trwale zrównoważonej, wielofunkcyjnej gospodarki leśnej (TZWGL). Zgodnie z powyższym, dla dalszego szczegółowego konfrontowania potrzeb inwentaryzacyjnych i możliwości teledetekcji przyjmujemy powszechnie akceptowany w leśnictwie krajowym paradygmat trwale zrównoważonej wielofunkcyjnej gospodarki leśnej, wyznaczający pola potencjalnych potrzeb inwentaryzacyjnych LP (Nowakowski, Rozwałka 2000, Zarządzenie Nr 11, 11a DGLP).
2. Rozpoznanie potrzeb inwentaryzacyjnych i wybór określonej koncepcji teoretycznej metody inwentaryzacyjnej dla potrzeb realizowanego tematu naukowego nie może opierać się tylko na jednej „szkole naukowej”. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że przedstawiciele szkoły zawsze będą preferowali koncepcje teoretyczne i rozwiązania praktyczne metody inwentaryzacji korzystne dla wizerunku szkoły. Rozsądnym rozwiązaniem wydaje się stąd rozpoznanie pełnego spektrum podejść metodologicznych, proponowanych dla inwentaryzacji lasu wielofunkcyjnego przez kluczowych i uznanych reprezentantów wszystkich krajowych szkół naukowych z

dziedziny leśnictwa. Zwracamy uwagę na szczególną rolę w procesie identyfikacji potrzeb inwentaryzacyjnych krajowych szkół naukowych. To podkreślenie ma wyraźny aspekt praktyczny. Jeśli opracowywana nowa metoda inwentaryzacji ma mieć szansę praktycznego stosowania, to nawet w odległej perspektywie czasowej musi być mocno osadzona w realiach przyrodniczych leśnictwa krajowego.

3. Powyższe stwierdzenie o konieczności wyselekcjonowania ze stanowisk różnych krajowych szkół naukowych potrzeb inwentaryzacyjnych, przydatnych dla trwale zrównoważonej wielofunkcyjnej gospodarki leśnej jest mniej istotne dla zakresu badań literaturowych w sferze technologicznej. Problem ten nabiera jednak znaczenia przy ocenie możliwości przeniesienia do leśnictwa krajowego rozwiązań technologicznych w sferze pozyskania i przetwarzania danych teledetekcyjnych, przetestowanych empirycznie na danych terenowych odmiennych przyrodniczo od warunków leśnictwa krajowego. Szczególna rola w opracowaniu metody spoczywać więc będzie na prawidłowo ustawionych metodycznie badaniach empirycznych realizowanego tematu, które powinny być ukierunkowane na rozpoznanie empirycznej przydatności rozwiązań technicznych dla wszystkich lub świadomie wybranych przez przedstawicieli leśnictwa krajowego potrzeb inwentaryzacyjnych w lesie wielofunkcyjnym. Zgodnie z powyższym, wyselekcjonowane problemy inwentaryzacyjne, sugerowane jako istotne dla potrzeb trwale zrównoważonej gospodarki leśnej powinny stać się automatycznie w trakcie pracy nad metodą tytułami opracowań cząstkowych realizowanego na zlecenie LP tematu naukowego. Tytuły opracowań cząstkowych są w stanie wystarczająco dokładnie informować zarówno o określonej potrzebie inwentaryzacji, jak i o technice geomatycznej potencjalnie przydatnej dla zrealizowania tej potrzeby.

4. Końcowe uwagi zawarte w p. 3 sygnalizują istotny problem metodyczny, który może pojawić się przy konfrontacji potrzeb inwentaryzacyjnych z potencjalnymi możliwościami teledetekcji. Jest to problem merytorycznie prawidłowego, ale w miarę szybkiego wyselekcjonowania ścieżki postępowania podczas pozyskania i przetwarzania obrazów teledetekcyjnych, która optymalnie zrealizuje określoną potrzebę inwentaryzacyjną. Wskazanie owej, najlepiej optymalnej, ścieżki postępowania (jednak bez konieczności oparcia się przy wyborze ścieżki na specjalnie konstruowanych do tego celu badaniach naukowych) będzie istotnie ważyć na postępach w całym realizowanym temacie naukowym. Logiczne wydaje się zatem, że

wstępne, ale w miarę pewne wskazanie ścieżki postępowania może w zasadzie zagwarantować jedynie wiedza ekspercka osób rozumiejących zarówno problematykę leśną jak i specyfikę poszczególnych etapów metody teledetekcyjnej. Mamy tu na myśli grupę osób profesjonalnie uprawiających teledetekcję lasów. Powyższe stwierdzenie należy rozumieć dodatkowo i w ten sposób, że specyfika merytoryczna tematu wymaga „seminaryjnego” rozstrzygnięcia zasadności realnych do zrealizowania zakresów merytorycznych kolejnych etapów procesu badawczego. W omawianym przypadku, dotyczącym potrzeby skonfrontowania potrzeb inwentaryzacyjnych dla trwale zrównoważonej, wielofunkcyjnej gospodarki leśnej z potencjalnymi możliwościami teledetekcji wymagany będzie udział reprezentantów (lub znajomości literatury) trzech działów merytorycznych a mianowicie: działu pierwszego obejmującego kluczowe dyscypliny leśnictwa, zgłaszających potrzeby inwentaryzacyjne lasu wielofunkcyjnego, działu drugiego, ogniskującego zainteresowania na technicznych i informatycznych aspektach teledetekcji i działu trzeciego, nazwanego wcześniej jako teledetekcja lasu.

Przesłanka druga bazuje na szczególnym znaczeniu, jakie w powszechnej opinii środowiska zawodowego przypisuje się Systemowi Informatycznemu Lasów Państwowych (SILP).

Budowany i konsekwentnie doskonalony od kilku lat SILP staje się najważniejszym narzędziem wspomagającym zarządzanie w Lasach Państwowych. Dane SILP tworzą fundamentalny zbiór informacji o lesie. Istnieje możliwość sięgania po te dane za pomocą środków przewidzianych przez twórców SILP, czyli odpowiednich ekranów oraz raportów na drukarkę. Doświadczony użytkownik może sięgać do bazy po dowolne dane i zestawiać je w potrzebnym mu układzie. Działania LP w zakresie doskonalenia i rozwijania możliwości analitycznych SILP wydają się wskazywać, że przyjmie on w przyszłości formę obejmującą wszystkie sfery zarządzania Lasami Państwowymi.

Pewność i adekwatność danych przetwarzanych w SILP w relacji do rzeczywistości terenowej ma stąd kluczowe i absolutnie pierwszorzędne znaczenie dla prawidłowego podejmowania decyzji gospodarczych. Pierwotnym źródłem informacji danych przechowywanych w SILP jest inwentaryzacja urządzeniowa. Zakres i dokładność inwentaryzacji urządzeniowej stanu lasu posiada proste przełożenie na tematykę merytoryczną oraz dokładność danych wyjściowych (analiz) SILP. Dlatego też niniejsze opracowanie powinno koncentrować uwagę na przyszłym profilu tematycznym inwentaryzacji urządzeniowej, która musi spełniać postulaty TZWGL

Należy mieć na uwadze możliwość łatwego pomylenia celów TZWGL i środków technicznych, wspomagających realizację celów. SILP jest (a raczej będzie) z pewnością podstawowym środkiem technicznym umożliwiającym zarządzanie i kontrolę realizacji celów zrównoważonego i wielofunkcyjnego leśnictwa, ale już nawet jego aktualne możliwości przetworzeń daleko wykraczają poza sferę zrównoważonej gospodarki leśnej. SILP jest i będzie doskonałym np. jako narzędzie analiz ekonomicznych, przetwarzając specjalne dane inwentaryzacyjne, dotyczące szacunków brakarskich, które nie należą do inwentaryzacji urządzeniowej. Dostrzegając potencjalny związek opracowywanej metody z inwentaryzacjami wykonywanymi na potrzeby szacunków brakarskich, zostają one, jako jedyna inwentaryzacja nienależąca do sfery zarządzania lasu, uwzględnione w niniejszym opracowaniu. Problematyka inwentaryzacji lasu w ramach szacunków brakarskich została wyodrębniona poza użytkowaniem lasu, w którym są zawsze merytorycznie sytuowane.

SILP w przyszłości musi istotnie rozszerzyć swoje możliwości analityczne w sferze informacji o zagrożeniu produkcji przyrodniczej czynnikami biotycznym, abiotycznymi i antropogenicznymi. Wymaga to między innymi pełnego wykorzystania specjalnych, corocznych inwentaryzacji stanu tych zagrożeń, precyzowanych w Instrukcji Ochrony Lasu. Problematyka inwentaryzacji zagrożenia produkcji przyrodniczej przez czynniki natury biotycznej, abiotycznej i antropogenicznej stanowi istotne pole potencjalnych zastosowań metod teledetekcyjnych poziomu lotniczego i satelitarnego, ale również poziomu naziemnego (stan uiglenia/ulistnienia koron na zdjęciach hemisferycznych, wnioskowanie na podstawie terenowego rozmieszczenia miejsc wykonania zdjęć hemisferycznych i wynikach analiz stanu koron o potrzebie zagęszczenia prób klasycznych obserwacji stanu owadów w prognozie rozwoju gradacji szkodników liściożernych itp.). Inwentaryzacja dla potrzeb ochrony lasu zostaje jednak świadomie pominięta w niniejszym opracowaniu dla poziomu lotniczego i satelitarnego.

Powyższe przykłady wskazują, że nawet prawidłowo ustalony zakres i dokładność inwentaryzacji dla potrzeb leśnictwa wielofunkcyjnego nie obejmuje wszystkich grup danych inwentaryzacyjnych, które będą przetwarzane w SILP a które potencjalnie byłyby możliwe do zarejestrowania metodą teledetekcji.

Podobnie jak wizja potrzeb leśnictwa wielofunkcyjnego potencjalnie powinna umożliwić wyselekcjonowanie niezbędnych dla tego leśnictwa potrzeb inwentaryzacyjnych, tak prognoza rozwoju SILP, wykonana jednak poza niniejszym tematem naukowym, powinna

stosownie doprecyzować zakres prac inwentaryzacyjnych i wskazać, w jakim zakresie teledetekcja mogłaby dostarczyć danych inwentaryzacyjnych na potrzeby przetworzeń SILP.

Przesłanka druga daje merytoryczne uzasadnienie twierdzeniu, że opracowywana metoda inwentaryzacji może być zaliczana do sfery działań Lasów Państwowych, ukierunkowanych na doskonalenie SILP. Temat mógłby stąd korzystać ze środków przeznaczonych na rozwój SILP.

Forma wyników inwentaryzacji przeprowadzanej opracowywaną metodą musi maksymalnie uwzględniać oczywisty fakt, że SILP pracuje na cyfrowej postaci danych i że sprawność całości procesu przetworzeń jest determinowana formą danych inwentaryzacyjnych. Najlepiej, aby dane inwentaryzacji miały bezpośrednio formę cyfrową a formaty danych były dopasowane do formatów akceptowanych przez SILP.

Przesłanka druga wskazuje na szczególną rolę całego procesu przetwarzania cyfrowych (nie analogowych!) danych teledetekcyjnych, które zgodnie z założeniem opracowywanej metody inwentaryzacji jako jedyne powinny pojawiać się na wejściu do przetworzeń SILP.

Przesłanka trzecia bazuje na współczesnym usytuowaniu problematyki teledetekcji w geomatyce lasów. Teledetekcja - przedmiot bezpośredniego zainteresowania opracowywanej metody inwentaryzacji jest jedną, ale nie jedyną, techniką geoinformacyjną. W ramach współczesnej geomatyki równą, jeśli nie większą wagę w pozyskaniu i przetwarzaniu danych przestrzennych o lesie przywiązuje się również do pozostałych technik geoinformacyjnych: systemowi pozycjonowania globalnego, modelowi numerycznym terenu, bezpośrednim naziemnym pomiarom geodezyjnym czy w końcu systemowi informacji przestrzennej.

Truizmem byłoby twierdzenie, że maksymalny efekt inwentaryzacyjny zostanie osiągnięty wtedy, kiedy dla różnorodnych potrzeb pozyskania i przetwarzania danych przestrzennych zastosowane będą metody bazujące na wysokim stopniu integracji technik geoinformacyjnych. Przesłanka trzecia sygnalizuje, sformułowaną zresztą wyraźnie w brzmieniu tematu badawczego, konieczność z jednej strony wysokiej integracji technik geoinformacyjnych z drugiej zaś niezbędne, ale świadome, ograniczenie zakresu merytorycznego tematu, w którym zainteresowanie skupia się na danych teledetekcyjnych jako głównego źródła informacji o lesie. Niezbędne jest zatem wyraźne i formalne (!) wyartykułowanie stanowiska, że przedmiotem badań tematu będzie teledetekcja z poziomu naziemnego, lotniczego i satelitarnego oraz integracja przede wszystkim danych

teledetekcyjnych (z ewentualnym zasygnalizowaniem zamiaru włączenia metod geostatystycznych jako sposobu integracji tych danych). Pozostałe techniki geoinformacyjne nie powinny być przedmiotem badań naukowych w ramach realizowanego tematu, przede wszystkim pod względem ich dokładności inwentaryzacyjnej. Formalne brzmienie tematu może sugerować Zleceniodawcy zamiar objęcia badaniami wszystkich technik geoinformacyjnych. Inne, poza teledetekcją, techniki geoinformacyjne powinny być rozpoznane głównie co do możliwości ich wykorzystywania w funkcji służebnej, maksymalizującej inwentaryzacyjny efekt zintegrowanych danych teledetekcyjnych. Doprecyzowanie zamiaru badawczego odnośnie poszczególnych technik geoinformacyjnych ma bezpośredni związek z zakresem studiów literatury w ramach konfrontacji potrzeb inwentaryzacyjnych i możliwości informacyjnych teledetekcji.

Przesłanka czwarta dotyczy podejścia metodologicznego do lasu, traktowanego jako element użytkowanej przestrzeni. Przesłanka czwarta koncentruje uwagę na znaczeniu dla opracowywanej metody zarówno stosowanego słownictwa, związanego z elementami użytkowanej przestrzeni jak i skali, w której realizowana będzie inwentaryzacja.

Można postawić tezę, że źródłosłów stosowanych aktualnie pojęć dotyczących elementów przestrzeni ma swe korzenie w odmiennym traktowaniu obszarów leśnych jako specyficznego przyrodniczego obiektu.

Traktowanie lasu jako przestrzenno-czasowej struktury, dostarczającej w sposób możliwie równomierny i bez zakłóceń różnych dóbr użytkowych można przypisać podejściu metodycznemu, którą dla naszych potrzeb nazwiemy podejściem urzędzeniowym, od dziesięcioleci (zbyt chyba silnie) kształtującym świadomość zawodową leśników.

Skoncentrowanie uwagi na traktowaniu lasu jako hierarchicznej struktury przestrzennej, generującej cechy wysokiego poziomu zdolności do utrzymania równowagi systemu przyrodniczego na rozpatrywanym poziomie hierarchicznym i zapewniającej zachowanie różnorodności biologicznej, jako autonomicznej wartości obiektów przyrodniczych, można przypisać filozofii podejścia, które nazwiemy podejściem krajobrazowo-ekologicznym.

Żadne z powyższych podejść metodologicznych nie funkcjonuje w czystej postaci w artykułowaniu potrzeb inwentaryzacyjnych leśnictwa wielofunkcyjnego. Obserwujemy natomiast (co można łatwo udowodnić) swoisty konglomerat pojęć i koncepcji ukierunkowanych na zapewnienie realizacji paradygmatu zrównoważonego wielofunkcyjnego

leśnictwa a wywodzących się ewidentnie z obydwu wymienionych podejść. Jest paradoksem (a może szczęśliwym przypadkiem?), że realnie istniejące elementy przestrzeni geograficznej lasu można nazwać stosując różne słownictwo, wywodzące się z podejścia urządzeniowego i ekologiczno-krajobrazowego. Przystępując do opracowania metody należy być świadomym, że przyjęcie paradygmatu zrównoważonego leśnictwa wielofunkcyjnego wprowadziło ewidentny chaos w nazewnictwie. Dla celów opracowywanej metody wydaje się mniej istotne jak nazwany zostanie element przestrzeni (ekoton las-pole, czy granica lasu) natomiast jest wręcz zasadnicze, z jaką dozą pewności różne elementy przestrzeni można rozpoznać na obrazach teledetekcyjnych i z jaką dokładnością można je skartować. Istotne jest również to, aby podczas opracowywania metody inwentaryzacji możliwie w pełni rozumieć co kryje się pod określoną nazwą, to znaczy o jakim realnie istniejącym elemencie przestrzeni jest mowa podczas formułowania potrzeb inwentaryzacyjnych dla realizacji celów leśnictwa wielofunkcyjnego.

Zwracamy również uwagę na łatwy do przeoczenia aspekt psychologiczny i skojarzenia merytoryczne, wywoływane określonymi pojęciami, wykorzystanymi w opisie metody. Podczas końcowego odbioru tematu naukowego przez Zleceniodawcę będzie artykułowana szczegółowa ocena, czy opracowana metoda spełnia potrzeby inwentaryzacyjne. Ocena ta będzie silnie uzależniona od udziału w komisji odbioru przedstawicieli różnych szkół naukowych a więc zarówno przedstawicieli szkół chętniej korzystających z podejścia urządzeniowego jak też tych, którzy artykułują potrzeby inwentaryzacyjne na gruncie podejścia ekologiczno-krajobrazowego.

Skala przestrzenna inwentaryzacji metodami teledetekcyjnymi z oczywistych względów może być bardzo różna. Nie wchodząc na tym miejscu w szczegóły opisu inwentaryzowanych elementów sygnalizujemy jedynie, że w podejściu urządzeniowym preferowane jest precyzowanie potrzeb inwentaryzacyjnych w hierarchii drzewostan – gospodarstwo (obręb).

W ujęciu krajobrazowo-ekologicznym uwaga inwentaryzacji na niskim szczeblu struktur przestrzennych koncentruje się na elementach świadczących o istnieniu w lesie określonego poziomu bioróżnorodności, łącznie z różnorodnością struktur przestrzennych, Na wysokim szczeblu struktur przestrzennych postulaty inwentaryzacji dotyczą struktur krajobrazu, w którym lasy, bez względu na formę własności fragmentów kompleksu leśnego, są traktowane tylko jako jeden z elementów budujących krajobraz. Powyższe zagadnienie potrzeb inwentaryzacyjnych ma związek z postulatem formułowanym ex post w „Polityce

leśnej państwa” i dotyczy optymalnego wypełniania przestrzeni przyrodniczej kraju. Na tym miejscu sygnalizujemy, że pomimo przyjęcia przez LP paradygmatu leśnictwa wielofunkcyjnego, poziom krajobrazowy jest artykułowany w potrzebach LP bardzo słabo. Poziom ten wydaje się być ważny również dla LP, przede wszystkim ze względu na relacje gospodarki leśnej z gospodarką przestrzenną, kształtowanie granicy polno-leśnej oraz konsekwencje przyrodnicze określonego rozmieszczenia w przestrzeni przyrodniczej obszarów wiejskich nowych lasów, pochodzących z realizowanego krajowego programu zalesień.

Wnioski z przesłanki czwartej wskazują na konieczność precyzyjnego ustalenia ze Zleceniodawcą zakresu badań tematu, co do skali przestrzennej opracowywanej metody inwentaryzacji.

Można łatwo uzasadnić twierdzenie, że obrazy teledetekcyjne, w porównaniu z innymi inwentaryzacyjnymi technikami geoinformacyjnymi, są bezkonkurencyjne jako źródło informacji o strukturach przestrzennych na wielu poziomach hierarchicznych, ważnych dla realizowania w praktyce gospodarczej idei zrównoważonego leśnictwa wielofunkcyjnego, poczynając od struktur wewnątrz pojedynczego drzewostanu a kończąc na szczeblu krajobrazowym.

Opracowywana metoda, bazująca wg założeń na danych teledetekcyjnych mogłaby w pełni wykorzystać powyższy fakt.

2.3 Postulaty dla inwentaryzacji urzędzeniowej w świetle ogólnych założeń trwale zrównoważonej wielofunkcyjnej gospodarki leśnej (TZWGL)

Inwentaryzacja urzędzeniowa jest podstawowym w leśnictwie źródłem informacji na temat stanu, zmian tendencji rozwojowych lasu i zasobów leśnych, niezbędnych do planowania i kontroli w wielofunkcyjnym gospodarstwie leśnym. Jak już wspomniano w kilku miejscach niniejszego opracowania funkcjonujący system informatyczny Lasów Państwowych czerpie dane o stanie lasu głównie z planu urządzania lasu.

Inwentaryzacja lasu, aby być przydatną dla TZWGL powinna umożliwiać możliwie dokładne kwantyfikowanie całej różnorodności lasu a nie tylko zapasu drzewnego. Aby być rzeczywiście przydatną dla nowo jakościowej gospodarki leśnej musi w pełni uwzględnić te wszystkie elementy, które świadczą o naturalnych wartościach lasów (Szujewski 2002). Istota

doskonalenia gospodarki leśnej na podstawach ekologicznych polega na indywidualnym traktowaniu każdego drzewostanu. Ostatnie stwierdzenie będzie rozwinięte w koncepcji półnaturalnej hodowli lasu.

Z powyższych stwierdzeń wynikają sprecyzowane dla TZWGL postulaty, co do zakresu i treści inwentaryzacji. Są to postulaty, aby inwentaryzacja obejmowała co najmniej (Szulecki 2004, Głaz 2004):

- strefy ekotonowe,
- fragmenty szczególnie różnicujące środowisko (kępy starodrzewia, śródleśne polany i łączki, bagna, uwilgotnione zakłębłości terenu) - ogólnie dobre rozpoznanie mikrosiedlisk,
- odnowienia lub podrosty wszystkich gatunków,
- podszyty naturalne i wprowadzone,
- zasoby nieдрzewnych produktów leśnych,
- obecność drzew martwych,
- dane umożliwiające wyznaczenie 27 wskaźników trwale zrównoważonej wielofunkcyjnej gospodarki leśnej, wypracowanych w europejskim procesie helsińskim i dopracowanych dla warunków polskich oraz poziomu nadleśnictwa,
- podwyższoną szczegółowość dla lasów w dolinach rzek, krajobrazie nadmorskim i w strefie górnej granicy lasu,
- wizualną atrakcyjność drzewostanów.

Wymagania TZWGL postulują tworzenie nowego jakościowego planu urządzenia, który powinien wyraźnie wyartykułować:

- sposób zwiększenia retencji wodnej i projekt sieci małej retencji wodnej, uzgodnionej z planami retencji w zlewni,
- kształtowanie granicy polno-leśnej,
- zabudowę biologiczną granicy lasu, linii podziału powierzchniowego i cieków wodnych,
- pożądane postępowanie w celu zwiększenia wiązania i akumulacji węgla..

Wzrost znaczenia funkcji ochronnych i społecznych lasu w TZWGL powoduje, że pojawiają się nowe pola inwentaryzacyjne dotyczące: przyrostu, zniekształcenia siedlisk i stopnia ich degradacji, oceny poziomu defoliacji, oceny stabilności mechanicznej oraz oceny walorów rekreacyjnych lasu.

W artykułowaniu potrzeb inwentaryzacyjnych dla TZWGL wyraźnie można dostrzec elementy podejścia ekologiczno-krajobrazowego. W następnym rozdziale dominować będzie podejście urzędzeniowe, w którym selekcji postulatów dla „inwentaryzacji urzędzeniowej” dokonano zgodnie z pierwszą przesłanką metodyczną opracowania, sugerującą przegląd możliwie pełnego spektrum stanowisk, artykułowanych przez kluczowe dyscypliny leśnictwa. W podanym w następnym rozdziale przeglądzie stanowisk uwzględniono postulaty hodowli, urządzania i użytkowania lasu. Koncepcje hodowlane ukierunkowane są na konstruowanie struktur poszczególnych drzewostanów. Urządzenie proponuje system gromadzenia i obiegu informacji źródłowych o lesie i zasobach drzewnych oraz formułuje zasady planowania ładu przestrzennego i czasowego. Postulaty użytkowania lasu zmierzają w kierunku otwarcia przestrzeni leśnej do jej wielokierunkowego użytkowania

Wymienione powyżej tradycyjne dyscypliny leśnictwa bazują z reguły na charakterystyce lasów przy użyciu typowych danych taksacyjnych, gromadzonych podczas inwentaryzacji urzędzeniowej. Zyskujące na znaczeniu koncepcje modelowania ekologicznego drzewostanów (Brzeziecki 1999, 2002), wychodzące naprzeciw postulatом półnaturalnej hodowli lasu wykorzystują nietypowe dane inwentaryzacyjne, niemożliwe do zaklasyfikowania zarówno do podejścia urzędzeniowego jak i ekologiczno krajobrazowego. Niektórzy autorzy (Zawadzki i in. 2004) zwracają np. uwagę na możliwość charakteryzowania lasów parametrami biofizycznymi, powstającymi jako próba syntetycznego opisu lasu za pomocą niewielkiej liczby parametrów. Przykładami parametrów biofizycznych są: powierzchnia projekcyjna aparatu asymilacyjnego i produkcja pierwotna. Na szczególną wagę tych parametrów w metodach wykorzystujących dane teledetekcyjne zwraca uwagę cytowane powyżej opracowanie (Zawadzki i in. 2004). Zdjęcia hemisferyczne wydają się być równie dobrym źródłem informacji dla parametrów biofizycznych lasu.

2.4 Postulaty inwentaryzacyjne tradycyjnych dyscyplin leśnictwa: hodowli, urządzania i użytkowania lasu

Prawidłowe diagnozowanie ostro ścierających się koncepcji metodologicznych wymienionych powyżej podstawowych dyscyplin leśnictwa ma zasadnicze znaczenie dla ostatecznego kształtu technologicznego opracowywanej metody inwentaryzacji lasu.

Jesteśmy świadomi obiektywnych trudności przedstawienia odpowiedzialnej diagnozy postulatów inwentaryzacyjnych nauk leśnych. Wymieniona w tytule rozdziału kolejność dyscyplin nie powinna być interpretowana jako próba hierarchizowania wagi koncepcji teoretycznych artykułowanych przez te dyscypliny.

2.4.1 Hodowla lasu

Ustawienie dyscypliny hodowli lasu jako pierwszej w kolejności analiz postulatów inwentaryzacyjnych zostało przyjęte zgodnie z założeniem, że hodowla ogniskuje swoje zainteresowanie na konstruowaniu struktur pojedynczego drzewostanu, będącym niekwestionowanym, podstawowym elementem inwentaryzacyjnym w lesie.

Jedną z czołowych postaci współczesnego leśnictwa, profesor Bernadzki, argumentuje wagę pełnego rozeznania warunków siedliskowych, mających podstawowe znaczenie dla wszystkich decyzji gospodarczych i formułowania celów hodowlanych. Jako zasadniczy wymieniany jest cel finalny, czyli model drzewostanu dojrzałego w danych warunkach siedliskowych a przede wszystkim jego skład i struktura, którą uznajemy za ekologicznie zrównoważone (Bernadzki 2002). Na tym gruncie rozwijana jest koncepcja półnaturalnej hodowli lasu (Bernadzki 2002, Żybura 2002), której podstawowymi założeniami są poniższe twierdzenia:

- półnaturalna hodowla lasu kształtuje las uwzględniając prawa rządzące rozwojem ekosystemów leśnych,
- każdy drzewostan jest niepowtarzalnym dziełem przyrody,
- drzewostan wymaga indywidualnych decyzji gospodarczych,
- drzewostan stanowi podstawową jednostkę planowania hodowlanego,
- jedną z zasad półnaturalnej hodowli lasu jest maksymalne wykorzystanie naturalnego odnowienia

Trafność decyzji jest uzależniona od zakresu i dokładności inwentaryzacji, co w prosty sposób implikuje konieczność zwiększania zakresu zbieranych informacji o drzewostanie, jako niezbędnej podstawy do podejmowania decyzji i oceny ich realizacji.

Zwracamy uwagę, że koncepcja półnaturalnej hodowli lasu równa wagę przywiązuje do trafności podejmowania decyzji jak i konieczności oceny ich realizacji, co jest dalej rozwijane w propozycjach wyboru stosownych sposobów realizacji inwentaryzacji.

Odpowiednia szczegółowość inwentaryzacji na poziomie drzewostanu, prawidłowe rozpoznanie warunków siedliskowych a także znajomość historii drzewostanu argumentowane są potrzebami planowania hodowlanego, utożsamianego pojęciowo ze wskazaniami gospodarczymi.

Przybylska (2004) stwierdza, że zbliżone do naturalnych zasady postępowania hodowlanego owocują bogactwem form postaci lasu, co wymaga systematycznej kontroli stanu, poprzez metodycznie zbierane dane pomiarowe. Wymogi te spełnia statystyczno-matematyczny system inwentaryzacji i kontroli lasu poprzez zastosowanie stałych, kołowych powierzchni próbnych, przeznaczonych do monitorowania.

Ramowe zasady półnaturalnej hodowli lasu krytycznie odnoszą się do tych wszystkich działań, które powodują, że zapas drzewostanu jest określany z dużym błędem. Rzutuje to bowiem na etat ustalany dla tego drzewostanu, będącego częścią etatu wg potrzeb hodowlanych. Przedstawiciel szkoły półnaturalnej hodowli lasu (Żybura 2002) zwraca uwagę na potrzebę stosownego ustalenia zakresu inwentaryzacji zarówno na etapie podejmowania decyzji odnośnie sposobu wykonania zabiegu pielęgnacyjnego jak i na etapie oceny skutków zabiegu, czyli sposobu reagowania drzewostanu na wykonany zabieg.

„Narzędziem” do oceny skutków zabiegu mogłaby być miąższość i przyrost miąższości poszczególnych gatunków. Wynika stąd konieczność prowadzenia okresowej kontroli na podstawie rzetelnych danych pomiarowych (a nie szacunkowych), co w tradycyjnym zbieraniu materiałów empirycznych zwiększa pracochłonność inwentaryzacji.

Sposobem realizacji inwentaryzacji jest jednoznacznie sformułowana potrzeba permanentnej inwentaryzacji na stałych powierzchniach próbnych, umożliwiająca (Bernadzki 2002) śledzenie zmian efektów gospodarczych i umożliwiającą zbieranie informacji o całym ekosystemie a nie tylko drzewostanie.

Przybylska (2004) uważa jednak za nierealne wdrożenie sieci stałych kołowych powierzchni próbnych o takiej gęstości, aby możliwa była indywidualna ocena zasobu każdego, nawet najmniejszego wydzielenia.

Zwracamy na tym miejscu uwagę, że stałość lub okresowość powierzchni próbnych jest jednym z ważniejszych kryteriów proponowanych przyszłościowych koncepcji inwentaryzacyjnych i będzie istotnie ważyć na ostatecznym kształcie opracowywanej metody inwentaryzacji lasu.

Bezpośrednio z opracowywaną metodą inwentaryzacji mają związek artykułowane przez półnaturalną hodowlę lasu (Bernadzki 2002) ramowe potrzeby inwentaryzacyjne:

- przyrost i jego zmiany w czasie,
- tempo i kierunki procesów regeneracyjnych,
- dane o zamieraniu drzew,
- udział drzew martwych,
- zdrowotność i żywotność,
- uszkodzenia drzew istotne dla ich jakości technicznej,
- zmiany w drzewostanie pod wpływem zabiegu,
- stabilność drzewostanu.

Żybura (2002) formułuje szereg potrzeb inwentaryzacyjnych, ważnych dla kierkowania rozwiązań technologicznych opracowywanej metody:

1. Wychodząc z przesłanki, że celem głównym jest przyszły drzewostan o ramowym składzie gatunkowym (liczba gatunków jest rzędu 3-4) ustalonym na podstawie dobrze rozpoznanych warunków siedliskowych, dla drzewostanów wielogatunkowych postulowana jest potrzeba inwentaryzacyjna rozpoznania i skartowania mikrosiedlisk. Na borach mieszanych dla gatunków domieszkowych zachodziłaby potrzeba inwentaryzacji fragmentów powierzchni o korzystniejszych warunkach wilgotnościowych (DTM lidarowy?, techniki radarowe rozpoznania wilgotności gleby?).
2. Istotne znaczenie dla działań hodowlanych ma dokładna inwentaryzacja odnowień naturalnych., przy czym stopień dokładności zależy od fazy rozwojowej drzewostanu zgodnie z regułą, że najdokładniej należy inwentaryzować odnowienia tam, gdzie

realizowany jest proces odnowienia. Dla drzewostanów w fazie odnowienia bardzo pomocny byłby szkic rozmieszczenia płatów poszczególnych gatunków drzew, z ewentualnym uwzględnieniem powierzchni nieodnowionej. Dla drzewostanów, w których należy rozpocząć proces tworzenia nowych warstw, potrzebny jest również szczegółowy opis nalotów i podrostów bowiem:

- umożliwi ocenę przydatności młodego pokolenia,
- przy następnej inwentaryzacji umożliwi ocenę realizacji struktury pionowej drzewostanu.

Dla pozostałych drzewostanów szczegółowość inwentaryzacji może być mniejsza, ale wszędzie należy inwentaryzować: naloty, podrosty, podsadzenia i podsiewy sztuczne.

3. W uprawach wielogatunkowych postulowane jest inwentaryzowanie:

- składu gatunkowego
- formy występowania domieszek,
- pozostałości poprzedniego pokolenia (kępy starego drzewostanu dla planowania czynności hodowlanych zapewniających realizację funkcji tych obiektów, pojedyncze drzewa, nasienniki i przestoje a dla przestojów dodatkowo długość korony i żywotność dla ewentualnego projektowania drzewostanu z przestojami).

4. Zakres inwentaryzacji na gniazdach jest niezbędny dla planowania zabiegów w obrębie młodego pokolenia i wypracowania decyzji odnośnie kolejnych cięć odnowieniowych:

- konieczna jest inwentaryzacja dokładnego planu rozmieszczenia gniazd, ich kształtu i wielkości, nawet jeśli nie ma na nich odnowienia,
- zakres inwentaryzacji odnowienia na gniazdach powinien obejmować co najmniej: skład gatunkowy, wysokość odnowienia w części centralnej i brzegowej gniazda, stopień zróżnicowania wysokości drzew.

5. Specjalne zadania inwentaryzacyjne stawiane są przed drzewostanami zakwalifikowanymi do przebudowy całkowitej lub częściowej. Generalna uwaga przy tym zadaniu inwentaryzacyjnym jest formułowana jako potrzeba dysponowania elementami, które potencjalnie mogą być włączone w skład następnej generacji.

W podsumowaniu skutków realizowania półnaturalnej hodowli lasu dla przyszłości metod inwentaryzacyjnych stwierdza się (Głaz 2002), że hodowla półnaturalna prowadzi do powstania drzewostanów bardziej zróżnicowanych. Tradycyjne metody inwentaryzacji bazujące na drzewostanowej taksacji wzrokowej i modeli w postaci tabel zasobności i danych z prób relaskopowych będą tracić na znaczeniu. Zyskiwać będą natomiast na znaczeniu formy inwentaryzacji dostarczające informacji dla jednostek większych niż drzewostany (gospodarstwa, stadia rozwojowe, typy drzewostanów) prowadzone na stałych kołowych powierzchniach próbnych.

Głaz (2002) prognozuje rozwój zintegrowanych systemów inwentaryzacji lasu o znaczącym udziale metod teledetekcji oraz metod obrębowo-drzewostanowych, umożliwiających:

- uzyskanie wiarygodnych syntetycznych danych dla całych grup drzewostanów, co wymaga precyzyjniejszej stratyfikacji poprzez dysponowanie stosownymi informacjami o drzewostanie,
- zachowujące możliwość podawania miąższości dla poszczególnych drzewostanów, co może być zrealizowane poprzez zastąpienie szacunku sposobami pomiarowymi.

2.4.2 Urządzanie lasu

Urządzanie lasu autonomicznie postuluje doskonalenie inwentaryzacji w sposób, który zapewni realizację zasad TZWGL. W postulatach inwentaryzacyjnych urządzania lasu wychodzi się (Miścicki i Stępień 2004) z dwu koncepcji inwentaryzacji. W koncepcji drzewostanowej jednostką obliczeniowo-interpretacyjną jest drzewostan. W koncepcji obrębowej jednostką jest zbiór drzewostanów w danych granicach administracyjnych lub zbiór drzewostanów wyselekcjonowanych na podstawie określonych kryteriów (drzewostany gospodarstwa, jako jednostki regulacyjno-kontrolnej, klasy wieku itp.)

Obecnie stosowane czasowe próby losowe znamienne są tym, że dają mało wiarygodne informacje dla poszczególnych drzewostanów i znacznie dokładniejsze dane dla ich zbiorów, co w rezultacie powoduje, że dane te nie są optymalne, a wręcz mało przydatne dla wymogów nowoczesnego planowania i kontroli. Wychodząc z powyższych przesłanek Miścicki i Stępień (2004) postulują konieczność dwukierunkowych działań w sferze inwentaryzacji, aby jednocześnie zapewnić możliwość regulacji i kontroli na poziomie gospodarstwa oraz możliwość określania celów hodowlanych, społecznych, ochronnych i produkcyjnych na poziomie drzewostanów.

Jest to więc sformułowana teza, że na poziomie gospodarstwa, jako jednostki regulacyjno-kontrolnej potrzebne są inne informacje, niż na poziomie drzewostanu.

Postuluje się zatem opracowanie i przyjęcie takiej koncepcji inwentaryzacji, która umożliwi:

- uzyskanie wiarygodnych danych dla konkretnego obrębu lub jego części,
- wystarczająco dokładnych informacji o poszczególnych drzewostanach

przy czym oczekuje się zmniejszenia dokładności szacowania najważniejszych cech dla dużych jednostek inwentaryzacyjnych, przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności szacowania kilku najważniejszych cech w drzewostanie.

Dla poziomu gospodarstwa, dla planowania długo i średniookresowego, w którym podejmuje się decyzje w sprawie wielkości użytkowania rębnego i przedrębego potrzebne są informacje o cechach ilościowych (zapas, przyrost, nasilenie cięć) oraz informacje o dystrybucji przestrzennej cech jakościowych (biotopy, funkcje lasu, strefy uszkodzeń).

Dla poziomu drzewostanu, dla uściślenia celów hodowlanych, pilności i intensywności zabiegów, potrzebne są informacje dotyczące: obecnego i pożądanego składu gatunkowego, formy mieszania, struktury pionowej, zdrowotności, cech wzrostowo-rozwojowych, stabilności, stanu pielęgnacji, potrzeb przebudowy. Cechy te, w większości niemierzalne (!). Według Miścickiego i Stępnia (2004) mogą one być, wg tych autorów, z powodzeniem określane drogą taksacji wzrokowej.

Zwracamy na tym miejscu uwagę na oczywisty konflikt w postulatach inwentaryzacyjnych, formułowanych przez przedstawicieli półnaturalnej hodowli lasu (Żybura 2004, Bernadzki 2004) i przedstawicieli urządzania lasu (Miścicki i Stępień 2004). W dyskusji nad wariantami inwentaryzacji (pomiaru na powierzchniach próbnych czasowych czy stałych?) sygnalizowany jest wysoki koszt zakładania stałych powierzchni próbnych, przede wszystkim ze względu na konieczność pomiaru sytuacji drzew. Można stąd wysnuć wniosek, że gdyby do dyspozycji postawiona została metoda sprawnej inwentaryzacji sytuacji drzew powierzchni próbnych (lidar naziemny?, naziemna fotogrametria cyfrowa?), to ze względów merytorycznych i ekonomicznych mógłby być rozważany przez urządzenie lasu wariant stałych powierzchni próbnych, postulowanych jako korzystniejszych dla współczesnych potrzeb leśnictwa wielofunkcyjnego.

Zwracamy uwagę na zgodność opinii o specjalnie korzystnych cechach stałych powierzchni próbnych, przeznaczonych do monitorowania stanu lasu. Przybylska (2004)

stwierdza wręcz (co już zacytowano wcześniej), że nierealne jest wdrożenie sieci stałych kołowych powierzchni próbnych o takiej gęstości, aby możliwa była indywidualna ocena zasobu każdego, nawet najmniejszego wydzielenia,. Realny i wystarczający dla celów regulacyjnych i monitoringowych jest (Przybylska 2004) zabieg łączenia rozdzielonych przestrzennie, ale jednorodnych (ze względu na siedlisko, kategorię składu gatunkowego i fazę rozwoju) podstawowych jednostek ewidencji czyli wydzielen w obszarowo większe, zbiorcze jednostki inwentaryzacyjne (warstwy), reprezentowane przez odpowiednią do statystycznego wnioskowania liczbę powierzchni próbnych. Szczegółowe sposoby tworzenia warstw inwentaryzacyjnych na potrzeby urządzania lasu podaje (Borecki 1995).

Urządzenie formułuje więc generalny postulat wykonywania prac inwentaryzacyjnych na dwóch poziomach:

- poziomie podstawowej jednostki ewidencji, waloryzacji i planowania tj. wydzielenia,
- poziomie podstawowej jednostki inwentaryzacyjnej dla celów regulacyjnych i monitoringowych tj. warstwy, czyli zbioru rozdzielonych przestrzennie, ale jednorodnych pod określonymi cechami podstawowych jednostek ewidencyjnych – wydzielen.

Postulat zmniejszania dokładności niektórych cech dla dużych jednostek inwentaryzacyjnych przy jednoczesnym zwiększaniu dokładności cech w drzewostanie zawarto w koncepcji kombinowanej 2-fazowej inwentaryzacji z wykorzystaniem zdjęć lotniczych i stałych kontrolnych powierzchni próbnych (Miścicki 2000).

W dyskusji nad doskonaleniem metod urzędzeniowej inwentaryzacji lasu z wykorzystaniem technik geomatyki musimy stąd uwzględnić:

- wyraźnie artykułowaną dwupoziomowość (drzewostanową i warstwową) podejścia inwentaryzacyjnego,
- powszechność wnioskowania statystycznego o cechach warstwy lub drzewostanu,
- potrzebę dysponowania takimi informacjami o drzewostanie, które w możliwie wysokim stopniu spełnią nie tylko postulaty inwentaryzacji dla celów regulacji użytkowania ale i postulaty półnaturalnej hodowli lasu.

Spełnienie jednocześnie trzech powyższych postulatów wydaje się nierealne, jeśli dla poziomu drzewostanu nie zostaną zastąpione metody szacunkowe obiektywnymi danymi pomiarowymi, dotyczącymi przede wszystkim przestrzennej zmienności w drzewostanie

składu gatunkowego, rozrzedzenia zwarcia, zagęszczenia, występowania luk, gniazd, charakterystyki młodego pokolenia itp..

Inwentaryzacja przestrzennej zmienności na szczeblu drzewostanu jest podstawowym warunkiem zwiększenia dokładności metody losowania warstwowego. Stanowi też warunek niezbędny praktycznego stosowania empirycznych modeli wzrostu (Bruchwald 2002, 2004), co zostanie szerzej rozwinięte we fragmencie opracowania dotyczącym postulatów inwentaryzacyjnych dla potrzeb modelowania w drzewostanach.

2.4.3 Użytkowanie lasu

Formułując postulaty użytkowania lasu w zakresie inwentaryzacji urzędniowej (Paschalis 2004) wskazuje generalnie na potrzebę takich działań inwentaryzacyjnych, które umożliwią udostępnienie przestrzeni leśnej w celu jej wielokierunkowego użytkowania. Współczesne użytkowanie lasu jest rozumiane jako wszechstronne użytkowanie dóbr wytwarzanych przez fakt istnienia ekosystemów leśnych, zgodnie z ograniczeniami jakie wynikają z realizacji leśnictwa ekosystemowego. Tak pojęta sfera użytkowania generuje bardzo szeroki wachlarz potrzeb inwentaryzacyjnych, włączając w to informacje dotyczące rekreacyjnych walorów lasu oraz informacje dotyczące tradycyjnego rozumienia „ubocznego użytkowania lasu”. Szczególne, specyficzne dane inwentaryzacyjne postulowane przez użytkowanie lasu dotyczą niekorzystnego wpływu użytkowania na: nieuniknioną fragmentację terenów leśnych (zręby, parkingi, drogi), skutków w funkcjonowaniu stref ekotonowych, zmiany walorów krajobrazowych.

Zwrócono uwagę (Paschalis 2004), że w planowaniu użytkowania lasu, wchodzącym w skład zabiegów określanych generalnie jako zagospodarowanie zasobów leśnych, użytkowanie musi dysponować między innymi takimi informacjami, które umożliwiają:

- minimalizowanie niekorzystnego , ubocznego skutku użytkowania,
- skuteczną działalność w zakresie hodowli i ochronie lasu,
- działalność logistyczną,
- optymalizowanie procesu użytkowania.

2.4.4 Szacunki brakarskie

Szacunek brakarski należy do alternatywnych, w stosunku do inwentaryzacji urzędniowych, źródeł informacji o lesie. Są to dane zbierane corocznie, zasilając dane pakietu ACER

(Kłapeć 2003), funkcjonującego w ramach SILP na poziomie nadleśnictwa a służącego do wspomagania budowy rocznego planu pozyskania drewna, w tym właśnie obsługi szacunków brakarskich. Szacunek brakarski jest sporządzany jako oferta handlowa nadleśnictwa na kolejny rok gospodarczy, formalnie będąc podstawą do sporządzania planu sprzedaży drewna. Podlegają mu wszystkie użytki rębne i przedrębne, objęte planem pozyskania drewna na dany rok.

Sposób realizacji szacunków brakarskich jest aktualnie znormalizowany stosownym Zarządzeniem DGLP (Zarządzenie Nr 25 z 12 marca 2003 r), którego najważniejsze elementy, związane bezpośrednio z opracowywaną metodą inwentaryzacji przedstawiono poniżej. W zależności od rodzaju i wieku drzewostanów, szacunek brakarski przeprowadza się jedną z metod:

1. Szacowanie na podstawie wyników z lat ubiegłych, z wykorzystaniem bazy danych systemu LAS
2. Metodami dotychczasowymi
 - posztuczne szacowanie każdego drzewa do wycięcia na danej pozycji planu cięć (w drzewostanach rębnych i przedrębnych IV i starszych klas wieku)
 - powierzchni próbnych, w drzewostanach objętych CP oraz trzebieżami w II i III klasie wieku
 - szacowanie mas i udziału procentowego sortymentów (dla CP) na podstawie oceny powierzchni ale bez wykonywania pomiarów,
 - szacowanie mas i udziału sortymentów dla cięć przygodnych

W zasadach szczegółowych obejmujących szacunek brakarski znajdują się etapy postępowania, wykorzystujące zarówno informację z SILP jak i dane bezpośrednich informacji terenowych.

Etap, w którym wykorzystywane są zarówno informacje terenowe jak i dane SILP. Jest to etap wyboru pozycji do cięć, podczas którego sprawdza się wzrokowo zgodność opisu taksacyjnego ze stanem na gruncie, decydując, czy pozycję do cięć wykluczyć z szacowania metodą przez porównanie.

Etap, który korzysta z danych SILP. Jest to etap wyszukiwania programem ACER pozycji do porównania, stosując szereg kryteriów i wykorzystując materiały porównawcze dotyczące powierzchni wykonanych cięć do 3 lub 5 lat wstecz.

Etap decyzji, czy pozycja planu może być szacowana metodą przez porównanie, czy też pozycja planu ma uzyskać status przeznaczenia do „ręcznego” sporządzenia szacunków brakarskich.

Etap szacowania drzewostanu metodą „powierzchni próbnych”. Wymaga on wyboru i terenowego wyznaczenia powierzchni próbnych. Stosowne zarządzenia rygorystycznie wymagają, aby powierzchnie próbne wyznaczane były w miejscach najbardziej reprezentatywnych dla całego drzewostanu pod względem zadrzewienia, jakości drzew, składu gatunkowego itp. Określane są również warunki położenia powierzchni w relacji do dróg i linii podziału powierzchniowego oraz wielkość (5-10% powierzchni drzewostanu) i kształt powierzchni próbnych.

Przedstawione powyżej potrzeby w zakresie informacji przestrzennych dla szacunków brakarskich zostały wyspecyfikowane wg etapów postępowania. Zasadnicze pomiarowe i klasyfikacyjne postępowanie terenowe ma miejsce dla wszystkich innych metod innych, niż przez porównanie.

Dla metody szacowania posztucznego i powierzchni próbnych niezbędne są dane pomiarowe dotyczące pierśnic w korze, wysokości drzew dla poszczególnych stopni pierśnic (lidar naziemny?) oraz dane dotyczące zaklasyfikowania każdego drzewa do klas definiowanych poprzez kryteria sortymentowe.

Kłapeć (2004), analizując technikę przeprowadzenia szacunków dla cięć przedrębnych na powierzchniach próbnych z wyboru, gdzie szacunkiem obejmuje się drzewa przewidziane do usunięcia, sugeruje rozważenie celowości realizacji poszerzonego wariantu szacunków, obejmującego pomiarem wszystkie drzewa na powierzchni próbnej. Zakładając, że w trakcie 10-lecia 80% drzewostanów nadleśnictwa wymaga różnych cięć, a zatem i szacunków brakarskich, w przeciągu 12 lat można byłoby zweryfikować najważniejsze elementy opisu taksacyjnego drzewostanów całego nadleśnictwa. Na drodze poszerzonego szacunku brakarskiego możliwe byłoby nie tylko zweryfikowanie opisu taksacyjnego drzewostanu, lecz również istotne rozszerzenie nie inwentaryzowanych obecnie danych przyrodniczych i techniczno-ekonomicznych. Kłapeć (2004) wymienia tu takie dane jak: jakość i struktura sortymentowa zapasu rosnącego, jego wartość, struktura pierśnic i liczba drzew. Szczególne znaczenie przypisuje się tu właśnie strukturze pierśnic i liczbie drzew. Są to elementy inwentaryzacyjne, dysponowanie którymi urealnia wprowadzenie do praktyki modeli wzrostu- szczególnego narzędzia informatycznego, dającego podstawy do określenia nasilenia i intensywności zabiegów pielęgnacyjnych czy prognozę rozwoju zasobów dla celów analizy

rynku drzewnego. Nietrudno zauważyć, że opracowywana metoda, dająca możliwość zarejestrowania informacji o wszystkich drzewach powierzchni próbnej urealnia zrealizowanie sugerowanego przez Kłapcia (2004) rozszerzonego wariantu szacunków.

W podsumowaniu stwierdzić można, że:

1. Szacunki brakarskie są formą działalności LP, w której występują elementy inwentaryzacji stanu lasu, weryfikujące dane inwentaryzacji urządzeniowej. Prognozowane relacje tych dwóch rodzajów inwentaryzacji (tzn. inwentaryzacji urządzeniowej i inwentaryzacji w ramach szacunków brakarskich) powinny być wyjaśnione w kontekście celów i zakresu merytorycznego opracowywanej metody
2. Specyfika potrzeb inwentaryzacyjnych jest odrębna dla wymienionych powyżej, precyzowanych obowiązującymi zapisami prawnymi, etapów wykonywania szacunków i szczególnie specyficzna w posztucznym przeprowadzaniu szacunków, również na powierzchniach próbnych.
3. Techniki geomatyki wykorzystujące informacje zbierane z przestrzeni nad drzewostanem (wybór reprezentatywnego dla drzewostanu miejsca założenia powierzchni próbnej) i informacje zbierane z poziomu terenu (szczegółowa inwentaryzacja dendrometryczna powierzchni próbnych) powinny być traktowane jako potencjalne źródło danych dla szacunków brakarskich.
4. Aktualnie obowiązujące wewnątrz resortowe regulacje prawne dotyczące szacunków brakarskich zawarte są Załączniku do cytowanego w spisie literatury Zarządzenia Nr 25 Dyrektora Generalnego LP z dnia 12 marca 2003 roku w sprawie sporządzania szacunków brakarskich. Załącznik nosi tytuł „Zasady sporządzania szacunku brakarskiego drzew na pniu z zastosowaniem technik elektronicznego przetwarzania danych”.

2.4.5 Potrzeby inwentaryzacyjne dla modelowania systemowego lasu

Wysoka komplikacja ekosystemów leśnych powoduje, że zarówno badanie prawidłowości i mechanizmów ich rozwoju jak i prognozowanie rozwoju lasu wymaga stworzenia systemów zastępczych, których zachowanie lub struktura odpowiada systemowi pierwotnemu i które można wykorzystać w celach poznawczych i/lub w procesie zarządzania.

Systemy o powyższych własnościach noszą nazwę modeli a konstruowanie systemów zastępczych nazywane jest zwykle modelowaniem. Modele stanowią narzędzia niezbędne do prognozy przyszłego stanu obiektów oraz do określania skutków działań podejmowanych na podstawie decyzji. W warunkach krajowych wytworzyły się dwie szkoły modelowania, silnie związanego z leśnictwem, rozumianym zarówno jako dyscyplina naukowa jak i dział gospodarki narodowej.

Szkoła pierwsza koncentruje uwagę na modelach zwanych tu modelami empirycznymi, występującymi obecnie głównie w postaci dynamicznych, symulacyjnych modeli komputerowych. W modelach empirycznych dużą, wręcz decydującą rolę, odgrywają korelacje i zależności statystyczne, uzyskane w wyniku opracowania obszernego materiału empirycznego. W opracowaniu koncentrujemy uwagę na wybranych zasadach konstrukcji i potrzebach inwentaryzacyjnych tzw. modeli wzrostu, należących do klasy modeli empirycznych. Szkoła druga jest silnie związana z ideą leśnictwa ekosystemowego.

Wywodząca się z idei tego leśnictwa koncepcja półnaturalnej hodowli lasu ogniskuje uwagę na kształtowaniu drzewostanów o możliwie dużym zróżnicowaniu genetycznym, gatunkowym i strukturalnym, podkreślając konieczność maksymalnego wykorzystania wartościowych odnowień naturalnych. Przypomnijmy, że istotą leśnictwa ekosystemowego jest zastąpienie zasady trwałej produkcji dóbr zasadą trwałego zachowania ekosystemów, które produkują te dobra. Zostało to szerzej wyjaśnione we fragmencie opracowania dotyczącego potrzeb informacyjnych półnaturalnej hodowli lasu. Praktyczna realizacja półnaturalnej hodowli lasu stwarza konieczność odpowiedzi na szereg pytań, w jaki sposób będą zachowywały się drzewostany o złożonych strukturach przestrzennych, prowadzone w zgodzie z zasadami hodowli półnaturalnej. Te problemy stwarzają istotnie różne od tradycyjnych wymagania dla modeli wzrostu i rozwoju drzewostanów, traktowanych jako narzędzia wykorzystane do prognozowania. Odpowiedzi na powyższe problemy starają się udzielać ekologiczne modele drzewostanów (Brzeziecki 1999, 2002), zaliczane do klasy modeli procesów. Modele procesów definiują reguły określające strukturę i funkcjonowanie drzewostanu, jako systemu ekologicznego. Modele procesów opierają się na zasadzie stałości mechanizmów i procesów, mogą być stąd dodatkowo wykorzystane do prognozowania rozwoju lasu również w warunkach zmieniającego się środowiska.

Spośród licznych wariantów modeli ekologicznych w niniejszym opracowaniu przedstawiony zostanie bliżej gapowy (płatowy) model wzrostu lasu, przede wszystkim ze

względu na specyficzne dane wejściowe potrzebne do uruchomienia modelu, możliwe częściowo do uzyskania technikami teledetekcyjnymi.

Modele wzrostu są bez wątpienia nowoczesnymi narzędziami prognozowania i wspomagania decyzji gospodarczych na różnych szczeblach zarządzania LP. Ich potencjalne zastosowanie w sferze zarządzania lasu dotyczy przede wszystkim ustalenia rozmiaru użytkowania przedrębego oraz regulacji i wyznaczania etatu użytkowania rębego (Siekierski 1995).

Modele są zaliczane przez ich twórców (Bruchwald 2002, 2004) do grupy stochastycznych modeli drzewa indywidualnego. Zostały opracowane dla szeregu najważniejszych krajowych gatunków drzew leśnych. Aktualnie są opracowywane modele wzrostu dla drzewostanów mieszanych. Prognoza rozwoju drzewostanu wykonana modelem wzrostu jest składową prognoz rozwoju poszczególnych drzew. Część stochastyczna modelu dotyczy generowania wysokości drzew, symulowania realizacji programu trzebieżowego oraz symulowania procesu naturalnej śmiertelności drzew.

Kompletny model wzrostu składa się z czterech algorytmów: wstępnego, trzebieżowego, śmiertelności drzew i przyrostowego. Z trzech algorytmów (wstępnego, śmiertelności i przyrostowego) składa się model graniczny, zakładający maksymalne zagęszczenie drzew prognozowanego drzewostanu. Cechy taksacyjne takiego drzewostanu zależą od jego bonitacji i wieku, przy stałym, równym jedności, stopniu zagęszczenia drzew. Model graniczny generuje specyficzną bazę danych. W bazie zawarta jest liczba drzew i miąższość drzewostanu o pełnym stopniu zagęszczenia, równym 1. W bazie danych modelu granicznego zawarte są również wartości cech, pozwalające na wygenerowaniu rozkładu pierśnic i wysokości drzew. Wymagana jest do tego tylko znajomość wieku, bonitacji i stopnia zagęszczenia drzew konkretnego drzewostanu.

Ważną cechą drzewostanu jest stopień zagęszczenia drzew. Stopień zagęszczenia jest ilorazem ilości drzew górnej warstwy danego drzewostanu i maksymalnej liczby drzew określonej w modelu granicznym. Parametr ten jest wykorzystywany do wypracowania decyzji o wykonaniu trzebieży.

W algorytmie trzebieżowym zawarte są zasady, zgodnie z którymi powinny być prowadzone zabiegi trzebieżowe w drzewostanie.

W rezultacie działania kompletnego (cztero-algorytmowego) modelu wzrostu uzyskuje się szereg wartości cech drzewostanu dla początkowego i końcowego roku prognozy oraz dla stanu drzewostanu przed trzebieżą. Są to następujące cechy: wiek, bonitacja, górna i średnia

wysokość drzewostanu, przeciętna pierśnica, liczba drzew, pierśnicowe pole przekroju, miąższość, stopień zagęszczenia, czynnik zadrzewienia. Model umożliwia uzyskanie dodatkowych cech, w tym sumę miąższości drzew wyciętych w trzebieży oraz przyrost miąższości, wyliczony jako roczny z okresu prognozy.

Model wzrostu umożliwia wykonanie prognozy rozwoju struktury konkretnego drzewostanu lub prognozy łącznej dla grupy drzewostanów o zbliżonych cechach biometrycznych. Optymalne warunki funkcjonowania modelu wzrostu występują, jeśli dla konkretnego, prognozowanego drzewostanu będziemy dysponować wiekiem, wysokością górną i rozkładem pierśnic drzew drzewostanu lub określonej części jego powierzchni.

Zestaw danych, tworzących optymalne warunki funkcjonowania modelu, jednoznacznie wskazuje potrzeby inwentaryzacyjne, które w miarę możliwości powinna zabezpieczać opracowywana metoda.

Jak już wspomniano, istnieje przełożenie własności modeli wzrostu na potrzeby okresowego planowania urzędzeniowego, szczególnie wyznaczanie etatów użytkowania rębego i przedrębego oraz planu obu kategorii cięć.

Ogólnie, wyznaczenie etatu oraz opracowanie planu cięć wymaga dysponowania aktualnymi informacjami o każdym z wydzieleń drzewostanowych danego nadleśnictwa. Są to informacje geodezyjne (powierzchnia wydzielienia oraz położenie i kształt granicy wydzielienia) oraz informacje taksacyjne (wiek drzewostanu, skład gatunkowy, miąższość). Tworzenie planu wymaga znajomości dodatkowo takich informacji jak: usytuowania drzewostanu względem sąsiedztwa, przyrostu miąższości, oceny pilności cięć dla poszczególnych pozycji planu, oceny jakościowej i finansowej możliwego do pozyskania surowca.

Twórcy modeli wzrostowych, mając na uwadze potencjalne możliwości ich zastosowań praktycznych właśnie przy wyznaczaniu etatów, proponują wprowadzenie do praktyki urządzania lasu metod pomiaru lasu opartych na pomiarze pierśnic pewnej liczby drzew. Pierwsza z metod jest ukierunkowana na drzewostan (metoda drzewostanowa), druga na grupę drzewostanów (metoda grup drzewostanów). Obydwie metody oparte są na losowych, kołowych, okresowych powierzchniach próbnych.

Ważna dla opracowywanej nowej metody inwentaryzacji jest znajomość koncepcji preferowanej przez twórców modeli wzrostowych metody pomiaru lasu, nazwanej metodą grup drzewostanów, która w klasycznej postaci wykorzystuje dane uzyskane z pomiarów

geodezyjnych i ocen taksacyjnych. Proponowana metoda obejmuje VI etapów, hasłowo nazwanych: tworzenie warstw, ustalenie liczby powierzchni próbnych, losowanie próby, lokalizacja geodezyjna prób, pomiary dendrometryczne na kołowych powierzchniach próbnych, przejście z zestawu dla warstwy na poziom drzewostanu.

Nie wnikając w szczegóły każdego z wymienionych wyżej VI etapów, zwróćmy uwagę na etap tworzenia warstw i etap przejścia z zestawu informacji dla warstwy na poziom drzewostanu. Te dwa etapy bezpośrednio korespondują bowiem z aktualnie poszukiwanymi na drodze teledetekcyjnej informacjami o lesie. Potrzeby tych etapów wyraźnie rozpoznajemy w ostatnio intensywnie prowadzonych przez IBL badaniach naukowych nad wysokorozdzielczymi obrazami satelitarnymi i technikami lidarowymi.

W etapie tworzenia warstw każdy drzewostan nadleśnictwa zaliczany jest do jednej z warstw. Twórcy metody sugerują, aby podstawą tworzenia warstw były trzy cechy drzewostanu: wiek, gatunek główny oraz cecha związana z miąższością. Tą cechą może być: czynnik zadrzewienia, stopień zwarcia lub stopień zagęszczenia, jak również zestaw tych cech.

Dla potrzeb etapu tworzenia warstw powinny być teledetekcyjnie wyznaczane cechy drzewostanu, związane z rozpoznaniem gatunku głównego i cechy związane z miąższością.

Etap przejścia z zestawu informacji dla warstwy na poziom drzewostanu może być realizowany w różny sposób. Istotne dla identyfikowania potrzeb informacyjnych praktycznego stosowania modeli wzrostu jest stwierdzenie, że jeśli dla każdego drzewostanu będziemy dysponować wiarygodną informacją np. o stopniu zagęszczenia i/lub informacją o składzie gatunkowym, to pozwoliłoby to na dokonanie stosownych korekt cech drzewostanu otrzymanych z pomiarów wartości średniej dla warstwy. Jest to sygnalizowany już w niniejszym opracowaniu sposób uzyskania bardziej wiarygodnych informacji o drzewostanie.

Kilka problemów związanych z modelami wzrostu wymaga dokładniejszego przeanalizowania.

1. Czy uzyskany poprzez modele wzrostu zestaw informacji będzie wystarczający dla potrzeb inwentaryzacyjnych, zgłaszanych przez inne, niż urządzenie lasu (np. hodowlę lasu), dyscypliny leśnictwa?,
2. Dodatkową kwestią dyskusyjną jest oparcie inwentaryzacji na kołowych, losowych, ale okresowych powierzchniach próbnych, mniej korzystnych dla dokładnego

monitorowania zmian w stanie lasu w porównaniu ze stałymi powierzchniami próbnymi.

3. Jak zrealizować wbudowaną w ideę metody pomiaru lasu losowość pobierania prób w technikach samolotowej rejestracji teledetekcyjnej?
4. Jak pogodzić losowość prób z często dostępną na drodze teledetekcji satelitarnej informacją o pełnym pokryciu terenowym?

Jak wynika z powyższej analizy, uzyskanie na drodze teledetekcyjnej pewnego pod względem dokładności zestawu danych, dotyczących struktur przestrzennych drzewostanu (teledetekcja lotnicza i satelitarna?) i struktury pierśnic (lidar naziemny?), wydaje się być jednym z najważniejszych a ciągle brakujących ogniw praktycznego stosowania modeli wzrostu.

Model gapowy symuluje dynamikę lasu, śledząc losy każdego pojedynczego drzewa, występującego w obrębie niedużej powierzchni modelowej, odpowiadającej strefie wpływu jednego drzewa dojrzałego, reprezentującego górne piętro drzewostanu. W modelu gapowym drzewa traktuje się jako podstawowe elementy składowe, oddziałujące na siebie w skali płatów, które z kolei tworzą drzewostan. Modele gapowe reprezentują więc hierarchiczne podejście do symulacji drzewostanu. Model ma charakter przestrzenny w tym sensie, że bierze pod uwagę zróżnicowanie pionowe drzew. Pojawienie się nowych drzewek na powierzchni symulowanego płatu i ich dalszy wzrost uwzględnia charakterystyki hodowlane gatunków. Ogół drzew występujących na powierzchni próbnej (?) określa pionowy rozkład ilości dostępnego światła. W tym celu wykorzystuje się informacje o wysokościach drzew i profilu wskaźnika powierzchni liści.

Na generalnych założeniach modeli gapowych oparty jest model 4C, opracowywany w Brandenburgii, który mógłby być bez większych trudności adoptowany do warunków krajowych (Brzeziecki 2002).

Podsumowując fragment dotyczący modelowania systemowego:

1. Można postawić tezę, że w warunkach TZLW jest miejsce zarówno na modele wzrostu jak i modele ekologiczne drzewostanów. Pola ich zastosowań wyznaczane byłyby realnymi warunkami przyrodniczymi, przede wszystkim stopniem komplikacji struktur drzewostanowych.

2. Wyszczególnione powyżej potrzeby inwentaryzacyjne dla potrzeb modeli, rozumianych jako przyszłościowe i najbardziej efektywne narzędzie prognozowania, są istotną wskazówką kierującą prace nad metodą inwentaryzacji lasu.

3. Możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego do określania parametrów drzewostanu w świetle dostępnej literatury

3.1 Wprowadzenie

Literatura dotycząca wykorzystania LIDAR-a w badaniach przyrodniczych jest już bardzo szeroka. Poniższe opracowanie zamyka się w tematyce dotyczącej pozyskiwania parametrów drzew i drzewostanów przy wykorzystaniu danych z lotniczego skaningu laserowego, także integrowanego z obrazami cyfrowymi. Skupiono się przede wszystkim na zebraniu wyników estymacji określonych charakterystyk i ich dokładności. Wykorzystano w tym celu również informację graficzną, często dużo czytelniejszą w odbiorze od treści pisanej, stąd w tekście zamieszczono wiele rysunków, wykresów i tabel. Dodatkowo przedstawiono w dużym skrócie metody oraz rodzaje algorytmów wykorzystywanych w badaniach oraz oprogramowanie, z pomocą którego prace były prowadzone.

W opracowaniu wykorzystano głównie artykuły i materiały z wielu czasopism i konferencji naukowych z ostatnich 4 lat. Zainteresowani informacjami o wcześniejszych wynikach prac z wykorzystaniem danych LIDAR-owych powinni zapoznać się z publikacjami Olssona (2004), Naesseta (2004c) i Carsona (2004), w których zebrane zostały doświadczenia z lat wcześniejszych. Poniżej przedstawiono główne źródła pozyskiwania materiałów: WG VIII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment" Freiburg, Niemcy 2004; International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry Wiedeń, Austria 2006; XX ISPRS Congress, Istanbuł, Turcja 2004; WG III/3-4 V/3 "Laser Scanning 2005" Enschede, Holandia 2005; 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA06). Salzburg, Austria; WG III/3 Workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data" Drezno, Niemcy 2003; Commission III Symposium Bonn, Niemcy 2006; Forest Ecology and Management; Canadian Journal of Remote Sensing; Canadian Journal of Forest Research; Scandinavian Journal of Forest Research; Forest Science; Remote Sensing of Environment; Australian Journal of Entomology; Photogrammetry and Remote Sensing; BioScience; Taiwan Journal of Forest Science

Głównym celem opracowania było dotarcie do możliwie dużej liczby artykułów by rozpoznać jak największą ilość metod wykorzystywanych w określaniu parametrów budowy przestrzennej i inwentaryzacji drzewostanów. W końcu pokuszono się o sformułowanie kilku wniosków wynikających z przemyśleń związanych z przeanalizowanymi materiałami, a także zebranie uwag autorów przeczytanych opracowań.

3.2 Opis technologii lotniczego skaningu laserowego

Początki badań nad LIDAR-em i możliwościami jego wykorzystania rozpoczęto w latach siedemdziesiątych XX wieku w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej (Hyypä i in. 2004). Jednak dopiero z pojawianiem się Bezwładnościowego Systemu Nawigacyjnego (INS - *Inertial Navigation Systems*) oraz systemu GPS technologia skaningu laserowego mogła stać się ważnym i efektywnym źródłem pozyskiwania informacji o przestrzeni geograficznej (Carson i in. 2004).

Słowo **LIDAR** pochodzi od angielskiej nazwy: *Light Detection And Ranging*. Najogólniej mówiąc jest to połączenie lasera ze skanerem, gdzie z określoną częstotliwością urządzenie wysyła wiązki świetlne w kierunku ziemi, pokrywając (skanując) określony pas terenu. Urządzenie, w wypadku skanowania z powietrza, może być podłączone na platformie helikoptera lub samolotu. Skaner wysyła przez specjalny układ optyczny, w dokładnie odmierzonych odstępach czasu, wiązki świetlne w zakresie bliskiej podczerwieni **NIR** (*Near InfraRed*) lub światła zielonego **G** (*Green*), o określonej długości fali i konkretnym kierunku. Wiązka światła w trakcie swej drogi napotyka przeszkody, przez co generowane są szumy, rejestrowane przez odbiornik. Każde odbicie oznaczane jest jako punkt w przestrzeni. Pierwsze urządzenia miały możliwość rejestrowania tylko jednego echa, obecnie możliwe jest już zarejestrowanie wszystkich składowych odbić jednej wiązki (skanery: *full waveform*). Dane uzyskane w wyniku nalotu LIDAR-a mają charakter przestrzenny i zapisywane są globalnym układzie współrzędnych WGS 84 (Guangping 1998).

W celu uzyskania współrzędnych punktu na ziemi, wykonywane są następujące pomiary (Ahokas i in. 2005; Katzenbeisser 2003, 2004; Pfeifer i in. 2004):

- określenie położenia i orientacji urządzenia w przestrzeni
- pomiar czasu od wyemitowania wiązki laserowej do zarejestrowania szumu
- obliczenie kąta, pod jakim wiązka ta została wysłana

Gdy prześledzimy drogę, jaka prowadzi do uzyskania współrzędnych punktu na ziemi możemy wyznaczyć kilka źródeł błędów, które mogą pojawić się w trakcie pomiarów LIDAR-em (Ahokas i in. 2005):

- **GPS** – (*Global Positioning System*) Globalny System Pozycjonowania ze względu na swoją specyfikę może być źródłem, czasami dużych, błędów¹ będących wynikiem:
 - zegara satelity – różnica pomiędzy idealnym czasem GPS, a wskazaniem zegara satelity
 - błędu efemeryd – spowodowanego różnicą między rzeczywistą pozycją satelity, a pozycją wyliczoną z danych orbitalnych. Przyczyną jest grawitacja Słońca i Księżyca, a także wiatr słoneczny.
 - selektywnej (ograniczonej) dostępności do sygnału – **PPS** (*Precise Positioning System*) – Precyzyjny System Pozycjonowania, dostępny jest tylko dla wybranych użytkowników cywilnych i wojska. W normalnych warunkach cywilni użytkownicy korzystają z **SPS** (*Standard Positioning System*) - Standardowego Systemu Nawigacji.
 - opóźnień jonosferycznego – błąd powstający w trakcie przechodzenia fali przez jonosferę. Za dnia przyjmuje wartości większe (20-30 m), nocą mniejsze (3-6 m.).
 - opóźnień troposferycznego – błąd powstały w trakcie przejścia fali radiowej przez dolne warstwy atmosfery. Zależy od temperatury, ciśnienia i wilgotności. Osiąga wartości do 3 m.
 - szumów własnych odbiornika - błędy pomiaru, jakie wystąpią na etapie obliczania pozycji już w samym odbiorniku GPS. Spowodowane mogą być np.: telefonem komórkowym lub komputerem przenośnym.
- **INS** – (*Inertial Navigation Systems*) Bezwładnościowy System Nawigacyjny, który określa aktualne nachylenia kątowe platformy, na której zamontowana jest optyczna głowica skanująca. W jego skład wchodzi system **IMU** (*Inertial Measuring Unit*) – Bezwładnościowy Układ Pomiarowy, złożony z żyroskopu i akcelerometru (Węzyk 2006). Pomiar położenia odbywa się 200 razy na sekundę. W tym czasie samolot lecący z prędkością około 210 km/godz., pokonuje drogę niespełna 30 cm. Są więc w trakcie pomiarów momenty, w których rejestracja może być wykonana bez ustalonego

¹ Aby ograniczyć błędy z tytułu pomiarów GPS ustalono następujące warunki pomiarów, które muszą być spełnione. Przede wszystkim przeprowadzane są pomiary różnicowe – DGPS, kodowo-fazowe, z częstotliwością 1 Hz, gdzie stacja bazowa nie może znajdować się dalej niż 25 km od miejsca pomiarów; współczynnik PDOP < 2,5. Przy spełnieniu tych warunków i zastosowaniu odpowiedniej klasy odbiorników precyzja uzyskanych pomiarów może sięgnąć około 10 cm (Katzenbeisser 2003, 2004).

położenia nadajnika, gdy emisja fali odbędzie się w przerwie w pomiarach systemu inercjalnego. System INS spełnia ponadto inne istotne zadanie: w momencie przerw w pracy GPS przejmuje jego funkcje. Ważne jest przed przystąpieniem do pomiarów właściwe skalibrowanie urządzenia, przez co prawdopodobieństwo wystąpienia dużych błędów będzie znikome.

- **Urządzenie laserowe.** Składa się ono z nadajnika, lustra, odbiornika sygnałów odbitych i licznika sygnałów. Nieskalibrowany laser może być przyczyną błędów systematycznych. Szczególnie chodzi tu o części mechaniczne (lustra), które są głównym powodem błędów. Jest to jednak sytuacja raczej niewystępująca z racji tego, iż urządzenie przed każdym lotem jest sprawdzane i strojone.
- **Charakterystyka danych.** Składa się na nią gęstość pozyskanych punktów, wysokość lotu, kąt skanowania, numer odbicia, wielkość plamki. Wszystkie te czynniki wpływają na późniejszą dokładność obróbki danych. Ważne jest dobranie odpowiednich parametrów do założonego celu prac.
- **Obróbka i przetwarzanie danych.** Podstawowym źródłem błędów jest czynnik ludzki. Ponadto każdy etap obróbki obarczony jest błędami, które mogą wynikać z: interpolacji brakujących danych, filtracji, segmentacji i wygładzania, współczynników progowych, generalizacji i innych. Wszystkie operacje wykonywane są w oparciu o pewne algorytmy. Każdy z nich różni się od siebie, przez co wyniki ich zastosowania mogą być inne w różnych sytuacjach. Jak pokazały doświadczenia (Hyypä J. i in. 2004, 2006; Pfeifer i in. 2004; Sithole, Vosselman 2003) należy starać się dobrać odpowiednie algorytmy oraz metody do potrzeb i dane grupować w porcje tak, by podnosić efektywność wyników i obniżyć czas analizy danych.
- **Charakterystyka obiektów.** Szczególnie trudnymi terenami są obszary górskie. Duże deniwelacje terenu i występowanie roślinności utrudnia filtrację (Hyypä H. i in. 2005). Dużo efektywniejsza i prostsza jest praca na obszarach płaskich. Innego typu trudności znajdujemy w drzewostanie, gdzie zwarta warstwa koron może w znacznym stopniu utrudnić dokonanie pomiarów. Zmniejszenie błędów powodowanych przez charakterystykę skanowanych obiektów można przeprowadzić na przykład przez dobranie odpowiedniej pory nalogu, przez zwiększenie ilości punktów na powierzchnię, zmniejszenie kąta skanowania, czyli próby maksymalnego wykorzystania i dostosowania parametrów zastosowanego skanera. Obiektu skanowanego nie możemy zmienić, możemy jednak zastanowić się nad odpowiednim dobraniem sprzętu, który będzie go skanował.

Wspomniane powyżej przyczyny błędów na pewno nie są wszystkimi. Dają one jednak pewne wyobrażenie o złożoności i zaawansowaniu technologii, która jest przedmiotem niniejszej pracy. Pokazują również, że nie mamy do czynienia z narzędziem zupełnie bezbłędnym. Wydaje się, że dokładność w granicach 15 cm jest zupełnie wystarczająca do inwentaryzacji leśnej.

Poniżej przedstawiono najważniejsze zalety technologii lotniczego skaningu laserowego w porównaniu do tradycyjnych metod fotogrametrycznych:

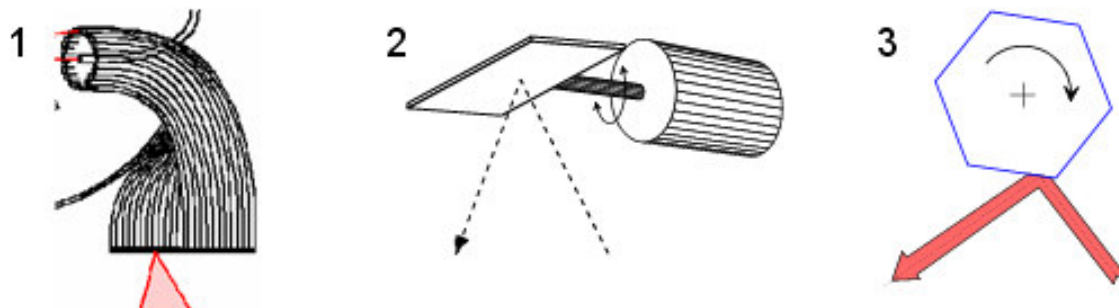
- Proces pozyskiwania i przetwarzania danych jest prawie całkowicie zautomatyzowany. Rola ludzi ogranicza się wyłącznie do kontroli i określania parametrów nalotu.
- LIDAR jest odporny na warunki świetlne: może pracować nocą i na obrazie nie występują cienie.
- Jest to jedyne narzędzie, które pozyskuje informację z tak wielką ilością próbek. Wykorzystanie innych tradycyjnych metod do pomiaru kilku punktów na 1 m², okazuje się zupełnie niewykonalne z powodu kosztów i pracochłonności. Nawet okap drzewostanu nie jest wystarczającą przeszkodą dla wiązki laserowej, gdyż przenika go średnio 24 % z łącznej liczby wyemitowanych promieni (Hopkinson i in. 2004a).

Do wad systemu należy zaliczyć:

- Nieodporność na czynniki pogodowe – niskie chmury, deszcz czy mgła uniemożliwiają pomiar powodując rozbiecie lub pochłanianie promieni laserowych.
- Wąska strefa pomiarów. Przelot samolotu odbywa się na stosunkowo niewielkich wysokościach. Dodatkowo skaniny wykonywane są przy niewielkim kącie przez co ostatecznie jednorazowo pozyskiwana jest informacja o obszarze, którego szerokość wynosi kilkuset metrów.
- Wysoka cena pozyskania danych. Wydaje się jednak, że w wyniku dużego zapotrzebowania i wielu nowo powstających firm skaningowych, sytuacja ta będzie się zmieniać i cena danych spadnie.

Regułą stało się integrowanie skanera z innymi sensorami optycznymi. Chodzi tu przede wszystkim o kamery cyfrowe i hiperspektralne. Dzięki tej fuzji możliwe jest jednoczesne i kompletne pozyskanie informacji na temat badanego obiektu. Ułatwia to i uzupełnia późniejsze analizy i obliczenia, oraz obniża koszty pozyskiwania danych LIDAR-owych.

Większość obecnie dostępnych na rynku skanerów jest systemami generującymi impulsy. Można wyróżnić 3 następujące ich rodzaje: światłowodowe, z wibrującym lustrem i lustrem wielokątnym (Ryc. I.1).

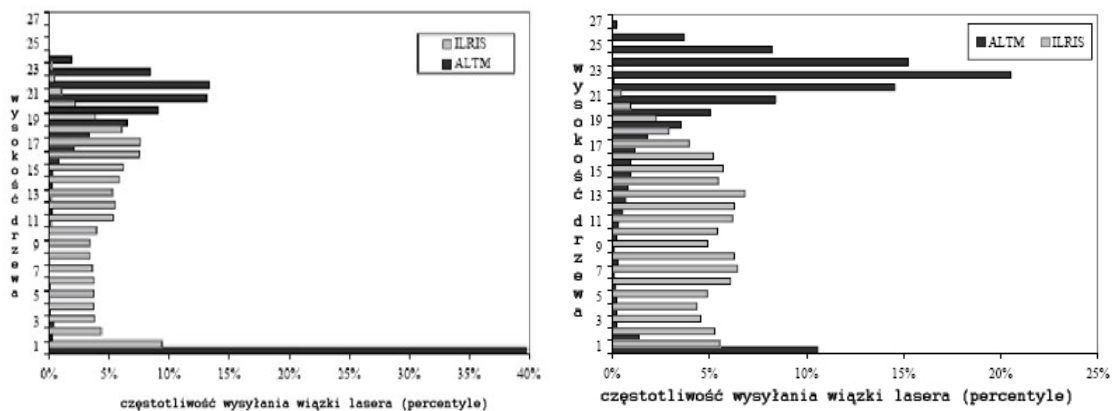


Rys. I.1 Rodzaje „systemów” LIDARowych. (1) Światłowodowy - Fiber scanner (TopoSys), (2) Wibrujące lustro - Oscillating Mirror (Optech, Leica), (3) Lustro wielokątne - Polygonal mirror (Riegl)

Różnią się one między sobą tym, że pierwszy zbudowany jest z systemu światłowodów zgrupowanych w 2 jednostkach ustawionych względem siebie pod odpowiednim kątem. Jedna z nich emituje impulsy, a druga rejestruje sygnały powracające. Obie części są połączone, co wykorzystywane jest do uzyskania danych referencyjnych. System ten m.in.: nie wymaga dodatkowej kalibracji po tej wykonanej w fabryce, możliwa jest zmiana kąta „patrzenia”, zapewnia gęste i regularne pokrycie terenu, a stopień pokrycia terenu punktami nie jest uzależniony od wysokości czy kąta skanowania. Problemem jest tylko skalibrowanie kierunku patrzenia obu jednostek. Pozostałe 2 rodzaje skanerów posiadają elementy mechaniczne (lustra) (Weżyk 2006), które z racji swej budowy mogą mieć wpływ na dokładność pomiarów. Są jednak z powodzeniem i bardzo szeroko stosowane na całym świecie.

Zagadnienia techniczne dotyczące lotniczego skaningu laserowego (LIDAR-a).

Penetrację drzewostanu przez sygnał z lotniczego skanera laserowego w porównaniu do naziemnego skaningu laserowego zobrazowano poniżej. LIDAR skanujący przestrzeń z poziomu lotniczego nie jest w stanie dostarczyć informacji w promieniu 4 m od środka do nasady korony (Chasmer i in. 2004), co powoduje wyłączenie tych części koron z określania np. parametru LAI. Gatunek drzewa ma istotny wpływ na ilość dostarczonej informacji z poszczególnych warstw drzewostanu.



Ryc. I.2 Średnia dystrybucja (procentowa) odbić lotniczego skaningu laserowego (kolor czarny) i naziemnego skaningu laserowego (kolor szary) dla mieszanych drzewostanów sosnowych (z lewej) i liściastych (z prawej) (Chasmer i in. 2004).

Należy sobie uświadomić, iż nie wszystkie impulsy wracają do nadajnika. Straty te mogą sięgnąć nawet kilkudziesięciu procent szczególnie w obszarach o dużym udziale wód otwartych (Hopkinson i in. 2004a). Spowodowane one są pochłanianiem impulsów lub zmianą kąta ich odbicia przez objekty na ziemi. Ponadto w okresie letnim nie więcej jak od 10-20 % (Wężyk 2006) do 35 % (Watt i in. 2004) wyemitowanych impulsów dosięga gruntu pod okapem drzewostanu. Obydwa te zagadnienia są istotne w momencie planowania nalotu, by odpowiednio ustalić gęstość próbkowania i uwzględnić ewentualne ubytki.

Kolejnym parametrem LIDAR-a, na który należy zwrócić uwagę jest wielkości plamki, czyli średnica wiązki laserowej na ziemi. Ma ona istotny wpływ na proces pozyskiwania danych oraz na efekt opracowań kameralnych. Wraz z jej zwiększaniem łatwiejsze staje się wychwycenie np.: wierzchołka drzewa. Im jest ona mniejsza, tym łatwiej przenika warstwę koron, co ma pozytywny wpływ na jakość informacji dotyczącej podokapowej części drzewostanu, a pozycja punktu bardziej odpowiada położeniu obiektu, który charakteryzuje.

Kolejnym ważnym tematem jest odległość potrzebna do zarejestrowania szumu (odbicia). Różne systemy potrzebują innej odległości pomiędzy kolejnymi celami by można je było wyróżnić. System *Falcon II* rozpoznaje dwa cele, gdy znajdują się one w odległości co najmniej 1,5 m (Loffler 2003). Inne systemy rozpoznają różne cele już po 0,6 m (Wężyk 2006).

Bardzo często zdarza się, iż dane referencyjne nie pokrywają się w swym położeniu geograficznym z danymi z LIDAR-a. Wynika to ze sposobu, w jakim mierzy się lokalizacje

pojedynczych drzew w pomiarach terenowych oraz z błędów określania położenia chmury punktów w trakcie nalotu skanerem lasera. Te drugie spowodowane są np.: różnicą w pokryciu się danych z sąsiednich pasów. Często stosowaną praktyką w badaniach jest dociąganie danych pozyskanych z lotniczego skaningu do danych terenowych w założonym promieniu i określonej wysokości. Zakłada się wtedy, że odchyłka pozioma większa niż 2 m i pionowa większa niż 5 m między korespondującymi danymi (pozyskanymi np.: z pomiarów terenowych i LIDAR-a) powoduje odrzucenie takich drzew w późniejszych porównaniach (Yu i in. 2004a).

Ostatnią ważną charakterystyką jest możliwość rejestracji różnej liczby sygnałów odbitych. Pierwsze systemy, np.: TopoSys I, mogły kolekcjonować tylko jedno odbicie w jednym nalocie – pierwsze lub ostatnie (Hyypä J. i in. 2006), następnie możliwe było jednoczesne kolekcjonowanie 2 odbić: pierwszego i ostatniego, m.in.: w systemach ALTM 1210 i ALTM1225, Falcon II czy TopoSys II. Od 2004 stało się możliwe rejestrowanie większej ilości odbić pośrednich. W systemie ALTM 3100 możliwe już jest pozyskanie do 4 odbić (np.: TopScan). Obecnie pojawiły się na rynku skanery mające możliwość rejestracji wszystkich odbić jednej wiązki, są to: Litemapper 5600 (Hug 2004; Reitberger i in. 2006a), Riegl LMS-Q560 (Reitberger i in. 2006a; Rieger i in. 2006) TopEye MK II (Reitberger i in. 2006b) i Harier 56 (Reitberger i in. 2006a).

Z końcowym efektem przetwarzania danych LIDAR-owych związane są następujące produkty:

- **DTM** (*Digital Terrain Model*) - Numeryczny Model Terenu (NMT) lub **DEM** (*Digital Elevation Model*) lub **DGM** (*Digital Ground Model*) – wektorowy lub rastrowy model Ziemi.
- **DSM** (*Digital Surface Model*) – Numeryczny Model Powierzchni Terenu (NMPT) lub szczegółowo w odniesieniu do drzewostanu - Numeryczny Model Warstwy Koron (NMWK) (Będkowski 2005). Jest to wektorowy lub rastrowy model Ziemi wraz ze wszystkimi obiektami znajdującymi się na jej powierzchni. W odniesieniu do lasu należy rozumieć to pojęcie jako: dyskretną (punktową) reprezentację pewnej powierzchni, która wraz z algorytmem interpolacyjnym opisuje kształt koron w określonym obszarze (Będkowski 2005).
- **nDSM** (*normalized Digital Surface Model*) znormalizowany Numeryczny Model Powierzchni Terenu lub Numeryczny Model Różnicowy (Mozgawa 2006), który w odniesieniu do powierzchni leśnej powstaje przez „odjęcie” NMT od NMPT, innymi słowy: Wysokościowy Model Koron – **CHM** (*Canopy Height Model*) lub

znormalizowany Model Koron - **nCM** - (*normalized Canopy Model*) lub Numeryczny Model Koron (NMK) - **DCM** (*Digital Canopy Model*), a także Model Powierzchni Koron (MPK) – **CSM** (*Crown Surface Model*).

3.3 Potencjalne zastosowanie lotniczego skaningu laserowego w leśnictwie - dotychczasowe wyniki

Pierwsza opublikowana praca dotycząca wykorzystania lotniczego skaningu laserowego w lesie zatytułowana była: „*Laser aerial profiling of a forest*”, pochodziła z Rosji, a jej autorem był Solodukhin (Naesset i in. 2004c) Porównywano w niej wyniki określania wysokości drzewostanu z danych LIDAR-owych i zdjęć lotniczych. Kolejne lata przyniosły następne publikacje głównie z Ameryki Północnej, a następnie ze Skandynawii (Hyypä J. i in. 2004, Naesset i in. 2004c). Dotyczyły one pozyskania informacji na temat wysokości drzewostanu, zadrzewienia, gatunku drzew i szacowania biomasy. Zasadniczo pomiar środowiska leśnego rozwinął się w dwóch kierunkach (Naesset 2004a). Pierwszy skupił się na poszukiwaniu charakterystyk poszczególnych wydzieleni (grup drzew), wykorzystywanych w wielkopowierzchniowej inwentaryzacji drzewostanu. Realizowany był w oparciu o dane LIDAR-owe, których gęstość na jednostkę powierzchni wynosi około 1 punkt/m². W świecie nauki m.in. tacy ludzie jak Danilin, Holmgren, Koch, Naesset i Wack zajmują się aktywnie tymi zagadnieniami. Drugi kierunek badań skupia się na określeniu i pomiarze pojedynczych drzew. W tym wypadku gęstość pulsów na metr kwadratowy często przekracza 5, czasami osiąga nawet wartość 50. Przedstawicielami tego trendu są m.in. de Kok, Hyypä, Maltamo, Persson., Pitkanen, Yu.

Obecnie możliwe jest przy pomocy LIDAR-a uzyskanie następujących informacji o drzewostanie:

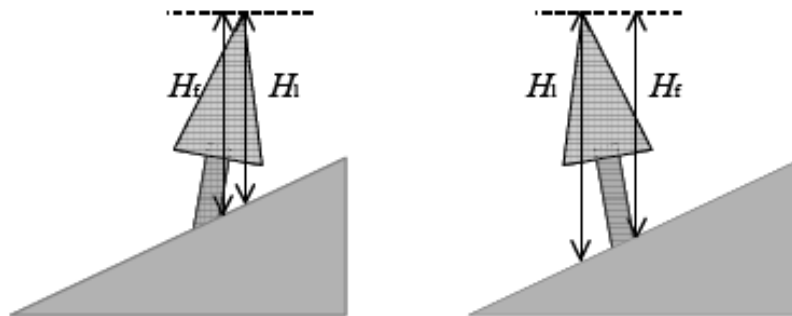
1. wysokość drzewa lub grupy drzew (NMT, NMPT, nDSM);
2. pierśnica drzew (korelacja z wysokością, szerokością korony etc);
3. pole powierzchni przekroju drzewa (G);
4. określenie przyrostu drzewostanu w jednostce czasu;
5. liczba drzew – zagęszczenie drzew, grupy drzew;
6. lokalizacja partii drzewostanów o budowie piętrowej;
7. powierzchnia pojedynczej korony drzewa (stanowisko);
8. miąższość drzew i drzewostanów (zasobność);
9. gatunek drzewa;

10. biomasa nadziemnej części drzewostanu;
11. wielkość i kształt korony;
12. powierzchnia (płatu) koron;
13. defoliacja, stan zdrowotny;
14. zwanie;
15. określanie współczynnika LAI;
16. określanie granic wydzieleń;
17. lokalizowanie ściętych drzew;
18. lokalizowania gniazd i luk;
19. wyznaczanie dróg leśnych;
20. określanie masy martwego drewna;

Wysokość drzew

Generalną zasadą w procesie określenia wysokości drzew jest odjęcie wartości „z” odpowiadających sobie pikseli z NMT i NMPT. W związku z tym w analizach skupić się należy się przede wszystkim na przyczynach błędów przy interpolacji i generowaniu numerycznego modelu terenu i powierzchni terenu oraz na źródle danych referencyjnych wykorzystanych w porównaniach.

Wiele czynników ma wpływ na dokładność określenia wysokości drzew. Należą do nich m.in.: wielkość plamki (zależna pośrednio od wysokości skanowania), nachylenie terenu, wzajemne położenie wierzchołka i podstawy drzewa oraz gęstość punktów na jednostkę powierzchni. Bardzo dobrze ilustrują to poniższe rysunki (Ryc. I.3).



Ryc. I.3 Wpływ ukształtowania terenu i pochylenia drzewa na określanie jego wysokości (Hirata 2004).

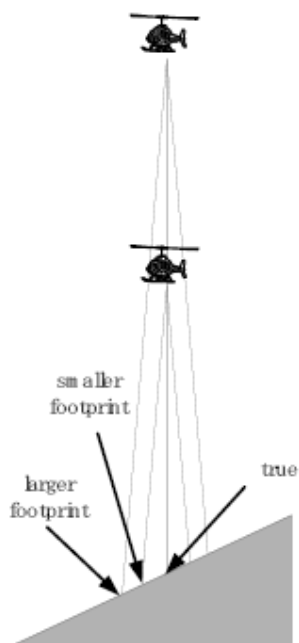
Pochylenie drzewa powoduje czasami znaczne przesunięcie wierzchołka względem podstawy (Będkowski 2005; Heurich i in. 2004b; Hirata 2004). Przy płaskim terenie nie ma to znaczenia gdyż różnica wysokości wierzchołka i podstawy drzewa będzie taka sama. Jeśli teren jest pofalowany już w niewielkiej odległości od drzewa możemy odnotować duże różnice wysokości. Wykonanie w takich wypadkach odejmowania NMT od NMPT powoduje zawyżenie (gdy drzewo pochylone jest w kierunku spadku stoku) lub zaniżenie wysokości drzew (gdy drzewo pochylone jest w kierunku wierzchołka stoku). LIDAR rejestruje pomiar wysokości nie uwzględniając jego pochylenia, ale najkrótszą, pionową odległość jego wierzchołka do gruntu. Wynika z tego, że w trakcie prac konieczne jest określenie systematycznego pochylenia, o ile takie występuje i określenie równania korelacji, niwelującego jego wpływ na prowadzone pomiary.

Tab. I.1 Porównanie wyników określania wysokości drzewostanu (RÓŻNICA (średnia arytmetyczna) = dane referencyjne – LIDAR [m lub %]).

AUTOR	GĘS-TOŚĆ [p/m ²]	DANE REFERENCYJNE	RÓŻNICA		R ²	UWAGI
			m	%		
Andersen i in. 2005	-	TEREN	-	-	0,98	głównie iglaste
Buddenbaum i in. 2006	2-3	TEREN	wynik > 0	-	0,93	Św
Coops i in. 2004	0,4-1	TEREN	1,4	10	0,88	drzewostan wielogat.
Dorren i in. 2006	0,9	TEREN	-	10	-	Św
Heurich i in. 2004a	10	TEREN	0,76	-	0,98	Iglaste
			0,71	-	0,96	Liściaste
Heurich i in. 2004b	11	TEREN	1,40	-	0,94	Św, Bk, Kl, Lp
			2,08	-	0,84	Św
			2,37	-	0,74	Bk, Kl
		PARA STEREOSKOPOWA Z KAMERY DMC	0,99	-	0,94	Św, Bk, Kl, Lp
			1,16	-	0,81	Św
			0,79	-	0,97	Bk, Kl
Hirata 2004	7,5-24,8	TEREN	od-0,50do-0,90	-	0,92	-
Holmgren i in. 2004a	1,2	TEREN	0,80	5	-	-

Hopkinson i in. 2004a	5	TEREN	-	3	0,97	Św czarny
Jan 2005	-	ZDJĘCIA LOTNICZE	-0,22	-	-	-
Kiraly i in. 2006	1,5	TEREN	Od 0 do 1,80		0,93	-
Korpela i in. 2007	6	TEREN	0,58			Sosna
			0,69			Świerk
			0,36			Liściaste
			0,58			średnia dla gat.
Leckie i in. 2003	2	TEREN	1,80	7		zagęszczenie 300 drzew/ha
			1,30	5		zagęszczenie 500 drzew/ha
			0,80	3		zagęszczenie 725 drzew/ha
			1,20	5		średnia dla 3 pow.
Maltamo i in. 2004a	10	TEREN	0,97			średnio dla wszystkich gat.
			0,80			Św
			1,20			So
			0,91			Brz
Maltamo in. 2004b	10	TEREN	0,80	-	0,98	Św
			0,65	-	0,99	So (dokładny wieloletni pomiar 29 sosen)
			1,20	-	0,93	So
			0,91	-	0,83	Brz
Morsdorf i in. 2006	5-10	ZDJĘCIA HEMISFERYCZNE	0,38			500m wys. lotu
			0,69	-	-	900m wys. lotu
Naasset i in. 2001	1,1	TEREN	0,23		0,8	średnia z 12 powierzchni
Parker i in. 2004	1-4	TEREN	0,92	-	-	1p/m ²
			0,76	-	-	4p/m ²
St-Onge i in. 2006	0,19-3	TEREN	2,03	-	0,75	wszystkie wartości
			1,84	-	0,84	Bez war. skrajnych
Tickle i in. 2006	1	TEREN	-	-	0,91	-
Wack i in. 2003	5	TEREN	0,69	-	-	plantacja eukaliptusowa
Watt i in. 2004	2	TEREN	0,83	-	0,98	-
Yu i in. 2004b	2,5-10	TEREN			0,99	

Ryc. I.4 Wpływ wysokości skanowania i wielkości plamki na dokładność NMT (Hirata 2004).



Wielkość plamki i gęstość pulsów na jednostkę powierzchni zależy od wysokości prowadzenia nalotu LIDAR-em. Przy pozyskiwaniu informacji na temat powierzchni ziemi (DTM) należy raczej zmierzać w kierunku małej wielkości plamki, przez co podwyższamy dokładność pomiarów. Wynika to ze zmniejszenia odległości od środka plamki do jej brzegu proporcjonalnie do zmniejszenia się wielkości promienia. Efektem tego jest generowanie na zboczu stoku sygnału z opóźnieniem, przez co zarejestrowany punkt pomiarowy leży poniżej faktycznego jego położenia. Im większe pochylenie stoku i większa średnica plamki tym to niedoszacowanie staje się większe.

W zależności od gęstości pozyskiwanych punktów na jednostkę powierzchni otrzymujemy numeryczny model terenu o różnej jakości. Im gęstość próbkowania mniejsza tym ogólniejszy obraz powierzchni ziemi otrzymujemy (Loffler 2003).

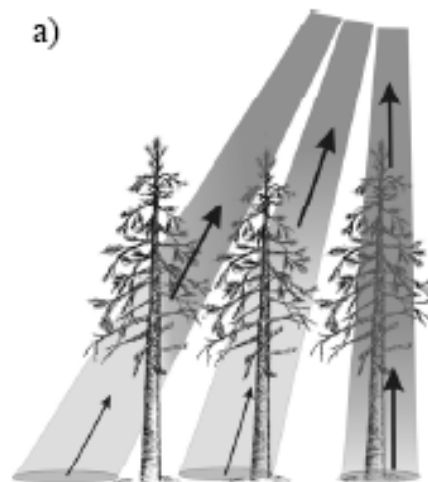
Ważnym czynnikiem determinującym dokładność generowanego numerycznego modelu terenu jest rodzaj roślinności znajdującej się na powierzchni inwentaryzowanej (Abraham, Adolf 2006; Jan 2005). W zależności od jej rodzaju i gęstości pulsów powoduje ona systematyczne zawyżenie wartości otrzymywanego NMT (Hopkinson i in. 2004b). Tak np.: dla trawy przesunięcie to może wynosić 5 cm, a dla starego drzewostanu wierzbowego 17 cm (Pfeifer i in. 2004). Wykazano również, iż zachodzi korelacja między wielkością przesunięcia, a rodzajem pokrywy, rozpoznawanej na podstawie tekstury (Pfeifer i in. 2004), co może w przyszłości posłużyć do automatycznej korekty NMT w zależności od roślinności porastającej powierzchnię ziemi. Niemożliwym jest jednak badanie tekstury tylko na podstawie jednego punktu. Na wielkość wartości odchylenia standardowego współrzędnych numerycznego modelu terenu, w trakcie określania tekstury, ma wpływ kilka czynników generujących błędy:

- Odchylenie standardowe samych pomiarów (2 - 4 cm)
- Odchylenie standardowe powodowane przez teren (kilka centymetrów)

- Odchylenie standardowe spowodowane przez rodzaj wegetacji (zależy od rodzaju pokrywy).

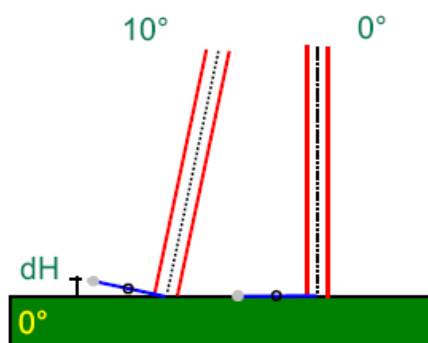
Należy więc w trakcie określania tekstury brać pod uwagę tylko obszar o pewnej powierzchni i znaleźć równanie regresji niwelujące przesunięcie spowodowane wegetacją (Gorte i in. 2005).

Przyczyną niedokładnego numerycznego modelu terenu mogą być również różnice w przebiegu poszczególnych pasów pochodzących z kolejnych nalotów (bardzo możliwe, że może mieć to wpływ również na NMPT). Różnice między nimi mogą dochodzić do kilkunastu centymetrów (Kornus, Ruiz 2003). Profesjonalne oprogramowanie jest w stanie automatycznie znaleźć różnice między nimi i w ten sposób poprawić błędy wynikające głównie z dokładności GPS-u. Przy pracach na surowych danych należy jednak pamiętać o możliwości wystąpienia systematycznych różnic, które są możliwe do usunięcia np. w oparciu o jeden poprzeczny pas danych zbierany w każdym nalocie.



Ryc. I.5 Obszary „zaczienione” zależności od wielkości kąta padania promieni laserowych (Chasmer i in. 2004).

Istotny wpływ na dokładność numerycznego modelu terenu ma kąt skanowania. Wykazano, iż wraz z jego wzrostem rośnie liczba „cieni” na gruncie, przez co ilość interpolowanych punktów się zwiększa. Powoduje to większe błędy w otrzymywanych modelach.



Ryc. I.6 Wpływ kąta padania wiązek laserowych na dokładność NMT (Wack, Stelzl 2005).

Dodatkowo przy płaszczyźnie o średnicy jednego metra, błąd spowodowany tylko kątem padania tylko 10° wynosi $+8,5$ cm (Wack, Stelzl 2005). Stwierdzono, że kąt skanowania do 15° nadaje się do wysokodokładnościowych (± 20 cm) badań w drzewostanach strefy borealnej (Ahokas 2005). Przy kącie w granicach $7-15^\circ$ nie znaleziono znaczących różnic w uzyskanym numerycznym modelu terenu (Morsdorf i in. 2006).

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na dokładność numerycznego modelu terenu jest pora wykonania nalotu. Okres bezlistny jest optymalnym do wykonania nalotu LIDAR-em. Wynika to z braku liści, na drzewach, krzewach i roślinności podokapowej. Różnice w numerycznym modelu terenu, badanego obszaru, pozyskanego zimą i latem mogą dochodzić do 30 cm (Wagner i in. 2004). Optymalnym terminem jest wczesna wiosna, tuż po zniknięciu pokrywy śnieżnej lub późna jesień, zaraz po opadzie liści, a jeszcze przed pojawieniem się śniegu. Dodatkowym czynnikiem powodującym błędy może być zalegający śnieg, szczególnie w zacienionych partiach drzewostanu. Stąd ważne jest właściwe określenie terminu takich prac i sprawdzenie terenu przed ich wykonaniem.

Ciekawe wyniki analiz przedstawił Anderson wraz z zespołem (2006). Najpierw wygenerował NMT w zależności od wielkości piksela oraz ilości punktów próbkowania.

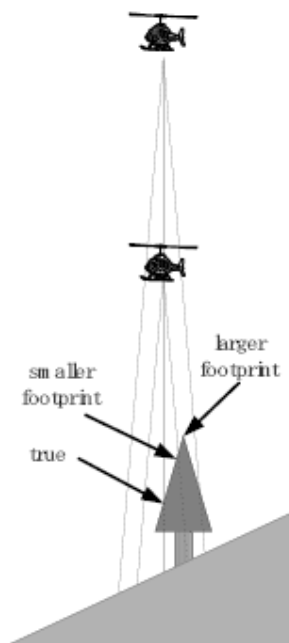
Tab. I.2 Różnice pomiędzy NMT w zależności od wielkości oczka rastra i ilości punktów (Anderson i in. 2006).

% original data set	30 m		10 m		5 m	
	Mean difference TOTAL – MEAN (m)	<i>p</i> -value	Mean difference TOTAL – MEAN (m)	<i>p</i> -value	Mean difference TOTAL – MEAN (m)	<i>p</i> -value
50	-0.01	0.4379	-0.01	0.7680	-0.01	0.1824
25	-0.02	0.1095	-0.02	0.0552	-0.03	0.0145
10	-0.02	0.1830	-0.03	0.0117	-0.04	0.0007
5	-0.03	0.0441	-0.04	0.0086	-0.06	0.0006
1	-0.06	0.0013	-0.04	0.0047	-0.07	0.0001

Następnie badał on wpływ redukcji liczby punktów na dokładność generowanego NMT w zależności od zmiennej wielkości oczka rastra. Z wyników prac okazało się, że gdy generowany jest numeryczny model terenu o wielkości piksela 30×30 m z danych wyjściowych zredukowanych nawet o 90%, jego dokładność nie różni się pod względem statystycznym od modelu uzyskanego ze 100% punktów. Przy generowaniu numerycznego modelu o polu podstawowym 10 m podobna redukcja może się odbyć do poziomu 25% danych pierwotnych. Jest to dowód, że w celu tworzenia modeli terenu o określonej rozdzielczości możliwe jest zmniejszenie gęstości próbkowania, bez statystycznych zmian w jakości modelu, przez co znacząco obniżone będą koszty projektu. Proces redukcji danych jest proporcjonalny do wielkości oczka rastra - im rozdzielczość NMT jest większa (oczko rastra mniejsze), tym możliwość redukcji danych jest mniejsza.

Przyczyny błędów przy generowaniu Numerycznym Modelem Powierzchni Terenu (NMPT)

Ryc. I.7 Wpływ wysokości skanowania i wielkości plamki na dokładność NMPT (Hirata 2004).



Odwrotnie, niż przy pozyskiwaniu danych do NMT, przy skanowaniu warstwy koron wielkość plamki ma pozytywny wpływ na dokładność generowanego później modelu. W trakcie jego tworzenia ważne jest oparcie się na punktach będących faktycznymi wierzchołkami drzew. Istotne jest więc ich pozyskanie z maksymalnie wysokim prawdopodobieństwem. Można rozwiązać ten problem na co najmniej dwa sposoby: albo zagęścić ilość punktów na jednostkę powierzchni albo

zwiększyć średnicę plamki (np.: przez zwiększenie wysokości lotu).

Zwiększenie gęstości skanowania może poprawić wyniki określania wysokości drzew o 0,5 - 0,6 m (Hirata 2004). Mniejsza gęstość powoduje „gubienie” niektórych wierzchołków, czasami nawet całych drzew. Dodatkowo spiczaste wierzchołki gatunków iglastych (świerk, sosna) często nie powodują od razu powstania szumu na tyle silnego by został on zarejestrowany. Odbicie powstaje dopiero po zetknięciu z niższymi grubszymi partiami koron (Heurich, Weinacker 2004; Maltamo in. 2004b). Powoduje to większy udział punktów, które trafiły w brzeg korony. Są to punkty położone najwyżej (ale nie wierzchołki), które wykorzystywane są przez algorytmy do tworzenia numerycznego modelu koron. To, a także zwiększenie się liczby interpolowanych punktów wpływa na pogorszenia dokładności NMPT. Pora roku ma także pewien wpływ na dokładność numerycznego modelu powierzchni terenu. O ile lato sprzyja i poprawia dokładność prac, o tyle okres zimowy powoduje pogorszenie się dokładności NMPT. Wynika to z faktu, że prawdopodobnie w okresie zimowym, drzewa iglaste są bardziej „przezroczyste” dla podczerwonych promieni lasera (Wagner i in. 2004). Z kolei cienkie gałązki drzew liściastych, bez liści, nie generują szumów, a rejestracja odbicia następuje dopiero po natrafieniu przez promień na grubszą gałąź. Błędy mogą sięgać nawet kilku metrów. Z racji tego nie zaleca się pozyskiwanie danych terenowych zimą.

Wielkie znaczenie w procesie prac doświadczalnych i kontrolnych ma rodzaj i pochodzenie danych referencyjnych. Nie zawsze są one bezbłędne (Maltamo in. 2004b). Jak pokazała praktyka pomiar wysokości drzew w terenie, wykonany przez dwóch obserwatorów, tradycyjnymi metodami różnił się średnio o 1,4 m, czyli o około 10% średniej wysokości drzew (Coops i in. 2004). Jak pokazują doświadczenia ze Szwecji, wielkość błędu standardowego przy określeniu wysokości wynosi około 10% (Holmgren, Jonnson 2004a). Na pewno więc błędy wykazywane w pomiarach LIDAR-owych spowodowane są częściowo niedokładnością danych referencyjnych. Dopiero pomiar ściętych drzew daje pewne, wiarygodne źródło w określaniu wysokości za pomocą lotniczego skaningu laserowego. Kolejnym czynnikiem, który może niekorzystnie wpłynąć na końcową postać numerycznego modelu terenu jest etap prac kameralny. Heurich (Heurich i in. 2004b) zauważył, że algorytmy w oprogramowaniu ISAE obcinają wyciągnięte, wysoko ponad okap drzewostanu, wierzchołki starych świerków, zaniżając przez to ich wysokość.

Pierśnica drzew

Tab. I.3 Porównanie wyników określania pierśnicy drzew (RÓŻNICA (średnia arytmetyczna) = dane referencyjne – LIDAR.)

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	RÓŻNICA		GĘS- TOŚĆ [p/m ²]	UWAGI
		cm	%		
Holmgren i in. 2004a	TEREN	1,9	8,9	1,2	drzewostan iglasty
Korpela i in. 2007	TEREN	-0,73	-	6	Sosna
		-1,39	-		Świerk
		-0,80	-		liściaste
		-0,99	-		wszystkie gatunki
Persson i in. 2003	TEREN	RSME=3,8	10	15	drzewostany mieszane

Pole powierzchni przekroju drzewa (G)

Pole powierzchni jest wynikiem estymacji z wykorzystaniem równań regresji. Podobnie jak przy innych parametrach wyznaczanych pośrednio, dokładność powierzchni pierśnicowej zależy od dokładności określania wartości parametrów wchodzących w skład równań regresji.

Okazuje się, że niemożliwe jest wykorzystanie w pracach istniejących równań regresji dla określonych gatunków. Poszczególne drzewostany tego samego gatunku rosnące w różnych warunkach siedliskowych czy klimatycznych różnią się między sobą np.: relacją powierzchni przekroju pierśnicowego do parametrów korony. Ponadto ciężko jest znaleźć dwa wydzielenia o podobnej strukturze i składzie gatunkowym, przez co możliwe byłoby używanie modeli dla większych powierzchni lasów (Naesset 2004b). Skaniny laserowe jest technologią, która nie jest w stanie, uchwycić tych różnic w poszczególnych drzewostanach tak, by możliwe było automatyczne skalibrowanie wykorzystywanych modeli do nowych warunków.

Tab. I.4 Porównanie wyników określania przekroju poprzecznego drzewostanu (powierzchnia = (dane referencyjne – LIDAR)/dane referencyjne)×100[%].

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	RÓŻNICA POWIERZCHNI [%]	GĘSTOŚĆ [p/m ²]	R ²	UWAGI
Holmgren i in. 2004a	TEREN	12,5	1,2	-	
Lucas i in. 2006	TEREN	-	-	0,65	
Wack 2006	TEREN	RMS = 15	1	0,93	wszystkie pow.
		RMS = 13		0,96	iglaste
		RMS = 4		0,98	>50% liściastych
		RMS = 19		0,85	różne drzewostany (10 pow.)

Miąższość drzew i drzewostanów (zasobność)

Określanie miąższości drzew (-ostanu) opiera się na szukaniu korelacji pomiędzy innymi, mierzalnymi parametrami drzewostanu. Stąd błąd określania zależy przede wszystkim od dokładności i doboru parametrów równania regresji wykorzystanego w estymacji miąższości.

Tab. I.5 Porównanie wyników określania miąższości drzewostanu (miąższość = (dane referencyjne - LIDAR/dane referencyjne)×100[%]. (śr. kor. – średnica korony, h – wysokości drzew, L – źródłem danych jest LIDAR, ZL – źródłem danych są zdjęcia lotnicze)

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	GĘSTOŚĆ [p/m ²]	MIĄŻSZOŚĆ [%]	R ²	UWAGI
Danilin i in. 2004	TEREN	-		0,99	ścięte drzewa, SYBERIA
Heurich i in. 2004a	TEREN	10	70,4		drzewa liściaste
			76,3		drzewa iglaste
Holmgren i in. 2004a	TEREN	1,2	14,1	-	drzewostan iglasty
Hyypä J. i in. 2005	TEREN	5-10	Błąd średni: 25-30	0,14	r. kor. - ZL, wszystkie segmenty, także grupy drzew
				0,14	śr. kor. - ZL, segmenty z pojedynczymi drzewami
				0,54	śr. kor. - ZL, h - L, wszystkie segmenty
				0,56	śr. kor. - ZL, h - L, segmenty z poj. drzewami
				0,67	śr. kor. - L, h - L(wys. 800m, 5p/m ²), wszystkie segmenty

				0,66	śr. kor. - L, h - L (wys. 800m, 5p/m ²) segmenty z poj. drzewami	
				0,68	śr. kor. - L, h - L(wys. 400m, 10p/m ²), wszystkie segmenty	
				0,64	śr. kor. - L, h - L(wys. 400m, 10p/m ²),segmenty z poj. drzewami	
Korpela i in. 2007	TEREN	6	80,8	-	masa całkowita	
			67,6	-	masa ściętego drewna	
			94,3	-	masa papierówki	
			86,8	-	sosna	
			73	-	świerk	
			80,9	-	liściaste	
Persson i in. 2003	TEREN	15	91		drzewostany o mieszanym składzie gatunkowym	
Wack i in. 2003	TREN	5	93		plantacja eukaliptusowa	
Wack 2006	TEREN	1	RMS = 24	0,88	wszystkie pow.	Korelacja z wartościami opisanymi w tekście poniżej.
			RMS = 16	0,97	igl.	
			RMS = 5	0,99	>50% liś.	
			RMS = 8	0,96	>30% liś.	
			RMS = 10	0,89	100% Św	
			RMS = 18	0,95	100% igl.	
			RMS = 12	0,95	>50% Św, igl.	

Liczba drzew

Od momentu pojawienia się danych LIDAR-owych, możliwe jest automatyczne generowanie wysokościowego modelu koron, który stał się podstawą w procesie określania liczby drzew na jednostkę powierzchni. W większości prac można zauważyć, iż dodatkowym ważnym źródłem informacji są różnego rodzaju zdjęcia lotnicze. Zagadnienie to zostanie rozwinięte w rozdziale poświęconym możliwościom integracji zdjęć lotniczych ze skanowaniem laserowym. W tym miejscu skoncentruję się nad możliwościami wykorzystania danych LIDAR-owych do określenia ilości drzew na jednostkę powierzchni.

Możliwość określenia ilości drzew na powierzchni polega w rzeczywistości na określeniu zasięgów koron i policzeniu poligonów, które powstały w wyniku tych działań. Udowodniono, że lepsze rezultaty daje obraz rastrowy o większej rozdzielczości (mniejsze „oczko” siatki), niż obrazy o małych rozdzielczościach. Wynika stąd jasno, iż możliwość określenia zasięgu korony, a co za tym idzie ilości drzew na jednostkę powierzchni zależy od rozdzielczości, czyli wielkości pola podstawowego w obrazie rastrowym (Heurich i in. 2004b).

Tab. I.6 Porównanie wyników określania ilości drzew.

liczba drzew = (dane referencyjne - dane LIDAR-owe/dane referencyjne)×100 [%]

* liczba drzew górnego piętra; ** liczba segmentów składających się z co najmniej 2 drzew

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	GĘSTOŚĆ [p/m ²]	LICZBA DRZEW [%]	R ²	UWAGI
Coops i in. 2004	TEREN	0,4-1	90	-	TWA i VWS (opis) Św –piętro dominujące
			63,3	-	VWS Św
			67	-	TWA Św
Heurich i in. 2004a	TEREN	10	1,4	-	najniższa warstwa drzewostanu
			5,4	-	średnia warstwa drzewostanu
			57,5	-	górnego piętra drzewostanu
			32,6	-	drzewostan liściasty
			43,5	-	drzewostan iglasty
Heurich i in. 2004b	TEREN	11	65*	-	Św, Bk, Kl, Lp – DSM 0,5m
			59*	-	Św, Bk, Kl, Lp – DSM 1m
			86*	-	Św – DSM 0,5m
			65*	-	Św – DSM 1m
			55*	-	Bk, Kl – DSM 0,5m
			39*	-	Bk, Kl – DSM 1m
Hirata 2004	TEREN	7,5-24,8	75-96	-	
Holmgren i in. 2004b	TEREN	1,2	84		drzewostany Św
			75		drzewostany So
			58		drzewostany mieszane
			71		średnia dla wszystkich powierzchni próbnych
Kiraly i in. 2006	ZDJĘCIA QUICKBIRD	1,5	166	-	plantacje brzozowe
	TEREN		127	-	
			95	-	
			77	-	
Koch i in. 2006	TEREN	0,5	95,9**	-	gospodarczy drzewostan daglezjowy
			87,3	-	
			ZDJĘCIA STEREOSKOPOWE	61,2**	-
	50			-	
	85,4**			-	gospodarczy drzewostan mieszany
	61,7		-		
Korpela i in. 2007	TEREN	6	96,3		wszystkie gatunki

			98,2		sosna
			97,6		świerk
			89,6		gatunki liściaste
Leckie i in. 2003	TEREN	2	100	-	zagęszczenie 300 drzew/ha
			100	-	zagęszczenie 500 drzew/ha
			90	-	zagęszczenie 725 drzew/ha
			95	-	średnia dla 3 powierzchni
Maltamo i in. 2004a	TEREN	10	84*		drzewostan świerkowy
			94*		drzewostan sosnowy
			63*		drzewostan brzoza
			83*		średnia dla wszystkich powierzchni próbnych
			37		drzewostan świerkowy
			50		drzewostan sosnowy
			33		drzewostan brzoza
39,5		średnia dla wszystkich powierzchni próbnych			
Mei i in. 2004	TEREN	-	53		drzewa oliwne
			81		plantacja brzozowa
Persson i in. 2003	TEREN	15	70		drzewostany świerkowo-sosnowo-bukowe
			90*		
Reitberger i in. 2007	TEREN	25 full wave form	78*	-	Metoda segmentacji wykorzystująca detekcji pni.
			53	-	
			74*	-	Metoda segmentacji nie wykorzystująca detekcje pni.
			49	-	
Tiede i in. 2006b	TEREN	10	90		wszystkie drzewa dominujące (H>10m)
			81		drzewa dominujące (H>10m) i prawidłowo sklasyfikowane
van Aardt i in. 2006	TEREN	<5	89		ostateczny efekt klasyfikacji na gatunki iglaste i liściaste
Wack i in. 2003	TEREN	5	93	-	plantacja eukaliptusowa
Wack 2006	TEREN	1	RMS=21	0,93	wszystkie pow.
			RMS=15	0,96	iglaste
			RMS=30	0,93	>50% liściastych
			RMS=22	0,90	różne drzewostany (10 pow.)
Weinacker i in. 2004	TEREN	-	87,3		Dg

Używając 3 metod Pitkanen wraz z zespołem, poddał analizie wysokościowy model koron by określić liczbę drzew na jednostkę powierzchni (Pitkanen i in. 2004). Poniżej przedstawiono wyniki tych estymacji.

Tab. I.7 Dokładność określania ilości drzew w zależności od metody (RAW - local maxima finding on the unfiltered CHM; GAUS - Gaussian filtered CHM; HBF – height based filtering; ELIM – maxima elimination; LAP – Laplacian blob selection); gęstość pulsów wyniosła 10 p/m² (Pitkanen i in. 2004).

Method	Percentage of all trees		Basal area of found trees (%)
	Found trees	Non-tree candidates	
RAW	49.2	64.6	81.7
GAUS	36.7	6.6	68.0
HBF	37.0	5.9	67.6
ELIM	41.6	8.0	73.2
LAP	41.5	16.9	66.8

Tab. I.8 Procent wykrytych drzew oraz systematyczny błąd wysokości (symbole metod jak wyżej) (Pitkanen i in. 2004).

Method	Dominant trees (%)	Other (%)	Bias of height
RAW	79.4	7.4	-0.46
GAUS	61.4	2.4	-0.74
HBF	61.2	3.4	-0.79
ELIM	68.7	4.0	-0.73
LAP	62.4	12.5	-0.97

Tab. I.9 Dokładność szacowania ilości drzew osiągnięta dla sześciu powierzchni próbnych (pod uwagę brana była tylko wysokość drzew powyżej 10 m; gęstość pulsów wyniosła 10 p/m² (Tiede i in. 2005).

Sample plot	Field measured trees		Lokal Maximum - calculated Trees			Perc. of found trees		
	All trees	Dominant trees	All trees	Dominant trees	false positives	All trees	Dominant trees	false positives
Plot 22: mature mixed (200 y) valley -side forest	57	32	30	25	0	52,6%	78,1%	0,0%
Plot 50: sub -alpine, well spaced mature (130 - 180y) spruce	46	43	38	35	1	82,6%	81,4%	2,6%
Plot 57: mature (90 - 105y) spruce stand	45	44	30	30	0	66,7%	68,2%	0,0%
Plot 59: juvenile (30 - 50y) spruce stand	177	79	51	47	0	28,8%	58,5%	0,0%
Plot 60: mature (110 y) beech, valley side	43	30	22	20	1	51,2%	66,7%	4,5%
Plot 64: mature (100 y) beech, velay side	40	38	37	35	2	92,5%	92,1%	5,4%
Sum of all plots:	408	266	208	192	4	51,0%	72,2%	1,9%
Sum without Plot 59:	231	187	157	145	4	68,0%	77,5%	2,5%

Wyniki segmentacji danych LIDAR-owych w środowisku oprogramowania Definiens eCognition (Definiens AG, Monachium) (Tiede, Hoffmann 2006a) przedstawiono poniżej. Metoda polegała na identyfikacji drzew na podstawie lokalnych maksimumów, a następnie określenia zasięgu ich koron na podstawie informacji o jasności zawartej w pikselach. Zastosowany algorytm analizuje przestrzeń i rozbudowuje koronę do momentu gdy natrafi na sąsiednią koronę. Metoda okazała się być bardzo sprawna. Istotne jest to, że zaledwie 3% wyników okazało się fałszywymi trafieniami, przy czym ilość zidentyfikowanych drzew rosła wraz ze zmniejszaniem obszaru przeszukiwania.

Tab. I.10 Dokładność określania lokalnych maksimumów dla sześciu różnych powierzchni doświadczalnych (pod uwagę wzięte zostały tylko dominujące drzewa) (Tiede, Hoffmann 2006a).

Sample plot	Field measurements	Local maximum calculation		% of found dominant trees
	Dominant trees	Dominant trees	False positives	
Plot 22: mature mixed forest	32	24	0	75.0
Plot 50: sub-alpine well spaced mature spruce	43	35	1	81.4
Plot 57: mature spruce	44	31	0	70.5
Plot 59: juvenile spruce	79	72	4	91.1
Plot 60: mature beech	30	20	1	66.7
Plot 64: mature beech	38	33	3	86.8
Sum of all plots	266	215	9	80.8

Gatunek drzewa

Tab. I.11 Porównanie wyników określania gatunku drzew.

[%] = (dane referencyjne - dane LIDAR-owe/dane referencyjne)×100 [%]

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	DANE WYKORZYSTANE	GĘS-TOŚĆ [p/m ²]	[%]	GATUNEK	UWAGI
Hajek 2006	SIP	Zdjęcia IKONOS o rozdzielczości 1m	-	90	Kl	opis metody
				90	Św	
				75	Md	
				75	Brz	
Koch i in. 2006	ZDJĘCIA W BARWACH RGB	LIDAR	0,5	80	liściaste	86% liść. dobrze zaklasyfikowano do klas wiekowych
				64	iglaste	
Mei i in. 2004	TEREN	Zdjęcia HRI rozdzielczość 1m i dane LIDAR-owe	-	90	plantacja brzoza	
				71	sad drzew oliwnych	
Oerka i in. 2007	TEREN	LIDAR (<i>intensity</i>)	5	74,1	wszystkie gatunki	
				87,2	Świerk	
				64,3	brzoza	
				23,8	osika	
Persson i in. 2003	TEREN	LIDAR	15	95	klasyfikacja liniowa	
				94	klasyfikacja drugiego stopnia	
Persson i in. 2004	TEREN	LIDAR i zdjęcia (DMC)	7	94	So	
				81	Św	
				94	liściaste	
Reitberger i in. 2006b	TEREN	LIDAR FULL WAVEFORM	25	82	liściaste	
				80	iglaste	
Waser i in. 2006	TEREN	LIDAR i CIR-ortofoto	0,5	98	rozdzielenie na gatunki liściaste i iglaste	
				95	So	
				95	Św	
Weinacker i in. 2004	TEREN	LIDAR	-	64	iglaste	
				80	liściaste	
		LIDAR i zdjęcia wielospektralne		69	iglaste	
				80	liściaste	

Poniżej przedstawiono wyniki prac szwedzkiego zespołu pod kierownictwem Perssona (Persson i in. 2006), który określił gatunek drzew na podstawie danych LIDAR-owych (50 punktów/ m²) i obrazów z kamery cyfrowej (rozdzielczość obrazów panchromatycznych – 0,1 m, wielospektralnych – 0,6 m) (opis).

Tab. I.12 Procent poprawnie sklasyfikowanych drzew (14 powierzchni próbnych, 1721 drzew) (DMC – Digital Mapping Camera); gęstość skanowania wyniosła 50 p/m² (Persson i in. 2006).

Data source	Pine	Spruce	Deciduous	All trees
Laser	87.6%	88.7%	84.7%	87.3%
DMC _{autumn}	87.3%	92.1%	93.3%	90.9%
DMC _{summer}	83.3%	79.5%	88.8%	83.2%
Laser, DMC _{autumn}	94.5%	94.9%	96.1%	95.1%
Laser, DMC _{summer}	91.3%	93.9%	93.3%	92.9%

Przedstawione poniżej wyniki klasyfikacji i segmentacji uzyskane w wyniku obiektowej metody segmentacji obrazów rastrowych uzyskane zostały w Austrii (Tiede i in. 2006b).

Tab. I.13 Dokładność uzyskanych wyników dla 20 losowo wybranych powierzchni; gęstość skanowania wyniosła 10 p/m² (Tiede i in. 2006b).

	Coniferous	Deciduous	Dead trees	Overall
# of manually digitized dominant trees	847	302	138	1287
# of automatically classified dominant trees (point in polygon)	730	132	109	971
% of automatically classified dominant trees (point in polygon)	~ 86%	~ 44%	~ 79%	~ 75%
# of misclassified but detected trees	148	15	29	192
# of false positives	139	59	4	202
% of false positives	~ 16%	~ 19.5%	~ 3%	~ 16%

Wysoką skuteczność uzyskano również przy pomocy klasyfikacji wykorzystującej informację o intensywności i relacjach przestrzennych pomiędzy grupami punktów wchodzącymi w skład numerycznego modelu terenu, numerycznego modelu powierzchni koron oraz punktów pochodzących z obszaru pomiędzy tymi płaszczyznami (Holmgren,

Persson 2004b). Klasyfikacja poprzedzona została segmentacją, która szczególnie dla sosny i świerka wykazała dużą skuteczność, odpowiednio 84 i 75%.

Tab. I.14 Porównanie wyników klasyfikacji z wykorzystaniem funkcji liniowej i kwadratowej.

Powierzchnie próbne o numerach: 7-12 to powierzchnie ze Św jako gatunkiem głównym; 1, 3, 6 – to powierzchnie z udziałem So powyżej 90%; 2, 4, 5 – to powierzchnie z drzewostanami mieszanymi; gęstość skanowania wyniosła 1,2 p/m² (Holmgren, Persson 2004b).

Field plot	Linear classification accuracy (%)	Quadratic classification accuracy (%)
1	89	85
2	78	78
3	93	93
4	95	95
5	98	95
6	100	96
7	100	100
8	100	97
9	92	88
10	99	99
11	89	95
12	95	93
All	95	94

Określenie przyrostu drzewostanu w jednostce czasu

Przyrost drzewostanu wyrażany jest najczęściej określeniem różnicy w wysokości pomiędzy dwoma pomiarami wykonanymi w założonym odstępie czasu (Wulder i in. 2007). Pozyskiwane jednocześnie dane terenowe mają raczej za zadanie sprawdzenie dokładności uzyskanych wartości szacowanych z danych LIDAR-owych.

Tab. I.15 Porównanie wyników określania przyrostu drzewostanu.

przyrost = wartość w roku n - wartość w roku n+X [m] (X – odstęp czasu między kolejnymi inwentaryzacjami).

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	GĘS-TOŚĆ [p/m ²]	PRZYROST [m]	UWAGI
Gobbaken i in. 2004	TEREN	1	1,11	młody drzewostan iglasty
			0,22	dojrzały drzewostan iglasty
Yu i in. 2004b	TEREN	4-5	0,28	So, okres 2 lat
			0,25	Św, okres 2 lat

Lokalizacja partii drzewostanów o budowie piętrowej

W celu określenia budowy przestrzennej drzewostanu posłużono się algorytmem HisMod (Maltamo in. 2004b). Efekty wykorzystania algorytmu okazały się bardzo dobre i pozwoliły na automatyczne rozróżnienie kilkudziesięciu obiektów w zależności od ich struktury pionowej. Na 28 powierzchni próbnych, algorytm 24 zakwalifikował poprawnie budowę przestrzenną, jako jedno- lub dwu warstwową.

Parametry koron drzew

Tab. I.16 Porównanie wyników określania średnicy korony (*) i powierzchni korony (**). Różnica średnicy = (pomiar terenowy - dane LIDAR-owe)

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	GEŚTOŚĆ [p/m ²]	RÓŻNICA ŚREDNICY [*m]; [**m ²]	R ²	UWAGI
Heurich i in. 2004a	TEREN	10	0,22*	0,31	drzewostan iglasty
			-0,21*	0,28	drzewostan liściasty
Weinacker i in. 2004	TEREN	-	2,8**		Dg

Określanie parametrów korony możemy przeprowadzić biorąc jako odniesienie płaszczyznę pionową lub poziomą. Do poziomych parametrów należą:

- Powierzchnia korony
- Minimalna odległość od centroidy do granicy
- Maksymalna odległość od centroidy do granicy
- Średnica (maksymalna i minimalna) korony
- Powierzchnia warstwy koron

Do pionowych parametrów korony należą:

- Wysokość korony
- Wysokość podstawy korony

Method	r^2	Standard error	Significance level, p
Tree height (m)			
Lidar	0.88	1.80	<0.001
Crown area (m²)			
Lidar	0.46	11.02	<0.001
NIR	0.26	12.55	<0.001
Red	0.24	13.09	<0.05
Green	0.01	14.38	ns
Minimum distance from centroid to boundary (m)			
Lidar	0.16	0.80	ns
NIR	0.05	0.80	ns
Red	0.19	0.81	<0.01
Green	0.21	0.73	<0.01
Maximum distance from centroid to boundary (m)			
Lidar	0.43	0.84	<0.001
NIR	0.09	1.05	ns
Red	0.16	1.01	ns
Green	0.00	1.10	ns

Note: ns, not significant.

Ryc. I.8 Statystyczne relacje pomiędzy parametrami terenowymi, a wynikami opracowań danych LIDAR-owych i wielospektralnych zdjęć lotniczych (Coops i in. 2004).

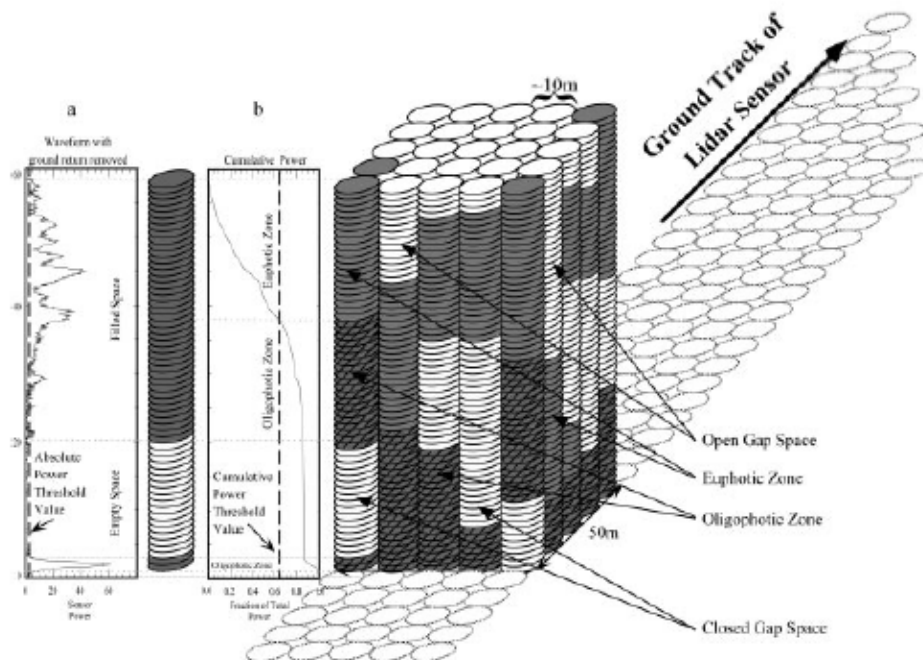
Coops wraz z zespołem (Coops i in. 2004) wykorzystując dane LIDAR-owe i zdjęcia wielospektralne uzyskał, dla tych pierwszych, dane opisujące parametry poziome koron drzew. (Ryc. 8). Jak widać z wyników dane LIDAR-owe w porównaniu za zdjęciami lotniczymi dostarczają dokładniejszej informacji na temat kształtu i powierzchni korony.

Warto zwrócić uwagę, iż niektóre kanały zdjęć lotniczych charakteryzowały się różną dokładnością, a co za tym idzie przydatnością w estymacji parametrów korony. Jak podają autorzy znaleziono bardzo silną korelację między wysokością korony pomierzoną w terenie, a jej estymacją z danych LIDAR-owych ($R^2=0,78$ – dla średniej wysokości grupy punktów tworzącej koronę, $R^2=0,88$ – dla wartości maksymalnej odbitego sygnału z grupy punktów tworzącej koronę w oparciu o algorytm TIDA (*Tree Identification and Delineation Algorithm*)).

Biomasa drzewostanu

Ważnym pojęciem związanym z szacowaniem biomasy jest **voxel** (Chasmer i in. 2004, Lefsky i in. 2002).

VOXEL – jest przestrzenią charakteryzującą strukturę drzewostanu w oparciu o ilość punktów zarejestrowanych przez skaner laserowy, a powstałych w wyniku natrafienia przez promień laserowy na wegetację.



Ryc. I.9 Pokazanie przestrzeni (drzewostanu dąglowego) w postaci voxeli. *Open Gap Space* – puste przestrzenie; *Euphotic Zone* – warstwa liści odbijająca nawet do 65% energii sygnału; *Oligophotic Zone* – drewno lub liście odbijające około 35% mocy sygnału; *Closed Gap Space* – przestrzenie bezlistne lub złożone z samego drewna; a – proces oczyszczania i klasyfikacji odbić; b – wykres kumulacji mocy sygnału promienia laserowego (Lefsky i in. 2002).

Estymacja biomasy nadziemnej części drzew daje lepsze rezultaty niż określanie miąższości pni drzew (Naesset 2004b). Wynika to z tego, iż rozkład przestrzenny punktów oraz wzajemne relacje między poszczególnymi rodzajami odbić (np.: ostatnim, pierwszym, jedynym) dają bardziej obiektywne dane niż estymacja masy pni w oparciu o relacje między parametrami korony, a pierścicowym polem przekroju.

Tab. I.17 Porównanie wyników określania biomasy.

$$\text{biomasa} = (\text{dane referencyjne} - \text{dane LIDAR-owe} / \text{dane referencyjne}) \times 100 [\%]$$

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	GĘS-TOŚĆ [p/m ²]	BIOMASA [%]	R ²	UWAGI
Naesset 2004b	TEREN	1,1	-	0,92	drzewostan iglasty, masa nadziemna
			-	0,86	drzewostan iglasty, masa podziemna
Wack 2006	TEREN	1	RMS=14	0,96	wszystkie powierzchnie
			RMS=14	0,96	iglaste
			RMS=4	0,99	>50% liściastych

Defoliacja, stan zdrowotny, luki

W celu określenia kondycji drzewostanu wykorzystuje się przede wszystkim kombinacje kilku technik teledetekcyjnych. Wynika to z tego, iż dotychczas używane skanery laserowe (oprócz *full waveform*) nie posiadały możliwości zapisania w sygnale odbitym charakterystyki obiektu, od którego się odbiły. Były one „ślepe” i nie mogły być jedynym nośnikiem informacji na temat zdrowotności drzewostanu. Ich głównym celem było określanie biomasy i struktury przestrzennej (Lefsky i in. 2002, Solberg i in. 2004b). Wartość danych LIDAR-owych przy tego typu estymacjach jest bardzo wysoka przede wszystkim dlatego, że nie posiadają cieni, w odróżnieniu od zdjęć lotniczych czy satelitarnych. Szkody wyznaczono przez określanie pośrednich cech możliwych do uchwycenia LIDAR-em. Informacje takie jak współczynnik LAI, dynamika pojawiania się luk w drzewostanie czy gęstość listowia mogą być informacjami mówiącymi o kondycji drzew (-ostanu) i za ich pomocą możliwe jest wychwycenie zmian zdrowotnych czy gradacyjnych. Na podstawie rozkładu punktów w przestrzeni możliwe jest określenie martwych drzew (Blaschke i in. 2004), których to śmierć mogła być spowodowana działaniem patogenów.

Badanie defoliacji czy odbarwień odbywa się na podstawie różnego rodzaju zdjęć cyfrowych, których rozdzielczość zależała od rodzaju i powierzchni badań. Szczególnie przydatne okazały się tu wielospektralne zdjęcia lotnicze, które miały możliwość zapisu poszczególnych zjawisk w wielu kanałach ułatwiających późniejsze analizy. Informacja barwna zawarta w zdjęciach jest niezbędna do określania defoliacji. Dopiero połączenie danych LIDAR-owych ze zdjęciami dopiero daje możliwości do określenia prawdziwego i pełnego obrazu zdrowotności i struktury lasu.

Zwarcie, pokrycie powierzchni

Z ekologicznego punktu widzenia zwarcie i procent pokrycia terenu przez gatunki drzewiaste są istotnymi charakterystykami wykorzystywanymi do szacowania zaabsorbowanej masy dwutlenku węgla (CO₂) przez roślinność. Istotne jest to przede wszystkim w dobie globalnego ocieplenia i grożących nam z tego powodu zmian klimatu. Wiele państw zobowiązanych zostało podczas konferencji w Kioto, w 1997 roku, do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Z ich punktu widzenia poznanie dokładnej powierzchni zajmowanej przez poszczególne typy roślinności ma znaczenia strategiczne dla dalszego rozwoju i prawidłowego zarządzania energią, oraz do przeciwdziałania emisji nadmiernych ilości dwutlenku węgla.

Z gospodarczego, leśnego punktu widzenia parametry te charakteryzują drzewostan, są również czynnikami współdecydującymi o tym czy dane zbiorowisko roślinne może być uznane za las, czy też nie.

Jak wiadomo, wiele jest definicji lasu, w związku z czym trudno jest jednoznacznie określić, jaka jest lesistość Europy. To, co uznawane jest już za las w krajach Europy Zachodniej, w Polsce może być zadrzewieniem. Z ogólnych przesłanek można spodziewać się, iż lesistość Polski może być z tego powodu wyższa o około 1-2%, co podniosłoby ją do poziomu średniej europejskiej.

Zwarcie jest określeniem formy wzrostu i relacji między sąsiadującymi drzewami. Jest jedną z wielu charakterystyk określanych w trakcie okresowych inwentaryzacji lasu. Jest to jednak bardzo subiektywna ocena, zależna od doświadczenia taksatora. Może w przyszłości udałoby się automatycznie określić zwarcie w oparciu o sumę powierzchni bezdrzewnych występujących w drzewostanie. Pierwsze kroki poczyniono już w tej dziedzinie przez automatyczną lokalizację luk i wolnych miejsc powstałych po wycięciu drzew (Nuske 2006; St-Onge i in. 2004, Yu i in. 2004b).

Prawidłowe określenie pokrycia powierzchni terenu przez roślinność drzewiastą ważne jest również do stworzenia prawidłowej globalnej mapy pokrycia Ziemi przez różne rodzaje zbiorowisk roślinnych (Sato, Teteishi 2004). Wszystkie ustanowione klasyfikacje wymagają procentowego pokrycia, jako jednej z cech opisujących konkretne zbiorowisko roślinne.

Określanie czynnika LAI

Wielkość LAI (*Leaf Area Index*) wyraża zarówno gęstość roślin, jak i ich geometrię oraz przybiera charakterystyczne dla danej fazy rozwojowej roślin wartości. Może ona być określana w terenie zarówno bezpośrednio jak i pośrednio (Morsdorf i in. 2005). Jego określanie polega przede wszystkim na znalezieniu korelacji między parametrem wyznaczonym z danych LIDAR-owych, a współczynnikiem LAI określonym w terenie. Dokładność badań terenowych uzależniona jest od wielu czynników. W związku z tym jest tak na prawdę duża ilość parametrów, których sumaryczny błąd wyznaczenia ma duży wpływ na końcowe efekty poszukiwanego równania regresji, a co za tym idzie ostatecznej wartości wielkości LAI.

Tab. I.18 Porównanie wyników określania współczynnika LAI.

liczba drzew = (dane referencyjne - dane LIDAR-owe/dane referencyjne)×100 [%]

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	LAI [%]	R ²	UWAGI
Bariolotti i in. 2006	TEREN	-	0,61	gęstość 1p/100m ²
		-	0,89	gęstość 2p/1m ²
Morsdorf i in. 2005	ZDJĘCIA HEMISFERYCZNE	-	0,61	gęstość 10p/1m ² , powierzchnia o średnicy 30m
Solberg i in. 2004b	TEREN		0,95	piksel 10×10m, wykorzystanie modeli opis (4.11)

Określanie granic wydzielen

Tab. I.19 Porównanie wyników określania przebiegu granicy.

Przebieg granicy = (dane referencyjne - dane LIDAR-owe/dane referencyjne)×100 [%]

AUTOR	DANE REFERENCYJNE	PRZEBIEG GRANICY [%]	UWAGI
Koch i in. 2006	SIP (FOGIS)	50-53	Metoda automatyczna
		67-73	Metoda automatyczna i klasyfikacja nadzorowana
		>86	Metoda automatyczna i klasyfikacja nadzorowana i edycja manualna brakujących linii

3.4 Możliwości integracji skaningu lotniczego ze zdjęciami cyfrowymi

W tym miejscu warto zastanowić się nad znaczeniem słowa integracja. W tym konkretnym przypadku oznacza ono łączenie ze sobą materiałów pochodzących ze zdjęć lotniczych lub satelitarnych z danymi LIDAR-owymi. Znaczenie tego słowa w geomatyce jest jednak szersze. Ponieważ nie jest to przedmiotem poniższego opracowania, dociekliwych odsyłam do lektury opracowania wykonanego przez profesora Jerzego Mozgawę (Mozgawa 2006)

Główną płaszczyzną wykorzystania danych LIDAR-owych i zdjęć cyfrowych jest proces automatycznego określania ilości drzew (wierzchołków, koron) na jednostkę powierzchni. Wysokie rozdzielczości i możliwość zapisu wielu kanałów spektralnych, oraz duża dostępność zobrażeń cyfrowych powoduje uzyskiwanie coraz dokładniejszych

wyników prowadzonych badań między innymi w określaniu zasięgu koron pojedynczych drzew (Mei, Durrieu 2004). Dzięki pozyskaniu danych rastrowych równocześnie ze skanowaniem laserowym obniża się cena ich pozyskania. Literatura dotycząca segmentacji wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych lub satelitarnych jest obszerna. Prac dotyczących tego tematu ukazało się już wiele (Bohlin i in. 2006; Kok, Wężyk 2006; Leckie i in. 2003; Mei, Durrieu 2004; Olofsson Hagner 2006; Persson i in. 2004; Tucek Majlingova 2006). Poniżej przedstawiono kilka z nich, szczególnie zwracając uwagę na te, które skupiają się głównie na wykorzystaniu wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych.

Wysokorozdzielcze zdjęcia lotnicze (ortofoto) w zakresie NIR wykorzystano do określenia ilości drzew na jednostkę powierzchni (Tucek Majlingova 2006). Wielkości piksela wynosiła odpowiednio 0,4 m; 0,8 m; 1,6 m; i 3,2 m. Jako dane referencyjne wykorzystano wyniki ręcznej wektoryzacji koron drzew widocznych na stereoskopowych parach zdjęć. Segmentację wykonano w środowisku oprogramowania Idrisi 32. W metodzie najpierw wyszukiwano wierzchołki drzew, a następnie w oparciu o nie budowano koronę wykorzystując moduł przydziału pikseli (*ALLOCATE module*). Następnie porównano wyniki estymacji w zależności od rozdzielczości zastosowanego obrazu. Wyniki w zależności od wielkości oczka rastra obrazuje tabela I.20.

Tab. I.20 Wyniki automatycznego określania liczby drzew w porównaniu do opracowań par stereoskopowych (Tucek Majlingova 2006).

Spatial resolution of image	Number of identified crowns	Difference against Image Station vector layer (929 crowns)
0.4 m	4166	+3237
0.8 m	1723	+794
1.6 m	939	+10
3.2 m	464	-465

Oszacowanie liczby drzew na podstawie zdjęć DMC (*Digital Mapping Camera*) o rozdzielczości 30 i 48 cm, przy wykorzystaniu metody bazującej na modelach 3D okazało się być metodą o wysokiej skuteczności (Bohlin i in. 2006). Użyte modele przestrzenne przetransformowano na obraz płaski uwzględniając różne kąty patrzenia i zmienne naświetlenie obiektów. Skuteczność wynosiła 89% przez co rozumieć należy, że drzewa prawidłowo przydzielone zostały do rodzaju: liściaste, świerk i sosna (dokładne wyniki w tabeli poniżej).

Tab. I.21 Efektywność klasyfikacji przy krzyżowym łączeniu kanałów dla dwóch terminów pozyskania zdjęć w 2003 roku (rozdzielczość 30 cm) i 2005 roku (rozdzielczość 48 cm) (Bohlin i in. 2006).

Bands used			Overall accuracy % (and kappa value)	
Green	Red	NIR	October 2003 3000 m altitude	June 2005 4800 m altitude
X	X	X	88.7 (0.82)	87.6 (0.80)
X	X		83.6 (0.74)	83.5 (0.74)
X		X	61.3 (0.43)	85.9 (0.78)
	X	X	83.6 (0.75)	69.4 (0.52)

Persson wraz z zespołem (Persson i in. 2004) wykorzystał zdjęcia w kanale podczerwieni (NIR) o rozdzielczości 0,6 m do klasyfikacji wcześniej określonych (zamkniętych) segmentów. W procesie segmentacji wykorzystano dane LIDAR-owe. Poniżej przedstawiono wyniki, które pokazują dużą efektywność zastosowanej metody w oparciu o fuzję obu typów danych.

Tab. I.22 Struktura błędów w klasyfikacji gatunku drzew (Persson i in. 2004).

	Field registered tree species group		
	Scots pine	Norway spruce	Deciduous
Scots pine	222	30	8
Norway spruce	13	171	6
Deciduous	2	10	212
Total number	237	211	226
Number correct	222	171	212
Proportion	0.94	0.81	0.94
Overall accuracy = $(222 + 171 + 212) / 674 = 90\%$			

Podobne wyniki w estymacji ilości koron na jednostkę powierzchni uzyskano w oparciu o obrazy z kamery cyfrowej DFC (*Digital Frame Camera*) o rozdzielczości 8.5 cm. (Leckie i in. 2003). W procesie segmentacji wykorzystano przetransformowane, ortorektyfikowane obrazy w kanale zielonym o rozdzielczości terenowej 0,5 m. oraz wysokościowy model koron pozyskany z LIDAR-a. Dane najpierw poddano wygładzeniu filtrem (3×3), następnie wydzielono segmenty poniżej 7m², gdyż ich powierzchnia była poniżej najmniejszej oczekiwanej powierzchni korony. Z danych LIDAR-owych usunięto obszary znajdując się poniżej 2 m nad gruntem. W segmentacji wykorzystano algorytm wyszukujący doliny (*valley following algoryth*), w oparciu o jasność pikseli, będących obniżeniami pomiędzy wierzchołkami koron. Autor dodatkowo określił wysokość drzewostanu wykorzystując osobno dane z kamery i skaningu laserowego. Jak można było się

spodziewać wysokościowy model koron okazał się być lepszym materiałem do określania wysokości drzewostanu. Poniższa tabela obrazuje rezultaty badań uzyskane w różnych warunkach.

Tab. I.23 Porównanie średniej wysokości i ilości drzew na hektar z wynikami estymacji przy wykorzystaniu zobrażeń z kamery cyfrowej (Leckie i in. 2003).

Plot no.	Feature	Ground data	DFC imagery
19	Density (stems/ha)	300	375
19	Height (m)	26.2	23.5
20	Density (stems/ha)	500	525
20	Height (m)	25.2	23.5
18	Density (stems/ha)	725	750
18	Height (m)	24.4	23.3
Total ^a	Density (stems/ha)	508	550
Total ^a	Height (m)	25.0	23.5

^aTotal over all three plots.

Kolejnym ważnym miejscem gdzie fuzja obu typów danych będzie miała coraz większe znaczenie jest określanie wysokości drzewostanu na podstawie numerycznego modelu terenu pozyskanego z LIDAR-a i numerycznego modelu powierzchni terenu pozyskanego ze stereogramów (St-Onge i in. 2006). Przede wszystkim NMT uzyskiwany w wyniku lotniczego skaningu laserowego osiąga bardzo dobre rezultaty nieosiągalne na razie przez inne urządzenia. Za to pomiary stereoskopowe koron drzew na zdjęciach cyfrowych często osiągają podobne rezultaty do wyników szacunków LIDAR-owych Są jednak o wiele tańsze. Wynika stąd, że raz pozyskany numeryczny model terenu może być uważany za referencyjny przez długi czas, a w celu określania wysokości drzewostanu można pozyskiwać w kolejnych latach tańsze lotnicze lub satelitarne pary zdjęć stereoskopowych.

Takie zastosowanie obu technik otwiera również nowe możliwości (St-Onge i in. 2005). Oczywistym jest, że ukształtowanie terenu nie zmienia się szybko w czasie, szczególnie na terenach leśnych. Stąd możliwe są analizy z wykorzystaniem już istniejących archiwalnych zdjęć. Wykorzystuje się je w badaniu przyrostu, rozkładu wysokości na powierzchni i badaniu dynamiki pojawiania się luk.

Inna metoda uzyskania wysokości z połączenia danych LIDAR-owych i wysokorozdzielczych zdjęć, o pokryciu 90% z kamery UltracamD daje nawet wyższe dokładności niż zastosowana para zdjęć stereoskopowych (Ofner i in. 2006). Autorzy oparli swoje analizy o tak zwane bloki 5 zdjęć, o pokryciu podłużnym 90%, które pokrywały ten sam obszar co tradycyjna para stereoskopowa (60%). Wysoka rozdzielczość (15 cm dla zdjęć

w kanale panchromatycznym) umożliwia dokładne określanie występujących uszkodzeń i określania ich zasięgu. Oprócz wysokiej rozdzielczości obrazy o pokryciu 90% dają lepsze wejrzenie w głąb warstwy koron i szczególnie poprawiają rezultaty prac w drzewostanach o skomplikowanej budowie wewnętrznej i różnorodnym składzie gatunkowym.

Sensor	Band	Height model 1 (n=28)		Height model 2 (n=438)	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
LiDAR		0.98	0.83		
LANDSAT ETM+					
Band 1	Blue	0.65	0.42	0.71	0.70
Band 2	Green	0.84	0.28	0.87	0.48
Band 3	Red	0.86	0.26	0.84	0.52
Band 4	NIR	0.60	0.45	0.46	0.98
Band 5	SWIR	0.80	0.33	0.85	0.50
Band 7	SWIR	0.80	0.32	0.80	0.60
IKONOS					
Band 1	Blue	0.75	0.35	0.81	0.56
Band 2	Green	0.85	0.27	0.84	0.53
Band 3	Red	0.82	0.30	0.86	0.49
Band 4	NIR	0.45	0.53	0.30	1.09

Ryc. I.10 Podsumowanie modeli regresji do określenia wysokości drzewostanu z wykorzystaniem LIDAR-a i zdjęć satelitarnych (Watt i in. 2004).

model 1 – Porównanie wyników określania wysokości pomiędzy danymi z pomiarów naziemnych i zdjęć satelitarnych.

model 2 - Porównanie wyników określania wysokości pomiędzy danymi z pomiarów naziemnych i zdjęć satelitarnych uzupełnionych o dane z LIDAR-a.

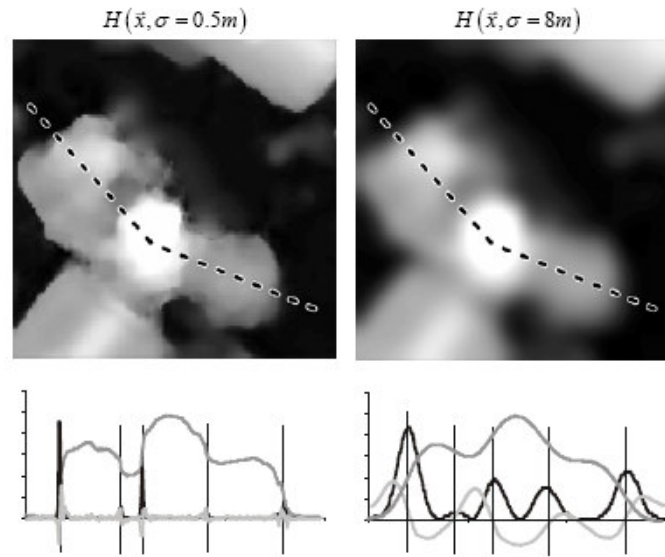
Powyższa tabela (Ryc. 10) prezentuje efekty doświadczeń, które miały na celu wyszukanie kanałów najbardziej skorelowanych z wynikami prac terenowych i pokazać pozytywny wpływ danych LIDAR-owych na poprawę uzyskanych estymacji. Włączenie danych o wysokościach uzyskanych LIDAR-em rozszerzyło zakres wartości wysokości, do którego został dopasowany statystyczny model oraz spowodowały, że dodatkowa ilość powierzchni próbnych dała większą pewność, iż empiryczny model statystyczny daje wiarygodne szacunki wysokości drzewostanu (Watt i in. 2004). Jest to dowodem, że przy obecnych rozdzielczościach wykorzystanie zdjęć satelitarnych (IKONOS i Landsat ETM+) wydaje się wysoce ekonomicznie uzasadnione. Na pewno zdjęcia nie dają tak bogatej informacji jak LIDAR, ale w warunkach niedoboru środków lub sytuacji klęskowej, możliwe jest uzyskanie za ich pomocą części informacji (np.: o wysokości czy wystąpieniu luk), jak pokazują powyższe wyniki, z podobną dokładnością jak wyniki opracowań LIDAR-owych.

Większość istniejących systemów LIDAR-owych (poza skanerami *full waveform*) nie ma możliwości zapisu żadnej informacji o rodzaju obiektu od którego promień laserowy został odbity. Krótko mówiąc wiązka laserowa „nie widzi” czy odbiła się od martwego czy żywego drzewa. Informację tę przechowują wielospektralne obrazy, szczególnie kanały NIR i

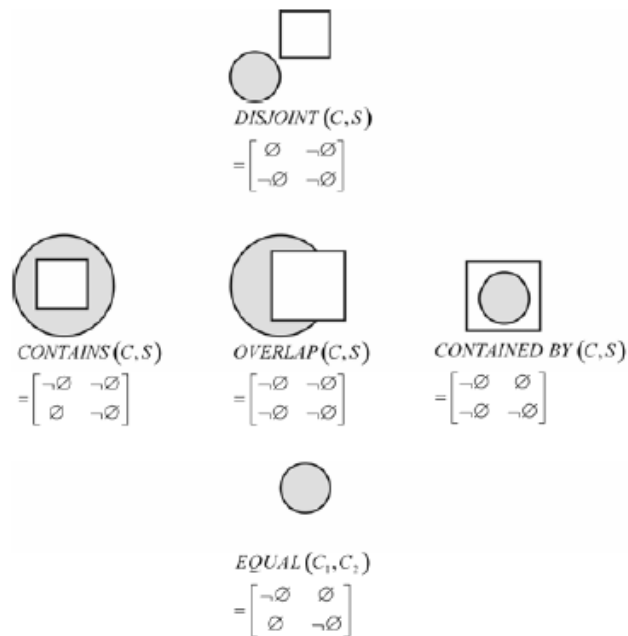
SWIR (*Short-Wavelength InfraRed*). Połączenie danych LIDAR-owych ze zdjęciami powoduje uzyskanie wiarygodnej informacji o stanie zdrowotnym lasu (Lefsky i in. 2002; Stone, Coops 2004). Informacje barwne ze zdjęć oraz informacje 3D o strukturze drzewostanu i oszacowanie czynnika LAI z LIDAR-a dają pełny zakres informacji o kondycji drzewostanu.

Zdjęcia w kanale podczerwieni w połączeniu z danymi LIDAR-owymi znalazły zastosowanie również w klasyfikacji roślinności terenów bagiennych (Waser i in. 2006). Idea taksacji w ten sposób powstała z powodu niedostępności tego środowiska w okresie wegetacji oraz pozyskania niewystarczających informacji w okresie spoczynku wegetacyjnego. Na podstawie danych pozyskanych technikami teledetekcyjnymi zbudowano model klasyfikujący, z określonym prawdopodobieństwem, poszczególne piksele do określonego rodzaju roślinności. Na podstawie klasyfikacji określono udział poszczególnych typów wegetacji w ogólnej powierzchni bagien. Sprawność metody okazała się być wysoka, a współczynnik determinacji z danymi terenowymi osiągnął wartość $R^2=0,87$. Najlepsze wyniki uzyskano w klasyfikacji grup drzew i pojedynczych drzew znajdujących się na granicy drzewostanu. W określaniu gatunków, model wykazał wysoką skuteczność dla sosny, uzyskując dokładność 95%. Zdaniem autorów niezbędne jest w klasyfikacji rodzajów drzew oraz zasięgu krzewów posiadanie materiałów cyfrowych o rozdzielczości co najmniej 0,5 m. Gdy wymagany materiał jest dostępny należy spodziewać się wiarygodnych i dokładnych wyników.

Koncepcja klasyfikacji topologicznych relacji między koronami drzew na różnych rodzajach danych była podstawą w określaniu lokalizacji wierzchołków w jednej z metod automatycznego wykrywania drzew (Straub, Heipke 2004). Podstawą metody jest założenie, że możliwe jest wykrycie przypuszczalnego kształtu korony pojedynczego drzewa wykorzystując sferę lub elipsoidę. Założenie to sprawdza się gdy szczegółowy kształt zostanie pominięty, a tylko uogólniony kształt ujawnia się na właściwym poziomie w wieloskalowym modelu powierzchni. Z racji tego, że nieznana jest skala, proces wymaga wielu testów na poszczególnych poziomach i wybrania najlepszego pasującego do danej korony drzewa.



Ryc. I.11 Reprezentacja powierzchni modelu $H(x)$ w dwóch różnych skalach. Profil wysokościowy poniżej zdjęć zmierzony został wzdłuż przerywanej linii (Straub, Heipke 2004).



Ryc. I.12 Pięć różnych relacji topologicznych pomiędzy dwoma regionami i powiązane z nimi cztery przecięcia (Straub, Heipke 2004).

Autorzy proponują podaną metodę do wykorzystania w pracy z danymi cyfrowymi 2D.

Wnioski

1. Najlepszymi materiałami mającymi bardzo szerokie zastosowania w wielu badaniach dotyczących struktury drzewostanu mają materiały cyfrowe o rozdzielczości terenowej 0,5m.
2. Dane LIDAR-owe mogą być wykorzystywane jako referencyjne do określenia NMT, wykorzystanego w pomiarach drzew i w prognozowaniu w oparciu o zobrażenia satelitarne takie jak: IKONOS i Landsat ETM+ ([Watt i in. 2004](#)).
3. Fuzja wielu typów danych poprawia wiarygodność dokładności estymacji wybranych parametrów drzewostanu.
4. Fuzja różnych typów danych, a także jednoczesne ich pozyskiwanie obniża całkowity koszt prac.
5. Stale zwiększa się rozdzielczość oraz dostępność materiałów lotniczych i satelitarnych, dzięki czemu zwiększają się możliwości ich zastosowania i poprawia jakość wyników badań, w których są one wykorzystywane.
6. Należy spodziewać się większego wykorzystania numerycznego modelu terenu pozyskanego ze skaningu lotniczego w opracowaniach z wykorzystaniem stereoskopowych par zdjęć z poziomu lotniczego i satelitarnego.

3.5 Metody i algorytmy wykorzystywane przy określaniu parametrów drzewostanu

Opis problematyki filtracji danych i zasady działania algorytmów.

Rozmiar danych dostarczanych z laserowego skaningu lotniczego jest ogromny i osiąga nierzadko rozmiary przekraczające gigabajty przestrzeni dyskowej. Do uporządkowania tak wielkiej liczby punktów potrzebny jest z jednej strony komputer o dużej mocy obliczeniowej, z drugiej, wydajny program, a dokładniej algorytm, który analizuje zbiór danych. Algorytm zbudowany jest z różnych elementów. Jeśli przykładowym zadaniem byłoby np.: stworzenie numerycznego modelu terenu, musielibyśmy rozpatrzyć elementy składowe tej operacji. W celu zrozumienia lub przewidzenia zachowania i wyników działania algorytmów oraz sposobu w jaki poszczególne filtry są połączone należy zapoznać się z następującymi, wymienionymi poniżej zagadnieniami ([Sithole, Vosselman 2003](#)):

1. STRUKTURA DANYCH PODDAWANYCH FILTRACJI

Niektóre algorytmy pracują na surowych danych punktowych. Jednak w celu wykorzystania narzędzi pracujących na obrazie rastrowym, część algorytmów pobiera pewną ilość próbek z chmury punktów w obraz rastrowy przed rozpoczęciem filtrowania.

2. TESTOWANIE SĄSIEDZTWA I LICZBA PUNKTÓW FILTROWANYCH JEDNOCZEŚNIE.

Filtry zawsze operują na sąsiedztwie. Generalnie operacja ta może być przeprowadzona na trzy sposoby:

- Relacja: **Punkt do Punktu** – w tego typu algorytmach dwa punkty porównywane są w jednym czasie. Funkcja dyskryminacyjna bazuje na pozycji. Jeśli wynik działania funkcji znajdzie się powyżej wyznaczonego progu wtedy jeden z punktów przypuszczalnie należy do obiektu. W jednostce czasu tylko jeden punkt jest klasyfikowany.
- Relacja: **Punkt do Punktów** – w tych algorytmach są analizowane punkty będące sąsiadami interesującego nas punktu. Na podstawie wyniku funkcji dyskryminacyjnej punkt ten może zostać sklasyfikowany. W jednostce czasu tylko jeden punkt jest poddany klasyfikacji.
- Relacja: **Punktu do Punktów** – w tych algorytmach wiele punktów jest wykorzystanych do rozwiązania funkcji dyskryminacyjnej. Wiele punktów poddanych jest klasyfikacji w jednostce czasu.

3. POMIAR NIECIĄGŁOŚCI

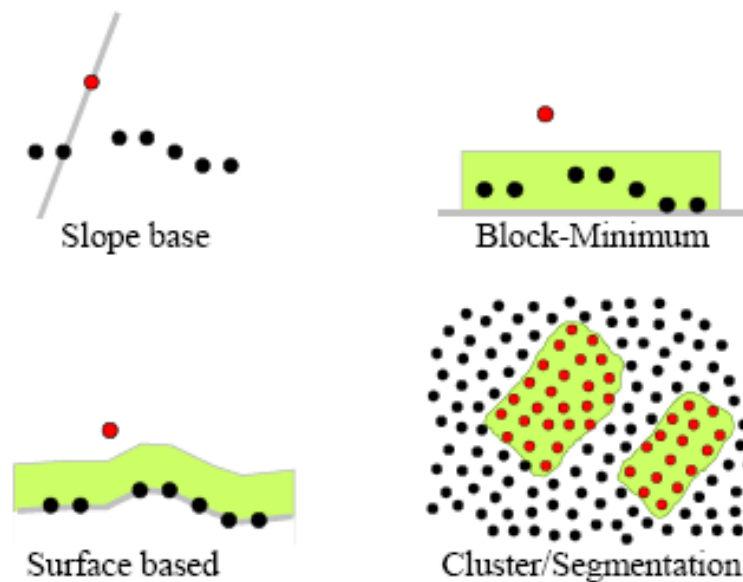
Wiele algorytmów w klasyfikacji bazuje na pomiarze nieciągłości. Polega to na określaniu: różnicy wysokości, spadku, pomiarze najkrótszej odległości do powierzchni TIN i najkrótszej odległości do innej zdefiniowanej powierzchni.

4. KONCEPCJA FILTRACJI

Algorytmy wstępnie estymują położenie powierzchni Ziemi w chmurze sąsiadujących punktów. Określa to koncepcja filtracji:

- Koncepcja bazująca na **wielkości spadku** (pochyłości) (*Slope based*). W tych algorytmach mierzona jest różnica wysokości lub wielkość skarpy (spadku) pomiędzy dwoma punktami. Jeśli poszukiwana wielkość przekracza założony próg to wyższy punkt sklasyfikowany zostaje jako obiekt.
- Koncepcja **zablokowanego minimum** (*block-minimum*) – tu funkcją dyskryminacyjną jest równia pozioma z ułożoną ponad nią strefą buforową. Płaszczyzna pozioma lokalizuje bufor, a strefa buforowa definiuje przestrzeń 3D, gdzie oczekuje się, że punkty powierzchni gruntu się znajdują.

- Koncepcja bazująca na **powierzchni** (*Surface base*) – funkcją dyskryminacyjną jest określona powierzchnia ze zdefiniowanym buforem. Powstała w oparciu o punkty płaszczyzna lokalizuje bufor, a strefa buforowa definiuje przestrzeń 3D, gdzie oczekuje się, że punkty powierzchni gruntu się znajdują.
- Koncepcja bazująca na **segmentacji grup punktów** (*Clustering segmentation*) - idea takich algorytmów polega na tym, że każdy punkt, który jest składnikiem grupy należy do obiektu o ile grupa ta leży poza inną znajdującą się w sąsiedztwie. Ważne jest zwrócenie uwagi na to że taka koncepcja pracy z segmentami (grupami punktów), ma wyodrębniać obiekty, a nie krawędzie (ściany) obiektów.



Ryc. I.13 Graficzna prezentacja koncepcji filtracji (Sithole, Vosselman 2003).

5. ILOŚĆ ETAPÓW (JEDEN LUB WIELE)

Jedne algorytmy wykonują operację w pojedynczym etapie, podczas gdy inne dokonują filtracji w wielu etapach. Podstawową przewagą tych pierwszych jest krótszy czas wykonania zadania. Z kolei złożoność i powtarzalność czynności wykonywanych przez drugą grupę algorytmów, powoduje, że pozyskana zostaje dokładniejsza informacja na temat sąsiedztwa, przez co dokładność otrzymanych wyników jest wiarygodniejsza.

6. WYMIANA LUB SELEKCJA

W selekcji filtrowany punkt usuwany jest z grupy punktów. Selekcja znajduje zastosowanie w algorytmach operujących na nieregularnie rozmieszczonych grupach punktów. W wymianie wyselekcjonowany punkt jest zwracany do grupy punktów ze zmienioną wartością wysokości (z reguły interpolowaną na podstawie wartości sąsiedztwa). Wymiana ma zastosowanie zwykle w algorytmach pracujących na chmurach punktów rozmieszczonych regularnie (zamienionych na postać rastrową).

7. UŻYCIE PIERWSZEGO ODBICIA I DANYCH O INTENSYWNOŚCI ODBICIA

Wykorzystanie kilku odbić oraz informacji o intensywności odbicia powoduje uzyskanie dokładniejszej informacji, przez co estymacja daje wiarygodniejsze wyniki.

Poniżej, na przykładzie operacji generowania NMT, przedstawiono trudności na jakie m.in. natrafia algorytm w trakcie filtracji (Sithole, Vosselman 2003):

1. ODCHYLEŃKI

DUŻE ODCHYLEŃKI – są to punkty, które należą do ukształtowania terenu czy krajobrazu, generowane od obiektów latających np.: ptaków. Są to punkty łatwe do klasyfikacji gdyż duża wartość ich odchyłki łatwo zostaje właściwie zidentyfikowana przez algorytm.

MAŁE ODCHYLEŃKI – są to punkty, które nie należą do krajobrazu. Źródłem ich jest rozproszenie (*multi-path*) sygnału oraz błędy zakresu zasięgu (*range finder*). Większość filtrów działa w oparciu o założenie, że najniższy punkt z grupy analizowanych należy do powierzchni gruntu. Punkty te naturalnie są wyjątkami. Wiele algorytmów dodatkowo zakłada, iż punkty sąsiadujące z najniższym należą do obiektów. W praktyce czasami ma to potwierdzenie. Niestety, w sytuacji gdy analizowany punkt przyjmuje skrajne wartości założenie okazuje się całkowicie błędne.

2. ZŁOŻONOŚĆ ANALIZOWANYCH OBIEKTÓW

BARDZO DUŻE OBIEKTY – ponieważ wiele algorytmów filtrujących porusza się wokół pewnego obszaru, wielkie obiekty mogą nie zostać rozpoznane jeśli ich wielkość wykracza poza analizowane sąsiedztwo.

BARDZO MAŁE OBIEKTY (wydłużone lub pokryte niewielką liczbą punktów) – często z powodu niewystarczającej informacji nie są rozpoznawane.

BARDZO NISKIE OBIEKTY (mury, krzewy, itd.) – często algorytmy identyfikują tego typu obiekty jako powierzchnię Ziemi. Problem jest o tyle złożony, że potrzebne jest

wychwycenie małych różnic wysokości, a ostrych przejść pomiędzy punktami powierzchni terenu.

ZŁOŻONOŚĆ KSZTAŁTU/UKŁADU – problem ten ma znaczenie głównie w obszarach zabudowanych gdzie istnieje ogromna różnorodność kształtów obiektów i nakładanie się ich brył.

NIECIĄGŁOŚCI TERENU (dziedzińce, drogi w lesie, itd.) – powierzchnie takie są trudne do określenia ze względu na swoje małe wymiary i sąsiedztwo wysokich obiektów.

3. OBIEKTY DOŁĄCZANE

BUDYNKI NA STOKACH – budynki tego typu mają dachy, które często z jednej strony są przedłużeniem poziomu gruntu, dlatego trudno jest je oddzielić od właściwej powierzchni Ziemi.

MOSTY – sztuczne obiekty pokrywające właściwy grunt często „wtapiają się” w niego.

RAMPY – sztuczne obiekty pokrywające powierzchnię Ziemi, gdzie, szczególnie na zboczach wzgórz, jedna strona jest niższa od drugiej.

4. WEGETACJA

WEGETACJA NA ZBOCZACH – wegetację można wychwycić opierając się na założeniu, że jest ona wyższa od otaczających ją punktów gruntu. W górzystym terenie trudne jest to do stwierdzenia gdyż grunt przyjmuje wartości podobne do wysokości wegetacji.

NISKA WEGETACJA – bardzo trudno oddzielić ją od otoczenia gdyż może ona być niewiele wyższa od gruntu i na tyle gęsta, że tworzy dokładnie taki sam obraz jak powierzchnia Ziemi.

5. NIECIĄGŁOŚCI

NP.: STROME ZBOCZA – z reguły odnajdywane są obiekty nie będące kontynuacją terenu. Czasami zdarza się, że powierzchnia Ziemi jest ciągła w pewnych fragmentach. Analizujący ją algorytm uzna wyższe punkty za składniki obiektów na jej powierzchni, przez co nieciągłości na powierzchni Ziemi zostaną utracone.

OSTRE KRAWĘDZIE – mogą one np.: zostać wygładzone przez co zostają zaokrąglone.

Powyżej opisano problemy z jakimi musi poradzić sobie algorytm tylko przy określaniu powierzchni ziemi. Można sobie wyobrazić, że z podobnymi zagadnieniami można spotkać

się w innego typu analizach grupy punktów. Najważniejsze jest to by zrozumieć istotę przeprowadzanych filtracji i możliwie optymalnie ustawić jej warunki.

Wysokość drzew

Jak już wcześniej wspomniano wysokość drzew (-a) określana jest z „różnicy” NMPT i NMT. Dokładność więc zależy od tego w jaki sposób pozyskiwana jest informacja wchodząca w skład tych dwóch modeli. Tradycyjnie prace prowadzone są głównie na danych rastrowych, dlatego powstaje pytanie o to jak poszczególne piksel rastra otrzymuje atrybut wysokości?

Częstą metodą tworzenia NMPT jest nadawanie atrybutu „z” pikselowi w oparciu o maksymalną wartość wysokości jednego z punktów występujących na powierzchni piksela (Sittler 2004; St-Onge i in. 2004; Watt i in. 2004). Praktyka ta uzasadniona jest m.in. tym, że nawet w wypadku nietrafienia promienia laserowego w wierzchołek, brany pod uwagę punkt ma najbliższą, zbliżoną do wysokości drzewa, wartość.

Wykorzystanie dwóch algorytmów do estymacji numerycznego modelu powierzchni terenu przedstawił Schardt z zespołem (Schardt i in. 2004). Obydwa algorytmy powstały w Austrijskim Instytucie Przetwarzania Zdjęć Cyfrowych (*Institute of Digital Image Processing Jonneum Research*). Pierwszy z nich – ISAE w swej filozofii opiera się o metodę dopasowywania bazującą na charakterystyce cechy, a drugi – RSG – na podstawie powierzchni (szczegółowy opis w artykule). ISAE daje bardziej wygładzoną powierzchnię. Ma to niekorzystny wpływ na obszary obejmujące skraj drzewostanu (ostre spadki, krawędzie), gdyż są one deformowane w wyniku działania algorytmu. Oba dają podobną dokładność w porównaniu do wyników pomiarów naziemnych.

Dorren wraz z zespołem (Dorren i in. 2006) oparli estymację wysokości na znormalizowanym modelu koron – nCM, gdzie przetestowali 2 metody określania wierzchołka za pomocą lokalnych maksimum w NMPT:

- W pierwszej metodzie użyto zmiennej wielkości okna – VWS (*Variable Window Size*), którego wielkość zależy od wysokości drzew. Wspomaganiem tej metody była empiryczna korelacja pomiędzy wielkością korony, a wysokością drzewa.
- Druga metoda nazwana – *Tree-top Window Analyzer (TWA)* operuje na poszczególnych komórkach znormalizowanego modelu koron, których wartość jest większa niż zdefiniowana minimalna wysokość drzewa lub gdy jest to lokalne maksimum. Każda komórka jest analizowana w polu o powierzchni 3×3 piksele. Gdy

analizowany obiekt jest maksimum w danym polu promień analiz się zwiększa do 2 komórek. Analizy zostają prowadzone do momentu, gdy zostanie wyznaczony obiekt (cel) dominujący ponad sąsiednimi komórkami. Metoda ta ma możliwość wyznaczenia sub-maksimów. Pozwala to na odnalezienie drzew w grupie drzew lub w ich najbliższym sąsiedztwie.

W wyniku zastosowania powyższych algorytmów uzyskano systematycznie niedoszacowaną wartość wysokości drzew (tabela).

Dwustopniową filtrację danych LIDAR-owych wykorzystano do stworzenia numerycznego modelu terenu (Tovari, Pfeifer 2005). Najpierw dane poddano segmentacji, a następnie filtracji w oparciu o wcześniej określone segmenty, a nie tak jak w większości dotychczasowych metod na punktach. Zaletami metody jest to, że nie usuwa ona punktów gruntu blisko krawędzi oraz zupełnie usuwa duże obiekty. Dodatkowo algorytm może być łączony z innymi filtrami, przy czym należy zwrócić uwagę na właściwe dobranie parametrów segmentacji gdyż wpływa ona na wyniki późniejszej filtracji.

Porównanie przydatności ośmiu różnych algorytmów (tabela I.24) do filtracji chmury punktów i wyróżnienia z niej 2 podzbiorów (obiekty, punkty gruntu) oceniono na podstawie danych referencyjnych (Sithole, Vosselman 2003).

Tab. I.24. Opis użytych w analizach algorytmów (Sithole, Vosselman 2003).

Developer(s)	Filter Description
M. Elmqvist - FOI (Swedish Defence Research Institute), Sweden	Active Contours - Elmqvist (2001)
G. Sohn - University College London (UCL)	Regularization Method - Sohn (2002)
M. Roggero - Politecnico di Torino	Modified Slope based filter - Roggero (2001)
M. Brovelli - Politecnico di Milano	Spline interpolation -Brovelli (2002)
R. Wack, A. Wimmer - Joanneum Research Institute of Digital Image Processing	Hierarchical Modified Block Minimum - Wack (2002)
P. Axelsson - DIGPRO	Progressive TIN densification - Axelsson (1999, 2000)
G. Sithole, G. Vosselman - TU Delft	Modified Slope based filter - Vosselman (2000), Sithole (2001)
N. Pfeifer, C. Briese - TU Vienna	Hierarchic robust interpolation - Pfeifer et. al. (1998), Briese et. al. (2001)

Jako dane, do których odnoszono wyniki pracy algorytmów, wykorzystano manualną filtrację z wykorzystaniem zdjęć lotniczych i zgromadzone informacje o terenie. Oceny dokonano na podstawie kryteriów opisanych powyżej („Opis problematyki...”). W trakcie wzrokowej oceny opartej na porównaniach wykorzystano trójstopniową skalę przedstawioną w tabeli I.25.

Tab. I.25 Poniżej przedstawiono znaczenie skrótów G, F i P z tabeli 26, przedstawiającej porównanie wyników estymacji DTM różnymi algorytmami (Sithole, Vosselman 2003).

Ocena	Ocena trafności określenia obiektu	Ocena wpływu sąsiedztwa
Dobrze (G)	Obiekt odnaleziony w większości wypadków (>90%)	Bez wpływu otoczenia
Znośnie (F)	Nieokreślenie obiektu w kilku przypadkach	Niewielki wpływ na filtrację sąsiednich punktów
Źle (P)	Nieokreślenie obiektu w większości przypadków (<50%)	Duży wpływ otoczenia na filtrację

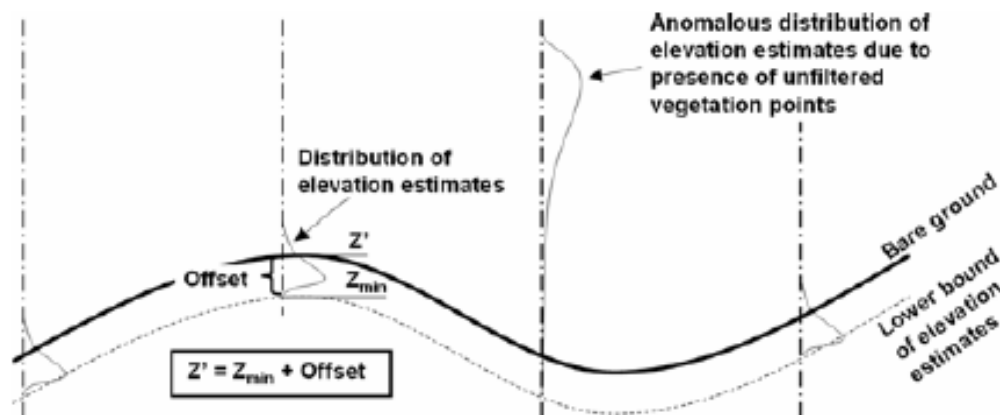
Tab. I.26 Wyniki analiz jakościowych (Sithole, Vosselman 2003).

	Elmqvist	Sohn	Roggero	Brovelli	Wack	Axelsson	Sithole	Pfeifer
Outliers								
High points	G	G	G	G	G	G	G	G
High points influence	G	G	G	G	G	G	G	G
Low points	G	F	F	G	G	F	F	G
Low points influence	G	G	G	G	G	P	P	G
Object complexity								
Objects	G	G	G	G	G	G	G	G
Large objects	G	G	G	G	G	G	G	G
Small objects	F	F	G	F	F	G	F	G
Complex objs.	F	F	F	F	F	F	F	F
Low objects	P	P	G	G	G	F	F	F
Disconnected terrain	F	F	F	F	F	F	F	F
Detached objects								
Building on slopes	G	F	F	F	F	G	F	G
Bridges	G/ R	G/ R	G/ R	G/ R	G/ R	F	G/ R	G/ R
Ramps	P	P	P	P	P	F	P	P
Vegetation								
Vegetation	G	G	G	G	G	G	G	G
Veg. on slopes	G	G	F	F	F	F	F	G
Low veg.	G	F	F	F	G	F	F	G
Discontinuity								
Preservation	P	P	P	P	F	F	P	F
Sharp ridges	P	P	P	P	F	P	P	P

G, Good; F, Fair; P, Poor; R, Removed

Wyniki analiz pokazały, iż nie ma jednego, algorytmu dającego zadowalające wyniki we wszystkich rodzajach krajobrazu. W jednostajnym terenie algorytmy wykazują się wysoką sprawnością. Jak zauważono skupiają się one na tym by w trakcie filtracji usunąć jak najwięcej punktów nienależących do powierzchni gruntu. Klasyfikacja do poszczególnych zbiorów (ziemia, obiekt) odbywa się na podstawie założenia, że konkretne struktury związane są z powierzchniami wybrzuszonymi (odkształconymi), inne zaś z powierzchniami płaskimi. Zdarza się że założenie to jest czasami błędne. Powodem jest to, że filtry są „ślepe” na kształt struktury w odniesieniu do jej sąsiedztwa. Generalnie filtry operujące na powierzchni dają lepsze wyniki niż te, które analizują sąsiedztwo punktów. Wynika to z analizy większej liczby sąsiednich punktów. Elementem, który może poprawić wyniki klasyfikacji jest informacja zawarta w zdjęciu lotniczym. Niemożliwe jest otrzymanie jednoznacznej informacji o punkcie tylko na podstawie jego położenia, poza tym dane mogą posiadać błędy systematyczne lub w zbiorze punktów mogą nie wystąpić punkty znajdujące się na Ziemi, a wtedy klasyfikacja nie jest możliwa. Dodatkowym elementem jest właściwe ustawienie parametrów filtracji i skalibrowanie ich z konkretnymi danymi. Złe dobranie parametrów może znacząco pogorszyć wyniki nawet wtedy gdy wykorzystamy kilka algorytmów w złożonym ciągu filtracji.

Trudnym zadaniem jest uzyskanie wiarygodnego numerycznego modelu terenu w górzystym i zalesionym obszarze. Jedną z metod opartą została o wstępną filtrację i niezależne próbkowanie, co wpłynęło pozytywnie na uzyskanie wyniku (Kobler i in. 2006). Metoda w pierwszym etapie eliminuje wszystkie skrajne wyniki (wartości), a następnie w efekcie niezależnego próbkowania określa się NMT dla każdego zbioru punktów. Prawdziwy numeryczny model terenu powstaje przez dodanie średniego globalnego offsetu do najniższych granic rozkładu (dystrybucji) (Ryc. I.14).



Ryc. I.14 NMT jest oszacowywany przez dodanie średniego globalnego offsetu do granicy najniższego położenia punktów terenu, które nie są skażone nieodfiltrowanymi punktami wegetacji (Kobler i in. 2006).

Właśnie losowe próbkowanie czyni proponowaną metodę niepowtarzalną gdyż nie powstają błędy w każdej filtrowanej próbie, a powstałe anulowane są w trakcie tworzenia ostatecznego NMT. O jakość metody świadczy fakt osiągnięcia w numerycznym modelu terenu błędu RMS na poziomie 0,15 m.

Minimalna wartość punktu znajdująca się w obrębie piksela była atrybutem NMT brany pod uwagę w trakcie jego generacji (Coops i in. 2004, Hyypä J. i in. 2005), a brakujące punkty w rastrze o wielkości piksela 0,5m interpolowane były metodą triangulacji Delaunay-a oraz bilinearną metodą interpolacji (Hyypä J. i in. 2005). Z pomiarów terenowych jakie wykonał Hyypä z zespołem okazało się iż błąd wyznaczenia NMT wahał się od 0,05 do 0,3 m.

Kiraly i Broly (2006) pracowali z rastrem 5×5 m. Poszczególnym pikselom nadawano wartości w ten sposób, że z 25 punktów leżących najbliżej środka wybierano 3 najniższe (NMT) i najwyższe (NMPT) i obliczano ich średnie. W wyniku różnic średnich otrzymywano wysokość. Drugą metodą zastosowaną przez autorów było użycie tych średnich wysokości jako wag. Liczba średnich w poszczególnych klasach była porównywana do całkowitej liczby obserwacji. Metody wykorzystane przez Autorów dały w konsekwencji bardzo wysoki współczynnik korelacji wyników estymacji wysokości z danych LIDAR-owych z danymi pozyskanymi z pomiarów naziemnych ($R^2=0,93$).

St-Onge i in. (2006) w trakcie tworzenia NMT wykorzystali metodę IDW (*Inverse Distance Weighted*). Polega ona na tworzeniu z chmury punktów obrazu rastrowego tak by usunąć nisko położone punkty. Jeśli wartość centralna pola o wymiarach 3×3 piksela była o co najmniej 0,25 m niższa niż wartość średnia z tych pól, to była ona zastępowana przez

wartość średnią. Tak powstały numeryczny model terenu, a potem wysokościowy model koron był wykorzystywany do dalszych analiz.

W oprogramowaniu TerraScan (algorytm wynaleziony przez Ruperta-a) (Maltamo i in. 2004a), w trakcie tworzenia NMT piksel otrzymuje wartość średnią ze współrzędnych punktów znajdujących się w jego obrębie (Yu i in. 2004a). Wartości NMPT uzyskiwano przez założenie promienia, zależnego od wysokości drzewa, w obrębie, którego analizowano korony drzew, rozpatrując dwa przypadki, które mogły wystąpić:

- W pierwszym zakładano, że w zbiorze punktów występuje tylko jedna grupa punktów odpowiadająca koronie i wtedy wartość maksymalna uważana była za wartość wchodzącą do numerycznego modelu powierzchni terenu.
- W drugim - w chmurze punktów były co najmniej dwa zgrupowania odpowiadające co najmniej dwóm koronom drzew. Liczba grup punktów zdefiniowana była wtedy z wykorzystaniem histogramu gdzie chmura punktów odpowiadała wysokości warstwy koron. W tym przypadku maksymalna wartość „z” wybierana była jako wysokość drzewa. Selekcja dokonana była na podstawie porównania wysokości grupy punktów i danych referencyjnych (pomiarów terenowych).

Wykorzystanie oprogramowania TerraScan w określaniu NMT w górzystym, zalesionym terenie ostatecznie wykazało dokładności $\pm 14\text{cm}$ (Maltamo i in. 2004a).

Heurich i Weinecker (2004) wykorzystali w estymacji wysokości algorytm zdefiniowany na uniwersytecie we Freiburgu. Algorytm automatycznie określa również średnicę korony pojedynczego drzewa oraz jego pozycję.

W celu określenia wartości numerycznego modelu terenu możliwe jest wykorzystanie algorytmu znajdującego się w programie SCOP++ (firmy Info) (Wagner i in. 2004). Hierarchiczną filtrację na danych wykonywaną przez algorytm można wybrać w zależności od rodzaju danych LIDAR-owych. Do wyboru są 4 metody:

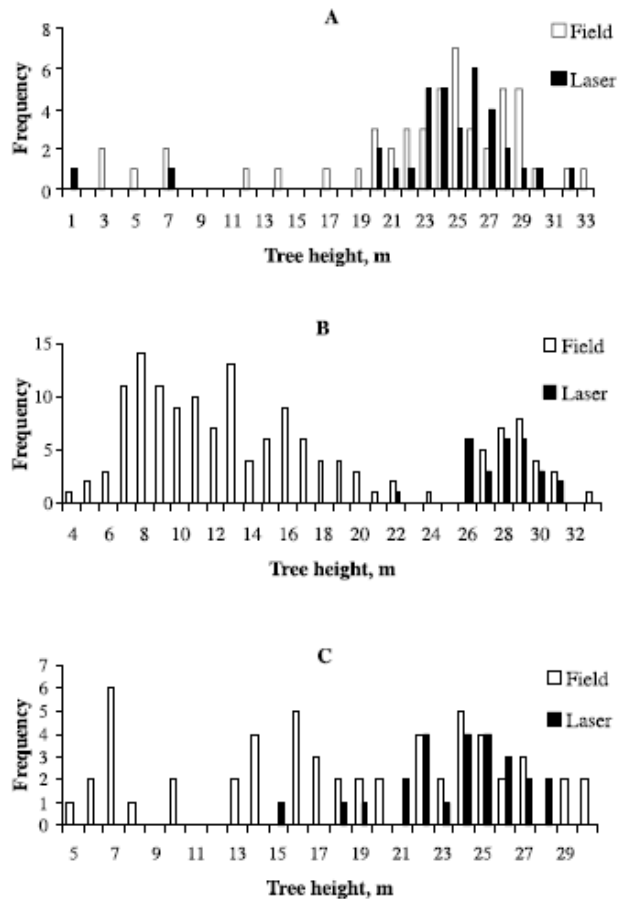
Przerzedzanie (ang: *thin out*) – proces ten w oparciu o algorytm zmniejszający ilość danych, nadaje atrybut wysokości pikselowi rastra równy wartości punktu o np.: najmniejszej wartości „z”.

Interpolacja (ang: *interpolate*) – polega na zagęszczeniu punktów przez interpolację ich wartości z sąsiednich punktów.

Filtracja (ang: *filter*) – w etapie tym nadawane są wysokie wagi punktom będącym prawdopodobnie terenem i niskie wagi tym, które prawdopodobnie nie są punktami leżącymi dokładnie na powierzchni terenu.

Ułożenie w kolejności (*sort out*) – w procesie tym punkty znajdujące się w założonej odległości od punktów wchodzących w skład początkowo określonego NMT są zachowywane. Opcja ta uwzględnia również manualną edycję danych.

Z doświadczeń wynika, że wysokość uzyskiwana z danych LIDAR-owych jest niedoszacowana. Spodziewać się więc należy, iż określenie wysokości poszczególnych drzew osiągnie niższą wartość od wyników pomiarów naziemnych. Jak się okazuje nie jest tak do końca w praktyce. Około 17 % wyników estymacji wysokości z wykorzystaniem danych LIDAR-owych jest większa od wartości uzyskanych z pomiarów naziemnych, Błędów niedoszacowania większych od jednego metra jest 46%, a mniejszych od metra – około 37% (Maltamo i in. 2004a). Wyniki badań pokazują różną możliwość detekcji poszczególnych drzew w zależności od gęstości i warstwowości drzewostanów. Poniżej (Ryc. I.15) przedstawiono wpływ tych cech drzewostanu na możliwości określenia dystrybucji wysokości. Określanie wysokości w terenie zależy od wielu czynników. Generalnie u gatunków iglastych identyfikacja wierzchołka odbywa się szybciej i w sposób pewniejszy niż u liściastych. Stąd określanie różnic w wysokości między pomiarami teledetekcyjnymi, a tradycyjnymi obarczone jest mniejszym błędem.



Ryc. I.15 Przykłady dystrybucji wysokości pozyskanej z pomiarów terenowych oraz estymowanej z danych LIDAR-owych. (A) jednopiętrowy drzewostan świerkowy w wieku 78, (B) wyjątkowo gęsty dwupiętrowy drzewostan 99 letni ze świerkiem jako gatunkiem panującym, (C) równomierny rozkład wysokości w 100 letnim drzewostanie świerkowym. Gęstość skanowania 8-10/m². (Maltamo i in. 2004a).

Podsumowanie:

1. Wysokość drzewostanu określona na podstawie danych LIDAR-owych w porównaniu do pomiarów terenowych jest z reguły niedoszacowana (Buddenbaum Seeling 2006; Coops i in. 2004; Heurich, Weinacker 2004; Heurich i in. 2004b; Hopkinson i in. 2004b; Maltamo i in. 2004a, 2004b; Morsdorf i in. 2006; Yu i in. 2004a, 2004b).
2. Im gęstość skanowania mniejsza tym mniejsze prawdopodobieństwo trafienia w wierzchołek, przez co niedoszacowanie wysokości drzew zwiększa się.
3. Im mniejsza gęstość drzewostanu tym większe niedoszacowanie wysokości, z powodu potrzeby interpolacji większej ilości punktów (np.: w zależności od wielkości rastra).
4. Należy zwrócić uwagę na dokładność danych referencyjnych, gdyż nie są one bezbłędne (Coops i in. 2004; Holmgren, Jonsson 2004a; Maltamo in. 2004b), przez co

- mogą wypaczać wyniki określania wysokości uzyskiwane z opracowań LIDAR-owych (Maltamo i in. 2004a).
5. W przyszłości bardzo prawdopodobne stanie się wykorzystywanie istniejących numerycznych modeli terenu (z LIDAR-a), jako podstawy do określania wysokości drzewostanu na podstawie zdjęć lotniczych lub satelitarnych (St-Onge i in. 2005, 2006).
 6. Często przyczyną zaniżenia wysokości drzewostanu jest przeszacowany NMT (Abraham, Adolf 2006; Hopkinson i in. 2004b; Watt i in. 2004; Wack, Stelzl 2005).
 7. Gęstość drzewostanu < 2000 drzew/ha jest odpowiednia do uzyskania wiarygodnego NMT i wysokości drzewostanu (Watt i in. 2004).
 8. Wraz ze wzrostem wysokości skanowania zmniejsza się dokładność określania wysokości drzew, przy czym brzoza jest mniej podatna na zmiany wysokości niż gatunki iglaste (Hyypä H. i in. 2005; Morsdorf i in. 2006; Yu i in. 2004a).
 9. Większe znaczenie na określenie wysokości ma gęstość punktów niż wielkość plamki. Aby jednak pomiar był stabilny plamka musi mieć co najmniej 16-26 cm. Mniejsza plamka ma większą czułość na małe drzewa (Yu i in. 2004a).
 10. Poprawieniem dokładności określania wysokości może być „odejmowanie” NMT pozyskanego zimą od NMPT pozyskanego w pełnym ulistnieniu (Wagner i in. 2004)
 11. Systematyczne przesunięcie i odchylenie standardowe wzrasta wraz ze zmniejszaniem się gęstości pulsów lasera na jednostkę powierzchni (Yu i in. 2004a).
 12. Średnia wartość punktów korony jest bardziej skorelowana ze średnią wysokością drzewa, a maksymalna wartość punktu (w chmurze punktów stanowiących koronę) odpowiada wysokości mierzonej w terenie przez taksatorów. Obie wartości są trudne do określenia w terenie (Coops i in. 2004).
 13. Możliwe jest określenie przyrostu drzewostanu, na podstawie danych LIDAR-owych, z dokładnością 5 cm, na poziomie drzewostanu, i 10-15cm, na poziomie powierzchni próbnej (Yu i in. 2004b).
 14. Pomiar wierzchołków drzew lub określonej powierzchni gruntu z różnych kierunków prowadzi do błędów (Yu i in. 2004b).
 15. Wraz ze wzrostem spadku terenu rośnie wartość przypadkowego błędu w numerycznym modelu terenu (Hyypä H. i in. 2005).

Pierśnica drzew

Określanie średnicy pnia drzewa odbywa się w wypadku danych LIDAR-owych na podstawie korelacji średnicy korony i wysokości do pierśnicy drzewa oparciu o istniejące formuły i modele statystyczne (Hyypä J. i in. 2005). Uzyskane wyniki w dużej mierze zależą od dokładności określania cech wykorzystywanych w modelu. Dokładność szacowania wysokości, przy użyciu danych LIDAR-owych, często jest dokładniejsza niż w przy pomiarach terenowych. Określanie parametrów korony, w tym jej szerokości zależy od wielu czynników i niestety osiąga różne efekty. Przede wszystkim określenie szerokości zależy od wielkości oczka rastra użytego w pomiarach, kąta odwzorowania na obrazie korony, występujących cieni (na zdjęciach lotniczych). Biorąc pod uwagę te wszystkie czynniki, wiarygodne pomiary mogą dotyczyć tylko najwyższych, luźnych partii drzewostanu. Przenikanie się koron sąsiadujących drzew jest często niewykrywalne, a wywiera to duży wpływ na jakość uzyskiwanych wyników estymacji.

Holmgren, Jonsson (2004a) również wykorzystali model do estymacji pierśnicy drzew. W swym równaniu korelacji wykorzystali zależność pomiędzy wysokością procentową drzewostanu i gęstością warstwy koron, a poszukiwaną pierśnicą.

Pole powierzchni przekroju drzewa (G)

Pierśnicowe pole powierzchni drzewostanu jest wartością niezbędną do określenia jego miąższości. Określenie powierzchni pierśnicowej w oparciu o dane LIDAR-owe opiera się w pierwszej kolejności na określeniu pierśnicy, a następnie wykorzystaniu prostego wzoru na pole powierzchni koła. Określenie pierśnicy odbywa się na podstawie modeli wykorzystujących dane LIDAR-owe, np.: średnicy korony i wysokości (Hyypä J. i in. 2005). Wyniki tych estymacji w dużej mierze zależą od gęstości danych LIDAR-owych i jakości zdjęć cyfrowych. Problemem pozostaje wciąż właściwe określenie liczebności drzew na powierzchni, co w dużym stopniu pogarsza wyniki estymacji.

Wack (2006) stwierdził zależność między dominującą wysokością, liczbą punktów z pierwszego znaczącego maksimum z wierzchołka i współczynnikiem odbicia światła przez koronę, a polem powierzchni. W oparciu o te parametry stworzył równanie regresji, dla którego współczynnik determinacji osiągnął wartość $R^2=0,85$.

Holmgren i Jonsson (2004a) zauważyli, iż powierzchnia pierśnicowego pola przekroju drzewostanu skorelowana jest ze średnią wysokością drzewostanu i wysokością procentową.

Wiedzę tę wykorzystali w modelu, za pomocą którego poddano analizie dane LIDAR-owe. Uzyskane wyniki estymacji dały zadowalający błąd wynoszący 12,5%.

Ogólnie można stwierdzić, że wykorzystanie modelu użytego w jednym drzewostanie może nie dać pozytywnych wyników w innym (Naasset 2004b).

Miąższość drzew i drzewostanów (zasobność)

Szacowanie miąższości, jak wspomniano powyżej, opiera się na szukaniu korelacji między parametrami drzew mierzalnymi z poziomu samolotu, a miąższością otrzymaną z pomiarów naziemnych. Wykorzystuje się również inne modele, które jednak wymagają kalibracji do konkretnych warunków (Breidenbach i in. 2007). Stosowane są głównie dwie metody określania miąższości drzew: metodę opartą na dystrybucji biomasy oraz metodą bazującą na pojedynczych drzewach (Hyypä J. i in. 2006, Korpela, Tokola 2006; Packalen, Maltamo 2006; Korpela i in. 2007). Różnice w podejściu obu metod do opisywanego problemu powodują różnice w otrzymywanych wynikach. Poniżej przedstawiono krótki opis zalet i wad obu technologii.

Tab. I.27 Porównanie metod określania miąższości bazujących na dystrybucji biomasy i pojedynczych drzewach (Hyypä J. i in. 2006).

Metoda	Zalety	Wady
Metoda bazująca na dystrybucji (biomasy)	<ul style="list-style-type: none"> - Łatwa do integracji z obecnie obowiązującą metodą inwentaryzacji przez wykorzystanie tych samych powierzchni referencyjnych. - Mocne podłoże statystyczne. - Pozyskanie danych LIDAR-owych relatywnie niedrogie 	<ul style="list-style-type: none"> - Wymaga dużej liczby dokładnych, reprezentatywnych i przez to drogich danych referencyjnych. - Bez dużej liczby wiarygodnych danych referencyjnych należy spodziewać się dużych błędów w inwentaryzacji.
Metoda bazująca na pojedynczym drzewie	<ul style="list-style-type: none"> - Dobra korelacja (istniejące modele) z estymowaną miąższością. - Potrzebna jest niewielka liczba danych referencyjnych do kalibracji. - Dąży do precyzyjnego leśnictwa i podnosi liczbę parametrów opisujących las. 	<ul style="list-style-type: none"> - Droższe dane LIDAR-owe. - System bardziej złożony i trudniejszy do zastosowania w praktyce.

Wack (2006) badał możliwości określania miąższości w kilku drzewostanach o różnym składzie gatunkowym. W procesie selekcji drzewostanów do prób wykorzystane zostały ortofoto ze zdjęć satelitarnych. Następujące współczynniki skorelowano z pomiarami terenowymi:

- Dominującą wysokość (95%)
- Liczbą punktów z pierwszego znaczącego maksimum z wierzchołka
- Wysokością w pierwszym znaczącym maksimum na wierzchołku
- Współczynnikiem odbicia światła przez koronę
- Średnią wysokością korony

Wszystkie dane wykorzystane w równaniach regresji pochodziły z pomiarów LIDAR-owych. Uzyskane wyniki charakteryzują się bardzo wysokimi współczynnikami korelacji przyjmującymi wartości co najmniej 0,85. Najlepsze efekty estymacji masy uzyskano w drzewostanach gdzie gatunki liściaste stanowiły ponad 30 % całkowitego składu (błąd 8 %) Podobnie było w warstwie drzewostanów złożonych tylko ze świerka lub iglastych z udziałem świerka ponad 30 %. Błędy wyniosły w nich odpowiednio 10 i 12 %. Zastosowanie tych samych współczynników równań regresji na innych obiektach dało bardzo podobne wyniki.

Wykorzystanie zdjęć lotniczych w kanale CIR o rozdzielczości 0,5 m oraz danych laserowych o gęstości 5 punktów/m² i 10punktów/m² wykorzystał Hyypä wraz zespołem (Hyypä J. i in. 2005) do szacowania masy drzewostanu – opartej o metodę indywidualnej korony drzewa ITC (*Individual Tree Crown*). Zdjęcia lotnicze posłużyły do określenia liczebności drzew na jednostkę powierzchni i określenia wielkości poszczególnych koron. Dane LIDAR-owe wykorzystano do określenia wysokości drzewostanu. Informacja o średnicy korony i wysokości drzewa była podstawą, wykorzystaną w modelu, do określenia powierzchni pierścicowego przekroju drzewostanu. Korelację określano dwoma sposobami:

- w pierwszym wykorzystano do porównań wszystkie segmenty, także te które później manualnie rozdzielano uznając je za grupy, a nie pojedyncze drzewa
- w drugim - tylko segmenty które od razu poprawnie zostały zaklasyfikowane jako pojedyncze drzewa

Okazało się, że w obydwu przypadkach średnica korony zupełnie nie koreluje z oszacowaną miąższością pnia ($R^2=0,13-0,14$). Przyczynę upatruje się w dużym niedoszacowaniu średnicy koron, z których u wielu niemożliwym było określenie dokładnego ich zasięgu. Dodatkowo budowa koron w analizowanym drzewostanie nie odpowiadała kształtem, tym które użyte

były do budowy modelu. Wyniki pokazały również, że rozdzielenie grup drzew nie poprawiło w znaczącym stopniu wyników prac. Znacząco wyniki estymacji poprawiły się gdy dodano parametr wysokości drzew z danych LIDAR-owych ($R^2=0,5-0,6$). Najlepsze wyniki uzyskano gdy w szacowaniu wykorzystano średnicę korony i wysokości tylko z danych LIDAR-owych wykonanych z poziomu 800 m (5 punktów/m²) i 400m ($R^2=0,6-0,7$). W obu przypadkach wyniki były bardzo podobne. Ostatecznie okazało się, że czasami nie jest potrzebne poznanie liczby drzew na całym obszarze o ile miąższość grupy w wiarygodny sposób reprezentuje miąższość całego drzewostanu.

Określenie miąższości odbywać się może również na podstawie skorelowania średnicy koron z danych LIDAR-owych z pierśnicą, a następnie na określeniu powierzchni wydzielenia, gatunku i jego klasy wiekowej oraz wysokości dominującej (Wack i in. 2003). Modele zbudowane dla plantacji eukaliptusowych w oparciu o parametry dostarczone z danych LIDAR-owych wykazują dużą sprawność, a uzyskiwane wyniki osiągają dokładności powyżej 90%.

Podsumowanie:

1. Najważniejszym parametrem wykorzystywanym w określaniu miąższości, dostarczanym przez technologie teledetekcyjne, jest wysokość drzewostanu (Hyypä J. i in. 2005)
2. Ważne jest poprawne określenie danych referencyjnych. Określanie miąższości tradycyjnymi metodami powoduje błąd rzędu 25 % (Holopainen, Talvitie 2004 za Hyypä 1998).
3. Określenie liczby drzew na jednostkę powierzchni ma decydujący wpływ na dokładność określania miąższości

Liczba drzew

Na wynik szacowania liczby drzew, od strony technicznej, ma wpływ przede wszystkim dokładność dwóch procesów: klasyfikacji i segmentacji.

- Klasyfikacja treści obrazu ma na celu wyodrębnienie różnych obiektów terenowych lub zjawisk, następnie przypisanie ich każdego piksela do jednej z klas (grup) obiektów (Adamczyk, Będkowski 2005). W efekcie klasyfikacji powstaje zupełnie nowy obraz cyfrowy, w którego pikselach zapisane są numery wcześniej zdefiniowanych klas.

- Segmentacja polega na wyodrębnieniu w obrazie cyfrowym granic obiektów o podobnych cechach tekstury. Używane do tego celu algorytmy wyszukują przede wszystkim elementy liniowe, tzw. granice (Adamczyk, Będkowski 2005).

Obie powyższe operacje przeprowadzane są głównie na zdjęciach lotniczych (Bohlin i in. 2006) lub satelitarnych. Włączenie do procesu ich obróbki danych wysokościowych znacznie poprawia wyniki takich analiz. Metod pozyskiwania informacji o ilości drzew jest wiele. Poniżej podano kilka z nich podając ogólne zasady przy ich stosowaniu oraz wyszczególniono algorytmy, które są wykorzystane w trakcie prac.

Określanie ilości drzew bardzo często jako głównego źródła informacji używa Wysokościowego Modelu Koron (Numerycznego Modelu Koron, Numerycznego Modelu Różnicowego) powstałego w wyniku automatycznego odjęcia NMPT od NMT. Czynność odjęcia warstw możliwa jest do przeprowadzenia w środowisku wielu programów, np.: HALCON (Heurich i in. 2004b). Model koron drzew wygładzany jest filtrem Gaussa. Następnie wyznajdowane są lokalne maksima, które interpretowane są jako osobne drzewa (Maltamo i in. 2004a). Model taki zostaje następnie włączony w proces klasyfikacji jako dodatkowe źródło informacji dla zdjęć lotniczych i satelitarnych (Wack 2006), lub przy pomocy algorytmów i informacji wysokościowej zawartej w pikselach poddawany jest procesowi segmentacji. Jak podaje Wack (2006) polepszenie wyników klasyfikacji uzyskiwano dzięki wcześniejszemu rozdzieleniu drzewostanów liściastych od iglastych.

Zależność między wysokością, a średnicą korony drzewa wykorzystana została w metodzie zaprezentowanej przez Tiede i zespół (2005). Model wymagał wcześniejszej kalibracji do specyfiki drzewostanu, który miał zostać poddany analizie. Po odnalezieniu przez algorytm najwyższego punktu następowało poszukiwanie innego, wyższego w promieniu, który odpowiadał średnicy korony. Określenie zasięgu drzew rozpoczynało się od punktów wcześniej określonych, jako wierzchołki drzew. Począwszy od najniższych drzew algorytm wyszukiwał sąsiednie piksele o mniejszej wartości i te uznawał za składniki korony, w założonym promieniu zależnym od wysokości. Metoda wykazała wysoką skuteczność, w granicach 51%, a dla drzew panujących 72 %. Za główne przyczyny błędów podano błędy w pracy algorytmu określającego zasięg, gdyż dodawał on powierzchnie będące lukami do powierzchni korony oraz nie trafianie impulsów laserowych w wierzchołki drzew, przez co wiele z nich nie zostało zarejestrowanych.

Wykorzystanie algorytmu TIDA (ang.: *Tree Identification and Delineation Algorithm*) do określania granic drzew opisana została przez Coopsa (Coops i in. 2004). Algorytm ten używa metody „od szczytu w dół” (*top-down*), która polega najpierw na

zidentyfikowaniu radiometrycznego maksimum z sąsiadującymi pikselami. Lokalne maksima służą w następnym etapie do określania centrów, wokół których reszta korony jest formowana. Wyniki analiz zależnie są od wielu czynników, takich jak: rodzaj wykorzystywanej technologii, pory dnia, kąta padania promieni słonecznych i kąta pozyskiwania danych. Z racji tego, że cienie odgrywają bardzo ważną rolę dane LIDAR-owe mają przewagę nad tradycyjnymi metodami fotogrametrycznymi – zdjęciami cyfrowymi, które skażone są występowaniem cieni. Minusem danych LIDAR-owych jest to, że niżej położone korony zasłonięte są przez drzewa z wyższych warstw, co może powodować utrudnienia w ich identyfikacji i negatywnie wpłynąć na wyniki estymacji.

Dwie różne metody określania położenia wykorzystano do określenia liczby wierzchołków (drzew) na jednostkę powierzchni. Były to: metoda zmiennej wielkości okna – **VWS** (ang.: *Variable Window Size*) i *Tree-top Window Analyzer (TWA)* (Dorren i in. 2006). Błędy określenia liczby drzew wyniosły dla obu algorytmów odpowiednio 36,7 i 33%. Spadły one istotnie do 10% gdy wzięto pod uwagę tylko drzewa z dominującej warstwy. Algorytm TWA częściej się „mylił”, gdyż z 25 na 30 znalezionych drzew, aż 4 były fałszywe.

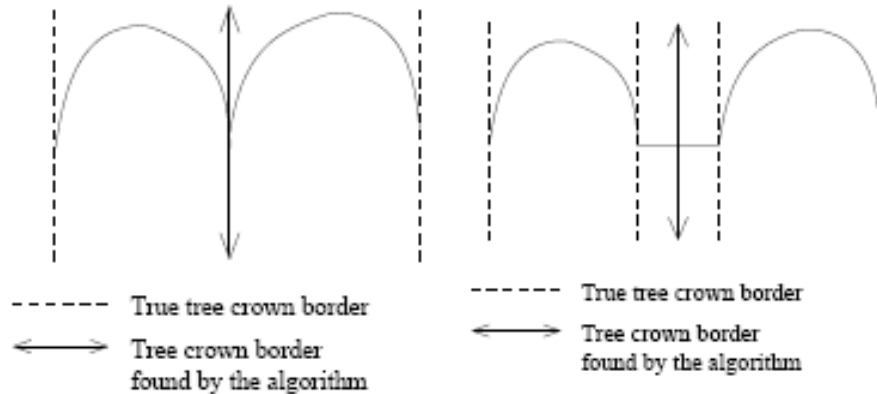
Wykorzystanie algorytmu wyszukującego dolin również przynosi wysoką skuteczność w określaniu zasięgu poszczególnych koron drzew (Leckie i in. 2003). W metodzie wykorzystano dane LIDAR-owe (rastry o rozdzielczości 0,25 m) i obrazy pozyskane przez DFC (*Digital Frame Camera*) o rozdzielczości 8,5 cm. Opisany algorytm traktuje obraz cyfrowy jak powierzchnię topograficzną. Jego działanie polega na wyszukiwaniu lokalnych minimów i odnajdywaniu dolin pomiędzy koronami na podstawie jasności pikseli. Im jaśniejsze oczko rastra tym jest ono położone wyżej. Algorytm tworzy maskę obszarów dolin i obszarów będących koronami. W dalszym etapie odseparowane segmenty są analizowane albo mogą być uważane za korony pojedynczych drzew. Jeśli ten warunek nie jest spełniony następuje rozdzielenie segmentu. Izolacja pojedynczych koron oparta została o materiał z kamery cyfrowej o rozdzielczości 0,5 m. Ostatnim etapem było określenie minimalnej powierzchni oznaczonych poligonów. Wartości mniejsze od założonego progu zostały usunięte. W obu użytych typach danych wyjściowych uzyskano skuteczność ponad 80%. Wysoką skuteczność analiz uzyskano zwłaszcza w rzadkich drzewostanach świerkowych.

Lucas (Lucas i in. 2006) do określenia liczby drzew na jednostkę powierzchni wykorzystał *Height Scaled Crown Openness Index (HSCOI)*, który po wygładzeniu poddany został analizie przez algorytm wyszukujący kopuły (mis) w powierzchni modelu. Porównanie wyników z pomiarami naziemnymi dało podobne rezultaty segmentacji w programie eCognition opartym na danych z CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) i dało

efektywność na poziomie 40-80%. Wyniki segmentacji wykorzystano następnie w klasyfikacji obiektów do gatunków.

Wykorzystanie programu *Arboreal Forest Inventory Tools of Arbonaut Ltd.* oraz algorytmu będącego połączeniem algorytmów zdefiniowanych w Austrii – *Joanneum Research* i w Niemczech na uniwersytecie we Freiburgu wykorzystał zespół Hyyppä (Hyyppä J. i in. 2005). Identyfikacja drzew opierała się najpierw na odnalezieniu lokalnego maksimum z wykorzystaniem filtra *low-pass*. Następnie z wykorzystaniem algorytmu *watershed* następowała segmentacja obrazu w siedmiu różnych warstwach o innych ustawieniach w celu ustalenia najskuteczniejszych z nich. Wzrokowa ocena wyłoniła najlepszy wynik segmentacji i tą warstwę wykorzystano w dalszych analizach. Założono na podstawie gatunku, wieku i wysokości maksymalną wielkość korony, a następnie wszystkie grupy, których średnica była większa od zakładanej podzielono by dokładniej określić ilość drzew.

Udoskonaloną metodę wykorzystania algorytmu *watershead* opisał Weinacker wraz z zespołem (2004), Mei i Durrieu (2004), Rossmann z zespołem. (2007) oraz Zhao i Popescu (2007). Problem, na który zwrócili oni uwagę dotyczył efektów pracy algorytmu i zawyżania powierzchni korony przy niskim stopniu zadrzewienia analizowanego drzewostanu. Numeryczny model powierzchni terenu powstały w wyniku wykorzystania algorytmu *watershead* może być przedstawiony jako obraz w odcieniach szarości tam, gdzie jasności pikseli reprezentują odpowiednie wysokości. Przez odwrócenie drzew do góry pniem, korony tworzą coś w rodzaju misek, zlewni. Granica takiej zlewni jest uznawana za granicę korony drzewa. Takie interpretowanie rzeczywistości przez algorytm prowadzi, szczególnie w drzewostanach o luźnej strukturze do przeszacowania powierzchni korony (Ryc. I.16). Granica wyznaczona przez algorytm nie jest granicą korony drzewa.



Ryc. I.16 Pozycja granicy wyznaczonej przez algorytm *watershead* dla gęstego (po lewej) i luźnego drzewostanu (po prawej) (Mei, Durrieu 2004).

Aby tego uniknąć autorzy wydzielili w obrazie miejsca gdzie nie ma wysokiej wegetacji. W tym celu podzielili NMPT na piksele i określili gdzie NMPT osiąga wartości graniczne. Obszary te zostały wyłączone z późniejszych prac. Wyniki klasyfikacji z wykorzystaniem indeksu wegetacji (NDVI) okazały się bardzo dobre i sięgnęły na niektórych powierzchniach 98% poprawnie wykrytych luk. Algorytm *watershead* wykorzystano do przeanalizowania zdjęć lotniczych (HRI - *High Resolution Imager*). Następnie dane z określania miejsc gdzie znajduje się nie-wegetacja wykorzystano do poprawy wyników segmentacji zdjęć lotniczych. Określenie ilości drzew sięgnęło 90%. Szczególnie dobre efekty uzyskano w plantacjach brzozowych.

Określenie liczby drzew może odbyć się także w dwustopniowym procesie zaproponowanym przez Wacka i jego zespół (2003). W pierwszym etapie identyfikowane są najwyższe punkty spośród otoczenia, a pozostałe położone niżej eliminowane są ze zbioru. W drugim etapie wykorzystuje się relacje między średnicą korony, a wysokością drzewa. Skalowanie średnicy w przestrzeni powoduje eliminację punktów w założonym promieniu, które stanowiłyby drugi wierzchołek. Wyniki otrzymane w efekcie zastosowania opisanej wyżej metody dały bardzo dobre rezultaty. Dodać trzeba iż analizy prowadzone były na plantacji eukaliptusowej, gdzie regularność położenia drzew pozytywnie wpływa na wynik takich analiz.

Trzy różne metody wykorzystane zostały do określania ilości drzew w oparciu o, uzyskany z danych LIDAR-owych, wysokościowy model koron o rozdzielczości 0,5 m (Pitkanen i in. 2004).

1. Pierwsza metoda (HBF – *height based filtering*) polegała na wygładzeniu numerycznego modelu koron filtrem zależnym od wysokości, a następnie zidentyfikowaniu lokalnych maksimów. Maksima te uznawane były za pojedyncze drzewa.
2. Pozostałe dwie metody wykorzystywały model szerokości koron.
 - Podstawową ideą pierwszej z nich (ELIM – *maxima elimination*) było wyznaczenie większej liczby prawdopodobnych wierzchołków (maksimów i prawie maksimów w wysokościowym modelu koron), a następnie ich redukcja w oparciu o wartość spadków wewnątrz założonej powierzchni środka korony oraz wartości odległości i głębokości doliny pomiędzy dwoma wierzchołkami (bardzo szczegółowy opis tego etapu znajduje się w artykule).
 - Druga z metod (LAP – *Laplacian blob selection*) bazowała na wyszukiwaniu plamki (kuli odnoszącej się do korony) przez skalowanie chmury punktów zależnie od średnicy korony.

Wyniki wyżej opisanych metod porównane zostały do rezultatów wyszukiwania lokalnych maksimów w niewygładzonym modelu koron (metoda RAW) i do wyników filtracji danych filtrem Gaussa, który dał najrozsądniejsze wyniki (metoda GAUS). Jak się okazało żadna z metod nie dała zadowalających wyników, bo zaledwie około 40% wszystkich drzew i 70% dominujących drzew zostało automatycznie wykrytych ([wyniki w paragrafie – 2.5](#)), przy czym trafień fałszywych było około 10%. Metoda LAP okazała się bardzo skuteczna w wyszukiwaniu małych drzew, dodatkowo jednak wykryła wiele fałszywych drzew czego powodem były np.: grubsze gałęzie. Większą liczbę drzew można znaleźć w niefiltrowanym wysokościowym modelu koron, ale procent maksimów nie będących wierzchołkami (65% liczby drzew) dowodzi potrzebie dopasowania skali przed rozpoczęciem obliczeń. Dwie ostatnie metody wymagają dodatkowo modelu szerokości koron, co jest o tyle problematyczne, że każdy drzewostan musiałby mieć osobno zdefiniowany model dopasowany do swoistych warunków budowy, gdyż relacja szerokości koron do wysokości nie jest stała. Metoda ELIM dała najlepsze rezultaty z akceptowalną ilością fałszywych trafień. Wymagało to jednak wielu dodatkowych czynności by ich liczba była odpowiednio niska.

Określanie zasięgu granicy koron poszczególnych drzew możliwe jest także w programie TreesVis ([Koch i in. 2006](#)). Algorytm analizując wygładzony numeryczny wysokościowy model koron wyszukuje lokalnych maksimów. Począwszy od nich, podobnie jak algorytm w programie HALCON, określa obszar o wartościach równych lub mniejszych

od określonego wcześniej wierzchołka. Możliwe jest po skończeniu procesu podzielić korony na klasy wysokościowe, a także zdefiniować minimalną odległość między dwoma wierzchołkami i minimalną powierzchnię regionu np.: w zależności od gatunku czy wieku. Po zidentyfikowaniu takiego obszaru, segment o mniejszej powierzchni dociągany jest automatycznie do segmentu sąsiedniego, z którym ma najdłuższą, wspólną granicę, a z dwóch wierzchołków, wyższy staje się wysokością nowego obiektu. Po tej wstępnej segmentacji pozostaje pewna liczba regionów, których powierzchnia wskazuje na występowanie w nich grupy drzew. Są one w zależności od powierzchni dzielone na mniejsze segmenty. Ostatecznym etapem jest zastosowanie algorytmu określającego zasięg koron po wyłączeniu z modelu przerw w drzewostanie. Wykorzystano również wiele innych charakterystyk koron drzew uznanych jako bryły. Punktem odniesienia do porównań były pomiary fotogrametryczne par stereoskopowych zdjęć lotniczych lub pomiary terenowe. Uzyskane wyniki były bardzo zadowalające szczególnie, że pokryły się w 94% z pierśnicowym polem powierzchni, co wskazywałoby na wykrycie prawie wszystkich drzew tworzących masę drzewostanu. Najlepsze rezultaty uzyskano dla daglezi gdzie dla 49 drzew udało się automatycznie wychwycić 47 z nich (95,9%). Z tej liczby aż 87,3% stanowiły segmenty odpowiadające pojedynczym drzewom. Generalnie liczba drzew została zaniżona, co wynika między innymi z występowania drzew podkapowych, istotnych dla leśników, lecz pominiętych przez algorytm, z powodu swych małych wymiarów.

Pojawiły się również pierwsze publikacje dotyczące określania liczby drzew na jednostkę powierzchni oparte o analizę surowych danych pochodzących ze skanowania laserowego (Wang i in. 2007). Zaproponowany algorytm analizuje chmurę punktów lokalizując w niej najwyżej położone punkty i traktując je jako wierzchołki drzew, rozpoczyna dalsze obliczenia poruszając się w dół. Metoda ta w całości funkcjonuje w oparciu dane surowe. Wraz z posuwaniem się algorytmu w dół drzewa, zwiększa się wielkość korony oraz pojawiają się nowe sąsiadujące drzewa. Odpowiednie dopasowanie wartości granicznej wielkości korony w zależności między innymi od wysokości i wartości spektralnych pikseli, pozwala na segmentację sąsiadujących drzew. Po określeniu zasięgu pojedynczej korony można dodatkowo określić jej wysokość oraz obliczyć jej miąższość.

Podsumowanie:

1. Gęstość punktów powyżej 3-5 daje możliwość określenia od 60 – 90% wierzchołków na badanej powierzchni. Spadek gęstości punktów poniżej 3-5 poważnie wpływa na zmniejszenie ilości automatycznie wyznaczanych drzew (Hirata 2004).
2. Wraz ze wzrostem wysokości skanowania zmniejsza się dokładność określania ilości drzew na jednostkę powierzchni (Yu i in. 2004a).
3. Określanie liczby drzew przy obecne używanych algorytmach może odbywać się z dużą efektywnością tylko w odniesieniu do najwyższej, panującej warstwy drzew.
4. Wykorzystywanie metody lokalnego maksimum do określania liczby drzew uzyskuje najlepsze wyniki w odniesieniu do warstwy drzew panujących (Maltamo i in. 2004a).
5. Wynik wykorzystania metody opartej na lokalnych maksimach zależy od rodzaju drzewostanu oraz od wielkości zakresu (promienia) przeszukiwania obszaru przez okno algorytmu (Tiede, Hoffmann 2006a).
6. Wraz ze zmniejszeniem się promienia przeszukiwania w metodzie lokalnych maksimów rośnie ilość fałszywych trafień.
7. Metoda wykorzystująca lokalne maksima wykazuje mniejszą sprawność gdy korona drzew przybiera spłaszczony, a nie stożkowy kształt (Tiede, Hoffmann 2006a).
8. Największym wyzwaniem jest określenie ilości drzew w dojrzałych drzewostanach liściastych. Pomimo niewielkiej liczby drzew, ich korony są bardzo silnie rozbudowane, a rozległe i przeplatające się nawzajem gałęzie są często interpretowane jako pojedyncze drzewa (Diedersshagen i in. 2003).

Gatunek drzewa

Oznaczenie gatunku drzewa w większości przypadków nadal odbywa się na podstawie zdjęć cyfrowych, głównie lotniczych. Doświadczenia z wysokorozdzielczymi obrazami rastrowymi nie są zbyt bogate, z racji bardzo krótkiego czasu dostępności do materiałów o rozdzielczości mniejszej niż 1 m. Dlatego umieszczono poniżej dla przykładu opracowanie dotyczące zagadnień segmentacji w oparciu o obrazy cyfrowe, gdyż często metody te są wykorzystywane w połączeniu z danymi LIDAR-owymi.

Klasyfikacja oparta na danych LIDAR-owy głównie oparta jest o różny przestrzenny rozkład punktów w zależności od gatunku drzewa. Pierwsze prace w tej dziedzinie oparte były głównie na poszukiwaniu różnic w wartości proporcji punktów ostatniego, pierwszego lub

jedyne echa w stosunku do wszystkich wysłanych punktów (Persson i in. 2006; Litkey i in. 2007). W zależności od budowy korony wartości te pozwalały na klasyfikację drzew w zależności od gatunku. Dalsze badania prowadzone w tej dziedzinie skupiają się obecnie na analizie surowych danych (Weinacker i in. 2004; Liang i in. 2007) i wykorzystaniu informacji o intensywności (Oerka i in. 2007).

Hajek (Hajek 2006) przeprowadził w programie eCognition segmentację obrazów IKONOS-2 o rozdzielczości 1 m - zdjęcia panchromatyczne i 4 m – zdjęcia wielospektralne. Metodę oparł na hierarchicznej obiektowej sieci założonej w obrazie, gdzie proces segmentacji odbywał się w 3-poziomym cyklu przy użyciu różnej skali dla każdego z nich. Kolejnym etapem było stworzenie dla każdego z gatunków (Db, Kl, Św, Md, Brz) sygnatur przestrzennych w oparciu o kolor, teksturę i tło. Lepsze o 10% wyniki, szczególnie w młodych drzewostanach, dała klasyfikacja przy wykorzystaniu obrazów panchromatycznych o rozdzielczości 1m (wyostrzenie obrazów barwnych o rozdzielczości 4 m).

Poszukując odpowiedzi na pytanie dlaczego drzewa iglaste charakteryzują się małą wartością intensywności odbicia promieni laserowych, postawiono tezę, że część promieni kilkakrotnie odbija się od różnych gałęzi, a dopiero potem powraca do sensora (Rautiainen i in. 2006). W celu zrewidowania tej idei posłużono się modelem łączącym w sobie określony (*parameterization*) czynnik LAI i prawdopodobieństwo ponownego dobiecia fotonu (*proton recollision probability*). Symulacje, w kanale NIR, przeprowadzone z wykorzystaniem modelu pokazały, że największe znaczenie dla poprawienia ich wyników uzyskano przez obliczenia zakresu rozrzutu odbić wewnątrz korony. Autorzy zalecają by przy budowaniu modeli spektralnych lasów strefy borealnej, duży nacisk położono na wymodelowanie hierarchicznej struktury koron (*hierarchic canopy structure*).

Koch wraz z zespołem (2006) dokonała podziału drzew na następujące trzy klasy: młode drzewa liściaste (wysokość < 20m), stare drzewa liściaste i drzewa iglaste. Wykorzystano w klasyfikacji, w programie TreesVis, informacje między innymi o kulistości, właściwościach odbiciowych i parametrach poprzecznych korony. Oprogramowanie wykazało dużą skuteczność w 74% prawidłowo dzieląc warstwę koron na wyżej zdefiniowane klasy. Według Autorów najważniejszymi parametrami mającymi wpływ na uzyskane wyniki były: kulistość, średnica korony oraz entropia.

W innej pracy wykazano przydatność danych LIDAR-owych – pierwszego echa w klasyfikacji gatunków drzew na liściaste i iglaste (Liang i in. 2007). Nalot skanerem laserowym przeprowadzono w drzewostanie będącym w okresie spoczynku wegetacyjnego. Następnie wygenerowano numeryczny model wysokościowy koron (CHM). Analizie

poddano zakres różnic w położeniu punktów pochodzących z pierwszego i ostatniego odbicia promienia laserowego. Założono, że pierwsze odbicie następuje w przypadku gatunków liściastych i iglastych w koronie. Ostatnie echo generowane jest w przypadku gatunków iglastych w koronie, a w przypadku drzew liściastych na powierzchni ziemi. Ostatecznie metoda osiągnęła dokładność na poziomie 90%.

Informacja o warstwie koron, zawarta w danych LIDAR-owych wzrasta wraz z gęstością punktów. Wykorzystanie takich danych w połączeniu z wysokorozdzielczymi obrazami cyfrowymi z założenia powinno dać dobre wyniki (Persson i in. 2006).

Zaproponowana metoda segmentacji opiera się na następujących charakterystykach:

- Przewidywane rozmieszczenie wysokości – względna wysokość pnia (C_b) określona była na podstawie skaningu laserowego jako stosunek pomiędzy oszacowaną wysokością pnia, a oszacowaną wysokością drzewa
- Odsetek poszczególnych rodzajów impulsów – określa gęstość koron. Udział pojedynczych odbić w koronie (P_s) i udział odbić w koronie (P_c) jako stosunek odpowiednio liczby odbić w koronie i liczby pojedynczych odbić w koronie do łącznej liczby wyemitowanych impulsów.
- Kształt koron – określony został przez wzór paraboli:

$$z = a(x - x_0)^2 + b(y - y_0)^2 + c$$

i dopasowany do chmury punktów powstałych na koronie drzewa. Następnie obliczono: średnią parametrów „a” i „b” (S_m), i proporcję pomiędzy minimalną, a maksymalną wartością obydwu parametrów (S_r) i RMSE (S_f)

- Intensywność odbić – obliczona została średnia wartość intensywności (I_m) z odbić.
- Skupienie odbić – użyto do jej określenia funkcji K (*K-function*) (K_r).

Metoda złożona jest z trzech etapów:

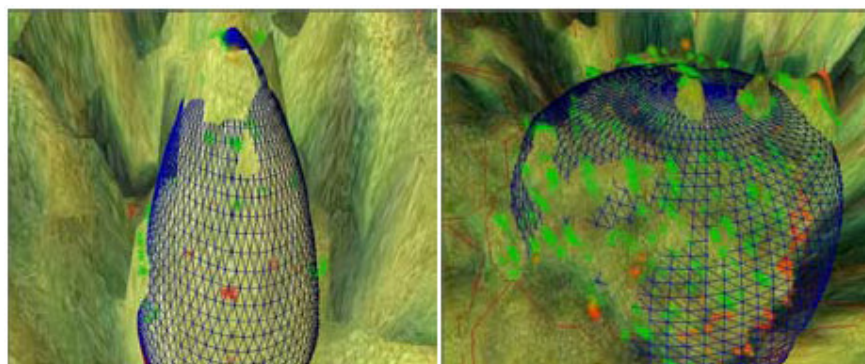
1. W pierwszym określa się zasięg poszczególnych koron drzew i oddzielenie ich od dolnych warstw w oparciu o dane LIDAR-owe. Wykorzystano do tego celu bryły przestrzenne (sfery), zdefiniowane przez promień „ α ”, uzyskane w triangulacji Delaunay-a. Dla wartości $\alpha \Rightarrow 0$ sfery odpowiadały kształtowi zbliżonemu do koron drzew. Po znalezieniu kształtu możliwe było określenie wysokości jej podstawy.
2. W drugim etapie uzyskiwane są informacje o wysokości drzew i powierzchni koron w oparciu o dane LIDAR-owe.

3. W ostatnim etapie wykorzystuje się łącznie dane LIDAR-owe i obrazy cyfrowe do określenia gatunku drzew.

Model drzewostanu uzyskany ze skaningu laserowego został dociągnięty do danych naziemnych. Proces ten pozwolił na późniejszą weryfikację wyników. Z analizowanych gatunków drzew świerk posiadał najbardziej symetryczną koronę i najbardziej pasował do zdefiniowanej parabolicznej przestrzeni (S_f). Proporcja pojedynczych odbić (P_s) była dobrym parametrem który wykorzystano do rozróżnienia drzew iglastych i liściastych lub innych grup gatunków. Przyjmowała ona wyższe wartości w iglastych co wskazywałoby na ich większą gęstość. Proporcja odbić z koron (P_c) posłużyła do odróżnienia sosny od pozostałych 2 gatunków. Zauważono, że generalnie drzewa iglaste mają większą wartość intensywności odbicia niż rzadsze drzewa liściaste. Świerki zwykle mają największą wartość intensywności odbicia. Dane LIDAR-owe okazały się bardzo ważne w procesie rozróżnienia sosny od świerka, a obrazy z kamery cyfrowej, w rozróżnieniu drzew gatunków iglastych od gatunków liściastych.

Jak dowiodły wcześniejsze badania w celu klasyfikacji segmentów do gatunku lepiej jest wykorzystać informacje spektralną z nasłonecznionych części koron (Lucas i in. 2006). Na podstawie 343 koron o znanym gatunku wyznaczono charakterystyki spektralne poszczególnych gatunków. Skuteczność tej metody określono na poziomie około 80%.

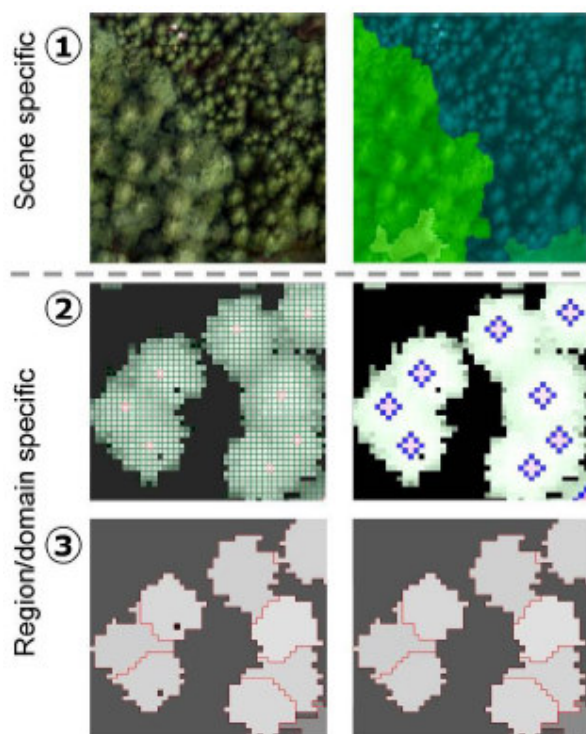
Wykorzystanie metody stopniowej liniowej analizy określania zasięgu korony, sprawdziło się w procesie klasyfikacji gatunków liściastych (Weinacker i in. 2004). W metodzie wykorzystywana jest informacja na temat rodzaju drzewa oraz parametrów przestrzennych korony. W oparciu o dane LIDAR-owe osiągnięto skuteczność określania gatunków liściastych na poziomie 80%. Autorzy zastosowali także w drugiej metodzie modelowanie oparte o ESQ (*extender superquadrics*) (rysunek poniżej).



Ryc. I.17 Drzewo iglaste (po lewej) i liściaste (po prawej) dopasowane przez ESQ (Weinacker i in. 2004).

Zdaniem autorów wymagane są wnikliwsze badania gdyż pierwsze wyniki wykazują duży potencjał wykorzystania modeli w segmentacji i klasyfikacji.

Założenia i wykorzystanie obiektowej metody segmentacji przy różnym poziomie klasyfikacji opisał Tiede z zespołem (2006b). Metoda charakteryzuje się tym, iż w pierwszej kolejności klasyfikacji poddawane są całe sceny, a dopiero w drugim etapie wydzielone, jednorodne pod względem struktury obszary dzielone są na mniejsze części (segmenty). W ostatnim etapie są one klasyfikowane.



Ryc. I.18 Kolejność etapów w metodzie: 1 – Segmentacja i klasyfikacja rodzajów drzewostanów przeprowadzana z „wysokiego pułapu”, 2 – rozpad przeklasyfikowanych obszarów drzewostanu na małe obiekty (tu poziom pikseli) i wydzielenie lokalnych maksimum. 3 – Wydzielenie pojedynczych koron drzew (Tiede i in. 2006b).

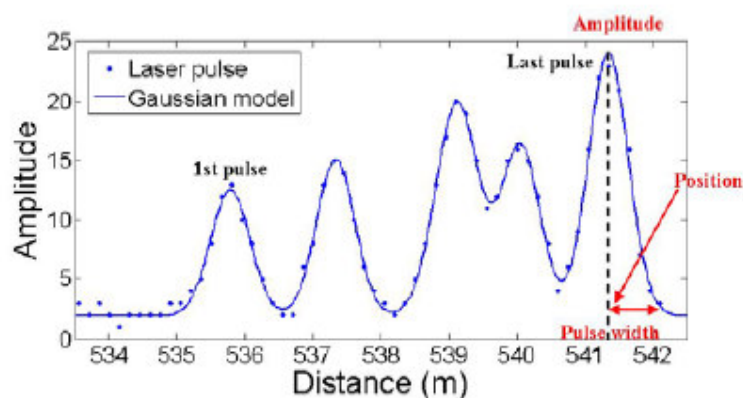
Dokładność metody wynosi około 75% dla wszystkich klasyfikowanych gatunków drzew, przy czym najlepsze rezultaty uzyskuje się dla iglastych (86%).

Całkowicie nowe możliwości klasyfikacji obrazu pojawiły się wraz z pojawieniem się na rynku skanerów *full waveform*. Ich wielką zaletą jest możliwość zapisu w sygnale informacji o rodzaju obiektu od którego sygnał się odbił.

Możliwości wykorzystania sygnału ze skanerów *full waveform* opisali szczegółowo badacze fińscy (Litkey i in. 2007), podając jako możliwe do wykorzystania w klasyfikacji następujące charakterystyki danych ze skanera laserowego:

- identyfikacja kształtu wierzchołka drzew – dzięki dużo większej ilości punktów opisujących jego powierzchnię
- wykorzystanie wartości poziomej i pionowej gęstości punktów
- wykorzystanie informacji zawartej w amplitudzie pojedynczego impulsu
- określenie profilu korony drzew na podstawie fali odbitych
- wykrycie pni drzew – dzięki bardzo dużej ilości punktów w porównaniu do tradycyjnych skanerów rejestrujących wyłącznie pierwsze i ostatnie echo
- powiązanie lotniczego skaningu laserowego z fotografią naziemną – jako bardzo wiarygodny materiał w interpretacji

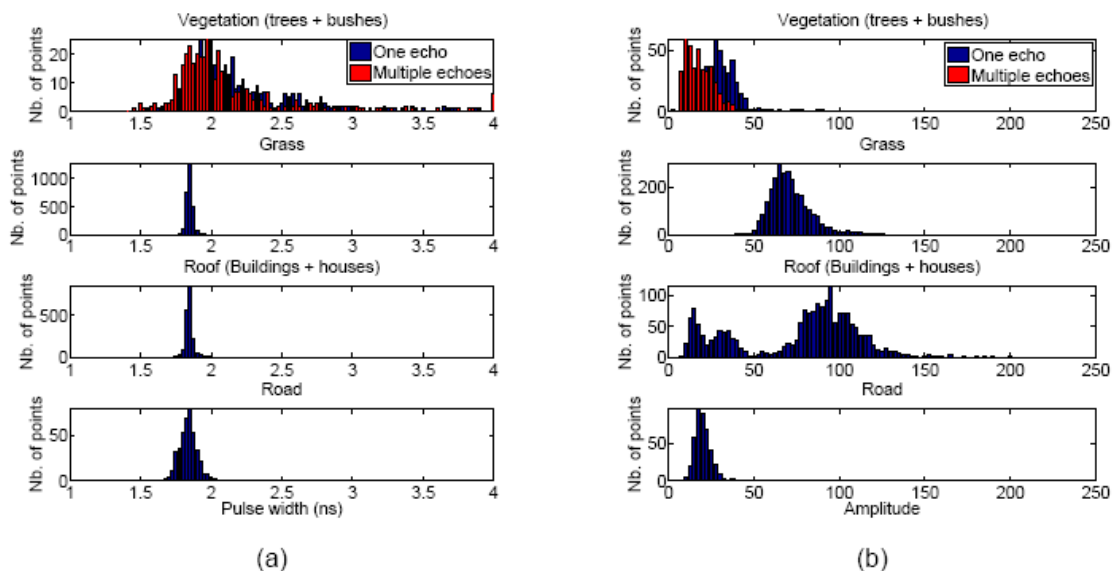
Amplituda, szerokość impulsu i liczba impulsów mogą być wykorzystane do odróżnienia roślinności od nie-roślinności bez użycia informacji o geometrii (Ducic i in. 2006). Amplituda została już wcześniej z powodzeniem użyta do wykrywania specyficznych konstrukcji (np.: roślinności lub budynków). Niestety roślinność posiada podobny zakres amplitudy do asfaltu dlatego też użyto dodatkowej informacji o szerokości pulsu by poprawić wyniki segmentacji.



Ryc. I.19 Przykład pomiaru w porównaniu do zobrazowania wyglądu fali (Ducic i in. 2006).

Przeanalizowano 5000 punktów by określić zakresy wyżej wymienionych charakterystyk dla poszczególnych obiektów. Na podstawie tych analiz określono zakresy dla których możliwe jest odróżnienie od siebie różnych obiektów. Jak widać z racji nakładania się wartości konieczne było wykorzystanie kombinacji różnych charakterystyk. Spośród 500 punktów poddanych klasyfikacji, 17 uznanych za nie-roślinność okazało się roślinnością, a 40 punktów

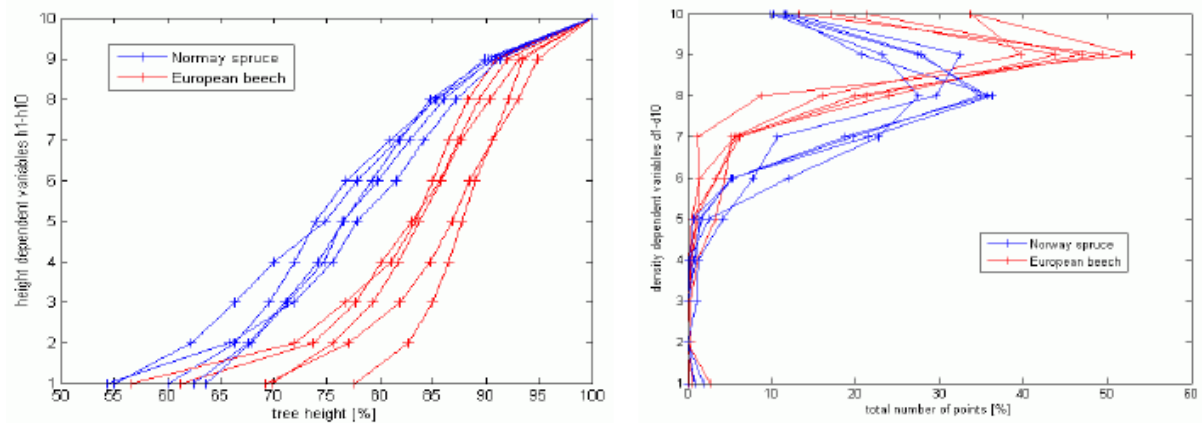
sklasyfikowanych jako wegetacja, nie było nią. Przyczyną większej ilości błędów przy punktach wegetacji były trudności w klasyfikacji punktów terenowych powstałych poniżej korony drzew. Inną przyczyną była błędna klasyfikacja punktów z krawędzi budynków.



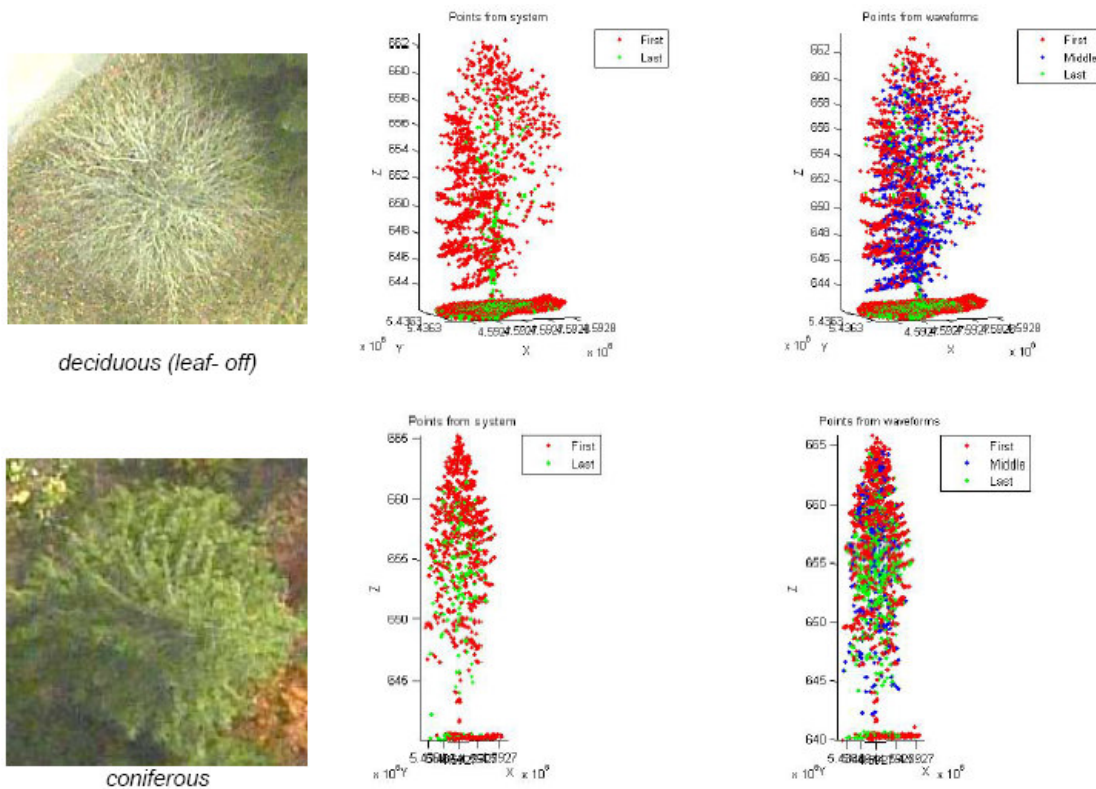
Ryc. 1.20 a - Histogram zakresu wartości szerokości impulsów punktów, b – Histogram wartości amplitudy punktów (Ducic i in. 2006).

Po kolejnych próbkach (>10000 punktów) ustalono dokładność metody klasyfikacji na poziomie 88,6 %, przy współczynniku korelacji Kappa = 0,8. Możliwość zapisu informacji w sygnale może w przyszłości pomóc w identyfikacji gatunku drzewa i poprawić wyniki klasyfikacji.

Pierwsze badania prowadzone są również nad tym czy możliwe jest określenie gatunku drzewa porównując tylko różnice w dystrybucji punktów na jego powierzchni (Reitberger i in. 2006a, 2006b). Po oddzieleniu sygnałów: pierwszego, ostatniego i środkowych, określono ich dystrybucję wzdłuż wysokości. Następnie zliczono ilość punktów dla 10% wysokości (h_{10}), 20% (h_{20}) itd. Porównując dystrybucję przestrzenną punktów pomiędzy świerkiem i bukiem możliwe było rozróżnienie tych gatunków między sobą. Oba gatunki możliwe były do rozróżnienia za pomocą współczynnika odbicia światła (Weihs i in. 2006). Dobrze znana jest wyższa wartość tego współczynnika dla buka.



Ryc. I.21 Wartość zmiennej zależna od wysokości (lewy wykres), wartość zmiennej zależna od gęstości (prawy wykres). Kolor czerwony - Buk zwyczajny, kolor niebieski - Świerk pospolity. (Reitberger i in. 2006a).



Ryc. I.22 Porównanie informacji o drzewie dostarczonych przez zdjęcie lotnicze (kolumna 1), tradycyjnym skanerem laserowym TopEye (kolumna 2) i skanerem full waveform TopEye MK II (kolumna 3) (Reitberger i in. 2006a).

W Norwegii przeprowadzono w ostatnim czasie badania nad wykorzystaniem wartości intensywności w klasyfikacji drzewostanu (Oerka i in. 2007). W badaniach wykorzystano

średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe z wartości intensywności sygnału odbitego. Charakterystyki te zostały określone dla pierwszego, ostatniego i jedyne go sygnału odbitego. Następnie dobierając różną liczbę różnych charakterystyk poddano badany obszar automatycznej klasyfikacji. Średnio jej wyniki przyjęły wartości od 60,3 do 74,1% dla wartości współczynnika korelacji Kappa = 0,49, przy czym spośród klasyfikowanych gatunków drzew najwyższą wartość uzyskano dla świerka – 87,2%

Podsumowanie:

1. Wykorzystanie danych pochodzących z okresów bezlistnych ułatwia segmentację obrazu na gatunki iglaste i liściaste.
2. Wykorzystując łącznie dane pochodzące ze zdjęć i skaningu lotniczego można oczekiwać lepszych rezultatów klasyfikacji niż przy wykorzystaniu tych danych osobno.
3. Wykorzystanie skanerów *full waveform* w dużym stopniu poprawia wyniki klasyfikacji.
4. Intensywność odbicia (*intensity*) przyjmuje dla gatunków liściastych wartości niższe niż dla gatunków iglastych, stąd może ona być pomocna w procesie klasyfikacji.

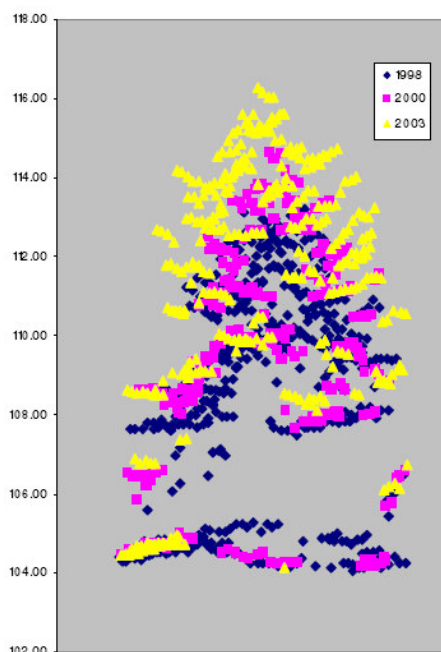
Określenie przyrostu wysokości drzewostanu w jednostce czasu

W celu oszacowanie przyrostu wyznaczone zostały, z dwóch oddalonych w czasie nalotów, następujące parametry drzewostanu, które zostały porównane między sobą (Gobbaken, Neasset 2004):

- Dystrybucja wysokości – wyznaczona z odbić laserowych zaklasyfikowanych jako wegetacja (>2m).
- Procent odbić laserowych dla 10% wysokości drzewostanu (h_{10}), 50% wysokości drzewostanu (h_{50}) i 90 % - (h_{90}).
- Maksymalna i średnia wysokość dla dystrybucji wysokości.
- Rozpiętość między najmniejszą (>2m), a największą wysokością podzielona została na 10 frakcji o jednakowej długości. Gęstość koron została następnie wyrażona jako proporcja odbić z poszczególnych frakcji do sumarycznej ilości odbić (>2m). Do dalszych analiz posłużyły frakcje: 1 (d_1), 5 (d_5) i 9(d_9).

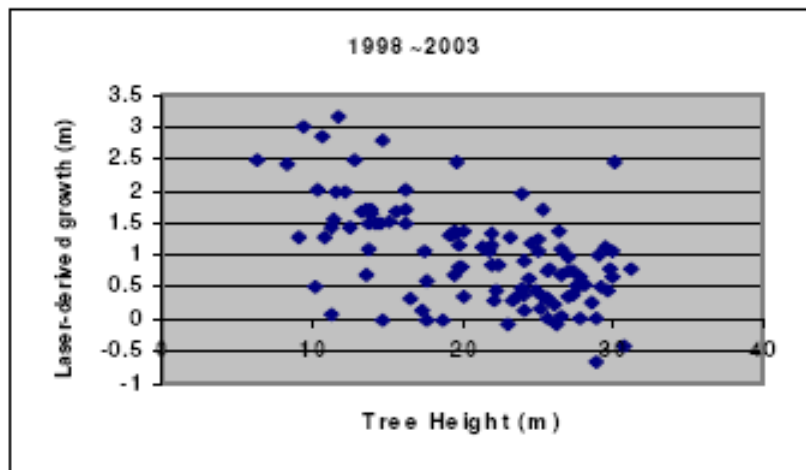
Następnie główne różnice w budowie drzewostanu pomiędzy danymi z 2001 i 1999 roku oparte zostały o wysokość i wartość przyrównanej gęstości, sprawdzono również jak rodzaj drzewostanu wpływa na relacje między frakcjami z obu okresów. Wyliczenia i statystyki oparto na testach „t” i „F”. Wyniki pokazały duże różnice w wysokości średniej jak i maksymalnej odpowiednio o 1,11 i 1,24 dla młodszego drzewostanu i 0,22 i 0,43 m dla starszego drzewostanu. Także gęstość w poszczególnych frakcjach była różna i wahała się od 0,01% do 0,11%. Stwierdzono iż udział procentowy odbić i średnia wartość pulsów z pierwszego odbicia była wyższa w danych z 2001 roku niż z odpowiadającymi im danymi z 1999 roku. Dlatego pewny pomiar gęstości może być odpowiedni do oszacowania przyrostu.

Określenie przyrostu można przeprowadzić również na podstawie różnicy w maksymalnej wartości Z i wysokości drzewostanu określonych dla 2 zestawów danych pozyskanych w pewnym odstępie czasu i porównaniu ich z danymi referencyjnymi zebranymi w pomiarach terenowych (Yu i in. 2005). Pozyskanie danych LIDAR-owych nastąpiło w latach 1998 (Toposys-1), 2000 (Toposys-1) i 2003 (Toposys-Falcon). Użyto skanerów o różnej czułości co wpłynęło na wystąpienie błędu systematycznego pomiędzy danymi z 2000 i 2003 roku (11 cm). Różnice w przyroście wynosiły odpowiednio 46 cm (lata 1998-2000) i 38 (lata 2000-2003). Autorzy zauważyli błędy w estymacji spowodowane różną dokładnością i czułością użytego sprzętu. Wynika to z rozwoju jaki nastąpił od pierwszego pozyskania danych.



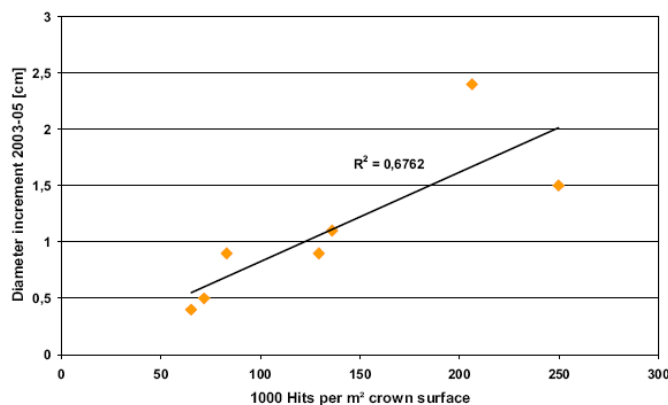
Ryc. I.23 Położenie punktów pozyskanych w kolejnych nalotach skanerem laserowym (Yu i in. 2005).

Poniższy rysunek (Ryc. I.24) obrazuje, że drzewa wyższe odznaczają się mniejszym przyrostem niż drzewa niższe i mniejsze, ponadto wyższe drzewa odznaczają się mniejszą zmiennością przyrostu.



Ryc. I.24. Oszacowany przy pomocy danych LIDAR-owych przyrost jako funkcja wysokości drzew (Yu i in. 2005).

Metodę określenia wielkości przyrostu w zależności od ilości otrzymywanej energii słonecznej zademonstrował Thies z zespołem (2006). Określili oni ilość energii słonecznej otrzymywanej przez poszczególne drzewa na podstawie korelacji ilości punktów LIDAR-owych pozyskanych z poszczególnych drzew z modelem padania promieni słonecznych. Przeprowadzone badania potwierdziły wcześniejsze hipotezy, że drzewa na które pada więcej promieni słonecznych mają większy przyrost (Ryc. I.25).



Ryc. I.25. Relacja pomiędzy przyrostem średnicy, a ilością otrzymanych promieni słonecznych (Thies i in. 2006).

Podsumowanie:

1. Wysokość maksymalna nie jest odpowiednią wartością do estymacji przyrostu, a przynajmniej nie w starszych drzewostanach sosnowych (Gobbaken, Neasset 2004).
2. Wnioski sformułowane przez Yu i zespół (2005) wskazują rozwiązania wpływające na poprawę wyników określania przyrostu drzewostanu:
 - Należy używać w kolejnych nalotach urządzeń o co najmniej podobnych parametrach.
 - Wykonanie nalotów w oparciu o ten sam plan daje duże prawdopodobieństwo tego, że drzewa „widziane” będą pod tym samym kątem.
 - Przyrost o wartości poniżej zera nie powinien być akceptowany.
 - Wartości przekraczające maksymalne i minimalne znane z nauki wartości mogą być estymowane z wysokości drzew.
 - Gdy niewymagana jest informacja o przyroście na poziomie drzewa, skrajne przypadki mogą zostać odrzucone.

Lokalizacja partii drzewostanów o budowie piętrowej

Określając strukturę pionową roślinności przy pomocy danych LIDAR-owych wykorzystuje się w badaniach przede wszystkim małą średnicę promienia laserowego i jego zdolność do penetracji otoczenia. Plamka średnicy kilkunastu centymetrów jest na tyle mała, iż nawet drzewostany liściaste w pełnym ulistnieniu nie są dla niej wystarczającą przeszkodą. Badania wykazały, że nawet do 20 % promieni jest w stanie przeniknąć ich korony. Dzięki takiej zdolności dane LIDAR-owe zostały wykorzystane do określania struktury występujących poniżej koron drzew niższych partii drzewostanu (Goodwin i in. 2007). W badaniach opisywano warstwę drzewostanu na wysokości od 0,5 do 4 metrów nad ziemią. Szacunki przeprowadzono na powierzchniach próbnych o wielkości 15×15 i 30×30m. Szacunki oparto na ilości i rozkładzie pierwszych pulsów na badanych powierzchniach próbnych. W efekcie porównania danych terenowych z wynikami estymacji uzyskano wysokie współczynniki korelacji odpowiednio $R^2 = 0.87$ dla powierzchni 30×30m i $R^2 = 0.68$ dla powierzchni 15×15m. Jak podają autorzy metoda nie może być zastosowana przy bardzo gęstych drzewostanach. W trakcie badań okazało się, że na jednej z powierzchni nie uzyskano pierwszego odbicia poniżej 0,5 m przez co przeprowadzenie analiz nie było możliwe.

Maltamo wraz z zespołem (2004b) w podobny sposób jak Naeset (2004) (opis 4.10) określił gęstość warstwy koron. Wykorzystał on dodatkowo algorytm HisMod do analizy czy rozkład punktów LIDAR-owych jest wielopłaszczyznowy czy też nie. Jeśli dane miałyby taką postać oznaczałoby to iż struktura lasu jest wielopiętrowa. Algorytm ten jest tak skonstruowany, że definiuje próg wysokości dla dominującej warstwy drzew. Inną ważną cechą jest możliwość grupowania podobnych danych wektorowych razem w „N” warstwach określonych wcześniej (np. na podstawie prac terenowych) (bardzo szczegółowy opis działania algorytmu podano w artykule). W opisywanych badaniach rozpoznano z dobrym skutkiem 2 istniejące warstwy w drzewostanie. Na 28 powierzchni próbnych, algorytm zakwalifikował poprawnie 24 do tych, które mają jedno lub dwu-warstwową budowę. Na podstawie uzyskanych danych zbudowano kilka modeli. Najlepsze wyniki dał model oparty o maksymalną wysokość drzew przytłumionych.

Czynnikiem mającym istotne znaczenie przy segmentacji obrazu jest jego budowa przestrzenna. Stąd Diederhagen wraz z zespołem (2004) najpierw poddał analizie warstwę punktów przy użyciu algorytmu ISODA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), który rozdzielał dane na warstwę niższą i wyższą, w oparciu o formułę minimalnej odległości. Jest to jedno z narzędzi programu ERDAS w dokumentacji którego podano więcej informacji na temat działania algorytmu. Autorzy zredukowali wiele odcieni szarości – klasy wysokości, do pięciu. Na podstawie tych klas obraz został poddany segmentacji nadzorowanej z użyciem klasyfikatora minimalnej odległości. Następnie w celu wygładzenia obrazów użyto maski 7×7 piksela i podzielono obraz na 2 warstwy, z których utworzono obrazy do dalszych analiz. Po doświadczalnym ustaleniu najlepszej wartości progowej każdy z tych obrazów osobno poddany został klasyfikacji. Wyniki porównano z przebiegiem granic oznaczonych przez taksatorów w terenie. Okazało się, że algorytm, w wielu miejscach, nie podzielił struktury w prawidłowy sposób. Było wiele miejsc gdzie różnice były znaczne. Jako przyczynę podano m.in.: wielogatunkowy skład wydzielen, różną strukturą luk pomiędzy drzewostanami, podobną wysokość i strukturę sąsiadujących drzewostanów o innym składzie gatunkowym. Zdaniem autorów wykorzystanie wielospektralnych obrazów rastrowych może dodatkowo wzbogacić informację i ułatwić identyfikację jednakowych partii drzewostanu.

Poza możliwością określenia wielopiętrowości drzewostanu dane LIDAR-owe wraz z zobrazowaniami wielospektralnymi mogą być wykorzystane w określaniu zasięgu pewnych zbiorowisk roślinnych lub konkretnych gatunków. Badania zasięgu bylicy odbyły się właśnie w oparciu o takie materiały (Mundt i in. 2006). Proces klasyfikacji zdjęć wspomagany był danymi wysokościowymi ze skaningu laserowego. Dodatkowo dane LIDAR-owe posłużyły

do określania struktury przestrzennej połaci krzewów. Skuteczność zastosowanej metody dała wynik pozytywny w 89% co określono jako bardzo satysfakcjonujący.

Podsumowanie:

1. Wykorzystując istniejące algorytmy możliwe jest automatyczne wyróżnienie części drzewostanów o strukturze piętrowej i poddanie ich osobnemu traktowaniu.
2. Nowe właściwości klasyfikacyjne skanerów *full waveform* powinny ulepszyć dokładność określania budowy przestrzennej drzewostanów.

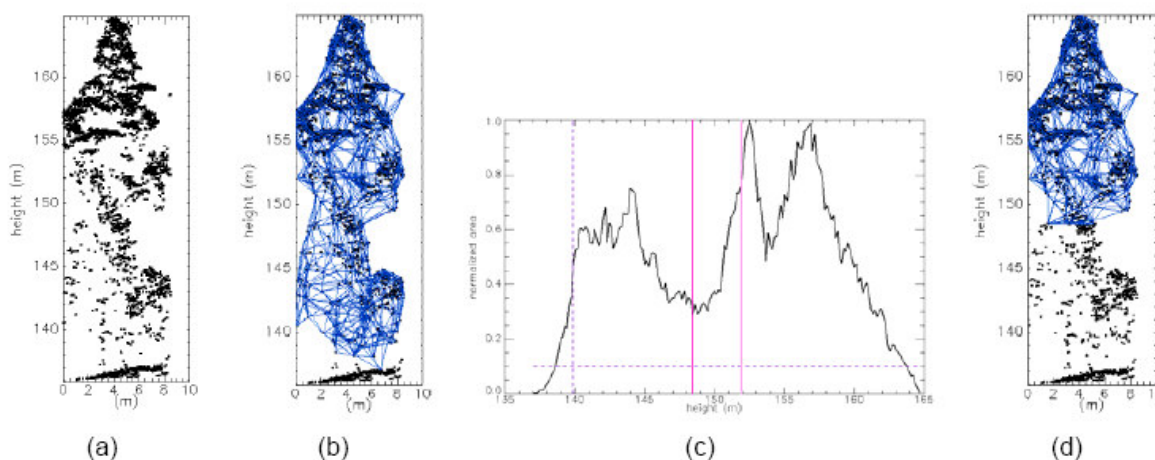
Parametry koron drzew

Wiele z pomiarów parametrów korony może być wykonanych bezpośrednio z obrazów rastrowych. Szerokość, odległość od centroidy czy powierzchnia są prostymi operacjami na obiektach wektorowych. Niektóre parametry wymagają jednak znalezienia korelacji pomiędzy wynikami pomiarów terenowych, a laserowym skanowaniem lotniczym (np.: wysokość korony) (Andersen i in. 2005).

Wykorzystanie algorytmu TIDA w określaniu parametrów korony opisana została przez Coopsa (Coops i in. 2004) (opis działania algorytmu). Przeprowadził on najpierw wyodrębnienie poszczególnych koron z chmury punktów, a następnie porównał wyniki szacunków ze zdjęć wielospektralnych i danych LIDARowych z danymi pozyskanymi z pomiarów terenowych (dane referencyjne). Uzyskane rezultaty były wynikiem bezpośrednich pomiarów obrazów rastrowych. Okazało się, że LIDAR wykazuje większą przydatność, a metody na nim oparte mniejsze błędy w trakcie estymacji. Ponadto ilustrował on pełniejszy obraz rzeczywistości niż zdjęcia lotnicze o rozdzielczości 0,5 m. Algorytm TIDA (biorąc pod uwagę wyniki wszystkich estymacji różnych obrazów) przeszacowuje wielkości koron, dlatego wyniki modelowania danych LIDAR-owych są mniej porównywalne z wynikami prac terenowych. W swej pracy autorzy sformułowali również postać równania regresji pomiędzy wysokością korony drzewa z pomiarów naziemnych, a jej szacunkiem z danych LIDAR-owych. Uzyskano wysoki współczynnik korelacji ($R^2=0,88$) dający optymistyczne wyniki przyszłych analiz tej cechy i jej możliwości pozyskania za sprawą danych LIDAR-owych.

Persson wraz z zespołem (Persson i in. 2006) używając triangulacji Delaunay-a otrzymał przestrzenne wzory (sfery) odpowiadające w przybliżeniu kształtom koron poszczególnych badanych drzew. Wykorzystał je następnie do określenia wysokości pnia i

wysokości podstawy korony drzewa. Jednocześnie oddzielił w ten sposób niższe partie drzewostanu od koron panujących drzew.



Ryc. I.26 Określanie wysokości podstawy korony. a – chmura punktów na sośnie, b – kształt zdefiniowany parametrem $\alpha = 1,5$, c – powierzchnia wzdłuż wysokości. Oszacowana (grubsza linia) i pomierzona w terenie (linia cieńsza) wysokość pnia drzewa, d - kształt zdefiniowany parametrem $\alpha = 1,5$ w oparciu o punkty powyżej oszacowanej wysokości podstawy korony (Persson i in. 2006).

Wykorzystanie modelowania dało wysokie wyniki określenia wysokości pnia drzewa na podstawie danych LIDAR-owych ($R^2=077$) (Andersen i in. 2005). W modelu użyto m.in. następujących charakterystyk:

- współczynnik zmienności wysokości
- wysokościowa dystrybucja punktów LIDAR-owych na różnych wysokościach
- procent pierwszych odbić z wnętrza korony

Podsumowanie:

1. Dane LIDAR-owe dostarczają lepszych danych o indywidualnych cechach koron niż informacje zawarte w kanale NIR zdjęć cyfrowych.
2. Dostarczane przez LIDAR dane na temat powierzchni korony są niedoszacowane gdyż graniczna część korony (złożona z końcowych cienkich gałązek) nie jest na tyle dużą przeszkodą by spowodować odbicie wiązki (Coops i in. 2004).
3. Mała średnica korony bardzo ogranicza możliwości pomiaru jej charakterystyk i zależy od rozdzielczości obrazu analizowanego.

Biomasa drzewostanu

Naesset (Naesset 2004b) wykorzystał dane LIDAR-owe w estymacji nadziemnej i podziemnej biomasy drzewostanów iglastych. W tym celu określone zostały następujące charakterystyki:

- Obliczono procent punktów dla 10% wysokości (h_{10}), 20% wysokości (h_{20}), ... i 90% wysokości (h_{90}).
- Przestrzenny rozkład wysokości stworzony został osobno dla pierwszego i ostatniego odbicia.
- Wyznaczono średnią wartość współczynnika wariancji pierwszego i ostatniego odbicia.
- Zakres wysokości pomiędzy najwyższym, a najniższym odbiciem (>2m) podzielony został na 10 frakcji. Następnie obliczono gęstość korony osobno dla pierwszego i ostatniego odbicia jako proporcję z liczebności punktów w poszczególnych frakcjach do całkowitej liczby punktów.

Powyższe charakterystyki wykorzystane zostały następnie w analizach statystycznych z wykorzystaniem modeli z wcześniejszych badań prowadzonych przez Lim-a i Anon-a (Naesset 2004b). Dla modelu do szacowania biomasy nadziemnej uzyskano współczynnik korelacji $R^2=0,92$, gdzie $RMSE=0,14$, a dla modelu do szacowania biomasy podziemnej – $R^2=0,86$, gdzie $RMSE=0,17$. Usunięcie wartości skrajnych nie poprawiło wartości współczynnika korelacji. O ile dokładność estymacji dla części nadziemnej nie jest zaskoczeniem, o tyle bardzo obiecujące są wyniki otrzymane dla masy podziemnej.

Straatsma (2005) wykorzystał w określaniu biomasy dwie metody. W pierwszej określał procent odbić powstałych na wegetacji pomiędzy wysokościami h_1 i h_2 (P). W drugiej metodzie wykorzystano wskaźnik powierzchni wegetacji – *Vegetation Area Index* (VAI), analogiczny do LAI z tym, że odpowiada powierzchni wegetacji w stanie bezlistnym. Po zbudowaniu odpowiednich modeli okazało się, że współczynnik P dał lepsze rezultaty i był mocniej skorelowany z wynikami pomiarów terenowych ($R^2=0,62$). Wskaźnik powierzchni wegetacji okazał się mało dokładnym w odniesieniu do rzetelnych analiz gęstości wegetacji ($R^2=0,37$). Wyniki pokazały ponadto, że VAI rośnie liniowo, zaś P maleje wraz ze wzrostem gęstości wegetacji. Ważne jest również poznanie w obu przypadkach całkowitej liczby wyemitowanych punktów.

Istotną z punktu widzenia gospodarki leśnej jest wiadomość o rozkładzie biomasy na powierzchni wydzielenia. Jedną z metod mogąca dostarczyć potrzebnych danych opiera się na

fuzji informacji dotyczącej pionowej i poziomej dystrybucji punktów LIDAR-owych (Holmgren, Wallerman 2006). Dane z wyników detekcji drzew, wariogramu i określenia rozkładu wysokości uzyskanych z LIDAR-a użyto jako wyjściowych w modelowaniu pokrycia powierzchni przez drzewa o różnej średnicy i wysokości. Do estymacji wysokości i średnicy pnia użyto pozornie rozłącznej regresji (SURE – *Seemingly Unrelated REgression*). Zauważono wysoką korelację pomiędzy pierśnicą i parametrami zlokalizowanych drzew, a wysokością (tab. I.28).

Tab. I.28 Korelacja pomiędzy procentem pomiarów naziemnych średnicy pnia, pomiarem naziemnym wysokości drzewa, wysokością z danych LIDAR-owych (LH) i wielkością korony (CS) (Holmgren, Wallerman 2006).

Percentiles		10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
Stem diameter	CH	0.12	0.47	0.46	0.59	0.75	0.87	0.90	0.90	0.92	0.91	0.46
	LT	0.72	0.68	0.80	0.82	0.86	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.46
	CS	0.76	0.77	0.82	0.81	0.84	0.91	0.92	0.92	0.93	0.92	0.48
Tree height	CH	0.15	0.52	0.57	0.62	0.80	0.93	0.96	0.96	0.96	0.96	0.54
	LT	0.70	0.68	0.79	0.84	0.89	0.97	0.98	0.98	0.97	0.96	0.55

Autorzy stwierdzili również, iż zwiększenie gęstości punktów na jednostkę powierzchni mogłoby pozytywnie wpłynąć na uzyskane wyniki korelacji. W przyszłości wskazane jest poprawienie wydajności wykorzystanych modeli, a także uzyskanie informacji o gatunku drzewa, by można je było zaimplementować w badaniach

Podsumowanie:

1. Szacowanie biomasy daje dokładniejsze rezultaty niż szacowanie tylko masy pni (Naasset 2004b).
2. Rozkład przestrzenny punktów jest bardzo wyraźnie skorelowany z gęstością biomasy.
3. Istotnym elementem estymacji biomasy na podstawie pokrycia punktami (pulsami) jest posiadanie informacji na temat całkowitej liczby wyemitowanych pulsów oraz ilości powstałych na powierzchni Ziemi odbić.

Defoliacja, stan zdrowotny, luki

Stan zdrowotny określany jest zwykle jako wypadkowa kilku mierzalnych cech. Dane pozyskane z wielospektralnych zdjęć (ASI – *Airborne Spectra Image*) wykorzystane w modelu mierzącym stężenie chlorofilu w połączeniu z masą listowia (uzyskaną z pomocą LIDAR-a) dostarcza informacji mogących co najmniej wskazać miejsca występowania jakiś zniszczeń (Solberg i in. 2004a). Ustalona została zależność pomiędzy bezpośrednim pomiarem chlorofilu w igłach dla poszczególnych drzew, a zakresem spektralnym. Przeanalizowano 160 kanałów i określono wartość współczynnika odbicia światła w zależności od długości fali. Użyto empirycznych modeli pomiędzy masą liści, a LIDAR-em i pomiędzy stężeniem chlorofilu, a danymi wielospektralnymi by dostroić rzeczywiste dane terenowe do każdego piksela zobrazowania satelitarnego (współczynnik korelacji osiąga wartość 0,9). W celu zlikwidowania wpływu cieni na zdjęciach wykorzystano dane z LIDAR-a. Określono równanie liniowe na określenie masy liści, pomiędzy indeksem LIDAR-owym (obliczonym dla każdego drzewa jako frakcja pierwszych odbić, które nie pochodziły z gruntu), a wielkością powierzchni korony. Stwierdzono korelację między tymi parametrami – $R^2=0,82$. Stwierdzono większy wpływ powierzchni korony na obliczanie masy liści. Indeks LIDAR-owy może dać pewien obraz jakości koron i ich ulistnienia. Gęste, zdrowe korony mogą być dzięki niemu odróżnione od tych z ubytkiem listowia. Jak stwierdzają Autorzy gęste dane LIDAR-owe dają bardzo obiecujące narzędzie do określania masy listowia i defoliacji drzewostanu.

Blaschke wraz z zespołem (2004), określił, które z punktów należały do drzew liściastych iglastych lub do martwych. Informacja ta tak może zostać wykorzystana np. w trakcie określania zmian w strukturze drzewostanu w wyniku działania czynnika stresującego.

Metodę określania dynamiki zmiany liczebności luk w drzewostanie opisał Nuske (Nuske 2006). Użył on dostosowania wartości granicznej mediany jako najlepszej wartości, do tego typu badań. Algorytm klasyfikuje daną przestrzeń jako lukę gdy jest ona niższa od wartości referencyjnej pomniejszonej o pewną wartość obliczoną z relacji z sąsiedztwem. Aby określić wartość referencyjną wyznacza się medianę z najwyższych wartości koron w obrębie założonego obszaru. Klasyfikacja oparta jest na rozmieszczeniu wartości wysokości w sąsiedztwie badanego obszaru. Efektywność metody była bardzo wysoka i jak się okazało tylko część najmniejszych luk nie została wykryta. Wykorzystanie jej do określania ilości luk po drzewach obumarłych po gradacjach, wyrwconych przez wiatr czy śnieg lub w wyniku innych czynników zewnętrznych może dać bardzo wiarygodne wyniki.

Zlokalizowanie luk po wyciętych (lub obumarłych) drzewach możliwa jest również dzięki porównaniu danych LIDAR-owych wykonanych w pewnym odstępie czasu (St-Onge i in. 2004, Yu i in. 2004b). Porównując dwa numeryczne modele powierzchni terenu, uzyskane w podobnych warunkach, możliwe jest określenie obszarów gdzie różnica wysokości jest większa niż założony próg. Miejsca takie określane są jako takie w których nastąpił ubytek drzew. Skuteczność metody w przypadku pierwszej warstwy koron była 100 procentowa (Yu i in. 2004b). St-Onge wykorzystał w swych analizach wysokościowe model koron w postaci rastrowej pochodzące z nalogów LIDAR-owych w 1998 i 2003 roku. Aby wykryć zmiany w budowie drzewostanu wykorzystał następujący wzór:

$$G(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } CHM98(x,y) \geq 10 \text{ m AND } CHM03(x,y) < 10 \text{ m} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

gdzie: CHM 98 – to wysokościowy model koron z 1998 roku

CHM 02 – to wysokościowy model koron z 2003 roku

oraz sformułował następujące założenia:

- korona powinna mieć co najmniej 5 m²
- obiekt, by był wiarygodny, musiał być reprezentowany przez co najmniej 3 punkty

Porównanie wyników automatycznej operacji ze zdjęciami satelitarnymi pokazało bardzo wysoką skuteczność prezentowanej metody, która osiągnęła 96%. Autorzy pokusili się również o określenie struktury tych luk, określając jaka ich część odnosiła się do wypadnięcia jednego czy większej ilości drzew. Pokazano dzięki temu wiele możliwych zastosowań chociażby analizie wzrostu drzewostanu, tworzeniu modeli dynamiki rozmieszczenia luk i gniazd czy analiz ekologicznych. Dzięki takim porównaniom możliwe jest również np.: śledzenie dynamiki rozwoju czynnika stresującego czy określenie efektów jego działania. Problem posiadania danych pozyskanych w pewnych odstępach czasu, w najbliższej przyszłości powinien być już sprawą marginalną jeśli okresowa inwentaryzacja drzewostanu będzie oparta również na danych LIDAR-owych.

Stone i Coops (Stone, Coops 2004) wykorzystali wielospektralne zdjęcia lotnicze w badaniach dotyczących uszkodzeń drzewostanów spowodowanych żerem owadów. Sprawdzając rezultaty barwne uszkodzeń w drzewostanach eukaliptusowych stwierdzono, że korony zdrowe odwzorowują się na czerwono lub pomarańczowo, a korony uszkodzone na ciemno-zielony. Autorzy zwrócili także uwagę na duże możliwości drzemiące w danych LIDAR-owych. Przede wszystkim dane te pozwalają na bardzo dokładne oszacowanie

gęstości szaty roślinnej, jej poziomej struktury, a także biomasy. Szkody powodowane przez owady i inne patogeny, wpływają na parametry pozyskiwane z danych LIDAR-owych, przez co mogą one być dzięki tym danym identyfikowane.

Podsumowanie:

1. Jak dotąd ukazała się znikoma ilość publikacji na temat określania szkód powstałych wskutek żeru foliofagów.
2. Określanie deforestacji lub ubytku aparatu asymilacyjnego jest silnie skorelowane z wartością współczynnika LAI.

Zwarcie, pokrycie powierzchni

Parametrem na podstawie, którego można określić zagęszczenie jest określenie pokrycia powierzchni przez korony, a obserwacja wzajemnego położenia poligonów koron może posłużyć do określenia stopnia zadrzewienia. Wykorzystanie różnych metod (Sato, Teteishi 2004; Lucas i in. 2006) sprowadza się do określenia proporcji pomiędzy powierzchnią numerycznego modelu powierzchni terenu a numerycznym modelem terenu..

Porównanie wyników szacowania pokrycia procentowego roślinności przeprowadzono z wykorzystaniem danych LIDAR-owych oraz danych TERRA/ASTER (TERRA/*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*) o rozdzielczości 15-30m (Sato, Teteishi 2004). Obszar podzielony został na 5 kategorii w zależności od ukształtowania i wystawy terenu. Każda z kategorii charakteryzowała się różną roślinnością panującą. Dane LIDAR-owe posłużyły do określenia NMT i NMPT. Następnie określono procentowe pokrycie terenu przez proste równanie:

$$PROCENT\ POKRYCIA\ TERENU\ PRZEZ\ DRZEWA = (NMPT - NMT) / NMPT [\%]$$

Wynik tych estymacji uznano za dane referencyjne w porównaniach ze zobrazowaniami satelitarnymi. Najlepsze wyniki uzyskano analizując czerwony kanał gdzie granicę, w 256 stopniowej skali szarości, określono w przedziale od 24 do 27. Autorzy stwierdzili, iż po dopracowaniu metody może ona być stosowana na wielkich obszarach i z powodzeniem być wykorzystana do globalnej klasyfikacji pokrywy roślinnej.

Do określania pokrycia wegetacji używano również zdjęć wielkoskalowych (LSP – *Large Scale Photography*) (1:4000) i porównywano uzyskane wyniki z szacunkami

wykonanymi na danych LIDAR-owych (Tickle i in. 2006). Pokrycie koron interpolowano na zdjęciach lotniczych i podzielono na 4 kategorie leśne 10-30, 30-50, 50-70 i 70-100%, i jedną kategorię nieleśną 0-10% pokrycia przez korony. Poza tym, że możliwe było uzyskanie informacji o pokryciu, dane LIDAR-owe dostarczyły także pełnej informacji o strukturze wysokościowej. Pełna automatyzacja wszelkich czynności pozwoliła na co najmniej tak dobre jak prace terenowe określenie badanych parametrów. Autorzy rekomendują swoją metodę jako odpowiednią do przeprowadzenia podobnych szacunków rodzaju i struktury biomasy na obszarze Australii. Jest ona ich zdaniem tańsza o 90% od tradycyjnych metod naziemnych i o wiele łatwiejsza do przeprowadzenia.

Podsumowanie:

1. Podstawowym problemem przy określaniu pokrycia jest właściwe określenie zasięgu koron.
2. Automatyczne określanie pokrycia (zadrzewienia) powierzchni przez korony drzew jest tańsze oraz bardziej obiektywne, nie zależnie od indywidualnych preferencji taksatora w obecnie stosowanych metodach inwentaryzacji.

Określanie współczynnika LAI

Jedną z metod wyznaczania współczynnika LAI polega na oparciu się na współczynniku penetracji laserowej – *Laser Penetration Index (LPI)* (Barilotti i in. 2006). Wyraża się on proporcją punktów gruntu do sumy punktów gruntu i punktów powstałych w trakcie przechodzenia wiązki laserowej przez wysoką roślinność (>1m wysokości). Wartość LPI, obliczona dla rastra o wymiarach 1×1m, bliska „0” reprezentuje gęstą roślinność, a bliska 1 odpowiada otwartemu terenowi albo czystej ziemi. Danymi referencyjnymi były wyniki prac terenowych z wykorzystaniem LiCor 2000 *Plant Canopy Analyzer*. Wyznaczony współczynnik korelacji między danym indeksem LPI, a współczynnikiem LAI z pomiarów terenowych przyjął wysoką wartość: $R^2=0,89$ dla gęstości 2 punktów na m^2 . Przy podobnych analizach ale innej gęstości danych LIDAR-owych (1p/100 m^2) nadal dało się zauważyć bardzo dobrą korelację między wyznaczonymi współczynnikami ($R^2=0,61$). Ma to bardzo korzystne wyniki ekonomiczne gdyż dzięki temu możliwe jest szacowanie zapasu węgla i jego produktywności na bardzo dużych obszarach (Barilotti i in. 2006).

Wysoki współczynnik korelacji między danymi terenowymi a wynikami estymacji z użyciem danych LIDAR-owych uzyskał Solberg wraz z zespołem (2004a, 2004b). Użył on

empirycznych modeli pomiędzy masą liści, a danymi LIDAR-owymi i pomiędzy stężeniem chlorofilu, a danymi wielospektralnymi by dostroić rzeczywiste dane terenowe do każdego piksela zobrazowania satelitarnego (współczynnik korelacji osiąga wartość 0,9). Uzyskany przez niego współczynnik korelacji pomiędzy danymi terenowymi, a danymi LIDAR-owymi wyniósł 0,95.

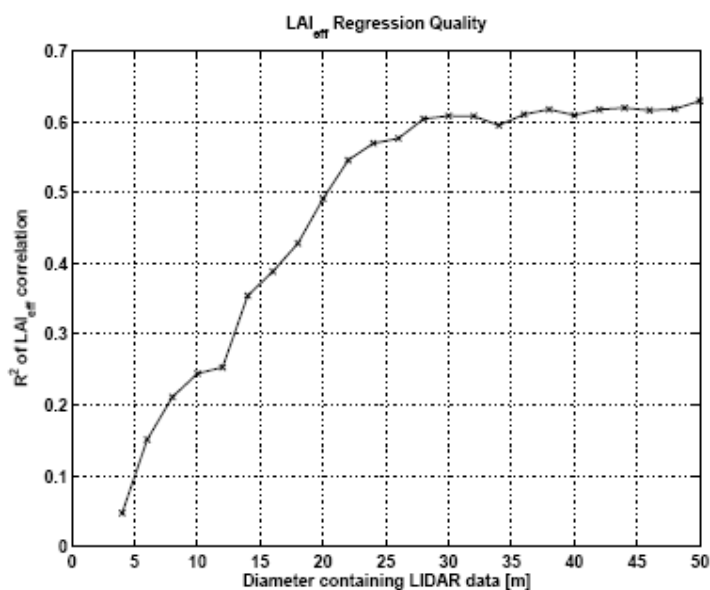
Określenie parametru LAI może odbyć się z równania regresji w oparciu o dane pochodzące tylko z metod fotogrametrycznych. Opisywana metoda (Morsdorf i in. 2005) wykorzystuje jako referencyjne zdjęcia hemisferyczne. Aby odnieść wyniki badań terenowych do uzyskanych danych LIDAR-owych, podzielono zbiór punktów LIDAR-owych w następujący sposób:

- pierwsze echo (F_{first})
- ostatnie echo (F_{last})
- ostatnie odbicie = pojedyncze echo, pierwsze odbicie (F_{single})

Następnie uzyskane zbiory posłużyły w równaniu szacującym wartość czynnika LAI (LAI_{prox})

$$LAI_{prox} = \frac{\sum E_{first}}{\sum E_{single} + \sum E_{last}}$$

Kolejnym etapem było określenie wielkości (powierzchni) surowych danych LIDAR-owych odpowiadających powierzchni odwzorowanej na zdjęciach hemisferycznych.



Ryc. I.27. Wykres przedstawiający zależność pomiędzy wielkością współczynnikiem korelacji określania parametru LAI, a średnicą danych LIDAR-owych (Morsdorf i in. 2005).

Na podstawie współczynnika korelacji (R^2) określono iż

poszukiwana średnica wynosi 30 m. Nie zauważono by po tej wartości współczynnik korelacji zwiększał znacząco swoją wartość.

Podsumowanie:

1. Wartość współczynnik LAI spada wraz z wysokością (Weihls i in. 2006).
2. Wśród homogenicznych drzewostanów jednogatunkowych można znaleźć różnice w wartości współczynnika odbicia światła.
3. Trudność w wykorzystywaniu współczynnika LAI do innych analiz (np.: zdrowotność gradacje) wynika z braku wielkości jego wartości na danym terenie, przed zaistniałym czynnikiem kłęskowym.

Określanie granic wydzieleń

Automatyczna segmentacja danych LIDAR-owych na klasy wysokościowe oraz obszary bezdrzewne i pokryte roślinnością jest już możliwa. Dodanie do tego informacji ze zdjęć lotniczych na temat rodzaju drzew dodatkowo wzbogaca informację oraz różnicuje obraz lasów danego regionu. W oparciu głównie o te charakterystyki możliwe jest określenie granic pojedynczych wydzieleń (Diedershausen i in. 2003, 2004; Koch i in. 2006; Straub i in. 2006). Ze zbioru danych usuwa się następnie drogi i inne obszary nie pokryte roślinnością. Jak pokazały wyniki udział człowieka w procesie klasyfikacji nadzorowanej, poprawia wyniki automatycznego określania zasięgu wydzieleń do ponad 70% poprawnych wyników. Przy dodatkowej edycji fragmentów granic uzyskuje się dokładność na poziomie 86% wszystkich granic znajdujących się w SIP-ie. Czas jaki zajmuje segmentacja automatyczna to 1 min, a cały proces łącznie z manualną edycją granic – 6 min (Straub i in. 2006). Należy przy tym zaznaczyć, iż porównywanie wyników także prowadzi do pewnych wypaczeń. Jak się okazało dane znajdujące się w systemie informacji przestrzennej nie były bezbłędne. Około 10% ich granic było niezgodnych z informacją znajdującą się na zdjęciach lotniczych. Reasumując, Autorzy stwierdzają iż ponad 85% granic wydzieleń może być określona na podstawie danych LIDAR-owych, klasyfikacji nadzorowanej i edycji manualnej (Straub i in. 2006).

Podsumowanie:

1. Homogeniczna budowa wydzieleń gwarantuje dobre wyniki automatycznego określania granic zadrzewień.
2. Sposób obróbki danych oraz użyte algorytmy mają duży wpływ na wyniki określania granic wydzieleń, stąd powinny być dopasowane do specyficznych warunków terenowych.
3. Wykorzystanie w analizach danych pochodzących z okresów bezlistnych, poprawia dokładność określania granic, szczególnie na styku drzewostanów liściastych i iglastych.
4. Utrzymanie w dobrej kondycji (przeciętych) dróg oddziałowych oraz wykonanie zgodnych z instrukcją urządzania lasu przecinek na granicach poszczególnych wydzieleń poprawi dokładność automatycznego określania granic wydzieleń.
5. Przebieg linii granicznych automatycznie określonych w procesie klasyfikacji ma bardziej skomplikowany przebieg w porównaniu do ręcznego ich oznaczania, ponieważ opiera się na kształcie koron drzew na granicy wydzielenia ([Diedershagen i in. 2003](#)).

3.6 Wymagania sprzętowe i możliwości zastosowania określonego oprogramowania

W trakcie przeglądu literatury wyszczególniono następujące oprogramowanie:

1. **ALTEXIS 2.0** – jest oprogramowaniem do kompleksowej analizy danych LIDAR-owych, oraz obrazów cyfrowych z poziomu lotniczego i satelitarnego. Możliwe jest w jego środowisku kalibrowanie danych z lotniczego skaningu laserowego oraz generowanie NMT za pomocą różnych algorytmów, identyfikacja obiektów geograficznych, automatyczna selekcja punktów oraz określanie parametrów drzewostanu. Możliwość łączenia różnych typów danych prowadzi do tworzenia map w czasie rzeczywistym (*Real Time Mapping*).
2. **ERDAS Imagine, Idrisi 32, eCognition** – różnego rodzaju oprogramowanie wykorzystane w klasyfikacji i filtracji obrazów cyfrowych oraz w innych zaawansowanych operacjach z obrazami cyfrowymi
3. **IMPACT** – oprogramowanie opracowane w *Institute of Digital Image Processing of Joanneum Research*. Wykorzystywane w analizach drzewostanu głównie do określenia miąższości drzewostanu na jednostkę powierzchni ([Wack i in. 2003](#)). Program przetwarza dane GIS, surowe dane ze skaningu laserowego i NMT.

4. **MVtec Halcon** - oprogramowanie wykorzystane do filtracji, segmentacji i klasyfikacji obrazów cyfrowych oraz par zdjęć stereo.
5. **Optech REALM** – jest kompleksowym oprogramowaniem do analizy i wizualizacji danych LIDAR-owych
6. **SCOP++**, produkt komercyjny firmy *Inpho GmbH* z Niemiec i Instytutu Fotogrametrii i Teledetekcji z Wiednia. Jest oprogramowaniem umożliwiającym filtrowanie, klasyfikację, kontrolę jakości i edycję danych LIDAR-owych. Jest oferowany przez *Inpho* jako pakiet LIDAR Box składający się z programów:
 - SCOP++ Kernel
 - stacji edycyjnej NMT - DTMaster
 - SCOP++ LIDAR, który umożliwia:
 - Filtrowanie danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego w celu automatycznej klasyfikacji „surowej” chmury punktów na punkty terenowe i poza terenowe, np. do wyboru punktów terenowych do dalszych przetworzeń NMT
 - Wydajne techniki interpolacji z możliwością elastycznego dopasowywania się do rodzaju terenu i typu jego pokrycia
 - Kontrolowany przez użytkownika, hierarchiczny proces wykorzystujący chmury punktów o różnych poziomach szczegółowości
 - Usuwanie błędów grubych z dowolnych zestawów danych NMT
7. **SURFEY** – oprogramowanie wykorzystywane do filtracji lokalnych maksimum w celu generacji NMT i NMPT.
8. **Terrasolid** (TerraScan Inc) – jest aplikacją pracującą w środowisku oprogramowania MicroStation. Możliwe jest jednorazowe analizowanie do 40 000 000 punktów. Jest uniwersalnym narzędziem do edycji, wizualizacji i klasyfikacji danych w zależności od potrzeb. Interfejs zbliżony do Windowsa pomaga łatwo poruszać się w aplikacji. Pełna wersja zawiera:
 - TerraScan
 - TerraMatch
 - TerraPhoto
 - TerraModeler
9. **TopPit** (TopoSys Processing and Imagine Tool) – klasyfikacja danych LIDARowych i generacja DTM, DEM, DCM. Poza tymi popularnymi funkcjami program

wykorzystywany jest przez firmy wykonujące skaniny LIDAR-owe i jego kompleksowe opracowania.

10. **TreesVis** – oprogramowanie wykorzystane m.in. przez Barbarę Koch ([Koch i in. 2006](#)) w trakcie określania parametrów drzewostanu. Zostało ono opracowane na uniwersytecie we Freiburgu. Umożliwia między innymi:

- generację DTM i DSM
- wyodrębnienie pojedynczych drzew i budynków
- pomiary i analizy pomiędzy dwoma dowolnie wybranymi punktami
- modelowanie budynków i drzew
- określanie granic drzewostanów
- tworzenie zrzutów ekranowych w formacie (BMP) oraz tworzenie filmów (format AVI)
- wizualizację obiektów wektorowych i wyników

11. **ArcInfo (ArcGIS)** – kompletne narzędzie do wszelkich analiz na obrazach rastrowych, wektorowych i 3D.

Poza tymi najważniejszymi i najczęściej używanymi programami było wiele innych. Opisywanie ich w tym miejscu nie wydaje się być celowe, ale warto wspomnieć o ich nazwach.

- **OrthoEngine** ([Nuske 2006](#))
- **Definiens eCognition** – jest to profesjonalne rozszerzenie eCognition ([Tiede, Hoffmann 2006a](#))
- **Virtuzo 3.5, Supresoft Inc.** ([St-Onge i in.2005](#))
- **MARA** ([Leckie i in. 2003](#))
- **Voronoi** ([Magnussen, Wulder 2004](#))
- **Individual Tree Crown suite** ([Leckie i in. 2003](#))
- **Environment for Visualizing Images (ENVI)**

Wydział Leśny SGGW posiada wiele z tych narzędzi (**Idrisi 32, eCognition, ERMapper, ArcGIS**). Nie ma jednak w swych zasobach programu dedykowanego typowo do pracy z danymi LIDAR-owymi.

Podsumowanie

Możliwości opisu drzewostanu przy pomocy danych LIDAR-owych nie kończą się tylko na wyżej wymienionych charakterystykach.

Ważnym elementem przestrzennym lasu są drogi. Stanowią one często granicę poszczególnych wydzieleń, a przede wszystkim udostępniają wewnątrz lasu spełniając bardzo ważne funkcje ochronne i gospodarcze. Prawidłowo założona sieć dróg powoduje prowadzenia optymalnej gospodarki leśnej oraz poprawia bezpieczeństwo przeciwpożarowe drzewostanu. Ostatnie doświadczenia pokazują wykorzystanie danych LIDAR-owych do automatycznego określania przebiegu dróg w środowisku leśnym (Straub i in. 2006). Dzięki temu że drogi przedzielają z reguły wydzielenia różniące się pod względem wysokości możliwe jest ich automatyczne wykrycie poszukując w porcji danych miejsc, krawędzi o dużych skokach wysokości. Wyniki także z terenu górzystego dały bardzo zadawalające rezultaty.

Danilin i Medvedev (2004) uzyskali bardzo dobre wyniki szacowania biomasy i parametrów drzewostanu. Badania prowadzili na obszarze Syberii, gdzie drzewostan charakteryzuje się prostą, jednopiętrową budową przestrzenną, a drzewa rosną w luźnym zwarciu. Dodatkowo jako danych referencyjnych użyto pomiarów dokonanych na ściętych drzewach. Trudno wyniki te porównywać z warunkami i wynikami panującymi w Niemczech, dają one jednak wyobrażenie o tym, że pewna część terenów leśnych może być w podobny sposób inwentaryzowana. Jednogatunkowe drzewostany iglaste i liściaste, rosnące na słabych borowych siedliskach mogą być przedmiotem inwentaryzacji prowadzonych wyłącznie metodami teledetekcyjnymi, jak pokazały rosyjskie doświadczenia z bardzo wiarygodnymi wynikami.

Wykorzystanie danych pochodzących ze skaningu lotniczego (wysokość drzew, średnica koron, ilość drzew, pionowa i pozioma struktura) wykorzystywane mogą być do identyfikacji i określania funkcji ochronnych lasu (Pitterle i in. 2006). Na tej podstawie certyfikuje się produkty pochodzenia leśnego. Na tle innych technologii teledetekcyjnych można przedstawić koszty pozyskania parametrów drzewostanu z danych LIDARowych przekładając je na efektywność ochrony (tab. I.29).

Tab. I.29 Ranking różnych metod teledetekcyjnych wykorzystywanych do pozyskiwania informacji o lesie w porównaniu do efektywności ochronnej (Pitterle i in. 2006).

	Costs (*)	Forest Parameters Relevant for Protection Efficiency							
		Tree Height	Crown Diam.	Crown Number	Crown Condition	Tree Species	Horizontal Structure	Vertical Structure	dbh
Analogue Aerial Photos (Scale 1:10.000)	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Digital Aerial Photos (Pixel Size 15 cm)	2	2	2	2	3	3	2	2	1
Ikonos-Type Satellite Image	2	1	1	2	2	2	2	1	1
Landsat-Type Satellite Image	3	0	0	0	1	1	1	0	0
Airborne Laser Scanner Data	1	3	3	3	1	1	3	3	1
Terrestrial Laser Scanner Data	0	1	1	2	1	0	2	1	3

*) per unit area

	For Costs	For Parameters
0	very high	unsuitable
1	high	moderate
2	moderate	good
3	low	very good

Istotnym elementem wykorzystywanym w modelowaniu rozprzestrzeniania się pożaru jest określenie masy materiału palnego koron drzew. W określeniu całkowitej suchej masy żywej i martwej materii można oprzeć się na wzorze sformułowanym przez Brown-a i Johnsona (Andersen i in. 2005). Zaletą metody jest możliwość jej skalowania do wielkości i średnicy koron w zależności od wieku. Uzyskiwane wyniki estymacji pokazują dużą sprawność metody ($R^2=0,86$) oraz pozwalają oczekiwać dobrych wyników modelowania przeciwpożarowego opartego o nie.

Porównując wyniki inwentaryzacji drzewostanu z wykorzystaniem zdjęć lotniczych w technologii 2D i metod fotogrametrii 3D oraz LIDAR-em należy zwrócić uwagę na 2 podstawowe wartości, mianowicie: koszty i dokładność. Metody 2D są tańsze szczególnie na małych powierzchniach. Jednak nie w momencie gdy odniesiemy się do powierzchni nadleśnictwa. Sama wielkość drzewostanów lokuje się tam na poziomie około 10000 – 15000 ha, czyli 100-150 km². Zrównanie się kosztów pozyskania danych fotogrametrycznych i danych teledetekcyjnych następuje na poziomie 20 km² (Holopainen, Talvitie 2004). Dokładność opracowań parametrów drzewostanu na podstawie danych LIDAR-owych i stereoskopowych zdjęć lotniczych jest wyższa od wyników uzyskiwanych w technologii 2D. Dodatkowo mają one szersze wykorzystanie.

Tab. I.30 Dokładność inwentaryzacji przy wykorzystaniu różnych metod (Holopainen, Talvitie 2004 na podstawie: Tokola i in. 1998, Uuttera i in. 2002, Korpela 2004, Naasset 2004b).

	<i>3D and laser scanning</i>			<i>Compartment-wise inventory</i>			<i>2D aerial photograph</i>		
	<i>Pine</i>	<i>Spruce</i>	<i>Birch</i>	<i>Pine</i>	<i>Spruce</i>	<i>Birch</i>	<i>Pine</i>	<i>Spruce</i>	<i>Birch</i>
d_{zM} (cm)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.18	0.20	0.20	0.23
h_{zM} (m)	0.04	0.04	0.04	0.15	0.15	0.18	0.20	0.20	0.23
n/ha	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.23	0.65	0.65	0.70
age (a)	0.20	0.20	0.30	0.25	0.28	0.25	0.20	0.20	0.30

Najbardziej ekonomiczną metodą wykorzystania lotniczego skaningu laserowego, zalecaną przez Autorów, jest oparcie się na podłużnych powierzchniach próbnych, o szerokości pasa równej szerokości danych z jednego przelotu LIDAR-a. Dodatkowo obszar ten mógłby zostać pokryty materiałem fotograficznym pozyskanym jednocześnie w trakcie skanowania. Doświadczenia pokazują, iż wykorzystanie podłużnych powierzchni próbnych, może poprawić dokładność określania parametrów drzewostanu w porównaniu do tradycyjnych powierzchni próbnych (Ene i in. 2007).

Badania nad możliwościami wykorzystania danych LIDAR-a w inwentaryzacji lasów europejskich prowadzone są już między innymi w Niemczech (Koch i in. 2006; Rossmann i in. 2007), Szwajcarii (Ginzler i in. 2007), a przede wszystkim w krajach skandynawskich (Hyypä i in. 2006; Maltamo i in. 2007; Naasset 2004a; Naasset i in. 2004c; Olsson 2004). Także w Polsce ukazały się pierwsze wyniki. Generalnie wyróżniono dwie podstawowe metody inwentaryzacji drzewostanu. Jedna bazuje na określaniu parametrów pojedynczych drzew (ang: *single tree detection*), druga opiera się na modelowaniu parametrów uzyskanych z powierzchni próbnych (ang: *area based modeling*) (Maltamo i in. 2007). Obie metody rozwijane są praktycznie na całym świecie. W tym momencie można stwierdzić, iż obie metody dają bardzo podobne wyniki estymacji miąższości drzewostanu, przy czym z ich pomocą można uzyskać dla niektórych cech drzewostanu dokładniejsze wyniki w porównaniu do tradycyjnie stosowanych metod taksacji naziemnej. W związku z tym można się spodziewać iż w przyszłości metody te będą zupełnie wiarygodną alternatywą dla inwentaryzacji z poziomu ziemi. (Maltamo i in. 2007).

Jak dotąd inwentaryzacja z wykorzystaniem danych LIDAR-owych wprowadzona została do praktyki leśnej w Skandynawii. Norweska firma Prevista zinwentaryzowała do 2005 roku już 100000 ha lasu, metodą, która jako podstawowe wykorzystuje dane LIDAR-owe (Prevista 2005). Na ostatniej prezentacji firmy na konferencji w Espoo (Finlandia, wrzesień 2007), można było dowiedzieć się, że inwentaryzacja z wykorzystaniem danych LIDAR-

owych objęła już ponad 20000 ha lasu. Uzyskiwane wyniki inwentaryzacji i koszty pozyskania obrazują poniższe tabele:

Tab. I.31 Porównanie dokładności uzyskiwanych wyników przez firmę Prevista (Prevista 2005).

Drzewostan	Metody tradycyjne	LIDAR
H	15-25%	5-10%
H100	15-25%	5-10%
G	20-30%	10-15%
Dg	25-35%	10-15%
V	15-30%	5-15%
łuki	23-30%	10-15%
% powierzchni inwentaryzowanej	10-20%	3-8%

Tab. I.32 Porównanie pracochłonności w dolarach na ha wykonywanych prac inwentaryzacyjnych przez firmę Prevista do tradycyjnych metod (Prevista 2005).

	Metody tradycyjne	LIDAR
Zdjęcia lotnicze	0,3	0,3
LIDAR	-	2,5
Pomiary terenowe/pow. próbne	4,2	0,6
fotointerpretacja	2,4	1,8
Obróbka danych	1,2	1,8
Plan gospodarczy	2,4	2,4
Koszty cząstkowe	10,5	9,4
NMT	3,0	0,6
Koszty całkowite [\$ / ha]	13,5	10,0

4 Możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie

4.1 Wstęp

Prowadzenie zrównoważonej gospodarki leśnej wymaga oparcia się o pełną i wszechstronną informację o lesie. Dlatego też współczesne urządzenie lasu musi w większym, niż dotychczas stopniu polegać na dokładnych metodach pomiaru lasu. Z jednej strony wymaga to doskonalenia statystycznych podstaw metod pomiaru, z drugiej zaś – stosowania nowych, dokładniejszych i wydajniejszych technik pomiarów drzew drzewostanów.

Od kilku lat pojawia się w leśnej literaturze naukowej coraz więcej prac dotyczących zastosowania skaningu laserowego (LIDAR –Light Detection And Ranging) do wspomagania metod pomiaru lasu. Większość opublikowanych prac związanych z technologią skanerową w leśnictwie dotyczy zastosowań skaningu lotniczego. Związane jest to przede wszystkim ze spodziewanymi korzyściami wynikającymi z zastosowania tej techniki. Szczególnie obiecujące są wyniki integracji danych zebranych z wykorzystaniem lidara z informacjami pochodzącymi z zastosowania innych technik teledetekcyjnych. Skaningu lotniczy pozwala na uzyskanie dość dokładnych informacji dotyczących obiektów leśnych na dużych obszarach. Sprawia to, że jeden z czynników ograniczających zastosowanie tej nowoczesnej technologii – jej cena – przestaje odgrywać kluczową rolę.

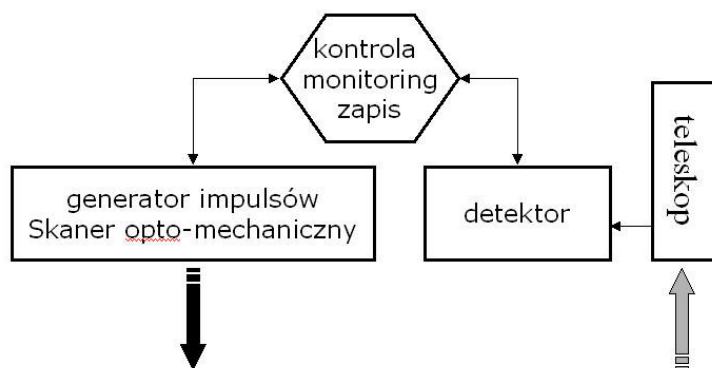
Jednak w ostatnich latach również technologia trójwymiarowego skaningu laserowego znacząco rozwija się i kolejne badania dowodzą przydatności tego typu skanowania lidarowego w leśnictwie (np. Frohlich i Mettenleiter 2004). Wydaje się jednak, że aktualny koszt zastosowania technologii ogranicza na razie jej zastosowanie wyłącznie do celów badawczych. Z tego powodu liczba prac dotyczących „terrestrial laser scanning” (TLS) czyli naziemnego skaningu laserowego jest w przypadku leśnictwa wielokrotnie mniejsza, niż w przypadku skaningu lotniczego (ALS).

Naziemny skaningu laserowy może znaleźć zastosowanie przede wszystkim przy określaniu cech pojedynczych drzew na powierzchniach próbnych. Dotyczy to przede wszystkim położenia drzewa w drzewostanie, grubości drzewa na różnych wysokościach (w tym pierśnicy), wysokości, wysokości osadzenia korony, liczby gałęzi i ich grubości,

uszkodzeń pnia itd. Skanowanie naziemne pozwala również na określanie cech dotyczących drzewostanu, przede wszystkim zagęszczenia drzew oraz cech związanych z aparatem asymilacyjnym (np. LAI). Dane pochodzące z zastosowania lidar naziemnego służyć mogą również do określania cech pochodnych (np. pierścieniowego pola przekroju czy miąższości drzew i drzewostanów) oraz do budowy modeli pozwalających na uzyskanie pełniejszej informacji o lesie (np. modeli kształtu podłużnego). Potencjalny zestaw danych możliwych do pozyskania na powierzchni próbnej za pomocą skanera laserowego daje znacznie większe możliwości określania cech drzew i analizy struktury drzewostanu, niż tradycyjne pomiary naziemne. Analizy wymaga jednak nie tylko dokładność uzyskiwanych wyników, ale przede wszystkim kosztów wykonania tych pomiarów.

4.2 Technologia skaningu laserowego (LIDAR)

Skanowanie laserowe, znane pod nazwą LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*), należy do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, wykorzystujących do obrazowania promieniowanie najczęściej z zakresu bliskiej podczerwieni, tzw. NIR (ang. *Near InfraRed*).



Ryc. I.28. Schemat działania skanera laserowego LIDAR

Dzięki temu LIDAR jest niezależny od warunków oświetleniowych, co oznacza, że obrazowanie skanerem LIDAR można dokonywać nawet w nocy przy braku światła słonecznego, gdyż urządzenie zasilane jest niezależnym źródłem energii.

W ogromnym uproszczeniu, LIDAR składa się z modułu generującego światło lasera (nadajnika; diody), systemu wirujących luster (zadaniem których jest równomierne „odchylenie” wiązki i tym samym jej rozrzucenie po obiekcie badań), teleskopu skupiającego promieniowanie powracające (odbite) oraz rejestrującego go detektora (ryc. I.28). Nadajnik i

detektor podlegają jednostce kontrolującej, sterowanej komputerem (Wężyk 2006). Oprogramowanie do obsługi skanera umożliwia dobór parametrów skanowania tj. częstotliwości generowania impulsu lasera oraz kąta uchylenia wiązki lasera. Odległość obiektów od skanera decyduje także o rzeczywistej wielkości plamki (ang. footprint).

Poza rejestracją odbitego sygnału (echa) tzw. pierwszego (FE – ang. first echo) lub ostatniego (LE – ang. last echo) nowoczesne skanery rejestrują także wartość intensywności (ang. intensity) odbitego sygnału. Parametr ten staje się coraz częściej obiektem zainteresowania ze strony użytkowników, choć do tej pory nie był konkretnie wykorzystywany poza wizualizacją chmury punktów (tzw. obrazy intensywności w skali szarości).

Większość skanerów naziemnych obecnie posiada zintegrowaną kamerę cyfrową dostarczającą wysokiej rozdzielczości obrazów. Zabarwienie chmury punktów LIDAR dokonywane jest na podstawie synchronizacji z obrazami z kamery cyfrowej (z obiektami szerokokątnymi) przez co obraz LIDAR staje się bardziej „realny”. Jednocześnie można dokonać udrapowania (ang. *draping*) obrazu z kamery na model 3D obiektu wygenerowany z chmury punktów (Haala et al. 2004).

Stosowane obecnie systemy LIDAR w zakresie skaningu naziemnego podzielić można wg kryterium generowania wiązki promieniowania, jej modulowania i interpretacji, tj. na (Sternberg i Kersten 2007):

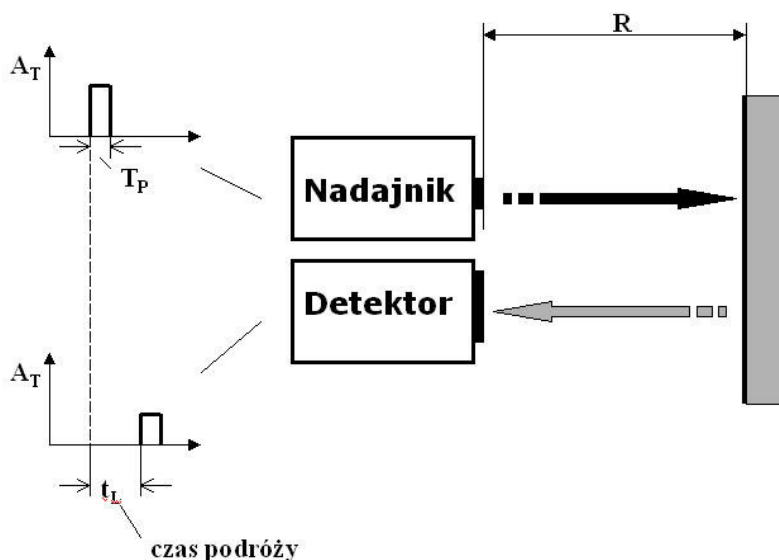
- systemy generujące „impulsy” promieniowania (ang. pulse ranging) określające odległość do obiektu na zasadzie pomiaru czasu (ang. *time of flight*) jaki upływa od wysłania impulsu do jego powrotu, oraz
- systemy tzw. fali ciągłej bazujące na przesunięciu i modulowaniu wysyłanej energii (ang. *phase difference* bądź *phase shift*).

Systemy „pulsacyjne” (Pulse ranging)

Generalnie, działanie skanera laserowego polega na pomiarze odległości urządzenia od badanych obiektów (np. pnia drzewa, konaru w koronie). W większości przypadków realizowane to jest poprzez pomiar czasu jaki upływa od momentu wysłania światła lasera do jego powrotu do detektora, po uprzednim odbiciu od powierzchni celu. Znana wartość prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej (w próżni wynosi 299792458 m/s) oraz zarejestrowanego czasu, pozwalają na obliczenie odległości obiektu od skanera. Urządzenie

poza czasem, rejestruje także kąt pod jakim wysyłana jest wiązka lasera (tą wartością można sterować). Powyższe parametry czasu i kąta odchylenia wiązki jednoznacznie pozwalają na wyznaczenie współrzędnych pomierzonych punktów w przestrzeni trójwymiarowej XYZ (wektora przestrzennego). Znając współrzędne skanera bądź też dowolnych pomierzonych punktów (z tzw. chmury punktów; ang. point cloud) cały pomiar można wpasować np. w Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych 1992 (PUWG 1992) lub system odniesienia WGS84.

Konwencjonalne rozwiązania polegają na użyciu lasera generującego bardzo silne impulsy światła głównie zakresu bliskiej podczerwieni (NIR) w niezmiernie krótkim czasie. Przykładowo urządzenie Leica ScanStation generuje do 4000 a TRIMBLE GS101 do 5000 impulsów na sekundę (Mechelke et al. 2007).

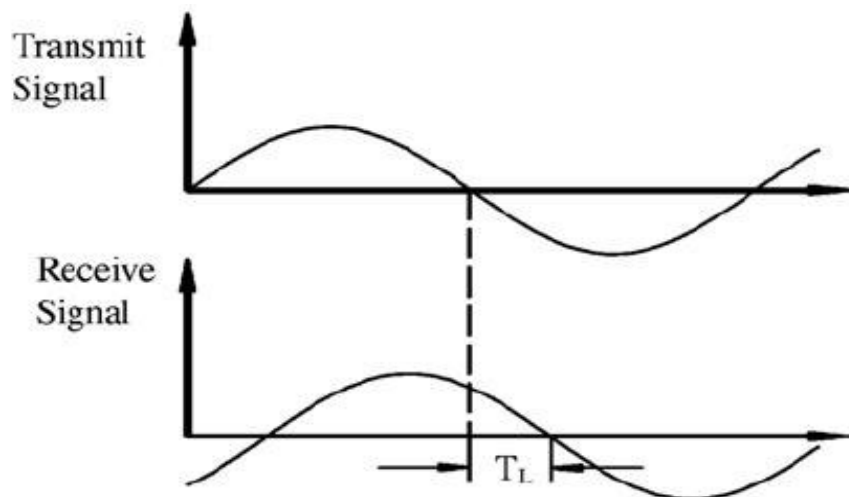


Ryc. I.29. Schemat ideowy działania skanera LIDAR generującego impulsy lasera (za Thiel i Wehr 2004)

Długość generowanego przez nadajnik impulsu T_p (ryc. I.29) determinuje rozdzielczość i dokładność pomiaru odległości R (Thiel i Wehr 2004). Rozdzielczość w przypadku „pulsacyjnych” systemów należy rozumieć jako rozróżnianie pierwszego i ostatniego odbicia (echa) od obiektu, tzn. minimalnej odległości pomiędzy pierwszym i ostatnim celem (np. pomiędzy ulistnioną gałęzią przesłaniającą pień drzewa).

Systemy fali ciągłej (lasera falowego) - continuous wave ranging („CW”)

W systemach typu „fali ciągłej” intensywność lasera jest modulowana odpowiednią funkcją np. sinusoidalną bądź wykładniczą. Modulacja obejmuje okres czasu (T_p). Laser emituje światło w sposób ciągły modulując średni poziom sygnału. Czas wędrówki (T_L) określany jest poprzez pomiar różnic w fazie pomiędzy wysyłanym a rejestrowanym sygnałem na detektorze (Ryc. I.30).



Ryc. I.10. Schemat modułowanej fali ciągłej i przesunięcia fazowego (za Thiel , Wehr 2004)

Ze względu na stosunkowo niską moc sygnału skanery typu „cw” mają ograniczony zasięg operacyjny do około kilkudziesięciu metrów (przykładowo konstrukcja FARO LS880 operuje do około 78 metrów). W bardzo krótkim czasie skanery typu „cw” są w stanie pozyskać kilkadziesiąt milionów punktów pomiarowych. Urządzenie IMAGER 5006 firmy Zoller & Fröhlich jest w stanie pozyskiwać do 500 000 punktów na sekundę a FARO LS880 do 120000 w tym samym czasie (Sternberg i Kersten 2007). Nie są one jednak w stanie rozdzielić sygnału pochodzącego z odbicia od wielu obiektów (poszczególnych ech sygnału) z powodu interpretacji przesunięcia fazowego na sygnale wspólnym.

Stosowane obecnie urządzenia do skaningu naziemnego mogą być klasyfikowane wg. różnych kryteriów, w tym m.in.:

- metody pomiaru odległości – większość z producentów sprzętu stosuje technologie pulsacyjnych skanerów (synonim ang. *time-of flight*), których dokładność określania

odległości jest ograniczona do około 5-10 mm. Niektóre urządzenia wykorzystują modulowanie fali („CW”) osiągając dokładności rzędu 1-3 mm. Wadą jednak tego typu urządzeń jest niewielki zasięg i dwuznaczność w interpretacji odbitego promieniowania,

- pola obserwacji – znaczna część producentów oferuje panoramiczne (ang. panoramic view scanners) obrazowanie 360° horyzontalnie oraz z kątem pionowej obserwacji 80° (np. Riegl Z420i) do 135° (a nawet 320°, np. FARO). Nielicznie oferowane są modele rejestrujące wiązkę lasera wewnątrz zdefiniowanego kadru (np. 60° x 60°), linia po linii (tzw. camera-like view scanners) jak w przypadku skanera ILRIS-3D (Optech),
- metody odchylenia wiązki lasera – LIDAR obrazuje powierzchnie obiektów sekwencyjnie, rozrzucając systematycznie wiązkę za pomocą zwierciadeł galwanicznych, rotujących eliptycznych luster, obrotu samego instrumentu, czy kombinacji wyżej wymienionych,
- maksymalnego zasięgu: od około 20 metrów – skanery typu CW, do ponad 1300 metrów – skanery „pulsacyjne” (np. Riegl Z420i),
- częstotliwości pracy lasera – liczby impulsów promieniowania wysyłanych przez urządzenie (od 2000 do 625000 na sekundę),
- rozdzielczości przestrzennej – tj. liczby punktów pomiarowych uzyskanych w skanowanym polu operacyjnym,
- integracji z kamerą cyfrową – wiele urządzeń posiada na stałe wbudowane kamery (np. ILRIS 3D – 6 mln pikseli) lub też posiada możliwość ich zamontowania (np. Riegl Z420i – Nikon 200D),
- sposobu przechowywania danych – zwykle dane są transferowane do przenośnych komputerów (np. Riegl) bądź też zapisywane na zintegrowanym z urządzeniem dysku twardym (FARO SL) lub przenośnym nośniku pamięci (ILRIS-3D).
- zakresu światła lasera – większość producentów wykorzystuje promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni (NIR 785 nm) np. Faro SL czy Riegl Z420i ale zdarzają się też rozwiązania ze światłem zielonym 565 nm (np. Trimble® GX™ 3D, czy Leica HDS 3000).

W przeciwieństwie do innych urządzeń geodezyjnych (takich jak TotalStation czy GPS) skanery laserowe nie doczekały się jeszcze konkretnych testów porównawczych

wykonywanych przez niezależne instytuty w celu potwierdzenia parametrów oferowanych przez producentów. Dodatkowo różne ww. rozwiązania techniczne wprost uniemożliwiają dokonywania takich porównań. Nie ma po prostu uniwersalnych skanerów spełniających wymagania konkretnych aplikacji, w tym stosowanych lub wprowadzanych właśnie w leśnictwie (Wężyk 2006).

Dostępne na rynku skanery naziemne posiadają różne, często odmienne specyfikacje i charakterystyki. Bienert i in. (2006a) podaje, że skaner laserowy odpowiedni do zastosowania w naziemnym pomiarze lasu powinien charakteryzować się następującymi cechami:

- możliwość panoramicznej rejestracji obrazu (360°),
- zasięg maksymalny 20-100 metrów,
- rejestracja co najmniej 10 000 punktów na sekundę (częstotliwość pracy min. 10 kHz),
- dokładność pomiaru nie mniejsza niż 10 mm.

Metody skaningu

Bienert i in. (2006b) wymieniają dwie metody pozyskiwania danych lidarowych:

- pojedynczy skan (single scan),
- wielokrotny skan (multiple scan).

W przypadku skanu pojedynczego skaner zbiera dane z jednej tylko pozycji, będącej środkiem powierzchni próbnej. W drugim przypadku mamy do czynienia z kilkoma pozycjami skanera (najczęściej trzema) znajdującymi się na obrzeżach lub wokół powierzchni próbnej.

Zarówno Bienert i in (2006b) jak i Thies i Spiecker (2004) podkreślają, że o ile pojedynczy skan pozwala na szybką i łatwą rejestrację drzew, o tyle niemożliwe jest w takim przypadku uniknięcie efektu cienia (całkowitego lub częściowego zasłaniania drzew dalszych przez te znajdujące się bliżej). Jako skanery najlepiej nadające się do takiego zastosowania wymieniają skanery skanujące pełną sferę (np. LS 880). Z kolei skanowanie z kilku pozycji zajmuje co prawda dużo więcej czasu ale zapewnia znacząco większą dokładność danych, wynikającą z nakładania się kilku chmur punktów oraz informacji o drzewach z więcej niż jednego kierunku.

Również Henning i Radke (2006) opisali technikę naziemnego skaningu laserowego oraz wskazali podstawowe problemy obróbki zebranych danych: zasłanianie obiektów

dalszych przez bliższe oraz różnice we współrzędnych uzyskanych dla różnych obrazów. Jako rozwiązanie tych problemów wskazują oni wykonanie zobrazowań z więcej niż jednego punktu oraz zastosowanie odpowiednich algorytmów znajdowania środka pnia drzewa, synchronizacji poszczególnych obrazów oraz pomiaru grubości, wykonywanych na podstawie nałożonych na siebie fragmentów drzew z różnych obrazów.

Opracowanie danych

Opracowanie danych zebranych przy pomocy naziemnego skanera laserowego może odbywać się automatycznie lub przy udziale człowieka. Największe szanse na praktyczne zastosowanie mają metody pozwalające na automatyczną identyfikację drzew oraz na automatyczne lub półautomatyczne wykonywanie pomiarów i analiz.

W wyniku zastosowania naziemnego skanera laserowego uzyskuje się dane o różnym charakterze (Aschoff i in. 2004). Są to:

- obraz intensywności,
- obraz odległości,
- trójwymiarowy obraz powierzchni próbnej.

Dane te – zanim staną się podstawą do określania poszczególnych cech drzew i drzewostanów – podlegają wstępnemu opracowaniu, mającemu na celu odfiltrowanie ewidentnych błędów a wykorzystującemu np. funkcje sąsiedztwa, w celu usunięcia odizolowanych grup punktów (Gorte i Pfeifer, 2004). Kolejne kroki opracowania danych obejmują:

- utworzenie NMT (numerycznego modelu terenu),
- automatyczne zidentyfikowanie poszczególnych drzew i ustalenie ich położenia,
- pomiary wysokości i grubości.

Bienert i in. (2006b) proponują generowanie NMT na podstawie rozmieszczenia i gęstości punktów wzdłuż osi Z, technika ta pozwala na eliminację punktów poniżej poziomu gruntu, powstających w wyniku zaburzeń technologii pomiarów fazowych (ang. ghost points). Na podstawie tych danych można utworzyć model terenu oraz znaleźć najniższy punkt drzewa (istotny z punktu widzenia pomiarów pierśnicy).

Identyfikacja drzew i określenie ich położenia

Podstawowym zadaniem automatycznego procesu analizy danych lidarowych jest identyfikacja poszczególnych drzew. Automatyczny proces identyfikacji drzew oparty jest

zwykle na analizie poziomych wycinków danych pochodzących ze skanera. W analizie danych stosuje się transformację punktów (np. dwuwymiarową transformację Hough-a) oraz wpasowanie łuków lub okręgów w grupy punktów (Aschoff i in. 2004). Grupę punktów przyjmuje się jako drzewo jeżeli promień łuku lub wpisanego okręgu jest większy, niż minimalna wartość graniczna oraz gdy odchylenie standardowe σ odległości punktów od łuku lub okręgu jest mniejsze niż ustalona maksymalna wartość σ_{\max} . Środek okręgu definiuje współrzędne zidentyfikowanego drzewa. Opisany powyżej sposób może być zastosowany zarówno w przypadku skaningu przeprowadzonego z kilku punktów (kiedy dysponujemy danymi definiującymi pełen okrąg), jak i do wyników pojedynczego skanu dostarczającego około 160° przekroju poprzecznego drzewa (Simonse i in. 2003, Hopkinson i in. 2004, Bienert i in. 2006). Z kolei Pfeifer i Winterhalder (2004) oraz Pfeifer i in. (2004) opisali metodę automatycznego wyodrębniania drzew z trójwymiarowej chmury punktów za pomocą dopasowywania kolejnych walców do pnia. Dopasowanie oparte było na estymacji wykonanej nieliniową metodą najmniejszych kwadratów.

Automatyczna identyfikacja drzew na podstawie skanów laserowych pozwala między innymi na określenie zagęszczenia drzew w drzewostanie (Hopkinson i in. 2004), a zatem stanowić może źródło informacji do stosowania modeli wzrostu jako narzędzi wspomagających pomiar lasu.

W literaturze raportowane są bardzo różne wyniki identyfikacji drzew na powierzchniach próbnych oraz określania ich lokalizacji. Bienert i in. (2006) podają, że wszystkie drzewa na powierzchniach próbnych założonych w lesie mieszanym na terenie Saksonii zostały poprawnie zidentyfikowane na podstawie skaningu wykonanego z dwóch pozycji. Hopkinson i in. (2004) uzyskali dokładność identyfikacji drzew na poziomie 95-97% oraz średnio 2-metrowe przesunięcie lokalizacji drzew. Z kolei Thies i Spiecker (2004) raportują stosunkowo niewielki procent drzew zidentyfikowanych na podstawie skaningu laserowego: dla pojedynczych skanów wyniósł on 22%, a dla wielokrotnego skaningu – 52%, a jednocześnie wskazują na bardzo dokładne określenie współrzędnych poszczególnych drzew. Wyniki te uzyskane jednak zostały na powierzchni próbnej założonej w drzewostanie mieszanym o złożonej strukturze pionowej, położonym na stromym stoku. Autorzy twierdzą, że w przypadku zastosowania skaningu laserowego w drzewostanach o prostszej strukturze, wyniki powinny być znacznie lepsze.

4.3 Parametry drzew możliwe do określenia za pomocą skaningu naziemnego

Wysokość drzewa

Przyjmuje się, że wysokość drzewa na podstawie danych ze skaningu laserowego określona jest jako różnica między położeniem najwyższego punktu należącego do chmury punktów definiujących drzewo a modelem terenu. Akceptuje się przy tym fakt, że wysokość ta może być określona z błędem wynikającym z co najmniej dwóch faktów:

- najwyższy punkt nie zawsze reprezentuje wierzchołek drzewa
- teren otaczający drzewo może być lepiej zdefiniowany, zwłaszcza w przypadku terenu mocno pofalowanego.

W gęstych drzewostanach wysokość jest elementem trudnym do bezpośredniego zmierzenia przy pomocy skanera. W takiej sytuacji często określa się wysokość drzew pośrednio, wykorzystując modele zbieżystości dopasowane do serii pomiarów grubości drzewa na różnych wysokościach oraz metody numeryczne pozwalające na znalezienie wysokości w sytuacji, gdy poszukiwana wysokość jest jednocześnie informacją wejściową dla modelu zbieżystości (Thies i Spiecker 2004, Aschoff i in. 2004).

W badaniach Bienert i in. (2006) różnice w pomiarach wysokości dwóch drzew wyniosły 0.22 m i 1.47 m, zaś średni błąd (RMS) dla czterech drzew wyniósł 80 cm. Autorzy wyrażają jednak wątpliwości związane z dokładnością danych referencyjnych, stąd na podstawie przytoczonych wyników nie można wyciągnąć żadnych wniosków. Thies i Spiecker (2004) określali wysokości drzew przy pomocy dopasowania modeli zbieżystości. Średnio wysokość drzew była większa o 7% od wysokości mierzonej wysokościomierzem. Jednak odchylenie standardowe określania wysokości równe 5.6 metra oraz poszczególne wysokości wahające się od 54.6 do 190.7% wartości rzeczywistej autorzy uznali za zbyt duże, by pomiary te zastosować w praktycznej inwentaryzacji lasu. Hopkinson i in. (2004) uzyskali wysokości drzew określone na podstawie danych ze skanera laserowego zaniżone średnio o 1.5 m, to jest ok. 7% średniej wysokości. Autorzy tłumaczą ten błąd niską gęstością próbkowania w górnej części warstwy drzew spowodowaną zasłanianiem obrazu wierzchołków przez niższe warstwy drzewostanu oraz parametrami zastosowanego skanera.

Pierśnica i grubości drzewa na różnych wysokościach

Pierśnicę drzewa oraz grubości drzewa na różnych wysokościach, w najprostszym przypadku, określić można ręcznie przy pomocy oprogramowania dostarczanego wraz ze skanerem.

Źródłem danych są w takim przypadku obrazy intensywności odbicia (Thies i Spiecker 2004). Proces automatycznego określania pierśnicy może wykorzystywać te same algorytmy, jakie są stosowane w procesie identyfikacji drzew przy pomocy wpasowywania okręgów (Simonse i in. 2003). Stosowane jest również wpasowywanie walca w wycinek chmury punktów wyodrębniony między dwoma przekrojami pnia położonymi poniżej i powyżej pierśnicy (Hopkinson i in. 2004). Określanie grubości drzewa na różnych wysokościach jest prostym rozszerzeniem określania pierśnicy drzewa (Aschoff i Spiecker 2004). Dysponowanie grubościami na różnych wysokościach umożliwia precyzyjne określanie miąższości drzewa oraz budowę modelu kształtu podłużnego (ang. taper model).

Bienert i in. (2006) podają, że odchylenie standardowe pierśnic drzew na powierzchniach próbnych założonych w lesie mieszanym na terenie Saksonii, uzyskanych przy pomocy zastosowanej procedury wpasowania okręgów, wyniosło 0.5 cm, a odchylenie standardowe różnic pomiędzy grubościami uzyskanymi ze skanera i przy pomocy średnicomierza wyniosło średnio 1.5 cm. Uzyskane grubości okazały się średnio za duże, co tłumaczyć można średnicą wiązki lasera; błąd ten może zostać w przyszłości wyeliminowany przez zastosowanie współczynnika korekcyjnego zależnego od odległości od drzewa i charakterystyki wiązki. Poza wyznaczeniem pierśnicy autorzy określili grubości pnia na różnych wysokościach, jednak nie została wykonana żadna analiza uzyskanych wyników.

Henning i Radke (2003) przetestowali dokładność określania grubości na różnych wysokościach pni drzew. Różnice między grubościami uzyskanymi z pomiaru średnicomierzem i na podstawie skaningu laserowego wahały się – w zależności od wysokości pomiaru – od +1,32 do - 2,76cm i wynosiły średnio (dla czterech drzew próbnych) od -1,56 do -0,36cm. Oznacza to, że wyniki uzyskane za pomocą skanera są – podobnie, jak w badaniach Bienerta i in. (2006) - średnio zawyżone.

Hopkinson i in. (2004) uzyskali dość dużą dokładność określania pierśnicy drzew na powierzchniach próbnych, bez żadnej tendencji do zawyżania lub zaniżania wyników. Zauważyli oni również paradoksalną sytuację: zmienność pomiarów wykazała, że na podstawie danych ze skanera laserowego trudniej było dokładnie określić pierśnicę w jednorodnym drzewostanie iglastym, niż w mocno zróżnicowanym mieszanym drzewostanie liściastym.

Thies i Spiecker (2004) opisali wyniki pomiaru pierśnic drzew na podstawie różnych wariantów skaningu laserowego. Największe różnice (od 82.3 do 109.5% - średnio -4.1%) zaobserwowali oni dla pierśnic uzyskanych na podstawie pojedynczego skanu. Nieco

mniejsze średnie różnice -3.5% (90-103.4%) otrzymali dla pierśnic określanych ręcznie na podstawie obrazów intensywności. Średnio najlepsze wyniki (1.3%) uzyskano określając pierśnice automatycznie na podstawie pięciu skanów, jednak zakres zmienności uzyskiwanych wyników był w tym przypadku bardzo duży (84.0- 111.6%).

Jednym z głównych źródeł błędów określania pierśnicy drzewa są błędy NMT, względem którego określa się wysokość położenia pomiaru. W celu wyeliminowania tych błędów, w wielu przypadkach przed wykonaniem zobrazowania powierzchni próbnej pierśnicę oznacza się taśmą, która jest dobrze widoczna na uzyskanym obrazie (np. Thies i Spiecker 2004). Wielu autorów podkreśla fakt, że wyniki porównań pomiarów pierśnicy, zarówno tych wykonywanych automatycznie jak i tych wykonywanych ręcznie są zazwyczaj niedoszacowane (Watt i in, 2003, Thies i Spiecker 2004). Autorzy tłumaczą to tym, że ze względu na kształt drzewa wiązka lasera dostarcza niedokładnych wyników pomiarów odległości i intensywności na zaokrąglonych brzegach pnia. Inną przyczyną może być kształt i wielkość samej wiązki lasera, której część będzie się odbijać od brzegu obiektu a część od obiektu znajdującego się z tyłu, przeliczona wartość będzie się znajdować pomiędzy wartościami tych dwóch odbić (Aschoff i Spiecker 2004). Poza tym z powodu położenia skanera względem obwodu pnia, tylko około 30% obrazu pierśnicy charakteryzuje się jednakową intensywnością odbicia, podczas gdy zewnętrzna jego część jest niejednorodna. Z kolei dopasowanie okręgu jest w większym stopniu zdeterminowane przez powierzchnię pnia położoną najbliżej skanera. Mimo to np. Thies i Spiecker (2004) uznają, że wyniki automatycznego pomiaru pierśnicy są satysfakcjonujące i zbliżone do wyników Hopkinsona i in. (2004) oraz Simonse i in. (2004).

Inne parametry

Poza podstawowymi parametrami jakimi są wysokość, pierśnica i grubości na różnych wysokościach, naziemny skanowanie laserowe umożliwia uzyskanie również innych informacji dotyczących drzew. Przykładem może być kształt pnia (Thies i in. 2004), jakość strzały (Schuett i in. 2004), czy struktura koron (Henning i Radtke 2006).

4.4 Integracja z innymi metodami

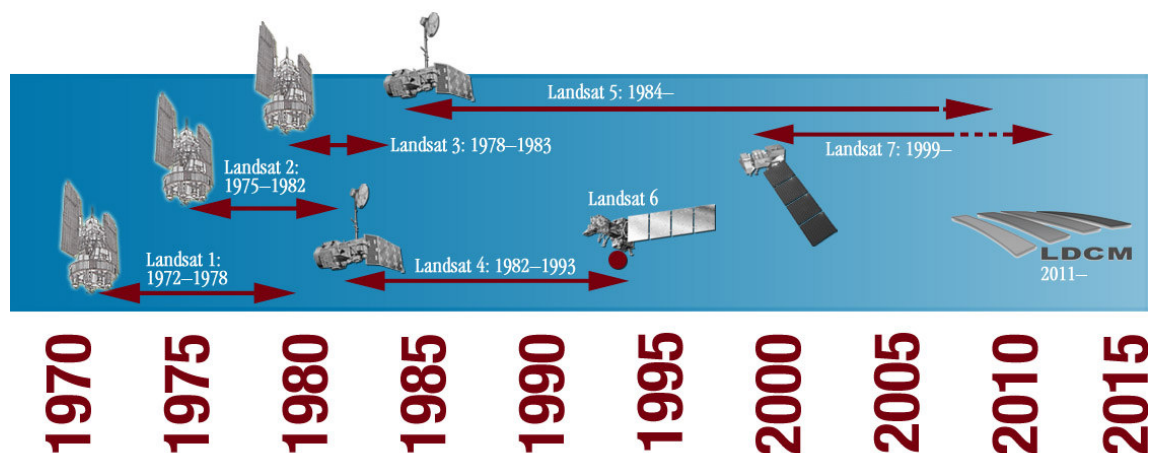
Uzyskane do tej pory wyniki badań nad zastosowaniem techniki laserowej do pomiaru lasu wskazują ponadto na zdecydowaną przewagę dokładności wyników uzyskanych z analizy wielu źródeł danych: tak różnych danych uzyskanych ze skaningu naziemnego (np. jednoczesne wykorzystanie informacji z obrazów intensywności i odległości), jak i danych ze

skaningu laserowego połączonych ze zdjęciami naziemnymi i lotniczymi, skanowaniem lotniczym i innymi technikami teledetekcyjnymi (np. Haala i in. 2004, Chasmer i in. 2004).

5 Wykorzystanie zobrażeń satelitarnych w inwentaryzacji lasu

5.1 Wstęp

Historia środowiskowych zastosowań zobrażeń satelitarnych sięga roku 1972, kiedy to Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej NASA (National Aeronautics and Space Administration – agencja rządowa Stanów Zjednoczonych) wprowadziła w przestrzeń kosmiczną pierwszego cywilnego satelitę nazwanego roboczo ERTS – 1. Zapoczątkował on serię satelitów (od 1 do 7), znanych później pod nazwą LANDSAT, z których ostatni (TM 7) w dalszym ciągu dostarcza wielospektralnej informacji o Ziemi (ryc. I.31). W latach 70 i do połowy lat 80-tych zobrażenia z tych satelitów były praktycznie jedynym źródłem obrazowych danych satelitarnych. Dopiero w II połowie lat 80-tych pojawiły się w przestrzeni kosmicznej kolejne komercyjne satelity dostarczające informacji o pokryciu powierzchni ziemi, w tym o środowisku przyrodniczym: francuski SPOT 1 (1986) oraz indyjski IRS (1988).



Ryc. I.31. Okresy aktywności satelitów LANDSAT. Źródło:

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/graphics/timeline-lg.jpg>

Pierwsze zastosowania zobrażeń satelitarnych dotyczyły mapowania pokrycia terenów lądowych (<http://www.fafnoscie.terramail.pl/satsrod.html>). Tworzone tą drogą mapy użytkowania wykorzystywane były w planowaniu przestrzennym, ochronie środowiska, i rolnictwie. Ponadto zobrażenia wykorzystywane były w badaniach wód przybrzeżnych – m.in. obserwacji procesów sedymentacyjnych w deltach rzek – oraz w geologii. Zastosowanie

kanału 7 satelity LANDSAT TM pozwalało bowiem na określanie struktur tektonicznych, analizę rodzaju skał i wyznaczanie granic pomiędzy nimi. Jednak najczęstsze zastosowanie zobrazowania satelitarne znajdowały i znajdują do dzisiaj przy określaniu stanu zasobów środowiska przyrodniczego i monitorowaniu jego zmian, m.in. przy ocenie wielkości biomasy roślinnej, wyznaczaniu zasięgów występowania różnych typów roślinności, czy wyróżnianiu obszarów uszkodzeń wywołanych czynnikami naturalnymi i antropogenicznymi. Dzieje się tak dzięki możliwości rejestracji przez wielozakresowe skanery satelitarne odpowiedzi spektralnej roślin, różniącej się w zależności od gatunku i od ich stanu zdrowotnego

Początkowo skanery satelitarne rejestrowały obraz tylko w kilku zakresach spektralnych (R – red, G – green, B – blue, NIR – near infrared) z rozdzielczością przestrzenną wynoszącą 80 m (np. LANDSAT) i służyły głównie do oceny zasobów i zmian zachodzących w środowisku przyrodniczym, w tym w powierzchni lasów. Stosunkowo niska rozdzielczość stanowiła barierę w ich zastosowaniu w precyzyjnej inwentaryzacji zasobów leśnych. Nie zmienił tego fakt zwiększenia rozdzielczości w kanale panchromatycznym do 15 m (LANDSAT), czy nawet 5 m (IRS) i 2,5 m (SPOT 5). Dopiero udostępnienie obrazów ze skanerów zamontowanych na satelitach QuickBird i IKONOS rejestrujących w bardzo wysokich rozdzielczościach (tzw. skanery VHRS, *ang. very high spatial resolution*), stworzyło nowe możliwości zastosowania tego źródła danych w inwentaryzacji lasu.

Obecnie oferta rynkowa zobrazowań wysokorozdzielczych obejmuje wspomniane wcześniej satelity QuickBird (max rozdzielczość przestrzenna w kanale panchromatycznym 0,61 m, a w kanale wielospektralnym 2,4 m) i IKONOS (odpowiednio 0,82 m i 3,2 m), a także OrbView-3 (1m/4m), KOMPSAT 2 (1m/4m), FORMOSAT 2 (2m/8m), Eros-A1 (1,8m/-) Eros-B1 (0,7m/-), CartSat (2,5m/-), KVR-1000 (1,4m/-), ResourceSat DK-1 (1m/3m). Na uwagę zasługuje również najnowszy satelita radarowy TerraSAR-X dostarczający informacji 3D z rozdzielczością 1m. Z grupy skanerów rejestrujących w niższej rozdzielczości, ale za to w wielu zakresach spektralnych, należy wymienić skaner hiperspektralny Hyperion, umiejscowiony na satelicie EO-1, posiadający zdolność rejestracji obrazów o rozdzielczości 30 m w 220 kanałach oraz skaner ASTER zainstalowany na satelicie TERRA, rejestrujący obrazy w zakresie promieniowania zielonego, czerwonego i bliskiej podczerwieni z rozdzielczością przestrzenną wynoszącą 15 m i jednocześnie w 6 kanałach z zakresu średniej podczerwieni o rozdzielczości 30 m oraz 5 kanałach z zakresu podczerwieni termalnej o rozdzielczości 90 m (Wolf F., 2006; Topan, Büyüksalih, Jacobsen, 2004;., www.geosystems.com.pl, Drzewiecki).

5.2 Możliwości zastosowania zobrażeń satelitarnych przy określaniu wybranych charakterystyk drzewostanów

Zapotrzebowanie na opracowanie alternatywnych, w stosunku do pomiarów naziemnych, metod inwentaryzacji lasu wynika głównie z dużej pracochłonności prac terenowych i związanych z nimi wysokimi kosztami. Poszukiwaniu tańszych metod nie sprzyjają obecne trendy społeczne - obserwuje się bowiem wzrost oczekiwań społecznych odnośnie dostępu do informacji o środowisku przyrodniczym. Aby spełnić te oczekiwania odpowiednie służby leśne, zamiast ograniczać zakres prac terenowych, muszą je poszerzać. To postulowane zwiększenie pracochłonności dotyczy głównie prac związanych z taksacją lasu, gdyż właśnie na tym etapie zbierane są informacje o bioróżnorodności ekosystemów leśnych. Taksacja jest podstawowym źródłem informacji o budowie drzewostanów, i w przypadku inwentaryzacji średniookresowej, pozyskane na tym etapie dane wykorzystuje się w procesie stratyfikacji drzewostanów w celu zaplanowania zadań związanych z inwentaryzacją zapasu, tj. ustaleniem liczby powierzchni kołowych w danych grupach i ich lokalizacją w terenie.

Dotychczasowe doświadczenia wielu krajów wskazują, że właśnie na etapie prac związanych z inwentaryzacją zapasu można szukać tańszych rozwiązań. Praktyka pokazuje, że wiąże się to na ogół z zastosowaniem zdalnych źródeł pozyskiwania danych o lesie, w tym przede wszystkim lotniczych i satelitarnych skanerów rejestrujących obraz w kilkukilkudziesięciu zakresach spektralnych. W dalszym ciągu są również podejmowane próby doskonalenia metod naziemnych, przy czym są one wspomagane danymi przestrzennymi generowanymi często właśnie przy wykorzystaniu danych teledetekcyjnych (np. w przypadku Polski – system informacyjny Lasów Państwowych, leśne mapy numeryczne).

O ile jednak w przeszłości zastosowanie w inwentaryzacji lasu zobrażeń satelitarnych pozwalało na uzyskiwanie satysfakcjonującej dokładności w odniesieniu do informacji o zróżnicowaniu wiekowym i gatunkowym jedynie na obszarach leśnych charakteryzujących się prostą budową drzewostanów (1-3 gatunki, duże arealy), jak np. w krajach skandynawskich czy Ameryce Północnej, to w przypadku krajów europejskich, w których przeważają drzewostany mieszane o dużym stopniu złożoności, informacje pozyskiwane tą drogą nie spełniały wymagań co do zakresu i dokładności pozyskiwanych informacji (Hyypä i in. 2000). Stwierdzono bowiem, że zobrażenia rejestrowane z rozdzielczością 10-30 m (SPOT i LANDSAT TM) mogą dostarczyć informacji o tych charakterystykach z dokładnością rzędu 65-85% (Holmgren, Thuresson, 1998), co jest

wynikiem dobrym w przypadku dużych kompleksów leśnych Ameryki Płn., ale nie w przypadku np. Polski, gdzie obowiązujący system inwentaryzacji umożliwia dostarczenie o wiele bardziej dokładnych danych. Do takich właśnie konkluzji doszedł zespół naukowców pod kierownictwem Bochynka (1998), który badając środowisko leśne Polski z wykorzystaniem obrazów satelitarnych Landsat oraz SPOT stwierdził, że materiały te nie mają praktycznego zastosowania w urządzaniu lasu, głównie ze względu na niską rozdzielczość terenową. Do końca lat 90-tych, zakres praktycznych zastosowań zobrażeń satelitarnych ograniczał się więc do mapowania obszarów leśnych, rejestracji zmian zachodzących w ekosystemach leśnych, korekcie podziału powierzchniowego oraz inwentaryzacji powierzchni uszkodzonej przez czynniki biotyczne i abiotyczne, takie jak np. owady, pożary, wiatry (Ahern, Horler, 1986). Dopiero wprowadzenie wielospektralnych zobrażeń satelitarnych o rozdzielczości przestrzennej poniżej 1 m sprawiło, że ponownie zwrócono uwagę na zobrażenia satelitarne, jako potencjalne źródło informacji przydatne w inwentaryzacji urzędzeniowej. Zobrażenia te niosły bowiem ze sobą duży potencjał w zakresie wyodrębniania i lokalizacji pojedynczych drzew (Wulder i in. 2002), co z kolei skutkowało możliwością określania wielu innych parametrów drzew i drzewostanów, takich jak: zagęszczenie drzew w drzewostanie, zwarcie koron, formy zmieszania gatunków, skład gatunkowy, a pośrednio także miąższość drzewostanów (Zajączkowski, Wężyk, 2004).

Liczne badania (np. Kayitakire i in. 2002, Vanderzanden i Morrison 2003, Hoffman i van der Vegt 2001, Halounova 2003, Furlan 2002, Moskal 2002), podczas których analizę spektralną obrazu wspomagano analizą obiektową, a następnie wdrożenia (np. Tuominen 2007, McRoberts 2008, Næsset 2007), wskazują na trzy sposoby wykorzystania danych satelitarnych w inwentaryzacji drzewostanów:

- określenie danej cechy bezpośrednio na podstawie analizy zobrażenia (np. zagęszczenie, gatunek),
- określenie danej cechy metodą pośrednią, tj. na podstawie istotnej zależności pomiędzy wartością mierzalną wyznaczoną dla drzewa lub drzewostanu na zobrażeniu (np. liczba drzew, gatunek), a wartością innego parametru (np. pierśnicowe pole przekroju, wysokość, zapas) przy zastosowaniu odpowiednich modeli rozwojowych drzewostanów,
- dostarczanie informacji wspomagającej etap stratyfikacji drzewostanów podczas prac inwentaryzacyjnych, co umożliwia ograniczenie liczby terenowych powierzchni próbnych oraz zwiększenie dokładności określania zapasu drzewostanów.

Jeszcze kilkanaście lat temu w wysokorozdzielczej informacji obrazowej, zarówno lotniczej jak i satelitarnej, dopatrywano się przyszłościowego źródła danych o wybranych charakterystykach drzew i drzewostanów. Metody bazujące na tych źródłach znajdowały zastosowanie w praktyce urzędniowej krajów skandynawskich i alpejskich. Jednakże obecnie największe oczekiwania w zakresie doskonalenia metod inwentaryzacji drzewostanów wiążą się z zastosowaniem technologii skaningu laserowego (np. Magnusson 2006; Lang i in. 2006). Świadczą o tym m.in. wdrożone już do praktyki leśnej metody inwentaryzacji bazujące na tej technologii w Norwegii, Finlandii czy Szwajcarii oraz liczne opracowania badawcze potwierdzające przydatność lotniczego skaningu laserowego w tym zakresie (*ang. ALS – airborne laser scanning*) (Zajączkowski i Wężyk 2007). Dane obrazowe są w tym przypadku traktowane jako pomocnicze i wykorzystywane głównie przy stratyfikacji drzewostanów (np. Brockhaus i Manry 2000; Magnusson i in. 2007). Jednym z głównych kryteriów stratyfikacji jest zróżnicowanie gatunkowe drzewostanów, a właśnie ten parametr może być określany przy wykorzystaniu lotniczych lub satelitarnych skanerów wielospektralnych. Pozyskana tą drogą informacja odnosić się będzie na ogół do udziału powierzchniowego, rzadziej ilościowego. Uwarunkowane jest to możliwością detekcji pojedynczych koron drzew na obrazie, a to z kolei uzależnione jest od rozdzielczości przestrzennej obrazu. Lokalizacja pikseli obrazu odpowiadających wierzchołkom koron jest bowiem możliwa tylko wtedy, gdy zdjęcie posiada dostateczną rozdzielczość, tzn. taką, przy której średnica korony odpowiada szerokości przynajmniej trzech pikseli obrazu (Wulder i in. 2000). Rozdzielczość terenowa (wymiar piksela na gruncie) standardowych zdjęć lotniczych, wynosząca ok. 10-30 cm (Mozgawa i in. 2001), jest zatem wystarczająca do prowadzenia analiz ilościowych zarówno w starszych, jak i młodszych drzewostanach. Natomiast rozdzielczość nawet najlepszych zdjęć z satelity Quickbird - ok. 60 cm - praktycznie uniemożliwia wykorzystanie ich do analiz pojedynczych drzew w drzewostanach I i II klasy wieku.

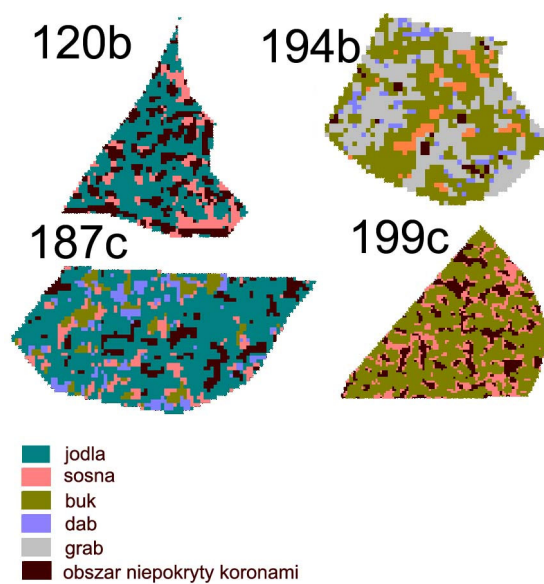
Określanie składu gatunkowego drzewostanów

Zastosowanie zobrazowań satelitarnych do określania powierzchniowego lub ilościowego składu gatunkowego drzewostanów, bazuje na możliwości rejestracji pasma widzialnego i bliskiej podczerwieni, w zakresie których obserwuje się wyraźne zróżnicowanie odpowiedzi spektralnej poszczególnych gatunków drzew. Skład gatunkowy określany jest na podstawie udziału powierzchni rzutu koron poszczególnych gatunków drzew występujących

w danym drzewostanie. Dodatkowo przestrzenne rozmieszczenie zarejestrowanych koron stanowić może podstawę do określenia formy zmieszania gatunków.

Początkowo podstawową metodą określania zróżnicowania gatunkowego drzewostanów na dostępnych w ubiegłym wieku zobrażowaniach LANDSAT, SPOT czy IRS, była pikselowa klasyfikacja obrazu. Polegała ona na analizie wartości spektralnej poszczególnych pikseli i łączeniu ich w jednorodne grupy, których liczba uzależniona była od stopnia zróżnicowania gatunkowego i wiekowego drzewostanów. Wyróżnia się klasyfikację nadzorowaną i nienadzorowaną. W pierwszym przypadku, dla obiektu testowego zakłada się na obrazie tzw. pola treningowe reprezentujące poszczególne gatunki drzew. Pozwala to na odszukiwanie tylko takich obszarów, które reprezentują określone gatunki. W przypadku klasyfikacji nienadzorowanej cały zakres spektralny dzieli się na pewną ilość klas, a otrzymany wynik obrazuje stopień zróżnicowania obiektu pod względem poziomu pochłanianego światła. W analizach można wykorzystywać ponadto nie tylko wartości liczbowe pikseli dla poszczególnych pasm, ale także ich różnego rodzaju transformacje (Gong i Yu, 2001) – np. wskaźnik wegetacji (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI = IR-R/IR+R*, gdzie *R* – kanał czerwony, *IR* - podczerwień).

Dla praktyki leśnej zdecydowanie bardziej przydatne okazało się stosowanie klasyfikacji nadzorowanej, na podstawie której można było uzyskiwać dokładności wyznaczania udziału poszczególnych gatunków rzędu 65-85% (Holmgren, Thuresson, 1998), czasem nawet większe, jak np. u Vohland i in. (2007) – 87,5%.



Ryc.I.32.

Wyniki klasyfikacji nadzorowanej dla wybranych wydziałów wielogatunkowych (Zajączkowski G., Wężyk P., 2004)

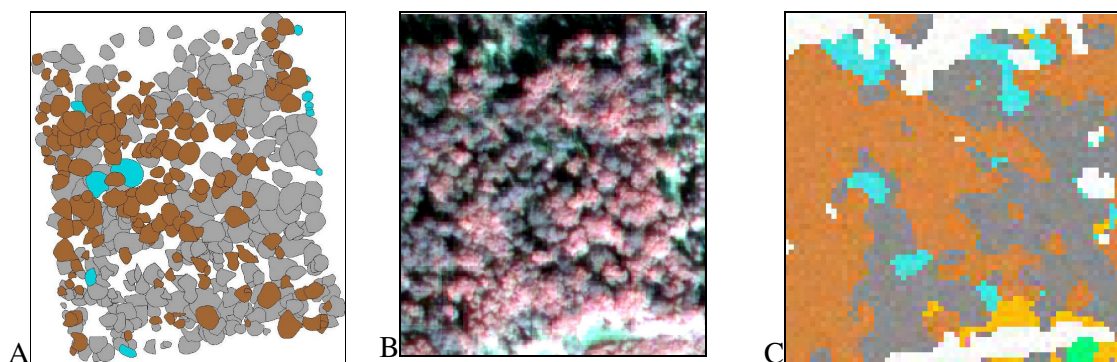
Częstym zjawiskiem w analizie składu gatunkowego było jednak niedoszacowanie udziału poszczególnych gatunków domieszkowych (Leckie i in. 2003), zdarzały się też przypadki niedoszacowania udziału gatunku głównego (Gougeon, 2000). Z drugiej strony, wymagania stosowanych w praktyce leśnej metod inwentaryzacji drzewostanów, określały minimalny poziom dokładności określania udziału poszczególnych gatunków w składzie gatunkowym na poziomie co najmniej 85% (King 2000), co w przypadku zastosowania metod klasyfikacji obrazów było wartością trudną do uzyskania. Jednocześnie zwrócono uwagę na fakt, że im większa jest rozdzielczość zdjęcia, tym większa staje się też obserwowana zmienność obrazu, a tym samym i liczba klas niezbędnych do jej odwzorowania z założoną dokładnością. Zbyt duża liczba klas zmniejsza bowiem przejrzystość klasyfikacji. Z tego powodu przy analizach obrazu należy wskazywać pewną optymalną rozdzielczość zdjęcia dla danych zastosowań. Np. Levesque i King (2003) wskazali na rozdzielczość przestrzenną 0.5 m jako odpowiednią do różnicowania gatunków na obrazie. Odpowiada to rozdzielczości zdjęć lotniczych w skali ok. 1:30 000 i jest bliskie rozdzielczości zobrazowań QuickBird. Doświadczenia wskazują, że gdy liczbę i cechy klas ustala się jedynie na podstawie pożądaných kryteriów gospodarczych, to prawie zawsze nie są one adekwatne do dostępnej rozdzielczości czy założonego kosztu gromadzenia danych treningowych (King 2000).

Zastosowanie zobrazowań VHRS oraz zdjęć lotniczych do określania składów gatunkowych drzewostanów, oprócz głównej zalety, jaką jest możliwość identyfikacji pojedynczych koron drzew, niesie ze sobą również pewne ograniczenia spowodowane dużym uszczegółowieniem obrazu, co z kolei może skutkować błędami w pikselowej klasyfikacji obrazu. Rozwiązania tego problemu należy szukać w obiektowych metodach analiz, w których najpierw wydzielane są na obrazie obiekty, a następnie w obrębie ich zasięgów odbywa się klasyfikacja nadzorowana. (King 2000, Kim, Madden 2006, Alvarez i in. 2006). Wyniki badań dotyczących analiz spektralnych koron wskazują, że opieranie się tylko na rastrowej strukturze danych oraz cechach pojedynczych pikseli jest niewskazane, ponieważ w małym stopniu pozwala to na uwzględnianie innych informacji o całych koronach, jak np. wymiary, kształt i zagęszczenie koron oraz o warunkach siedliskowych, wysokości drzew, ekspozycji terenu itp. Zamiast tego autorzy proponują prowadzenie analiz w odniesieniu właśnie do obiektów (plam barwnych), składających się z wszystkich pikseli w obrysie korony, przy wykorzystaniu technik zbiorów rozmytych (*fuzzy sets*), sieci neuronowych, analiz wielowymiarowych i modelowania tekstur - prawdopodobieństw przynależności obiektów do poszczególnych klas (np. King 2000, Levesque i King 2003, Erikson 2003, Brandtberg 2002). Już obecnie takie techniki pozwalają na praktycznie bezbłędne odróżnienie

drzew iglastych od liściastych (Halounova 2003), a wielu przypadkach – przy zastosowaniu lotniczych skanerów hiperspektralnych – także precyzyjne rozróżnianie poszczególnych gatunków drzew odwzorowanych na zdjęciach z poziomu lotniczego (Wertz 2003; Lumme 2004).

Wyniki realizowanych w ostatnich latach badań nad przydatnością wielospektralnych obrazów QuickBird do określania składów gatunkowych drzewostanów w polskich lasach (Zajączkowski, Węzyk 2004; Zajączkowski, Węzyk 2007; Zajączkowski. 2008), nie upoważniają do wdrożenia tego źródła informacji do praktyki urzędniowej. Wynikało to przede wszystkim z faktu licznego występowania drzewostanów wielogatunkowych, w tym w szczególności liściastych. O ile zastosowanie obrazów QuickBird pozwoliło na dosyć precyzyjne rozróżnianie gatunków iglastych (świerk, sosna, modrzew, jodła), to w przypadku gatunków liściastych stwierdzono wyraźne przenikanie się charakterystyk spektralnych takich gatunków jak dąb, brzoza czy olsza. W przypadku drzewostanów Nadleśnictwa Staszów ocenę zróżnicowania gatunkowego wykonano przy zastosowaniu tylko klasyfikacji pikselowej, natomiast w drzewostanach Nadleśnictwa Supraśl analiza ta była poprzedzona segmentacją koron drzew. W obu przypadkach wyniki analiz nie odzwierciedliły rzeczywistego stanu na gruncie.

Nie oznacza to jednak konieczności rezygnacji z wykorzystywania tych obrazów przy określaniu składów gatunkowych drzewostanów. Należy bowiem zauważyć, że w obu doświadczeniach nie wykorzystano w pełni informacji zawartej w bazach Systemu Informacyjnego Lasów Państwowych (SILP). W przypadku drzewostanów zarządzanych przez Lasy Państwowe, bardziej istotna jest weryfikacja udziału poszczególnych gatunków, aniżeli stwierdzenie ich występowania (taka informacja istnieje bowiem w bazach SILP). Wydaje się, że wstępna selekcja zróżnicowania gatunkowego wykonana na poziomie wyłączeń drzewostanowych na podstawie danych SILP, w znacznym stopniu poprawiłaby dokładność określenia udziału poszczególnych gatunków w składzie gatunkowym drzewostanów (por. ryc. I.33, tab. I.33). Mając świadomość nakładania się charakterystyk spektralnych niektórych gatunków, można zaproponować taką stratyfikację drzewostanów, aby w oddzielnych grupach znalazły się drzewostany, w których występują „konfliktowe” gatunki. W ten sposób uzyska się wiarygodne dane dla większości wyłączeń. W dalszym ciągu pozostanie problem tych drzewostanów, w których wspólnie występują gatunki o zbliżonych charakterystykach spektralnych, jednak ich udział w powierzchni leśnej powinien być niewielki.



Ryc. 1.33. Klasyfikacja nadzorowana dla fragmentu bory mieszanej:

A - obraz rzutów koron, B - obraz QuickBird (432), C - wynik klasyfikacji QuickBird.

Kolor korony: brązowy – So; szary – Db (kolory wg. SLMN)

Tab. 1.33. Porównanie udziału poszczególnych gatunków dla wybranego drzewostanu określone podczas prac urzędzeniowych (udział miąższościowy), prac terenowych (rejestracja powierzchni rzutów koron) oraz na podstawie klasyfikacji zobrażenia QuickBird (Zajączkowski, Wężyk, 2004)

Gatunek	Udział gatunku		
	SILP	Powierzchniowy (koron - pomiar terenowy)	wg. sklasyfikowanych pikseli QuickBird
Db	70%	60%	63%
So	30%	38%	30%
Brz	0%	2%	7%

We wnioskach przedstawionych do omawianych prac znajdują się postulaty zastosowania skanerów hiperspektralnych do oceny zróżnicowania składu gatunkowego drzewostanów. Postulaty te dotyczą głównie technologii lotniczej, gdyż z poziomu satelitarnego dostępne są praktycznie tylko zobrażenia ze skanera HYPERION (rozdzielczość przestrzenna 30 m, 242 kanały spektralne od 0,4 do 2,4 nm) zainstalowanego na satelicie EO1. Skanery hiperspektralne charakteryzują się możliwością rejestracji danych jednocześnie w wielu wąskich zakresach światła widzialnego i podczerwieni. Właśnie ten element decyduje o większej przydatności w ocenie szaty roślinnej zobrażeń hiperspektralnych w odniesieniu do zobrażeń barwnych lub wielospektralnych. Dzięki

dużej ilości rejestrowanych wąskich pasm, mogą być one bowiem użyte tam, gdzie analiza zdjęć wielospektralnych nie daje wystarczająco dokładnych rezultatów. Taka właśnie sytuacja często występuje w przypadku weryfikacji lub określania składu gatunkowego drzewostanów. Uważa się, że zobrażenia hiperspektralne, głównie lotnicze, w połączeniu z technologią skaningu laserowego, staną się już w niedalekiej przyszłości istotną alternatywą dla tradycyjnych metod pozyskiwania danych o drzewostanach, w tym o zróżnicowaniu gatunkowym i o zasobach drzewnych (<http://www.itres.com/Home>, Lang 2006).

Określanie zagęszczenia drzewostanów

Zagęszczenie drzew, wyrażane liczbą drzew na jednostkę powierzchni, jest jednym z podstawowych parametrów drzewostanu, który może być analizowany automatycznie na zobrażeniach lotniczych i satelitarnych. Parametr ten jest często wykorzystywany w modelach wzrostu drzewostanów i stanowią istotny czynnik wpływający na zwiększenie dokładności określania zapasu. Szacuje się jednak, że może on być uwzględniany w modelach stosowanych w praktyce urzędniczej, pod warunkiem, że dokładność jego określania osiągnie poziom 90-95% (Korpela i in. 2007). W praktyce uzyskanie takiej informacji z poziomu naziemnego jest nieopłacalne ekonomicznie, dlatego też zastosowanie zdalnych metod wydaje się być jedyną obiektywną i akceptowalną alternatywą dla kosztownych pomiarów terenowych.

O przydatności zobrażeń satelitarnych w inwentaryzacji drzewostanów decyduje głównie możliwość identyfikacji wierzchołków drzew. Jeżeli dany materiał obrazowy umożliwia zdalne określenie liczby drzew, to tym samym umożliwia również wnioskowanie o składach gatunkowych, stanie zdrowotnym, zasięgu jednorodnych drzewostanów, a pośrednio także o objętości biomasy i miąższości (Leppanen i in. 1999).

Zdalne pozyskiwanie informacji o liczbie drzew polega na identyfikacji (lokalizacji) ich wierzchołków oraz określeniu wielkości i kształtu rzutu płaskiego ich koron. Identyfikacja wierzchołków drzew jest możliwa głównie dzięki zróżnicowanej jasności różnych fragmentów koron, przy czym za najbardziej przydatne do analiz uważa się zobrażenia, na których maksimum jasności pikseli przypada na wierzchołki. Oznacza to, że w chwili pozyskiwania zdjęcia/zobrazowania słońce powinno być maksymalnie wysoko, a odchylenie rejestrującego skanera nie powinno być większe niż 10% (Larsen 1997). Ponadto korona drzewa nie może być reprezentowana przez mniej niż 3 piksele w układzie liniowym (Wulder i in. 2000), gdyż poniżej tej wartości nie da się prowadzić sensownych analiz pikseli i trzeba

korzystać z metod obiektowych (Furlan 2002, Halounova 2003). Wymóg ten warunkuje zatem przydatność poszczególnych materiałów teledetekcyjnych do oceny zagęszczenia drzew. I tak w przypadku zastosowania zobrażeń QuickBird parametr zagęszczenia nie będzie mógł być określany gdy średnica korony będzie mniejsza niż 2 – 2,5 m, zaś w przypadku zobrażeń pochodzących z IKONOSA odpowiednio 3 – 3,5 m. Z drugiej strony, aby uniknąć nadmiernego zróżnicowania w obrębie korony, korona nie powinna być reprezentowana w układzie liniowym przez więcej niż 7 pikseli (Zajączkowski, Wężyk, 2004). Większa liczba komórek branych do analizy może bowiem powodować zawyżanie liczby drzew na skutek klasyfikowania większych gałęzi jako oddzielne drzewa. W rzadkich przypadkach spotyka się więc zalecenia sztucznego zwiększania rozdzielczości obrazu, co ma ułatwić pracę algorytmów analizujących przestrzenne relacje pikseli (Magnussen i in. 1999).

Istotnym ograniczeniem w możliwości identyfikacji wierzchołków drzew jest również czynnik zwarcia koron. Im większe zwarcie tym możliwości prawidłowej interpretacji obrazu są mniejsze. Na taką właśnie zależność wskazał Pitkanen (2001), który porównywał dokładność szacowania liczby drzew w drzewostanach II klasy wieku o różnym stopniu zagęszczenia. Okazało się, że w przypadku drzewostanów o silnym zagęszczeniu (1900 szt/ha) rozpoznano na zdjęciach średnio tylko 54% koron, zaś w drzewostanach nieco luźniejszych (do 1500 szt/ha) już 70-95%.

Przy analizie rozmieszczenia drzew stosuje się na ogół obrazy w odcieniach szarości, zarejestrowane w dowolnym zakresie światła widzialnego (np. Pitkanen, 2001). Nie stwierdzono bowiem istotnych różnic w liczbach drzew uzyskiwanych w analizach różnych zakresów spektralnych tego samego obrazu (Wulder i in. 2000).

Identyfikacja wierzchołków koron drzew na podstawie jasności pikseli reprezentujących koronę może być realizowana przy zastosowaniu takich metod jak:

- Wyszukiwanie lokalnych maksimów obrazu za pomocą przesuwającego się okna o określonej wielkości wyrażonej liczbą pikseli (np. Wulder i in. 2000; Hui i in 200; Erikson 2003). Uzyskiwane tą metodą dokładności sięgają, w zależności od budowy drzewostanu, 70-90%. Modyfikacją tej metody jest przeszukanie całego obrazu w celu zlokalizowania miejsc o najwyższym poziomie jasności, traktowanych jako potencjalne wierzchołki (np. Walsworth i King, 1998);

Zdjęcie satelitarne

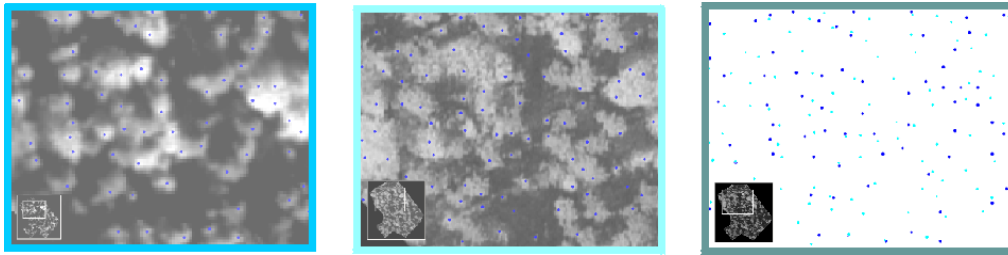
Zdjęcie lotnicze

Znalezione wierzchołki

Piksel 0.6 m

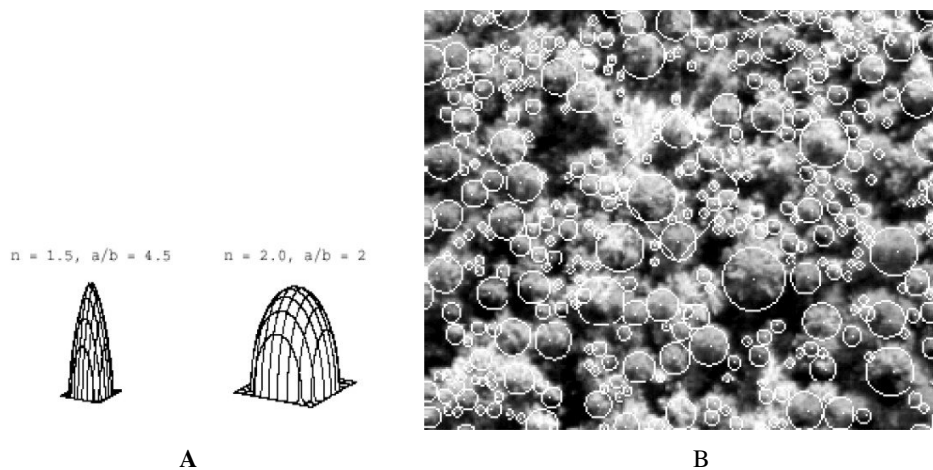
Piksel 0.3 m

Wymiary obrazu w terenie ok. 68 x 53 m



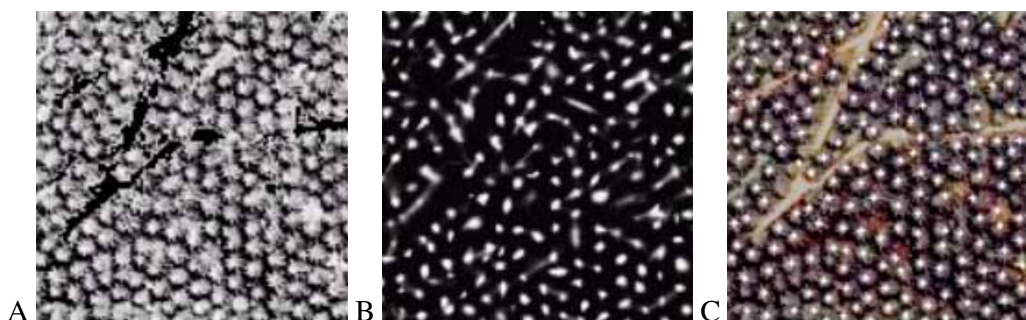
Ryc. 1.34 Porównanie położenia wierzchołków drzew znalezionych za pomocą metody lokalnego maksimum na satelitarnym i lotniczym obrazie tego samego fragmentu terenu na przykładzie drzewostanu 195 w Nadleśnictwie Staszów, Obręb Kurozwęki. (Zajczkowski, Wężyk 2004).

- Dopasowywanie wzorców przestrzennych określających zmienność jasności wokół najjaśniejszego piksela, co dodatkowo umożliwi określenie wielkości korony (Andersen i in, 2001) – jest to metoda wywodząca się z grupy analiz obiektowych, przy czym do analiz wykorzystuje się różnej wielkości obrotowe bryły geometryczne (Quackenbush i in. 2000). Dokładność tej techniki sięga ponad 90% (Larsen 1997).



Ryc. 1.35 Przykłady wzorców koron dla różnych wartości parametrów paraboloidy obrotowej (A) oraz zastosowanie metody dopasowania wzorca (B) do określenia położenia, wielkości i kształtu koron drzew na powierzchni 60 x 100 m (Pollock, wg Bulitko i in. 2000)

- Analiza krzywizn obrazujących brzegi korony podczas procesu wygładzania obrazu – utrzymywanie się krzywizny w kolejnych etapach wygładzania może świadczyć o istnieniu w pobliżu wierzchołka (Brandtberg i Walter 1998). Dokładność tej metody jest porównywalna do wyników ręcznego wyznaczania konturów na zdjęciu i sięga 50-80%.



Ryc. 1.36

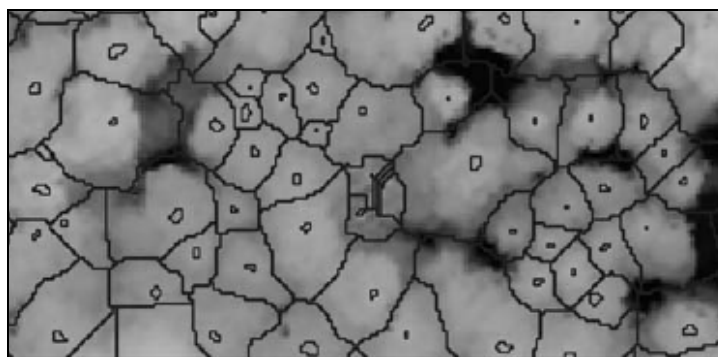
Wykrywanie drzew na zdjęciu barwnym wyostrzonym panchromatycznie z satelity Ikonos metodą wyszukiwania konturów koron w różnych skalach - (Hui i in. 2000):

A - wybrane do analizy obrazu czerwone pasmo o dużej aktywności fotosyntetycznej;

B - identyfikacja wierzchołków jako środków krzywizn, skumulowanych w różnych skalach;

C - znalezione wierzchołki na tle oryginalnego zdjęcia plantacji palmowej (piksel 1 m)

- Wyszukiwanie lokalnych minimów jasności obrazów (tzw. metoda valley foolwing) – wyznacza się w ten sposób granice zasięgu poszczególnych koron (Gougeon 1995, Gougeon 1998). Metoda ta pozwala na uzyskanie wyników z dokładnością sięgającą 80%, zwłaszcza na zdjęciach o dużej rozdzielczości. W zwartych drzewostanach technika wykrywania dolin, podobnie zresztą jak i większość innych, zwykle zaniża liczbę drzew na skutek pozostawiania nierozdzielonych grup z bardziej zwartymi koronami (King 2000). Aby rozdzielić przynajmniej niektóre takie grupy, wykorzystuje się analizę morfologiczną obrazu, np. techniki podziału zlewni (Straub 2003, Wang i in. 2004).



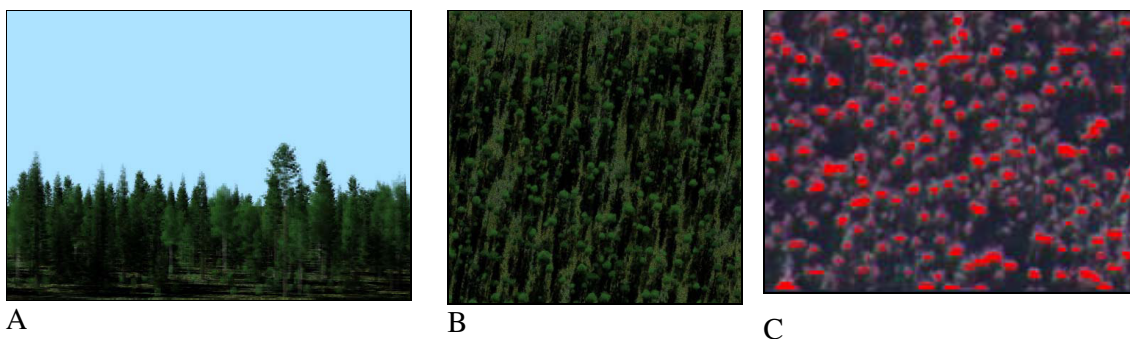
Ryc. 1.37 Graficzne przedstawienie wyników segmentacji numerycznego modelu warstwy koron (Weinacker i in. 2004).

Najnowsze trendy w zakresie określania zagęszczenia drzewostanów dotyczą wykorzystania procesu segmentacji, czyli wydzielenia obiektów różniących się pewnymi charakterystykami. Segmenty są to grupy pikseli współtworzące nieregularne figury geometryczne, służące jako nośniki informacji, z których w zasadniczym procesie klasyfikacji składane są obiekty terenowe (Wyczółek i in. 2004). W procesie segmentacji zwraca się istotną uwagę na to, aby tworzone segmenty były w największym stopniu homogeniczne, a ich charakterystyki były porównywalne w obrębie tej samej klasy obiektów – np. w obrębie koron drzew danego gatunku. Efekt taki uzyskuje się poprzez wyodrębnienie obszaru zaciemnionego rozdzielającego korony, a następnie – przy wykorzystaniu informacji o kształcie i wielkości tych koron oraz jasności pikseli w ich obrębie – identyfikację pojedynczych obiektów, tj. koron (Wang i in. 2006). Zastosowanie metody obiektowej pozwala zwiększyć dokładność wyznaczania liczby drzew o kilka – kilkanaście procent. Tezę tą potwierdzają także wyniki polskich badań (Zajączkowski, Wężyk 2007). Na przykładzie kilkunastu drzewostanów Nadleśnictwa Supraśl, zróżnicowanych pod względem składu gatunkowego, wysokości oraz zwarcia koron, stwierdzono, że różnice pomiędzy liczbą drzew określoną na obrazie satelitarnym QuickBird z wykorzystaniem procesu segmentacji (oprogramowanie Definiens Professional) a danymi rzeczywistymi nie przekraczają 10%. Najwyższe zbieżności uzyskano dla drzewostanów 20-25 metrowych o zwarcium umiarkowanym i przerywanym +/- 3%, zaś najniższe dla drzewostanu iglastego, o wysokości ok. 20 m i zwarcium pełnym – niedoszacowanie o 9%.

Tab. I.34. Zestawienie wyników działania algorytmu wyznaczającego liczbę drzew (Zajczkowski i Wężyk 2007)

Gatunek	Wysokość	Zwarcie	Adres	Liczba drzew teren	Liczba drzew Definiens	Parametr skali dla typu głównego	Różnica w ilości drzew	Różnica
				[szt.]	[szt.]			[%]
iglaste	20	peł	126b	586	532	5	-54	-9
	20	um	NP 2	521	512	4,5	-9	2
	25	peł	64g	112	116	4,5	4	4
	25	um	146j	286	283	6,5	-3	-1
	25	przer	38b	437	425	6	-12	-3
	25	luź	NP1	122	127	5	5	4
	30	um	32g	265	268	9,5	3	1
	30	przer	159a	357	341	10	-16	-4
	30	luź	21f	73	77	17,5	4	5
liściaste	20	peł	215f	254	260	5,5	6	2
	20	um	104c	142	139	4,5	-3	-2
	25	luź	41h	387	380	10	-7	-2
	30	przer	124h	447	447	13	0	0

Podjęmowane są także próby zastosowania sieci neuronowych do określania zagęszczenia. Olofsson i Hagner (2006), bazując na obrazach QuickBird, IKONOS oraz cyfrowych zdjęciach lotniczych, na podstawie ok. 500 wzorców „nauczyli” sieć identyfikacji wierzchołków drzew, uzyskując wysoką sprawność w jednogatunkowych drzewostanach sosnowych (ryc. I.38).



Ryc. 1.38. Efekt zastosowania sieci neuronowych w ocenie zagęszczenia drzew w drzewostanie
 A – rzeczywisty drzewostan, B – obraz lotniczy, C – wierzchołki zidentyfikowanych drzew
 (kolor czerwony) (Olofsson, Hagner 2006)

Z zagęszczeniem drzew w drzewostanie jest bezpośrednio powiązany inny parametr – zwarcie koron. Informuje on o stopniu konkurowania koron drzew i jest wskaźnikiem określającym pilność przeprowadzenia zabiegów hodowlanych w drzewostanie. W nomenklaturze międzynarodowej parametr ten koresponduje z informacją o pokryciu koronami powierzchni leśnej (*ang. crown cover*). Praktycznie jedyną metodą dostarczającą obiektywnej informacji o zwarciu koron w drzewostanie jest interpretacja zdjęć lotniczych lub zobrazowań satelitarnych. Ze względu na nadmierną szczegółowość zdjęć lotniczych (rozdzielczość przestrzenna 10-30 cm) znacznie prościej jest przeprowadzać ocenę tego parametru przy zastosowaniu materiałów satelitarnych o rozdzielczości 0,6-1,0 m. Należy przy tym pamiętać o właściwym przyjęciu zakresów pokrycia dla poszczególnych stopni zwarcia. Np. w doświadczeniu opisanym przez Zajączkowskiego (2007) przyjęto następujący sposób interpretacji obrazu:

- stopień pokrycia 90% i więcej – zwarcie pełne,
- 70 – 90 – zwarcie umiarkowane,
- 50 – 70 – zwarcie przerywane,
- poniżej 50 – zwarcie luźne.

Przeprowadzone dla dwóch obiektów (Nadl. Staszów i Nadl. Supraśl) porównanie wykazało tendencję do zawyżania stopnia pokrycia koronami drzew powierzchni leśnej na obrazach satelitarnych w odniesieniu do danych urzędniowych. W przypadku drzewostanów Nadleśnictwa Staszów ponad 40% wyłączeń zaklasyfikowano do klasy wyższej, zaś w przypadku drzewostanów Nadleśnictwa Supraśl nawet 78%. Można oczekiwać, że bardziej zbliżone wyniki otrzyma się modyfikując cyfrowe zakresy stopnia zwarcia dla poszczególnych stanów pokrycia koronami drzew, należy jednak pamiętać, że wpływ na końcowy wynik

interpretacji ma również udział warstwy podszytów i podrostów w drzewostanie oraz powierzchnia, do której odnoszony jest wynik interpretacji. Analiza obrazów satelitarnych wykazała bowiem liczne rozbieżności pomiędzy rzeczywistym przebiegiem granic wyłączeń drzewostanowych, a ich odzwierciedleniem na mapach numerycznych. Mapy te w większości przypadków tworzone były na podstawie starszych opracowań papierowych, dla których podstawą utworzenia były pomiary busolowe przeprowadzane w drzewostanach. Zmiany zachodzące w drzewostanach w trakcie cyklu urządzeniowego, błędy pomiarowe oraz błędy kreślarskie sprawiły, że duża część leśnych map numerycznych funkcjonujących w polskich lasach w sposób niedoskonały odwzorowuje aktualny ład przestrzenny. Aby ten stan poprawić pojawił się zapis w instrukcji urządzania lasu nakładający obowiązek wykorzystywania ortofotomapy lotniczej lub satelitarnej przy aktualizacji leśnych map numerycznych, zarówno w zakresie korekty istniejących granic wyłączeń drzewostanowych jak i granic innych obiektów powierzchniowych (np. gniazda, kępy). Wymóg ten odnosi się jednak tylko do tych wyłączeń, w których podczas taksacji, lub w trakcie cyklu urządzeniowego, stwierdzono wystąpienie zmian. Nie odnosi się natomiast do korekty granic tych obiektów, w których przeprowadzane zabiegi pielęgnacyjne nie spowodowały zmian w przebiegu ich granic. A właśnie poprawny przebieg granic wyłączeń drzewostanowych jest niezbędnym wymogiem zastosowania zdalnych technologii w lasach.

Określanie zasobności drzewostanów

Pomimo rozwoju technik przetwarzania obrazów lotniczych i satelitarnych nie udało się, jak dotychczas, opracować metody pomiaru miąższości drzewostanów, przydatnej w praktyce leśnej, bazującej jedynie na danych obrazowych. Wyniki uzyskiwane przez badaczy dla poziomego drzewostanu obarczone były błędami rzędu 40-50% i więcej (Tokola i in. 1996; Mäkelä, Pekkarinen, 2004; Reese i in. 2003). Spowodowane to było głównie zbyt słabą korelacją pomiędzy powierzchnią rzutu koron drzew a ich średnicą mierzoną na różnych wysokościach. Potwierdziły to m.in. badania Zajączkowskiego i Wężyka (2004), którzy analizując tę zależność z zastosowaniem obrazów QuickBird, stwierdzili że dla poszczególnych gatunków drzew związek ten kształtuje się w zakresie od 0,19 do 0,88 i tylko w części przypadków jest istotny. W odniesieniu do obrazów o niższej rozdzielczości (np. LANDSAT TM), miąższość drzewostanów próbowano powiązywać z wynikiem szacowania biomasy drzewostanów otrzymanym na podstawie analizy charakterystyki spektralnej drzewostanów. Pozytywne wyniki otrzymano jednak tylko w aspekcie przestrzennego

zróznicowania biomasy w drzewostanach oraz oceny ich stanu zdrowotnego (King 2002). Jak się jednak okazało, zastosowanie technik satelitarnych powiązanych z danymi pozyskanymi tradycyjnymi metodami (pomiarzy naziemne) w sposób istotny zracjonalizowało metody szacowania miąższości drzewostanów, szczególnie w odniesieniu do dużych powierzchniowo obszarów. Dzięki możliwości oceny przestrzennego zróznicowania drzewostanów pod względem gatunkowym i wiekowym mogła zostać ograniczona liczba naziemnych powierzchni próbnych. Takie podejście reprezentowane było w szczególności w krajach skandynawskich (Tuominen 2007), głównie w odniesieniu do inwentaryzacji wielkoobszarowej. Jednakże ostatnie lata przyniosły znaczące zmiany w sposobie pozyskiwania danych dla potrzeb zarówno inwentaryzacji urządzeniowej jak i wielkoobszarowej. Na przykładzie Finlandii można zaobserwować, że obecnie większość danych pozyskiwana jest już metodami teledetekcyjnymi, a to za sprawą wdrożenia do praktyki leśnej nowej metody inwentaryzacji bazującej na wykorzystaniu wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych IKONOS i QuickBird, obrazów radarowych (CARABAS – *ang. Coherent All Radio Band Sensing*) oraz technologii lotniczego skaningu laserowego (ALS). W chwili obecnej to dane naziemne są uzupełnieniem danych pozyskiwanych z poziomu lotniczego i satelitarnego i służą do ich spektralnej i przestrzennej kalibracji (Korpela 2004). Ponadto, zastosowanie satelitarnych danych radarowych o rozdzielczości przestrzennej 1m (CARABAS, TerraSAR-X) lub lotniczych danych laserowych umożliwia ocenę zasobów leśnych nie tylko na poziomie drzewostanu, ale także na poziomie pojedynczego drzewa – tzw. *single tree detection method*. (Korpela i in. 2007).

Doświadczenia krajów skandynawskich są powoli przenoszone także do innych krajów europejskich. Np. Austriacy doszli do wniosku, że tradycyjne metody inwentaryzacji lasu bazujące na pomiarach naziemnych i interpretacji zdjęć lotniczych, nie pozwalają na uzyskiwanie przestrzennie ciągłej informacji dla większych kompleksów leśnych (Lang i in. 2006). Jako alternatywę dla tych metod wskazali oni wykorzystanie technologii ALS (10 pkt/m²) zintegrowaną z cyfrową ortofotografią (lotniczą lub satelitarną). Jej zastosowanie zwiększyło dokładność wyznaczania granic drzewostanów oraz pozwoliło na określanie takich parametrów drzewostanu jak: wysokość drzew, wielkość koron, skład gatunkowy. Dodatkowym profitem był numeryczny model terenu, model powierzchni terenu oraz znormalizowany model drzewostanu. Wskazując na obrazowania satelitarne typu VHRS, jako potencjalne źródło informacji obrazowej w metodzie inwentaryzacji, stwierdzili że w odniesieniu do zdjęć lotniczych, niosą one ze sobą pełniejszą informację spektralną i nie

przyczyniają się do zniekształceń obrazu w procesie mozaikowania. Jednak ich przestrzenna rozdzielczość na poziomie 0,6 m stanowi istotne ograniczenie w przypadku prób oceny parametrów pojedynczych drzew. W tym przypadku lepsze wyniki uzyskiwano wykorzystując zdjęcia lub zobrazowania lotnicze.

Także w Niemczech, w nowo opracowanej metodzie określania miąższości bazującej na detekcji pojedynczego drzewa, zobrazowania satelitarne są polecane do wykorzystywania, jako jedną z potencjalnych źródeł danych rastrowych (Rossmann i in. 2007).

5.3 Potencjalne zastosowanie wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych w Lasach Państwowych

Obowiązująca aktualnie Instrukcja zarządzania lasu dopuszcza wykorzystywanie źródeł teledetekcyjnych w pracach urzędniowych, jednak oprócz wymogu korzystania ze zdjęć lotniczych lub zobrazowań satelitarnych przy aktualizacji granic wyłączeń drzewostanowych, nie precyzuje sposobu ich zastosowania. Ewentualny zakres i sposoby przenoszenia danych uzyskiwanych drogą teledetekcyjną może być przedmiotem ustaleń podejmowanych podczas narady wstępnej przed przystąpieniem do prac terenowych.

Przedstawiony we wcześniejszych rozdziałach opis praktycznych zastosowań zobrazowań satelitarnych w inwentaryzacji drzewostanów sugeruje większy, niż to obecnie ma miejsce w polskim leśnictwie, potencjał informacyjny tych materiałów. Integracja danych SILP z danymi satelitarnymi powinna zapewnić uzyskiwanie dokładnej i obiektywnej informacji o powierzchniowym składzie gatunkowym drzewostanów. Z kolei informacja o liczbie drzew w drzewostanach starszych klas wieku (tj. III klasy i starszych), powinna zwiększyć dokładność określania zasobności drzewostanów.

Wydaje się jednak, że największe korzyści z praktycznego zastosowania zobrazowań satelitarnych w zarządzaniu lasu można uzyskać przy ich uwzględnieniu w procesie stratyfikacji drzewostanów przeprowadzanej dla potrzeb inwentaryzacji miąższości. Integracja danych obrazowych i SILP powinna umożliwić wskazanie jednorodnych obszarów leśnych pod względem gatunkowym, wiekowym oraz liczby drzew w drzewostanie. Zrealizowana poprawnie przestrzenna delimitacja poszczególnych grup stratyfikacyjnych powinna przyczynić się do zwiększenia dokładności szacowania miąższości drzewostanów, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby terenowych powierzchni próbnych. Ten ostatni postulat wiąże się z możliwością pominięcia obrębu, jako jednostki inwentaryzacyjnej, przy tworzeniu grup stratyfikacyjnych i przeprowadzeniu delimitacji drzewostanów bezpośrednio dla całego nadleśnictwa.

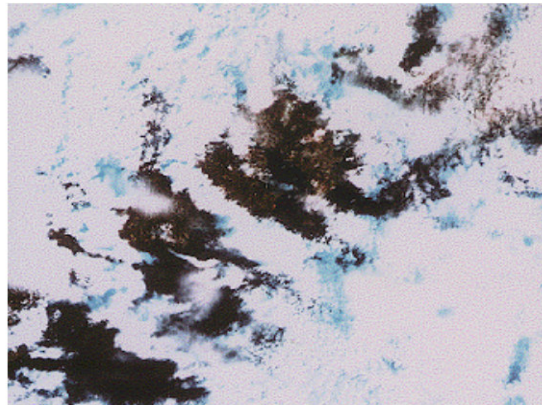
W niniejszym opracowaniu nie poruszano kwestii przydatności danych satelitarnych do oceny stanu zdrowotnego drzew i drzewostanów. Należy jednak wiedzieć, że wszelkie zmiany chorobowe, przejawiające się przebarwieniem liści i całych koron, odzwierciedlają się szczególnie wyraźnie właśnie na wielospektralnych zobrazeniach satelitarnych. Nawet na średniorozdzielczych obrazach z satelitów LANDSAT możliwe jest wykrycie martwych fragmentów lasu z praktycznie 100-procentową dokładnością (Zawiła-Niedźwiedzki i in. 2001).

Potencjalne operacyjne zastosowanie zobrażeń satelitarnych w leśnictwie może napotykać na wiele przeszkód związanych przede wszystkim z ich dostępnością. Jak pokazują doświadczenia ostatnich projektów badawczych (np. Zajączkowski, Wężyk, 2007; Zajączkowski 2008) nie zawsze udaje się pozyskać obrazy obszarów badawczych w wymaganym terminie. Dotyczy to głównie zobrażeń typu VHRS (IKONOS, QuickBird), na które istnieje duże zapotrzebowanie na rynku komercyjnym (zamówienia rządowe i wojskowe wielu krajów), a warunki pogodowe nie zawsze umożliwiają ich pozyskanie. Z drugiej strony technologia satelitarna staje się coraz bardziej dostępna pod względem cenowym – relatywnie taniej zarówno same obrazy, jak i oprogramowanie do ich przetwarzania.

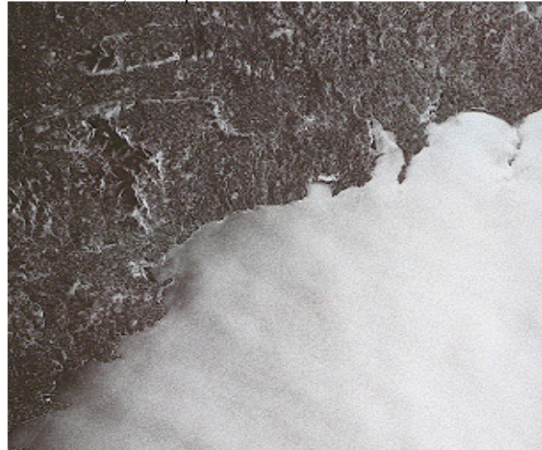
6 Zdjęcia radarowe

Radar (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) jest aktywnym systemem teledetekcyjnym, wysyłającym promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym (tabela 2) oraz rejestrującym powracającą wiązkę (zwaną echem radaru) po jej odbiciu od obiektów znajdujących się na drodze wysłanych fal. Technika ta uniezależnia pozyskiwanie danych od światła słonecznego, które jest podstawą rejestracji zdjęć przez urządzenia optyczne, umożliwiając rejestrację obrazu zarówno w dzień, jak i w nocy. Ale największy atut teledetekcji radarowej wynika z przenikania promieniowania mikrofalowego przez pokrywę chmur, co pozwala na uniezależnienie pozyskiwania danych od warunków pogodowych (ryc. I.39).

Landsat Thematic Mapper, 9 sierpnia 1991



ERS-1 SAR, 9 sierpnia 1991



Źródło: Europejska Agencja Kosmiczna

Ryc. I.39. Zobrazowanie wybrzeża Irlandii na zdjęciach wykonanych w tym samym czasie w zakresach: optycznym (Landsat Thematic Mapper) i mikrofalowym (ERS-1 SAR).

Teledetekcyjne urządzenia radarowe można podzielić na nieobrazowe (np. altimetr) i obrazowe, np. radary z anteną naturalną (RAR-Real Aperture Radar) i syntetyczną (SAR-Syntetic Aperture Radar). Antena zwana syntetyczną, jest tak skonstruowana, że przechowuje odbierany sygnał przez pewien czas i porównuje go z kolejnymi, rejestrowanymi podczas lotu samolotu lub satelity. Antena syntetyczna daje więc wrażenie wielokrotnie dłuższej niż jest nią w rzeczywistości, co wpływa na poprawę azymutalnej zdolności rozdzielczej zdjęć radarowych, która w przypadku pułapów satelitarnych może wynosić od kilku do 50 metrów.

Radarowe systemy obrazujące wykorzystują promieniowanie mikrofalowe o długości fal od poniżej 1 cm do ponad 1 m (tab. I.35), emitując sygnały w wiązkach ciągłych lub pulsacyjnych o mikrosekundowej długości, które mają prędkość światła. Promieniowanie to jest charakteryzowane przez długość oraz częstotliwość fali, amplitudę, fazę, tak jak to ma miejsce w przypadku zakresów optycznych. Ale ponadto promienie mikrofalowe wykorzystywane w teledetekcji charakteryzowane są przez: polaryzację anteny i kąt padania na powierzchnię Ziemi (Θ).

Tab. I.35. Wykaz zakresów mikrofalowych

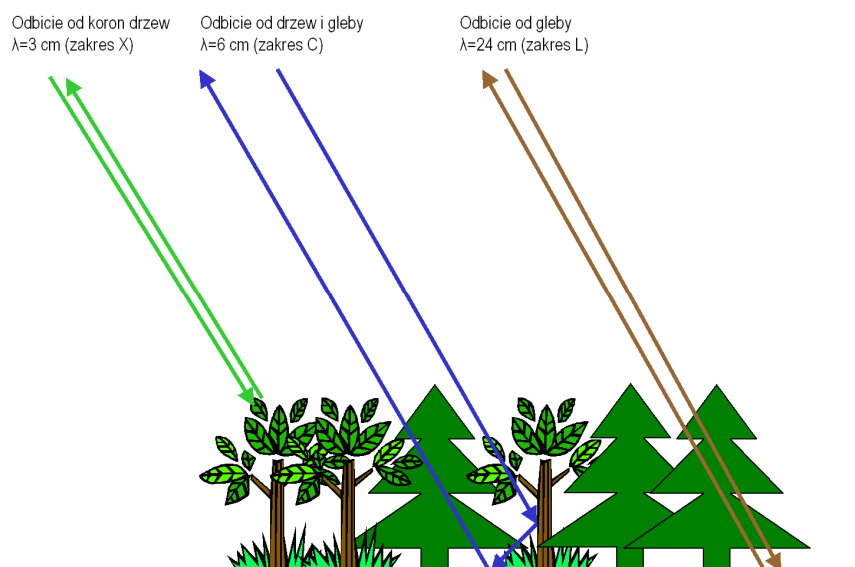
Zakres	Częstotliwość - f (GHz)	Długość fali - λ (cm)
P	0,225 - 0,39	133 - 76,9
L	0,390 - 1,55	76,9 - 19,4
S	1,55 - 3,9	19,4 - 7,69
C	3,9 - 5,75	7,69 - 5,21
X	5,75 - 10,9	5,21 - 2,75
K	10,9 - 36	2,75 - 0,83
<i>Ku</i>	<i>10,9 - 18</i>	<i>2,75 - 1,67</i>
<i>K</i>	<i>18 - 26,5</i>	<i>1,67 - 1,13</i>
<i>Ka</i>	<i>26,5 - 36,6</i>	<i>1,13 - 0,83</i>
Q	36 - 46	0,83 - 0,063
V	46 - 56	0,063 - 0,053
W	56 - 100	0,053 - 0,3

Zakresy *K* były wykorzystywane jedynie w początkach teledetekcyjnych zastosowań radarów. Kanał *X* jest stosowany w lotniczym rozpoznaniu wojskowym oraz dla celów topograficznych. W systemach lotniczych i satelitarnych zastosowanie znalazły zakresy *C* (m.in. satelity ERS oraz Radarsat,) *S* (satelita Ałmaz), *L* (satelity Seasat i JERS) i *P*. Nie wszystkie wymienione w tabeli I.35 przedziały mikrofalowe mogą być stosowane w teledetekcji, niektóre z nich są zastrzeżone do celów komunikacyjnych i wojskowych.

Systemy radarowe dostarczają zobrazowań, na których każdy piksel ma wartość odpowiadającą natężeniu promieniowania odbitego od obiektów oświetlonych wysłaną wiązką mikrofal.

Współczynnik wstecznego odbicia σ_0 zależy od: długości fali (częstotliwości), kąta padania promieniowania, polaryzacji anteny oraz własności dielektrycznych i geometrycznych obiektu. Jest on jednostką bezmianową, ale często wyraża się go w decybelach (dB): $\sigma_0(\text{dB})=10 \log \sigma_0$.

Długość promieniowania determinuje zasięg przenikania fal w głąb obiektu oświetlonego wiązką radaru. Im większa długość fali (mniejsza częstotliwość), tym głębiej sięga penetracja promieniowania mikrofalowego. I tak, w przypadku lasu, fale o długości $\lambda=3\text{cm}$ (zakres *X*) zatrzymują się przy pierwszym zetknięciu z obiektem, a więc informacje rejestrowane na obrazie są związane z górną powierzchnią koron drzew. Natomiast fale o długości $\lambda = 23 \text{ cm}$ (zakres *L*) penetrują wewnątrz drzewostanu, więc informacje zarejestrowane na obrazie będą dotyczyły pni drzew i wnętrza lasu (ryc. I.40). Woda jest całkowicie nieprzezroczysta dla mikrofal, które ulegają silnemu od niej odbiciu, i dlatego zmiana wilgotności powierzchni liści i gałęzi może ograniczać przenikania promieni w głąb lasu.



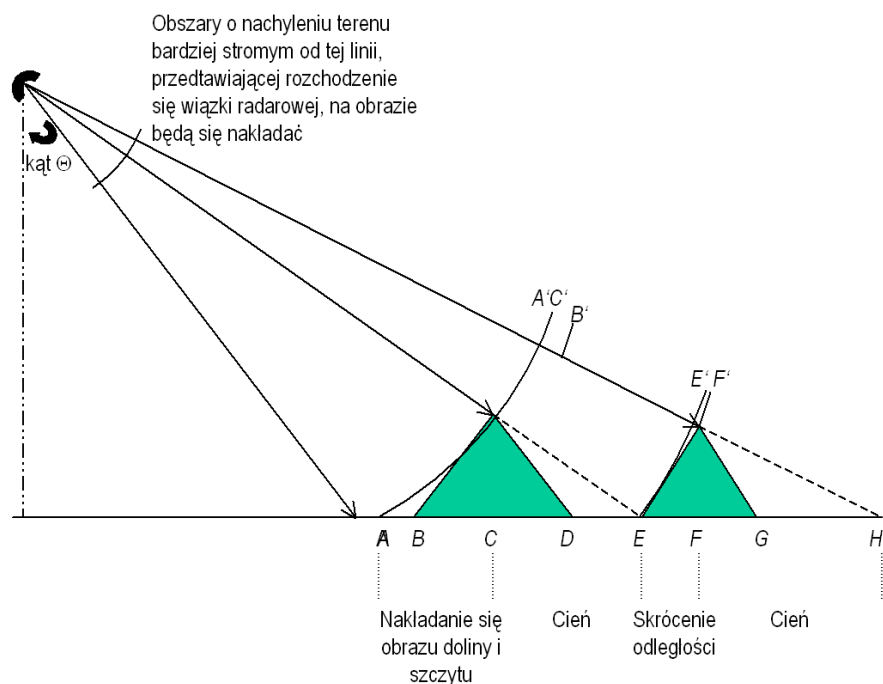
Ryc. I.40. Schemat przenikania mikrofal w głąb drzewostanu. Fale dłuższe penetrują wewnątrz drzewostanu, podczas gdy fale krótsze odbijają się od koron drzew.

Obok długości fal, innym istotnym czynnikiem opisującym konkretny system radarowy jest polaryzacja anteny, czyli jej ustawienie w stosunku do obserwowanej powierzchni. Polaryzacja może być wertykalna (V) lub horyzontalna (H) i opisywana jest jako HH, VV, HV lub VH, gdzie pierwsza litera określa polaryzację emisji, a druga odbioru wiązki promieniowania mikrofalowego. Polaryzacja anteny, podobnie jak zakres fal, wpływa na rodzaj informacji pozyskiwanych przez konkretny radar.

Emisja promieniowania mikrofalowego w celach obrazowych, nie jest dokonywana wertykalnie, ale pod pewnym kątem w stosunku do powierzchni Ziemi. Gdyby wiązka mikrofalowa była wysyłana wertykalnie, niewiele informacji udało by się wydobyc z zarejestrowanego obrazu, gdyż prawie całe promieniowanie powróciłoby do anteny radaru w tym samym czasie. Aby na zdjęciu radarowym możliwe było rozróżnienie poszczególnych obiektów, sygnały przez nie odbite powinny mieć nie tylko różne natężenie, ale także powinny docierać do anteny w różnym czasie. W przeciwnym razie zostałyby one zarejestrowane jako jeden duży obiekt. To czasowe rozróżnienie promieni odbijanych przez różne obiekty na powierzchni Ziemi jest możliwe jedynie w przypadku emisji promieniowania pod pewnym kątem, określanym jako kąt padania promieniowania radarowego w stosunku do powierzchni Ziemi (Θ), którego wielkość ma wpływ na zakres informacji, możliwych do odczytania na zdjęciu radarowym.

Rejestracja promieniowania wysyłanego i odbieranego niewertykalnie powoduje jednak dystorsję zdjęcia, co należy brać pod uwagę przy ich interpretacji. Dystorsja ta może występować w następujących postaciach (ryc. I.41):

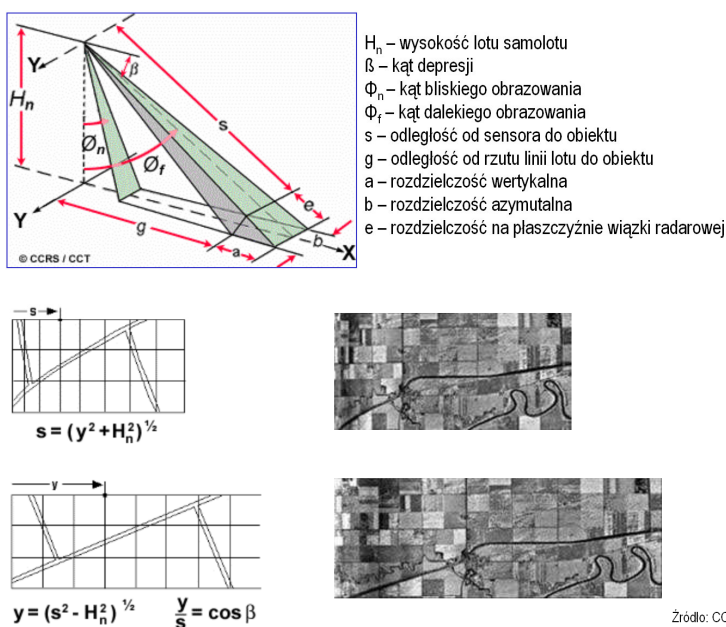
- skrócenie na zdjęciu faktycznej odległości, w przypadku zdjęć z obszarów o znacznej deniwelacji,
- nakładanie się informacji w przypadku ekstremalnego skrócenia odległości, np. najpierw dotrze do anteny odbiorczej sygnał odbity od grzbietu górskiego lub szczytu, a dopiero później od dolin leżących po jego obu stronach, czego efektem na zdjęciu będzie usytuowanie obu dolin po jednej stronie góry,
- w terenie górskim nie uzyskuje się informacji ze stoków zacienionych (nieoświetlonych przez radar),
- obiekty poruszające się zmieniają częstotliwość wiązki radarowej powodując tzw. *przesunięcie dopplerowskie*, w wyniku którego na zdjęciu obraz pociągu może znajdować się poza obrazem szyn, a statku poza kilwaterem.



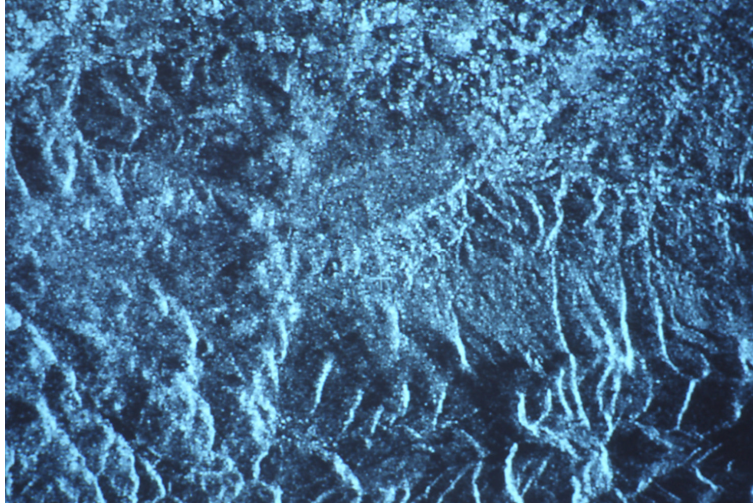
Ryc. I.41. Przykłady dystorsji obrazu na zdjęciach radarowych, powodowanej niewertykalnym wysyłaniem i odbieraniem sygnału. Punkty terenowe A i C, na zdjęciu zostaną odwzorowane jako nakładające się na siebie A'C', punkt B – jako B', leżący za punktami A'C', a nie między nimi, jak ma to miejsce w rzeczywistości, natomiast odległość pomiędzy punktami E i F ulegnie na zdjęciu skróceniu do odległości E'F'. Punkty D i G nie będą widoczne, podobnie jak i odcinki CE oraz FH, które znajdują się w cieniu radaru.

Zdjęcia radarowe wymagają zaawansowanych przetworzeń w celu ich rektyfikacji. Dla odtworzenia rzeczywistych kształtów i odległości stosuje się obliczenia trygonometryczne (ryc. I.42).

Innym utrudnieniem w interpretacji zdjęć radarowych jest tekstura obrazu, nazywana efektem "soli z pieprzem". Jest to specyficzna plamistość będąca wynikiem silnego echa, powodowanego przez obiekty o wymiarach porównywalnych z długością fal radarowych. Obiekty te, mimo że mniejsze od piksela, mogą zdominować wartość jego echa. Charakterystyczny dla obrazu radarowego efekt plamistości wynika z tych właśnie wpływów, których wizualna postać jest podobna do efektu ziarnistości emulsji fotograficznej (ryc. I.43). Odpowiednie filtracje, bazujące na lokalnych statystykach obrazu, mogą jednak usunąć ten efekt lub złagodzić jego negatywny wpływ na czytelność zdjęcia (Lee, 1981 i 1983).

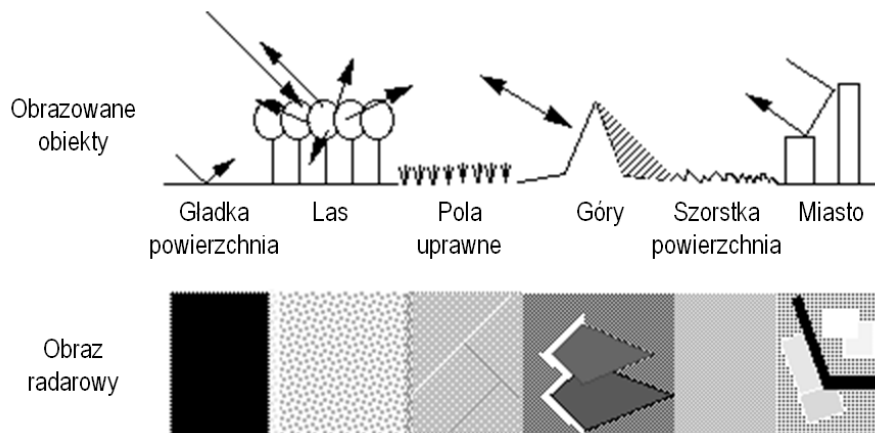


Ryc. I.42. Główne parametry zobrazowań radarowych oraz przykład odtwarzania rzeczywistych kształtów zarejestrowanego obszaru.



Ryc. I.43. Zdjęcie radarowe okolic Szklarskiej Poręby, wykonane 13.01.1993 roku przez satelitę ERS-1 SAR. Wyraźnie widoczny efekt "soli z pierzem". Jasne obszary to efekt silnego odbicia wiązki radarowej, wzmocnionego wskutek nakładania się obiektów. Fragmenty czarne to cień radaru.

W teledetekcji radarowej operuje się także pojęciem "szorstkości" powierzchni, czy obiektu, od której zależy kierunek odbijania fal radarowych. Powierzchnie "gładkie" powodują silne odbicie całej wiązki pod jednym kątem, podczas gdy powierzchnie "szorstkie" powodują odbicie wielokierunkowe, co ma wpływ na obraz tych obiektów na zdjęciu (ryc. I.44). Teren określa się mianem "gładkiego", gdy: $h < \lambda * (8 \sin \Theta)^{-1}$ (lub mniejsze od $\lambda * 4^{-1}$), gdzie h opisuje nieregularności terenu, λ - długość fal, Θ - kąt padania promieni radarowych (Leberl, 1990).



Źródło: NASA/JPL

Ryc. I.44. Przykłady odbicia promieniowania radarowego od różnych obiektów oraz ich obrazu na zdjęciach radarowych.

Mimo, że mikrofałe przenikają przez chmury, to jednak nie są wolne od wpływu czynników atmosferycznych. Przy niższych częstościach (np. zakres L), na zdjęciach radarowych nie są widoczne ani chmury, ani opady deszczu. Natomiast w zakresie X obfite opady mogą zmieniać echo radaru, a w przypadku częstości K chmury mogą być odwzorowane na zdjęciu. Także silne turbulencje, których natężenie nie jest kompensowane stabilizacją anteny, wywołują niekorzystne efekty (Leberl, 1990).

Potencjalne zastosowania teledetekcji mikrofalowej w leśnictwie dotyczą identyfikacji pokrywy leśnej, typów lasu, gatunków, struktury przestrzennej lasu i jego kondycji, a także określania parametrów drzewostanów, takich jak wysokość, liczba pni, zwarcie, czy zasobność na podstawie analiz współczynników odbicia poszczególnych obiektów (σ), rejestrowanych przez radary. Interpretacja zdjęć radarowych napotyka jednakże trudności wynikające z zupełnie innych, w porównaniu do zakresów optycznych, praw fizycznych rządzących mikrofalami. A ponadto wciąż jeszcze brak jest wystarczającej wiedzy empirycznej, szczególnie w zakresie wstecznego odbicia mikrofal przez różnego rodzaju roślinność.

W celu poznania reguł rządzących rozpraszaniem mikrofal od obiektów leśnych, tworzone są modele symulujące strukturę drzewostanów. Ich zastosowanie umożliwiło określenie najważniejszych parametrów, które wpływają na charakterystyki lasu w zakresach mikrofalowych (Ulaby i in., 1990; Karam i in., 1992). Takimi parametrami są nie tylko wartość bezpośredniego odbicia od drzewostanów, ale także stopień rozproszenia promieni w warstwie roślinności oraz wtórne odbicie fal od gałęzi, pni, liści i podłoża. Zmiennymi są tutaj wielkości liści (porównywalne lub mniejsze od długości fal), przestrzenna dystrybucja drzew, konarów i gałęzi oraz ich rozmiary.

Według Karama i in. (1992) modele wstecznego odbicia lasu muszą uwzględniać, co najmniej trzy warstwy: koron, pni oraz podłoża. W części modelu dotyczącej koron, gałęzie powinny być pogrupowane według ich rozmiarów i orientacji przestrzennej. Rola gałęzi w wartości odbicia promieniowania mikrofalowego, szczególnie w drzewostanach liściastych, może być większa, niż samych liści. Na obraz lasu na zdjęciu radarowym istotnie wpływają też promienie wtórnie odbite, szczególnie w zakresie interakcji "pień-podłoże", a ich wpływ zależy od wilgotności gleby oraz jej "szorstkości". Innym elementem decydującym o charakterystykach rozpraszania mikrofal odbitych od lasu jest roślinność podokapowa. W przypadku fal krótkich (X, C) ma ona mniejsze znaczenie, ale dla fal długich (L), jego rola

jest istotna. Natomiast cechy morfologiczne drzew mają mniejszy wpływ na wartość echa fal długich (Hoekman, 1990).

Held i in. (1988) uważają, że do analiz wizualnych zdjęć radarowych użyteczne jest tworzenie kompozycji barwnych z zakresów P, L i C, gdyż w każdej z tych częstotliwości występują inne mechanizmy wstecznego odbicia promieni mikrofalowych. Takie podejście jednak jest nie do przyjęcia w operacyjnym stosowaniu zdjęć radarowych, gdyż poza misjami ściśle badawczymi, na pokładzie satelity lub samolotu umieszcza się zazwyczaj aparaturę operującą tylko w jednym zakresie mikrofalowym, a użytkownik zdjęć nie zawsze ma możliwość kompilowania danych o różnej częstotliwości.

Wyniki programu MAESTRO-1, realizowanego przez ośrodek badawczy Komisji Wspólnot Europejskich - JRC w Ispra i Europejską Agencję Kosmiczną (Held i in., 1988) wykazują, że istnieją duże zróżnicowania pomiędzy obrazowaniami pozyskiwanymi w różnych zakresach i przy różnej polaryzacji anteny. Analiza zdjęć drzewostanów iglastych i plantacji topolowych, wykonanych przy polaryzacji anteny HH, dowiodła, że zakres P zawiera więcej informacji o roślinności niż zakres C. Natomiast zakres L jest pośrednim, jednakże większość elementów na takim zdjęciu jest w lepszej relacji do zakresu P, niż C.

W przypadku wykorzystywania zdjęć radarowych do szacowania zasobności drzewostanów, także zauważono większą użyteczność promieniowania o niższej częstotliwości. Szczególnie zastosowanie zakresów L i P wydaje się obiecujące. Ogólnie można stwierdzić, że wyniki korelacji wartości σ_0 , otrzymanych ze zdjęć, dla poszczególnych drzewostanów z ich parametrami terenowymi poprawiają się wraz ze wzrostem długości fal promieniowania mikrofalowego.

Mimo że fale o częstotliwości C nie przenikają w głąb lasu, to jednak istnieje możliwość stratyfikacji drzewostanów i w tym zakresie częstotliwości, który pozwala w niektórych przypadkach wyróżnić, na podstawie zmienności σ_0 , drzewostany świerkowe oraz sosnowe zwarte i luźne (Held i in., 1988). Ponadto zakresy C i X powinny znaleźć zastosowanie do określania granic poszczególnych drzewostanów, klasyfikacji typów lasu, monitorowania rozwoju fenologicznego i procesów fizjologicznych, a także do wykrywania stresu i klęsk w lasach (Hoekman, 1990).

Westman i Paris (1987), którzy prowadzili badania nad radarowymi charakterystykami drzewostanów iglastych, stwierdzają, że zakres C jest dosyć czuły na zmiany zasobności aparatu asymilacyjnego, ugałężenie drzew, biomasę i zasobność wody. Podkreślają również,

że powierzchnia aparatu asymilacyjnego odgrywa większą rolę w wartości odpowiedzi spektralnej lasu niż wielkość masy tego aparatu. Natomiast dolne piętra nie wpływają znacząco na wartości współczynnika odbicia drzewostanu, nawet jeżeli charakteryzuje się on luźnym zwarciem. Utworzony przez autorów model lasu pozwolił określić parametry, które mają największy wpływ na wartości współczynnika wstecznego odbicia od lasu, w zakresie C. Są to: wilgotność pni i gałęzi, kąt nachylenia gałęzi oraz ich grubość. Ta ostatnia cecha może mieć różny wpływ, w zależności od kąta padania promieni radarowych. Ponadto autorzy sugerują, że w drzewostanach iglastych wertykalne polaryzacje anteny umożliwiają określanie powierzchni projekcyjnej liści (LAI) oraz biomasy całkowitej drzewostanu. Natomiast polaryzacja VH może być użyteczna do szacowania biomasy gałęzi, szczególnie w drzewostanach zwartych.

Polaryzacja anteny w istotny sposób wpływa na rozróżnialność obiektów na zdjęciu radarowym. Analizując różne ustawienia anteny stwierdzono dla zakresu P najlepszą rozróżnialność poszczególnych drzewostanów jednogatunkowych przy polaryzacji HV i HH, a najgorszą przy VV (Held i in., 1988; Le Toan i in., 1992). Takie same parametry są najlepsze przy wykorzystywaniu zdjęć radarowych do szacowania zasobności drzewostanów, z tym że dokładność szacunku rośnie wraz ze zmniejszaniem się wartości kąta Θ .

7 Opis obiektu badawczego oraz wykorzystane w analizach materiały

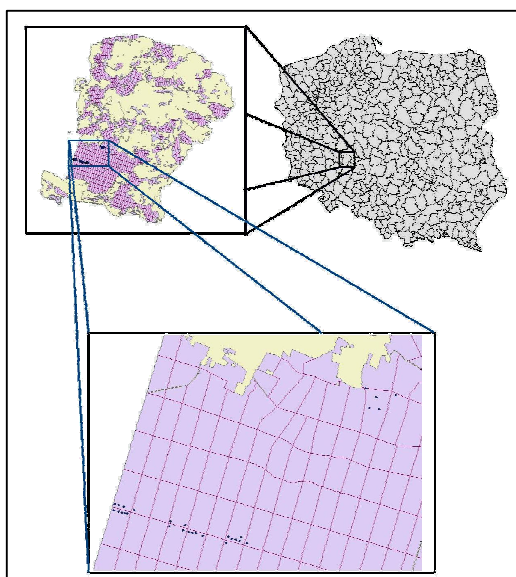
Z uwagi na znaczną ilość zgromadzonych do analiz materiałów fotogrametrycznych, teledetekcyjnych i danych z pomiarów naziemnych, poniżej - oprócz opisu obiektu badawczego - przedstawiono ich charakterystykę. Ponadto przygotowano krótki opis użytych w analizach aplikacji i programów. W niektórych analizach wykorzystywano nieco zmieniony zakres danych – zostało to za każdym razem zaznaczone we właściwym rozdziale.

7.1 Opis obiektu badań

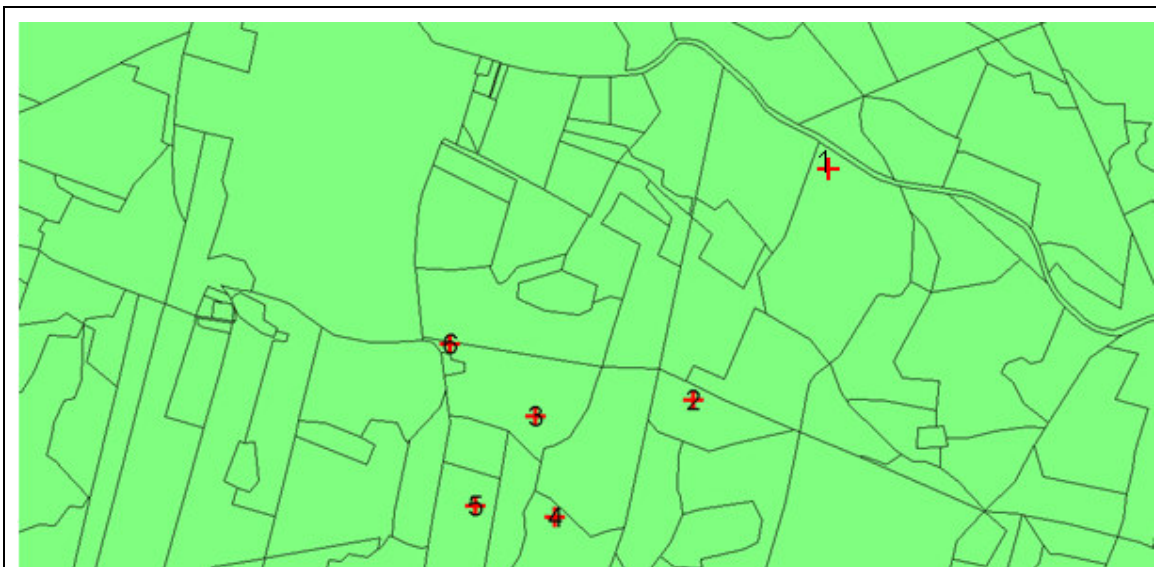
Wyboru obiektu badań dokonało Kierownictwo projektu wraz z pracownikami naukowymi Wydziału Leśnego SGGW w Warszawie przy akceptacji UP Poznań i UR Kraków. Ze względu na realizowane projekty naukowe przez zespoły naukowe SGGW na obszarze Nadleśnictwa Milicz (RDLP Wrocław) oraz zakończone właśnie urządzenie lasu w tym Nadleśnictwie, wybór padł właśnie na ten obiekt. Nadleśnictwo położone jest w północno-wschodniej części województwa dolnośląskiego (Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych we Wrocławiu), około 60 km na północ od Wrocławia. Powierzchnia Nadleśnictwa wynosi 26 351 ha. W składzie gatunkowym drzewostanów dominuje sosna (76%), dąb (9%), buk zwyczajny (4,7%) oraz olsza (4,5%). Struktura ta jest zbliżona do przeciętnych wartości dla Polski, a sygnalizowane przez administrację leśną zmiany dążą w kierunku zmniejszania udziału sosny na rzecz gatunków liściastych. Teren badań ma charakter równinny z występującymi pasowo wydmami śródlądowymi.

Reprezentację drzewostanów nadleśnictwa stanowi 30 kołowych powierzchni urządzeniowych o powierzchni (promieniu koła) uzależnionej od klasy wieku. Na sześciu powierzchniach występują drzewostany liściaste (Bk, Db, Gb) na pozostałych 24 powierzchniach - drzewostany iglaste: sosnowe. Powierzchnie są zgrupowane w 2 głównych obszarach odległych od siebie o około 3500 metrów (grupa liściastych drzewostanów od sosnowych). Odległości pomiędzy powierzchniami kołowymi wewnątrz grup waha się od 50 metrów do około 650 metrów w linii prostej. Firma Taxus SI wykonująca pomiary przekazała końcem października 2006 współrzędne WGS84 środków powierzchni kołowych pochodzących z pomiarów GPS w trybie autonomicznym. Pomimo niedokładności pomiaru sięgającego kilku metrów (XY – pomiar bez korekcji różnicowej) bez większych trudności

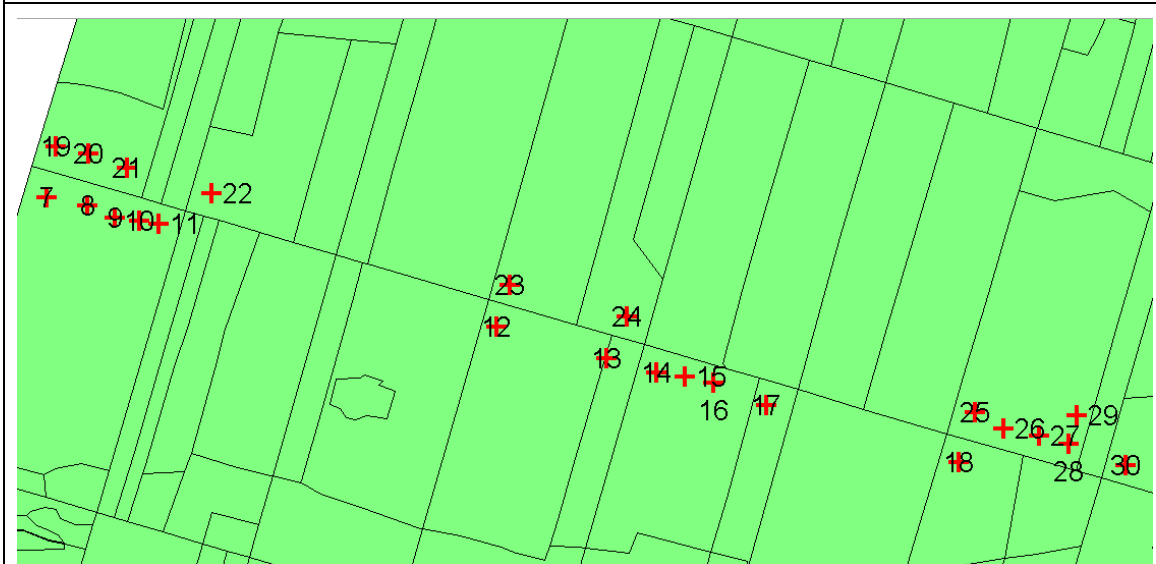
odnajdywano powierzchnie kołowe dobrze oznakowane na pniach drzew (tzw. lustra). W nawigacji do powierzchni kołowych wykorzystano także fragmenty map gospodarczych otrzymanych w formie rastrów (bez georeferencji) z naniesionymi uwagami nt. dotarcia do powierzchni czy jej lokalizacji. W niektórych analizach (np. przy określaniu możliwości automatyzacji przetwarzania pomiarów wykonanych za pomocą naziemnego skanowania laserowego) stosowano podzbiór 30 powierzchni referencyjnych. Związane to było z trudnościami w odpowiednim zorientowaniu i zlokalizowaniu powierzchni. Ponieważ korekta współrzędnych drzew na zobrazowaniach laserowych wykonywana była w różnym czasie, w momencie wykonywania analizy zdecydowano się odrzucić dane z pojedynczych wątpliwych powierzchni, na których współrzędne jeszcze nie zostały poddane korekcie.



Ryc. I.45. Lokalizacja Nadleśnictwa Milicz wraz położeniem powierzchni próbnych, tło stanowi wydruk LMN Nadleśnictwa Milicz.



Ryc. I.46. Lokalizacja powierzchni próbnych na tle granic wydziałów (nr pow. 1-6).



Ryc. I.47. Lokalizacja powierzchni próbnych na tle granic wydziałów (nr pow. 7-30).

7.2 Wykorzystane w analizach materiały

Materiały wykorzystane w opisywanych pracach pochodziły z różnych źródeł i od różnych wykonawców. Część z nich, przed wykorzystaniem w badaniach, poddana została obróbce lub przetworzeniu. Poniżej prezentowany jest opis wszystkich wykorzystanych w analizach danych oraz czynności, jakie zostały wykonane, by móc zastosować niektóre z nich w analizach.

7.2.1 Dane referencyjne z pomiarów naziemnych

Dane referencyjne pozyskane zostały w 2 różnych sesjach pomiarowych. W każdej z serii pomiar dotyczył nie zawsze tych samych cech drzewostanu. W sumie, w obszarze pokrytym lotniczym skanowaniem laserowym znalazło się 250 powierzchni próbnych (30 + 220).

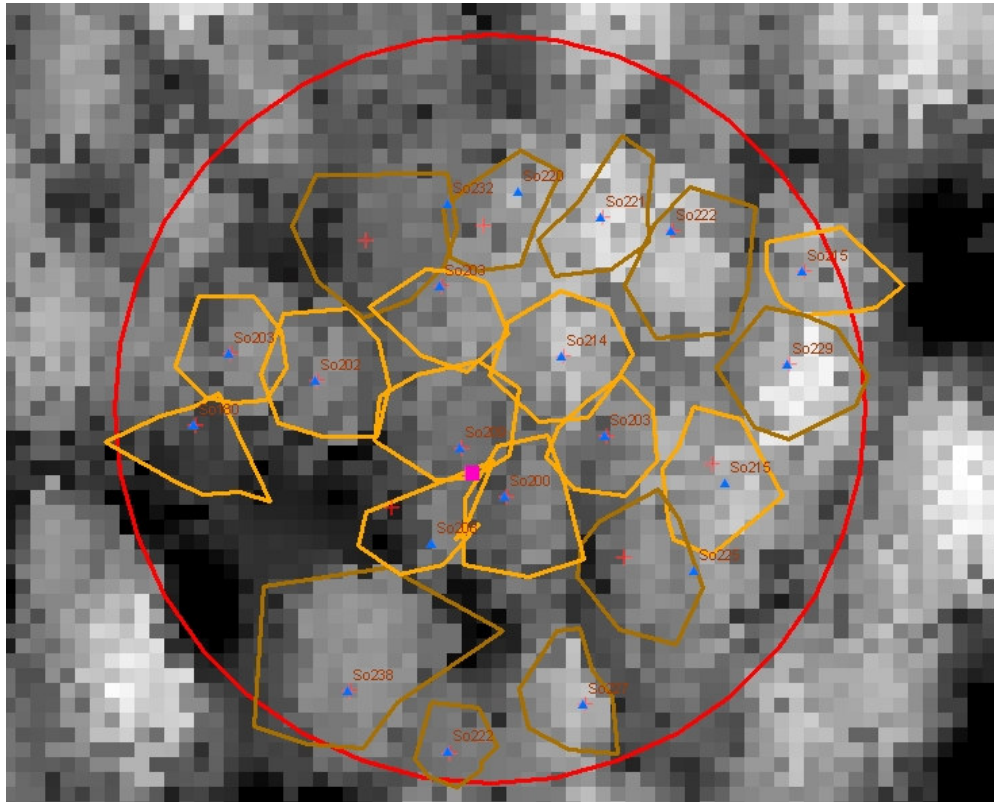
Inwentaryzacja naziemna przeprowadzona została jesienią 2006 roku. Pierwsza sesja pomiarowa wykonana została przez firmę Taxus SI i pracowników Wydziału Leśnego SGGW. W jej trakcie pomierzono 30 kołowych powierzchni próbnych, których promień uzależniony był od wieku drzewostanu (podobnie jak w tradycyjnej metodzie inwentaryzacji zapasu):

- 21 – 30 lat – 3,99 (0,005 ha),
- 31 – 40 lat – 5,64 (0,01 ha),
- 41 – 60 lat – 7,98 m (0,02 ha),
- 61 – 80 lat – 9,77 m (0,03 ha),
- 81 – 100 lat – 11,28 m (0,04 ha),
- 101 i starsze – 12,62 m (0,05 ha).

Na każdej z powierzchni próbnych wyznaczono metodą geodezyjną współrzędne środka oraz określono azymut i odległość od środka powierzchni do każdego drzewa znajdującego się w jej obrębie. Dla wszystkich drzew o pierśnicy powyżej 7 cm określono następujące parametry:

- gatunek,
- średnicę na wysokości 1,3 m – pierśnicę,
- średnicę na wysokości 5 m,
- wysokość wszystkich drzew – pomiary wykonano wysokościomierzem SUUNTO,
- wysokość osadzenia korony,
- zasięg korony w 8 kierunkach,
- wierzchołek korony,
- oznaczono drzewa martwe.

W oparciu o powyższe pomiary uzyskano informację o 668 drzewach. W trakcie analiz okazało się, że w czasie, który upłynął od pomiarów naziemnych do wykonania skanowania laserowego, powierzchnia nr 26 została wycięta.

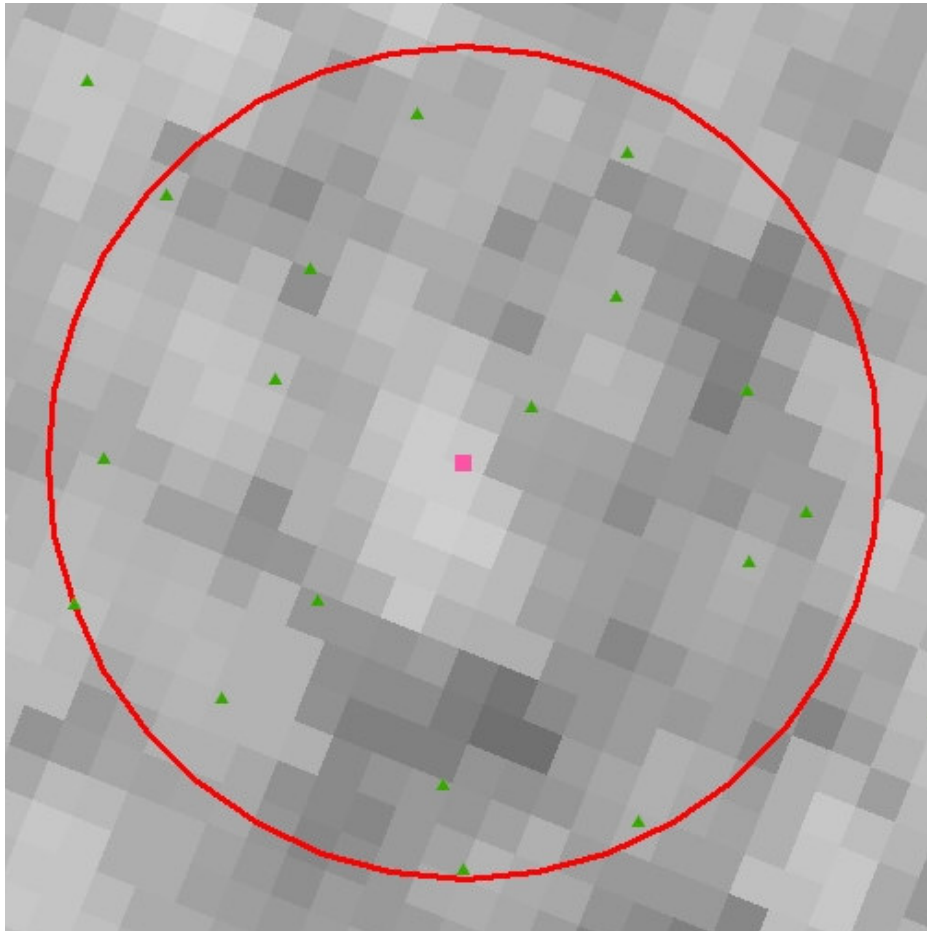


Ryc. I.48. Przykładowa powierzchnia próbna ze zwizualizowanymi warstwami: wierzchołków drzew (niebieskie trójkąty), pozycji pni drzew (pomarańczowe krzyże), rzutów koron drzew (różne odcienie brązowych krawędzi poligonów), zasięgów powierzchni próbnych (czerwony okrąg) i środków powierzchni próbnych (fioletowy kwadrat).

Druga sesja pomiarowa objęła swoim zasięgiem całe nadleśnictwo. W zasięgu wykonanego skanowania laserowego znalazło się 220 powierzchni próbnych pomierzonych przez pracowników Wydziału Leśnego SGGW i pracowników BULiGL. W tym przypadku środki powierzchni próbnych określano za pomocą pomiarów technologią DGPS, a inwentaryzacja naziemna objęła następujące cechy drzew:

- gatunek,
- średnicę na wysokości 1,3 m – pierśnicę,
- wysokość najbliżej środka położonych drzew, w każdym z wydzielonych pięter, osobno dla różnych gatunków – zgodnie z zasadami obecnie obowiązującej instrukcji urządzania lasu – pomiary wykonano wysokościomierzem SUUNTO,
- pozycje każdego drzewa określono mierząc azymut i odległość pnia drzewa od środka powierzchni próbnej.

W wyniku tej sesji pomiarowej uzyskano informacje na temat 4873 drzew.



Ryc. I.49. Przykładowa powierzchnia próbna ze zwizualizowanymi warstwami: pozycji pni drzew (zielone trójkąty), środków powierzchni próbnych (fioletowy kwadrat) i zasięgów powierzchni próbnych (czerwony okrąg).

Prace przygotowawcze, mające na celu wykorzystanie danych referencyjnych w analizach, przeprowadzono w następującym zakresie:

1. Dociągnięto obiekty wchodzące w skład powierzchni próbnych przedstawione za pomocą warstw wektorowych, tak by pokrywały się z tymi samymi obiektami prezentowanymi na modelach cyfrowych i zdjęciach lotniczych. Okazało się, że część powierzchni, pomimo pomiaru ich środków metodami geodezyjnymi, znajdowało się w pewnej odległości od ich prawidłowego położenia.
2. 25 z pośród 30 powierzchni próbnych z pierwszej serii pomiarowej zostało właściwie połączonych z modelami uzyskanymi z danych LIDAR-owych.
3. Wygenerowano okręgi ograniczające zasięg powierzchni próbnych.
4. Dla 220 powierzchni próbnych z drugiej serii pomiarowej wygenerowano następujące warstwy wektorowe
 - warstwę, w której skład weszły środki powierzchni próbnej,

- warstwę z pozycjami pni drzew, której podstawą były współrzędne środków powierzchni.
5. Wyselekcjonowano spośród wszystkich powierzchni próbnych drugiej serii te, które znajdowały się na obszarze pokrytym przez lotniczy skanowanie laserowe.

7.2.2 Dane z lotniczego skanowania laserowego

Nalot lotniczy w celu pozyskania danych z lotniczego skanowania laserowego przeprowadzony został w dniach 2 - 3 maja 2007 roku, przez firmę TopoSys, z wykorzystaniem systemu Falcon II (opis w tabeli I.36). W trakcie nalotu zbierana była informacja o pierwszym (FE – ang.: *first echo*) i ostatnim (LE – ang.: *last echo*) sygnale odbitym.

Tab. I.36. Parametry systemu Falcon II, wraz z charakterystyką danych pozyskanych do projektu.

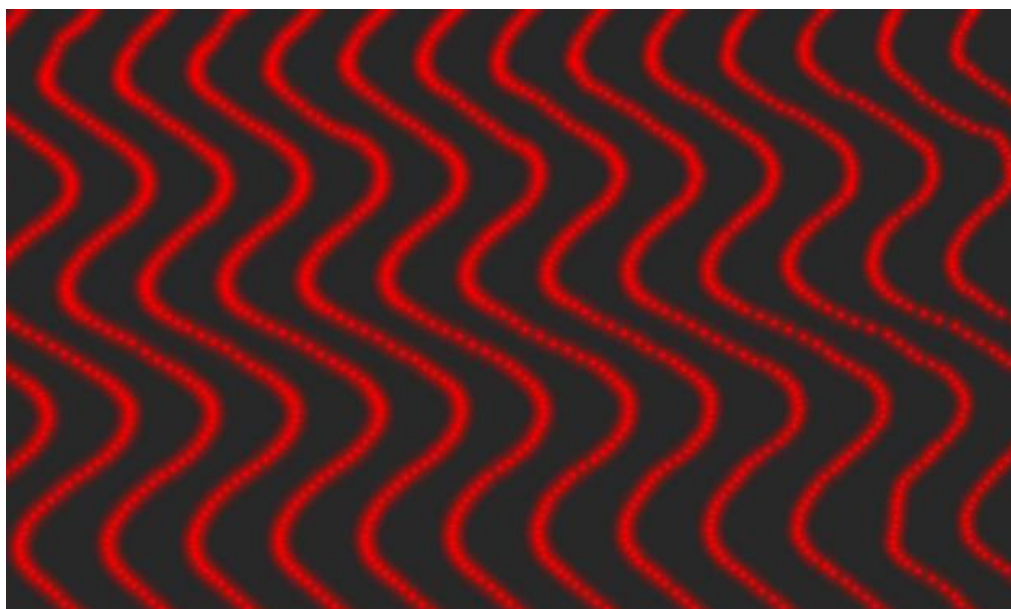
Typ sensora	Pulsacyjno - włóknisty
Długość fali	1560 nm
Częstotliwość pulsów	5 nsec
Częstotliwość skanowania	83 kHz
Zakres skanowania	14.3°
Rejestrowane odbicia	pierwsze (FE) i ostatnie (LE) odbicie
Wysokość lotu	700m
Wielkość plamki	0.7 m



Ryc. I.50. System Falcon II, przed umieszczeniem na platformie podwieszanej do samolotu.

Dane zostały dostarczone wykonawcy projektu 2 listopada 2007 roku. Niestety po kilkutygodniowej analizie i weryfikacji jakości danych i ostatecznym spotkaniu z przedstawicielami firmy TopoSys sprawdziły się podejrzenia dotyczące jakości danych. Okazało się, że w trakcie filtracji chmury punktów z ostatniego odbicia (LE) użyto ustawień dla obszaru zabudowanego, a nie jak w tym przypadku - leśnego. W związku z tym po poprawieniu surowej chmury punktów wykonawca nalotu dostarczył poprawne dane dopiero 17 stycznia 2008. Po ponownym sprawdzeniu okazało się, że chmura jest gęstsza niż wcześniej dostarczona. Poza tym nie stwierdzono różnic pomiędzy poszczególnymi pasami nalotu. Uznano dane za wiarygodne i wykorzystano do opisanych w opracowaniu analiz.

Dane pozyskane do projektu ostatecznie mają gęstość około 7-8 p/m². Przewyższa to spodziewaną gęstość, ale w tym przypadku ma to wpływ pozytywny na prowadzone analizy. Dane z systemu Falcon II mają bardzo charakterystyczny wzór. Ponieważ cały system posadowiony jest na platformie, która w trakcie nalotu poddana jest ruchowi wibrującemu, punkty tworzą na płaszczyźnie wzór sinusoidalny (ryc.I.51).

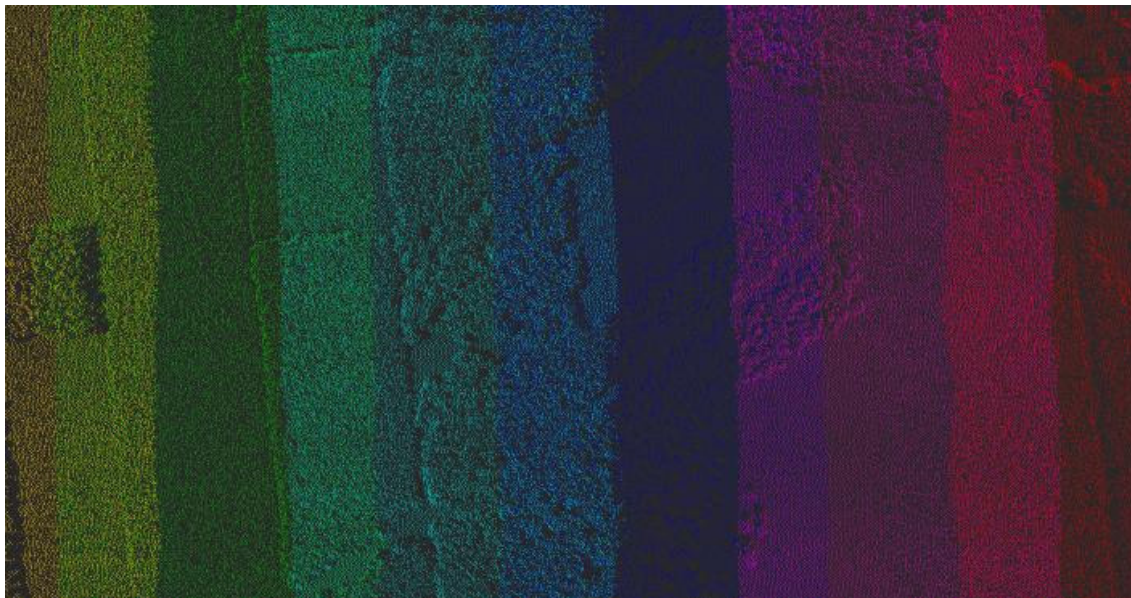


Ryc. I.51. Wzór, jaki tworzą punkty na płaszczyźnie, pozyskane przy pomocy systemu Falcon II.

Zdaniem przedstawicieli firmy TopoSys wykorzystywane przez nich rozwiązanie techniczne pozwala uzyskać wyższą gęstość punktów na metrze kwadratowym w porównaniu do systemów tradycyjnych, przy zachowaniu tej samej prędkości w trakcie lotu.

Istotnym aspektem skanowania laserowego jest to, by poszczególne pasy nalotu pokrywały się ze sobą tak, by cały obszar został pokryty równomiernie i bez „dziur” w danych. Rysunek poniżej (ryc. I.52) prezentuje wycinek danych, gdzie wyraźnie widać

zachodzenie (pokrywanie się wzajemne) poszczególnych pasów nalotu. Oczywiście jest, że w miejscach pokrycia gęstość punktów będzie średnio dwukrotnie wyższa niż dla środkowej części pasa.



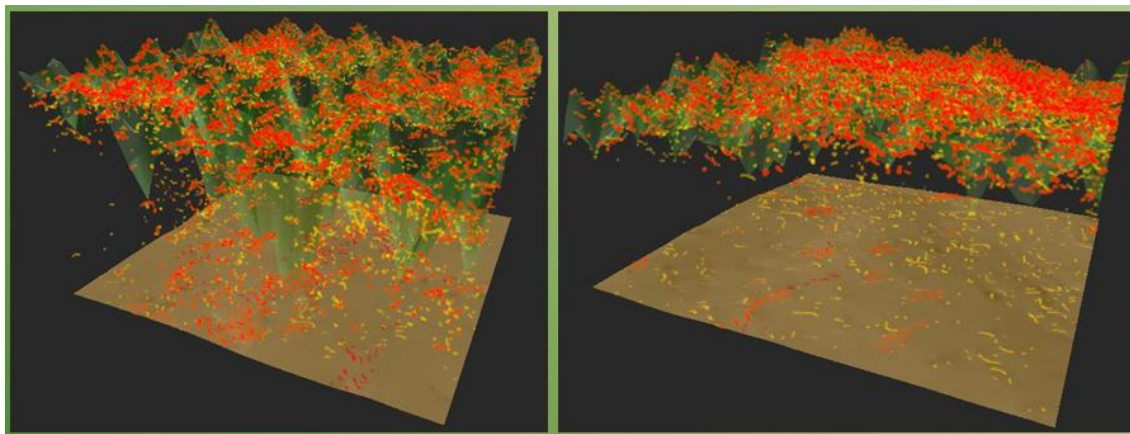
Ryc. I.52. Wzajemne ułożenie pasów danych z nalotu LIDAR-owego w Nadleśnictwie Milicz. Wyraźnie widoczne jest pokrycie poprzeczne pomiędzy pasami sięgające około 30% szerokości pasa.

Dane LIDAR-owe wykorzystane były w projekcie przede wszystkim do tworzenia modeli terenu, które były podstawą między innymi w określeniu zagęszczenia drzew, w analizach struktury przestrzennej drzewostanu czy do określania przebiegu dróg leśnych. Dodatkowo nieprzetworzona chmura punktów wykorzystana została do rozwinięcia 2 metod segmentacji drzewostanu na pojedyncze korony.

Przed przystąpieniem do analiz dane z lotniczego skanowania laserowego zostały sprawdzone. Porównano położenie sąsiadujących pasów nalotu oraz wzajemne położenie względem siebie danych z pierwszego i z ostatniego odbicia. Dzięki tym analizom udało się uniknąć błędu w filtracji ostatniej chmury danych. Wykonawca nalotu poprawił dane i ostatecznie obie chmury punktów zostały poprawnie wykonane.

Dla wszystkich powierzchni próbnych (około 250) wygenerowano z surowych danych LIDAR-owych następujące chmury punktów: FE, LE i łączoną chmurę z dwóch wcześniejszych. Wszystkie chmury miały rozmiar 50 m x 50m w poziomie, ze współrzędną środka zgodną ze współrzędną środka powierzchni próbnej pomierzonej w terenie. Wygenerowanie większego obszaru niż właściwa powierzchnia próbna miało na celu uwzględnienie ewentualnych odchyłek spowodowanych błędem pomiaru środków

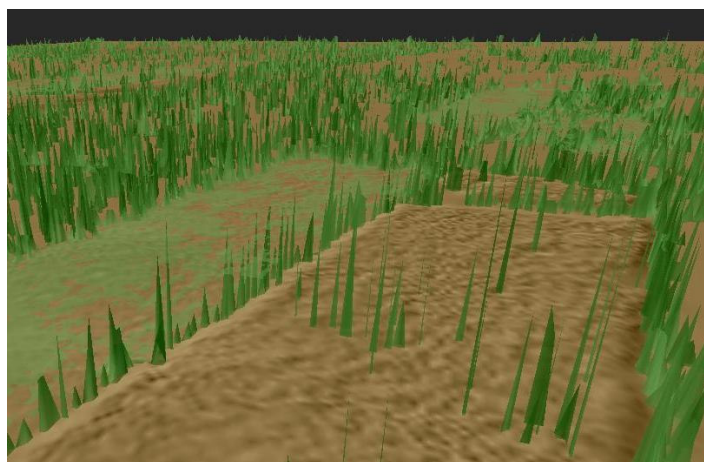
powierzchni w trakcie inwentaryzacji naziemnej. Poniżej prezentowane są 2 przykładowe powierzchnie próbne, gdzie na tle numerycznych modeli terenu pokazane są surowe chmury punktów (Ryc. I.53).



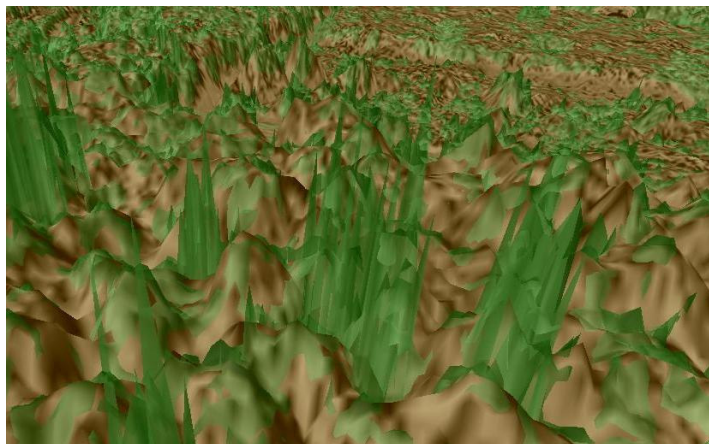
Ryc. I.53. Powierzchnie próbne 50 m × 50 m z dociętymi do ich powierzchni danymi z lotniczego skanowania laserowego.

Numeryczne modele terenu

Numeryczne modele terenu miały zostać pierwotnie wygenerowane przez firmę TopoSys, wykonawcę nalogu skanerem laserowym. Niestety od początku w modelach stwierdzane były błędy. Szczególnie numeryczny model pokrycia terenu (DSM) był nimi skażony i dopiero po czwartej poprawce wykonanej przez dostawcę danych osiągnięto zadowalającą dokładność. Głównym problemem były pojawiające się w danych strome szczyty wynikające z błędnej filtracji (ryc. I.54 i I.55).



Ryc. I.54. DTM – kolor brązowy, DSM – kolor zielony, widoczne, na płaskim terenie, „piki” w modelu DSM.



Ryc. I.55. DTM – kolor brązowy, DSM – kolor zielony, widoczne „piki” w modelu DSM nad koronami drzew.

Ostatecznie obydwie modele terenu dostarczono pięciokrotnie. Dopiero 20 marca 2008 roku dostarczony został przez firmę TopoSys prawidłowo wyinterpolowany numeryczny model pokrycia terenu. W wyniku problemów z dostarczeniem prawidłowych modeli terenu przez wykonawcę wykorzystano program TreesVis do ich generacji. Program TreesVis jest efektem prac prowadzonych na Wydziale Leśnym Uniwersytetu we Freiburgu (Department of Remote Sensing and Landscape Information Systems).

Najważniejszą funkcją programu, w początkowym etapie jego powstania, była wizualizacja dużych porcji danych. W tym celu zastosowano wiele technik i algorytmów optymalizujących ten proces ([Weinacker i in. 2004](#)). Doświadczenia pokazują, że wczytanie ponad 130 milionów punktów do środowiska programu nie przeciąża laptopa (procesor dwurdzeniowy 2,16 GHz, karta graficzna ATI Mobility Radon X1400, 256 Mb pamięci własnej), dzięki czemu możliwe jest ich swobodne przeglądanie. W wyniku dalszych prac nad jego rozwojem program uzyskał nowe możliwości.

W programie istnieje opcja wczytania kilku różnych formatów i modeli danych:

- *Raw data* – surowe dane LIDAR-owe, każda osobna smuga wizualizowana jest w innym kolorze,
- *Numeryczne modele terenu* – NMT i NMPT wczytywane są osobno i wizualizowane w dowolnej palecie barwnej,
- *Teksturę* – *orthophoto* lub *true – orthophoto*,
- *Obiekty wektorowe*,
- *Obiekty 3D* – będące np. modelami drzew lub budynków.

Aplikacja obsługuje tylko kilka formatów danych, dzięki którym możliwa jest wymiana informacji z innymi programami. TreesVis dostępny jest w dwóch wersjach w zależności od licencji. Pierwszy rodzaj licencji pozwala używać programu jak typowej przeglądarki, wzbogaconej o kilka narzędzi do konwersji i filtracji danych. Drugi rodzaj licencji pozwala na generowanie i analizę modeli numerycznych. Opcja ta ma zostać udostępniona dla szerszego grona użytkowników po zaimplementowaniu do środowiska programu narzędzi m.in. do automatycznej segmentacji drzewostanu na pojedyncze drzewa i wydzielenia. Trzeba pamiętać, że opisywany program, jest narzędziem powstałym na uniwersytecie, dlatego brak jest, typowej dla dużych firm, pomocy technicznej. Czasami może to prowadzić do niepotrzebnej zwłoki, zwłaszcza w przypadku potrzeby usunięcia niespodziewanego błędu.

Zasady działania algorytmu do generacji numerycznych modeli terenu znajdują się w paragrafie nr 4 niniejszego opracowania, który jest zatytułowany: „Interpolacja numerycznych modeli terenu w oparciu o dane z lotniczego skanowania laserowego”.

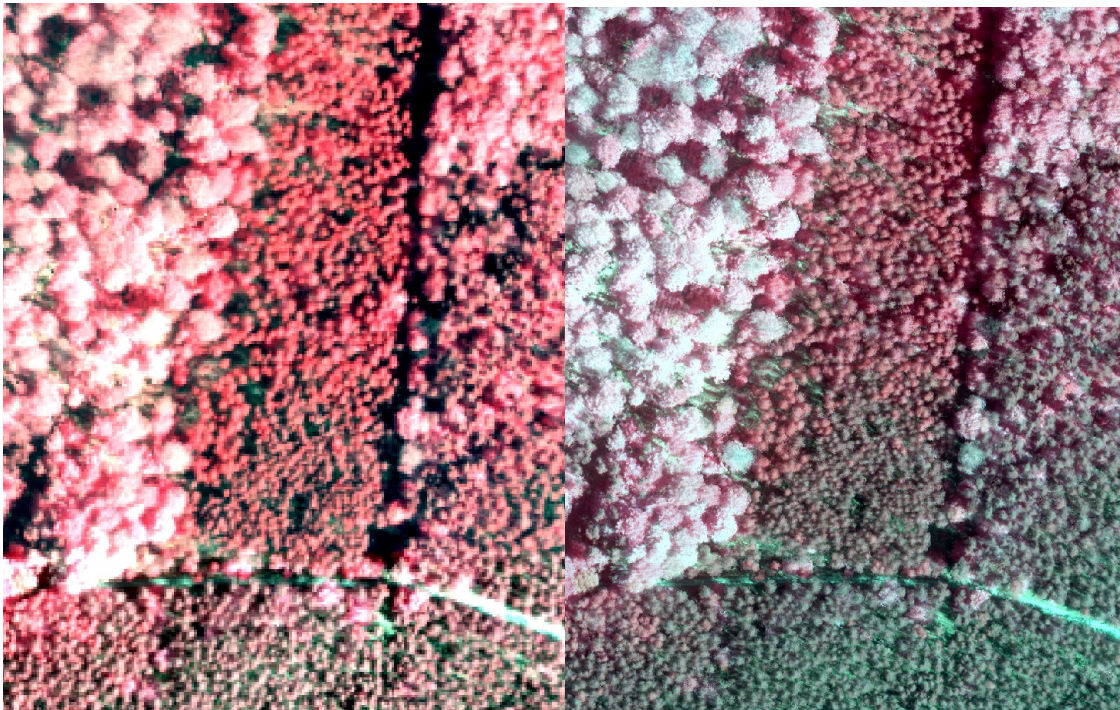
Ortofotomapa na bazie numerycznego modelu pokrycia terenu (ang.: true-orthophoto)

Mapy ortofoto zamówione zostały w firmie TopoSys. Do ich budowy wykorzystano informację spektralną (kompozycje barwne imitujące zdjęcia lotnicze w barwach naturalnych (ang: *natural color - NC*) i spektrostrefowych (ang: *color infrared CIR*) ze skanera liniowego (ang: *RGB/NIR linear scanner*) i numeryczny model pokrycia terenu uzyskany z danych pozyskanych z lotniczego skanowania laserowego.

Skaner liniowy zbiera informację w postaci obrazu ciągłego, dlatego nie jest możliwe pozyskanie, jako osobnych zdjęć lotniczych. Poszczególne piksele obrazu orto-rektyfikowane są w oparciu o odpowiadające im piksele z numerycznego modelu pokrycia terenu. Pierwotnie firma TopoSys dostarczyła ortofoto mapy o rozdzielczości 1 m, następnie w rozdzielczości 0,25 m, co było przedmiotem zamówienia. Poniżej prezentowane są dostarczone ortofotomapy (Ryc. I.56 i I.57).



Ryc. I.56. Ortofotomapy powstałe w oparciu o kompozycje barwne imitujące zdjęcia w barwach naturalnych (NC) o rozdzielczości 1 m (z lewej) i 0,25 m (z prawej).



Ryc. I.57. Ortofotomapy powstałe w oparciu o kompozycje barwne imitujące zdjęcia spektrostrefowe (CIR) o rozdzielczości 1 m (z lewej) i 0,25 m (z prawej).

Dokładny opis procesu kalibracji danych obrazowych z danymi z laserowego skanowania lotniczego nie jest dostępny. Na stronach firmy TopoSys można zapoznać się

tylko z poszczególnymi, bardzo ogólnymi etapami całego procesu. W związku z tym nie przytaczano w niniejszym opracowaniu opisów dotyczących powstawania *true-orthophoto*.

Ortofotomapa wykorzystana została głównie w procesie weryfikacji dokładności algorytmów do określania liczby drzew na jednostkę powierzchni. Dodatkowo została wykorzystana do klasyfikacji drzewostanów na gatunki drzew.

Ortofotomapa na bazie numerycznego modelu terenu (ang.: *orthophoto*)

Opisywana ortofotomapa powstała w oparciu o cyfrowe zdjęcia lotnicze RGB wykonane w 2006 roku. Jej rozdzielczość terenowa to 15 cm. Mapa wykonana i dostarczona została przez firmę TeleAtlas. Mapa wykorzystywana była jako materiał pomocniczy do weryfikacji dokładności algorytmów do segmentacji drzewostanów oraz przy wyborze konkretnych fragmentów drzewostanów do innych badań.



Ryc. I.58 Ortofotomapa – kompozycja barwna symulująca zdjęcie lotnicze w barwach naturalnych RGB, o rozdzielczości 15 cm.