

# 14. Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych

## 14.1. Podstawy teledetekcji i fotogrametrii

prof. dr hab. TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI – Instytut Badawczy  
Leśnictwa

### 14.1.1. Wprowadzenie

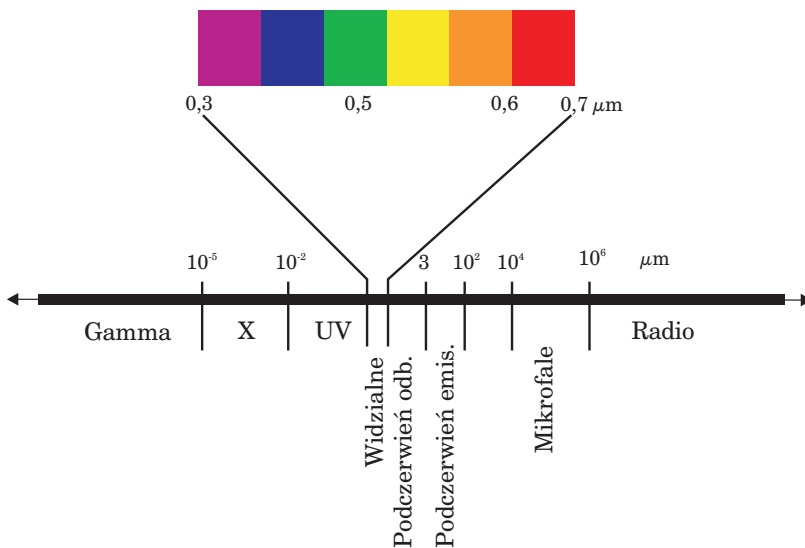
Międzynarodowe Towarzystwo Fotogrametrii i Teledetekcji definiuje fotogrametrię i teledetekcję jako dziedziny nauk technicznych zajmujące się zdalnym pozyskiwaniem informacji o obiektach fizycznych i ich otoczeniu drogą rejestracji, pomiaru i interpretacji zdjęć.

Fotogrametria jest działem nauki i techniki zajmującym się odtwarzaniem kształtów, rozmiarów i wzajemnego położenia obiektów w terenie na podstawie zdjęć fotogrametrycznych, wykonywanych z powierzchni Ziemi, samolotów lub satelitów. W Polsce początki fotogrametrii datuje się na wczesne lata 20. ubiegłego wieku, kiedy to Kasper Weigel, profesor Politechniki Lwowskiej, opracował mapę Tatr z wykorzystaniem stereofotogramów.

Z kolei teledetekcja jest działem nauki zajmującym się zdalnym pozyskiwaniem, przetwarzaniem i interpretowaniem informacji jakościowych o obiektach, zjawiskach i procesach na powierzchni Ziemi. Po raz pierwszy to pojęcie zastosowano w USA na początku lat 60. minionego stulecia do określenia obserwacji na podstawie zdjęć lotniczych. Obecnie rozumie się pod nim zdalne pozyskiwanie i opracowywanie danych o środowisku na podstawie rejestracji promieniowania elektromagnetycznego.

Do zdalnego pozyskiwania danych o obiektach i różnorodnych zjawiskach w atmosferze, na powierzchni Ziemi i w jej głębi stosuje się między innymi pomiary przyspieszenia ziemskiego, fal sejsmicznych, fal dźwiękowych i fal elektromagnetycznych. Te ostatnie są podstawą teledetekcji środowiska wykorzystującej zdjęcia lotnicze oraz satelitarne.

Częstotliwość i długość fali elektromagnetycznej zależą od ich źródła i obejmują zakres od niskich częstotliwości fal elektrycznych generowanych przez przesyłowe linie energetyczne, aż po wysokie częstotliwości fal gamma emitowanych przez promieniotwórcze jądra atomowe. Ten szeroki zakres tworzy spektrum elektromagnetyczne (ryc. 14.1.1 i tabela 14.1.1).



Ryc. 14.1.1. Schemat spektrum elektromagnetycznego

Teledetekcja wykorzystuje słoneczne promieniowanie elektromagnetyczne odbite przez atmosferę oraz od obiektów na powierzchni Ziemi, promieniowanie emitowane przez obiekty (głównie ciepłe i mikrofalowe), a także promieniowanie generowane przez specjalistyczne urządzenia (radary i linary), którego wartości odbicia są następnie mierzone i porównywane z wartościami promieni wysyłanych.

Możemy więc podzielić techniki teledetekcyjne ze względu na źródło wykorzystywanego promieniowania elektromagnetycznego na (ryc. 14.1.2):

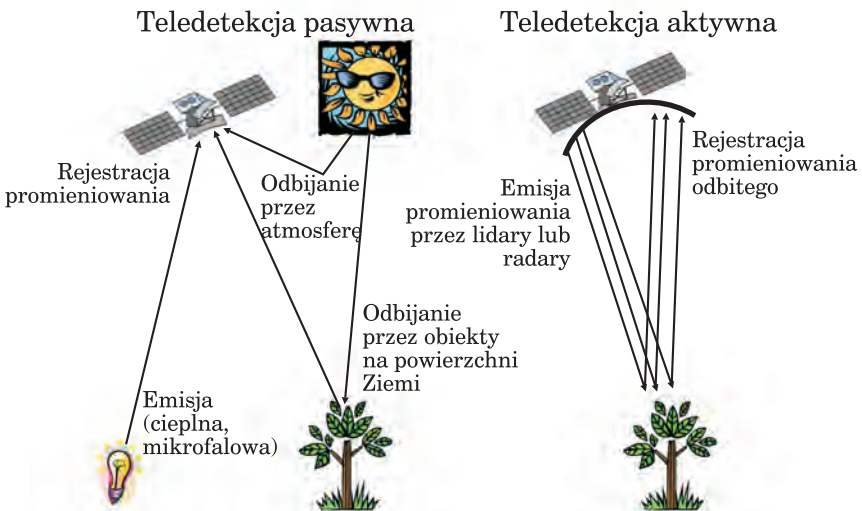
- pasywne – wykorzystujące promieniowanie słoneczne lub promieniowanie emitowane przez obiekty,
- aktywne – wykorzystujące własne źródła promieniowania.

Atmosfera zbudowana jest ze składników o stałej koncentracji (78% – azot, 21% – tlen), o koncentracji zmiennej (para wodna, ozon, związki azotu i siarki) oraz ze stałych i płynnych cząsteczek (aerozole, krople wody, kryształki lodu), które mogą tworzyć chmury i mgły.

Promieniowanie elektromagnetyczne, docierające do górnych warstw atmosfery, to głównie fale krótkie o długości 0,1–4 μm, z czego na ultrafio-

Tabela 14.1.1.  
Zakresy spektrum elektromagnetycznego

Zakres	Długość fal
Gamma	0,001 $\mu\text{m}$
X	0,001–0,1 $\mu\text{m}$
Ultrafiolet (nadfiolet lub UV) <i>UV próżniowy</i> <i>UV C</i> <i>UV B</i> <i>UV A</i>	0,1–0,4 $\mu\text{m}$ 0,1–0,2 $\mu\text{m}$ 0,2–0,28 $\mu\text{m}$ 0,28–0,315 $\mu\text{m}$ 0,315–0,40 $\mu\text{m}$
Widzialny (światło widzialne) <i>Fioletowy</i> <i>Niebieski</i> <i>Zielony</i> <i>Żółty</i> <i>Pomarańczowy</i> <i>Czerwony</i>	0,4–0,7 $\mu\text{m}$ 0,400–0,446 $\mu\text{m}$ 0,446–0,500 $\mu\text{m}$ 0,500–0,578 $\mu\text{m}$ 0,578–0,592 $\mu\text{m}$ 0,592–0,620 $\mu\text{m}$ 0,620–0,700 $\mu\text{m}$
Podczerwony <i>Bliska podczerwień (krótkofalowa, fotograficzna)</i> <i>Średnia (środkowa) podczerwień</i> <i>Daleka podczerwień (termalna)</i>	0,7 $\mu\text{m}$ – 1 cm 0,7–1,5 $\mu\text{m}$ 1,5 $\mu\text{m}$ – 3 $\mu\text{m}$ 3 $\mu\text{m}$ – 12 $\mu\text{m}$
Mikrofalowy	1 cm – 1 m
Radiowy	1 m – 10 km



Ryc. 14.1.2. Schemat obrazujący pasywne i aktywne pozyskiwanie obrazowań teledetekcyjnych

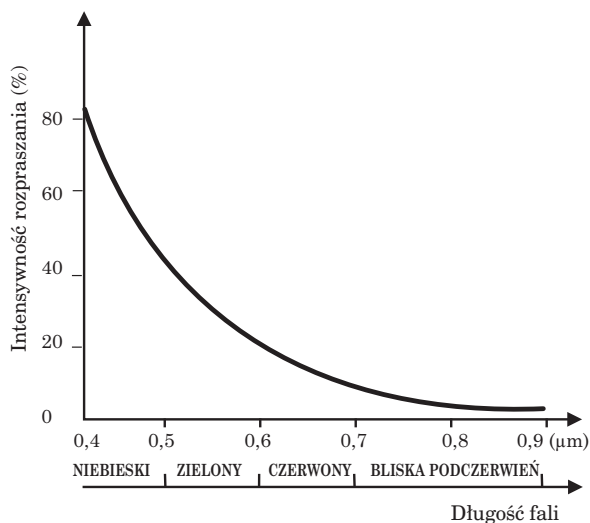
let przypada 9%, na zakres widzialny – 45%, a na podczerwień – 46%. Atmosfera pochłania średnio 15% promieniowania słonecznego, a Ziemia – 43%. Górne warstwy atmosfery pochłaniają głównie promieniowanie ultrafioletowe (pochłaniają je cząsteczki ozonu i atomy tlenu), a dolne – widzialne i podczerwone (cząsteczki pary wodnej, dwutlenku węgla, pyłów oraz krople wody).

Promieniowanie całkowite, docierające do powierzchni Ziemi, składa się z bezpośredniego promieniowania Słońca oraz promieniowania rozproszonego w atmosferze. Najważniejszymi zjawiskami wpływającymi na wartość promieniowania w atmosferze są rozpraszanie i pochłanianie.

Rozpraszanie zachodzi wtedy, gdy cząsteczki zawarte w atmosferze powodują zmiany kierunku promieniowania elektromagnetycznego. Intensywność rozpraszania zależy od długości fal i stanu atmosfery w danym momencie. Ogólny schemat intensywności rozpraszania przez atmosferę promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni przedstawia ryc. 14.1.3, z której wynika, że najsilniej atmosfera rozprasza promieniowanie krótkofalowe, a najslabiej długofalowe. Rozpraszanie światła jest odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fal ( $\lambda^4$ ). Tak więc promienie niebieskie są rozpraszane bardzo intensywnie, a bliska podczerwień i czerwien – w niewielkim tylko stopniu. Można z tego wysnuć wnioski dotyczące przydatności tych zakresów do zobrazowań teledetekcyjnych.

Rozpraszanie promieniowania w atmosferze ma duże znaczenie w teledetekcji, gdyż ogranicza zastosowanie zakresu niebieskiego, natomiast mgły i chmury pogarszają jakość zdjęć i mogą utrudniać ich interpretację.

Ozon, dwutlenek węgla i para wodna to główni sprawcy pochłaniania fal elektromagnetycznych przez atmosferę, w konsekwencji czego niektó-



**Ryc. 14.1.3.** Wykres przedstawiający intensywność rozpraszania przez atmosferę promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni. Najsilniej rozpraszane jest promieniowanie niebieskie, a najslabiej w podczerwieni fotograficznej

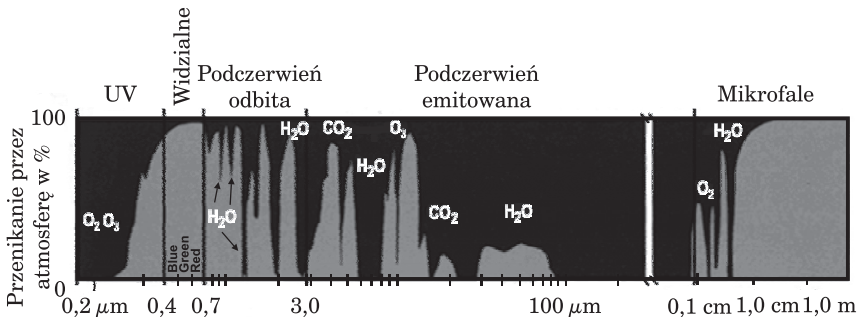
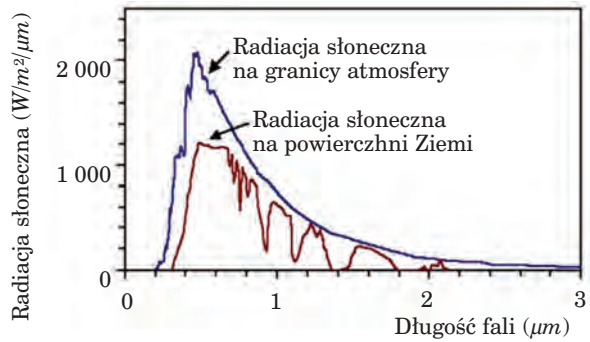
re zakresy spektrum są całkowicie przez nią „zablokowane”, a więc ich stosowanie w teledetekcji jest niemożliwe.

Ogólnym efektem przechodzenia promieniowania przez atmosferę jest osłabianie jego wartości energetycznej (ryc. 14.1.4).

Pochłanianie promieniowania Słońca przez atmosferę ziemską nie jest równomierne w całym zakresie spektrum. Istnieją przedziały, w których atmosfera jest nieprzezroczysta, natomiast w innych całkowicie przepuszcza słoneczne promieniowanie elektromagnetyczne (ryc. 14.1.5.). Powoduje to, że w niektórych zakresach można wykorzystywać promieniowanie elektromagnetyczne w teledetekcji środowiska, a w innych jest to zupełnie niemożliwe. Obszary spektrum, które nie są silnie zakłócone przez atmosferę, noszą nazwę „okien transmisji atmosferycznej” lub „okien atmosferycznych”. Są one wykorzystywane w teledetekcji środowiska, zajmującej się badaniem powierzchni Ziemi.

Promieniowanie elektromagnetyczne, przenikające przez atmosferę i znajdujące zastosowanie w teledetekcji środowiska, przedstawia tabela 14.1.2 (porównaj ryc. 14.1.5).

**Ryc. 14.1.4.** Schemat wartości promieniowania słonecznego o różnych zakresach na powierzchni atmosfery i na powierzchni Ziemi. Atmosfera osłabia wartość radiacji słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi



**Ryc. 14.1.5.** Schemat przenikania promieniowania elektromagnetycznego przez atmosferę. Widać rozmięszczenie „okien atmosferycznych” oraz substancje odpowiedzialne za pochłanianie promieniowania

Tabela 14.1.2.

Wykaz okien atmosferycznych, czyli zakresów spektrum, w których słoneczne promieniowanie elektromagnetyczne przenika przez atmosferę do powierzchni Ziemi, a więc może być wykorzystywane do badania obiektów na jej powierzchni

Zakres promieniowania elektromagnetycznego	Długość fal
Ultrafiolet i widzialny	0,3–0,7 $\mu\text{m}$
Bliska podczerwień	0,7–0,91 $\mu\text{m}$
	1,00–1,12 $\mu\text{m}$
	1,19–1,34 $\mu\text{m}$
Średnia podczerwień	1,55–1,75 $\mu\text{m}$
	2,05–2,40 $\mu\text{m}$
Podczerwień termalna	3,35–4,16 $\mu\text{m}$
	4,50–5,0 $\mu\text{m}$
	8,0–9,2 $\mu\text{m}$
	10,02–12,4 $\mu\text{m}$
Mikrofale	od 1 cm

Zakres pomiędzy 0,3  $\mu\text{m}$  a 22  $\mu\text{m}$  (bliski ultrafiolet, światło widzialne i podczerwień) jest nazywany optycznym, gdyż do jego rejestracji wykorzystuje się sensory optyczne (kamery, skanery, lidary). Natomiast obszar spektrum powyżej 1 mm nosi nazwę mikrofalowego, a do jego rejestracji stosuje się radary.

Promieniowanie elektromagnetyczne docierające do powierzchni Ziemi przenika przez obiekty na niej się znajdujące (tzw. transmisja promieniowania), jest przez nie pochłaniane lub odbijane.

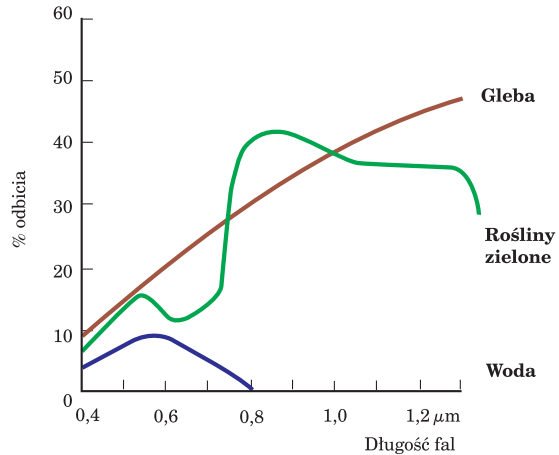
Promieniowanie pochłaniane wskutek reakcji elektronowych i molekularnych jest następnie emitowane, przeważnie w postaci fal dłuższych niż absorbowane – głównie jako ciepło (podczerwień termalna).

Z punktu widzenia teledetekcji najważniejsze jest promieniowanie odbijane. Odbicie może się dokonywać na wiele sposobów, począwszy od odbicia lustrzanego, aż po odbicie rozproszone.

Każdy obiekt odbija promieniowanie elektromagnetyczne w charakterystyczny sposób, a wykres takiego odbicia nosi nazwę krzywej spektralnej lub krzywej odbicia spektralnego (ryc. 14.1.6).

Przebieg krzywej spektralnej roślinności w zakresie widzialnym (0,4–0,7  $\mu\text{m}$ ) ma minima w przedziale niebieskim (0,4–0,5  $\mu\text{m}$ ) i czerwonym (0,6–0,7  $\mu\text{m}$ ) oraz maksimum w zakresie zielonym (0,5–0,6  $\mu\text{m}$ ). Minima te są wynikiem pochłaniania promieniowania wykorzystywanego

**Ryc. 14.1.6.** Krzywe odbicia spektralnego gleby, roślinności i wody



w procesie fotosyntezy. Natomiast odbicie zakresu 0,5–0,6 μm skutkuje tym, że roślinność postrzegamy w barwie zielonej. Na jesieni, gdy liście tracą chlorofil, proporcje pochłaniania się zmieniają i większemu odbiciu podlegają fale czerwone, co powoduje efekt czerwienienia i żółknięcia liści (żółty jest kombinacją czerwieni i zieleni).

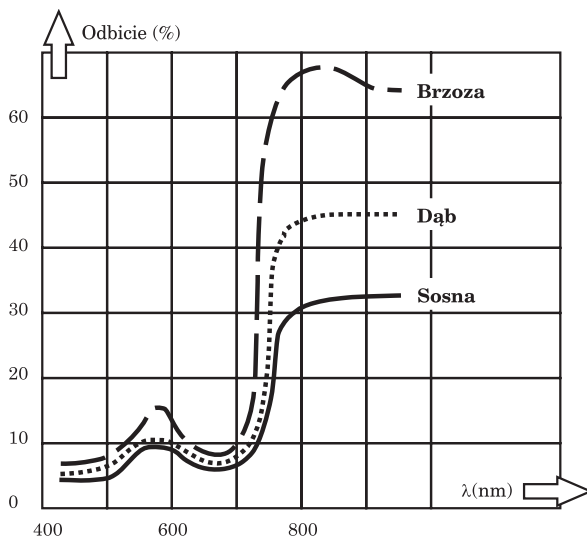
Wewnętrzna struktura zdrowych liści powoduje, że promieniowanie bliskiej podczerwieni (0,7–1,3 μm) jest intensywnie odbijane i stąd maksimum na wykresie krzywej spektralnej roślinności. Zobrazowania w tym zakresie spektralnym pokazują roślinność w postaci bardzo jasnych obiektów. Wraz ze spadkiem kondycji roślin ich odbicie maleje, dzięki czemu bliska podczerwień może być wykorzystywana do obrazowania stanu zdrowotnego roślin.

Wielkości odbicia i pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego przez rośliny zależą od:

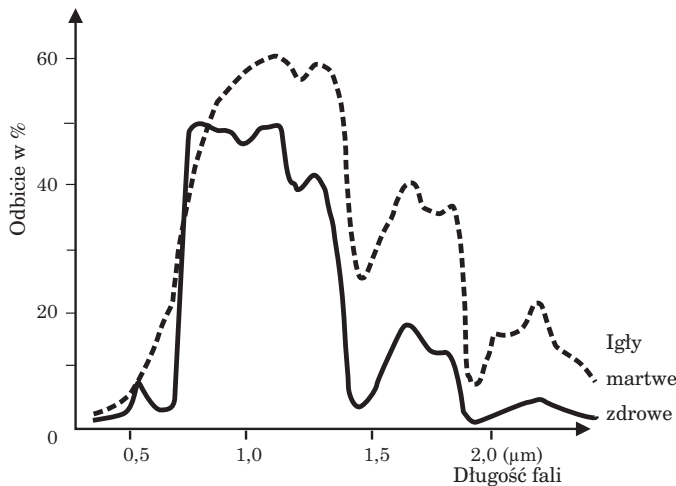
- barwników zawartych w zielonych częściach roślin, których ilość i rozmieszczenie decydują o przebiegu krzywej w zakresie widzialnym;
- struktury komórkowej, która ma wpływ na przebieg krzywej w zakresie bliskiej podczerwieni;
- zawartości wody, która decyduje o wielkościach odbicia i pochłaniania w zakresie podczerwieni średniej.

Warto podkreślić, że rośliny zielone odbijają różne zakresy promieniowania w różnych proporcjach, ale zawsze przebieg krzywej spektralnej zielonych części roślin będą charakteryzowały minima w przedziałach niebieskim i czerwonym, maksimum w zakresie zielonym oraz bardzo wyraźny wzrost odbicia w bliskiej podczerwieni (ryc. 14.1.7).

Zmiana kondycji roślin uwidaczniana jest modyfikacją ich odpowiedzi spektralnych. Destrukcja chloroplastów powoduje wzrost odbicia od aparatu asymilacyjnego w zakresie widzialnym, natomiast destrukcja mezofilu i dehidracja tkanek – silne zmiany odbicia w podczerwieni. W wyniku nie-



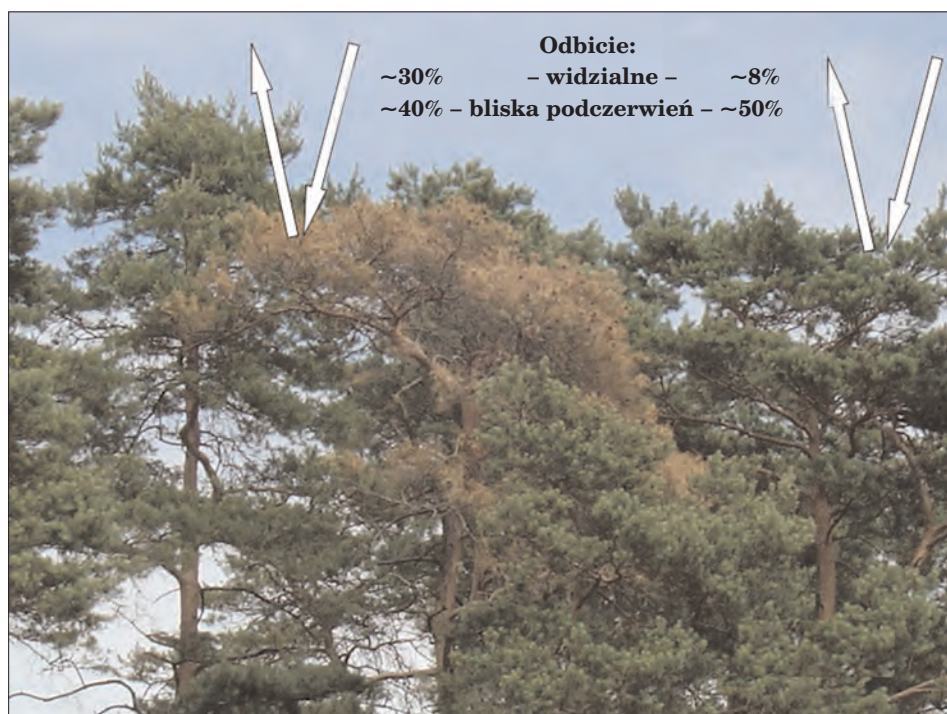
**Ryc. 14.1.7.**  
 Charakterystyki spektralne różnych gatunków drzew leśnych. Przy różnych proporcjach odbijania różnych zakresów spektralnych zachowane są podobne kształty krzywych z minimummi w zakresach niebieskim i czerwonym (pochłanianie światła przez chlorofil) oraz maksimumami w zakresach zielonym i podczerwieni fotograficznej (źródło: Ciołkosz i in. 1999)



**Ryc. 14.1.8.**  
 Różnice w odbiciu promieniowania elektromagnetycznego od sosen zdrowych i martwych (źródło: Guyot 1985)

doboru wody tkanki reagują wędnięciem, a więc zmianą kąta ustawienia liści, wskutek czego następuje wzrost odbicia od pokrywy glebowej, gdyż igły i liście, sytuując się wzdłuż pnia i gałęzi, odsłaniają niższe piętra lasu.

Żer szkodników pierwotnych powoduje prześwietlenie korony, a więc zmniejszenie udziału aparatu asymilacyjnego w wartościach odbicia spektralnego od drzewostanów. Przykład różnic odbicia od drzew zdrowych i martwych przedstawiają ryc. 14.1.8 i 14.1.9.



**Ryc. 14.1.9.** Różnice w odbiciu promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni od sosen zdrowych i martwych. Drzewa zdrowe odbijają ok. 8% światła widzialnego i 50% bliskiej podczerwieni, natomiast z martwymi igłami – odpowiednio 30% i 40%

## 14.1.2. Techniki pozyskiwania teledetekcyjnej informacji obrazowej

Zobrazowania teledetekcyjne mogą być wykonywane w postaci zdjęć fotograficznych lub cyfrowych. Zdjęcia fotograficzne są rejestrowane w sposób ciągły przez kamery na błonach fotograficznych, natomiast zdjęcia cyfrowe – przez skanery w sposób dyskretny. Skanery zapisują promieniowanie elektromagnetyczne w postaci matrycy pikseli – podstawowych elementów obrazu. Każdy z pikseli ma wartość odpowiadającą zarejestrowanej intensywności światła, ciepła lub innego zakresu promieniowania elektromagnetycznego.

Teledetekcję z punktu widzenia pochodzenia promieniowania rejestrowanego przez sensory można podzielić na pasywną i aktywną. Pasywne techniki teledetekcyjne są uzależnione od zewnętrznego źródła promieniowania (np. odbite promieniowanie Słońca, emisja ciepła, emisja mikrofalowa), natomiast techniki aktywne opierają się na własnym „oświetleniu”

obiektów. Teledetekcja aktywna posługuje się wysyłaniem wiązki promieniowania, a następnie rejestracją fal odbitych, obliczając przy tym często czas, kąt i intensywność wiązki zwrotnej (w taki sposób działają radary i lidary).

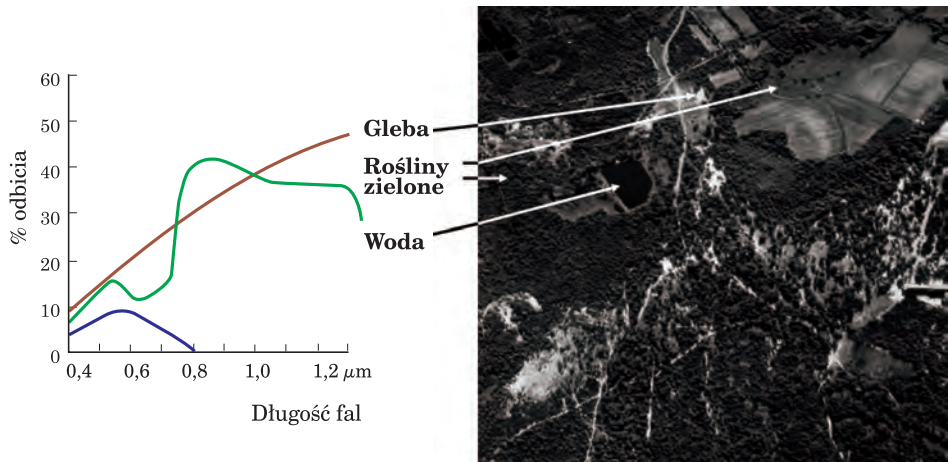
### 14.1.2.1. Techniki pasywne

#### 14.1.2.1.1. Zdjęcia panchromatyczne

Zdjęcia panchromatyczne rejestrują, w postaci czarno-białego obrazu, cały zakres widzialny ( $0,4\text{--}0,7\ \mu\text{m}$ ), a często także bliski ultrafiolet i bliską podczerwień ( $0,3\text{--}1,3\ \mu\text{m}$ ).

Na zdjęciu panchromatycznym wody są odwzorowane w ciemnych tonach, nieco mniej ciemne są lasy, następnie roślinność trawiasta, a najjaśniejsze są gleby piaszczyste. Ryc. 14.1.10 przedstawia przykład lotniczego zdjęcia panchromatycznego, zestawionego z krzywymi spektralnymi wybranych obiektów terenowych.

Zdjęcie rejestrujące rozszerzony zakres o ultrafiolet i bliską podczerwień jest łatwiejsze w interpretacji, szczególnie w wypadku roślinności (ryc. 14.1.11). Bliska podczerwień, dzięki wysokiemu odbiciu spektralnemu roślin, jest użyteczna w analizach przyrodniczych.



**Ryc. 14.1.10.** Panchromatyczne zdjęcie lotnicze oraz wykres charakterystyk spektralnych zobrazowanych obiektów. Zdjęcie, zarejestrowane w zakresie widzialnym ( $0,4\text{--}0,7\ \mu\text{m}$ ), ukazuje glebę w najjaśniejszych tonach skali szarości, roślinność (trawy, lasy i uprawy rolne) w tonach ciemniejszych, a wody – w najciemniejszych



**Ryc. 14.1.11.** Zdjęcie panchromatyczne wykonane przez satelitę IKONOS z zarejestrowanym promieniowaniem widzialnym i bliskiej podczerwieni (0,45–0,9  $\mu\text{m}$ ). Dzięki rejestracji promieniowania podczerwonego łatwe stało się rozróżnianie składu gatunkowego lasu (wysoka jasność spektralna gatunków liściastych powoduje, że są one zwizualizowane w jaśniejszej tonacji niż gatunki iglaste)

#### 14.1.2.1.2. Zdjęcia w barwach naturalnych

Zdjęcia w barwach naturalnych rejestrują obraz na filmie, którego poszczególne warstwy są uczulone na zakresy: niebieski, zielony i czerwony. Odpowiednie ich zwizualizowanie skutkuje otrzymaniem obrazu o prawdziwych kolorach. Ten typ zobrazowań jest często stosowany do prac topograficznych i aktualizacji map, ale należy wyraźnie podkreślić, że jest on najmniej użyteczny w analizach przyrodniczych.

Zdjęcia w barwach naturalnych zostały spopularyzowane w wyniku pokrycia nimi w latach 90. ubiegłego wieku całej Polski w ramach programu PHARE, który dostarczył zdjęć w skali 1:26 000 do celów topograficznych. Zarówno technika wykonania, jak i skala nie są optymalne w badaniach roślinności, ale dostępność tych bardzo tanich zdjęć spowodowała w sposób naturalny ich dosyć szerokie stosowanie przez parki narodowe i krajobrazowe oraz administrację Lasów Państwowych. Należy jednak podkreślić, że w wypadku analiz przyrodniczych jest to najmniej użyteczny typ zobrazowań.

Podobnie jak w innych technikach pozyskiwania danych teledetekcyjnych, tak i tu duże znaczenie dla ich użyteczności odgrywa termin zobrazowania. Zdjęcia wiosenne i jesienne umożliwiają na przykład określe-

nie składu gatunkowego z dużo większą dokładnością niż zdjęcia letnie (ryc. 14.1.12).

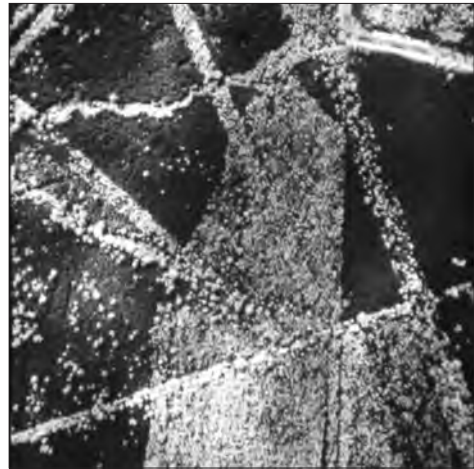
#### 14.1.2.1.3. Zdjęcia podczerwone

Teledetekcja wykorzystuje zakres bliskiej podczerwieni (nazywanej także fotograficzną, jako że można ją rejestrować na błonach filmowych), dwa okna atmosferyczne w zakresie podczerwieni średniej oraz dwa okna podczerwieni termalnej. Ale nawet w obrębie okien atmosferycznych (ryc. 14.1.5) dochodzi do silnego pochłaniania promieniowania podczerwonego przez atmosferę.

Na **czarno-białych zdjęciach w podczerwieni bliskiej**, dzięki wysokiemu odbiciu promieniowania podczerwonego od roślin, uzyskujemy bardzo interesujące zobrazowania (ryc. 14.1.13), na których wyraźnie można odróżnić drzewostany iglaste od liściastych, formy zmieszania i strukturę wiekową lasu, a ponadto podczerwień przenika przez lekkie zamglenia. Na zdjęciach w podczerwieni wyraźnie podkreślone są cienie, co należy brać pod uwagę podczas interpretacji takich zobrazowań.



**Ryc. 14.1.12.** Porównanie zdjęć w barwach naturalnych wykonanych późną wiosną (zdjęcie lewe) i w środku lata (zdjęcie prawe). Na zdjęciu wiosennym wyraźnie jest widoczne zróżnicowanie gatunkowe. Na zdjęciu letnim trudno jest odróżnić nawet gatunki iglaste od liściastych



**Ryc. 14.1.13.** Przykłady czarno-białych zdjęć w podczerwieni: terenowe (po lewej) i lotnicze (po prawej). Widać zróżnicowanie drzew iglastych i liściastych oraz (na zdjęciu po lewej) wyraźne cienie rzucane przez drzewa i krzewy



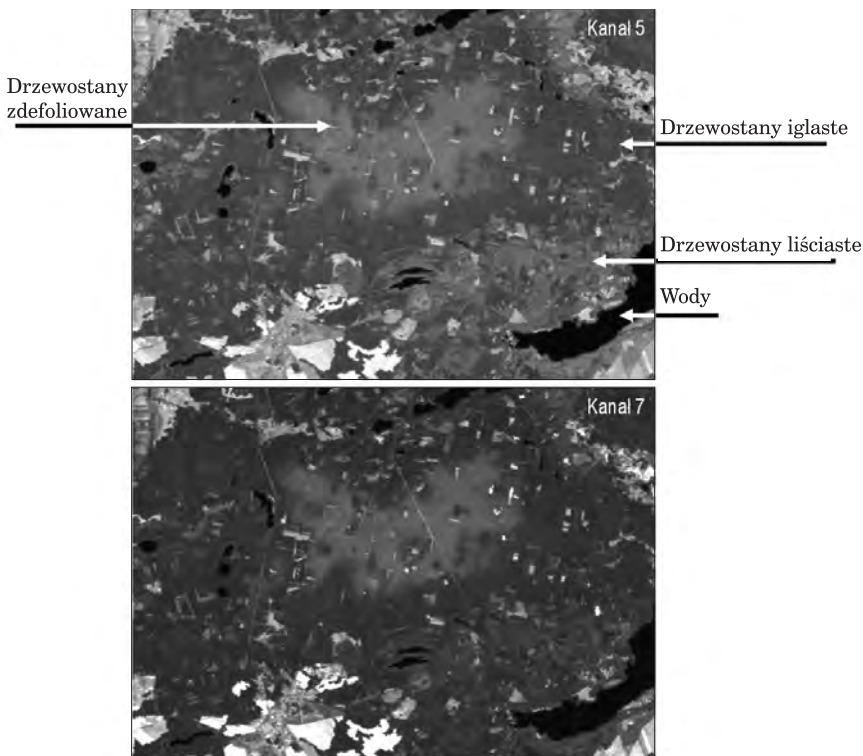
**Ryc. 14.1.14.** Przykłady zdjęć (a – terenowe, b – lotnicze), wykonanych na barwnym filmie w podczerwieni (Kodak Aerochrom IR 2443).

Łłona rejestruje zakresy: zielony, czerwony i bliskiej podczerwieni. Nadano im odpowiednio barwy: niebieską, zieloną i czerwoną, uzyskując efekt barw nienaturalnych (umownych), (fot. M. Ostrowski)

Optymalnym rozwiązaniem w wypadku analiz przyrodniczych jest zastosowanie **zdjęć w barwach umownych**. Wykorzystuje się do tego rejestrację zakresów zielonego, czerwonego i bliskiej podczerwieni. Ze względu na konieczność zwizualizowania niewidzialnego dla oka ludzkiego promieniowania podczerwonego, któremu przypisano barwę czerwoną, obserwując obiekty odfotografowane na takim filmie, zauważamy przesunięcie skali barw, wskutek czego roślinność jest na nim przedstawiona w czerwieni (ryc. 14.1.14).

Przy analizach szaty roślinnej użyteczne są również zakresy **podczerwieni średniej**. Są one rzadko stosowane w teledetekcji lotniczej, ale są rejestrowane przez skanery satelitarne (ryc. 14.1.15) i bardzo często stosowane do oceny kondycji lasów.

Ostatnim zakresem podczerwieni stosowanym w teledetekcji jest **promieniowanie termalne**. Zdjęcia termalne rejestrują emisję w zakresach okien atmosferycznych: 3–5  $\mu\text{m}$  oraz 8–14  $\mu\text{m}$ . Nie są one zobrazowania-

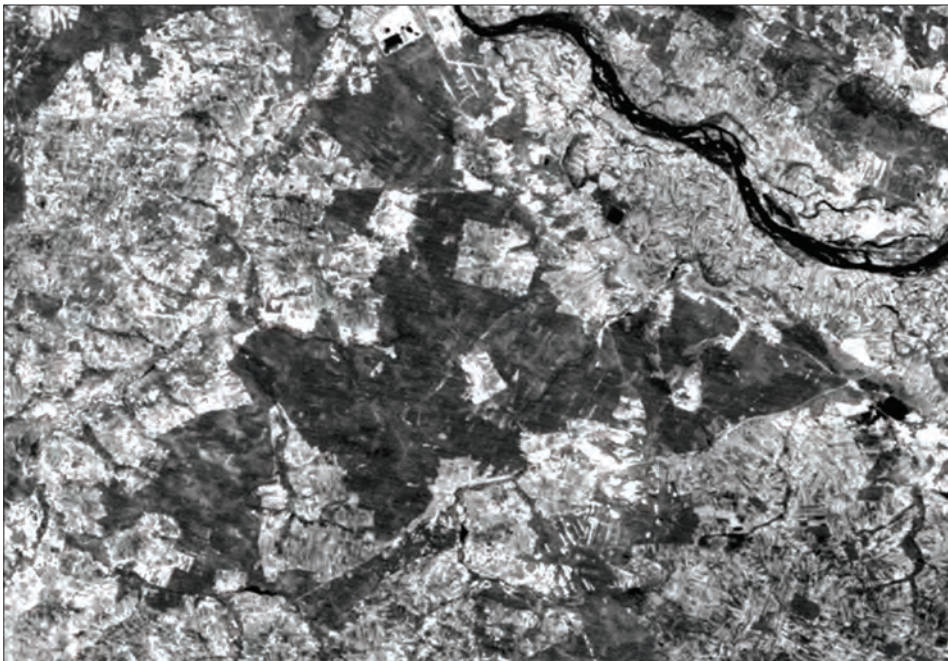


**Ryc. 14.1.15.** Szata roślinna w podczerwieni średniej. Przykłady zobrazowań obszarów leśnych w zakresach podczerwieni średniej – kanały 5 (1,55–1,75  $\mu\text{m}$ ) i 7 (2,08–2,35  $\mu\text{m}$ ) skanerów Thematic Mapper oraz Enhanced Thematic Mapper+, zainstalowanych na satelicie Landsat 7

mi fotograficznymi – detektor rejestruje sygnał, który po przetworzeniu może być jednak przedstawiony w postaci obrazowej.

Ryc. 14.1.16 pokazuje, że zobrazowania termalne mają inny charakter niż dotychczas omawiane, rejestrując rozkład temperatury z dokładnością nawet do ułamków stopni Celsjusza. Znajdują one zastosowanie w budownictwie do wykrywania wad izolacji budynków, do analiz klimatu miast (lokalizacja tzw. wysp ciepła), do monitorowania cieków i zbiorników wodnych (zrzuty wód z zakładów przemysłowych), ale także do analiz zagrożenia pożarowego lasów czy prognozowania plonów.

**Ryc. 14.1.16.** Przykłady zobrazowań termalnych. Zdjęcie obok pokazuje wady izolacji budynku. Zdjęcie dolne, zarejestrowane przez skaner Thematic Mapper satelity Landsat (kanał 6: 10,4–12,5  $\mu\text{m}$ ), pokazuje rozkład temperatury w okolicach Puszczy Kozienickiej (niska temperatura wód i lasów – ciemne tony, oraz wysoka terenów zabudowanych, odkrytej gleby, piasków – tony jasne)



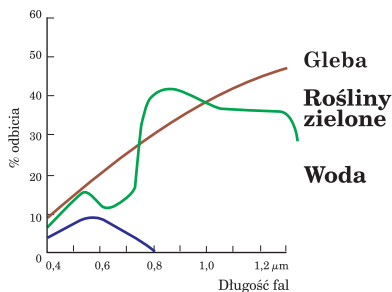
#### 14.1.2.1.4. Zdjęcia wielospektralne

Zdjęcia wielospektralne pozyskuje się w ten sposób, że ten sam obszar jest równocześnie odfotografowywany w kilku, kilkunastu lub nawet kilkuset zakresach (kanałach) spektralnych. Standardowa fotografia wielospektralna obejmuje zdjęcie wykonane w zakresach: niebieskim, zielonym, czerwonym i bliskiej podczerwieni. Jeżeli zakresów jest więcej niż 10, to mówimy o zdjęciach hiperspektralnych.

Na ryc. 14.1.17 oraz 14.1.18 zaprezentowano przykłady zdjęć wielospektralnych – terenowego i satelitarnego, które zestawiono z krzywymi spektralnymi roślinności, gleby i wody. Kiedy porównamy poszczególne obrazy, zauważymy, że kanały widzialne przedstawiają podobny zakres tonalny, podczas gdy zdjęcie w podczerwieni jest jakby negatywową wersją pozostałych. Wynika to z wysokich wartości odbicia promieniowania elektromagnetycznego przez rośliny, wskutek czego są one przedstawione w bardzo jasnych tonach. Natomiast gleba jest zdecydowanie ciemniejsza (niższe wartości odbicia), a woda zupełnie ciemna.

W zakresach widzialnych gleba charakteryzuje się najwyższymi wartościami odbicia, przedstawiona jest więc na zdjęciu w najjaśniejszych tonach, woda w tonacji pośredniej, a roślinność jest najciemniejsza (najniższe wartości odbicia) spośród analizowanych elementów terenu.

Zdjęcie terenowe (ryc. 14.1.17), wykonane w kanale niebieskim, jest zamglone, co wynika z rozpraszania promieniowania przez cząsteczki wody

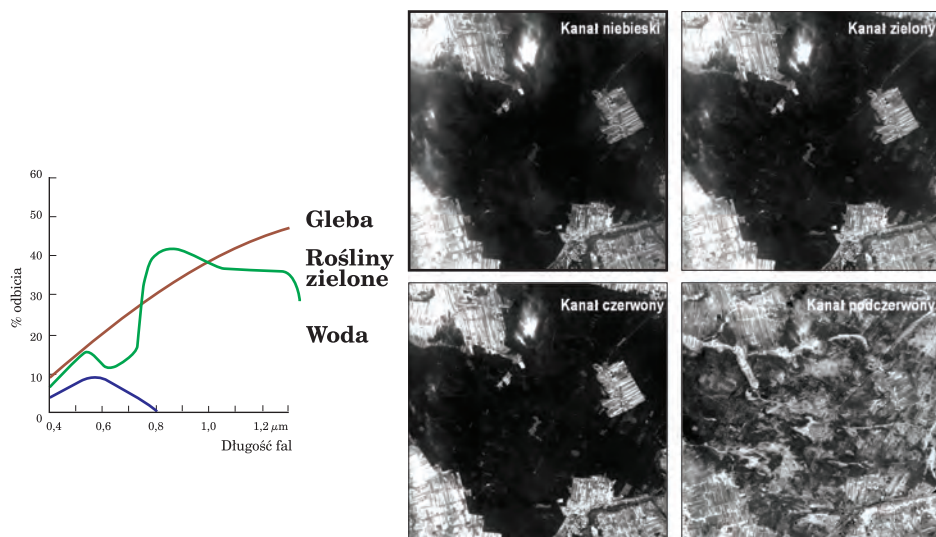


**Ryc. 14.1.17.** Przykład terenowego zdjęcia wielospektralnego, na którym zarejestrowano zakresy: niebieski, zielony, czerwony i bliskiej podczerwieni (fot. M. Ostrowski)

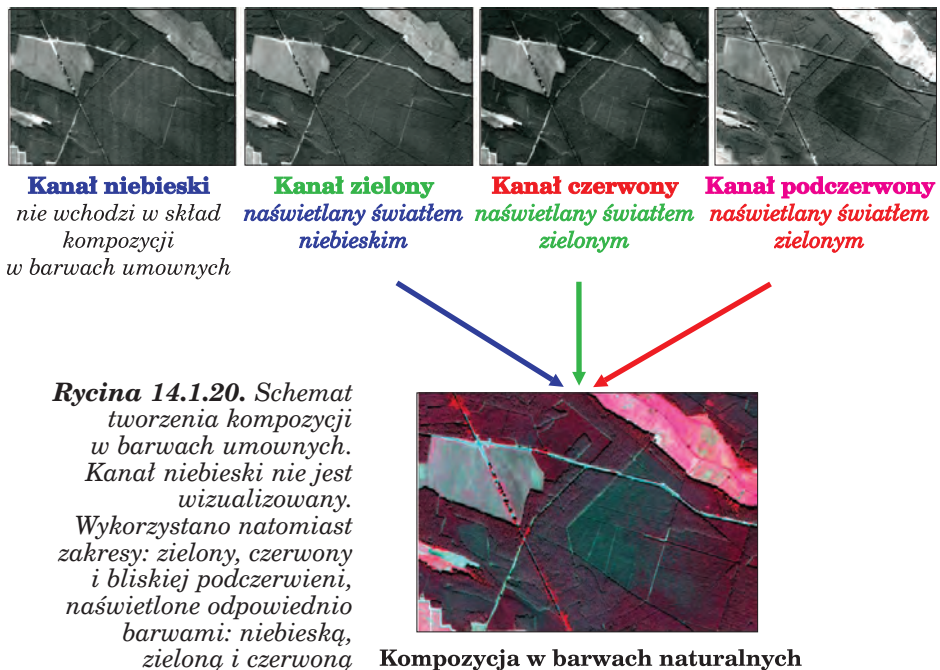
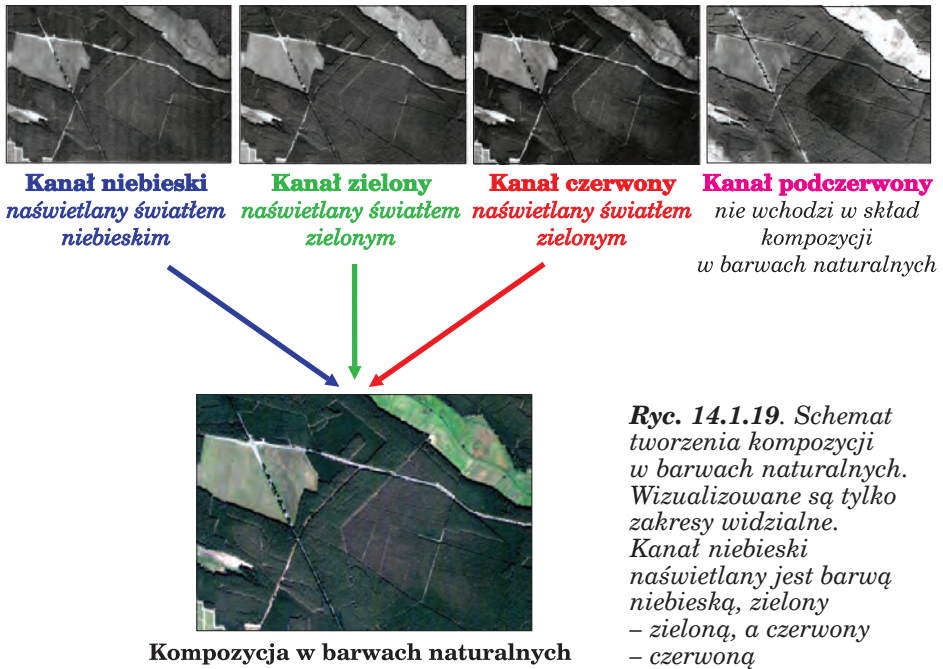
zawartej w atmosferze (promieniowanie niebieskie jest najintensywniej rozpraszane – porównaj ryc. 14.1.2). Podobna sytuacja została zarejestrowana na zdjęciu satelitarnym (ryc. 14.1.18), na którym w kanale niebieskim zamglenia dużo bardziej utrudniają interpretację niż w pozostałych kanałach.

Niezależna rejestracja poszczególnych zakresów spektralnych umożliwia dokonywanie ich zindywidualizowanych przetworzeń, co z kolei pozwala na łatwiejszą i dokładniejszą interpretację zdjęcia. Inne przetworzenia należy zastosować w celu poprawienia czytelności zamglonego zdjęcia, wykonane w zakresie niebieskim, a inne dla uwypuklenia informacji z kanału podczerwonego.

Sama interpretacja obrazu, szczególnie wizualna, powinna być dokonywana na zdjęciach barwnych. A to dlatego, że oko ludzkie jest zdolne rozróżnić zaledwie 20–30 tonów szarości, ale aż ponad 20 000 barw. Aby tego dokonać, z zestawu czarno-białych zdjęć należy utworzyć kompozycję barwną poprzez naświetlenie wybranych zakresów spektralnych barwami podstawowymi (addytywny model tworzenia barw). Ponieważ istnieją trzy barwy podstawowe (czerwony, zielony i niebieski), kompozycję barwną tworzy się z trzech wybranych kanałów spektralnych. Kompozycje barwne mogą przedstawiać obraz w barwach rzeczywistych lub w barwach umownych (ryc. 14.1.19 i 14.1.20). Barwy rzeczywiste kompozycji uzyskuje się,



**Ryc. 14.1.18.** Przykład satelitarnego zdjęcia wielospektralnego (satelita Ikonos). Zarejestrowano zakresy: niebieski, zielony, czerwony i bliskiej podczerwieni. W kanale niebieskim wyraźnie widoczne są zamglenia, które w dużo mniejszym stopniu są zauważalne w pozostałych zakresach widzialnych i prawie niewidoczne w bliskiej podczerwieni



naświetlając kanały niebieski, zielony i czerwony odpowiednio barwami: niebieską, zieloną i czerwoną. Kiedy jednak w skład kompozycji wchodzi któryś z kanałów niewidzialnych dla oka, naświetlając go jedną z barw podstawowych (na ogół czerwienią), nadaje się mu barwę nienaturalną, a co za tym idzie kompozycja będzie przedstawiała obiekty na powierzchni Ziemi w barwach nienaturalnych (umownych).

W podobny sposób jest tworzony obraz na filmie spektrostrefowym, z tą różnicą, że na błonie filmowej rejestrowane są od razu trzy zakresy, którym z góry nadaje się odpowiednie barwy. W wypadku kompozycji barwnej, tworzonej ze zdjęcia wielospektralnego, barwy naświetlające poszczególne kanały można dowolnie dobierać, a ponadto każdy z kanałów może być przetwarzany osobno, a więc można im przypisać różnorakie kontrasty w celu lepszego zwizualizowania poszczególnych obiektów. Takich operacji nie można stosować, wykorzystując zdjęcie zarejestrowane na błonie filmowej.

Na podstawie poszczególnych zakresów spektralnych można także analizować pokrywe roślin poprzez wykorzystanie tzw. wskaźników roślinności. Najpopularniejszym jest znormalizowany wskaźnik roślinności (Normalised Difference Vegetation Index – *NDVI*), obliczany jako waganie odpowiedzi spektralnych bliskiej podczerwieni (*NIR*) i czerwieni (*R*) według wzoru:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

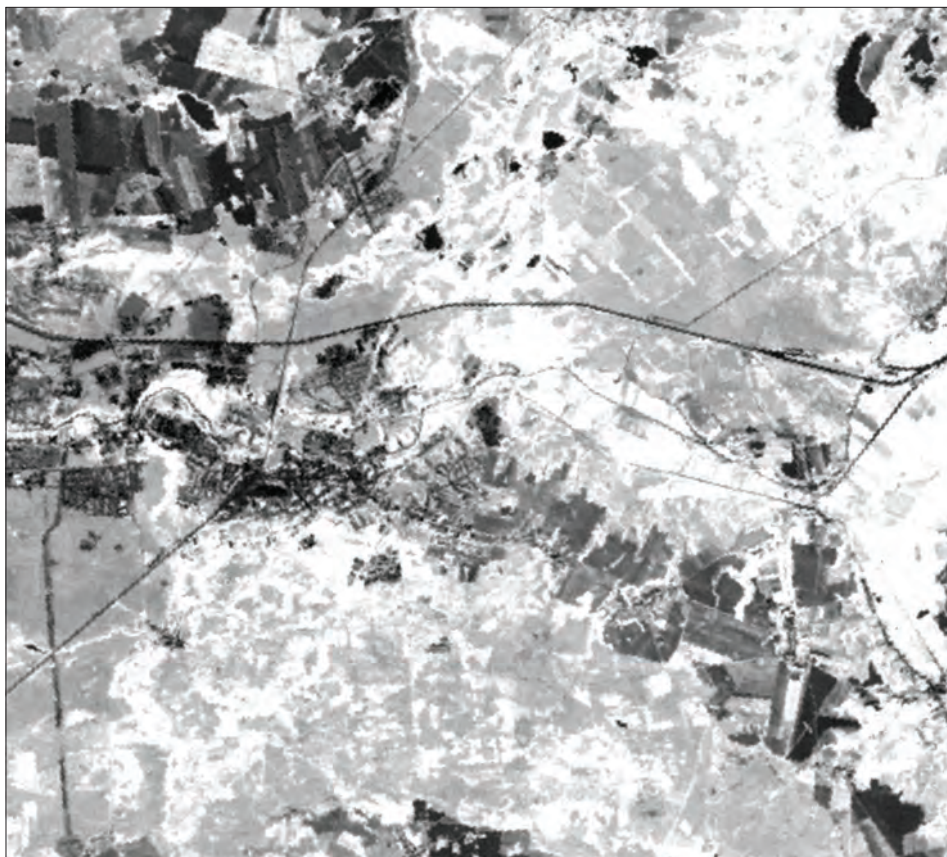
Zastosowanie wskaźnika pozwala podkreślić obecność zielonych roślin poprzez nadanie im jasnych tonów w przeciwieństwie do pozostałych obiektów, które będą zobrazowane tonami ciemniejszymi (ryc. 14.1.21).

#### 14.1.2.1.5. Zdjęcia wideo

Technika wideografii wykorzystuje zarówno zobrazowania w barwach naturalnych, jak i w podczerwieni. Opiera się na rejestracji CCD, jednakże mimo pozytywnie zweryfikowanych prób stosowania (Mozgawa i in. 1994) nie znalazła szerszego zastosowania w polskim leśnictwie, co wynika z ograniczeń wynikających z małego obszaru zobrazowania związanego z wymiarami czujnika oraz niestabilnością kolorystyczną zapisu magnetycznego.

#### 14.1.2.1.6. Zdjęcia hemisferyczne

Zdjęcia hemisferyczne są wykonywane kamerami fotograficznymi, wyposażonymi w szerokokątny obiektyw, tzw. rybie oko, o szerokim polu widzenia – przeważnie 180° (Strzeliński 2006). Kamera umieszczana jest pod okapem



**Rycina 14.1.21.** Zdjęcie satelitarne obrazujące wskaźnik NDVI. Lasy liściaste przedstawione są jasnymi tonami, iglaste – ciemniejszymi, a tereny bez roślinności – jako ciemne lub czarne (odkryta gleba, zabudowania, drogi, linie kolejowe, wody)

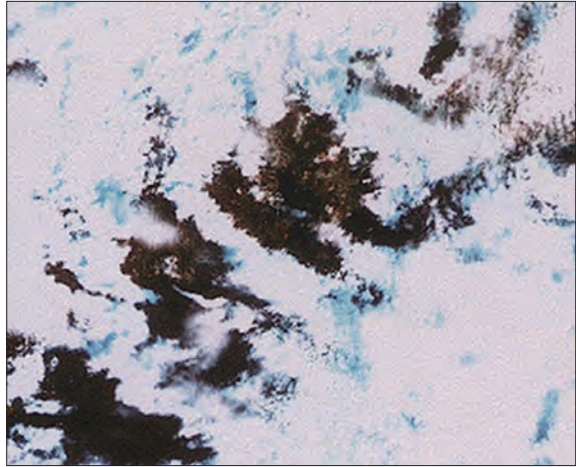
drzewostanu, z obiektywem skierowanym zenitalnie, lub nad drzewostanem, z obiektywem ku dołowi (Jonckheere i in. 2004). Zdjęcia takie dostarczają informacji o poziomie koron, ich zwarcie, lokalizacji, rozmiarach, a także o rozmieszczeniu i wymiarach luk oraz o ilości światła przenikającego do dna lasu (lub na wysokość umieszczenia kamery). Można na nich rozpoznawać gatunki, wiek i strukturę drzewostanu oraz obliczać wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści – LAI (Leaf Area Index).

## 14.1.2.2. Techniki aktywne

### 14.1.2.2.1. Zdjęcia radarowe

Radar (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) jest aktywnym systemem teledetekcyjnym, wysyłającym promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym (tab. 14.1.1) 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. 14.1.22).

Landsat Thematic Mapper, 9 sierpnia 1991



### 14.1.2.2.2. Zdjęcia lidarowe

Lidar (**LI**ght **D**etection **A**nd **R**anging) jest aktywnym systemem zdalnego pozyskiwania informacji, wykorzystującym skoncentrowaną wiązkę promieni świetlnych (laserowych), która wysyłana w kierunku

ERS-1 SAR, 9 sierpnia 1991



**Ryc. 14.1.22.**  
*Zobrazowanie wybrzeża Irlandii na zdjęciach wykonanych w tym samym czasie w zakresach: optycznym (Landsat Thematic Mapper) i mikrofalowym (ERS-1 SAR)*

Źródło: Europejska Agencja Kosmiczna

ku obiektu ulega od niego odbiciu (i rozproszeniu), a wiązka zwrotna jest rejestrowana i następnie analizowana. Analiza własności powracającej wiązki światła umożliwia charakteryzowanie obiektów, od których uległa ona odbiciu. Pomiar czasu od wysłania do powrotu promieniowania służy określeniu odległości od źródła promieniowania do obiektu.

Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**missions of **R**adiation, czyli wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania), nazywany też wzmacniaczem optycznym, to urządzenie generujące lub wzmacniające spójne promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie między ultrafioletem a podczerwienią.

Lidar, nazywany też niekiedy radarem laserowym lub optycznym, wykorzystuje promieniowanie w zakresach optycznych 5–33 kHz (najczęściej bliskiej podczerwieni), wysyłane w wiązce ciągłej lub pulsacyjnej. Dla celów środowiskowych używa się głównie laserów pulsacyjnych o częstotliwości 5000–15 000 pulsów na sekundę. Typowy zakres skanowania obejmuje kąt 1–75°, ale najlepszy w zastosowaniach leśnych jest zakres 10–20° (by maksymalizować penetrację wiązki laserowej w głąb drzewostanu), co w zależności od wysokości lotu obejmuje pas obrazowania o szerokości 100–200 m.

Lidar lotniczy dla każdego wysłanego pulsu wiązki laserowej może rejestrować kilka (do pięciu) wartości promieniowania zwrotnego. Najczęściej jednak stosuje się rejestrację dwóch sygnałów zwrotnych: pierwszy – odbity od pułapu koron, a drugi – od wnętrza drzewostanu lub gleby.

Terenowy „ślad” pulsu laserowego charakteryzuje się średnicą 5–100 cm. Maksymalna rozdzielczość terenowa to 10–20 cm (by ją uzyskać, konieczne jest gęste próbkowanie), a dokładność wynosi wertykalnie:  $\pm 10$ –20 cm i horyzontalnie  $\pm 11$ –15 cm.

W porównaniu z obrazowaniami radarowymi lidar charakteryzuje się szeregiem zalet, takich jak: łatwiejsze obrazowanie danych, lepsza rozdzielczość terenowa, wertykalne lub prawie wertykalne pozyskiwanie danych, co wiąże się z mniejszymi zniekształceniami obrazu.

Lidar jest także używany do pozyskiwania zdjęć terenowych. W takim wypadku stosuje się urządzenia o szerokim polu widzenia, wynoszącym horyzontalnie 360°, a wertykalnie – nawet 320°. Wykonując obrazowania z kilku miejsc zlokalizowanych na jednej powierzchni próbnej w drzewostanie, tworzy się następnie jej model przestrzenny. Na modelu takim można analizować rozmieszczenie drzew, dokonywać pomiarów średnicy i obwodu drzew na dowolnej wysokości, a także wysokości poszczególnych drzew.

## 14.2. Lotnicze obrazowanie Ziemi

dr inż. EMILIA WIŚNIEWSKA – Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Wydział Urządzania Lasu i Geoinformatyki

W rozdziale 14.1.2 omówione zostały techniki pozyskiwania teledetekcyjnej informacji obrazowej. Wyjaśniono w nim, dlaczego zastosowanie różnych technik obrazowania powoduje, że ten sam fragment powierzchni Ziemi może wyglądać odmiennie w różnych tonach szarości czy barwach. Najczęściej wykonywane zdjęcia lotnicze to obrazy rejestrujące promieniowanie odbite od powierzchni Ziemi w zakresie widzialnym (zdjęcia czarno-białe zwane panchromatycznymi oraz zdjęcia barwne w barwach naturalnych), a także w podczerwieni (zdjęcia barwne w podczerwieni nazywane też zdjęciami spektrostrefowymi). Zdjęcia panchromatyczne (ryc. 14.2.1) uczulone są na cały zakres światła widzialnego, czasem także w kierunku bliskiej podczerwieni. Zdjęcia barwne w barwach naturalnych (ryc. 14.2.2) rejestrują również cały zakres światła widzialnego, przy czym (zarówno zdjęcia analogowe, jak i cyfrowe) przyporządkowują osobne barwy zakresowi promieniowania niebieskiego, zielonego i czerwonego. Zdjęcia barwne w podczerwieni (ryc. 14.2.3) rejestrują natomiast niewidzialne dla



Ryc. 14.2.1. Panchromatyczne zdjęcie lotnicze (źródło: PGL LP)



**Ryc. 14.2.2.** Zdjęcie barwne w barwach naturalnych (źródło: PGL LP)



**Ryc. 14.2.3.** Zdjęcie barwne w podczerwieni, określane również jako zdjęcie spektrostrefowe albo zdjęcie w barwach nierzeczywistych lub fałszywych (źródło: PGL LP)

oka ludzkiego promieniowanie podczerwone (dlatego określane są czasami jako zdjęcia w barwach nierzeczywistych lub zdjęcia w barwach fałszywych) oraz jeden lub dwa zakresy promieniowania widzialnego (np. światło zielone i czerwone).

Przetwarzanie i interpretacja zdjęć oraz specyficzne uwarunkowania fotogrametrii leśnej przedstawione są w innych podrozdziałach rozdziału 14. W tym podrozdziale, traktującym o zdjęciach lotniczych, przybliżone zostaną przede wszystkim ogólne podstawy fotogrametrii, związane z geometrią zdjęć lotniczych.

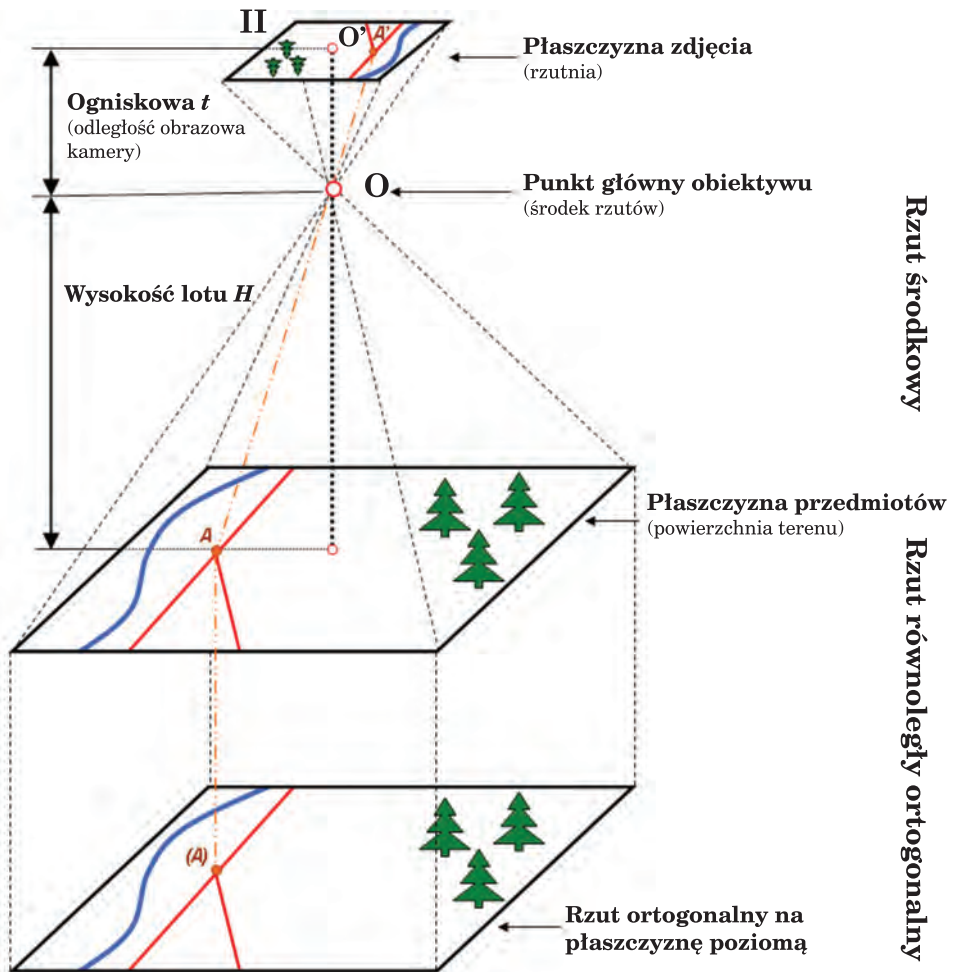
### 14.2.1. Zdjęcie lotnicze i realizacja rzutu środkowego

Fotografia to odwzorowanie na materiale światłoczułym lub na matrycy CCD geometrii przedmiotu istniejącego w sposób rzeczywisty przed obiektywem aparatu fotograficznego. W obrazowaniu lotniczym obiektem fotografowanym jest powierzchnia Ziemi, której obraz rejestrowany jest z wykorzystaniem kamery fotogrametrycznej (analogowej lub cyfrowej), umieszczonej na pokładzie samolotu dostosowanego do wykonywania lotów fotogrametrycznych.

Obraz zarejestrowany kamerą fotogrametryczną jest rzutem środkowym fotografowanego przedmiotu. Aby je wykorzystywać do celów pomiarowych, niezbędna jest znajomość teorii rzutu środkowego.

Ryc. 14.2.4 przedstawia zasadę rzutu środkowego (odwzorowania perspektywicznego). Płaszczyzna przedmiotu (powierzchnia terenu) jest odwzorowana na płaszczyznę  $\pi$ , nazywaną płaszczyzną rzutów, rzutnią, płaszczyzną zdjęcia. Punkt  $O$  to środek rzutów, przez który przechodzą promienie rzucające, łączące poszczególne punkty z płaszczyzny przedmiotów i płaszczyzny zdjęcia. I tak, punkt  $A'$  to obraz punktu  $A$ , powstały w wyniku rzutu prostej  $AO$  na płaszczyznę zdjęcia  $\pi$ . Jeżeli wykreślimy z punktu  $O$  prostą prostopadłą do płaszczyzny  $\pi$ , to przebije ona płaszczyznę  $\pi$  w punkcie  $O'$ , który nazywany jest punktem głównym zdjęcia (rzutem środka rzutów). Natomiast odcinek  $OO'$  to odległość obrazowa, czyli ogniskowa kamery lotniczej (oznaczana  $f$  lub  $c_k$ ).

Specyficznym przypadkiem rzutu środkowego jest takie odwzorowanie, w którym środek rzutów  $O$  jest umieszczony w nieskończoności. Wtedy promienie rzutujące przebiegają równolegle względem siebie. Jeżeli dodatkowo płaszczyzna rzutów umieszczona jest prostopadłe do promieni rzutujących, to mamy do czynienia z rzutem równoległym prostokątnym, czyli ortogonalnym (ryc. 14.2.4). Przykładem rzutu równoległego prostokątnego jest mapa topograficzna i większość opracowań kartograficznych.



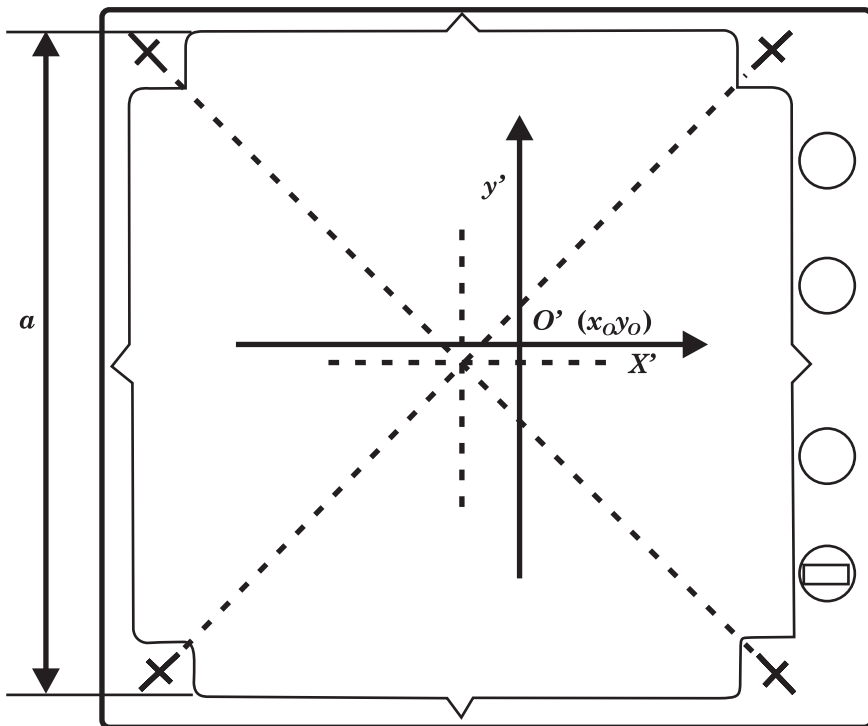
Ryc. 14.2.4. Zasady rzutu środkowego i rzutu ortogonalnego

## 14.2.2. Orientacja zdjęcia lotniczego

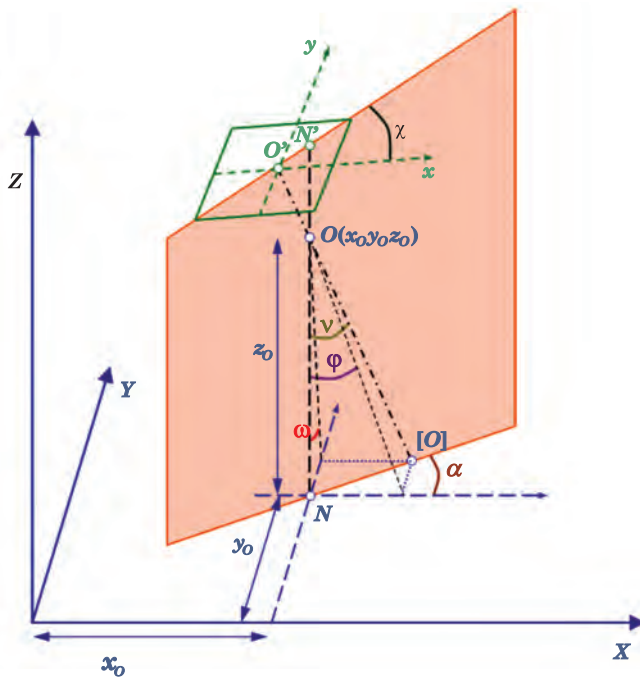
Aby korzystać ze zdjęcia lotniczego do celów pomiarowych, czyli odtworzać rzeczywiste wielkości i kształty fotografowanych przedmiotów, musimy mieć określony jednoznacznie rzut środkowy. Określone musi być położenie środka rzutów w stosunku do płaszczyzny zdjęcia i fotografowanego terenu oraz położenie płaszczyzny rzutów względem terenu. Elementy te, nazywane elementami orientacji wewnętrznej zdjęcia i elementami orientacji zewnętrznej zdjęcia lotniczego, umożliwiają jednoznaczne odtworzenie wiązki promieni rzutujących i jej położenia w przestrzeni.

Elementy orientacji wewnętrznej określają geometryczną relację pomiędzy kamerą fotogrametryczną a zdjęciem i sprowadzają się do wyznaczenia położenia środka rzutów  $O$  w stosunku do płaszczyzny zdjęcia  $\pi$ . Położenie to wyznaczają współrzędne tłowe punktu głównego zdjęcia  $O'$  ( $x'_o, y'_o$ ) oraz ogniskowa kamery  $f$ , przy czym układ współrzędnych tłowych określany jest na podstawie położenia znaczków tłowych zdjęcia (ryc. 14.2.5). Elementy orientacji wewnętrznej są takie same dla wszystkich zdjęć w czasie jednego lotu fotogrametrycznego.

Z kolei elementy orientacji zewnętrznej określają relację pomiędzy lokalizacją obiektów przedstawionych na zdjęciu lotniczym a ich rzeczywistym położeniem w terenie. Aby relację tę odtworzyć dla każdego zdjęcia, muszą być określone następujące elementy: współrzędne przestrzenne środka rzutów ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) w przyjętym do prac pomiarowych układzie współrzędnych prostokątnych, kąt nachylenia zdjęcia w stosunku do płaszczyzny poziomej  $\nu$ , kąt kierunkowy osi kamery  $\alpha$  (azymut zdjęcia), kąt skręcenia zdjęcia  $\chi$  (ryc. 14.2.6). Położenie osi kamery w przestrzeni, określone za pomocą kątów  $\nu$  i  $\alpha$ , można także wyrazić za pomocą nachy-



Ryc. 14.2.5. Ramka tłowa z zaznaczonym układem współrzędnych tłowych i formatem zdjęcia  $a$



**Ryc. 14.2.6.**  
 Elementy orientacji  
 zewnętrznej zdjęcia  
 lotniczego:  
 współrzędne  
 terenowe środka  
 rzutów  $O (X_0, Y_0, Z_0)$   
 oraz trzy kąty ( $\nu, \alpha, \chi$ )  
 lub ( $\omega, \varphi, \chi$ )

lenia poprzecznego  $\omega$  i nachylenia podłużnego  $\varphi$ . W trakcie lotu elementy orientacji zewnętrznej ulegają ciągłym zmianom, a zatem są inne dla każdego zdjęcia. Wartości przybliżone orientacji zewnętrznej można uzyskać ze wskazań przyrządów pomiarowych (wysokościomierza i libelli). Ich dokładne określenie następuje w ramach opracowania fotogrametrycznego, z wykorzystaniem współrzędnych terenowych (osnowa fotogrametryczna).

### 14.2.3. Skala i format zdjęcia lotniczego

Na ryc. 14.2.4, określającej zasady rzutu środkowego, zaznaczono dwa podstawowe geometryczne parametry zdjęcia lotniczego. Jest to odległość środka rzutów od fotografowanego terenu, czyli wysokość fotografowania  $H$  i odległość obrazowa kamery, czyli ogniskowa  $f$ . Jeżeli zdjęcie lotnicze jest pionowe, a fotografowany teren płaski i poziomy, to **skalę zdjęcia lotniczego** można wyznaczyć na podstawie tych dwóch parametrów następująco:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \quad [1]$$

gdzie:

- $m$  – mianownik skali zdjęcia,
- $H$  – wysokość fotografowania,
- $f$  – ogniskowa kamery.

W wypadku zdjęcia nachylonego skala jest zmienna, nawet przy założeniu, że teren jest płaski i poziomy. Także zdjęcie pionowe będzie miało zmienną skalę, jeżeli w jego obrębie znajdują się tereny o dużych deniwelacjach terenu.

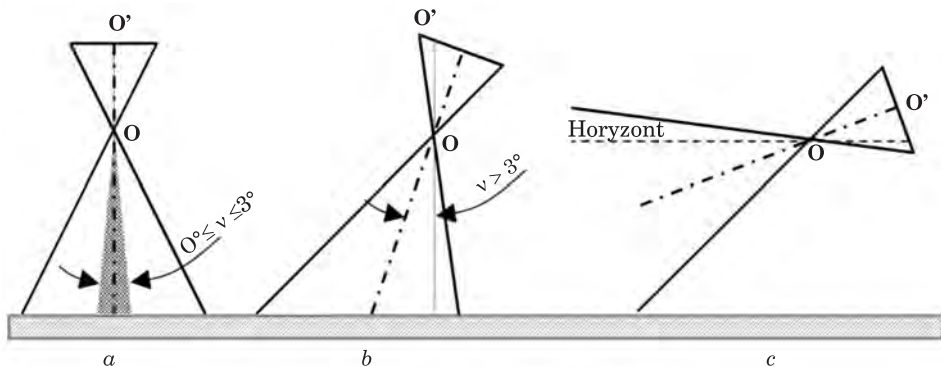
Ponieważ pomiary i obliczenia wykonywane w ramach prac fotogrametrycznych i fotointerpretacyjnych prowadzi się w prostszy sposób na zdjęciach pionowych (lub prawie pionowych) w porównaniu ze zdjęciami nachylonymi lub ukośnymi, najczęściej wykorzystywanymi zdjęciami są obrazy o kącie nachylenia osi optycznej kamery nie większym niż  $3^\circ$ . Podział zdjęć lotniczych w zależności od kąta nachylenia osi kamery w momencie ekspozycji przedstawia ryc. 14.2.7.

Jeżeli zdjęcie lotnicze jest pionowe, to znając skalę zdjęcia i jego wymiary, można obliczyć format zdjęcia lotniczego  $P$ . Ponieważ większość wykonywanych zdjęć lotniczych ma kształt kwadratu, wzór na pole powierzchni odfotografowanego na zdjęciu terenu wyraża się następująco:

$$P = (am)^2 = \left(a \frac{H}{f}\right)^2 \quad [2]$$

gdzie:

- $P$  – wielkość odfotografowanej powierzchni terenu,
- $a$  – format zdjęcia (długość boku kwadratu użytecznej części zdjęcia, np. 23 cm),
- $m$  – mianownik skali zdjęcia,



**Ryc. 14.2.7.** Rodzaje zdjęć lotniczych ze względu na położenie osi kamery:

- $a$  – zdjęcia pionowe i prawie pionowe,
- $b$  – zdjęcia nachylone (o kącie nachylenia  $\nu > 3^\circ$ ),
- $c$  – zdjęcia ukośne (z widoczną linią horyzontu)

$H$  – wysokość fotografowania,  
 $f$  – ogniskowa kamery.

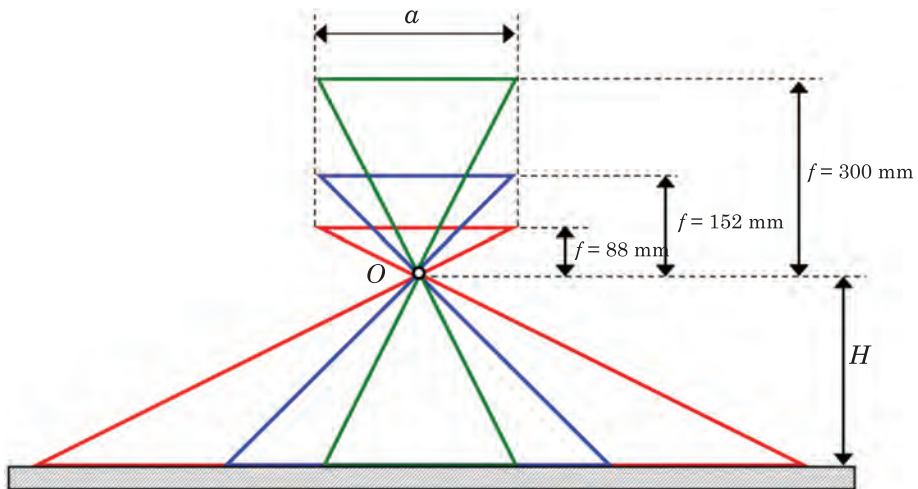
Należy pamiętać, że powierzchnia terenu odfotografowanego na zdjęciach nachylonych, wykonanych z tej samej wysokości, co zdjęcie pionowe, będzie większa niż powierzchnia terenu przedstawiona na zdjęciu pionowym.

Ze wzoru na powierzchnię terenu zarejestrowaną na pojedynczym zdjęciu wynika, że wykonując zdjęcia z tej samej wysokości, ale kamerami o różnych kątach rozwarcia obiektywu, czyli o różnych ogniskowych (tab. 14.2.1), zostaną wykonane zdjęcia w różnej skali, przedstawiające mniejszą lub większą powierzchnię. W stosunku do zdjęć wykonanych kamerą normalnokątną, zdjęcia zarejestrowane kamerą szerokokątną obejmą powierzchnię około czterech razy większą, a kamerą nadszerokokątną – prawie dwanaście razy większą. Tak więc wykonując zdjęcie ka-

Tabela 14.2.1.

Typowe odległości obrazu (ogniskowe kamery  $f$ ) dla kamer o różnym rozwarciu obiektywu i formacie  $23\text{ cm} \times 23\text{ cm}$  (Kurczyński, Preuss 2003)

Rodzaj kamery	Ogniskowa kamery $f$ ( $a = 23\text{ cm}$ )
Kamery normalnokątne	300 mm
Kamery szerokokątne	152 mm
Kamery nadszerokokątne	88 mm



Ryc. 14.2.8. Zależność pomiędzy ogniskową kamery  $f$  a wielkością sfotografowanego terenu

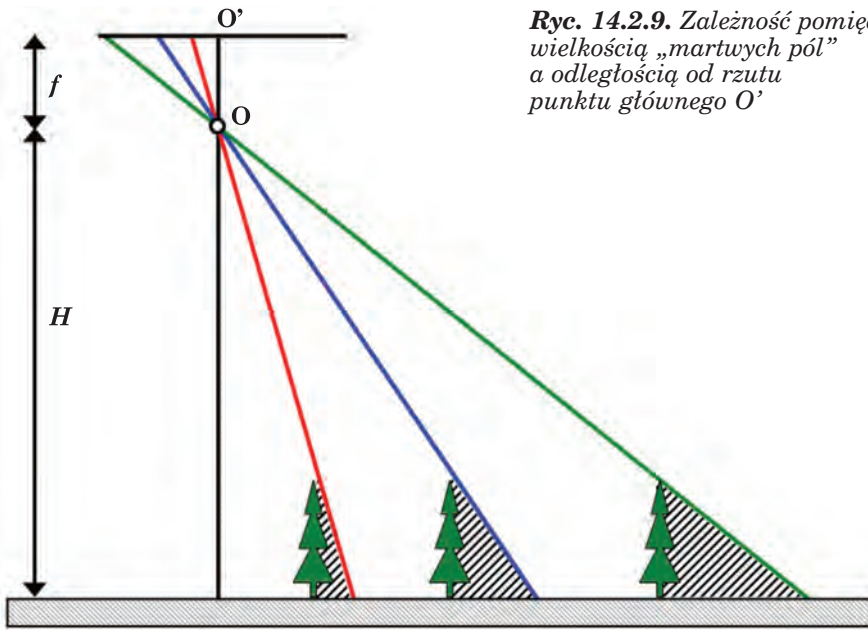
merą o dłuższej ogniskowej (o mniejszym rozwarciu obiektywu), odfotografowana zostanie mniejsza powierzchnia terenu (ryc. 14.2.8), ale za to w większej skali, czyli możliwa będzie bardziej szczegółowa interpretacja zdjęcia.

Z kątem rozwarcia obiektywu wiąże się także problem tzw. martwych pól. Z martwymi polami mamy do czynienia wtedy, gdy w terenie znajdują się obiekty o znacznych wysokościach (wzniesienia, budynki, drzewa), które zasłaniają fragmenty terenów znajdujących się za nimi (patrząc z punktu głównego zdjęcia). I tak, im większe rozwarcie obiektywu (krótsza ogniskowa  $f$ ), tym większe będą na zdjęciu martwe pola (ryc. 14.2.9). Dlatego też zaleca się, by zdjęcia fotogrametryczne terenów zabudowanych, górskich i innych z wysokimi „przeszkodami” wykonywać kamerami normalnokątnymi. Tego wymogu nie ma dla terenów płaskich, np. użytkowanych rolniczo, na których nie będzie dużo martwych pól nie tylko na zdjęciach pozyskanych kamerą szerokąkątną, ale także kamerą nadszerokokątną.

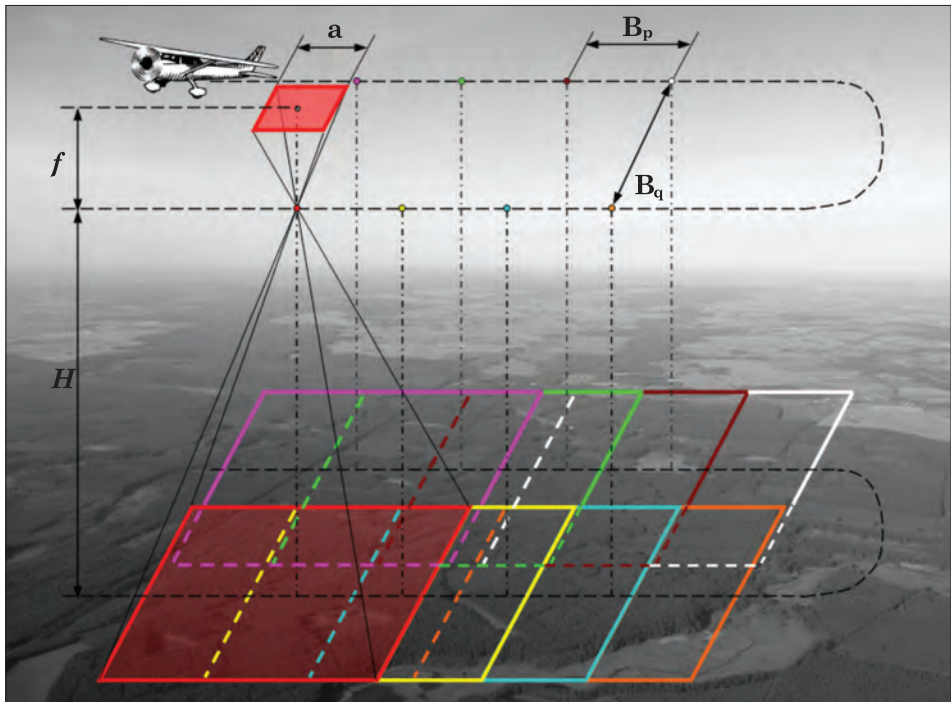
#### 14.2.4. Wykonywanie lotów fotogrametrycznych

Lot fotogrametryczny poprzedzony jest sporządzeniem planu nalotu. Podstawą do jego wykonania jest określenie, do jakich celów mają być wykorzystywane zdjęcia. Projekt lotu fotogrametrycznego, oprócz wyboru techniki fotografowania (zdjęcia czarno-białe, barwne w barwach naturalnych lub barwne w podczerwieni), dotyczy także wyboru odpowiedniej kamery, określane są ponadto wysokość lotu i interwał czasowy pomiędzy kolejnymi ekspozycjami. Sporządzana jest również trasa przelotu – po to, by samolot, poruszając się wzdłuż osi lotu, zarejestrował na zachodzących częściowo na siebie zdjęciach obraz całego obszaru opracowania. Wykonanie zdjęć dla zaprojektowanego fragmentu terenu odbywa się w ustalonym wcześniej porządku. Samolot, lecąc na właściwej wysokości i z określoną prędkością, wykonuje zdjęcia w zadanym interwale czasowym. Po zrobieniu zdjęć dla jednego szeregu zawraca i rejestruje zdjęcia kolejnych szeregów – tak, by w końcowym efekcie na ich podstawie zwizualizowany był cały obszar opracowania. Pełny zbiór zdjęć fotografowanego terenu nazywamy zespołem zdjęć. Zdjęcia wykonywane są z taką częstotliwością, by nie tylko zarejestrować obraz całego obszaru opracowania, ale żeby kolejne zdjęcia zachodziły na siebie z takim pokryciem, by możliwa było nie tylko monokularna, ale i stereoskopowa analiza obrazów. Zdolność przestrzennego (stereoskopowego) widzenia zdjęć umożliwia prowadzenie obserwacji i pomiarów nie tylko współrzędnych płaskich, ale także wysokościowych.

Sporządzając plan nalotu, określa się wysokość lotu nad terenem  $H$ , bazę podłużną  $B_p$  i bazę poprzeczną  $B_q$  (ryc. 14.2.10) na podstawie następujących parametrów kamery: ogniskowej  $f$  i formatu zdjęć  $a \times a$ , skali zdjęć  $1:m$  i przyjętych wielkości pokrycia podłużnego  $p$  i pokrycia poprzecznego  $q$ .



Ryc. 14.2.9. Zależność pomiędzy wielkością „martwych pól” a odległością od rzutu punktu głównego  $O'$



Ryc. 14.2.10. Prezentacja podstawowych elementów zespołu zdjęć lotniczych

Wysokość lotu wyznaczamy z ogniskowej kamery  $f$  i zakładanej skali zdjęć  $1:m$ . Bazę podłużną  $B_p$ , czyli odległość między sąsiednimi środkami rzutów (sąsiednimi lokalizacjami ekspozycji) wyznacza się na podstawie zakładanego pokrycia poprzecznego  $p$  sąsiednich zdjęć, wyrażonego w procentach mianownika skali zdjęcia  $m$  i formatu zdjęcia  $a$ . Baza poprzeczna  $B_q$  to odległość pomiędzy sąsiednimi szeregami zdjęć, wyrażona pokryciem poprzecznym  $q$  (w procentach) i analogicznie jak w wypadku bazy podłużnej – mianownikiem skali zdjęcia  $m$  oraz formatem zdjęcia  $a$ . Z kolei interwał czasowy pomiędzy kolejnymi ekspozycjami zdjęć w szeregach  $T$  zależy od bazy podłużnej  $B_p$  i prędkości samolotu  $v$ . Podstawowe parametry lotu wyznaczają się na podstawie poniżej przedstawionych wzorów.

$$H = m \cdot f \quad [3]$$

$$B_p = \frac{a \cdot m \cdot (100 - p)}{100} \quad [4]$$

$$B_q = \frac{a \cdot m \cdot (100 - q)}{100} \quad [5]$$

$$T = \frac{B_p}{v} \quad [6]$$

gdzie:

$H$  – wysokość lotu,

$B_p$  – baza podłużna,

$B_q$  – baza poprzeczna,

$T$  – czasowy interwał między kolejnymi ekspozycjami,

$f$  – ogniskowa kamery,

$m$  – mianownik skali zdjęcia,

$a$  – format zdjęcia,

$p$  – pokrycie podłużne określone w procentach,

$q$  – pokrycie poprzeczne określone w procentach.

Od metody dalszego opracowania zdjęć fotogrametrycznych zależy dobór wielkości pokrycia podłużnego i poprzecznego. Do opracowań przestrzennych (stereoskopowych) pokrycie podłużne  $p$  wynosi ok. 60%, a pokrycie poprzeczne  $q$  – około 30%. Przy opracowaniach analitycznych o zwiększonej dokładności zarówno pokrycie poprzeczne, jak i podłużne może być wyższe.

Rejestracje lotniczych zdjęć fotogrametrycznych wykonywane są z pokładów samolotów specjalnie dostosowanych do prac fotolotniczych. Samoloty muszą gwarantować stabilność lotu przy ograniczonej prędkości, a także zapewnione muszą być warunki do zainstalowania i obsługi aparatury związanej z rejestracją zdjęć fotogrametrycznych.

### **14.2.5. Stereoskopia**

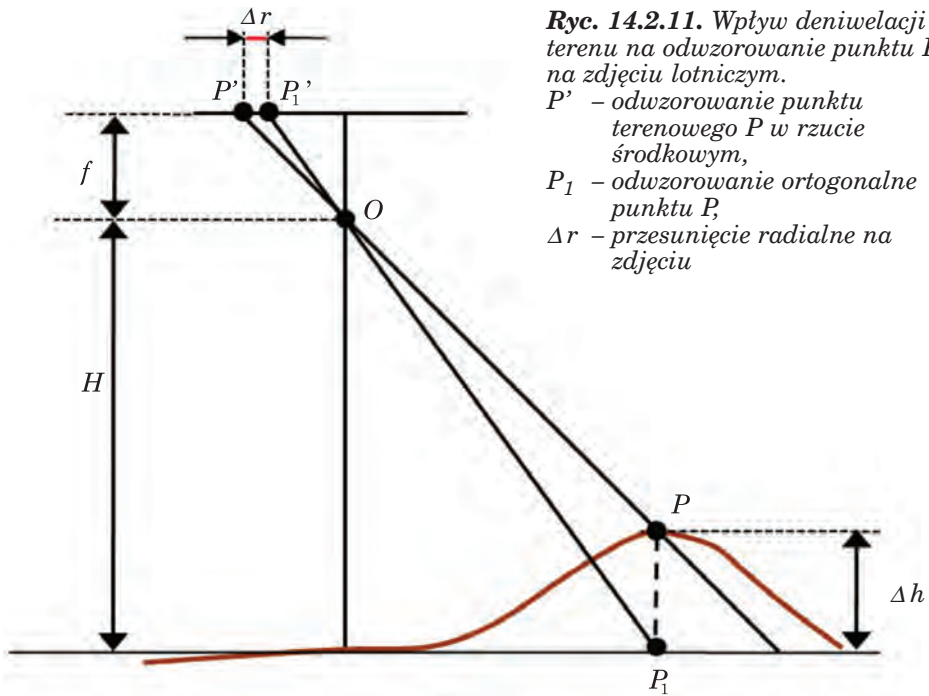
Większość opracowań fotogrametrycznych wykonywana jest na postawie stereoskopowej (trójwymiarowej, przestrzennej) obserwacji zdjęć, także wtedy, gdy zleceniodawcy przekazywane jest opracowanie w formie dwuwymiarowej, kartometrycznej wizualizacji utworzonej ze zdjęć lotniczych – ortofotomapy. Ze stereoskopią mamy do czynienia na co dzień dzięki dwuocznemu obserwowaniu świata zewnętrznego. Dwuoczne (stereoskopowe) widzenie umożliwia nam odbieranie wrażenia przestrzenności i ocenę odległości przedmiotów od nas oddalonych.

Rejestrując, a następnie obserwując zdjęcia wykonane z dwu różnych miejsc, można także uzyskać sztuczny efekt stereoskopowy. Para zdjęć spełniająca wymogi obserwacji stereoskopowej nazywana jest parą stereoskopową lub stereogramem. Niewielkie stereogramy można obserwować nawet gołymi oczami, choć przeważnie używa się dedykowanego do tego celu sprzętu. Aby zdjęcia lotnicze poprawnie obserwować stereoskopowo, spełnione muszą być odpowiednie kryteria. Obiekty zarejestrowane na obu zdjęciach powinny być odwzorowane w podobnej skali, zdjęcia powinny zajmować takie położenie, jak w momencie fotografowania (obiekty obserwuje się w ich płaszczyznach rdzennych, czyli w płaszczyznach wyznaczonych przez obydwie środki rzutów i obserwowany obiekt). Aby model stereoskopowy, podobnie jak w rzeczywistości, przedstawiał wzniesienia terenu wypukłościami do obserwatora, należy lewym okiem obserwować zdjęcie lewe, a prawym – zdjęcie prawe. Efekt taki nazywamy efektem ortoskopowym. Efekt odwrotny, z odwróconym modelem terenu, nosi nazwę efektu pseudoskopowego.

Jak już wcześniej wspomniano, w opracowaniach fotogrametrycznych stosuje się często stereoskopową (trójwymiarową) obserwację i analizę zdjęć. W fotointerpretacji zdjęć lotniczych możliwość ich stereoskopowej obserwacji, szczególnie jeśli analizowany teren jest zróżnicowany wysokościowo, może w istotny sposób wpłynąć na szczegółowość uzyskiwanych opracowań. A zatem dla obszarów górskich, terenów zurbanizowanych, a także dla drzewostanów zróżnicowanych wysokościowo stereoskopowa obserwacja i interpretacja zdjęć umożliwia uzyskanie dokładniejszych i bardziej szczegółowych wyników w porównaniu z obserwacją pojedynczego zdjęcia.

### **14.2.6. Ortorektyfikacja i mozaikowanie zdjęć lotniczych**

Aby analizować zdjęcia lotnicze razem z innymi danymi przestrzennymi, należy zdjęcia przekształcić do produktu fotogrametrycznego nazywanego ortofotomapą. Ortofotomapa to mapa fotograficzna, która jest wykonana ze zdjęć przetworzonych w taki sposób, że obiekty pierwotnie



**Ryc. 14.2.11.** Wpływ deniwelacji terenu na odwzorowanie punktu  $P$  na zdjęciu lotniczym.

$P'$  – odwzorowanie punktu terenowego  $P$  w rzucie środkowym,  
 $P_1$  – odwzorowanie ortogonalne punktu  $P$ ,  
 $\Delta r$  – przesunięcie radialne na zdjęciu

odwzorowane w rzucie środkowym przekształcone są na obrazy w rzucie ortogonalnym, w którym wykonywane są mapy. Dzięki ortorektyfikacji otrzymywany jest obraz powierzchni Ziemi o jednolitej skali na całej powierzchni opracowania, a obiekty terenowe przedstawione są w swym rzeczywistym położeniu. Tak więc zdjęcie lotnicze przetworzone do postaci ortofotomapy ma jednolitą skalę, nie jest obciążone wpływem błędów orientacji zewnętrznej oraz pozbawione zniekształceń wynikających z deniwelacji terenu. Wynikowy produkt ortorektyfikacji pojedynczego zdjęcia nazywany jest także ortofotografią (czasem ortoobrazem).

Najczęściej wykonywaną współcześnie ortofotomapą jest ortofotomapa cyfrowa, która jest rastrowym, kartometrycznym obrazem terenu otrzymanym w wyniku cyfrowego przetworzenia zdjęć lotniczych cyfrowych lub zeskanowanych analogowych. Do wykonania ortorektyfikacji zdjęcia lotniczego wykorzystywane są parametry orientacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz numeryczny model wysokościowy.

We wcześniej wykonywanych analogowych opracowaniach ortofotomapy jej podstawową charakterystyką była skala ortofotomapy. Obecnie cyfrowe ortofotomapy często opisywane są rozdzielczością przestrzenną, czyli wymiarem najmniejszego elementu zobrazowania – piksela. Aby powiązać rozdzielczość przestrzenną ortofotomapy z jej skalą, można w przybliżeniu przyjąć następujące zależności pomiędzy rozdzielczością a skalą orto-

fotomapy: 0,10 m – skala 1:1000, 0,25 m – skala 1:2000, 0,50 m – skala 1:5000, 1,0 m – skala 1:10 000.

Po utworzeniu ortofotomap (ortofotografii) pojedynczych zdjęć kolejnym krokiem prowadzącym do stworzenia finalnej ortofotomapy prezentującej cały obszar opracowania jest mozaikowanie zdjęć. Jest to procedura mająca na celu połączenie zortorektyfikowanych zdjęć lotniczych w jeden spójny i kartometryczny, fotograficzny obraz terenu. Aby w efekcie mozaikowania uzyskać wysokiej jakości produkt prezentujący maksymalnie dużo obiektów terenowych, zalecane jest kierowanie się następującymi wskazaniem (Ziobro, Ewiak 1999):

- wytwarzać ortofotografie ze środkowych części zdjęć (aby minimalizować wpływ błędów numerycznego modelu terenu, zniekształceń perspektywicznych oraz spadku jasności zdjęcia ku jego brzegom);
- mozaikować wzdłuż linii, które są granicami konturów terenowych (aby szew łączenia nie był widoczny na obrazie);
- mozaikować ze sobą wszystkie ortofotografie, aby powstała dla całego obszaru opracowania jednolita ortofotomapa dopiero później cięta była na arkusze.

Przestrzeganie tych reguł jest szczególnie istotne, jeżeli ortofotomapa tworzona jest dla dużego obrazu, a zdjęcia różnią się tonalnie. Wymienione wymagania wynikają nie tylko z troski o estetykę produktu końcowego, ale mają na celu zachowanie czytelności ortofotomapy.

Na finalną, zmozaikowaną ortofotomapę mogą być także nanoszone dodatkowe elementy, np. nazwy miejscowości i inne opisy.

## 14.3. Satelitarne obrazowanie Ziemi

prof. dr hab. TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI  
– Instytut Badawczy Leśnictwa

Od roku 1960, uznawanego za początek ery teledetekcji satelitarnej, na orbitach okołoziemskich zostało umieszczonych ponad 8000 satelitów. Tylko niewiele z nich przeznaczonych było do badań środowiska, niemniej obecnie wykorzystywanych jest ok. 50 satelitów teledetekcyjnych, a blisko 70 kolejnych znajduje się w planach narodowych i międzynarodowych agencji kosmicznych. Z tych liczb widać wyraźnie, że zakres zastosowań teledetekcji środowiska będzie się stale zwiększać.

Zaletą zdjęć satelitarnych w porównaniu z lotniczymi jest większy obszar zobrazowania, powtarzalność obrazowania określonego obszaru co kilka do kilkunastu dni, możliwość ilościowego i jakościowego opisywania obiektów na podstawie pomiarów dokonywanych przez radiometrycznie skalibrowane sensory, niższy koszt w przeliczeniu na jednostkę powierzchni.

### 14.3.1. Orbity

Satelity teledetekcyjne umieszczane są na orbitach eliptycznych. Najczęściej wykorzystywane są orbity: geostacjonarna i okołobiegunowe.

Orbita geostacjonarna znajduje się na wysokości 36 000 km w płaszczyźnie równikowej Ziemi. Satelity umieszczone na tej orbicie, przy prędkości zsynchronizowanej z ruchem obrotowym Ziemi, mogą stale monitorować ten sam obszar. Orbita geostacjonarna wykorzystywana jest głównie przez satelity meteorologiczne.

Orbita okołopolarna przebiega w płaszczyźnie nieco przechylonej do osi obrotowej Ziemi. Satelity umieszczone na takiej orbicie przelatują blisko biegunów Ziemi i mogą zobrazować całą jej powierzchnię w cyklu powtórzeniowym.

Satelity środowiskowe umieszczone są na orbitach okołopolarnych zsynchronizowanych z pozornym ruchem Słońca. Dzięki tej synchronizacji satelita zawsze przelatuje nad określoną lokalizacją na powierzchni Ziemi o tej samej porze lokalnego czasu słonecznego. Dzięki temu na kolejnych zobrazowaniach określonego obszaru uzyskuje się podobne warunki oświetlenia – oczywiście z uwzględnieniem sezonowych zmian wysokości Słońca.

Gdy satelita porusza się z południa na północ, przemierza część orbity nazywanej wstępującą, a gdy z północy na południe – część orbity nazywanej zstępującą. Kiedy orbita jest zsynchronizowana z pozornym ruchem Słońca – orbita wstępująca znajduje się w tej części globu, w której panuje noc, a zstępująca – tam, gdzie jest dzień. Tak więc odbite promieniowanie Słońca może być rejestrowane tylko ze zstępującej (nasłonecznionej) części orbity, a promieniowanie emitowane w obu jej częściach.

Dzięki skoordynowaniu parametrów orbity z ruchem obrotowym Ziemi z kolejnych orbit rejestrowane są nowe obszary, by po pewnym czasie zamknąć cykl obrazowania globu. Cykl ten wynosi od kilku do kilkunastu dni, w zależności od parametrów orbity i skanerów.

### 14.3.2. Rozdzielczość

Zdjęcia satelitarne pozyskiwane są przeważnie przez skanery, rzadziej przez kamery fotograficzne. Skanery satelitarne rejestrują od kilku do kilkudziesięciu wybranych zakresów spektralnych zwanych kanałami. Zdjęcia fotograficzne zapewniają ciągłą rejestrację powierzchni Ziemi, podczas gdy skanery obrazują ją w sposób dyskretny, w postaci próbkowanych obrazów zbudowanych z podstawowych elementów – pikseli (pixel – picture element). Każdemu pikselowi przypisana jest wartość tonalna (czarny, biały, tony szarości lub barwa), która zapisywana jest w kodzie binarnym. Ten zapis jest odczytywany przez komputer w celu wyświetlenia obrazu w formie analogowej.

Zdjęcia satelitarne opisywane są takimi parametrami, jak rozdzielczość przestrzenna, spektralna, czasowa i radiometryczna.

### 14.3.2.1. Rozdzielczość przestrzenna

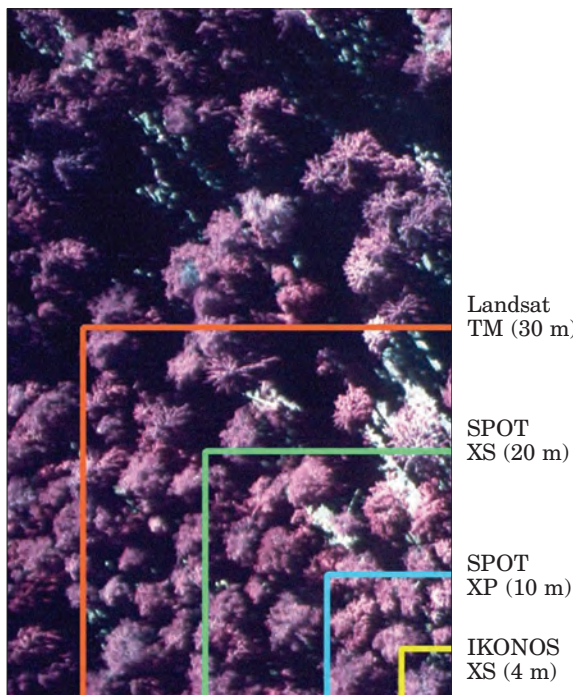
Ciągła rejestracja obrazu na zdjęciach fotograficznych pozwala dostrzec obiekty o wymiarach co najmniej 0,1 mm w skali zdjęcia. Ale aby je rozpoznać i opisać, ich wymiar powinien wynosić co najmniej 1 mm. Ogromną rolę odgrywa tutaj kontrast pomiędzy obiektem a jego tłem.

W wypadku zapisu cyfrowego rozdzielczość przestrzenną określa wielkość piksela, czyli pojedynczego elementu obrazu, która decyduje o wielkości najmniejszego obiektu rozróżnialnego na zdjęciu. Jest on powiązany z wielkością chwilowego pola widzenia sensora (IFOV – Instantaneous Field of View), która jest obszarem widzianym przez pojedynczy element detektora. Obecne satelity pozyskują zobrazowania o rozdzielczości tereno-  
wej wynoszącej od 4 km (Meteosat) do 0,6 m (QuickBird).

Teoretycznie obiekty mniejsze od wielkości piksela nie są widoczne na zdjęciu, gdyż rejestruje on uśrednioną odpowiedź spektralną chwilowego pola widzenia. Jednakże w praktyce nawet mniejsze obiekty mogą być wykryte, gdy ich odpowiedzi spektralne zdominuje średnią wartość odbicia

wskutek kontrastu z otoczeniem. W takim wypadku np. drogi o szerokości znacznie mniejszej niż wielkość piksela mogą być wyraźnie na zdjęciu widoczne.

Piksel ze swej natury zawiera uśrednioną odpowiedź spektralną określonej powierzchni Ziemi (ryc. 14.3.1). W wypadku terenów leśnych, w obszarze jednego piksela zobrazowania drzewostanów średnich klas wieku, wykonanych przez skaner Landsat TM (obejmującego  $30 \times 30$  m), może się znajdo-



**Ryc. 14.3.1.** Wielkości pikseli wybranych satelitów na tle zdjęcia lotniczego

wać ok. 50 drzew, a przez skaner wielospektralny IKONOSA ( $4 \times 4$  m) – 1–2 drzewa. Tak więc o wartości pikseli decydować będzie uśredniona wartość odbić od koron drzew, gałęzi, kory, dna lasu, cienia itd.

Często zdarza się, że pojedynczy piksel pokrywa nie tylko jedną formę użytkowania ziemi, lecz dwie lub nawet więcej. Taki piksel leżący na granicy dwóch lub więcej klas nosi nazwę mikselu (mixed pixel). Im niższa rozdzielczość zdjęcia, czyli im większy piksel, tym więcej mikseli na zdjęciu (ryc. 14.3.2 i tab. 14.3.1), a tym samym trudniejsza jego interpretacja.

**Tabela 14.3.1.**

**Liczba mikseli na zobrazowaniu satelitarnym (Campbell 2002)**

Rozdzielczość przestrzenna zdjęcia satelitarnego	Obszar sceny pokryty mikselami
A (wysoka)	12%
B	26%
C	34%
D (niska)	47%

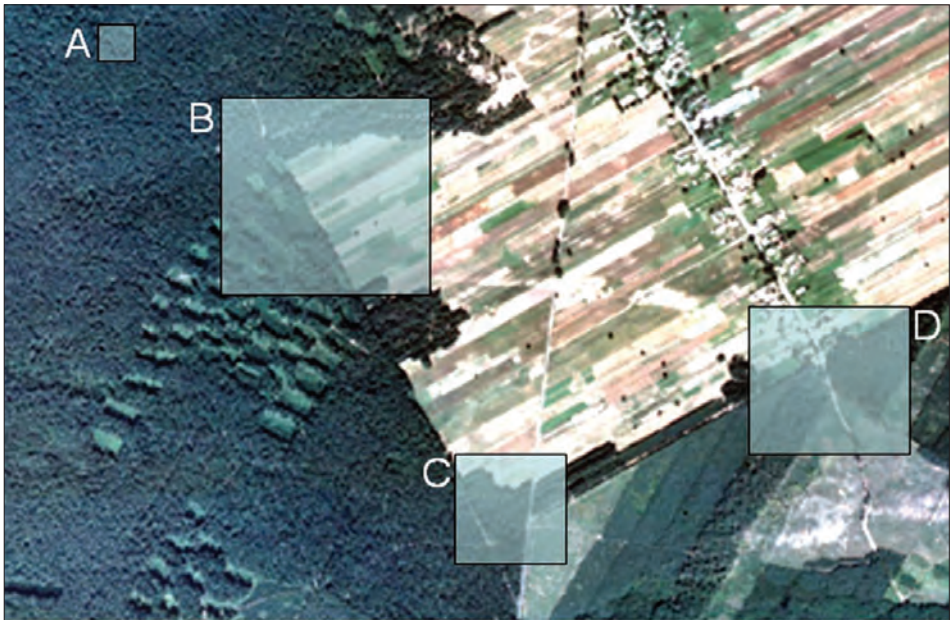
### 14.3.2.2. Rozdzielczość spektralna

Rozdzielczość spektralna to liczba kanałów (i ich rozpiętość spektralna) rejestrowanych przez satelitę. Stosując różne kombinacje kanałów, możemy konkretne zdjęcie satelitarne wykorzystywać do różnych celów.

Z zestawu kilku zobrazowań zarejestrowanych w tonach szarości można tworzyć kompozycje barwne poprzez naświetlanie poszczególnych kanałów jedną z barw podstawowych (czerwoną, zieloną lub niebieską). Barwa jest niezmiernie ważnym elementem analizy zdjęć. O ile oko człowieka jest w stanie rozróżnić zaledwie od 20 do 30 tonów szarości, o tyle w wypadku barw – aż 20 000 kolorów. To dlatego dla ułatwienia i podniesienia dokładności interpretacji wizualnej stosuje się kompozycje barwne (ryc. 14.3.3).

Zobrazowania rejestrowane w poszczególnych zakresach spektralnych mogą być wykorzystywane do różnych zastosowań. I tak:

- zakres niebieski znajduje zastosowanie w analizach wód, batymetrii, sedymentacji, geologii oraz odróżnianiu roślinności od odkrytej gleby. Jest to zakres pochłaniany przez rośliny w procesie fotosyntezy, silnie zakłócany w wyniku rozpraszania promieniowania niebieskiego przez atmosferę;
- zakres zielony – to maksimum odbicia od roślin zakresu widzialnego; służy do określania kondycji roślin, sedymentacji wód oraz analizom geologicznym;
- zakres czerwony – to przedział pochłaniania w procesie fotosyntezy; jest stosowany do określania typów roślinności, a także w geologii;



**Ryc. 14.3.2.** Piksele i miksele zdjęcia satelitarnego przedstawione na tle zdjęcia lotniczego.

A – piksel reprezentujący jedną klasę (drzewostan sosnowy), B, C i D – miksele, których wartość odpowiada średniej odbicia spektralnego od różnych klas użytkowania ziemi (las sosnowy, odnowienia, zręby, rola, zadrzewienia, zabudowania, tereny podmokłe)



**Rycina 14.3.3.** Przykład kompozycji barwnych zdjęcia wykonanego skanerem Enhanced Thematic Mapper przez satelitę Landsat 7.

Zdjęcie po lewej przedstawia kompozycję w barwach naturalnych (zakresy: niebieski, zielony i czerwony), a po prawej jest barwnym zdjęciem w podczerwieni (zakresy: zielony, czerwony i bliskiej podczerwieni)

- bliska podczerwień – wykorzystywana jest w analizach kondycji roślin;
- średnia podczerwień – stosowana jest w analizach kondycji roślin oraz wilgotności gleb, a także do odróżniania chmur od śniegu oraz w geologii;
- podczerwień termalna – stosowana jest do określania termalnych właściwości obiektów.

### 14.3.2.3. Rozdzielczość czasowa

Rozdzielczość czasowa określa, jak często (co ile dni) można uzyskać zobrazowanie tego samego obszaru przez konkretnego satelitę.

W wypadku pierwszych satelitów, wykonujących jedynie wertykalne zobrazowania, rozdzielczość czasowa wynosiła kilkanaście dni (np. Landsat – co 16 dni). Z chwilą wprowadzenia nowocześniejszych skanerów, umożliwiających pozyskanie zobrazowań z sąsiednich orbit, rozdzielczość czasowa wyraźnie się poprawiła, czyli zmniejszył się odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi zobrazowaniami.

Następny postęp dokonał się wskutek umieszczenia na zsynchronizowanych orbitach kilku satelitów podobnego typu (np. trzech satelitów SPOT, pięciu satelitów serii RapidEye), co pozwala nawet na codzienną rejestrację. Tak więc o rozpiętości czasowej decydują cechy aparatury rejestracyjnej, liczba satelitów danego typu, a także rozkład orbit, na których są umieszczone. Zwiększa to możliwość zastosowania zdjęć satelitarnych wobec:

- częstego zachmurzenia, ograniczającego widoczność powierzchni Ziemi z pułapu satelitarnego;
- krótkotrwałych zjawisk (powodzi, pożarów, zanieczyszczenia wód czy atmosfery);
- potrzeby stosowania analiz wieloterminowych (np. monitorowania gradacji owadzych).

### 14.3.2.4. Rozdzielczość radiometryczna

Rozdzielczość radiometryczna opisuje cyfrowy sposób zapisu. Zdjęcia w odcieniach szarości rejestrowane są najczęściej jako obrazy 8-bitowe, choć zdarzają się także zapisy do 11 bitów w wypadku wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych. Zapis 8-bitowy obejmuje 256 tonów szarości ( $2^8 = 256$ ), a 11-bitowy – 2048 tonów. Obrazy barwne mogą zawierać od 8 do 24 bitów, a nawet więcej. Dla obrazu 24-bitowego (16,7 mln barw) bity mogą być podzielone na trzy zestawy, po 8 bitów dla każdej z barw podstawowych (czerwonej, zielonej i niebieskiej). Ich kombinacja pozwala na tworzenie pozostałych kolorów.

### 14.3.3. Wielkość plików obrazowych

Wielkość plików obrazowych zależy od formy zapisu (liczby bitów), liczby kanałów spektralnych zobrazowania, rozdzielczości terenowej zdjęcia oraz jego zasięgu. Na przykład ćwiartka zdjęcia wykonanego przez satelitę Landsat skanerem Thematic Mapper w sześciu zakresach spektralnych (bez kanału termalnego) o pikselu wielkości 30 m, obejmująca obszar  $80 \times 80$  km (wymiar sceny rzędu  $2666 \times 2666$  pikseli), w zapisie 8-bitowym (1 bajt) zajmuje 42,6 mln bajtów pamięci ( $2666 \times 2666 \times 6$ ).

### 14.3.4. Skala zdjęć i materiałów pochodnych

Oko człowieka jest zdolne rozpoznać 16 przemianych czarnych i białych linii na odcinku 1 mm. Oznacza to, że granica ostrości widzenia wynosi  $1/16$  mm, czyli 0,0626 mm. Poniżej tej wartości nie jesteśmy w stanie rozróżnić ani linii, ani punktów, które stają się niezauważalne lub wskutek agregacji wchodzą w skład większego obiektu.

Wychodząc od tej granicznej wartości ostrości widzenia, można obliczyć skalę maksymalnego powiększenia cyfrowego zdjęcia satelitarnego lub lotniczego. Na przykład wymiar piksela satelity QuickBird w zakresie panchromatycznym wynosi 0,6 m (600 mm), a na każdy milimetr przypada 16 linii; na 600 mm będzie ich 9600, a więc skalę maksymalnego powiększenia możemy określić na 1:9600.

Tabela 14.3.2.

Teoretyczna i praktyczna skala zobrazowań satelitarnych

Satelita/ skaner	Wielkość piksela w m	Teoretyczna maksymalna skala powiększenia	Praktyczna maksymalna skala powiększenia	Maksymalna skala wg oferty dystrybutorów zobrazowań
QuickBird	0,6	1:9600	<1:2000	
Ikonos P	1	1:16 000	1:3500	1:2000
SPOT XP	10	1:160 000	1:35 000	1:24 000
Landsat ETM+, XP	15	1:240 000	1:50 000	
SPOT XS	20	1:320 000	1:66 000	1:50 000
Landsat TM	30	1:480 000	1:100 000	1:50 000
Landsat MSS	80	1:1 280 000	1:260 000	
Resurs	160	1:2 560 000	1:530 000	
NOAA	1160	1:17 600 000	1:3 600 000	1:1 500 000

Te teoretyczne obliczenia opierają się na postrzeganiu zdjęcia fotograficznego. Odczytywanie obrazu cyfrowego rządzi się nieco zmodyfikowanymi zasadami. Piksel obrazu może być mianowicie rozpoznany, gdy charakteryzuje się wymiarami co najmniej  $0,3 \times 0,3$  mm, co daje powierzchnię  $0,09$  mm<sup>2</sup>. Jest to więc prawie pięć razy lepiej, niż pokazują rozważania dotyczące zdjęć fotograficznych. Oznacza to, że 60-centymetrowa rozdzielczość zobrażeń pozyskiwanych przez satelitę QuickBird pozwala na ich powiększanie do skali ok. 1:2000, a nie – jak to wynikało z pierwszych obliczeń – do skali 1:9600. Dystrybutorzy zdjęć satelitarnych oferują często materiały o lepszych parametrach, niż to wynika z przedstawionego sposobu wyliczania maksymalnej skali powiększenia. Ma to związek z zabiegami przepróbkowywania w procesie cyfrowego przetwarzania zdjęć.

Należy pamiętać, że zobrażenia cyfrowe nie mają nominalnej skali, ale powyższe kalkulacje pokazują, jak dalece można je powiększać, by nie stracić złudzenia rejestracji ciągłej (tab. 14.3.2).

### 14.3.5. Charakterystyki najważniejszych satelitów

Charakterystykę najważniejszych satelitów przedstawia tab. 14.3.3

**Tabela 14.3.3.**  
Charakterystyki wybranych satelitów teledetekcyjnych

Satelita i nazwa skanera oraz system zapisu	Rozdzielczość spektralna w $\mu\text{m}$ (i przestrzenna w m)	Satelita i nazwa skanera oraz system zapisu	Rozdzielczość spektralna w $\mu\text{m}$ (i przestrzenna w m)
Landsat 5 Thematic Mapper (TM) 8 bitów	1: 0,45–0,52 (30)	SPOT 4 HRVIR 8 bitów	1: 0,50–0,59 (20)
	2: 0,52–0,60 (30)		2: 0,61–0,69 (20)
	3: 0,63–0,69 (30)		2: 0,61–0,69 (10)
	4: 0,76–0,90 (30)		3: 0,79–0,89 (20)
	5: 1,55–1,75 (30)		4: 1,58–1,75 (20)
	7: 2,08–2,35 (30)		
Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) 8 bitów	6: 10,4–12,5 (120)	SPOT 5 HRG 8 bitów	1: 0,50–0,59 (10)
	1: 0,45–0,52 (30)		2: 0,61–0,68 (10)
	2: 0,52–0,60 (30)		3: 0,79–0,89 (10)
	3: 0,63–0,69 (30)		4: 1,50–1,70 (20)
	4: 0,76–0,90 (30)	PAN: 0,51–0,73 (2,5)	
	5: 1,55–1,75 (30)		
7: 2,08–2,35 (30)	IRS-1C I 1D 7 bitów	1: 0,52–0,59 (23,5)	
6: 10,4–12,5 (60)		2: 0,62–0,69 (23,5)	
PAN: 0,52–0,9 (15)		3: 0,77–0,86 (23,5)	
		PAN: 0,50–0,75 (5,8)	

cd. tabeli 14.3.3.

Satelita i nazwa skanera oraz system zapisu	Rozdzielczość spektralna w $\mu\text{m}$ (i przestrzenna w m)	Satelita i nazwa skanera oraz system zapisu	Rozdzielczość spektralna w $\mu\text{m}$ (i przestrzenna w m)	
Terra	1: 0,52–0,60 (15)	11 bitów	1: 0,450–0,520 (4)	
Aster	2: 0,63–0,69 (15)		2: 0,520–0,600 (4)	
Kanały 1–9: 8 bitów	3: 0,76–0,86 (15) (skierowany w tył)		3: 0,625–0,695 (4)	
			4: 0,760–0,900 (4)	
Kanały 10–14: 12 bitów	4: 1,600–1,700 (30)	EROS A/B	PAN: 0,4–0,90 (1,8/0,82)	
	5: 2,145–2,185 (30)	11 bitów	QuickBird PAN: 0,450–0,900 (0,61–0,72) 1: 0,450–0,520 (2,44–2,88) 2: 0,520–0,600 (2,44–2,88) 3: 0,630–0,690 (2,44–2,88) 4: 0,760–0,900 (2,44–2,88)	
	6: 2,185–2,225 (30)			
	7: 2,235–2,285 (30)			
	8: 2,295–2,365 (30)			
	9: 2,360–2,430 (30)			
	10: 8,125–8,475 (90)			
	11: 8,475–8,825 (90)			
	12: 8,895–9,275 (90)			
	13: 10,25–10,95 (90)			
	14: 10,95–11,65 (90)			
	Ikonos 11 bitów	PAN: 0,45–0,90 (1)	RapidEye	1: 0,440–0,510 (5)
		1: 0,45–0,53 (4)	11 bitów	2: 0,520–0,590 (5)
		2: 0,52–0,61 (4)		3: 0,630–0,685 (5)
3: 0,64–0,72 (4)		4: 0,690–0,730 (5)		
5: 0,77–0,88 (4)		4: 0,760–0,850 (5)		
	GeoEye	PAN: 0,450–0,800 (0,41)		
OrbView	PAN: 0,450–0,900 (1)	11 bitów	1: 0,450–0,510 (1,65)	
			2: 0,510–0,580 (1,65)	
			3: 0,655–0,690 (1,65)	
			4: 0,780–0,920 (1,65)	

## 14.4. Przetwarzanie i klasyfikacja zdjęć

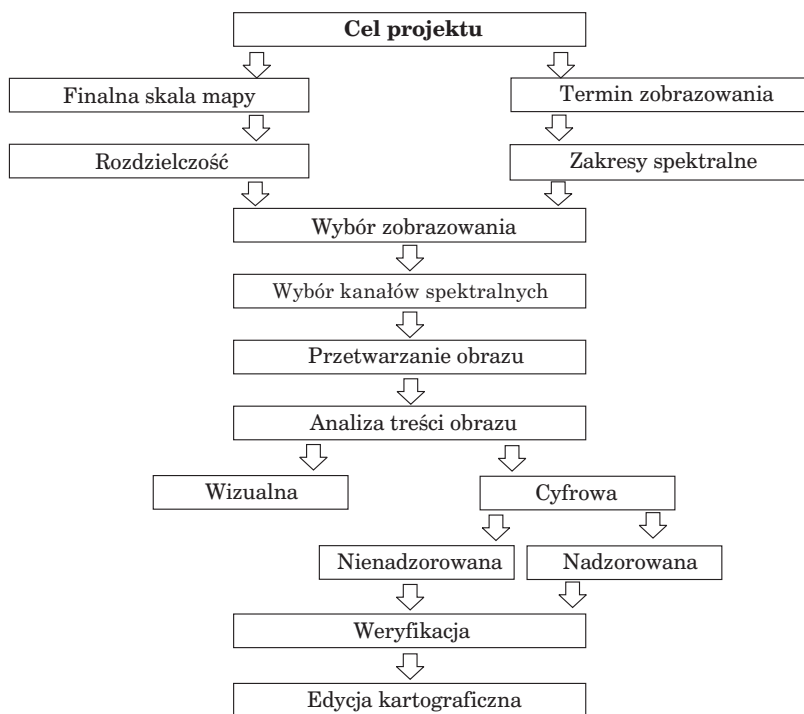
prof. dr hab. TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI – Instytut Badawczy Leśnictwa

Zastosowanie danych teledetekcyjnych w realizacji określonego projektu dokonuje się według schematu przedstawionego na ryc. 14.4.1.

Wybór typu zobrazowań zależy od celu opracowania oraz skali mapy, która ma być jego zakończeniem. Te elementy oraz dostępność zdjęć z określonego terminu determinują wybór danych do analizy. Sama analiza polega na przetwarzaniu obrazu oraz jego interpretacji lub klasyfikacji.

Przetwarzanie obrazu jest procesem zmierzającym do:

- wydobycia z niego informacji,
- podkreślenia informacji istotnych dla interpretatora i ewentualnego wygłuszenia informacji zbędnych,



**Ryc. 14.4.1.** Przebieg prac związanych z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych

- dokonania analiz statystycznych w celu wydobycia informacji nieobrazowej.

Praktycznie nie istnieje żaden standard przetwarzania obrazowego, co wynika z tego, że:

- każdy projekt wymaga indywidualnego podejścia;
- interpretatorzy wykorzystują „autorskie” procedury, będące wyrazem ich osobistych preferencji, oraz różnorodne oprogramowanie do analiz obrazowych, w tym także „autorskie”;
- jakość przetwarzanych danych nie jest jednorodna.

Mimo braku standardowych procedur operacje przetwarzania obrazu można pogrupować na:

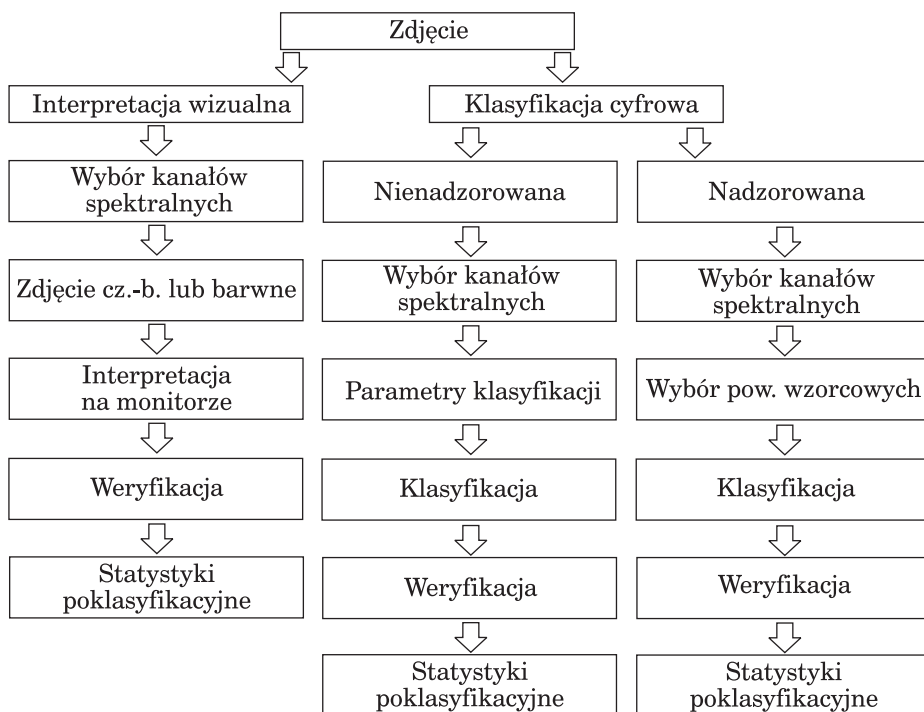
- korekcje radiometryczne (usunięcie błędów zapisu oraz umożliwienie odniesienia wartości spektralnych pikseli do parametrów, które interpretator chce ze zdjęcia pozyskać),
- korekcje geometryczne (usunięcie dystorsji obrazu oraz wpasowanie zdjęcia w mapy),
- operacje zmierzające do wydobycia maksimum treści o interesującym interpretatora obiekcie.

Tak przygotowane zdjęcie poddaje się interpretacji wizualnej lub klasyfikacji cyfrowej (ryc. 14.4.2).

W procesie interpretacji wizualnej można analizować zdjęcie czarno-białe lub barwne (większa możliwość wydzielenia klas). Ważne jest stosowanie odpowiedniej kolejności wyróżniania obiektów: najpierw należy oznaczyć elementy liniowe (drogi, koleje, ciekły wodne), następnie kolejno wydzielić elementy naturalne (las, jeziora itp.), antropogeniczne, obiekty przemysłowe i wojskowe.

Wizualna interpretacja zdjęć lotniczych i satelitarnych, mimo subiektywnego charakteru, ma duże znaczenie, gdyż zapewnia zwykle większą dokładność opracowań (przy dużej, niestety, pracochłonności) niż analizy cyfrowe. Zresztą cyfrowa klasyfikacja zdjęć także dokonuje się często z wykorzystaniem choćby wrywkowej interpretacji wizualnej, np. w celu rozpoznania i lokalizacji wzorcowych powierzchni treningowych.

Bez wątpliwości znajomość zobrazonego obszaru oraz analizowanych obiektów, zjawisk lub procesów wpływa znacząco na dokładność i czas interpretacji. Ponadto skojarzenia, zależne od doświadczenia interpretatora, mogą być niezwykle pomocne w rozpoznawaniu i charakteryzowaniu obiektów.



Ryc. 14.4.2. Schemat analizy danych teledetekcyjnych

W procesie rozpoznawania obiektów wykorzystuje się, czasami całkowicie intuicyjnie, następujących czynniki: ton, barwę, kształt, wielkość, wzór (deseń), teksturę, cień (ryc. 14.4.3).

W wyniku interpretacji, wykonywanej obecnie przeważnie na monitorze komputera (a jeszcze do niedawna polegającej na rysowaniu na kalce nałożonej na zdjęcie), powstaje zarys mapy uwzględniającej elementy według ustalonej legendy.

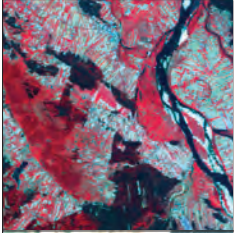



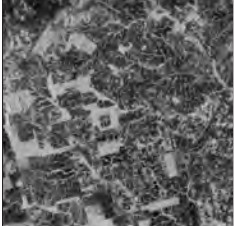

W wypadku cyfrowej analizy zdjęć mamy do czynienia z analizą statystyczną, podczas której analizowane są wartości odbić spektralnych w  $n$ -wymiarowej przestrzeni spektralnej. Liczba wymiarów przestrzeni spektralnej jest równa liczbie kanałów wybranych do analizy. Porównując piksele ze sobą oraz z pikselami reprezentującymi określone obiekty (wzorcowymi), można je grupować w określone klasy, nadając im definicje terenowe (rola, las, drzewostany iglaste, liściaste, uszkodzone itd.).

Jak wynika z ryc. 14.4.2, klasyfikacja zdjęć satelitarnych może być nadzorowana i nienadzorowana. W **klasyfikacji nienadzorowanej** następuje programowo zdefiniowane grupowanie pikseli w klastry o różnych własnościach spektralnych. Następnie, już po dokonaniu klasyfikacji, definiuje się wyróżnione na zdjęciach klasy, tzn. przypisuje się im znaczenie terenowe. W metodzie nienadzorowanej każdy piksel przyporządkowany jest do klasy spektralnej w sposób niejako mechaniczny, bez znajomości jej charakterystyki terenowej. Klasyfikacja nienadzorowana jest przydatna szczególnie dla terenów, które są mało rozpoznane.

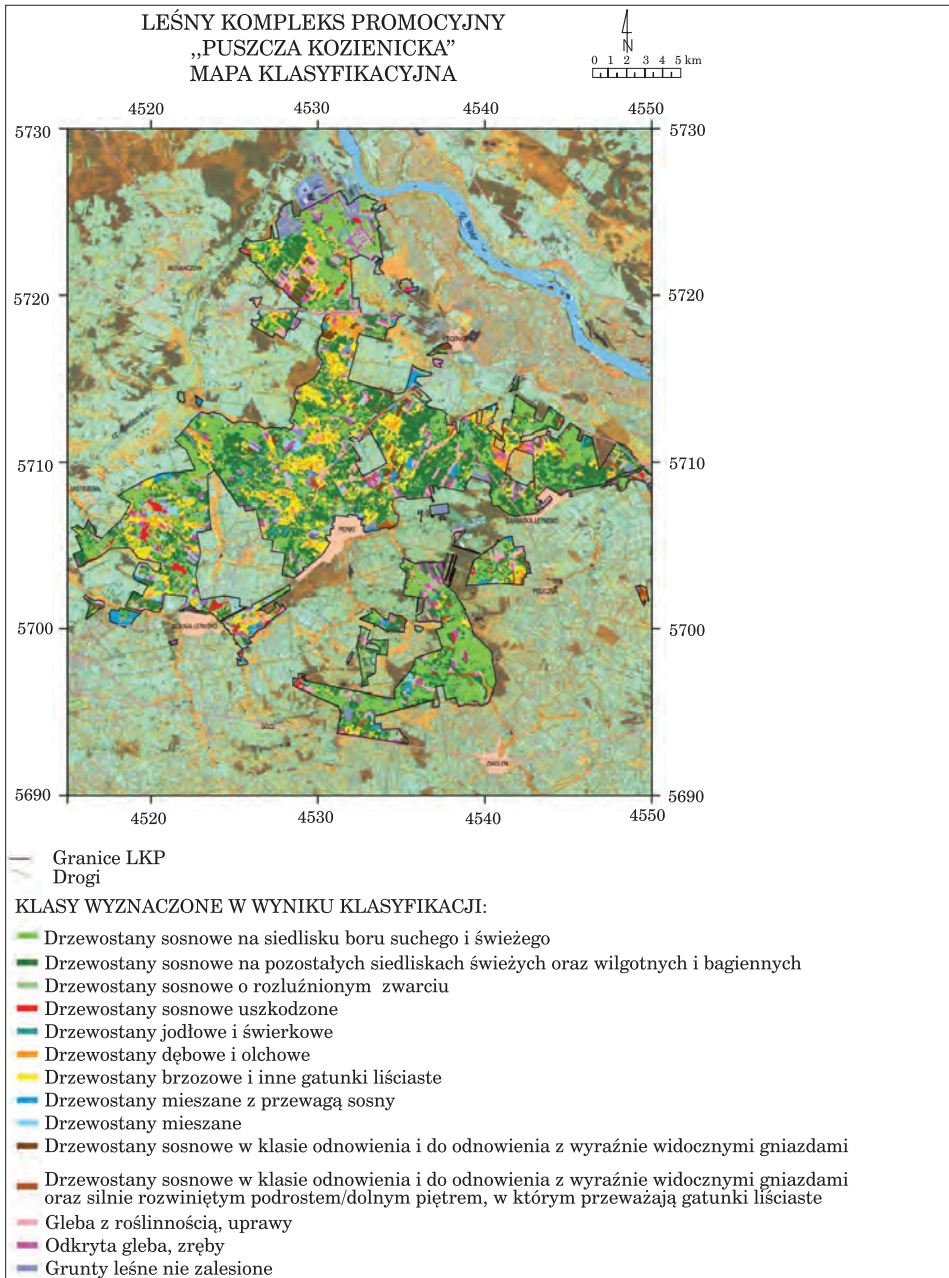
W **klasyfikacji nadzorowanej**, której celem jest wyodrębnienie z góry określonych klas terenowych, określa się ich wzorce spektralne (poprzez wskazanie pikseli je reprezentujących, czyli tzw. wzorcowych powierzchni treningowych), a następnie w procesie klasyfikacji cyfrowej uzyskuje się finalny obraz klasyfikacyjny, pokazujący przestrzenny układ klas, które chciano zwizualizować. Tak więc piksele obrazujące znane klasy terenowe służą za wzorce spektralne do klasyfikacji wszystkich pikseli obrazu. Dokładność klasyfikacji nadzorowanej zależy od właściwego wyboru pól treningowych, reprezentujących w sposób spektralny wszystkie wydzielane klasy. Niezwykle istotna jest spektralna rozdzielczość klas.

Specyficznym rodzajem klasyfikacji nadzorowanej jest segmentacja obrazu. Dokonuje się jej przeważnie przy klasyfikacji zdjęć wysokorozdzielczych, czyli o małym pikselu. W takich zobrazowaniach zmienność spektralna pikseli (nawet obrazujących ten sam obiekt) jest duża, co utrudnia ich klasyfikację. Dlatego, zanim się do niej przystąpi, wykonuje się segmentację obrazu, czyli operację polegającą na grupowaniu sąsiednich pikseli w segmenty. Dopiero segmenty, reprezentujące poszczególne obiekty naziemne, podlegają klasyfikacji nadzorowanej.

Obecnie najczęściej wykorzystywane są klasyfikacje cyfrowe. Nie są one tak dokładne jak interpretacja wizualna, ale wykonuje się je znacznie szybciej. Ponadto do przeprowadzenia klasyfikacji cyfrowej można wykorzystać więcej niż trzy kanały tworzące kompozycje barwne, a jej wynik

	<p><b>Ton</b></p> <p>Odnosi się do jasności lub barwy zobrazowanych obiektów i jest podstawowym elementem ich rozpoznawania. Zmiany tonalne pozwalają rozróżnić także kształty, teksturę i wzór (deseń). Na zdjęciu: jasne tony terenów rolnych kontrastują z ciemnymi tonami drzewostanów iglastych, z czerwonymi drzewostanami liściastymi i bardzo ciemnymi wodami.</p>
	<p><b>Kształt</b></p> <p>Regularne kształty nie występują naturalnie, są bowiem związane z działalnością człowieka (linie kolejowe, drogi, zabudowania). Kształty nieregularne (linia brzegowa, oryginalna granica polno-leśna wraz z ekotonem) są dziełem natury. Na zdjęciu: zabudowa wiejska i sieć drogowa oraz naturalny przebieg rzeczki z brzegami porośniętymi drzewami.</p>
	<p><b>Wielkość</b></p> <p>Pozwala definiować typy obiektów i ich wzajemne relacje przestrzenne. Na przykład wielkość budynków umożliwia wnioskowanie o ich przeznaczeniu.</p>
	<p><b>Wzór (deseń)</b></p> <p>Tworzony przez obiekty, mówi o ich rozmieszczeniu i wzajemnych relacjach przestrzennych, a także umożliwia ich identyfikację. Wzór tworzony przez poszczególne drzewostany pozwala np. wnioskować o gospodarce leśnej na danym obszarze.</p>
	<p><b>Tekstura</b></p> <p>Odnosi się do rozmieszczenia i powtarzalności określonych tonów na obrazie. Zdjęcia radarowe mają charakterystyczną teksturę, zwaną „sól z pieprzem”.</p>
	<p><b>Cień</b></p> <p>Może ułatwiać interpretację, umożliwiając np. określanie wysokości obiektów (np. drzew), ale też może ją utrudniać, np. na zacienionych stokach te same drzewostany wyglądają inaczej niż na stokach nasłonecznionych.</p>

Ryc. 14.4.3. Elementy interpretacji danych teledetekcyjnych



**Ryc. 14.4.4.** Przykład mapy leśnej, powstałej w wyniku klasyfikacji zdjęcia satelitarnego.

W tle kompozycja barwna, utworzona z trzech kanałów zarejestrowanych skanerem Thematic Mapper, na którą nałożono wyniki klasyfikacji hybrydowej (źródło: Wiśniewska i in. 2003)

ma postać cyfrową, która może być od razu wprowadzona jako kolejna warstwa informacyjna do systemu informacji przestrzennej.

Przy klasyfikacji zdjęć satelitarnych, zintegrowanych z innymi informacjami o środowisku w systemie informacji przestrzennej, należy zwrócić uwagę na połączenie klasyfikacji cyfrowej z wizualną. Jak wiadomo, interpretacja wizualna jest doskonalsza, ale za to klasyfikacja cyfrowa – szybsza, a zatem tańsza (Wiśniewska i in. 2003). Łącząc obie metody, a więc stosując klasyfikację hybrydową, obszary jednorodnie spektralnie (o dowolnie zadanej powierzchni) są klasyfikowane automatycznie, a obszary spektralnie niejednorodne (np. drzewostany wielopiętrowe) są wyłączone z klasyfikacji cyfrowej i przeznaczone do interpretacji wizualnej. Dzięki temu wynik klasyfikacji zdjęcia jest bardziej wiarygodny i mniejsze jest przenikanie się wydzielanych klas. Ponadto włączając obszary niejednorodne do interpretacji wizualnej, mamy możliwość nadania tym powierzchniom definicji klas używanych w klasyfikacji cyfrowej lub też, jeżeli zajdzie taka potrzeba, poszerzenia liczby wydzielanych klas interpretacyjnych.

W wypadku każdej analizy zdjęć konieczna jest weryfikacja wyników. Dokonuje się jej przez sprawdzenie terenowe, a na koniec procesu klasyfikacji za pomocą analizy jej dokładności. Polega to na weryfikacji prawidłowości sklasyfikowania losowo wybranych pikseli i zestawienia wyniku w tabeli pokazującej prawidłowości i błędy obrazu poklasyfikacyjnego.

Finałnym etapem, po zaakceptowaniu jakości klasyfikacji obrazu, jest kartograficzna edycja mapy obrazowej (ryc. 14.4.4).

## 14.5. Skaniny laserowy

### 14.5.1. Lotniczy skaniny laserowy

dr hab. inż. KRZYSZTOF BĘDKOWSKI, prof. SGGW – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Leśny, Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa

dr inż. PIOTR WĘŻYK – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Ekologii Lasu, Laboratorium GIS i Teledetekcji

#### 14.5.1.1. Wprowadzenie do technologii lotniczego skaniny laserowego

Technika skaniny laserowego, znana też pod akronimem LIDAR (ang. **L**ight **D**etection and **R**anging), mimo operowania w innym zakresie fal elektromagnetycznych niż technika radarowa (w optycznym, a nie mikro-

falowym), w swojej istocie jest analogiczna do niej, a obie zaliczane są do aktywnych systemów teledetekcyjnych. W skład systemu LIDAR wchodzi: emiter (urządzenie generujące wiązkę światła laserowego) oraz odbiornik (detektor), czyli urządzenie rejestrujące powracającą po odbiciu wiązkę danych. W wypadku terenów odkrytych (brak szaty roślinnej i infrastruktury) wiązka padająca, po odbiciu od powierzchni ziemi, powraca do detektora i jest rejestrowana. Sytuacja się komplikuje, gdy teren pokryty jest roślinnością (lasy, krzewy etc.) lub liniami energetycznymi. Wówczas impuls w postaci plamki światła jest rozpraszany i odbijany od kilku obiektów jednocześnie. W ten sposób rejestrowane są promienie, odbite zarówno od powierzchni terenu, jak i koron drzew (nawet na kilku jej wysokościach). Podstawowym produktem lotniczego skanowania laserowego (ang. Airborne Laser Scanning; ALS) jest chmura punktów o znanych współrzędnych przestrzennych ( $X, Y, Z$ ), które są miejscami odbić promieni lasera od napotkanych przeszkód. Rejestrowane mogą być też: intensywność (ang. intensity) odbicia impulsu oraz kolejne echa sygnału (tzn. pierwsze – First Echo i ostatnie – Last Echo).

Sposób odbicia promieniowania lasera od obiektów terenowych zależy od rodzaju ich powierzchni, a także ich struktury wewnętrznej. Promieniowanie laserowe podlega znanym z fizyki prawom, tzn. może być całkowicie odbijane (od gładkich powierzchni, np. dachów samochodów), może też być całkowicie pochłonięte (przez wodę w zakresie bliskiej podczerwieni – NIR, szczególnie te padające prostopadle do powierzchni lustra wody). Zasada działania skaningu laserowego oparta jest na wyznaczeniu odległości od skanera do badanej powierzchni za pomocą pomiaru czasu ( $\Delta t$ ) upływającego pomiędzy wysłaniem a odbiorem pojedynczego impulsu laserowego w wypadku skanerów impulsowych (ang. Time-of-Flight), przy znajomości wartości prędkości rozchodzenia się światła (stała  $c = 299\,792\,458$  m/s w próżni). Dodatkowo w celu określenia przestrzennego położenia punktu ALS znane muszą być wartości kąta, pod jakim wysłano wiązkę, aby wyznaczyć wektor przestrzenny (OFFSET) od znanej pozycji skanera w układzie  $X, Y, Z$ .

#### 14.5.1.1.1. Historia rozwoju technologii ALS

Początki technologii ALS sięgają roku 1965, kiedy to użyto półprzewodnikowego, gazowego (hell-neon) „profilera” laserowego do ciągłego pomiaru odległości terenu od samolotu. Skutkowało to wykonywaniem profili wzdłuż osi lotu, z wysokości względnej 300÷1000 m i z dokładnością pomiaru 1,5 m w pionie. Zastosowano laser typu CW (fali ciągłej) o modulowanej częstotliwości fali. Z czasem skaner zintegrowano z kamerą szeregową, wykonującą zdjęcia wzdłuż trajektorii lotu samolotu. Do pomiaru wysokości stosowano altimetry, oparte na pomiarze ciśnienia atmosferycznego. Profilerzy pozyskiwały dane wysokościowe jedynie

wzdłuż jednej linii, co nie znajdowało szerokiego zastosowania w takich dziedzinach, jak leśnictwo. Stosowano także próby z określaniem pozycji i wysokości samolotu na podstawie systemów mikrofalowych, śledzących transpondery rozlokowane na precyzyjnie pomierzonych pozycjach w terenie.

Przełomowym momentem rozwoju technologii ALS była możliwość nadania georeferencji pozyskanej chmurze punktów. Niestety, w przeciwieństwie do fotogrametrii nie da się na podstawie danych terenowych zrekonstruować położenia skanera, dlatego pojawienie się funkcjonującego systemu NAVSTAR-GPS otworzyło nową erę rozwoju lidara lotniczego. Dodanie kolejnego podsystemu IMU (Inertial Measurement Unit) i zintegrowanie go z odbiornikiem dGPS pozwoliło osiągnąć dokładność położenia skanera w przestrzeni na poziomie  $4 \div 7$  cm. Jednym z pierwszych modeli skanerów komercyjnych, opartych na technologii profilera, był model 501SX firmy Optech (Kanda). Grupa badawcza dr. Joachima Lindbergera (Uniwersytet w Stuttgarcie) zintegrowała ten laser z odbiornikiem GPS Sercel oraz systemem IMU Delco Carrousel, tworząc tzw. Airborne Laser Profiling System (ALPS). Usprawniony system mechaniczny doprowadził do skonstruowania znanego urządzenia ALTM 1020 (Optech) i utworzenia firmy TopScan (Niemcy). Dziś profilerzy są jeszcze sporadycznie wykorzystywane do pozyskiwania profili lodowców i obszarów tektonicznie czynnych, ale na wzmiankę zasługuje próba stworzenia urządzenia typu „low-cost” do leśnej inwentaryzacji. System, znany pod nazwą PALS (Portable Airborne Laser System), zbudowany został z niedrogich komponentów przez Centrum Lotów Kosmicznych im. Roberta H. Goddarda NASA (USA). Oparty jest na dalmierzu Riegl LD90-3800-VHS (zaledwie 2000 impulsów/s = 2 kHz) oraz odbiorniku GPS Garmin III i sygnale korekcyjnym z radiolatarni. Dodatkowo z systemem zintegrowano kamerę wideo Pulnix, a cena całego zestawu nie przekracza 30 000 dol., co czyni go około 30 razy tańszym w porównaniu do współczesnych komercyjnych systemów ALS. Stosowanie profilerów ma jednak miejsce z poziomu przestrzeni kosmicznej, czego przykładem jest Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), zamontowany na satelicie ICESat. Średnice plamek lasera (ang. beam; footprint), wysyłanego z orbity 600 km, wynoszą na powierzchni Ziemi ok. 70 m, a ich środki oddalone są od siebie o ok. 170 m. Dokładność określenia wysokości tym urządzeniem wynosi  $\pm 10$  cm i jest uzależniona od orientacji zewnętrznej samego satelity, wykorzystującego sygnały GPS, oraz od kamer śledzących położenie gwiazd, tzw. Stellar Reference System (SRS). Innym przykładem profilera SLS (Satellite Laser Scanning) jest Vegetation Canopy Lidar (VCL), wysyłający z orbity 400 km trzy plamki lasera (średnica 25 m) jednocześnie, wzdłuż trzech trajektorii do siebie równoległych (odległość 4 km). Pomimo że oba wyżej wymienione systemy SLS konstruowano z myślą o obserwacji lodowców w górach i na biegunach, to znane są prace badawcze dotyczące wykorzystania tych danych na potrzeby inwentaryzacji szaty roślinnej (lasów).

#### 14.5.1.1.2. Komponenty systemu

Samoloty, które wykorzystuje się w technologii ALS, nie różnią się w zasadzie od statków powietrznych przystosowanych do wykonywania zadań fotogrametrycznych. Samolot powinien mieć odpowiednio certyfikowane otwory w podłodze lub też mocowania do podwieszenia specjalnych, aerodynamicznych zasobników z włókien węglowych, w których znajdują się skanery i kamery. Taką konstrukcję zastosowano np. w nowoczesnej konstrukcji samolotu Diamond DA42 – nosi ona nazwę Multi-Purpose Platform (MPP). Pozycja skanera w samym samolocie musi być niezmiernie stabilna i precyzyjnie zmierzona ze względu na orientację względem innych urządzeń (anten GPS oraz jednostki IMU – Inertial Measurement Unit). W samolocie muszą się także znaleźć urządzenia do sterowania skanerem, zapisujące dane na dyski HDD, kamery wideo do podglądu sytuacji pod samolotem oraz wyświetlacze LCD. Zwykle podczas lotu wykonuje się zdjęcia kamerami średniego formatu lub pozyskuje obraz w wielu kanałach spektralnych skanerem linijkowym, takim jak Falcon (TopoSys), lub hiperspektralnym AISA (Specim). Poza samolotami korzysta się także ze śmigłowców, które mają skaner (lub nawet dwa skanery), zamontowany z boku lub pod podwoziem, oraz kamery cyfrowe. Dla niektórych zastosowań (np. monitoring linii wysokiego napięcia czy przebiegu górnej granicy lasu) użycie śmigłowca może okazać się praktyczniejsze niż samolotu, choć jest on podatny na niestabilność trajektorii lotu ze względu na boczny wiatr i stosunkowo wolny przelot. Z drugiej strony stosowanie śmigłowca zapewnia pozyskanie bardzo dużej liczby punktów na jednostce powierzchni i dopasowanie trajektorii do przebiegu skanowanego obiektu (np. drogi, rzeki, linii wybrzeża). System ALS obsługiwany jest przez jednego operatora, który czuwa nad przyjętymi ustawieniami parametrów dla skanowanego obszaru i kontroluje wraz z pilotem przebieg kolejno zaplanowanych szeregów nalotu, wspomagając się odpowiednim oprogramowaniem i mapami wyświetlanymi na monitorach LCD.

Typowy system laserowego skanowania lotniczego ALS zbudowany jest z następujących zintegrowanych ze sobą komponentów:

- dalmierza laserowego, składającego się z urządzenia generującego impuls, systemu optycznego i detektora, zegara oraz urządzenia digitalizującego;
- systemu opto-mechanicznego (np. rotujących powierzchni, luster poligonowych lub włókien światłowodowych) oraz urządzenia kodującego kąt rozrzuconej w poprzek lotu samolotu wiązki światła;
- elektronicznej jednostki kontrolującej urządzenia wysyłające i odbierające sygnał (zwykle komputer PC zarządzający zapisem danych ze skanera, GPS oraz IMU na dyskach HDD);
- zintegrowanego modułu GPS/IMU, bez którego nie można użyć całego systemu (wymagany jest sygnał korekcyjny ze stacji bazowych, odległych o ok. 40 km od dokonywanego nalotu, np. ASG-EUPOS, co za-

- pewnia dokładność kilku centymetrów w trybie post-processing lub nawigacji). Urządzenie IMU (żyroskopy i akcelerometry, np. POS-AV firmy Applanix) zapewnia pomiar wysokości samolotu, kierunki skręcenia w trzech płaszczyznach oraz wartości przyspieszeń na składowych kierunkach (dokładności kątowe to  $0,005 \div 0,03^\circ$ , a odległości  $9 \div 50$  cm na 1000 m);
- oprogramowania zarządzającego zapisywaniem i wstępnym przetwarzaniem informacji zapisywanej podczas lotu oraz do post-processingu danych (kalibracja danych, analiza zapisu w wypadku skanera typu „pełnej fali” – ang. full waveform) oraz łączenie pojedynczych szeregów ze sobą i nadawanie chmurze punktów georeferencji;
  - urządzenia obrazującego, np.: mało- i średnioformatowych kamer cyfrowych, kamery wideo, skanera linijkowego (np. Toposy Falcon II), skanera hiperspektralnego bądź kamery termowizyjnej.

Końcowe położenie punktów ALS, uwzględniające powyższe dokładności dalmierza laserowego, instrumentów GPS/IMU oraz transformacje do układu odniesienia użytkownika, oscyluje zwykle w zakresie dokładnościowym  $10 \div 15$  cm dla współrzędnej wysokościowej  $Z$  oraz  $30 \div 50$  cm dla współrzędnych płaskich  $X, Y$ . Wartości te, choć nie wydają się na pierwszy rzut oka precyzyjne, to jednak gwarantują pozyskanie informacji o przebiegu powierzchni (np. NMT) na dużych obszarach z niespotykaną wcześniej dokładnością i gęstością pomiarów. Generowane na podstawie danych ALS powierzchnie NMT lub NMPT zwykle i tak dostarczane są do odbiorcy jako obrazy rastrowe o pikselu  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , co w większości przypadków jest w zupełności wystarczającą rozdzielczością przestrzenną dla typowych analiz przestrzennych GIS.

#### 14.5.1.1.3. Typy skanerów lotniczych i technologia skanowania ALS

Producentów skanerów, którzy zdominowali rynek ALS, jest zaledwie trzech. Są to:

- Optech International Inc. (Kanada) – pierwsze modele ALTM 1020 oraz najnowszy Gemini 167, rejestrujący do czterech odbić przy wysokości lotu  $150 \div 4000$  m i 12-bitowym zapisie intensywności. System integruje kamery DSS 439 (Digital Sensor System; Applanix – rozdzielczość 39 Mpix RGB oraz CIR) lub Rolleimetric (39 Mpix RGB).
- Leica Geosystems (USA, Szwajcaria) – od 2006 r. nowa generacja ALS50-II, wysokość względna lotu – 6000 m, częstotliwość skanowania – do 150 kHz, integracja z IMU Applanix lub IPAS Terramatics (200 poz./s) oraz kamerą RCD105 (39 Mpix).
- Riegl (Austria) – od 2006 r. skanery dla niskich pułapów, LMS-Q240 – do 450 m lub LMS-Q560 – do 1500 m wysokości względnej (skaner typu full waveform, częstotliwość generowania impulsu – do 240 kHz, pomiar – do 160 000 pkt/s), integracja z IMU/GPS AEROcontrol firmy

IGI oraz licznymi kamerami bądź kombinacją dwóch skanerów (system BP560-XS) podwieszonych pod samolotem Diamond DA42 MPP. Najnowszy skaner lotniczy Riegl to LMS-Q560 typu full waveform, przeznaczony m.in. dla leśnictwa.

Inni producenci to: IGI (LiteMapper), TopoSys (włókna światłowodowe), Helimap, iMAR, Lidar Services International, Tuck Mapping, TopEye (Mk II), Fugro (FLI-MAP), Terrapoint, Northerne Geomatics czy w końcu NASA – systemy ELVIS, SLICER, RASCAL.

Ogólnie rzecz biorąc, skanery lotnicze można podzielić na dwa podstawowe typy, czyli do zadań związanych z:

- pozyskiwaniem informacji z powierzchni lądów (np. skanowanie miast, lasów, linii energetycznych, dróg etc.), określane mianem tzw. skanerów topograficznych;
- mapowaniem dna zbiorników wodnych: jezior i mórz – tzw. skanery batymetryczne, które działają w zakresie światła podczerwonego (NIR) i zielonego (G), lepiej penetrującego w wodzie (systemy: SHOALS – Optech, Hawk Eye II – AHAB czy EAARL – NASA).

#### **14.5.1.1.3.1. Ślad plamki na obiekcie**

Mechanizmy skanujące stosowane przez producentów decydują o tym, jaki „ślad” poruszania się po obiektach pozostawia plamka lasera. Najczęściej jej skok przypomina „zęby piły”, co uzyskuje się przez zastosowanie obracającego się lustra lub pary powierzchni planarnych odbijających impuls lasera. W tym wypadku niewielką wadą jest zmieniające się zagęszczenie punktów na linii skanowania, ale za to możliwa jest regulacja kąta rozwarcia dla wysyłanego impulsu. Efektem sinusoidalnego rozrzucenia plamki lasera charakteryzują się tzw. lustra poligonowe (rotująca kostka sześcienna o wypolerowanych ścianach). Istnieją też inne rozwiązania, takie jak Palmer scanner, zapewniające (dzięki specjalnej konstrukcji lustra, tzw. ang. nutating mirror) eliptyczny rozkład plamek zbliżonych do przesuniętych okręgów (w zależności od prędkości lotu). Unikatowym rozwiązaniem jest skaner zbudowany z włókien światłowodowych (TopoSys), w którym nie ma potrzeby pomiaru kąta wysyłania wiązki (stała wartość). Aby zapewnić bardziej przypadkowy rozkład plamek na gruncie (układają się równoległe do kierunku lotu), w kolejnych modyfikacjach zastosowano rotującą podstawę skanera, co zapewnia śladom plamek sinusoidalny kształt (tzw. swing mode).

#### **14.5.1.1.3.2. Nalot ALS oraz pomiary terenowe**

Planowanie misji ALS odbywa się niemal identycznie jak nalotu fotogrametrycznego, tj. z zastosowaniem specjalnie przygotowanych aplikacji wykorzystujących narzędzia GIS oraz dane w postaci wektorowej (np. mapa ewidencyjna) czy też rastrowej (mapy topograficzne, ortofotomapy).

Założona gęstość chmury punktów do uzyskania ma ścisły związek z wysokością lotu statku powietrznego, prędkością przelotową samolotu, wielkością plamki na gruncie, częstotliwością generowania impulsów i sposobem (śladem) ich rozrzucania poprzecznie do osi lotu (lub eliptycznie). Zwykle producent skanera dostarcza odpowiednie oprogramowanie, pozwalające na interaktywne dobranie wszystkich tych parametrów oraz optymalizację trasy przelotu. Założenie jest takie, aby wykonywać jak najmniej nawrotów i latać możliwie długie szeregi (skany) przy zachowaniu odpowiedniego pokrycia poprzecznego (zwykle ok. 25–30%). Szerokość skanowanego pasa, w zależności od wysokości lotu i kąta wysyłania wiązki, wynosi zwykle 300 ÷ 600 m. W sytuacji ostrych nawrotów samolotu należy się liczyć z utratą sygnału GPS, stąd zwykle obszary do nalotu ALS wyznacza się w kształcie regularnych wieloboków. Ułatwia to znacznie ich schematyczne pozyskanie (nawigacja) oraz dalsze przetwarzanie (regularny podział na obszary robocze, np. 1,0 × 1,0 km). Ustalone parametry lotu, samego skanera i urządzeń zintegrowanych (np. kamer cyfrowych czy wideo) pozwalają na wstępne obliczenie rozmiaru pozyskiwanych danych. To z kolei wskazuje na niezbędne pojemności twardego dysku (HDD). W połączeniu z warunkami atmosferycznymi (np. przeciwny wiatr) wszystkie te czynniki decydują o maksymalnej liczbie godzin skanowania w powietrzu (ilość paliwa, czas dolotu i powrotu na lotnisko etc). Specjalne wyświetlacze z mapkami czy wskaźnikami kierunków poziomych i pionowych mogą być montowane w kokpicie, co ułatwia pilotom nawigację na kolejno wykonywane szeregi. Przy planowaniu misji pomiarowej należy oczywiście uwzględnić i uzyskać zgodę lotniska na lądowanie i tankowanie, jak również zaplanować odpowiednie rozłożenie ciężaru (paliwo, sprzęt, załoga), co należy do obowiązków pilota. W wypadku nalotów ALS wykonuje się często kilka poprzecznych („wiązących”) skanów (pasów) w stosunku do rejestrowanych regularnie szeregów, a ich wyznaczenie nie jest przypadkowe. Przed przystąpieniem do nalotu planuje się rozmieszczenie stacji referencyjnych GNSS, co dziś w dużej mierze ułatwia działający nieodpłatnie serwis ASG-EUPOS. Stacje bazowe nie powinny być odległe o więcej niż 40 km od obszaru nalotu, co czasem wymaga uruchomienia własnej stacji referencyjnej w terenie. W obszarze „szeregów wiążących” wykonuje się pomiary powierzchni planarnych, tzn. dachów budynków ustawionych do siebie pod różnymi kątami.

Poszczególne szeregi nalotu wpasowuje się w te precyzyjnie pomierzone tachimetrem płaszczyzny. Łączenia (ang. matching) poszczególnych szeregów oraz wpasowania w układ odniesienia (nadanie georeferencji, np. do układu współrzędnych PUWG 1992) dokonuje się na podstawie pomiarów powierzchni planarnych dachów budynków oraz przetworzonych (po poprawce) danych GPS oraz IMU. Każda powierzchnia planarna powinna być wyznaczona przez minimum 4–6 punktów w miarę równomiernie rozmieszczonych na dachu. Podczas pomiarów (dGPS oraz tachimetr) można ustalić współrzędne punktów dostosowania (GCP – Ground Con-

trol Points) na potrzeby orientacji zewnętrznej i kontroli zdjęć lotniczych, jeśli przewiduje się ich wykonanie. Jeśli zdjęcia pozyskiwane są podczas nalotu ALS (najczęściej kamery średniego formatu), to ich orientację zewnętrzną można przejąć z jednostek GPS/IMU i stosując odpowiednie oprogramowanie (np. Terraphoto, Terrasolid Ltd.), wykonać tzw. prawdziwą ortofotomapę (ang. true orthophotomap). Odpowiednio zaplanowany nalot, uwzględniający zarówno koszty dolotu do obszaru badań, opłaty postojowe i serwisowe na lotnisku, cenę paliwa i całej logistyki sprzętu i personelu, jak i ewentualne opłaty za dane korekcyjne GNSS, daje podstawy do wyliczenia właściwych nakładów niezbędnych do pozyskania danych.

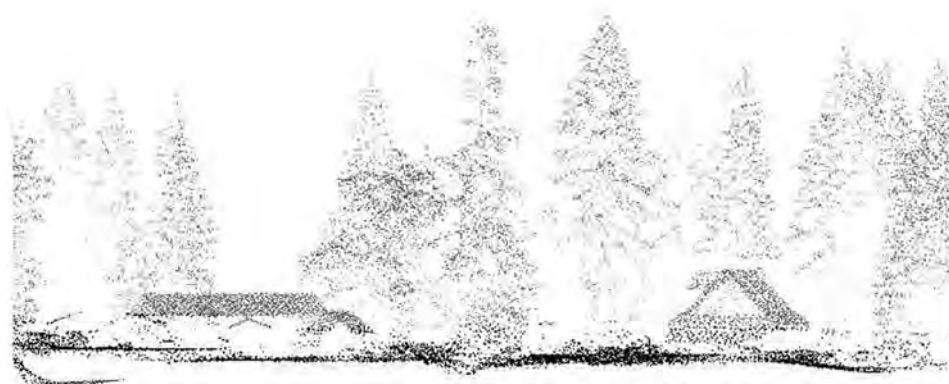
#### **14.5.1.1.3.3. Przetwarzanie danych ALS**

Dane ALS po wstępnym przetworzeniu („matching” oraz nadanie georeferencji) mają tzw. znacznik czasu GPS, tzn. każdy punkt z wygenerowanej chmury punktów otrzymuje informacje o czasie jego pozyskania (UTC), współrzędnych  $X$ ,  $Y$  oraz  $Z$ , kolejności odbicia (np. FE czy drugie echo z czterech odbić), kącie wysłania impulsu, intensywności odbicia, numerze szeregu (skanu) i jego kierunku oraz inne zdefiniowane przez użytkownika cechy (np. oznaczenie skanera w wypadku stosowania większej ich liczby). Przechowywanie danych w formacie binarnym opracowanym przez danego producenta jest niewątpliwie najlepsze ze względu na ich najmniejszy rozmiar i optymalne przetwarzanie, ale uniemożliwia to często ich użycie w innych zewnętrznych aplikacjach. Dane ALS na tym stopniu przetworzenia mogą być przekazywane odbiorcy w postaci plików ASCII bądź też w coraz bardziej uznanym w świecie formacie binarnym LAS (przyjętym przez ASPRS – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; najnowsza wersja 1.3), obsługiwanym przez wiele programów. Przechowuje on wszystkie wyżej wymienione informacje przypisane do punktu z chmury ALS oraz dodatkowo parametry transformacji kartograficznych czy informacje na temat danych typu „full waveform”. Format LAS zapewnia także przechowywanie informacji o przynależności punktu do odpowiedniej klasy zdefiniowanej przez ASPRS.

Przetwarzanie dużych zbiorów chmur punktów ALS odbywa się zazwyczaj w sposób zautomatyzowany (makropolecenia, wsadowe przetwarzanie) w celu maksymalnego wykorzystania możliwości obliczeniowych komputera lub klastrów sieciowych.

Przy analizie danych ALS obszarów leśnych należy brać pod uwagę zjawisko częściowego odbijania impulsów laserowych przez elementy drzew (korony, konary, pnie), niżej położone krzewy (podszyt, podrost) oraz rośliny dna lasu i istniejącą infrastrukturę, np. kabel telefoniczny (ryc. 14.5.1.1).

Powierzchnia, interpolowana na podstawie pierwszych powracających impulsów (FE), przebiega albo po koronach drzew, albo na pewnej wyso-



**Ryc. 14.5.1.1.** Obraz chmury punktów ALS. Profil: szerokość 10 m, gęstość ok. 20 pkt/m<sup>2</sup> (źródło: ProGea Consulting; Zakopane 2007)

kości nad terenem (roślinność zielna, niskie krzewy), albo bezpośrednio po terenie. Uzyskiwane wyniki zależą od gęstości pokrywy roślinnej oraz jej zmienności w okresie wegetacyjnym. Możliwość zarejestrowania kształtu pojedynczych drzew i krzewów zależy od gęstości punktów pomiarowych oraz śladu rozrzutu wiązki po obiektach. Podstawowym problemem związanym ze skanowaniem obszarów pokrytych roślinnością drzewiastą jest opracowanie sposobu odróżniania impulsów odbitych od drzew – od odbijanych przez grunt. Zagadnienie to ma znaczenie praktyczne – pierwotnie związane było z zadaniem budowy NMT obszarów pokrytych roślinnością. Opracowywane algorytmy filtracji mają na celu uzyskanie danych dotyczących wyłącznie powierzchni związanych z terenem (gruntem), a pozostałe rejestrowane impulsy są traktowane jako zakłócenia w generowaniu modelu. Wskazuje się na konieczność dostosowywania filtrów do rodzaju pokrywy roślinnej. Impulsy pochodzące z odbić od dna lasu mogą być wykorzystane do modelowania bardzo precyzyjnego NMT, na którego podstawie możliwe jest nawet badanie śladów dawnego rolniczego zagospodarowania terenu czy też osadnictwa.

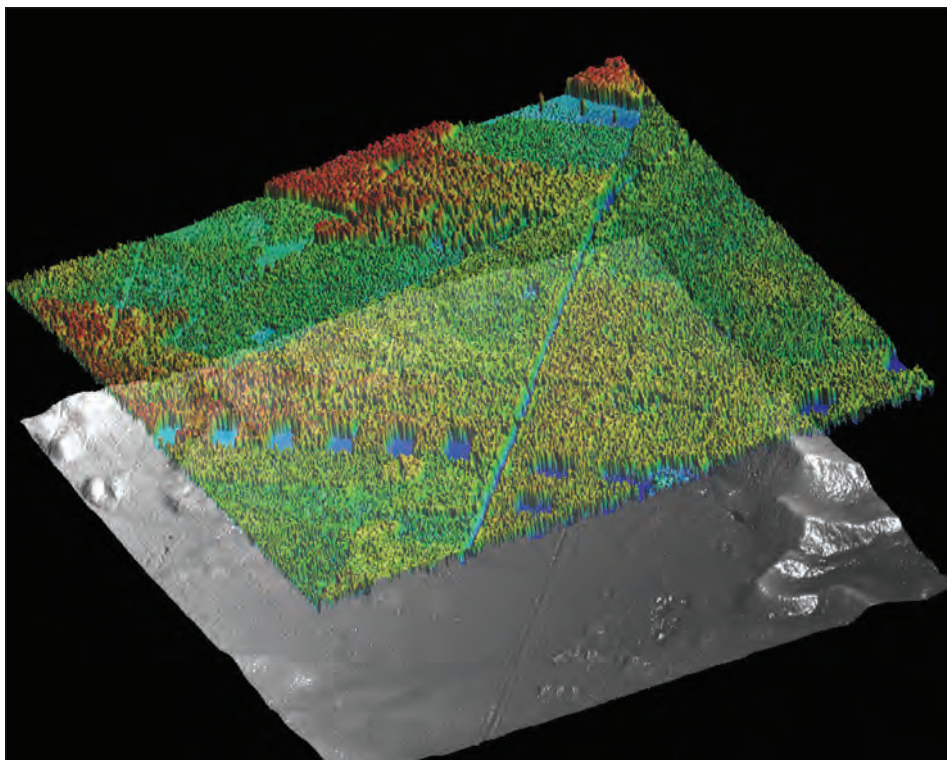
Najbardziej znany i zaawansowany algorytm filtracji chmur punktów został zaimplementowany w oprogramowaniu Terrascan, Terrasolid Ltd. Generuje on punkty będące wierzchołkami trójkątów i znany jest pod nazwą aktywnego modelu TIN. Użytkownik definiuje rozmiar siatki, w której poszukiwane są punkty leżące najniżej. Tworzą one pierwsze zręby generowanej powierzchni TIN, która w kolejnych krokach jest zagęszczana przez punkty spełniające kryterium odległości interakcyjnej i kąta interakcyjnego. W ten sposób powstaje powierzchnia będąca reprezentantem klasy „grunt”. Najczęściej bywa ona konwertowana do regularnej siatki GRID (lub Geo-TIFF). Punkty ALS, uczestniczące w tworzeniu NMT, zostają przypisane do klasy gruntu. Przed przystąpieniem do generowania tej klasy wyszukiwane

są tzw. punkty błędne, znajdujące się niżej pod gruntem (ang. ghost points – low points), najczęściej ulokowane pod budynkami. W oprogramowaniu Terrascan można interaktywnie modelować NMT przez manualną edycję punktów ALS, tj. ich zaklasyfikowanie lub przesunięcie do odpowiedniej klasy. Mając klasę „grunt” i przyjmując jej wysokość względną za zero (0,0 m), możemy przydzielić pozostałe punkty do klas: roślinności niskiej, średniej bądź wysokiej, samodzielnie ustalając przedział wysokości dla każdej klasy. Istnieją specjalistyczne algorytmy, które wyszukują wewnątrz chmury punktów punkty tworzące klasę „budynki” (odpowiednie kryteria powierzchni planarnych) lub „pojedyncze drzewa” (programy Terrasolid lub TIFFS). Automatycka klasyfikacja chmur punktów bywa jednak obciążona błędem, dlatego zawsze rezultaty powinny być sprawdzane przez operatora.

### 14.5.1.2. Zastosowanie technologii ALS w leśnictwie

Pierwsze badania dotyczące zastosowania ALS w leśnictwie i analizach krajobrazu wykonano w połowie lat 70. ubiegłego wieku w ZSRR pod kierunkiem Sołoduchina, jednak zasadniczy rozwój zastosowań w leśnictwie nastąpił pod koniec lat 90. (USA, Kanada, Skandynawia). Głównym obszarem zastosowania ALS w lasach jest od samego początku zbieranie danych do określania wysokości pojedynczych drzew i całych drzewostanów, zagęszczenia drzew oraz zapasu (biomasy) drzewostanów. Później pojawiły się próby klasyfikowania treści danych ALS, czyli identyfikowania zarejestrowanych obiektów, w tym przynależności gatunkowej pojedynczych drzew. Współcześnie coraz częściej dane ALS integrowane są z lotniczymi lub satelitarnymi obrazami cyfrowymi.

W aplikacjach z zakresu leśnictwa wykorzystywany jest nie tylko NMT, zasadniczą bowiem rolę odgrywa numeryczny model powierzchni (pokrycia) terenu (NMPT), zwany w języku angielskim Digital Surface Model – DSM (ryc. 14.5.1.2). W wypadku skanowania drzewostanów i analizy warstwy koron często mamy do czynienia z numerycznym modelem koron (ang. Crown Height Model – CHM), który ze względów praktycznych poddaje się tzw. normalizacji. Zabieg ten ma za zadanie operowanie wartościami względnymi wysokości zarejestrowanych koron. Najczęściej stosowanym określeniem w wypadku modelowania danych ALS jest nDSM, czyli znormalizowany NMPT (zNMPT), którego wartości wskazują na względne wysokości obiektów (domów, drzew). Normalizację można przeprowadzać zarówno na „surowych” chmurach punktów, jak i na powierzchniach rastrowych (map algebra). Generowanie modelu CHM odbywać się może przy uwzględnieniu lokalnych maksimów (zachowania wierzchołków drzew) lub też stosowaniu różnego rodzaju filtrów wygładzających (medianowych czy Gaussa). Powstałe powierzchnie (CHM)



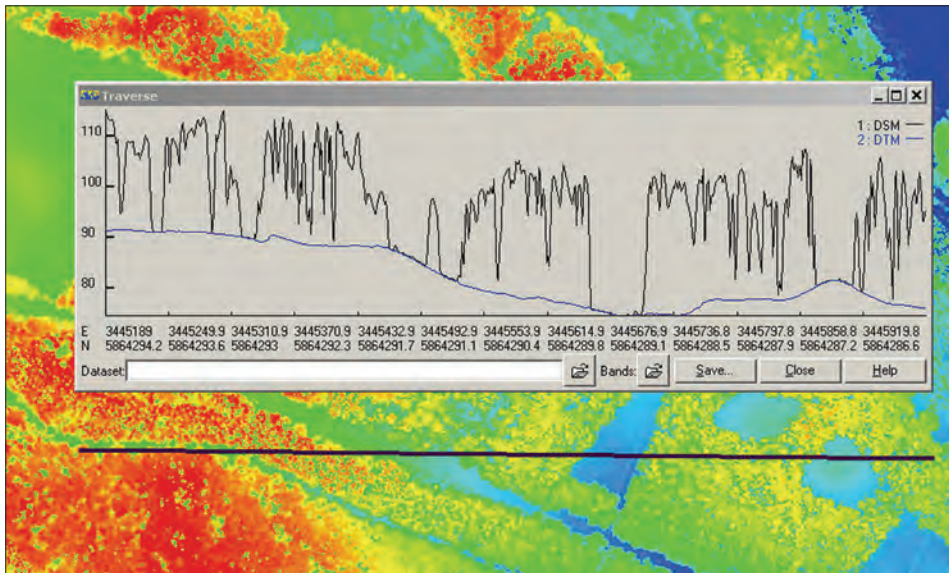
**Ryc. 14.5.1.2.** Porównanie NMT i NMPT. Numeryczny model terenu (NMT; u dołu) oraz numeryczny model powierzchni terenu (NMPT; u góry w transparencji) fragmentu Nadleśnictwa Chojna (źródło: ProGea Consulting)

służą często licznym analizom z zakresu pozyskiwania informacji o drzewostanie.

Leśnicy zainteresowani są przede wszystkim sposobami określania wielkości charakteryzujących drzewostany, które są istotne z punktu widzenia opisu ich rozwoju do planowania czynności hodowlanych oraz na potrzeby inwentaryzacji wielkości zapasu drewna. Do najważniejszych cech taksacyjnych i parametrów opisujących drzewostany, możliwych do bezpośredniego lub pośredniego określenia na podstawie wyników skanowania laserowego, należą: wysokość (pojedynczych drzew i średnia wysokość drzewostanu; wysokość 100 najwyższych drzew – wysokość górna), zwarcie koron, liczba drzew (zagęszczenie), obecność luk i gniazd, a pośrednio także wielkości silnie skorelowane z wymienionymi, np. pierśnica czy zapas drzewostanu (wielkość biomasy). W licznych badaniach zagranicznych i krajowych dokonano już oceny możliwości określania tych cech za pomocą technologii lotniczego skanowania laserowego.

Wysokości drzew, określane na podstawie CHM (ryc. 14.5.1.3), zwane go też wysokościowym modelem koron – WMK, są najczęściej zaniżane. Podobne zjawisko występuje w fotogrametrii i może być objaśnione faktem, iż najwyższe części drzew – wierzchołki – nie odbijają wystarczającej ilości energii, aby sygnał mógł być zauważony przez systemy rejestrujące skanera. Dopiero odbicia z niżej położonych fragmentów koron są na tyle silne, że przekraczają przyjętą wartość progową. Ustawienie progu jest konieczne, aby oddzielić impulsy istotne od ewentualnych zakłóceń (szumów). Znany jest też wygładzający efekt algorytmów interpolacyjnych, zależny od rozdzielczości generowanej powierzchni WMK. Ponieważ stosowane do wyznaczania wysokości drzew i drzewostanów modele NMPT i NMT powstają niekiedy w wyniku oddzielnych procesów pomiarowych, bardzo ważne jest wykonanie odpowiedniej kalibracji wysokościowej danych źródłowych. Najlepsze dane skanowania laserowego, zbierane do budowy NMT, uzyskuje się w okresie zimowym, natomiast do budowy WMK – latem.

Rozdzielczość WMK ma wpływ na liczbę identyfikowanych koron drzew. Trzeba także zauważyć, że wierzchołki drzew, należących np. do IV oraz V klasy biosocjalnej według Krafta, mogą być niewidoczne. Wysokość drzewostanu, rozumiana jako średnia arytmetyczna wysokości drzew, ustalona na podstawie pozostałych drzew, będzie zawyżona. Problem będzie miał znaczenie w drzewostanach o dużym zagęszczeniu. W obecnie

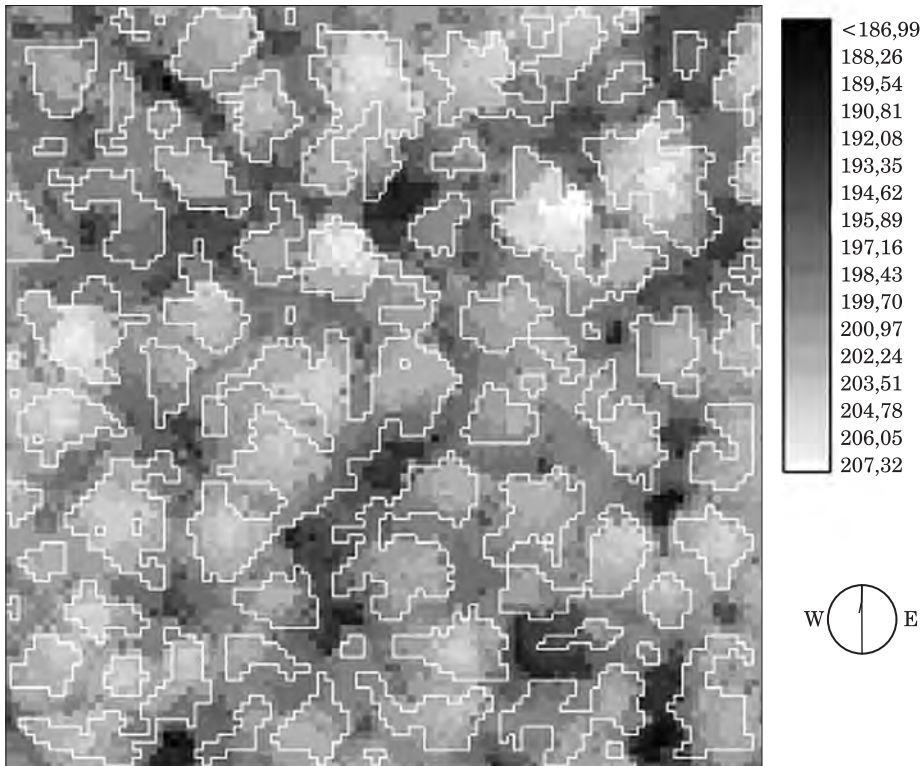


**Ryc. 14.5.1.3.** Profil wysokościowy drzewostanów w Nadleśnictwie Chojna na tle NMPT.

Gradient wysokości: barwa czerwona – najwyższe obiekty, niebieska – najniższe (źródło: ProGea Consulting)

prowadzonych badaniach poszukuje się możliwości poprawy dokładności określania wysokości drzew poprzez uwzględnienie surowych danych, czyli chmur punktów, a nie interpolowanych powierzchni WMK. Precyzyjnego wyjaśnienia wymaga także wpływ różnego rodzaju cech środowiska leśnego na dokładność określania NMT.

Zainteresowanie problemem wyznaczania zasięgów koron drzew (ryc. 14.5.1.4) ma w leśnictwie bardzo duże znaczenie praktyczne, gdyż wielkość korony pozostaje w związku z innymi cechami drzewa, np. wiekiem, wysokością, wielkością masy drewna itp. Struktura wielkości i rozmieszczenie drzew w lesie stanowią przesłanki do określania cech drzewostanów, w tym liczby drzew na jednostce powierzchni oraz zapasu drzewostanu. Metody określania zasięgu koron (segmentacji) uwzględniają przy detekcji i określaniu zasięgu koron parametry dostępne z pomiaru ALS – wysokość drzewa oraz wysokość okapu drzewostanu. Rozwijano też metody wykorzystujące znaną w teledetekcji klasyfikację obiektową (OBIA). Opracowane metody automatycznej segmentacji koron pozwoliły na osiągnięcie lub nawet przewyższenie dokładności uzyskiwanej z bezpośrednich pomiarów



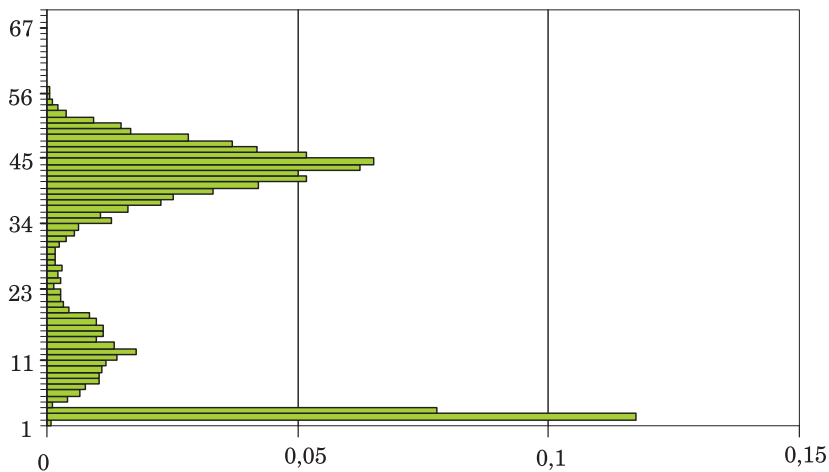
**Ryc. 14.5.1.4.** Zasięgi koron drzew wyznaczone na podstawie danych skanowania laserowego za pomocą automatycznego algorytmu (źródło: Będkowski i in. 2008)

fotogrametrycznych. W generowanych modelach występowały niekiedy nieliczne błędy, wynikające np. z wzajemnego przysłaniania się koron lub niewłaściwej segmentacji koron przez zastosowany algorytm. Bardzo często nie ma też możliwości wyróżnienia drzew rosnących pod innymi drzewami.

Za pomocą danych skanowania laserowego szacowano także inne wielkości dotyczące drzewostanów, np. pierśnicowe pole przekroju (G) oraz zapas (V). Wyznaczano je z dużą dokładnością; niekiedy stwierdzano wręcz, że uzyskane wyniki były lepsze od wyników konwencjonalnych metod naziemnych szacowania tych cech. Różnorodne wielkości opisujące warstwę koron, wyprowadzone na podstawie danych skanowania laserowego, można wykorzystać także do opracowania równań regresji, w których zmiennymi zależnymi są: średnia wysokość drzewostanu, średnia pierśnica, pierśnicowe pole przekroju, miąższość grubizny – oddzielnie dla różnych gatunków wchodzących w skład drzewostanu. Badania wykazują, że takie wielkości, jak objętość (miąższość) pni drzew oraz pierśnicowe pole przekroju drzewostanów są określane znacznie dokładniej dla gatunków iglastych niż liściastych. Zainteresowanie wzbudza także wielkość biomasy znajdującej się pod powierzchnią gruntu. Te wielkości można skutecznie określać za pomocą modeli, które uwzględniają szereg wielkości dostępnych do pomiaru na powierzchni – pierśnicę lub pierśnicę i wysokość. Opracowane modele szacowania ogólnej wielkości biomasy dawały dobre rezultaty niezależnie od typu drzewostanu, czyli składu gatunkowego, wieku itp. Dane ALS wykorzystywane są też do określania objętości koron i pola powierzchni czy wprost parametru LAI (ang. Leaf Area Index), będącego wskaźnikiem kondycji drzew i drzewostanów.

Osobnym kierunkiem badań jest analiza pionowej struktury przestrzennej drzewostanów. Histogramy chmur punktów przedstawiają rozkład punktów odbić impulsów lasera w podziale na poziome warstwy drzewostanu (ryc. 14.5.1.5). Na podstawie oceny kształtów histogramów wykonanych w różnych drzewostanach można stwierdzić, że większość z nich ma wyraźnie zaznaczone dwa lub więcej maksima. Maksimum położone najwyżej (najwyżej od poziomu gruntu = najwyższy numer warstwy) jest prawdopodobnie związane z warstwą koron drzewostanu piętra pierwszego. Drugie wysokie maksimum występuje w warstwach położonych nisko (najczęściej 0,5–1,0 m). To maksimum można wiązać z odbiciem sygnałów od dna lasu – krzewów, roślin runa leśnego. W terenie płaskim odbicie od poziomu gruntu powinna reprezentować warstwa pierwsza. Zaznaczone w części histogramów trzecie maksimum, znajdujące się na poziomie 4,0–5,0 m, można wiązać z maksymalnym zasięgiem warstwy krzewów. Najwyżej położone punkty odbić definiują kres zasięgu górnego drzewostanu. Tę wielkość można wiązać z wysokością najwyższych drzew w drzewostanie. W zestawach danych ALS mogą wystąpić odbicia błędnie zarejestrowane jako skutek przelotu ptaków lub błędu urządzenia rejestrującego.

Badano też związki pomiędzy cechami drzewostanów (przeciętna wysokość, przeciętna pierśnica, wiek oraz zapas grubizny) oraz położeniem gór-



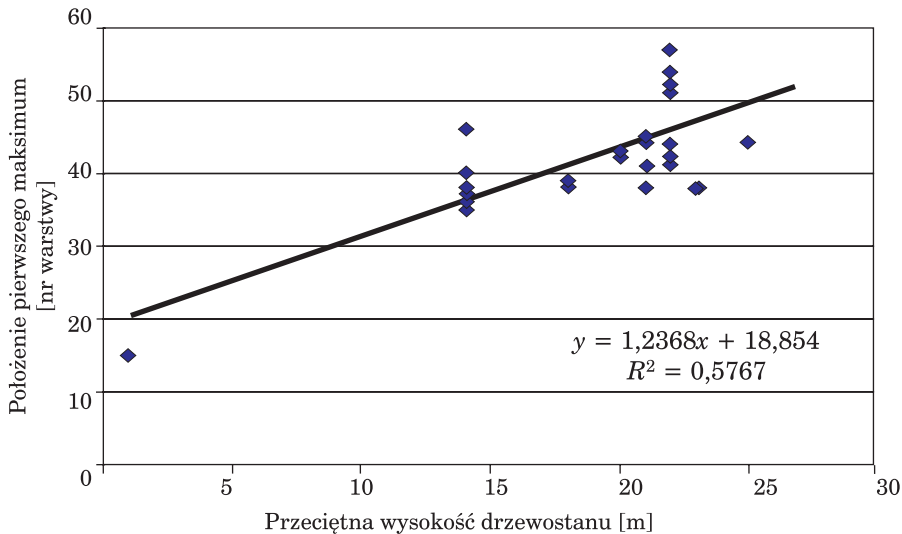
**Ryc. 14.5.1.5.** Histogram rozkładu odbić impulsów skanera w poziomych warstwach w 62-letnim drzewostanie na siedlisku lasu mieszanego. Na osi pionowej podano numer warstwy o grubości  $\Delta h = 0,5$  m (źródło: Będkowski, Stereńczak 2008)

nego maksimum histogramu (ryc. 14.5.1.6). Poszczególne cechy drzewostanów mają umiarkowany wpływ na kształtowanie się analizowanej cechy chmur odbić. Kolejność związków, od najsilniejszego do najsłabszego, jest następująca: przeciętna wysokość drzewostanu, przeciętna pierśnica drzewostanu, zasobność grubizny, wiek.

Niewiele jeszcze można znaleźć prac w literaturze na temat określania prędkości przyrostu drzew i drzewostanów na podstawie ALS. Przyczyną jest stosunkowo młoda technika pomiarowa oraz stosowanie różnych technologicznie skanerów. Pierwsze opublikowane badania wskazują, że zauważalne są już różnice wyników skanowania drzewostanów, wykonywanego w odstępach dwu lat.

Podsumowując, należy zwrócić uwagę na najważniejsze przyczyny dużego zainteresowania leśników lotniczym skanowaniem laserowym i podejmowanych w związku z tym badań nad przydatnością tej techniki w gospodarce leśnej. Są to m.in.:

- **Możliwość precyzyjnego opisu (pomiaru) obiektów przestrzeni leśnej.** Wysokość drzew i drzewostanu, wielkość koron drzew, zwarcie (oraz ażurowość), liczba drzew (zagęszczenie), szczegóły budowy pionowej drzewostanu (piętrowość) stają się cechami, które można opisać dokładniej niż tylko za pomocą określeń słownych lub wyrywkowych pomiarów.
- **Pomiar praktycznie wszystkich drzew z piętra górnego.** Technologia ALS otwiera nowe możliwości detekcji i pomiaru wysokości



**Ryc. 14.5.1.6.** Zależność położenia pierwszego maksimum histogramu od przeciętnej wysokości drzewostanu (źródło: Będkowski, Stereńczak 2008)

i wybranych innych cech (np. szerokości korony, podstawy korony) wszystkich drzew pietra górnego starszych klas drzewostanów gospodarczych. Tym samym istnieją przesłanki do zmiany istniejących metod pomiaru jedynie reprezentacji drzewostanu (kołowa powierzchnia próbną) na metody uwzględniające całą populację drzew w drzewostanie.

- **Szybkość pozyskiwania danych.** Nie ma obecnie innej, równie wydajnej metody. Pod tym względem technika skanowania laserowego jest dużo lepsza od pomiarów terenowych, a także innych metod geomatycznych, nawet pomiarów fotogrametrycznych. Jedna misja ALS może trwać kilkanaście godzin, a zgromadzone w tym czasie wyniki precyzyjnie opisują setki kilometrów kwadratowych terenu. Konkurencją dla tej technologii będzie niebawem radar (InSAR, PolInSAR).
- **Automatyzacja przetwarzania danych.** Olbrzymie zbiory danych mogą być przetworzone wyłącznie za pomocą w pełni automatycznych lub półautomatycznych algorytmów. Automatyzacja sprzyja zapewnieniu obiektywności przy wykonywaniu pomiarów oraz obniża ich koszty.
- **Generowanie tzw. true ortho.** Dane dotyczące powierzchni NMPT mogą być wykorzystane np. do generowania prawdziwych ortofotomap (ang. true ortho). W produkcji ortofotomap uwzględniano dotychczas wyłącznie NMT, co powodowało błędne położenie koron wysokich drzew na obrazie wynikowym. Uwzględnienie wysokości obiektów znajdujących się ponad terenem pozwoli na uzyskanie ortofotomap o dużej dokładności lokalizacji koron drzew czy dachów obiektów.

- **Brak niektórych wad, typowych dla zobrazowań fotograficznych.** Modele pokrycia terenu można przedstawić w dowolnych rzutach, w tym w rzucie ortogonalnym. Przy odpowiednim zaplanowaniu nalotów nie ma na nich cieni rzucanych przez obiekty ani miejsc niedostatecznie oświetlonych. Informacja o wysokości obiektów może być zakodowana barwami lub za pomocą skali szarości. Naloty ALS teoretycznie wykonywać można nawet przy całkowitym braku oświetlenia (Słońca).
- **Integracja geodanych.** Wieloletnie badania prowadzone z wykorzystaniem innych technik, głównie fotogrametrycznych i teledetekcyjnych, udowodniły, że dostępna do pomiaru z powietrza strefa koron drzew może dostarczać wielu informacji o różnych cechach drzewostanów, jakościowych i ilościowych. Forma danych skanowania laserowego (obraz rastrowy) sprzyja ich łączeniu z innymi danymi o sprawdzonej w gospodarce leśnej przydatności, np. z kanałami spektralnymi obrazów wielospektralnych i hiperspektralnych (lotniczych lub satelitarnych), danymi radarowymi, termalnymi i innymi.

### **Zalety i wady techniki skanowania laserowego w kontekście zastosowań leśnych**

(źródło: Będkowski 2006, zmienione)

#### **Zalety**

- Małe uzależnienie od warunków oświetlenia (skanowanie można wykonywać np. przy zachmurzonym niebie, jednak gdy chmury są wysoko).
- Obszary oświetlone promieniami słonecznymi i zacienione są jednakowo „widoczne” dla skanera laserowego.
- Skanowanie laserowe jest aktywną techniką pomiaru, niezależną np. od pory dnia (można wykonywać skanowanie w nocy).
- Promienie laserowe penetrują las aż do poziomu gruntu.
- Dokładne odwzorowanie kształtu i położenia mierzonych obiektów.
- Cyfrowa postać danych sprzyja automatyzacji dalszych opracowań.
- Możliwość pozyskiwania dużej ilości danych w krótkim czasie.
- Możliwość skanowania z różnych platform (samolot, śmigłowiec, satelita, naziemnie).
- Proces przetwarzania danych do odpowiednich układów współrzędnych jest wysoce zautomatyzowany.

#### **Wady**

- Technika jest kosztowna (sprzęt, oprogramowanie, analizy, usługa).
- Brak opracowanych jednolitych standardów dla urzędzeń utrudnia porównanie ich cech.
- Nie ma zaaprobowanej metodyki zastosowania wyników skanowania w inwentaryzacji lasów; technologia pozostaje w sferze badań.

Technika lotniczego skanowania laserowego ma bardzo duży potencjał jako metoda zbierania informacji o drzewostanach, zwłaszcza o warstwie koron. Badania wykonane za pomocą technologii skanowania laserowego udowodniły, że informacje uzyskiwane w wyniku analizy warstwy koron mogą być z powodzeniem wykorzystywane do pozyskiwania danych o cechach taksacyjnych drzewostanów i inwentaryzacji zapasu drewna. Dalszemu rozwojowi tej techniki sprzyjać będą wysoki stopień automatyzacji pozyskiwania i przetwarzania danych oraz ich numeryczna postać. Podaż nowych rozwiązań technologicznych na rynku usługodawców będzie powodować duże obniżenie dziś jeszcze stosunkowo wysokich kosztów. Warunkiem powszechnego stosowania technologii ALS jest realizacja dużych projektów (np. obejmujących całe województwa) z zakresu generowania precyzyjnych modeli terenu (NMT i NMPT) śladem innych krajów europejskich.

### 14.5.1.3. Projekty ALS do celów leśnych realizowane w Polsce

Pierwsze projekty pilotowe, które dały początek badaniom nad wykorzystaniem ALS w zakresie leśnictwa czy monitoringu roślinności drzewiastej, realizowano już od 2004 r. na wydziałach leśnych AR w Krakowie (obecnie UR) oraz na SGGW w Warszawie. Inne, później realizowane projekty dla celów inwentaryzacji lub monitoringu obszarów leśnych dotyczyły obszarów nadleśnictw: Chojna (RDLP Szczecin), Milicz, Świeradów i Szklarska Poręba (RDLP Wrocław), Niepołomice (RDLP Kraków), Żednia (RDLP Białystok) oraz terenu Karkonoskiego i częściowo Tatrzańskiego Parku Narodowego.

## 14.5.2. Naziemny skaning laserowy

dr inż. PIOTR WĘŻYK – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie,  
Wydział Leśny

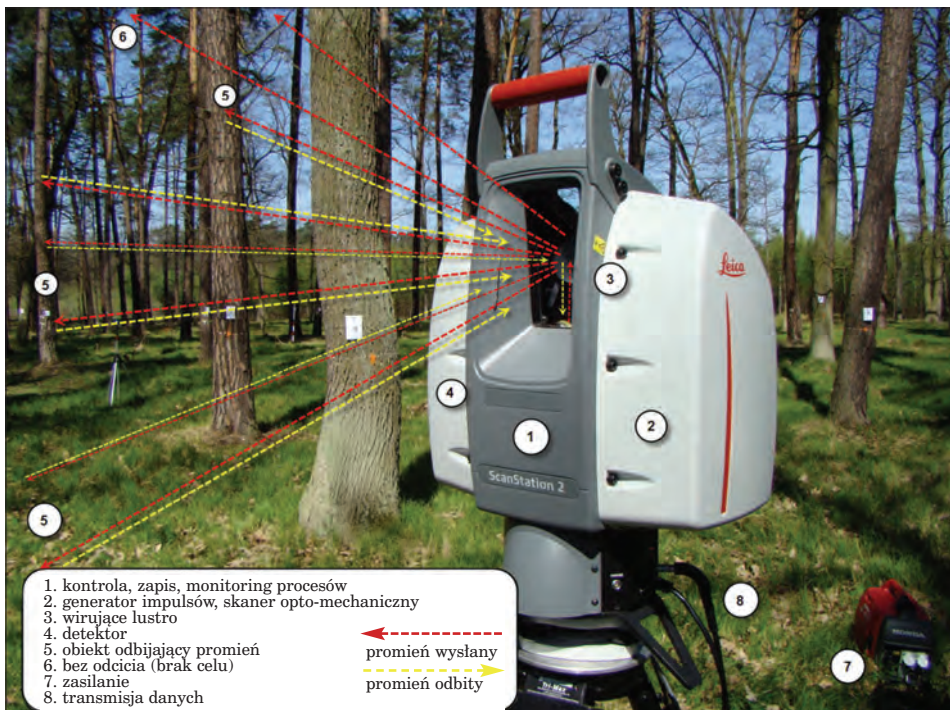
### 14.5.2.1. Wprowadzenie do technologii naziemnego skaningu laserowego

Skaning laserowy, znany także pod nazwą LIDAR (ang. Light Detection and Ranging), zalicza się do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, wykorzystujących wysyłane przez urządzenie promieniowanie elektromagnetyczne. Naziemny (terenowy) skaning laserowy (ang. Terrestrial Laser Scanning – TLS) dostarcza chmury punktów pomiarowych o współrzędnych X, Y, Z. System TLS składa się zazwyczaj z nadajnika, tj. modu-

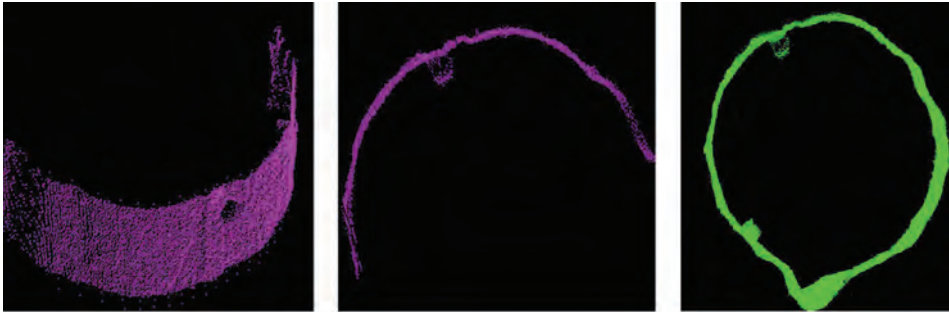
lu generującego światło lasera (diody), systemu wirujących luster, zadaniem których jest równomierne odchylenie kątowe (pionowe i poziome) wiązki lasera i jej rozrzucenie po powierzchni obiektów, teleskopu optycznego, skupiającego powracające odbite promieniowanie, oraz detektora, zamieniającego energię światła na impuls zapisywany w module rejestracji (HDD, karta pamięci) i kontroli (ryc. 14.5.2.1). Zarówno nadajnik, jak i detektor podlegają jednostce kontrolującej, sterowanej mikroprocesorem. Urządzenie obraca się precyzyjnie wokół własnej osi o ustalony kąt, gwarantujący uzyskanie założonej rozdzielczości. Skaner montowany jest na stabilnej podstawie, np. na statywie geodezyjnym.

Działanie naziemnego skanera laserowego polega na pomiarze odległości oraz kąta pomiędzy urządzeniem a badanym obiektem (celem), które pozwalają na wyznaczenie współrzędnych  $X, Y, Z$ , tworzących tzw. chmurę punktów. Reprezentują one powierzchnię obiektu (np. pień) odbijającego promieniowanie lasera (ryc. 14.5.2.2).

Część plamki lasera padającej na krawędź obiektu (np. gałęzi) może nie być całkowicie odbita, odbicie następuje dopiero od dalszych celów. Mówimy wtedy o pierwszym lub ostatnim bądź też kolejnych odbiciach (echach) sygna-

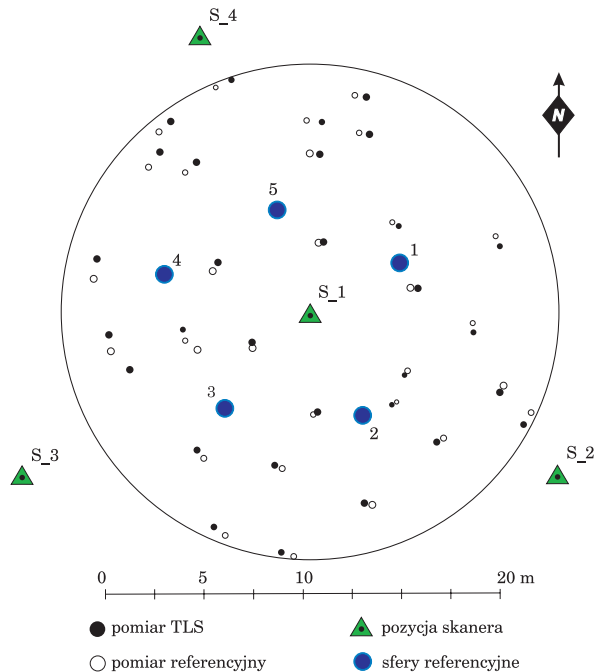


Ryc. 14.5.2.1. Schemat działania naziemnego skanera laserowego TLS (fot. P. Wężyk)



**Ryc. 14.5.2.2.** Widok chmury punktów TLS.  
 Od lewej: rzut izometryczny 2,5D fragmentu pnia dębu, przekrój poprzeczny pnia z chmury punktów (jedno stanowisko) oraz przekrój przez cztery połączone ze sobą skany (źródło: P. Wężyk)

tu. Skanowanie drzewostanu przeprowadza się zazwyczaj w trybie jednostanowiskowym (np. ze środka powierzchni kołowej) lub wielostanowiskowym (np. z czterech lub więcej stanowisk; ryc. 14.5.2.3), co wydłuża oczywiście czas pracy w terenie, ale zapewnia możliwość pozyskania danych reprezentujących w pełni pnie drzew (3D), a nie tylko fragmenty płaszczyzny walca obserwowane z jednej pozycji (ryc. 14.5.2.2). Podczas skanowania stosuje się



**Ryc. 14.5.2.3.**  
 Schemat wielostanowiskowego skanowania kołowej powierzchni próbnej

najczęściej lokalny układ współrzędnych (0, 0, 0), gdyż zdecydowana większość skanerów naziemnych nie ma zintegrowanego odbiornika GNSS (GPS) ani też elektronicznego kompasu. Z tego względu w celu połączenia ze sobą chmur punktów z poszczególnych stanowisk stosuje się np. specjalne kule referencyjne o znanym promieniu i wysokim albedo (ryc. 14.5.2.4). Identyfikowalne na obrazach (np. min. 3 z 5 kul), pozwalają na uzyskanie reprezentacji 3D drzewostanu, jego wizualizację i dalsze analizy, np. pasowanie figur geometrycznych. W niektórych rozwiązaniach w celu nadania georeferencji należy określić współrzędne X, Y, Z lustra skanera bądź innych identyfikowalnych w chmurze obiektów (np. tarcz). Odległość obiektów od skanera decyduje także o wielkości plamki lasera padającej na obiekt, a tym samym o rzeczywistej dokładności skanowania. Skaner poza kątem i odległością rejestruje także wartość energii, tzw. intensywność odbitego sygnału



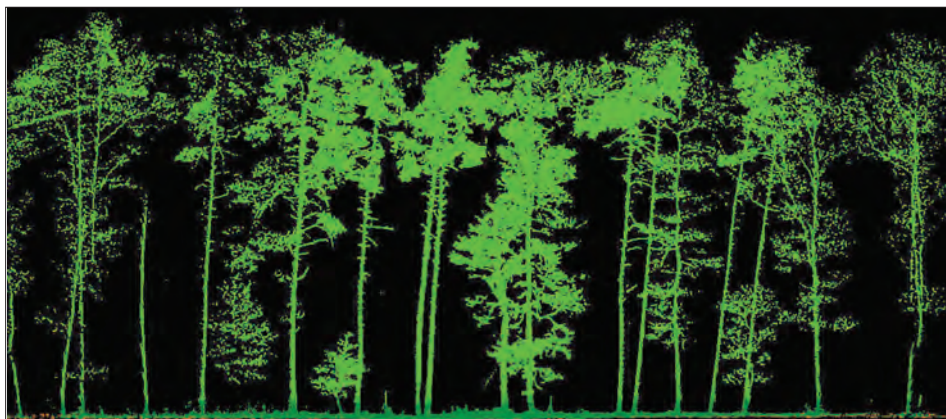
**Ryc. 14.5.2.4.** Skanowanie kołowej powierzchni próbnej. Skaner FARO LS 880 na stanowisku S\_1 centralnym; widoczne ponumerowane kule referencyjne (fot. P. Wężyk)



**Ryc. 14.5.2.5.** Obraz planarny (2D) chmury punktów TLS (360°). Drzewostan So-Db w Puszczy Niepołomickiej (skaner TLS FARO LS 880, stanowisko centralne S\_1, pow. badawcza TR1), (źródło: P. Wężyk)

tu. Może być wykorzystany do wizualizacji chmury punktów w postaci tzw. widoku planarnego 2D (ryc. 14.5.2.5), a w przyszłości wspomagać klasyfikację chmury punktów (ryc. 14.5.2.6). Dodatkowo, stosując kamerę cyfrową, można chmurze punktów nadać wartość RGB pikseli z matrycy aparatu i uzyskać realistyczny obraz 2D lub 3D (ryc. 14.5.2.7).

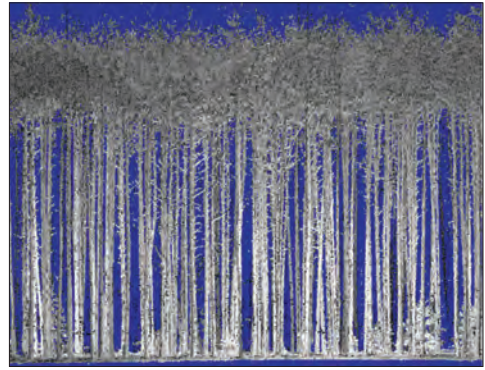
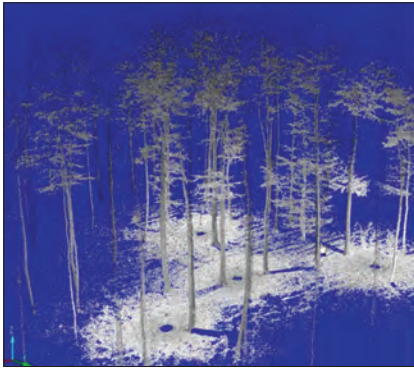
Specjalistyczne oprogramowanie stosowane do przetwarzania chmury punktów TLS, poza jej wizualizacją w różnych rzutach (znane z oprogramowania CAD; ryc. 14.5.2.8), umożliwia dokonanie także szeregu operacji związanych z pomiarami bezpośrednimi i obliczeniami, np. objętości (modelowanie chmury do figur geometrycznych i powierzchni).



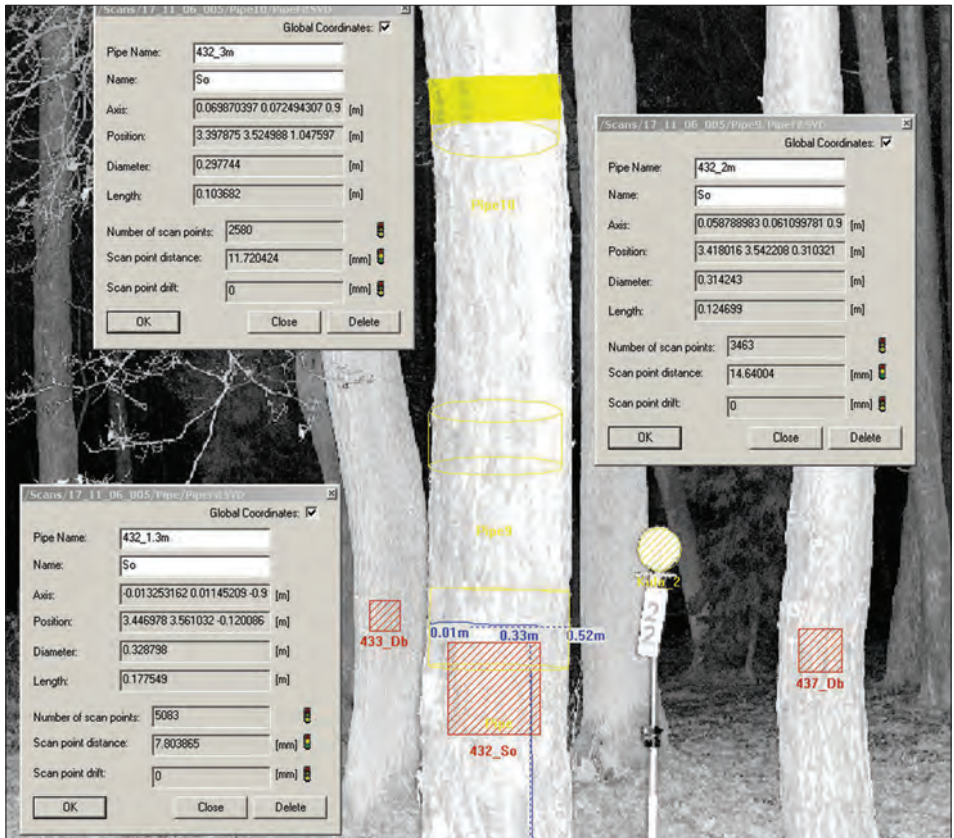
**Ryc. 14.5.2.6.** Przekrój przez sklasyfikowaną chmurę punktów TLS. Drzewostan Db-So w Puszczy Niepołomickiej (skaner TLS Leica ScanStation2 1, stanowisko centralne, pow. badawcza TR2), (źródło: P. Wężyk)



**Ryc. 14.5.2.7.** Obraz chmury punktów w opcji „color scan”. Puszcza Niepołomicka, skaner TLS FARO LS 880 + kamera NIKON D200, pow. badawcza TR2 (źródło: P. Wężyk)



Ryc. 14.5.2.8. Chmura punktów TLS. Z lewej: widok izometryczny drzewostanu Bk; z prawej: widok z boku (2D) drzewostanu So z podszytem Św (źródło: P. Wężyk)

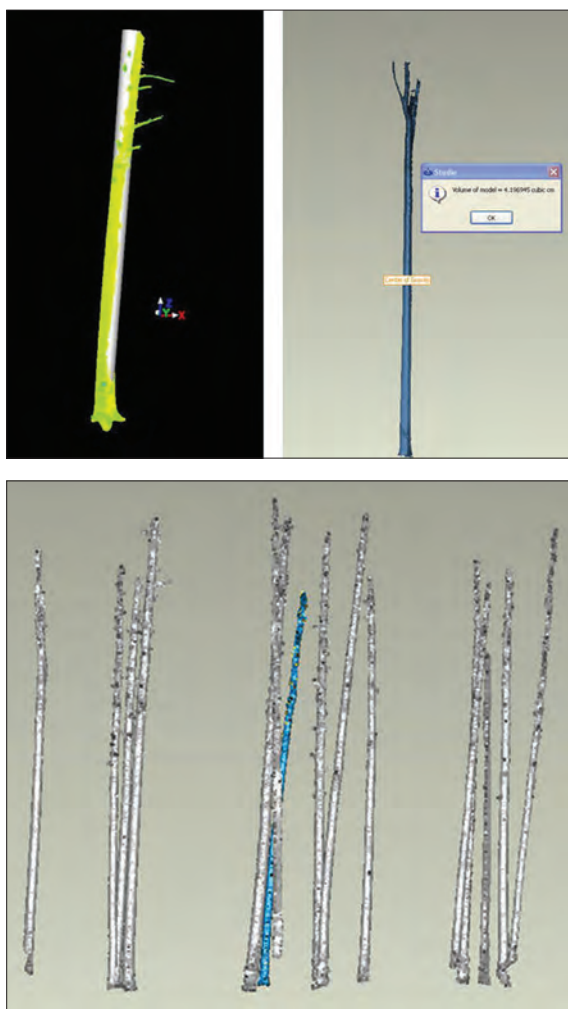


Ryc. 14.5.2.9. Pomiary średnicy pnia drzewa. Pomiary średnicy pnia sosny na wysokości 1,3 m metodą manualną (PIXEL) oraz półautomatyczne wpasowanie walca (PIPE 1,3 m, 2,0 oraz 3,0 m). Puszcza Niepołomicka, pow. doświadczalna TR1 (źródło: P. Wężyk)

Podstawową czynnością operatora oprogramowania jest np. pomiar pierśnicy czy wysokości drzewa, co może być dokonywane w programie FARO Scene albo w pełni manualnie (tzw. metoda PIXEL), bądź też przy wspomaganiu komputera (pasowanie np. figury walca na wycinek pnia w celu określenia średnicy), (ryc. 14.5.2.9).

Możliwości modelowania 3D chmury punktów pomiarowych TLS są bardzo duże i pozwalają na generowanie powierzchni (Geomagic; ryc. 14.5.2.10) czy też modelowanie poszczególnych fragmentów pnia, wpasowując w nie walce lub ścięte stożki (Leica Cyclon).

Skanery TLS były w ostatnich 10 latach rozwijane niejako w tle technologii skaningu lotniczego (ang. Airborne Laser Scanning). Jedną z przyczyn był fakt, iż potencjalni klienci nie byli w stanie wydać więcej środków finansowych niż na sprawdzone instrumenty geodezyjne (np. Total Station czy tachimetr skanujący) lub nie mieli odpowiedniego personelu do obsługi. Pierwsze instrumenty powstały pod koniec lat 90. XX wieku (Zoller-&Fröhlich, skaner Scene Modeller), a pionierskie wdrożenia realizowały firmy korzystające już wcześniej z lotniczego skaningu, zatrudniające przeszkolony personel. W technologiach ALS przeważa typ laserów pulsacyjnych. Dla systemów TLS nowe otwarcie rynku nastąpiło w momencie wprowadzenia tzw. skanerów fazowych (krót-



**Ryc. 14.5.2.10.**  
*Modelowanie chmury punktów TLS. U góry od lewej: wymodelowany pień sosny (Leica Cyclon) i kłoda buka z określoną miąższością. U dołu: modele 3D pni sosen na powierzchni kołowej (Geomagic)*

kiego zasięgu). Sprzedaż skanerów TLS szacuje się jednak wciąż tylko na ok. 1/10 rynku urządzeń ALS. Rozwój oprogramowania i rozwiązania technologiczne powodują, że gwałtownie rozwija się rynek usług skanowania w trybie dynamicznym, opartego na skanerach TLS, które – w przeciwieństwie do skanerów pracujących w trybie statycznym – wymagają integracji z systemami IMU (ang. Inertial Measurement Unit), czyli zespołem żyroskopów i akcelerometrów (ang. Inertial Navigation System – INS) oraz z precyzyjnym odbiornikiem dGPS i często – w warunkach podokapowych – z przyrządami do pomiaru odległości. Montowane są (dwa – trzy skanery) na specjalnych platformach ruchomych (półciężarówki) i integrowane z kamerami cyfrowymi bądź wideo i noszą nazwę MMS (ang. Mobile Mapping System).

Podstawowa klasyfikacja skanerów TLS wynika ze stosowanej technologii pomiaru odległości. Pierwsza grupa urządzeń to tzw. skanery pulsacyjne, znane też jako TOF (ang. time-of-flight). Pomiar odległości odbywa się poprzez określenie czasu ( $\Delta t$ ), jaki upływa od momentu wysłania promienia lasera przez skaner do jego powrotu, po odbiciu się od obiektu. Promień lasera porusza się z prędkością światła ( $c$ ), wynoszącą 299 792 km/s, dlatego odległość ( $L$ ) skanera od obiektu wyliczamy na podstawie zależności (wzór 1):

$$L = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad [1]$$

Dokładność określenia odległości zależy więc od precyzji urządzenia do pomiaru czasu wędrówki wiązki lasera, stąd dokładność skanerów TOF waha się w granicach 1 ÷ 6 mm.

Drugą grupę stanowią skanery tzw. fali ciągłej (CW), zwane też potocznie **skanerami fazowymi**. W tego typu systemach sygnał lasera jest modulowany odpowiednią funkcją sinusoidalną bądź wykładniczą. Laser emituje światło w sposób ciągły, modulując średni poziom sygnału. Przesunięcie fazowe zdefiniować można jako różnicę pomiędzy fazami fali wyrażonymi w stopniach, jednostce czasu lub częściach okresu ( $T$ ). Skaner wysyła najczęściej fale o różnych długościach (zasięg skanera równy jest połowie maksymalnej długości fali), które odbite od obiektu powracają do detektora skanera z określonym opóźnieniem czasowym ( $t_L$ ). Korzystając z odpowiednich formuł (wzór 2), bazujących na proporcjonalnej zależności fazy fali ( $\phi$ ) do opóźnienia czasowego i odwrotnej do częstotliwości ( $f$ ), można określić precyzyjnie odległość ( $L$ ):

$$L = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{c}{f} \phi \quad [2]$$

Zaletą skanerów fazowych jest częstotliwość (liczba wysyłanych impulsów) skanowania wielokrotnie przewyższająca skanery TOF. Wadą może być jednak częste pojawianie się zakłóceń, czyli punktów o lokalizacji spoza maksymalnego zasięgu skanera, którym przypisywana jest błędna od-

ległość. Usuwa się je, wykorzystując różne algorytmy filtracji (np. niskiej wartości intensywności). Wybrane skanery CW, wykorzystując modulowanie fali, osiągają dokładności rzędu  $1 \div 3$  mm.

Trzecią niewielką grupę stanowią tzw. lasery triangulacyjne, które zalicza się jednocześnie do urządzeń bardzo krótkiego zasięgu (maks. do ok. 3 m). Ich zastosowanie znane jest od 30 lat (Kanada) i ogranicza się do pomiarów (mm) dla przemysłu precyzyjnego (kopiowanie wzorców, design) bądź medycyny. Przykładem takich skanerów są: Konica Minolta VIVID (dokładność pomiarowa 0,05 mm) lub Callidius CT 900. Dokonują one pomiarów odległości i kąta na zasadzie obliczeń triangulacyjnych odbitej od obiektu wiązki lasera, padającej na poszczególne piksele matrycy kamery cyfrowej, obserwującej obiekt. Maksymalny zasięg pracy to 2,5 m (Konica) lub 1,5 m (Callidius). Zastosowanie tego typu skanerów w leśnictwie jest dość ograniczone ze względu na ich zasięg i sprowadza się do skanowania szyszek, nasion, aparatu asymilacyjnego czy wycinków kory drzew.

Przyjmując klasyfikację odległości skanowania, możemy wyróżnić kolejną grupę, którą stanowią skanery krótkiego zasięgu ( $1 \div 150$  m). Pierwsze wykorzystanie skanerów TLS w leśnictwie dotyczyło właśnie urządzeń tego typu, produkowanych przez firmę Zoller&Fröhlich (ZF). Są to urządzenia wykorzystujące technologię CW (fazowego przesunięcia). Skaner Imager 5006 (ZF) charakteryzuje się zasięgiem maksymalnym do 79 m (kąty skanowania:  $360^\circ$  poziomy,  $310^\circ$  pionowy) oraz dokładnością  $\pm 6$  mm na 50 m odległości. Niezmiernie wysoka częstotliwość skanowania dochodzi do 500 000 pkt/s, co zapewnia szybkie skanowanie i ma praktyczne przełożenie w pracach na powierzchniach kołowych (1 stanowisko ok. 3 min). Ten sam skaner sprzedawany jest również jako model HDS6000 przez firmę Leica. Zapis danych następuje do wewnętrznego dysku twardego (HDD) lub poprzez Ethernet do zewnętrznego laptopa. Wprowadzanie ustawień możliwe jest poprzez urządzenia typu PDA (Bluetooth). Inne, podobne rozwiązanie oferuje skaner firmy Faro LS 880 (wcześniejsza nazwa IQSun 880), który zostanie omówiony szczegółowo w dalszej części rozdziału. Ten typ skanera o zasięgu 76 m wykorzystywany jest najczęściej w projektach z zakresu leśnictwa w Polsce. Następca tego modelu, Faro Photon 120 (ryc. 14.5.2.11), dzięki zastosowaniu lasera o zwiększonej długości fali powiększył zasięg skanowania do 153 m wewnątrz pomieszczeń i do 120 m w warunkach terenowych, przy jednoczesnym zwiększeniu częstotliwości do 960 000 pkt/s. Firma Faro oferuje specjalny stełaż (plecak) do przenoszenia urządzenia w terenie (np. w lesie pomiędzy powierzchniami kołowymi), a także znacząco zmodyfikowała zasilanie (zintegrowane ze statywem), redukując w ten sposób okablowanie i wagę akumulatorów. Istnieje także możliwość wprowadzania ustawień do skanera poprzez PDA oraz Ethernet. Skaner Faro ma możliwość integracji z kamerami cyfrowymi (lustrzanki). Inne urządzenia zaliczane do tej grupy to Surphaser 25HSX (Basis Software Inc.) o zasięgu 38,5 m i kątach obrazowania  $360^\circ/270^\circ$  przy 190 000 pkt/s. Jedynym typem urządzeń wykorzystującym



**Ryc. 14.5.2.11.** Skanery TLS na poligonie badawczym w Puszczy Niepołomickiej i w Tatrach. U góry od lewej: FARO Photon 80, Topcon GLS-1000; u dołu od lewej: Leica ScanStation2 oraz Riegl LPM-321 (źródło: P. Wężyk)

technologie pulsacyjną (TOF) w tej kategorii zasięgu jest Callidius CP3200, sprzedawany także pod marką Trimble, o dokładności 5 mm/50 m. Nowy model Callidius CPW8800 jest hybrydą technologii TOF oraz fazowego przesunięcia; osiąga dokładność 2 mm/30 m.

W sektorze skanerów średniego zasięgu (1 ÷ 300 m) dominują skanery pulsacyjne TOF znanych producentów urządzeń geodezyjnych, takich jak: Leica, Trimble czy Topcon. Skaner firmy Cyrax 2400 został zmodyfikowany przez Leica i sprzedawany jest jako modele HDS3000 oraz ScanStation2 (ryc. 14.5.2.11) o zasięgu do 300 m przy albedo 90% i częstotliwości do 50 000 pkt/s oraz dokładności 4 mm/50 m i zastosowaniu zielonego światła lasera (wbudowana kamera cyfrowa 3MPix). Niezmiernie precyzyjny pomiar do 2 mm (gęstość punktów siatki nawet do 1 mm) oraz oprogramowanie Leica Cyclon pozwalają na zarządzanie chmurami punktów w wewnętrznej bazie danych oraz pasowanie skanów na obiekty 3D lub też na specjalne tarcze w celu nadania georeferencji. Niestety, precyzja pomiaru niesie ze sobą dłuższy czas skanowania powierzchni kołowej (powyżej 3 godz. jedno stanowisko, powierzchnia kołowa 500 m<sup>2</sup>, zasięg 360°/270°). Testy przeprowadzone w Puszczy Niepołomickiej w 2009 r. wskazują na możliwość wykorzystania tego skanera do określania liczby drzew w drzewostanach starszych klas wieku i precyzyjnego modelowania wycinków pni na wysokości pierśnicy.

Inne marki skanerów w tej grupie to: Trimble GX 3D (dawny Mensi GS100), skanujący obszar 360°/60° z dokładnością 3 ÷ 8 mm przy częstotliwości 5000 pkt/s na dystansie maksymalnym do 300 m. Inny skaner GLS1000 firmy Topcon (ryc. 14.5.2.11) integruje w sobie technologię TOF oraz CW i charakteryzuje się zasięgiem do 330 m dla obiektów o albedo 90% lub co najmniej 150 m o albedo 18%. Obszar skanowania nie jest jednak zbyt imponujący – 360°/70°, a przy częstotliwości 3000 pkt/s skanowanie powierzchni kołowej z jednego stanowiska trwa około 3 godz. Dokładność pomiaru wynosi 4 mm/150 m. Zapis danych odbywa się na kartę pamięci SD. Urządzenie ma zintegrowaną kamerę 2 MPix oraz wbudowane akumulatory. Całość obsługiwana jest poprzez interfejs zintegrowany z obudową, co czyni ten skaner praktycznym w warunkach leśnych. Nie można jednak w pełni wykorzystać zasięgu wewnątrz drzewostanów z podszycem, a częstotliwość skanowania jest stosunkowo niska, co wykazały wstępne testy na poligonie badawczym w Puszczy Niepołomickiej. Zastosowanie tego skanera w leśnictwie z pełnym wykorzystaniem zasięgu powinno się koncentrować na kartowaniu granicy rolno-leśnej lub przebiegu zrębów i linii oddziałowych (np. wizur), a także inwentaryzacji infrastruktury (wieże ppoż. itp.).

Znanym skanerem dalekiego zasięgu (300 ÷ 6000 m) jest ILRIS-3D firmy Optech o polu widzenia 40° × 40° i częstotliwości 2000 pkt/s. Choć te wartości nie wydają się szczególnie wysokie, urządzenie potrafi określać lokalizacje obiektów z dokładnością do 1 cm przy odległości do 1000 m. Skaner ma wbudowaną kamerę cyfrową 6 MPix i wyposażony jest w uchyl-

ną podstawę (model ILRIS 36D), co umożliwia skanowanie np. wierzchołków wysokich drzew.

Innym przykładem bardzo udanych skanerów dalekiego zasięgu, często stosowanych w leśnictwie europejskim, są urządzenia firmy Riegl z serii LMS: 210ii, Z390i, Z420i oraz Z620 o maksymalnym zasięgu odpowiednio: 650, 400, 1000 oraz 2000 m. Ich dokładność wynosi  $4 \div 15$  mm/50 m przy kątach skanowania  $360^\circ/80^\circ$ . W celu skanowania wysokich drzew czy budynków stosuje się uchylną konstrukcję (dlatego skanery te zalicza się do hybrydowych w klasyfikacji pola widzenia). Daleki zasięg wymaga stosunkowo niewysokich częstotliwości skanowania:  $8000 \div 12\ 000$  pkt/s. Skanery mają możliwość zintegrowania kamery, np. Nikon D300.

Niezmiernie obiecujący dla warunków drzewostanowych wydaje się skaner VZ-400 (Riegl), który rozwiązaniami technologicznymi przypomina skaner lotniczy, a to ze względu na możliwość digitalizacji całego przebiegu odbitej przez obiekty fali (FW), a nie tylko pierwszego lub ostatniego odbicia. Ma to ogromne znaczenie w zastosowaniach tego urządzenia przy skanowaniu drzewostanu z gęstym podszytem. Zasięg tego skanera to maksymalnie 500 m, a częstotliwość –  $125\ 000$  pkt/s. Urządzenie jako nieliczne ma wbudowany odbiornik GPS (typu L-1) oraz może być integrowane z aparatami cyfrowymi Nikon (np. D 700).

Inny skaner, LPM-321 firmy Riegl (ryc. 14.5.2.11), wyróżnia się maksymalnym zasięgiem aż 6000 m przy założeniu odpowiedniego albedo obiektów oraz warunków oświetleniowych i bardzo niskiej częstotliwości skanowania (9 Hz). Dokładność pomiaru (odległości) wynosi 2,5 cm, a maksymalna częstotliwość to  $1000$  pkt/s. Skaner wykorzystuje możliwość digitalizacji pełnej fali (FW), co zapewnia rejestrację  $1 \div 3$  odbić od obiektów (np. w drzewostanie). Praktyczne zastosowanie tego urządzenia w leśnictwie może dotyczyć precyzyjnych pomiarów granicy rolno-leśnej na długich odcinkach bądź też obrazowania form terenowych (np. skał) z dużej odległości. Testy przeprowadzone w Tatrach w 2009 r. dowiodły możliwości stosowania tego urządzenia w kartowaniu struktury drzewostanów przy górnej granicy lasu oraz obszarów lawinowych.

Klasyfikację skanerów TLS oprócz też można na kryterium **pola skanowania** (FOV; skanery panoramiczne, hybrydowe oraz typu camera-like view), **metody odchylenia** wiązki lasera (zwierciadła galwaniczne, rotujące eliptyczne lustro), **częstotliwości pracy** (od 9 do 960 kHz), **rozdzielczości przestrzennej** (liczby punktów pomiarowych uzyskanych w skanowanym polu operacyjnym), **integracji z innymi urządzeniami** (kamera cyfrowa, elektroniczna busola, GPS), **zapisu danych** (przenośne komputery, wewnętrzne HDD lub karty pamięci), **zakresu spektralnego lasera** (NIR 785 mm, Green 565 mm) czy też **zasilania** (akumulatory zewnętrzne lub zintegrowane z urządzeniem, agregaty prądowórcze).

### 14.5.2.2. Zastosowania TLS w leśnictwie

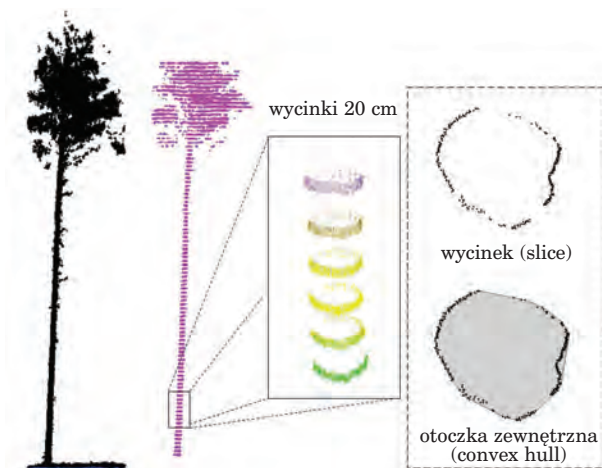
Wykorzystanie skanera naziemnego TLS w leśnictwie dotyczy głównie określania (pomiaru manualnego i automatycznego) wybranych cech takacyjnych i innych parametrów drzew lub całych drzewostanów. Ze względu na geodezyjny (pomiarowy) charakter danych (chmury punktów TLS) ich wykorzystanie w leśnictwie często sprowadza się do bezpośrednich pomiarów:

- lokalizacji pni w przyjętym układzie odniesienia na podstawie pomiaru biegunowego (jedno stanowisko skanera) bądź analizy wycinków chmury punktów (wiele stanowisk);
- określenia liczby drzew w drzewostanie (zagęszczenie, odległości pomiędzy pniami);
- wysokości wierzchołka drzewa oraz długości poszczególnych odcinków pnia;
- długości, szerokości, zasięgu, kształtu, powierzchni 3D oraz objętości korony drzewa;
- zwarcia koron drzew wyrażonego w skali 1–100% oraz indeksu LAI;
- średnicy pnia (np. pierśnicy) oraz konarów na wybranych wysokościach od gruntu;
- pierśnicowego pola przekroju drzewa (g) oraz drzewostanu (G) na podstawie wycinków chmury punktów z wysokości 1,3 m nad gruntem;
- kątów nasady gałęzi, zbieżności, krzywizny oraz liczby kształtu pnia;
- wysokości i zwarcia podrostu i podszytu, a także procentu pokrycia roślinnością;
- drewna martwego (pniaki, kłody, gałęzie) – długości i średnicy;
- długości i wysokości stosów i mygł oraz przestrzeni niewypełnionych;
- inwentaryzacyjnych szkód huraganowych bądź pożarowych;
- przebiegu granicy rolno-leśnej oraz gniazd, upraw, linii podziału powierzchniowego.

Wyniki pomiarów oraz modelowanie 3D chmury punktów TLS w specjalistycznym oprogramowaniu pozwalają na pośrednie określenie:

- miąższości pnia (jego wycinków lub wirtualny pomiar sekcyjny);
- jakości drewna poprzez analizę obrazu intensywności lub np. pomiar kąta rozwarcia gałęzi, występowania chorób bądź uszkodzeń drewna;
- detekcji podszytu, zagrożenia pożarowego, występowania odnowienia naturalnego;
- modelowania korowiny (określanie gatunku drzewa);
- struktury przestrzennej, pionowego profilu koncentracji biomasy, indeksów przestrzennych, czyli tzw. vokseli – pikseli 3D;
- infrastruktury w lesie (mosty, przepusty, drogi, wieże ppoż., budynki), a także na przeprowadzenie:
- inwentaryzacji drzew pomnikowych, pomników przyrody nieożywionej;
- generowania lokalnych numerycznych modeli terenu (NMT);
- wizualizacji 3D na potrzeby PR i ochrony przyrody.

Ponadto dane ze skanera TLS są wykorzystywane w generowaniu wirtualnych obrazów drzewostanu do treningu operatorów harwesterów na specjalnych symulatorach. Skanery montowane są też na maszynach zrywkowych oraz w tartakach w celu pomiaru kłód drzew na potrzeby komputerów sterujących procesem produkcji (sortymentacja). Niektóre cechy, takie jak gatunek drzewa bądź uszkodzenia pnia, wciąż jednak wymagają wiedzy eksperckiej operatora oraz manualnych pomiarów czy interpretacji obrazu. Część z tych cech i parametrów (np. pierśnica, liczba drzew, wysokość drzewa) jest możliwa do określenia na drodze zautomatyzowanych analiz przetwarzania chmury TLS. Jedną z metod automatycznego pomiaru pierśnicy drzewa jest poszukiwanie skupisk punktów tworzących klastry na wycinkach chmury punktów generowanych w płaszczyźnie równoległej do gruntu na określonej wysokości (1,3 m). Często w tym celu wykorzystywana jest też transformacja Hougha wpasowania okręgu w zgrupowanie wykrytych punktów poddanych rasteryzacji. Inną metodą jest algorytm generujący otoczkę wypukłą na 4-centymetrowej grubości wycinku selekcyjonowanym z chmury punktów TLS równoległe do przebiegu generowanej powierzchni gruntu (NMT). Algorytm ten pozwala na uzyskanie precyzyjnych wartości pierśnicowego pola przekroju pnia, a tym samym drzewostanu na podstawie analizy drzew na kołowej powierzchni próbnej (ryc. 14.5.2.12). Chmury punktów TLS, reprezentujące pień drzewa, mogą być modelowane w kierunku wpasowania na nie figur geometrycznych (walca, ściętego stożka). Wykonywane są też na nich kolejne procesy (algorytmy), określające średnice pnia na zadanej wysokości czy podstawy korony i wysokości drzewa (wzory na figury obrotowe), jak również detekcje gatunku drzewa (wartości intensywności bądź RGB; ryc. 14.5.2.13). Dokładność określania średnicy zależy od wielu czynników, m.in. od samego skanera, rozdzielczości i grubości pni. Badania wielu au-



**Ryc. 14.5.2.12.**  
*Automatyzacja pomiaru pola przekroju pnia na różnych wysokościach. Od lewej: chmura punktów (sosna), wycinki o grubościach 20 cm i pole przekroju jako otoczka wypukła (źródło: P. Tompański)*

**Ryc. 14.5.2.13.**  
 Obrazy  
 intensywności 2D  
 wycinków pni  
 poszczególnych  
 gatunków drzew  
 (skaner  
 FARO LS880),  
 (źródło: P. Węzyk)



torów wskazują, że kształtuje się ona w granicach  $0,5 \div 1,5$  cm. Wysokość drzew odczytywana w chmurze punktów TLS obarczona bywa błędem kilku procent z powodu przesłaniania partii wierzchołkowych przez aparat asymilacyjny drzewa. Problemy te można przewyżczać, stosując wiele stanowisk skanera oraz modelując brakujące fragmenty pni przy założeniu ich odpowiedniej regularności (np. ściętego stożka). Skanowanie w przypadku drzewostanów liściastych należy prowadzić w okresie, kiedy drzewa są całkowicie pozbawione liści (przy braku śniegu w koronie). Zwykle wysokość drzewa bywa zaniżona o kilkanaście do kilkudziesięciu centymetrów. Trudności w określeniu błędu bezwzględnego powoduje brak odpowiedniej referencji, gdyż pomiary naziemne nie są pozbawione subiektywizmu i błędów operatora oraz samego wysokościomierza.

## 14.6. Specyfika fotogrametrii leśnej

dr hab. inż. KRZYSZTOF BĘDKOWSKI, prof. SGGW  
 – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Leśny,  
 Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa

Sposób odwzorowania lasów na zdjęciach lotniczych jest uzależniony od wielu czynników natury przyrodniczej i technicznej, a wykonawstwo zdjęć lotniczych na potrzeby leśnictwa jest uważane za trudne. Leśnictwo korzysta ze specjalnie na jego potrzeby wykonywanych zobrazowań; materiały pozyskane do innych celów najczęściej są mało przydatne.

Czynniki przyrodnicze, takie jak np. charakter zbiorowisk roślinnych (skład gatunkowy, formy zmieszania, budowa przestrzenna, różnorodność kształtów, stan zdrowotny) oraz pora sezonu wegetacyjnego, oświetlenie, stan atmosfery, ukształtowanie terenu – istnieją obiektywnie i nie mogą być w momencie wykonywania zdjęć dowolnie zmienione. Wpływają jednak istotnie na dobór parametrów technicznych – rodzaju kamery fotogra-

metrycznej i zastosowanego filmu<sup>1</sup>, skali zobrazowań, organizacji nalotu, a także technologii fotogrametrycznego opracowania zdjęć itd. Umiejętne połączenie wiedzy o lesie i systemach fotogrametrycznych pozwala na optymalne wykorzystanie zdobyczy współczesnej techniki.

### 14.6.1. Uwarunkowania przyrodnicze

Nośnikiem informacji o obiektach środowiska jest promieniowanie elektromagnetyczne, a jego naturalnym źródłem jest Słońce. Istnieją także systemy fotogrametryczne (np. skaningu laserowego), wykorzystujące promieniowanie wytworzone sztucznie. Pochodzące z tych źródeł promieniowanie jest odbijane od powierzchni Ziemi i znajdujących się na niej obiektów, przechodzi przez warstwę atmosfery, dociera do systemu rejestrującego i jest zapisywane w postaci obrazu.

Zdolność odbijania promieniowania jest wyrażana za pomocą spektralnego współczynnika jasności, który określa stosunek jasności danego obiektu do jasności powierzchni porównawczej – białej, idealnie rozpraszającej promieniowanie. Współczynniki jasności różnych obiektów zmieniają się w zależności od długości fali świetlnej. To, jakie są intensywność i skład spektralny odbitego promieniowania, zależy od bardzo wielu czynników. W tym miejscu zwrócimy uwagę wyłącznie na te, które są związane z właściwościami pokrywy roślinnej.

Podstawowymi czynnikami przyrodniczymi, wpływającymi na charakterystyki spektralne roślinności leśnej, są: gatunek, wiek drzew, pora roku, zwarcie okapu drzewostanu, a także żyzność siedliska i stan zdrowotny drzew.

Poszczególne gatunki drzew różnią się pod względem budowy aparatu asymilacyjnego, kształtu koron i budowy przestrzennej zbiorowisk, które tworzą. Ich aparat asymilacyjny (liście, igły) w niejednakowym stopniu odbija promieniowanie elektromagnetyczne. Duże różnice charakterystyk spektralnych widoczne są przede wszystkim w zakresie bliskiej podczerwieni. Za wysokie odbicie podczerwieni u gatunków liściastych odpowiada budowa miększu gąbczastego – obecność pustych przestrzeni wypełnionych powietrzem – promieniowanie bowiem jest odbijane na granicy ośrodków o różnej gęstości.

Las jest tworem przestrzennym, trójwymiarowym. Drzewa liściaste tworzą korony, których kształty możemy określić jako owalne, w odróżnieniu od stożkowych koron drzew iglastych. Drzewa liściaste lepiej od iglastych wypełniają przestrzeń. Można również zauważyć, że warstwa

---

<sup>1</sup> Wobec stopniowego zastępowania kamer analogowych przez systemy cyfrowe (kamery cyfrowe i skanery) przytoczone uwagi należy rozumieć szerzej jako odnoszące się do własności różnych sensorów rejestrujących obrazy.

koron gatunków iglastych jest bardziej zróżnicowana wysokościowo. Przy bocznym oświetleniu powstają na koronach strefy zacienione (tzw. cień własny) oraz drzewa zacieniają się nawzajem (cień rzucany). Na obrazach lotniczych jest to widoczne w postaci specyficznej mozaiki miejsc oświetlonych i zacienionych. Udział w obrazie fragmentów nieoświetlonych, które odbijają mało promieniowania, jest większy u gatunków iglastych.

Łączny wpływ wymienionych czynników przejawia się w tym, że drzewa gatunków liściastych odbijają więcej promieniowania niż drzewa gatunków iglastych.

Różnicowanie się przestrzenne warstwy koron, a co za tym idzie jej odwzorowania na zdjęciach, postępuje w miarę zwiększania się wieku drzew tworzących drzewostan. Efekt ten ulega dodatkowo pogłębieniu wraz ze spadkiem zwarcia drzew. Drzewostany młode są bardziej wyrównane pod względem przestrzennego rozkładu jasności spektralnej, gdyż nie tworzą jeszcze wyraźnych koron, widocznych na zdjęciach lotniczych drzewostanów starszych.

Na sposób odwzorowania obrazu lasu ma także wpływ ukształtowanie terenu. W górach wyraźne są różnice oświetlenia stoków w zależności od ich wystawy. Niwelowanie wpływu tego zjawiska jest trudne i wymaga użycia zaawansowanych cyfrowych technik przetwarzania obrazów.

Jasność spektralna zależy także od kondycji roślinności. Drzewostany rosnące na siedliskach słabych mają większą jasność spektralną w zakresie promieniowania widzialnego od drzewostanów rosnących na siedliskach bogatych. Jednak dla praktyki gospodarstwa leśnego kapitalne znaczenie ma przede wszystkim fakt, że w charakterystykach spektralnych odzwierciedlenie znajdują zmiany stanu roślinności powodowane przez czynniki chorobowe, wpływające na ubytek (zmiany ilościowe) i przebarwienie się (czyli zmiany jakościowe) aparatu asymilacyjnego. Zagadnienie to zostało szczegółowo omówione w rozdz. 14.4. Zmiany charakterystyk spektralnych widoczne są we wszystkich zakresach promieniowania, jednak największe zaobserwować można w bliskiej podczerwieni.

Istotnym czynnikiem modyfikującym charakterystyki spektralne roślinności jest zmienność sezonowa, wynikająca z cyklicznego odnawiania się i zaniku (zmiany) wielkości i jakości aparatu asymilacyjnego. Zauważyć należy następujące fakty:

- największe różnice między grupą gatunków iglastych i liściastych, a nawet poszczególnymi gatunkami, występują na początku (rozwój aparatu asymilacyjnego) i na końcu sezonu wegetacyjnego (jesienne przebarwienie się liści);
- w środku sezonu wegetacyjnego (lipiec, połowa sierpnia) charakterystyki spektralne różnych gatunków drzew są podobne;
- od połowy sierpnia zaznacza się niekiedy efekt suszy letniej, który bardzo często daje obraz podobny do chorobowych uszkodzeń aparatu asymilacyjnego lub jesiennego przebarwienia liści.

Zdjęcia wykonywane poza sezonem wegetacyjnym, z uwagi na trudność wyodrębnienia obrazów koron i brak informacji spektralnych, uważa się za nieprzydatne na potrzeby analizy drzewostanów liściastych i mieszanych.

Dodatkowymi czynnikami utrudniającymi analizę obrazu lasu są nieostrość kształtów koron drzew, duża ich zmienność i uzależnienie od lokalnych warunków. „Rozmycie” kształtów koron, odbierane jako nieostrość kształtów, wynika z ich ażurowego charakteru i małej kontrastowości obrazu. Przy obserwacji zdjęć, nawet stereoskopowej, trudno jest „zamknąć” korony w regularne bryły, a często nawet zidentyfikować położenie wierzchołków. Drzewa są także mało stabilne – odchylają się znacznie od pionu na skutek wiatru, co może spowodować błędy pomiaru ich wysokości metodami fotogrametrycznymi. Nie można również przyjmować, że korony są zawsze symetryczne, a pnie drzew pionowe.

## 14.6.2. Uwarunkowania techniczne

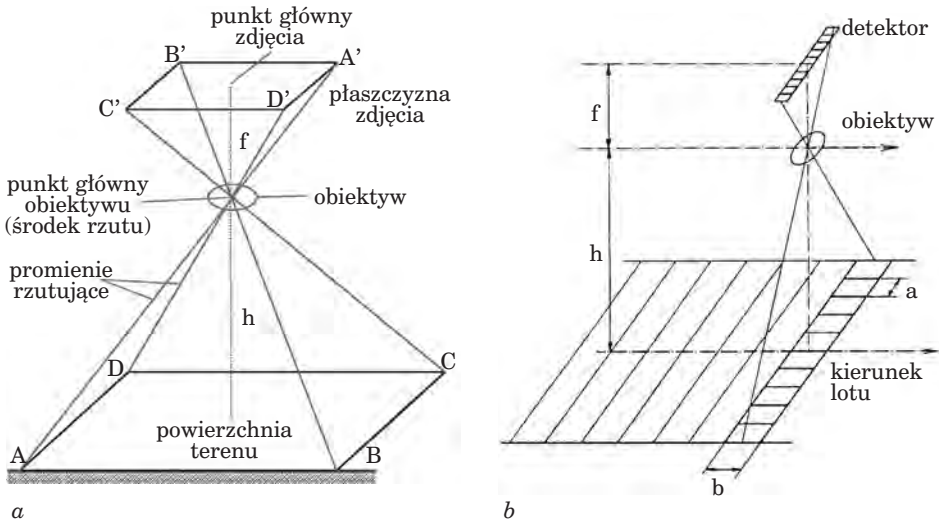
Odwzorowanie lasów na obrazach zależy od własności geometrycznych systemu rejestrującego. Zdjęcia lotnicze są realizacją rzutu środkowego (ryc. 14.6.1a). W jednym momencie powstaje w płaszczyźnie zdjęcia płaski obraz przestrzennego tworu, jakim jest las. Konsekwencją jest zmiana obrazu lasu w zależności od położenia na zdjęciu. Mamy do czynienia głównie z dwoma czynnikami: w miarę przesuwania się od środka zdjęcia (punktu głównego) ku jego obrzeżu obrazy drzew coraz bardziej się odchylają (drzewa widzimy z boku), a w poszczególnych partiach zdjęcia, z uwagi na kierunkowość oświetlenia, zmieniają się relacje między zacienionymi i jasnymi częściami koron drzew (ryc. 14.6.2a).

Inny efekt związany z oświetleniem, wynikający z kierunkowego odbicia promieniowania – charakterystyczny dla powierzchni gładkich lub amorficznych (woda, jednolite uprawy rolne), w wypadku roślinności wysokiej jest słabo zaznaczony.

Współcześnie obrazy uzyskiwane są coraz częściej za pomocą skanerów lub linijkowych kamer cyfrowych (ryc. 14.6.1b, c). Pełny obraz powstaje przez rejestrowanie kolejnych pasków, w miarę przesuwania się platformy przenoszącej urządzenie rejestrujące. W takim obrazie zniekształcenia wynikające z charakteru rzutu środkowego powstają tylko w kierunkach prostopadłych do osi lotu (ryc. 14.6.2b).

Przestrzenny charakter lasu oraz geometria rzutu środkowego powodują, że na zdjęciach lotniczych nie ma możliwości zaobserwowania wielu szczegółów:

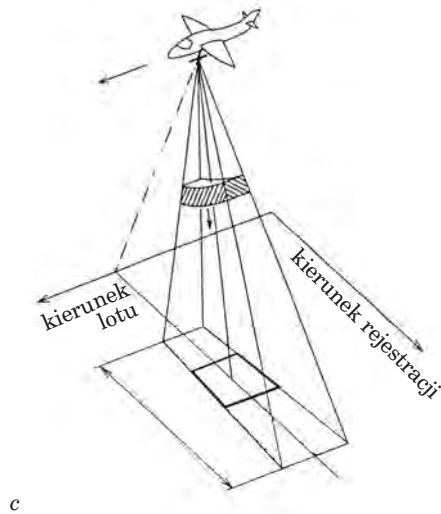
- część drzew jest zasłonięta przez sąsiadujące z nimi drzewa wyższe; efekt ten na zdjęciu lotniczym zwiększa się w miarę oddalania się od punktu głównego;



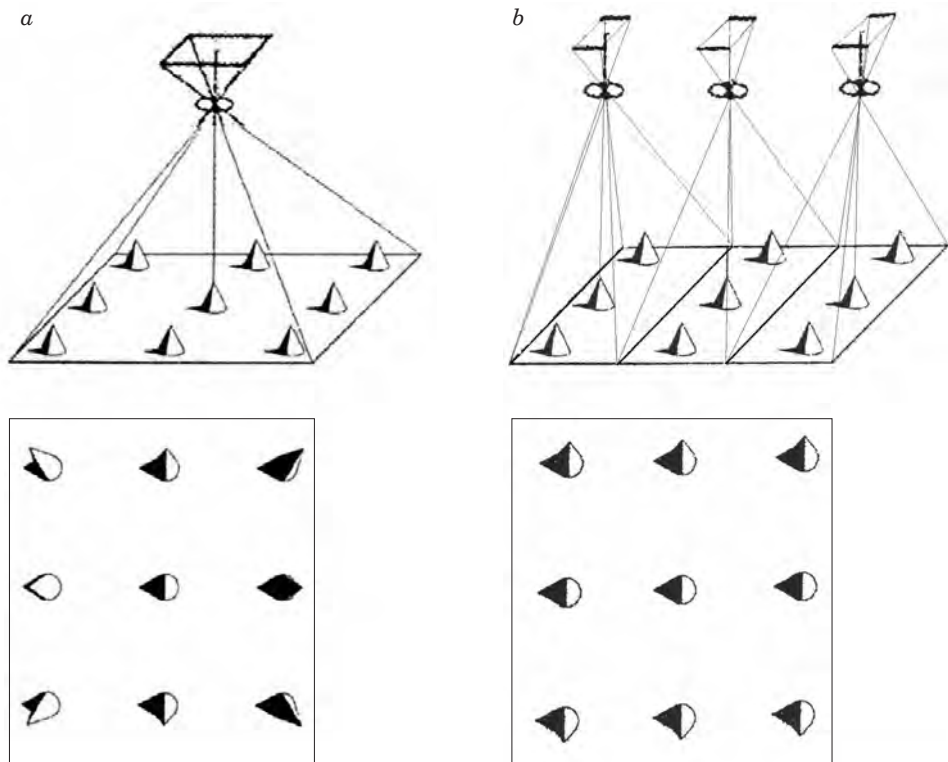
**Ryc. 14.6.1.** Sposoby rejestracji obrazu:

a – zdjęcie fotograficzne lub matrycowa kamera cyfrowa, b – linijkowa kamera cyfrowa, c – skaner (źródło: a – Adamczyk, Będkowski 2007; b i c – Schneider 1989 – zmienione)

- drzewa tworzą bardzo często wspólne korony, które na zdjęciu lotniczym zostaną zinterpretowane jako jedno drzewo;
- w zwartych drzewostanach nie ma możliwości zaobserwowania drzew drugiego piętra, praktycznie nie jest także możliwe obserwowanie powierzchni terenu.



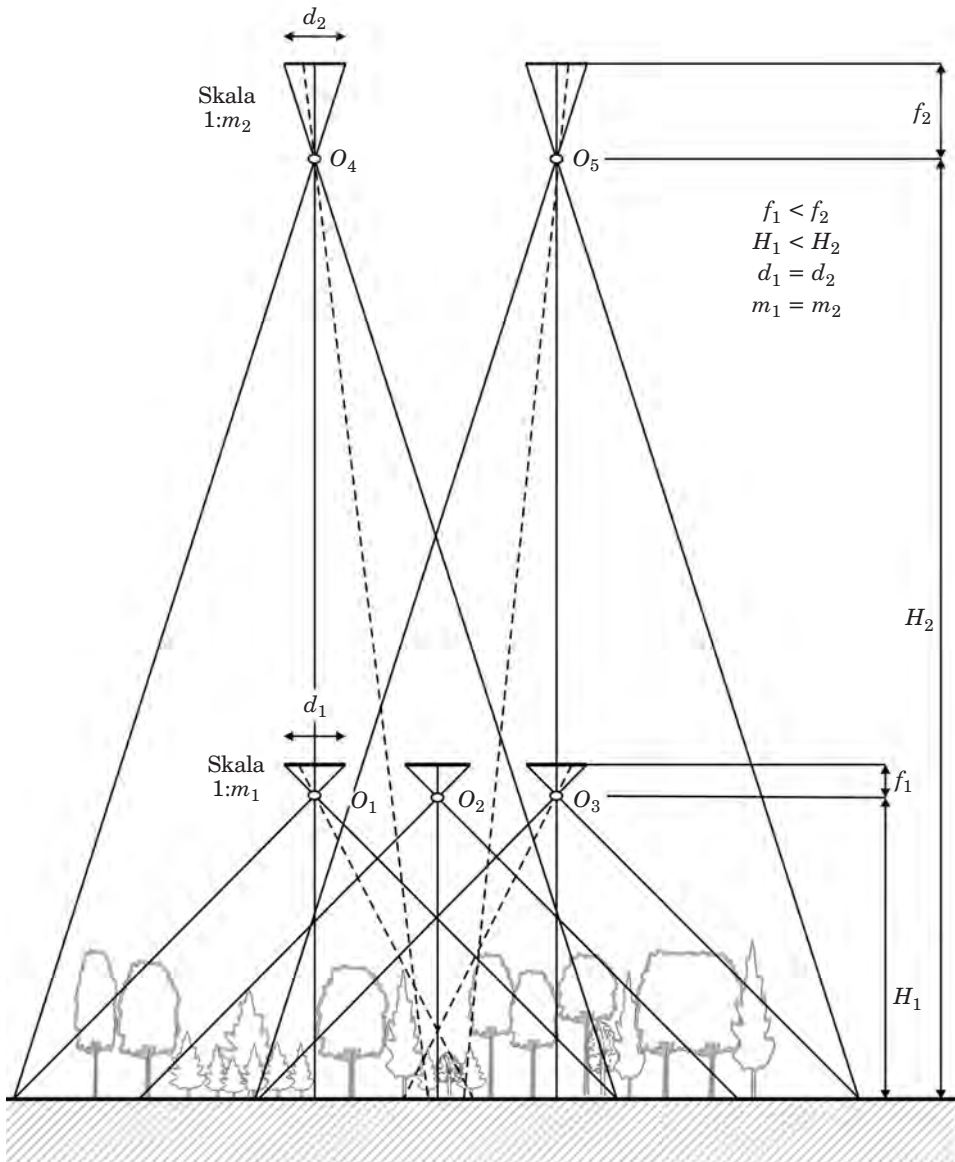
Warunki wglądu w głąb drzewostanu można poprawić, wykonując zdjęcia z większym pokryciem podłużnym (czyli z większej liczby punktów) w poszczególnych szeregach nalotu fotogrametrycznego (ryc. 14.6.3). Na kolejnych zdjęciach lepiej będą widoczne niektóre luki i zawartość gniazd w drzewostanie, zwiększy się także liczba drzew dostępnych do obserwacji i ewentualnego pomiaru. Łatwiej będzie ocenić zwarcie drzewostanu oraz stan zdrowotny poszczególnych drzew. Wymienione efekty można uzyskać także poprzez wykonanie zdjęć z większej wysokości, co daje lepszy wgląd w głąb drzewostanu przy obserwacji stereoskopowej.



**Ryc. 14.6.2** Odzworowanie koron drzew na obrazach z kamery:  
a – matrycowej, b – linikowej

### 14.6.3. Dobór warunków wykonania zdjęć na potrzeby leśnictwa i ich fotogrametrycznego opracowania

Przy definiowaniu wymagań dotyczących zdjęć lotniczych niezbędne jest uwzględnienie jednocześnie wielu czynników. Pozostają one we wzajemnych związkach, a wybór jednego z nich powoduje konieczność odpowiedniego dopasowania pozostałych. Do podstawowych czynników wymagających określenia należą: rodzaj materiału fotograficznego (lub sensora), pora wykonania zdjęć, skala opracowania, kierunek nalotu, pokrycie podłużne i poprzeczne zdjęć, rodzaj kamery i wysokość lotu, czas ekspozycji zdjęć, rodzaj stosowanych filtrów, warunki atmosferyczne, sygnalizacja (lub brak) fotopunktów.



**Ryc. 14.6.3.** Warunki pomiaru drzewostanu.

Warunki obserwacji i pomiaru fragmentów drzewostanu w lukach i gniazdach można poprawić poprzez zwiększenie pokrycia podłużnego (zdjęcia  $O_1$  i  $O_3$  pokrywają się w 60%; wykonując zdjęcie  $O_2$ , uzyskuje się pokrycie 80%) lub wysokości lotu (w tym wypadku młody drzewostan w luce jest dobrze widoczny na zdjęciach  $O_4$  i  $O_5$  tworzących parę stereoskopową)

Pierwszą czynnością związaną z planowaniem wykonania zdjęć lotniczych na potrzeby leśnictwa jest określenie rodzaju materiału fotograficznego lub właściwości spektralnych systemu rejestrującego. Ważne jest także, aby były one użyte w odpowiedniej porze sezonu wegetacyjnego.

W leśnictwie wykonywane są najczęściej zobrażenia:

- czarno-białe – rejestrują zakres widzialny promieniowania (panchromatyczne) lub dodatkowo są uczulone na podczerwień (infrachromatyczne). Znajdują zastosowanie przy wyznaczaniu granic i określaniu cech taksacyjnych drzewostanów oraz inwentaryzacji zapasu. Najlepiej różnicują gatunki drzew w okresie jesiennego przebarwiania się liści (wrzesień/październik). Zdjęcia infrachromatyczne są niekiedy zbyt kontrastowe, przez co utrudniona jest obserwacja obiektów zacienionych;
- barwne (w barwach naturalnych) – zapisują zakres widzialny promieniowania, mogą być stosowane do oceny jakościowych uszkodzeń aparatu asymilacyjnego;
- barwne w barwach umownych, tzw. spektrostrefowe – zapisują zakres zieleni, czerwieni i niewidzialnej dla człowieka podczerwieni, nadają się szczególnie do odróżniania roślinności od innych obiektów, rozpoznawania rodzajów i gatunków drzew oraz oceny ilościowych uszkodzeń aparatu asymilacyjnego;
- wielospektralne – rejestrują różne, dowolnie wybrane zakresy promieniowania, w postaci oddzielnych obrazów (najczęściej wizualizowanych jako czarno-białe). Za pomocą metod analogowych lub cyfrowych umożliwiają tworzenie dowolnych kompozycji barwnych, które mają bardzo szerokie zastosowanie.

Zdjęć barwnych i kompozycji barwnych nie powinno się wykonywać poza sezonem wegetacyjnym, gdyż obraz lasu jest na nich pod względem kolorystycznym bardzo pstrokaty, co utrudnia interpretację.

Wybór skali zdjęcia lotniczego jest kompromisem pomiędzy szczegółowością obrazów a kosztami nalotu fotogrametrycznego. Od skali zdjęć zależy także sytuacyjna i wysokościowa dokładność wykonywanych na ich podstawie pomiarów i opracowań kartograficznych. Można przyjąć, że dla większości zastosowań, związanych zarówno z taksacją drzewostanów i inwentaryzacją zapasu, jak i oceną stanu zdrowotnego drzewostanów, można zastosować skalę z zakresu od 1:8000 do 1:12 000. W tych skalach możliwe jest opracowanie nawet szczegółów dotyczących pojedynczych drzew, a jednocześnie liczba wykonywanych zdjęć nie będzie zbyt duża. Pojedyncze zdjęcie, przy standardowym formacie 23 cm × 23 cm, obejmie obszar od ok. 1840 m × 1840 m do 2760 m × 2760 m. Na zdjęciu znajdzie się odpowiednio dużo czytelnych szczegółów – linii podziału powierzchniowego, dróg, granic itp., co pozwoli na lepszą orientację, jeśli zechcemy je wykorzystać bezpośrednio w terenie. W wypadku obrazów cyfrowych zalecić można takie określenie warunków nalotu, aby terenowy wymiar piksela nie przekroczył wielkości 15 cm × 15 cm.

Przyjmuje się, że kierunek nalotu (orientacja osi szeregów fotogrametrycznych) przy wykonywaniu zdjęć na potrzeby leśnictwa powinien być obierany ze wschodu na zachód. Ułatwia to obserwację zdjęć pod stereoskopem, gdyż obserwator będzie widział głównie oświetlone części koron. Obszar lasu zyskuje na plastyczności przy niskim położeniu Słońca, jednak zbyt długie cienie, szczególnie w wypadku zdjęć kontrastowych (spektrostrefowe, czarno-białe infrachromatyczne, wielospektralne) utrudniają obserwację wielu szczegółów. Także w obrębie koron poszczególnych drzew są bardzo różne warunki świetlne, co komplikuje ich pomiar i określanie kondycji zdrowotnej. Szczególnie wrażliwe na zmiany warunków świetlnych są zdjęcia spektrostrefowe. Powinny być wykonywane przy dobrym oświetleniu, latem, przy wysokim położeniu Słońca.

Pokrycie podłużne zdjęć ( $p$ ) przyjmuje się standardowo równe 60% lub 80%, co przekłada się bezpośrednio na liczbę wykonanych zdjęć. Zwiększenie liczby zdjęć ma nieduży wpływ na koszty nalotu fotogrametrycznego (największy udział mają koszty samego lotu), za to można poprawić warunki obserwacji struktur pionowych w drzewostanach, w tym szczegółów leżących bezpośrednio na poziomie terenu. Pokrycie poprzeczne ( $q$ ) przyjmuje się zwykle równe 30%. W warunkach terenów o dużym zróżnicowaniu wysokościowym konieczne jest takie dobranie pokrycia, aby przy najgorszych warunkach fotografowania uzyskać minimalne wymagane pokrycie podłużne i poprzeczne.

Ważnym parametrem kamer fotogrametrycznych jest ogniskowa obiektywu ( $f$ ), a ściślej – wielkość do niej przybliżona, nazywana odległością obrazową (lub stałą kamery –  $c_k$ ). Istnieje zasada, która mówi, że zdjęcia obiektów zróżnicowanych wysokościowo (np. miasta z wysokimi budynkami, także lasy) należy wykonywać kamerami o dłuższych ogniskowych; warto bowiem pamiętać, że dzięki temu można uzyskać obrazy danego terenu o takiej samej skali, jak za pomocą kamer z krótszą ogniskową, lecz o lepszych własnościach geometrycznych (ryc. 14.6.3). Zwiększenie wysokości lotu spowoduje jednak wzrost grubości atmosfery między kamerą a terenem, a w konsekwencji wpłynie ujemnie na jakość zdjęć (zakłócenia widoczne jako zamglenie, narastające od środka na zewnątrz zdjęć). Należy także pamiętać, że wysokościowo dokładność opracowań fotogrametrycznych, wyrażona za pomocą błędu średniego  $m_h$ , jest wprost proporcjonalna do wysokości lotu:

$$m_h = \pm aH$$

gdzie:

$a$  – ustalony empirycznie współczynnik,

$H$  – wysokość fotografowania.

Wartość współczynnika zawiera się w granicach od 0,008% do 0,024%, zależnie od charakteru i warunków pomiaru (punkty sygnalizowane lub naturalne, opracowania punktowe lub warstwicowe, kontrast obrazu). In-

nym czynnikiem jest konieczność zachowania odpowiedniej relacji między podłużną bazą zdjęć lotniczych ( $B_x$ ) a wysokością lotu ( $H$ ), gdyż ma to znaczenie dla dokładności wykonywanych pomiarów przy wykorzystaniu obserwacji stereoskopowej. Teoretycznie optymalna wielkość stosunku  $B_x/H$  wynosi od 1 do 3; uzyskuje się wtedy dobrą dokładność sytuacyjną (położenie w płaszczyźnie  $X, Y$ ) oraz wysokościową (rzędna  $Z$ ). W praktyce, z uwagi na ograniczenia sprzętowe, stosunek ten wynosi najczęściej od 1/7 do 1.

Dla uzyskania dobrej jakości obrazów niezbędne jest przyjęcie właściwej ekspozycji, tj. czasu otwarcia migawki kamery. Zwykle zainteresowanie wykonujących zdjęcia skierowane jest na obiekty pochodzenia antropogenicznego, zabudowę, obszary użytkowane rolniczo, które są na ogół jaśniejsze od lasów. Ustawienie parametrów według tych obiektów powoduje, że lasy będą odwzorowane jako zbyt ciemne i nie będzie możliwości odczytania wielu szczegółów. Niezbędne jest zaznaczanie w wymaganiach, że naświetlanie powinno być ustawione na las.

Pomiarowe opracowania fotogrametryczne na potrzeby leśnictwa wykonuje się obecnie głównie z wykorzystaniem obserwacji stereoskopowej zdjęć. Poprawne przygotowanie projektu wymaga ustalenia położenia na zdjęciach lotniczych fotopunktów (nazywanych także punktami GCP – Ground Control Points), tj. punktów o znanych współrzędnych terenowych  $X, Y, Z$ . Współrzędne tych punktów można ustalić po nalocie, poprzez poligonowy pomiar geodezyjny, lub odbiornikami GPS (nie dają one na ogół wystarczającej dokładności w lesie). Na obszarze lasów bardzo trudno jest znaleźć odpowiednie punkty naturalne, które byłyby czytelne i widoczne na zdjęciach. Można wyklądać specjalne znaki namalowane białą farbą na dużych płaszczyznach. Odpowiednie instrukcje określają ich kształt i wymiary. Znaki powinny być wyłożone bezpośrednio przed nalotem. Wewnątrz kompleksu leśnego można wyklądać znaki tylko na skrzyżowaniach linii podziału powierzchniowego i w uprawach, a osie nalołów należy zaprojektować tak, aby pokrywały się z tymi liniami. Fotopunkty nie powinny jednak tworzyć linii, tymczasem trudno tego uniknąć, gdy ich położenie wynika z prostoliniowego na ogół przebiegu linii podziału powierzchniowego. Ponadto tylko jedna linia podziału powierzchniowego będzie wystarczająco dobrze widoczna (tzn. będzie można oglądać znaki wyłożone na powierzchni terenu) na zdjęciach tworzących dany szereg zdjęć lotniczych.

Współcześnie opracowuje się nie pojedyncze pary zdjęć stereoskopowych, lecz ich bloki pokrywające cały obiekt, a do realizacji projektu wymagana jest nieduża liczba fotopunktów, rozmieszczonych na obrzeżach bloku, plus kilka punktów wewnątrz obiektu. Zdjęcia wykonuje się zwykle tak, że pokrywają również pas obszaru wokół fotografowanego obiektu. Jeśli mamy do czynienia z odosobnionym kompleksem leśnym, możliwe będzie wówczas rozmieszczenie fotopunktów na otwartej przestrzeni, przez co będą lepiej widoczne i dostępne do pomiaru zarówno fotogrametrycznego (na zdjęciach), jak i w terenie w celu ustalenia ich współrzędnych.

Wymienione czynniki mają wpływ także na sposób i wyniki pomiaru oraz oszacowania na podstawie zdjęć cech taksacyjnych drzewostanów i inwentaryzację zapasu. Na przykład pomiar średnicy korony powinien być wykonywany w kierunku prostopadłym do linii łączącej wierzchołek drzewa z punktem głównym (środkiem) zdjęcia. Znany jest problem zaniżania wyników pomiaru wysokości drzew. Dla obserwatora, z powodu ograniczonej rozdzielczości zdjęć, niewidoczne są wierzchołki drzew (efekt szczególnie wyraźny w wypadku gatunków iglastych), dodatkowo niewidoczne jest, z powodu zwarcia koron, dno lasu. Zaniżane są także zwarcie i liczba drzew, gdyż obserwatorzy koncentrują się na widocznych (oświetlonych) częściach koron, nie widzą przy tym niektórych drzew lub interpretują ich grupy jako pojedyncze egzemplarze. Dla zapewnienia odpowiedniego pomiaru wysokości drzew i drzewostanu niezbędne jest stosowanie modelu wysokości drzewostanu wyprowadzonego z numerycznego modelu terenu i numerycznego modelu pokrycia terenu (rozdz. 11).

Omówione warunki wykonania zdjęć uwzględniają specyficzne, podstawowe wymagania opracowań na potrzeby leśnictwa. Praktyka fotogrametrii jest bardziej złożona, niezbędne jest uwzględnienie wielu innych wymagań, głównie natury technicznej, związanych z posiadanym sprzętem fotogrametrycznym, zarówno używanym do rejestracji obrazów, jak i późniejszego ich opracowania. Są one określone w odpowiednich przepisach wydawanych przez Głównego Geodetę Kraju – Prezesa Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. W obiegu znajdują się także obszerne opracowania książkowe z tego zakresu.

## 14.7. Zdjęcia mikrofalowe

dr KRYSZYNA STANKIEWICZ – Wyższa Szkoła Informatyki  
Stosowanej i Zarządzania

Pasmo promieniowania mikrofalowego znajduje się pomiędzy podczerwienią a ultrakrótkimi falami radiowymi. W przybliżeniu obejmuje ono fale o długości od 1 mm do 300 cm. Promieniowanie elektromagnetyczne z tego zakresu przenika przez chmury i między innymi z tej przyczyny mikrofały znalazły szerokie zastosowanie w badaniach teledetekcyjnych prowadzonych na obszarach tropikalnych, a także wszędzie tam, gdzie utrzymujące się zachmurzenie utrudnia zastosowanie obrazowania w zakresie optycznym i w podczerwieni.

Intensywność naturalnego promieniowania mikrofalowego Ziemi jest niewielka. Promieniowanie to jest nośnikiem interesujących informacji dotyczących na przykład wilgotności, jednak jego pomiary, zwane pasywnymi, charakteryzują się małą rozdzielczością przestrzenną. Lepszą rozdzielczość przestrzenną uzyskuje się wtedy, gdy pomiary w paśmie mi-

krofalowym wykonywane są w trybie aktywnym. Tryb aktywny oznacza wykorzystanie urządzeń, które wytwarzają sygnał w zakresie mikrofalowym i wysyłają go w kierunku badanego obiektu. Następnie sygnał odbity od obiektu, czyli sygnał echa, który powraca w kierunku urządzenia nadawczego, jest w nim odbierany i rejestrowany. Przy zastosowaniu metody aktywnej mikrofalowe zdjęcia powierzchni Ziemi mogą być pozyskiwane w dzień i w nocy, niezależnie od warunków atmosferycznych. Na podobnej zasadzie działają urządzenia radarowe służące do wykrywania obiektów w powietrzu, na wodzie oraz na lądzie, które umożliwiają określenie kierunku, odległości, wielkości obiektu, a nawet służą do pomiarów jego prędkości.

### 14.7.1. Metoda pozyskiwania obrazów mikrofalowych – zasada działania SAR

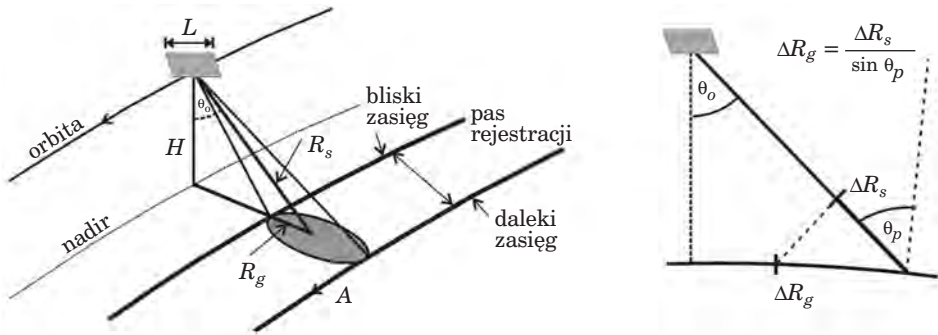
Radar jest urządzeniem radiolokacyjnym, natomiast obrazowanie mikrofalowe wymaga zastosowania szczególnych rozwiązań. Rozdzielczość przestrzenna obrazu tworzonego przy użyciu zwykłej anteny radarowej (RAR – Real Aperture Radar) zależy od długości tego urządzenia i odległości obiektu od anteny. Uzyskanie odpowiednio wysokiej rozdzielczości przestrzennej wymaga stosowania anten, których znaczne rozmiary wykluczają umieszczanie ich na samolotach lub satelitach. Rozwiązaniem tego problemu stało się zastosowanie techniki syntezy apertury. Urządzenie działające na tej zasadzie, czyli radar z syntetyczną anteną, określa się w skrócie mianem SAR (Synthetic Aperture Radar). Wszystkie urządzenia do obrazowania mikrofalowego, pracujące obecnie na satelitach, to anteny aperturowe (powierzchniowe) typu SAR. Zasada działania SAR polega na wykorzystaniu ruchu anteny umieszczonej na samolocie lub satelicie do symulacji wirtualnej anteny o znacznie większej długości niż rzeczywista.

SAR wysyła impulsowo sygnały w stałych odstępach czasu. Promieniowanie wysyłane przez antenę to spójna wiązka mikrofalowa o ustalonej długości fali. Podstawowym mierzonym parametrem jest czas  $\tau$ , który upływa pomiędzy wysłaniem sygnału mikrofalowego a jego powrotem do urządzenia nadawczo-odbiorczego, zwany czasem opóźnienia sygnału echa. Pomiar czasu  $\tau$  jest równoważny pomiarowi odległości  $R$  obiektu od anteny, ponieważ zachodzi następujący związek:

$$\tau = 2 R / c \quad [1]$$

gdzie  $c$  oznacza prędkość światła.

Pole promieniowania anteny obejmuje swoim zasięgiem pewien obszar na powierzchni Ziemi, zwany śladem. Obrazowany jest pas równoległy do



**Ryc. 14.7.1.** Schemat obrazowania za pomocą SAR.

Oznaczenia:  $H$  – wysokość orbity,  $L$  – rzeczywista długość anteny,  $\theta_o$  – kąt obserwacji,  $\theta_p$  – kąt padania,  $R_s$  – zasięg ukośny,  $R_g$  – zasięg naziemny,  $A$  – wektor w kierunku azymutalnym,  $\Delta R_s$  – piksel w kierunku zasięgu ukośnego,  $\Delta R_g$  – piksel w kierunku zasięgu naziemnego

ślądu toru lotu platformy (nadiru), przesunięty względem niego w kierunku bocznym. Ryc. 14.7.1 przedstawia położenie pasa rejestracji względem nadiru. Obszar na powierzchni Ziemi oświetlony przez pojedynczy impuls, czyli ślad wiązki, ma na ogół znaczne rozmiary. Na przykład dla urządzeń SAR, umieszczonych na satelitach ERS i ENVISAT, ślad wiązki ma 100 km (szerokość rejestrowanego pasa) na ok. 5 km w kierunku równoległym do toru lotu. Do opisu relacji geometrycznych stosuje się układ odniesienia, w którym wyróżnione są dwa wzajemnie prostopadłe kierunki: kierunek azymutalny, równoległy do toru lotu platformy unoszącej antenę, i kierunek zasięgu ukośnego, wyznaczony przez linię przechodzącą przez antenę i obrazowany obiekt w chwili, gdy odległość między nimi jest najmniejsza.

W czasie, gdy antena zbliża się do danego obiektu, mijają go i oddala się, do obiektu dociera wiele kolejnych impulsów. Z powodu efektu Dopplera częstotliwość kolejnych sygnałów echa, pochodzących od ustalonego obiektu, zostaje zmodyfikowana. Efekt Dopplera polega na zmianie częstotliwości fali w sytuacji, gdy nadawca i odbiorca (czyli antena i obiekt rozpraszający) poruszają się względem siebie. Zmiana częstotliwości jest mierzona przez SAR i stanowi dodatkową informację, która ostatecznie pozwala na lepszą identyfikację położenia obiektu. Do formowania obrazu wykorzystywane są wszystkie sygnały odbite od danego obiektu w czasie, gdy znajduje się on w polu promieniowania anteny. Konsekwencją takiego sposobu tworzenia obrazu mikrofalowego jest między innymi stała rozdzielczość przestrzenna w kierunku azymutalnym, która jest równa połowie długości anteny rzeczywistej  $L/2$ . Anteny SAR, działające na satelitach, mają długości rzędu kilkunastu metrów, a więc przestrzenna rozdzielczość tych systemów w kierunku azymutalnym wynosi na ogół kilka metrów. Rozdzielczość SAR w kierunku zasięgu ukośnego zależy od czasu trwania pojedynczego sygnału impulsowego. Im krótszy sygnał, tym lepsza rozdzielczość w kie-

runku zasięgu ukośnego. Bardzo krótkie sygnały niosą jednak zbyt mało energii, aby zapewnić wymaganą rozdzielczość radiometryczną. Dlatego w urządzeniach SAR stosuje się nieco dłuższe impulsy z liniową modulacją częstotliwości. Podobnie jak w wypadku kierunku azymutalnego, zmiana częstotliwości sygnału przekłada się na możliwość lepszej lokalizacji obiektu. Rozdzielczość w kierunku zasięgu ukośnego jest odwrotnie proporcjonalna do zmiany częstotliwości modulowanego sygnału i wynosi na ogół kilka metrów. Pikselowi w kierunku zasięgu ukośnego  $\Delta R_s$  odpowiada przedział  $\Delta R_g$  w kierunku zasięgu naziemnego, określony następującą zależnością:

$$\Delta R_g = \Delta R_s / \sin \theta_p \quad [2]$$

gdzie

$\theta_p$  jest kątem padania mikrofal (ryc. 14.7.1).

Im większa odległość od anteny, tym większy przedział zasięgu naziemnego odpowiada pikselowi zasięgu ukośnego. Z tego powodu obraz przedstawiony względem zasięgu ukośnego jest zniekształcony w kierunku poprzecznym.

Sygnały echa, zarejestrowane przez urządzenie SAR, nie stanowią jeszcze obrazu. Dla danego obiektu zarejestrowanych jest wiele sygnałów, które różnią się częstotliwością na skutek efektu Dopplera oraz z powodu modulacji sygnału. Kompresja zarejestrowanych sygnałów (tzw. ogniskowanie obrazu) przeprowadzana jest w dwu etapach. W pierwszym dokonuje się kompresji w kierunku zasięgu ukośnego, a w kolejnym wykonywana jest kompresja w kierunku azymutalnym. Przetworzenia te wymagają zastosowania złożonego algorytmu, ale mogą być wykonane zarówno przez dostawcę zdjęć, jak i użytkownika, gdy decyduje się on na odbiór danych surowych i ma odpowiednie oprogramowanie do przetwarzania wstępnego.

W wyniku wstępnych przetworzeń pozyskuje się dane dotyczące nie tylko amplitudy fali elektromagnetycznej  $A$ , ale także jej fazy  $\varphi$ . Produkt, który zawiera takie dane, nosi nazwę SLC (Single Look Complex). Położenie w nim pikseli jest określone względem kierunku azymutalnego i zasięgu ukośnego, a rozdzielczość przestrzenna jest większa niż dla innych produktów z wyższego poziomu przetwarzania. W SLC amplituda  $A$  i faza  $\varphi$  przekazywane są w postaci dwóch składowych wartości każdego piksela:  $A \cdot \cos \varphi$  i  $A \cdot \sin \varphi$ . Produkty SLC wykorzystywane są w interferometrii i polarymetrii (rozd. 14.7.3). Na kolejnym etapie przetwarzania tworzone są produkty PRI (Precision Image), które zawierają wyłącznie dane o amplitudzie. Położenie pikseli w PRI przedstawiane jest względem zasięgu naziemnego. Produkty PRI nadają się do bezpośredniej wizualizacji i w tym sensie przypominają zdjęcia satelitarne z optycznych sensorów.

## 14.7.2. Charakterystyka promieniowania mikrofalowego wykorzystywanego w teledetekcji

Interpretacja zdjęć mikrofalowych zależy w istotny sposób od takich cech zastosowanego promieniowania, jak długość fali, polaryzacja, spójność i kąt padania wiązki. Podstawowe dane dotyczące urządzeń SAR działających na satelitach są przedstawione w tab. 14.7.1. Znaczenie symboli użytych do opisu pasma i polaryzacji zostało objaśnione w kolejnych podrozdziałach.

Tabela 14.7.1. Charakterystyka sensorów SAR na satelitach

Satelita	Okres funkcjonowania	Pasmo/długość fali (cm)	Polaryzacja	Zdolność rozdzielcza (m)	Szerokość pasa rejestracji (km)
ERS-1	1991–2000	C / 5,6	VV	25	100
JERS-1	1992–1998	L / 23,5	HH	25	100
ERS-2	1995	C / 5,6	VV	25	100
RADARSAT-1	1995	C / 5,6	HH	10–100	45–500
ENVISAT	2002	C / 5,6	HH/VV, HH/HV, VV/VH	25–1000	50–500
ALOS	2006	L / 23,5	HH/VV/HV/VH	10–100	100–350
TerraSAR-X	2007	X / 3,1	HH/VV/HV/VH	1–16	10–100
RADARSAT-2	2007	C / 5,6	HH/VV/HV/VH	3–100	20–500

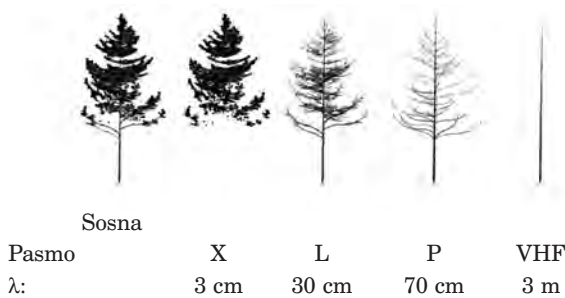
### 14.7.2.1. Długości fal

Zakres promieniowania mikrofalowego został podzielony na węższe pasma, oznaczone kodem literowym ustanowionym w okresie II wojny światowej (tab. 14.7.2).

Długość fali ma zasadnicze znaczenie dla zastosowań obrazowania wykonanego z jej wykorzystaniem. Na echo sygnałów mikrofalowych wpływają przede wszystkim te obiekty, których

Tabela 14.7.2. Pasma promieniowania mikrofalowego

Pasmo	Długość fali $\lambda$ (cm)	Częstotliwość $\nu$ (GHz)
Ka	0,8–1,1	40–26,5
K	1,1–1,7	26,5–18
Ku	1,7–2,4	18–12,5
X	2,4–3,8	12,5–8
C	3,8–7,5	8–4
S	7,5–15	4–2
L	15–30	2–1
P	30–100	1–0,3

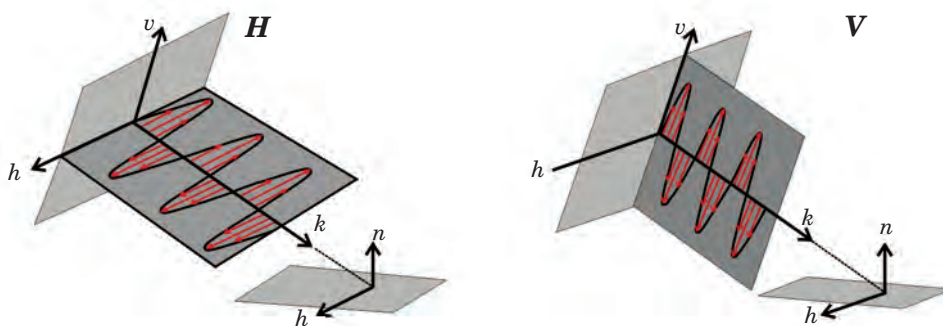


**Ryc. 14.7.2.**  
Centra rozpraszania sosny przy różnych długościach fal z zakresu mikrofalowego i radiowego

wielkość jest porównywalna z długością fali. Części sosny, które są elementami rozpraszającymi fal z kilku wybranych zakresów długości, zostały przedstawione na ryc. 14.7.2.

### 14.7.2.2. Polaryzacja

Mikrofale, podobnie jak fale świetlne, są falami poprzecznymi, w których składowe elektryczna i magnetyczna są wzajemnie prostopadłe i obie oscylują prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. W fali niespolaryzowanej drgania odbywają się we wszystkich dopuszczonych kierunkach. W fali spolaryzowanej oscylacje zachodzą tylko w pewnym wybranym kierunku. Mikrofałe emitowane przez urządzenia SAR, obecnie pracujące na satelitach, są spolaryzowane liniowo. Antena SAR wysyła falę o polaryzacji pionowej  $V$  lub poziomej  $H$ . Kierunek poziomy oscylacji ( $H$ ) jest równoległy do obrazowanej powierzchni, a kierunek pionowy  $V$  – prostopadły do  $H$  (ryc. 14.7.3).



**Ryc. 14.7.3.** Fale spolaryzowane poziomo ( $H$ ) i pionowo ( $V$ ):  
 $h$  i  $v$  – wektory wyznaczające kierunki oscylacji fali spolaryzowanej poziomo i pionowo,  $k$  – wektor w kierunku propagacji fali,  $n$  – wektor prostopadły do obrazowanej powierzchni

Antena może rejestrować echo o zgodnej (kombinacje VV lub HH) lub krzyżowej polaryzacji (HV lub VH) względem polaryzacji fali wysyłanej. W symbolicznym zapisie kombinacji polaryzacji na pierwszym miejscu występuje polaryzacja fali wysyłanej. Niektóre anteny SAR, stosowane w teledetekcji satelitarnej, rejestrowały tylko jedną wybraną kombinację polaryzacji: VV lub HH. Antena ASAR, umieszczona na satelicie ENVISAT, może pracować w reżimie zmiennej polaryzacji i w trakcie rejestracji pojedynczej sceny generować dwa obrazy dla różnych kombinacji polaryzacji fali padającej i echa: HH i VV lub HH i HV, lub VV i VH. Urządzenia SAR na satelitach ALOS i TerraSAR-X rejestrują wszystkie cztery kombinacje polaryzacji dla danej sceny, co poszerza zakres zastosowań pozyskanych w ten sposób zdjęć.

### 14.7.2.3. Kąt obserwacji i kąt padania mikrofal

Kąt padania  $\theta_p$  jest zdefiniowany jako kąt pomiędzy kierunkiem padania wiązki mikrofalowej na płaszczyznę a kierunkiem prostopadłym do tej płaszczyzny. Gdy kąt padania jest mały, czyli gdy fala pada prawie prostopadle na płaszczyznę, sygnał echa docierający do odbiornika jest duży. Wraz ze wzrostem kąta padania maleje natężenie rejestrowanego echa. Wielkość tego efektu zależy od rodzaju powierzchni rozpraszającej. Kąt padania  $\theta_p$  zależy od kąta obserwacji  $\theta_o$  (ryc. 14.7.1) i ukształtowania obrazowanej powierzchni. Kąt obserwacji zmienia się na ogół w zakresie kilku stopni w kierunku poprzecznym pasa rejestracji, a zatem na płaskim terenie kąt padania zmienia się w podobny sposób. Niektóre sensory, np. ASAR na satelicie ENVISAT, mają możliwość rejestracji pasów znajdujących się w różnych odległościach od nadiru, co zwiększa zakres kątów obserwacji (dla ASAR wynosi on od  $20^\circ$  do  $43^\circ$ ). W związku z zależnością intensywności echa od kąta obserwacji niezbędne jest unormowanie wartości pikseli względem tego kąta przed interpretacją zdjęcia. Lokalny kąt padania zależy także od rzeźby terenu, a korekcja tej zależności wymaga uwzględnienia danych o ukształtowaniu powierzchni, czyli numerycznego modelu terenu.

### 14.7.2.4. Spójność wiązki mikrofalowej i plamkowanie

Antena SAR emituje promieniowanie spójne, czyli takie, które ze względu na zgodność faz jest zdolne do interferencji. Interferencja, czyli zjawisko nakładania się fal, prowadzi do zwiększania lub zmniejszania amplitudy fali wypadkowej w zależności od różnicy faz. Odbicie spójnej wiązki mikrofalowej od wielu centrów rozpraszających, rozmieszczonych

na obszarze pojedynczego piksela, powoduje konstruktywną bądź destruktywną interferencję. Wynika to ze struktury (szorstkości) powierzchni odbijającej i zmian odległości od satelity na obszarze piksela. Z tej przyczyny na zdjęciach mikrofalowych pojawia się efekt plamkowania (speckle), polegający na znacznej zmienności wartości sąsiadujących ze sobą pikseli reprezentujących ten sam jednorodny obiekt. Plamkowanie jest podobne do szumu multiplikatywnego – im większa intensywność rozproszonej wstecznie mikrofal, tym bardziej widoczna jest zmienność sygnału dla dużych (czyli reprezentowanych przez więcej niż jeden piksel) obiektów jednorodnych. Plamkowanie utrudnia interpretację zdjęcia mikrofalowego, dlatego w celu zmniejszenia fluktuacji sygnału należy zastosować filtrację cyfrową. Filtracja powinna zachować krawędzie obiektów oraz nie zmieniać charakteru sygnału odbitego od wielopikselowych obiektów jednorodnych. Dokładne spełnienie tych wymagań jest trudne, ale w dużym stopniu możliwe, jeśli stosowane są filtry przeznaczone specjalnie do przetwarzania zdjęć mikrofalowych.

#### 14.7.2.5. Współczynnik wstecznego rozpraszania

W wypadku dużego, jednorodnego obiektu miarą współczynnika wstecznego rozpraszania  $\sigma^{\circ}$  jest średnia wartość intensywności sygnału, wyznaczona na podstawie wartości wielu pikseli reprezentujących ten obiekt na zdjęciu. W celu uzyskania unormowanych wartości współczynnika wstecznego rozpraszania wartość średnia intensywności sygnału jest mnożona przez odpowiednią stałą kalibracyjną. Analiza statystyczna procesu plamkowania wskazuje, że współczynnik wstecznego rozpraszania może być wyznaczony z dużą dokładnością dopiero wtedy, gdy przy uśrednianiu zostaną uwzględnione wartości co najmniej kilkuset pikseli należących do obiektu jednorodnego. Ze względu na znaczną zmienność wartości w ramach pojedynczego zdjęcia współczynnik wstecznego rozpraszania przedstawiany jest w skali logarytmicznej i wyrażany w decybelach:  $\sigma^{\circ}_{dB} = 10 \log \sigma^{\circ}$ .

### 14.7.3. Interpretacja zdjęć mikrofalowych

Wartości pikseli zdjęcia mikrofalowego są miarą intensywności wstecznego rozpraszania mikrofal od powierzchni terenu. Przy ustalonej długości fali i kombinacji polaryzacji zdjęcie jest na ogół wizualizowane w tonach szarości. Ciemne fragmenty zdjęcia oznaczają małą intensywność wstecznego rozpraszania, a jasne – dużą.

Na intensywność wstecznego rozpraszania mikrofal wpływają następujące czynniki:

- parametry charakteryzujące powierzchnię rozpraszającą, przede wszystkim szorstkość tej powierzchni oraz przenikalność elektryczna w chwili rejestracji obrazu;
- parametry sensora, takie jak długość mikrofal, polaryzacja fali emitowanej i echa, kąt obserwacji;
- inne czynniki odnoszące się do danego obszaru, takie jak rzeźba terenu oraz czynniki charakteryzujące stan środowiska naturalnego.

Podstawową wskazówką pomocną przy interpretacji zdjęć mikrofalowych jest reguła mówiąca o tym, że obiekty jaśniejsze na zdjęciu są zarazem obiektami bardziej szorstkimi. Należy przy tym pamiętać, że szorstkość mierzona jest w stosunku do długości mikrofal. Na przykład dla fal o długości od kilku lub kilkunastu centymetrów roślinność jest zwykle umiarkowanie szorstka i na zdjęciu mikrofalowym jej obraz jest jasnoszary lub szary. W wypadku powierzchni gładkich mamy natomiast do czynienia z odbiciem zwierciadlanym, którym rządzi zasada równości kąta padania i kąta odbicia fali elektromagnetycznej. Jasność obrazu tej powierzchni na zdjęciu zależy od usytuowania powierzchni odbijającej względem kierunku padającej fali. Jeśli powierzchnia gładka jest pozioma, a fala pada na tę powierzchnię ukośnie (kąt padania większy od  $0^\circ$ ), wtedy fala odbita nie dociera do anteny i zarejestrowany obraz jest prawie czarny (ryc. 14.7.4a). Jeśli jednak kąt padania mikrofal jest bardzo mały (np. fala pada na odpowiednio usytuowane zbocze), to prawie cała energia fali zostanie skierowana z powrotem do anteny i w efekcie obraz będzie bardzo jasny. Zjawisko odbicia zwierciadlanego może zachodzić kilkakrotnie, zanim ostatecznie echo zostanie skierowane w stronę anteny. Na przykład na obszarach miejskich często występuje układ sąsiadujących ze sobą gładkich powierzchni poziomych i pionowych. Fala odbita od jezdni lub chodnika może doznać kolejnego odbicia od pionowej ściany domu, dając bardzo jasny obraz na zdjęciu (ryc. 14.7.4b). Taki układ ścian jest rodzajem reflektora rogowego. Konstrukcje metalowe tworzące reflektor rogowy (np. mosty, statki) bardzo silnie odbijają mikrofałe. Ze względu na duże natężenie echa specjalnie skonstruowane trójścienne reflektory rogowe stosowane są do kalibracji zdjęć mikrofalowych.

Miarą szorstkości danej powierzchni jest zmienność jej profilu, mierzona względem długości fali padającej. Zmienność profilu jest określona przez odchylenie standardowe wysokości  $\sigma(h)$ . Zgodnie z kryterium Rayleigha, powierzchnia jest gładka, gdy spełniony jest następujący warunek:

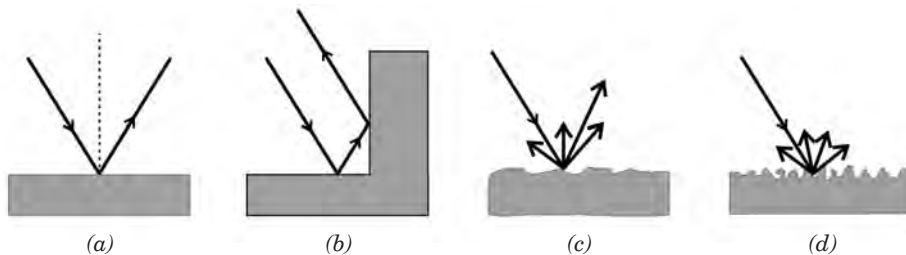
$$\sigma(h) < \lambda / 8 \cos \theta_p \quad [3]$$

gdzie:

$\lambda$  – długość fali elektromagnetycznej,

$\theta_p$  – kąt padania.

Dla powierzchni spełniających powyższe kryterium mamy do czynienia z odbiciem zwierciadlanym. W miarę wzrostu szorstkości powierzchni wzra-



**Ryc. 14.7.4.** Rozpraszanie mikrofal w zależności od szorstkości i usytuowania powierzchni względem fali padającej:

- a) – odbicie zwierciadlane, b) – odbicie dwukrotne od powierzchni gładkich,  
 c) – odbicie od powierzchni spełniającej kryterium  $\lambda/8 \cos \theta_p < \sigma(h) < \lambda/2 \cos \theta_p$ ,  
 d) – odbicie od powierzchni spełniającej kryterium  $\lambda/2 \cos \theta_p < \sigma(h)$

sta prawdopodobieństwo odbicia fal w innych kierunkach (ryc. 14.7.4c). Przykładem może być obraz powierzchni jeziora. W bezwietrzny dzień na zdjęciu mikrofalowym jezioro będzie czarne, ponieważ przy odbiciu zwierciadlanym antena nie zarejestruje fali odbitej. Jeśli jednak na powierzchni wody pojawią się fale, to w zależności od ich wysokości i kierunku obraz jeziora na zdjęciu będzie mozaiką różnych poziomów szarości. Przy szorstkości większej niż połowa długości fali rozpraszanie we wszystkich możliwych kierunkach na ogół staje się jednakowo prawdopodobne (ryc. 14.7.4d).

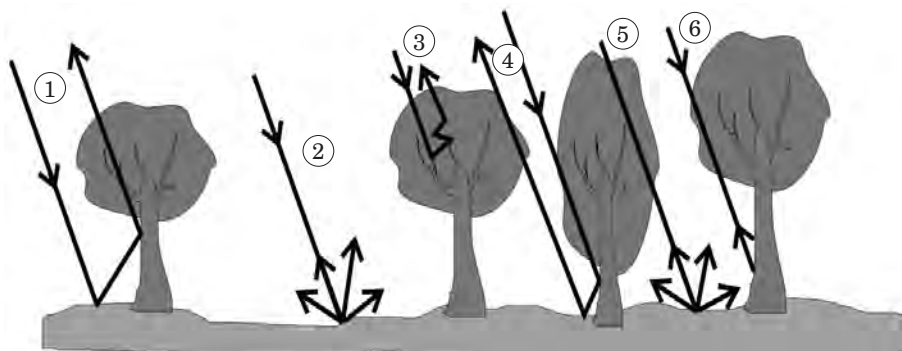
Z fizycznego punktu widzenia na oddziaływanie fali elektromagnetycznej z danym obiektem wpływa jego kształt oraz względna przenikalność elektryczna  $\epsilon_r$ . Metale mają bardzo dużą względną przenikalność elektryczną ( $\epsilon_r > 1000$ ), więc bardzo silnie odbijają mikrofales. Przy odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej konstrukcje metalowe są dobrze widoczne na zdjęciach SAR. Przenikalność elektryczna materiałów, z których składają się skały, gleby, rośliny bądź niemetalowe konstrukcje wytworzone przez człowieka, jest na ogół znacznie mniejsza niż metali. Bardzo duże znaczenie ma natomiast zawartość wody w danym ośrodku rozpraszającym. Woda ma większą względną przenikalność elektryczną ( $\epsilon_r = 80$ ) niż większość naturalnych materiałów (dielektryków) znajdujących się na powierzchni Ziemi. Przenikalność elektryczna nie tylko determinuje proces rozpraszania fal elektromagnetycznych, ale także określa wielkość pochłaniania fal w danym ośrodku. Im większa zawartość wody, tym silniejsze rozpraszanie i tym mniejsza głębokość, na którą fala może wnikać w dany ośrodek, np. w glebę. Dlatego przy ustabilizowanej szorstkości obraz gołej gleby może mieć znacznie jaśniejszy ton na zdjęciu mikrofalowym, jeśli zostało ono wykonane bezpośrednio po deszczu. Wielkość przenikalności elektrycznej zależy od częstości fal elektromagnetycznych i np. dla pasma C nawet przy małej wilgotności głębokość penetracji gleby jest niewielka (rzędu długości fali). Fale z pasma L lub P mogą natomiast penetrować suche

podłoże na znaczną głębokość. Dzięki temu, na przykład, na zdjęciach mikrofalowych wykonanych z pokładu wahadłowca przez urządzenie SIR-C/X-SAR w paśmie L można zobaczyć różne struktury ukryte na głębokości ok. 2 m pod piaskami pustyni.

Rozpraszanie mikrofal od warstwy roślinnej jest procesem złożonym, zachodzącym nie tylko na powierzchni, ale także w całej objętości warstwy. Wielkość wstecznego rozpraszania zależy od pokroju roślin, czyli wielkości i orientacji podstawowych elementów ich struktury, takich jak łodygi, liście, pnie, gałęzie itp. oraz od zawartości wody w roślinach. Na intensywność rozproszonej fali ma wpływ układ całej warstwy roślinnej, określony przez skład gatunkowy, gęstość roślin oraz obecność w warstwie regularnych struktur pionowych (piętrowość) lub poziomych (rzędy), a także orientacja tych struktur względem kierunku padania wiązki mikrofalowej. Bardzo istotnym czynnikiem jest stopień pokrycia gleby przez rośliny. Od tego czynnika zależy proporcja pomiędzy rozpraszaniem pochodzącym bezpośrednio od gleby (oddziaływanie typu 2 na ryc. 14.7.5), pochodzącym bezpośrednio od roślin (oddziaływanie 3 i 6) oraz rozpraszaniem wynikającym z interakcji pomiędzy warstwą roślinną a glebą (oddziaływania 1, 4 i 5).

Fale spolaryzowane oddziałują głównie z tymi elementami struktury warstwy rozpraszającej, które leżą w płaszczyźnie polaryzacji. Na przykład fale spolaryzowane pionowo oddziałują głównie z łodygami, pniami drzew itp. Zmiana polaryzacji fali jest rezultatem wielokrotnego rozpraszania w objętości warstwy, a zatem rejestrowana intensywność polaryzacji krzyżowej jest mniejsza niż polaryzacji zgodnej.

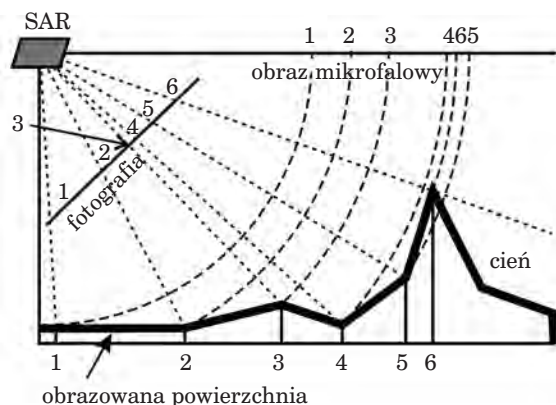
Kąt padania mikrofal określa proporcje między udziałem warstwy roślinnej i gleby w procesie rozpraszania. Im mniejszy kąt padania, tym większy udział gleby w tym procesie, i odwrotnie – przy dużych kątach padania rozpraszanie odbywa się głównie w warstwie roślinnej.



**Ryc. 14.7.5** Mechanizm rozpraszanie mikrofal na obszarze lasu:  
 1 – odbicie dwukrotne gleba-pień, 2 – rozpraszanie od gleby, 3 – rozpraszanie w koronie drzewa, 4 – odbicie dwukrotne pień-gleba, 5 – rozpraszanie fali ostabionej w koronie od gleby, 6 – bezpośrednie odbicie od pnia

Spośród czynników środowiskowych największy wpływ na rozpraszanie mikrofal ma występowanie opadów w okresie bezpośrednio poprzedzającym rejestrację obrazu lub w trakcie rejestracji. Jest to czynnik bardzo niekorzystnie wpływający na jakość obrazu i możliwość interpretacji jego treści. Gwałtowny wzrost wilgotności warstwy powierzchniowej gleby lub warstwa wody na powierzchni gleby i roślin wpływają na zmniejszenie kontrastu obrazu mikrofalowego i w dużym stopniu utrudniają jego prawidłową interpretację. Opady lub obecność rosy powodują wzrost współczynnika wstecznego rozpraszania i zmniejszają jego zróżnicowanie. Również silny wiatr może zmienić warunki rozpraszania mikrofal poprzez zwiększenie szorstkości powierzchni. Zniszczenia spowodowane zdarzeniami klimatycznymi, takimi jak ulewne deszcze, grad, przymrozki, bądź spowodowane atakami szkodników mogą znaleźć swoje odzwierciedlenie na obrazach mikrofalowych, jeśli tylko dotyczą odpowiednio dużych obszarów.

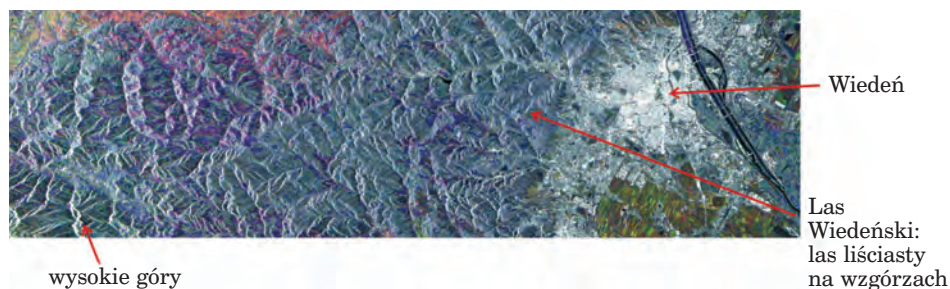
Rzeźba terenu wpływa na proces rozpraszania poprzez zmienność lokalnego kąta padania. W zależności od stopnia i kierunku nachylenia stoków mogą pojawiać się różne zniekształcenia obrazu, takie jak pozorne skrócenie stoków, inwersja podnóży i wierzchołków oraz cienie (ryc. 14.7.6). Zniekształcenia te mogą prowadzić do nieodwracalnej utraty informacji, a w każdym razie znacznie utrudniają klasyfikację treści obrazu. Ryc. 14.7.7 przedstawia barwną kompozycję zdjęć mikrofalowych, na której zobrazowane są tereny górzyste. W wyniku efektu skrócenia stoków na zdjęciu widoczne są lokalne rozjaśnienia, które podkreślają obecność zboczy nachylonych w kierunku anteny. W związku z występowaniem takich zniekształceń tworzenie ortofotomapy na podstawie zdjęć mikrofalowych dla obszarów o urozmaiconej rzeźbie wymaga zastosowania złożonych korekcy geometrycznych i radiometrycznych. Wykonanie takich korekcy jest jednak często niezbędne dla prawidłowej interpretacji zdjęcia.



**Ryc. 14.7.6.**  
Zniekształcenia występujące na zdjęciach SAR dla obszarów o urozmaiconej rzeźbie terenu.  
Przykłady zniekształceń: skrócenie stoków nachylonych w kierunku anteny – 1, 2, 3; wydłużenie stoku odchylnego od anteny – 3, 4; zmiana kolejności obrazu podnóży i wierzchołka – 4, 5, 6

Interpretację zdjęć mikrofalowych ułatwia stosowanie kompozycji barwnych. Są to na ogół kompozycje zdjęć wykonanych w tej samej konfiguracji w różnych terminach (ryc. 14.7.7) lub kompozycje zdjęć wykonanych w tym samym terminie, ale z różną kombinacją polaryzacji fali padającej i odbitej (ryc. 14.7.8). W celu wyznaczenia parametrów charakteryzujących bieżący stan warstwy glebowo-roślinnej, takich jak wilgotność lub biomasa, na podstawie wartości rejestrowanych przez SAR, stosuje się modele oparte na mechanizmach oddziaływania mikrofal ze środowiskiem. Mechanizmy te są złożone, a więc modele także są na ogół bardzo skomplikowane i nie zawsze przynoszą oczekiwane rezultaty. Niemniej wciąż prowadzone są prace zmierzające do ich udoskonalania.

Pewne metody interpretacji są przeznaczone wyłącznie dla zdjęć z zakresu mikrofalowego. Są to metody, w których wykorzystywana jest nie tylko amplituda, ale także faza fali elektromagnetycznej. Dane dotyczące fazy, uzyskane z pojedynczego zdjęcia, nie mają zastosowania. Do użytku nadaje się wyłącznie informacja o różnicy faz pozyskiwana na podstawie dwu zdjęć przedstawiających te same obiekty w niezmiennym stanie.

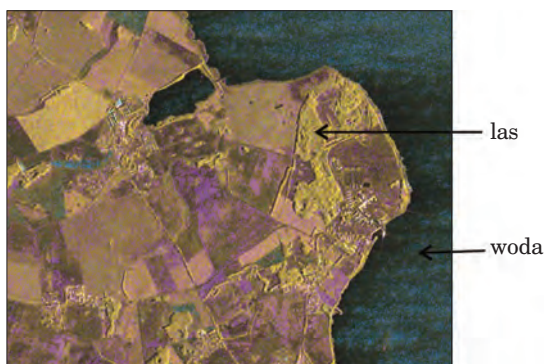


**Ryc. 14.7.7.** Wiedeń i jego okolice.

Kompozycja zdjęć z ENVISAT ASAR w polaryzacji VV (R: 15.09.2003, G: 07.07.2003, B: 24.03.2003), (źródło: European Space Agency, <http://earth.esa.int/cgi-bin/satimsgsql.pl?search=&sat=0>)

**Ryc. 14.7.8.** Fragment wybrzeża Kubitzer Bodden.

Kompozycja zdjęć z satelity TerraSAR-X wykonanych w paśmie X (kolejność kanałów R: VV, G: HH, B: VV-HH), (źródło: DLR, <http://www.infoterra.de/image-gallery/images.html>)



Dane tego typu wykorzystywane są w metodach analizy zdjęć mikrofalowych, znanych jako techniki POLSAR, INSAR i POLINSAR. W polarymetrii mikrofalowej (POLSAR) wykorzystywane są wartości amplitudy dla czterech polaryzacji oraz różnice faz między poszczególnymi kanałami polaryzacji. Badania w zakresie polarymetrii dostarczają szczegółowych informacji o obiektach rozpraszających. Interferometria mikrofalowa (INSAR) dostarcza informacji o wysokości obiektów. W interferometrii mikrofalowej wykorzystywane są zdjęcia tego samego obszaru wykonane z różnych, przesuniętych względem siebie pozycji platformy. Zdjęcia mogą być wykonane równocześnie przez dwie anteny SAR rozmieszczone w pewnej odległości na wspólnej platformie (samolocie lub satelicie). Można również użyć zdjęć wykonanych w trakcie ponownych przelotów platformy z pojedynczą anteną SAR nad danym terenem po zbliżonej trajektorii. Odpowiednie złożenie amplitudy i fazy dwóch zdjęć daje produkt zwany interferogramem. Interferogramy przedstawiane są w postaci barwnych map, na których kolor prążków interferencyjnych odpowiada różnicy faz pochodzących z dwóch rejestracji. Różnica faz wynika z różnicy dróg, jakie przebywa sygnał do i od obiektu obrazowanego przy różnych pozycjach urządzeń obrazujących, a struktura prążków interferencyjnych na interferogramie jest związana ze zmianami wysokości obrazowanego terenu.

Na podstawie interferogramu można wyznaczyć numeryczny model pokrycia terenu (NMPT), przedstawiający średnią wysokość, na której mikrofałe ulegają odbiciu. NMPT zawiera więc dane o wysokości terenu pokrytego skałami, gołą glebą, a także o wysokości rozmaitych powierzchni nieprzepuszczających wody, takich jak np. dachy budynków. Na obszarach lasów mikrofałe są rozpraszane na różnej wysokości pomiędzy powierzchnią gruntu a koronami drzew w zależności od zastosowanej długości mikrofal i kąta obserwacji. Na przykład fale z pasma X są rozpraszane w koronach drzew, a więc NMPT uzyskany na podstawie interferogramu z tego pasma może stanowić podstawę do szacowania średniej wysokości drzewostanów. Wysokość tę wyznacza się przez odjęcie od NMPT numerycznego modelu terenu (NMT), zawierającego dane o wysokości gruntu. Trzeba przy tym zaznaczyć, że na obszarach pokrytych roślinnością często nie udaje się uzyskać prążków interferencyjnych z powodu dekorelacji zdjęć. Dekorelacja jest wynikiem zmian obiektów rozpraszających w granicach poszczególnych pikseli, które zachodzą pomiędzy dwoma rejestracjami zdjęć. Zmiany te mogą być spowodowane wiatrem, zmianą wilgotności lub przemianami związanymi z cyklem życiowym roślin, gdy zestawia się zdjęcia wykonane w długim odstępie czasu. Stopień skorelowania zdjęć ocenia się na podstawie lokalnego współczynnika korelacji wzajemnej. Wartość bezwzględna tego współczynnika przedstawiana jest w postaci map koherencji, czyli map zgodności fazowej. Okazuje się, że mapy koherencji stanowią wartościowy materiał do oceny rozpraszania objętościowego w ośrodkach roślinnych, nawet przy znacznym poziomie dekorelacji zdjęć. Mapy koherencji służyły np. do przeprowadzenia szczegółowych klasyfikacji la-

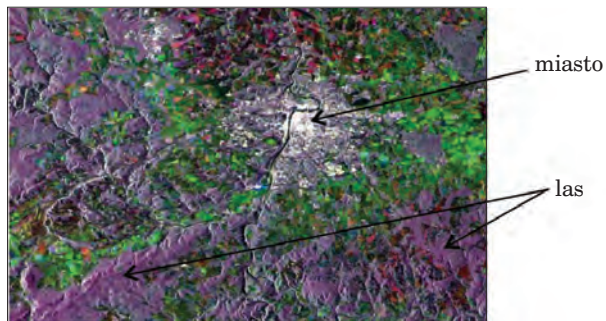
sów Syberii. Bardzo obiecujące są badania prowadzone z jednoczesnym wykorzystaniem metod polarymetrii i interferometrii (POLINSAR), np. badania zmierzające do wyznaczania wysokości lub grup wiekowych drzewostanów.

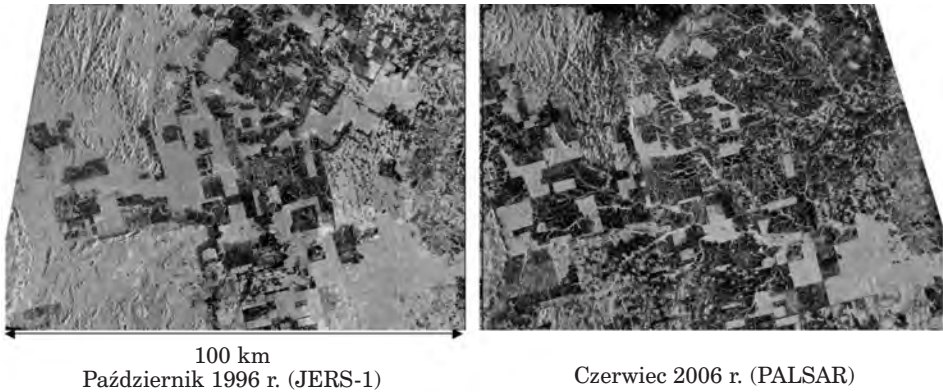
#### 14.7.4. Zastosowania zdjęć mikrofalowych

Mimo trudności na etapie interpretacji, spowodowanych przede wszystkim zjawiskiem plamkowania oraz złożonością samego procesu rozpraszania mikrofal, zdjęcia mikrofalowe znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach, uzupełniając, a czasem zastępując zdjęcia z zakresu optycznego i podczerwieni. Zdjęcia te są szczególnie przydatne do badania mórz i oceanów (określania prędkości wiatru, zasięgu plam ropy), stanu pokrywy lodowej i śnieżnej, kartowania obszarów lądowych (ryc. 14.7.9), oceny wilgotności gleb i biomasy, rozpoznawania upraw, monitorowania obszarów tropikalnych (ryc. 14.7.10), monitorowania powodzi (ryc. 14.7.11) i pożarów itp. Interferometria mikrofalowa jest uznaną technologią wykorzystywaną do tworzenia modeli terenu i obserwacji niewielkich (rzędu długości fali) zmian wysokości.

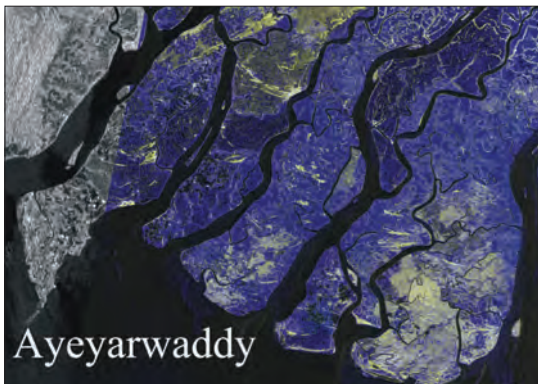
Zdjęcia mikrofalowe były wykorzystywane do identyfikacji i określania zasięgu pokrywy leśnej, rozpoznawania typów lasu i dominujących w nim gatunków, określania struktury przestrzennej lasu, klasyfikacji grup wiekowych drzewostanów. Powstały modele zależności sygnału mikrofalowego od różnych parametrów drzewostanów: wysokości, liczby pni, zwarcia koron, zasobności. Analizy prowadzone na podstawie zdjęć wykonanych w paśmie C i L przy zastosowaniu technologii INSAR pozwoliły na wyznaczanie miąższości pnia. Możliwość pozyskiwania zdjęć SAR przy różnych długościach mikrofal (pasma X, C i L) i z pełnym zakresem polaryzacji stwarza warunki do lepszego wykorzystania tych zdjęć w badaniach i inwentaryzacji lasów. Bardzo obiecujące są badania wykonywane na podstawie zdjęć lotniczych pozyskiwanych w zakresie pasma P.

**Ryc. 14.7.9.** Praga i jej okolice.  
Kompozycja zdjęć z satelity ERS-2 (pasmo C) pozyskanych w trzech terminach, (źródło: European Space Agency, <http://earth.esa.int/cgi-bin/ssatimgsqpl.pl?search=&sat=0>)





**Ryc. 14.7.10.** Porównanie dwu zdjęć obszaru Amazonii wykonanych w paśmie L z satelitów JERS-1 i ALOS. Ilustrują one zmniejszenie powierzchni lasów (jaśniejsze tony szarości) na przestrzeni 10 lat, (źródło: Japan Aerospace Exploration Agency, [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/gallery/new\\_arr.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/gallery/new_arr.htm))



**Ryc. 14.7.11.** Delta Irawadi w Birmie. Obszary zalane w wyniku powodzi, która rozpoczęła się 2 maja 2008 r., widoczne są w odcieniach barwy niebieskiej. Kompozycja barwna zdjęć z ALOS PALSAR w paśmie L (R: 24.04.2008, G: 24.04.2008, B: 06.05.2008), (źródło: Japan Aerospace Exploration Agency, [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/gallery/new\\_arr.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/gallery/new_arr.htm))

Warto również wspomnieć o zastosowaniach mikrofal w badaniach prowadzonych z wykorzystaniem urządzeń naziemnych, zwanych georadarami. Georadar to urządzenie, które wysyła sygnały mikrofalowe przenikające powierzchnię gruntu i odbiera sygnały odbite i rozproszone na różnych głębokościach podłoża. Głębokość wnikania fal zależy od stałej dielektrycznej ośrodka, a zmiany stałej dielektrycznej oznaczają zmianę składu i (lub) struktury ośrodka. Po złożonej analizie zarejestrowanych sygnałów zmienność stałej dielektrycznej jest przedstawiana na dwuwymiarowych profilach. Na podstawie profilów wnioskuje się o typie i ułożeniu warstw podłoża, o stopniu nasycenia warstw wodą oraz o obecności różnych obiektów pod powierzchnią gruntu. Oprócz licznych zastosowań w geologii, hydrologii i w rozwiązywaniu rozmaitych zagadnień technicznych wymagających wiedzy o strukturze podłoża, georadary są również

używane w badaniach lasów. Za ich pomocą można bezinwazyjnie prześledzić strukturę przestrzenną systemów korzeniowych, a także oszacować masę korzeni. Georadary wykorzystuje się również do bezinwazyjnego badania pni żywych drzew w celu wykrycia w ich wnętrzu pustych przestrzeni lub stref o zaburzonej strukturze.

## **14.8. Inne techniki w teledetekcji i fotogrametrii**

### **14.8.1. Zdjęcia niemetryczne**

dr inż. EMILIA WIŚNIEWSKA – Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Wydział Urządzania Lasu i Geoinformatyki

Sporządzanie zdjęć fotogrametrycznych podlega zasadom wykonywania prac fotolotniczych. Muszą być one prowadzone z pokładu specjalnie adaptowanego środka latającego, wyposażonego w oprzyrządowanie nawigacyjne, kamerę pomiarową i przyrządy pomocnicze. Zasady techniczne i porządkowe wykonywania prac fotolotniczych dotyczą zarówno projektowania i wykonywania lotów fotogrametrycznych, obróbki laboratoryjnej, badania jakości zdjęć, jak i prac związanych z ich dalszymi przetworzeniami. Wśród kryteriów, które muszą spełniać zdjęcia fotogrametryczne, znajdują się ściśle określone parametry techniczne kamer. Aby aparat fotograficzny wykonywał wysokiej jakości zdjęcia wykorzystywane do celów pomiarowych, jego konstrukcja powinna gwarantować zachowanie niezmiennych (stałych) elementów orientacji wewnętrznej. Ponadto do wykonawstwa pomiarowych zdjęć lotniczych dopuszcza się jedynie kamery posiadające aktualne metryki kalibracji. Ponadto lot fotogrametryczny realizowany jest zgodnie z projektem nalotu i jego uwarunkowaniami technicznymi. Przestrzeganie tych zasad sprawia, że zdjęcia lotnicze mogą być wykorzystywane jako materiał podstawowy dla wykonawców zadań geodezyjnych i kartograficznych, między innymi przy sporządzaniu map topograficznych i innych map tematycznych.

Potrzeba szybkiego, operacyjnego i niewysokiego w kosztach pozyskiwania zdjęć prezentujących zjawiska i zmiany na niedużych obszarach, na terenach trudno dostępnych lub rozproszonych, stała się impulsem do prowadzenia przez różne instytucje doświadczeń i badań zmierzających do wykonywania dla tego typu obszarów zdjęć niemetrycznych. Zdjęcia te mogą nie być tak wysokiej jakości, jak zdjęcia fotogrametryczne, ale mogą być wystarczająco dokładnym i aktualnym, co jest niezwykle istotne, materiałem dokumentującym bieżący stan na danym terenie. Tego typu zob-

razowania, choć nie gwarantują tak wysokiej jakości i kartometryczności, jak zdjęcia w pełni fotogrametryczne, pozwalają na szybką wizualizację zjawisk i analizę zmian, które zaszły na sfotografowanym terenie.

Do badań nad technologiami wykonywania zdjęć niemetrycznych z lotu ptaka przyczynił się również rozwój nowoczesnych technologii, w tym dostęp do amatorskich aparatów cyfrowych o coraz lepszych parametrach technicznych. Istotnym parametrem umożliwiającym adaptację wybranych modeli aparatów fotograficznych do wykonywania zdjęć z pokładów środków latających jest możliwość ich zdalnej obsługi oraz odpowiednio krótki interwał czasowy pomiędzy rejestracją kolejnych zdjęć.

Z punktu widzenia monitorowania lasu tego typu rozwiązywania powinny gwarantować nie tylko zachowanie stabilności lotu, a w przypadku zdjęcia odpowiednią jakość i szczegółowość, ale także prezentowanie w pojedynczym kadrze stosunkowo dużego obszaru. Istotnymi parametrami środków latających, będącymi nośnikami aparatów fotograficznych rejestrujących obrazy powierzchni Ziemi, są także: maksymalny czas lotu, czas dolotu od miejsca startu do regionu monitorowanego oraz system gwarantujący bezpieczeństwo przeprowadzanego lotu.

#### **14.8.1.1. Bezzałogowe środki latające rejestrujące zdjęcia niemetryczne**

Nośnikami aparatów cyfrowych mogą być zarówno załogowe, jak i bezzałogowe środki latające. Rozwój bezzałogowych środków latających do celów monitoringowych jest ściśle powiązany z technologiami wojskowymi, w których są głównie wykorzystywane jako cele powietrzne oraz do obserwacji i śledzenia. Przedmiotem badań i doświadczeń jest także możliwość ich wykorzystania również do innych celów (np. monitorowania lasów), nie tylko obronnych i prewencyjnych.

Podstawowym zadaniem, mają sprostać systemy bezzałogowe, jest zdolność pozyskiwania informacji o wybranych obszarach przy minimalizacji zaangażowanych sił i środków, a także przeprowadzanie lotów w terenie, który może być niebezpieczny lub szkodliwy dla lotów załogowych. W większości rozwiązań minimalizowana jest także liczba osób zaangażowanych w wykonanie tego typu lotu, choć wśród systemów bezzałogowych środków latających są i takie, które wymagają obsługi liczniejszej niż przy typowych lotach załogowych (Everaerts 2008), gdyż każdy lot musi być kontrolowany ze stanowiska naziemnego. Ponadto w wypadku lotów w przestrzeni lotów kontrolowanych niezbędny byłby także kontakt ze służbami kontroli ruchu lotniczego. Do wykonywania bezzałogowych lotów w przestrzeni lotów kontrolowanych muszą być stworzone odpowiednie systemy gwarantujące bezpieczeństwo i bezkolizyjność innym użytkownikom przestrzeni powietrznej. Niezbędne jest również dostosowanie uregulowań prawnych, pozwalających na prowadzenie tego typu lotów.

Bezzałogowe środki latające to zarówno śmigłowce, samoloty, jak i inne platformy, np. balony, sterowce. Różnią się one wieloma parametrami, takimi jak: masa własna, udźwig, typ napędu (spalinowy lub elektryczny), zakres osiągalnych prędkości i pułapów lotu, maksymalny czas lotu i zasięg (promień) operowania, technika startu i lądowania, system sterowania środkiem latającym. Wobec tak wielu zmiennych nie wszystkie z bezzałogowych środków latających mogą być adaptowane do pozyskiwania zdjęć o odpowiedniej jakości. Muszą spełniać kryteria gwarantujące wykonywanie lotów stabilnych, na odpowiednim pułapie i z założoną prędkością. Powinny także umożliwiać zamontowanie wszelkiej niezbędnej aparatury pozwalającej na łączność z bezzałogowym środkiem latającym ze stacji naziemnej, na zdalne sterowanie środkiem latającym, połączone z wykonywaniem zdjęć.

Bezzałogowe środki latające stwarzają możliwość rozpowszechniania danych teledetekcyjnych, gdyż koszty ich pozyskiwania będą niższe. Łatwiejszy dostęp do tego typu danych może także spowodować zwiększenie liczby użytkowników teledetekcji, i to z wielu branż. Niestety, korzystanie z bezzałogowych środków latających jest dziś trudne lub wręcz niemożliwe. Tak będzie dopóty, dopóki nie zostaną zapewnione odpowiednie środki bezpieczeństwa lotów oraz nie powstaną systemy gwarantujące bezkolizyjność lotów z innymi użytkownikami przestrzeni powietrznej. Kolejnym warunkiem niezbędnym do wykonywania tego typu lotów jest wprowadzenie odpowiednich regulacji prawnych w tym zakresie, podobnych do tych, które dotyczą załogowych środków latających i ich pilotów. Dopóki się to nie stanie, bezzałogowe loty będą się mogły odbywać tylko w wydzielonych z ruchu przestrzeniach powietrznych, aby uniknąć kolizji z innymi uczestnikami ruchu powietrznego.

Loty bezzałogowych środków latających odbywają się na bardzo różnych wysokościach. Powszechnie stosowane są pułapy niskie. Wiele eksperymentów z bezzałogowymi środkami latającymi i zastosowaniami teledetekcyjnymi prowadzonych jest na wysokości 150–200 m (Eve-raerts 2008). Inną przestrzenią, w której testowane są zupełnie innego rodzaju bezzałogowe środki latające, są bardzo wysokie pułapy (powyżej 15 km). Są one przeznaczone przede wszystkim do wykonywania długich misji, np. przez pięć lat lub dłużej, a same platformy charakteryzują się dużym udźwigniem, pozwalającym na wyposażenie ich w specjalistyczną i dedykowaną aparaturę. Mając na uwadze zastosowania służące pozyskiwaniu danych teledetekcyjnych dla obszarów leśnych o niewielkim areale, omówimy bezzałogowe środki latające do wykonywania lotów na niskich pułapach, poniżej ruchu lotniczego. Należy jednak pamiętać, że i w tym wypadku wymogiem niezbędnym takich lotów jest bezpieczeństwo i zapewnienie odpowiedniej separacji od innych użytkowników przestrzeni powietrznej. Nawet zagwarantowanie stałego podglądu z wykorzystaniem przekazu wideo z pokładu bezzałogowego środka latającego do naziemnego stanowiska operatora lotu nie zapewnia pełnego bezpieczeństwa. Niestety,

bezzałogowe środki latające są zbyt małe i mało znane, by była pewność, że inni użytkownicy przestrzeni powietrznej je zauważą i wykonają manewr w celu uniknięcia kolizji. Dlatego też stosowaną i zalecaną metodą zapewnienia bezpieczeństwa lotów jest stała obserwacja przestrzeni w otoczeniu bezzałogowego środka latającego (z poziomu ziemi, wzniesień, wież, podnośników), po to, by w wypadku pojawienia się załogowych statków powietrznych odpowiednio zareagować i zmienić kurs lub wręcz zakończyć misję. Niestety, wiąże się to z dłuższym przygotowaniem stanowiska pracy operatorów naziemnych do obsługi tego typu lotów.

Mimo uwarunkowań narzucających dodatkowe czynności związane z wykonawstwem zdjęć z bezzałogowych środków latających wydaje się, że tego typu rozwiązania pozwalające na rejestrację zdjęć niemetrycznych mogą znaleźć zastosowanie w praktyce leśnej.

Wybrane bezzałogowe środki latające, wyposażone w amatorskie aparaty cyfrowe i przystosowane na potrzeby monitorowania obszarów leśnych, były prezentowane głównie na pokazach laboratoryjnych i podczas testowych lotów w terenie. Testy terenowe przeprowadzano z wykorzystaniem dwóch bezzałogowych śmigłowców. Pierwszy z nich to bardzo lekki (ważący mniej niż 1 kg), czterowirnikowy śmigłowiec MD4-200 o napędzie elektrycznym, produkowany przez niemiecką firmę Microdornes GmbH (ryc. 14.8.1.1a). Może on wykonywać 20-minutowe loty do wysokości 150 m. Drugi śmigłowiec to model MS EAGLE, który w ramach współpracy Politechniki Gdańskiej i firmy Microsystem został zaadaptowany do wykonywania zautomatyzowanych lotów wraz z rejestracją zdjęć (ryc. 14.8.1.1b). Ma on napęd spalinowy, waży (wraz z aparaturą) mniej niż 15 kg, wznosi się na pułapy do 200 m. Może odbywać nieco dłuższe loty od pierwszego modelu, ale jego pilotaż jest trudniejszy od modelu czterowirnikowego. Obydwa prezentowane urządzenia mają nawigację opartą na systemie GPS, aparaturę do wykonywania seryjnych zdjęć zarówno



a



b

**Ryc. 14.8.1.1.** Przykłady bezpilotowych śmigłowców mających na celu wykonywanie zdjęć podczas zautomatyzowanych i zdalnie sterowanych lotów: a – model MD4-200 firmy Microdornes GmbH, b – model MS EAGLE, zaadaptowany przez Politechnikę Gdańską i firmę Microsystem

w trybie lotu automatycznego, jak i sterowanego za pomocą laptopa. Pierwsze testowe loty wykazały, że zaprezentowane systemy wymagają jeszcze pewnego dostosowania technicznego, pozwalającego na wykonywanie stabilnych i odpowiednio długich lotów nad obszarami lasów. Zapewne tego typu adaptacje bezzałogowych śmigłowców będą dostępne w niedługim czasie.

Podobnie jest z bezzałogowymi samolotami przeznaczonymi do szybkiego pozyskiwania wiarygodnych, fotograficznych danych przestrzennych. Tego typu środki latające są projektowane i oferowane do wspomagania różnych służb, np. do wsparcia działań wojska, policji, służb ratowniczych, kontroli ruchu ulicznego. Jeden z takich samolotów został skonstruowany w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Jest to miniaturowy, bezzałogowy system operacyjny HOB-bit. Z kolei na Politechnice Poznańskiej prowadzone są prace badawcze mające na celu stworzenie kompleksowego systemu monitorowania z wykorzystaniem bezpilotowego statku powietrznego Żuraw.

### **14.8.1.2. Załogowe środki latające rejestrujące zdjęcia niometryczne**

Innym sposobem pozyskiwania niefotogrametrycznych zdjęć lotniczych może być wykorzystanie w roli nośnika aparatu fotograficznego załogowego samolotu typu awionetka (np. samolotu wykorzystywanego w LP do patrolowania ppoż.). Samolot tego typu, oprócz standardowych urządzeń nawigacyjnych, powinien być wyposażony w aparat fotograficzny zdalnie obsługiwany przez operatora siedzącego w kabinie samolotu oraz urządzenie wspomagające prowadzenie lotu wzdłuż zaprojektowanej wcześniej trasy.

Tego typu wstępne testy wykonywane były w latach 2008 i 2009 z inicjatywy Dyrekcji Generalnej LP (przez DGLP i we współpracy z ORWLP w Bedoniu i RDLP w Pile), z wykorzystaniem czarterowanego przez Lasy Państwowe samolotu patrolowego Cessna 172. Ich celem było zaprojektowanie i wykonanie montażu aparatu fotograficznego Canon EOS 450D (tab. 14.8.1.1) na kadłubie samolotu, przetestowanie łączności pomiędzy aparatem fotograficznym a laptopem obsługiwany w kabinie samolotu oraz takie skonfigurowanie aparatu cyfrowego, aby migawka była wyzwalana w określonym interwale czasowym. Po montażu i skonfigurowaniu aparatury wykonano przelot, podczas którego zarejestrowano zdjęcia wcześniej wybranych oddziałów z nadleśnictw Złotów i Wronki (tab. 14.8.1.2). Trasa lotu została wytyczona na podkładzie leśnej mapy numerycznej i wprowadzona do systemu GPS AgNav (wykorzystywanego zwykle do naprowadzania samolotów do oprysków).

**Tabela 14.8.1.1.****Parametry aparatu fotograficznego, którym zarejestrowano zdjęcia wybranych oddziałów w nadleśnictwach Złotów i Wronki**

Nazwa aparatu	Canon EOS 450D
Przetwornik obrazu	22,2 mm × 14,8 mm CMOS
Rozdzielczość	12,2 megapikseli
Liczba kolumn i wierszy matrycy	4272 × 2848
Wymiar pojedynczego piksela	5,197 μm × 5,197 μm
Ogniskowa obiektywu – odpowiednik małego obrazka	28–87 mm (standardowy obiektyw)
Częstotliwość wykonywania zdjęć	3,5 kl/s RAW
Format zapisu	JPEG i RAW
Transmisja USB	2.0 Hi-Speed
Inne	system oczyszczania matrycy

**Tabela 14.8.1.2.****Parametry lotu oraz oczekiwane przybliżone parametry zdjęć zarejestrowanych nad wybranymi oddziałami z nadleśnictw Złotów i Wronki**

Parametr	Obszar testowy Złotów	Obszar testowy Wronki
Przybliżona wysokość lotu	700 m	700 m
Projektowany odstęp sąsiednich szeregów (baza poprzeczna)	$b_q = 80$ m	$b_q = 80$ m
Ogniskowa zdjęć	50 mm	28 mm
Przybliżona skala zdjęć	1:14 000	1:25 000
Orientacyjny terenowy wymiar piksela	7,2 cm	13,0 cm
Orientacyjne wymiary (terenowe) pojedynczego zdjęcia	310 m × 270 m	555 m × 370 m
Średni interwał czasowy wykonywania kolejnych zdjęć	5 s	4 s

Zarejestrowane zdjęcia zostały zgeometryzowane. Następnie oceniono jakość pojedynczych zdjęć, a także ich pokrycie podłużne, poprzeczne oraz nachylenia wynikające z przechyłu samolotu.

**Ryc. 14.8.1.2.**

Przykładowe fragmenty zdjęć zarejestrowanych z samolotu patrolowego:

*a* – zdjęcie z obszaru testowego Złotów o rozdzielczości 7 cm,

*b* – zdjęcie z obszaru testowego Wronki o rozdzielczości 13 cm



*a*

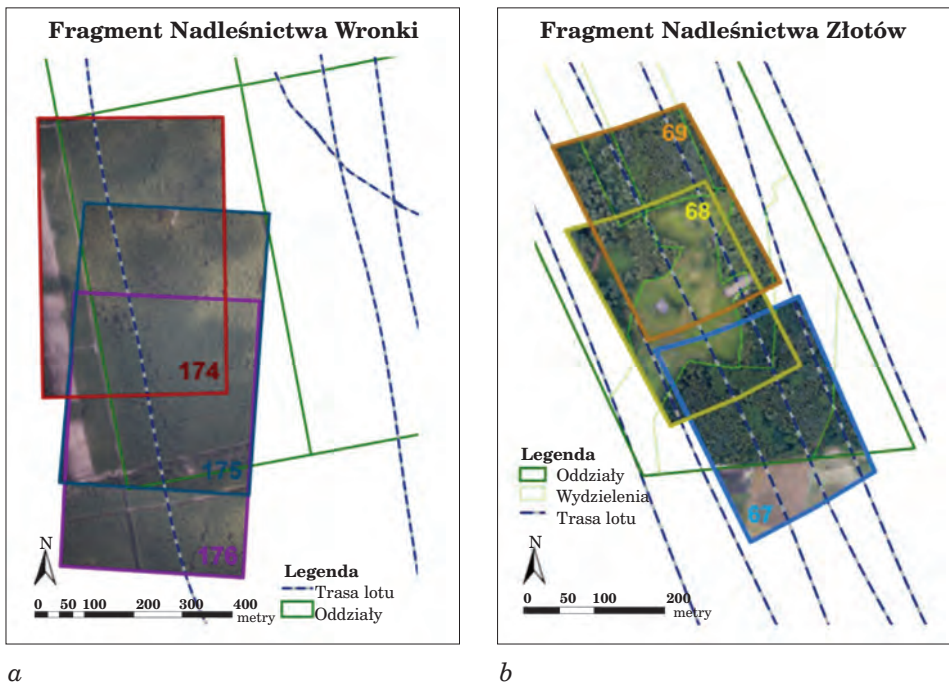


*b*

Biorąc pod uwagę czytelność, szczegółowość i ostrość zdjęć, jakość pojedynczych fotografii w większości przypadków wydaje się zadowalająca (ryc. 14.8.1.2), a nawet – oceniając wyłącznie ich rozdzielczość przestrzenną (terenowy wymiar pojedynczego piksela) – testowane zdjęcia mają zbyt wysoką rozdzielczość (przewyższającą rzeczywistą potrzebę). Ich rozdzielczość przestrzenna to 7 cm (dla Złotowa) i 13 cm (dla Wronek), podczas gdy wystarczająca byłaby  $20 \div 50$  cm. Zmniejszenie rozdzielczości przestrzennej spowodowałoby także, że pojedynczy kadr zdjęcia przedstawiałby większą powierzchnię, dzięki czemu zarówno proces geometryzacji (lub ortorektyfikacji), jak i mozaikowania zdjęć byłby prostszy i mniej czasochłonny.

Pokrycie podłużne zdjęć *p* (zależne od prędkości lotu i interwału spustu migawki) było wysokie i zadowalające (ryc. 14.8.1.3). Pokrycie poprzeczne zdjęć *q* oceniono pozytywnie jako zadowalające. Jest ono zależne od założonej w fazie projektu lotu szerokości bazy poprzecznej oraz od stabilności lotu, czyli wykonania lotu bez przechyłów wzdłuż zaprojektowanej trasy lotu. Spełnienie tych kryteriów powoduje, że rejestrowane zdjęcia są zdjęciami pionowymi lub prawie pionowymi, a nie nachylnymi.

Pokrycie poprzeczne zdjęć *q* oceniono pozytywnie jako zadowalające. Jest ono zależne od założonej w fazie projektu lotu szerokości bazy poprzecznej oraz od stabilności lotu, czyli wykonania lotu bez przechyłów wzdłuż zaprojektowanej trasy lotu. Spełnienie tych kryteriów powoduje, że rejestrowane zdjęcia są zdjęciami pionowymi lub prawie pionowymi, a nie nachylnymi.



**Ryc. 14.8.1.3.** Ilustracja pokrycia podłużnego zdjęć niometrycznych wykonanych z samolotu patrolowego: a – przykład trzech kolejnych zdjęć z obszaru testowego Wronki, b – przykład trzech kolejnych zdjęć z obszaru testowego Złotów (pokrycie jest mniejsze niż w wypadku zdjęć wykonanych nad Nadleśnictwem Wronki, ale nadal wystarczające)

Przeprowadzony test był testem wstępnym. W kolejnym roku wykonano następne loty samolotem patrolowym. Ich parametry zostały zmodyfikowane, aby rejestrować zdjęcia o zmniejszonej rozdzielczości przestrzennej. Podczas lotów modyfikowano także ustawienia aparatu w celu określenia optymalnych warunków do wykonywania odpowiedniej jakości zdjęć obszarów leśnych. Obecnie prowadzone są konsultacje mające na celu określenie wymagań formalnych związanych z wykonywaniem tego typu lotów, aby rejestrowane zdjęcia spełniały wszelkie wymagania stawiane przez prawo geodezyjne i kartograficzne, prawo lotnicze i inne przepisy związane z tymi dziedzinami.

Wydaje się, że kolejnym etapem prowadzącym do opracowania technologii tworzenia fotomap z niometrycznych zdjęć rejestrowanych z pokładów samolotów patrolowych powinno być wykonanie testów z rejestracją punktów kontrolnych i przeprowadzeniem pełnej ortorektyfikacji zdjęć (Zmarz 2008), a nie – jak to się odbywało na obecnych etapach – geometryzacji wielomianowej.

### 14.8.1.3. Perspektywy wykorzystania zdjęć niemetrycznych w Lasach Państwowych

Zdjęcia niemetryczne, pozyskiwane zarówno z załogowych, jak i bezzałogowych środków latających, mogą stać się w najbliższym czasie materiałem wspomagającym liczne prace prowadzone w Lasach Państwowych. Podstawowe zadania, w jakich mogłyby znaleźć zastosowanie, to między innymi usprawnienie prac aktualizacyjnych w zakresie zmian w geometrii wydzieleń, ale przede wszystkim szybkie pozyskiwanie wiarygodnych danych przestrzennych w sytuacjach klęskowych. Otrzymane dzięki tej metodzie zdjęcia, po zgeometryzowaniu, mogłyby być wykorzystane do:

- szacowania strat spowodowanych m.in. takimi czynnikami, jak wiatrolomy, pożary, okiście, gradacje owadów;
- monitorowania i wykrywania zmian w trudno dostępnych obszarach, mających odzwierciedlenie w zmianach geometrii wydzieleń oraz wynikających z analizy pokrywy roślinnej;
- okresowej aktualizacji leśnej mapy numerycznej.

Jednakże do wdrożenia zdjęć niemetrycznych do codziennej praktyki leśnej należy jeszcze zarówno dostosować nośniki załogowe i bezzałogowe do rejestracji tego typu zdjęć odpowiedniej jakości, jak i zdefiniować formalne warunki prawne, pozwalające na wykonywanie tego typu lotów.

## 14.8.2. Zdjęcia hemisferyczne

dr inż. PAWEŁ STRZELIŃSKI – Uniwersytet Przyrodniczy  
w Poznaniu, Wydział Leśny, Katedra Urządzania Lasu

### 14.8.2.1. Wstęp

Rozwój technologii geomatycznych umożliwia zbieranie danych do coraz bardziej szczegółowej inwentaryzacji lasu, coraz bardziej precyzyjny pomiar drzew i drzewostanów. Dotyczy to m.in. metod teledetekcyjnych, opierających się nie na pomiarze bezpośrednim, lecz wykorzystujących urządzenia optyczne. Szczególnie przydatne są one w pomiarze elementów trudno dostępnych – np. parametrów koron drzew. Do tego celu może być wykorzystywana fotografia hemisferyczna.

Fotografia hemisferyczna (ang. hemispherical photography) to metoda wykorzystująca zdjęcia wykonywane za pomocą obiektywu typu „rybie oko” (ang. fisheye), które rejestrują obraz przestrzeni w zakresie 180°.

Powstający w kadrze obraz jest widoczny w postaci koła i odzwierciedla hemisferę, czyli półkulę. Jest to sposób powszechnie stosowany w astronomii do odwzorowania położenia ciał niebieskich czy w meteorologii do

rejestracji zachmurzenia na całym widocznym nieboskłonie. W badaniach przyrodniczych tę metodę zastosował prawdopodobnie po raz pierwszy Robin Hill w latach 20. ubiegłego wieku do meteorologicznych analiz formacji chmur (Hill 1924). Po II wojnie światowej, wraz z upowszechnieniem fotografii, zdjęcia hemisferyczne znalazły szerokie zastosowanie m.in. w rolnictwie, leśnictwie i meteorologii. Szczególnie przydatne okazały się w badaniach z zakresu ekofizjologii roślin, przy analizach struktury zwarcia koron drzew i krzewów oraz ilości przenikającego przez nie światła.

### 14.8.2.2. Zastosowanie zdjęć hemisferycznych

W naukach przyrodniczych podstawowym zakresem badawczym, w którym wykorzystuje się zdjęcia hemisferyczne, są analizy związane z warunkami świetlnymi w zbiorowiskach roślin. W wypadku lasów najczęściej określa się:

- ażurowość,
- indeks powierzchni liściowej (ang. Leaf Area Index – LAI),
- wielkość promieniowania bezpośredniego i rozproszonego.

Parametry te są o tyle istotne, że są bezpośrednio związane z produkcją biomasy. Szczególnie znaczenie ma znajomość indeksu powierzchni liściowej (LAI), który umożliwia szacowanie biomasy aparatu asymilacyjnego – cechy dotychczas pomijanej podczas inwentaryzacji lasu, prowadzonej tradycyjnymi metodami (zgodnie z obowiązującą w Polsce „Instrukcją urządzania lasu” oraz instrukcją „Wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu”). Możliwość oszacowania LAI, a w konsekwencji biomasy aparatu asymilacyjnego, jest z kolei bardzo ważna przy ocenie możliwości pochłaniania i akumulacji dwutlenku węgla przez ekosystemy leśne (Strzeliński i in. 2008). Niestety, podobnie jak większość metod szacunkowych, także i wykorzystanie zdjęć hemisferycznych do obliczania LAI jest obciążone ryzykiem błędu. Jednym ze sposobów na podniesienie dokładności oszacowania LAI może być analiza porównawcza zdjęć hemisferycznych, wykonanych dla tych samych powierzchni dwukrotnie – z drzewami w stanie ulistnionym i bezlistnym (ryc. 14.8.2.1).

Analiza porównawcza zdjęć z ryc. 14.8.2.1 przedstawia nie tylko różnice pomiędzy udziałem frakcji koron, ażurowością i LAI w drzewostanie ulistnionym oraz po zrzuconiu liści. Tego typu analizy pozwalają także zwiększyć dokładność szacowania LAI. W rzeczywistości LAI uzyskany na podstawie analizy zdjęcia hemisferycznego przedstawionego na ryc. 14.8.2.1a zawiera nie tylko dane o aparacie asymilacyjnym, ale także dane o pniach i gałęziach. Trzeba jednak mieć świadomość, że niestety zwykle zredukowanie informacji ze zdjęcia w stanie ulistnionym (ryc. 14.8.2.1a) o LAI, określone w stanie bezlistnym (ryc. 14.8.2.1b), również nie daje rzeczywistego indeksu powierzchni liściowej. Jest to efekt m.in. przesłaniania

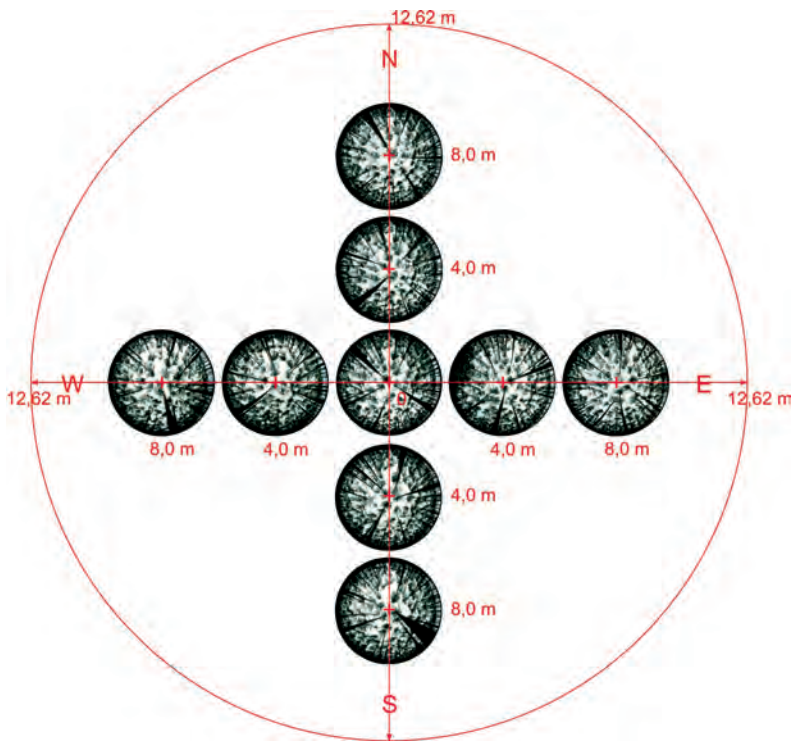


a) zdjęcie z 30.09.2006 r.



b) zdjęcie z 24.03.2007 r.

**Ryc. 14.8.2.1.** Cyfrowe zdjęcia hemisferyczne drzewostanu:  
a – w stanie ulistnionym, b – w stanie bezlistnym



**Ryc. 14.8.2.2.** Schemat rozmieszczenia punktów do wykonywania zdjęć hemisferycznych (źródło: Strześliński 2008)

części liści przez pnie i gałęzie. Tego typu błąd pojawia się również podczas LAI obliczanego na podstawie zdjęć satelitarnych lub mierzonego za pomocą bardzo powszechnie stosowanego na świecie urządzenia LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Strzeliński, Jagodziński 2009).

Bardziej zbliżone do rzeczywistości wyniki uzyskuje się jedynie poprzez pomiar powierzchni liści pozyskanych z drzew próbnych. Jest to jednak metoda bardzo pracochłonna, dlatego większość badań wykorzystuje instrumentalne pomiary LAI.

Wyniki wielu prac badawczych wskazują, że zdjęcia hemisferyczne, pozwalając na ocenę stopnia azurowości, umożliwiają również ogólną charakterystykę koron i ocenę stanu aparatu asymilacyjnego – bardzo ważnych parametrów w analizie zdrowotności drzewostanów (Wang i in. 1992, Walter i in. 1996, Planchais i Pontailier 1999, Dobbertin i in. 2004).

Zdjęcia hemisferyczne mogą posłużyć do jeszcze bardziej skomplikowanych analiz, np. do oceny wpływu promieniowania świetlnego na wzrost i rozwój drzewek w warstwie nalotu i podrostu (Cameron i Ives 1997, Robakowski i in. 2000, Robakowski 2003).

W ramach prac urzędzeniowych podstawowym zakresem, w którym mogą (i powinny) być wykorzystywane cyfrowe zdjęcia hemisferyczne, są pomiary związane z wielkoobszarową inwentaryzacją stanu lasu (WISL). Ze względu na dużą ich pracochłonność, na każdej powierzchni można wykonać tylko jedno zdjęcie hemisferyczne – ze środka powierzchni. Natomiast dla powierzchni wchodzących w skład sieci ICP Forest celowe jest wykonanie większej liczby zdjęć (np. dziewięciu zdjęć według schematu z ryc. 14.8.2.2.), (Strzeliński 2008).

### 14.8.2.3. Sprzęt i oprogramowanie

Do wykonywania zdjęć hemisferycznych potrzebny jest odpowiedni sprzęt fotograficzny, którego najważniejszym elementem jest optyka, umożliwiająca rejestrację obrazu hemisferycznego. Odwzorowanie takie jest możliwe wówczas, gdy kąt widzenia obiektywu wynosi  $180^\circ$  (porównaj: ryc. 14.8.2.3a i ryc. 14.8.2.3b). Tego typu obiektywy noszą nazwę „rybie oko” (ang. fisheye) i z reguły występują w dwóch odmianach, tzn. „circural fisheye” oraz „diagonal fisheye”. Do zdjęć hemisferycznych przydatne są jednak tylko obiektywy typu „circural fisheye”, które zapewniają w pełni koliste odwzorowanie całej hemisfery.

Jeszcze do końca ubiegłego wieku do wykonywania zdjęć hemisferycznych były wykorzystywane głównie analogowe aparaty fotograficzne (najczęściej lustrzanki małoobrazkowe), rejestrujące obraz na kliszach światłoczułych. Obecnie, gdy zdecydowanie dominuje fotografia cyfrowa, problemem jest tylko dobór odpowiedniej optyki do wielkości światłoczułej matrycy. Większość dostępnych obiektywów hemisferycznych ma kon-



a) zdjęcie zwarcia koron w drzewostanie sosnowym, wykonane zestawem Canon EOS 20D + Canon EF 17-40/4,0 L (rzeczywisty kąt widzenia: 60°)



b) zdjęcie hemisferyczne w drzewostanie sosnowym, wykonane zestawem Canon EOS 20D + Canon EF-S 18-55/3,5-5,6 + konwerter Raynox dcr-cf 185pro (rzeczywisty kąt widzenia: 185°)

**Ryc. 14.8.2.3.** Porównanie zdjęć okapu koron, wykonanych tradycyjnym obiektywem oraz zestawem do zdjęć hemisferycznych.



a) zestaw A: Canon EOS 5D (matryca 12 MP) + Sigma 8 mm f/3.5 DG EX FISH EYE



b) zestaw B: Canon EOS 20D + Canon EF-S 18-55/3,5-5,6 + konwerter Raynox dcr-cf 185pro

**Ryc. 14.8.2.4.** Dwa warianty sprzętowe umożliwiające wykonywanie cyfrowych zdjęć hemisferycznych

struktury dostosowaną do aparatów analogowych. Oznacza to, że kąt 180° można otrzymać na kliszy, której klatka ma wymiary  $24 \times 36$  mm. Aby przenieść tę zależność na kamerę cyfrową, jej matryca musi mieć takie same wymiary, tzn.  $24 \times 36$  mm. Matrycę taką, zwaną pełnoklatkową (ang. full frame) mają obecnie jedynie najdroższe modele kamer cyfrowych z wyinięną optyką (ryc. 14.8.2.4a).

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie kamer cyfrowych o mniejszych matrycach, z obiektywem o zmiennej ogniskowej (w zakresie od ok. 18 do ok. 24 mm) i konwerterem umożliwiającym uzyskanie kąta widzenia 180°

(ryc. 14.8.2.4b). Zaletą takiego rozwiązania jest niski koszt zakupu – mogą to być zarówno tanie wersje lustrzanek cyfrowych, jak i zaawansowane kompakty cyfrowe. Niestety, uzyskany obraz charakteryzuje o wiele gorsza jakość (głównie w zakresie rozdzielczości oraz aberracji) niż w wypadku lustrzanki pełnoklatkowej z obiektywem typu „circular fisheye”.

Ryc. 14.8.2.3a i 14.8.2.3b przedstawiają różnice w zobrazowaniu koron obiektywem typu „rybie oko” oraz obiektywem o węższym kącie widzenia.

Do analiz rastrowych zdjęć hemisferycznych bardzo często wykorzystywane jest oprogramowanie o licencji typu freeware. Jednym z takich programów, często cytowanym w publikacjach z zakresu ekologii ekosystemów leśnych, jest Gap Light Analyzer (<http://www.ecostudies.org/gla>), (Jaręska 2008).

Inne programy, które można wykorzystywać do analiz zdjęć hemisferycznych, to np.:

- CI-110 (<http://www.cid-inc.com>),
- HemiView and the Digital Plant Canopy Imager (<http://www.delta-t.co.uk>),
- RGBFisheye (<http://www.gifu-u.ac.jp/~ishidam/RGBFisheye02.htm>),
- WinSCANOPY (<http://www.regent.qc.ca>).

#### 14.8.2.4. Założenia metodyczne

Zdjęcie hemisferyczne, podobnie jak każde inne zdjęcie, jest typowo punktowym sposobem odzwierciedlenia fotografowanej przestrzeni. Każde, nawet niewielkie przesunięcie kamery może więc dać inny wynik pomiaru warunków świetlnych. Z tego też względu przy zastosowaniu tego sposobu w pracach inwentaryzacyjnych bazujących na powierzchniach kołowych oczywiste jest umieszczanie kamery w środku powierzchni. Pojedyncze zdjęcie to jednak zbyt mała „próbna”, aby na jej podstawie można było poprawnie oceniać warunki świetlne na danej powierzchni. W takim wypadku można wykorzystać metodę przesunięć punktów pomiarowych, wykonując zdjęcia np. w dziewięciu punktach, zgodnie ze schematem przedstawionym na ryc. 14.8.2.2 (Strzeliński 2008). W podanym przykładzie statyw z zestawem do zdjęć ustawiany jest co 4 m. Przykład odnosi się do powierzchni o promieniu 12,62 m (0,05 ha), czyli największego (powierzchniowo) koła, jakie jest wykorzystywane w pracach z zakresu zarządzania lasu.

Podstawowe założenia metodyczne dotyczące wykonywania zdjęć hemisferycznych, proponowane w publikacjach naukowych (np. Weiss i in. 2004) i zweryfikowane w trakcie prac terenowych (np. Strzeliński 2006, Kałuża i Strzeliński 2008, Strzeliński 2008), można przedstawić w następujących punktach:

- kamera musi być ustawiana zawsze na statywie,
- obiektyw (górna soczewka) powinien być ustawiany na wysokości ok. 130 cm nad powierzchnią gruntu (w wypadku analiz np. warstwy na-

- lotu – na wysokości 50 cm, ale z wykorzystaniem samowyzwalacza lub pilota, aby fotografujący mógł odejść na odpowiednią odległość),
- kamera powinna być ustawiana na punktach pomiarowych, zawsze w kierunku N-S (aby wszystkie zdjęcia można było analizować tym samym algorytmem obrazującym potencjalną „ścieżkę” tarczy słonecznej),
  - kamera musi być spoziomowana (z wykorzystaniem trójzakresowej libelki montowanej w sankach lampy błyskowej kamery) – oś obiektywu ustawiona prostopadłe do powierzchni gruntu,
  - kamera powinna być ustawiona w zakresie czułości ISO 200 (w trudnych warunkach oświetleniowych, np. po zachodzie słońca – ISO 400),
  - kamera powinna być ustawiona na czasie migawki nie dłuższym niż 1/30 (optymalnie: 1/60 – 1/250),
  - rodzaj pomiaru światła powinien być ustawiony na matrycowy (lub inny obejmujący całą powierzchnię kadru),
  - parametry rejestracji zdjęć powinny być ustawione na zapis w maksymalnej rozdzielczości – zapis plików w formacie JPG/JPEG z „zerową” kompresją.

Podczas wykonywania zdjęć hemisferycznych bardzo duży wpływ na poprawność uzyskanych wyników mają warunki atmosferyczne, szczególnie zachmurzenie. Optymalne warunki występują wówczas, gdy panuje pełne zachmurzenie. Oczywiście wszelkie opady wykluczają wykonywanie zdjęć hemisferycznych. W niektórych opracowaniach zaleca się nawet wykonywanie zdjęć godzinę przed wschodem lub godzinę po zachodzie Słońca. Można jednak przyjąć założenie, że zdjęcia mogą być wykonywane w momencie, gdy tarcza słoneczna nie jest bezpośrednio widoczna w obiektywie. Optymalną sytuacją jest jej przesłonięcie przez chmury. Przesłonięcie tarczy słonecznej przez korony lub pnie drzew jest niestety rozwiązaniem niewystarczającym. Wówczas na pniach drzew często widoczne są bardzo intensywne odbłaski, a podczas analizy takiego zdjęcia odbłaski najczęściej są interpretowane jako fragmenty nieba. Jeśli nie ma możliwości wykonania zdjęć w innym terminie, zdjęcia z widocznymi odbłaskami na pniach należy odpowiednio przygotować do analiz – najlepiej poprzez maskowanie odbłasków w programie do obróbki grafiki rastrowej. W trakcie analizy zdjęcia można też, w zależności od zastosowanego oprogramowania, wprowadzić korekcję związaną z położeniem Słońca nad horyzontem (Kopp i in. 2002).

### 14.8.2.5. Podsumowanie

Wieloletnie doświadczenia z wykorzystaniem fotografii hemisferycznej w badaniach przyrodniczych, dostępność relatywnie taniego sprzętu, prostota metod oraz niskie koszty tej technologii wskazują na jej duży potencjał. Na obecnym etapie rozwoju metod teledetekcyjnych, umożliwiających pomiary różnych parametrów środowiska przyrodniczego, zdjęcia hemisferyczne mogą być dobrym uzupełnieniem takich prac.

Już dzisiaj, dzięki zgromadzeniu bogatego materiału badawczego, istnieją podstawy praktycznego zastosowania opisywanych metod w taksacji urządzeniowej, prowadzonej zarówno w myśl obowiązujących zasad, jak i obejmującej nowe zakresy informacji. Dotyczy to głównie oceny indeksu powierzchni liściowej oraz azurowości, a także innych parametrów związanych z warunkami świetlnymi panującymi pod okapem koron.

Jakość tego typu opracowań może być dodatkowo poprawiona dzięki integracji z innymi metodami pomiarowymi, szczególnie z instrumentalnymi pomiarami indeksu powierzchni liściowej czy oceną tego wskaźnika na podstawie zdjęć satelitarnych (Zawiła-Niedźwiecki i in. 1993) lub na podstawie skaningu laserowego.

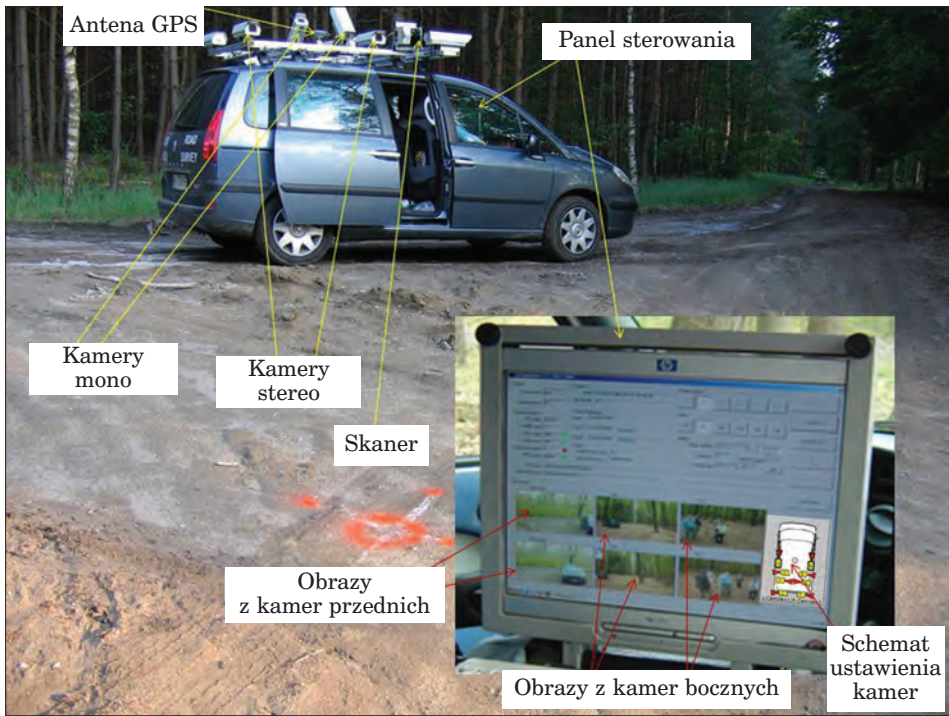
### **14.8.3. System kartowania mobilnego – MMS**

dr inż. ANDRZEJ CHOROMAŃSKI – Geolvent sp. z o.o.

#### **14.8.3.1. Wprowadzenie**

Rozwój technologii pomiarowych związanych z pozyskiwaniem danych do systemów nawigacyjnych umożliwił wykorzystanie ich również do inwentaryzacji dróg leśnych. Pomiarы dróg zostały zrewolucjonizowane poprzez zastosowanie integracji systemów pozycjonujących i sensorów pozyskujących dane. W ten sposób powstał system mobilnego kartowania (Mobile Mapping System – MMS). Jednym z takich rozwiązań jest MMS zaprojektowany i wykonany w Polskim Przedsiębiorstwie Wydawnictw Kartograficznych (PPWK). System ten, będący polskim patentem, to technologia szybkiego i efektywnego pozyskiwania aktualnych danych przestrzennych, obejmujących pas drogowy wraz z jego najbliższym otoczeniem. Ponieważ w dotychczasowej praktyce w lasach wykorzystywano rozwiązanie MMS PPWK-TeleAtlas, dlatego posłużono się nim do przedstawienia elementów technologii MMS (Choromański 2008). Składa się on z dwóch komponentów: sprzętowego i programowego.

Komponent sprzętowy dotyczy platformy, na której zamontowane są sensory zbierające dane. Mogą się one znajdować na samolocie, samochodzie czy też łodzi. W projektach dotychczas realizowanych w lasach w większości wykorzystywany był samochód pomiarowy wyposażony w skanery laserowe dostarczające chmury punktów, obrazujące miejsca odbicia promienia laserowego od przeszkody, oraz w zestawy kamer dostarczających obrazy o pokryciu stereoskopowym. System pozycjonowania globalnego (Global Positioning System – GPS), nawigacyjny system inercyjny (Inertial Navigation System – INS) oraz precyzyjny odometr (ryc. 14.8.3.1)



**Ryc. 14.8.3.1.** Samochód wyposażony w system MMS

składają się na zespół precyzyjnej lokalizacji zdjęć oraz chmury punktów laserowych w układzie współrzędnych geograficznych (McGlone 2004).

Komponent programowy technologii MMS tworzą dwa moduły – moduł zbierania danych geoprzestrzennych w trakcie przejazdu samochodu oraz moduł przetwarzania danych, oparty na technikach fotogrametrycznych.

W module pierwszym można wyróżnić cztery aplikacje:

1. MMS CarMapSystem.
2. MMS RemoteCamerasMgr.
3. MMS Frame Viewer.
4. MMS Track Viewer.

Ad 1. Zadaniem aplikacji MMS CarMapSystem (CMS) jest gromadzenie informacji zbieranych przez GPS, żyroskopy i odometr oraz komunikacja z kamerami w czasie rzeczywistym. MMS CarMapSystem odpowiada za komunikację z pozostałymi komputerami skonfigurowanymi z odpowiednimi parami kamer. Informacje dostarczone ze wszystkich urządzeń (kamery oraz system pozycjonowania) zostają zsynchronizowane, a otrzymane dane i jakość sygnału GPS – zarejestrowane. Aplikacja wyświetla obrazy w celu upewnienia się, czy obrazy otrzymane z obu pierwszych kamer są popraw-

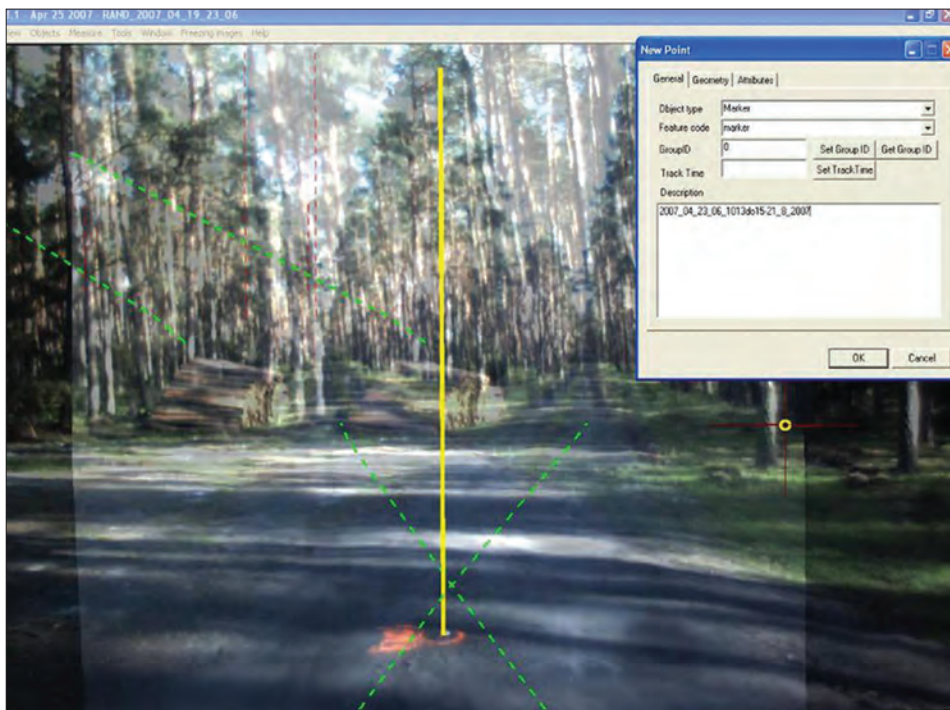
nie pozyskiwane i zapisywane na dysku. Można ją również wykorzystać do zmiany parametrów czasu ekspozycji kamer oraz kalibracji odometru.

Ad 2. Głównym zadaniem aplikacji MMS RemoteCamerasMgr (RCM) jest dostarczanie, kompresja i zapis pozyskanych obrazów. CMS nadzoruje pracę pozostałych komputerów, w tym także pracę RCM.

Ad 3. Aplikacja MMS Frame Viewer jest przeglądarką pomagającą szybko ocenić pozyskane dane, które zapisywane są w formacie BMP lub JPG 2000.

Ad 4. Aplikacja Track Viewer jest pomocna przy sprawdzaniu danych pozyskanych z MMS. Umożliwia wyświetlanie linii, zwanych dalej „trackami”, odzwierciedlającymi tory, po których poruszał się samochód pomiarowy.

OASIS (Object Aquisition Stereo Image System) to drugi moduł komponentu programowego. OASIS MMS jest oprogramowaniem fotogrametrycznym, które służy do interpretacji danych i pomiarów 3D na bazie obrazów stereo (ryc. 14.8.3.2). Umożliwia także cyfrową korekcję zebranych obrazów. Interpretacja danych i pomiary odbywają się w biurze, a nie w terenie. Tym samym jednokrotne zebranie danych ułatwia ich wie-



**Ryc. 14.8.3.2.** Zarejestrowane przez MMS (PPWK-TeleAtlas) obrazy analizowane są na modelu stereoskopowym z wykorzystaniem oprogramowania OASIS

lokrotną interpretację i weryfikację. W ten sposób opracowane dane zostają zapisane w bazach GIS ([www.computerworld.pl/artykuly//51861/Z.Lodzi.na.swiat.html](http://www.computerworld.pl/artykuly//51861/Z.Lodzi.na.swiat.html), dostęp 01.06.2009, McGlone 2004, PPWK Inwestycje 2004a, PPWK Inwestycje 2004b).

### **14.8.3.2. Przegląd technologii**

Pierwszy mobilny system kartowania powstał w 1995 r. w Centre of Mapping Uniwersytetu Ohio w Stanach Zjednoczonych. Było to rozwiązanie oznaczone symbolem GPSVanTM. Na samochodzie typu van zamontowane były dwie kamery cyfrowe, dwie kamery wideo oraz urządzenia pozycjonujące, odbiornik GPS, odometr i dwa żyroskopy. Wymienione urządzenia dostarczały informacji pozwalających na poprawną orientację w przestrzeni dwuwymiarowej. Dokładność uzyskiwanych pozycji wahała się od 1 do 3 m.

Obecnie najbardziej zaawansowane systemy MMS oferowane są przez następujące firmy:

- IP-S2 Topcon Positioning System,
- LYNX Mobile Mapper (Optech),
- MMS (PPWK-TeleAtlas),
- Mobile Mapping Technology (Visimind),
- StreetMapper (IGI mbH),
- System Informacji Drogowej (LEHMANN + PARTNER),
- System Mapowania – Mobilnego Skanowania Laserowego (MMS/MLS), (GISPRO)

W rozwiązaniach MMS (PPWK-TeleAtlas) oraz Mobile Mapping Technology (Visimind) wykorzystywane są obrazy stereoskopowe. Wszystkie wyżej wymienione systemy, oprócz Systemu Informacji Drogowej (LEHMANN + PARTNER), wyposażone są w skanery pozwalające zbierać chmury punktów laserowych. Charakteryzują się one znacznie większym zasięgiem (do 300 m) oraz, co jest nowością na rynku skanerów, możliwością rejestracji nieograniczonej liczby odbić pośrednich promienia laserowego.

### **14.8.3.3. Dotychczasowe zastosowania MMS w PGL Lasy Państwowe**

W polskich lasach pomiary z użyciem technologii MMS PPWK rozpoczęły się w 2004 r. Były to doświadczalne przejazdy w Nadleśnictwie Skierzniewice. Służyły testowaniu systemu i jego kalibracji. W roku 2006 w Nadleśnictwie Milicz sfilmowano i opracowano ok. 30 km dróg. W utworzonej bazie danych znalazły się następujące warstwy: osi dróg, szerokości, graniczników, ogrodzeń, łuków, krawędzi drzewostanów, drzew. Były to pier-

**Tabela 14.8.3.1.**  
**Zestawienie przeprowadzonych eksperymentów z wykorzystaniem MMS**

Nadleśnictwo	Lata	Liczba km	Cel
Skierniewice	2004	10	Sprawdzenie i kalibracja systemu
Milicz	2004–2007	50	Poligony do badania dokładności położenia punktu oraz pomiaru pierśnic, a także parametrów sensorów, prędkości przejazdu
Miękinia	2007	35	Poligon do oceny możliwości łączenia danych z MMS, ortofotomapy i NMT oraz NMPT
Chojna	2007	30	Poligon do oceny dokładności LMN oraz integracji danych ortofotomapy sporządzonej na potrzeby planu urządzenia lasu i danych z MMS
Sławno	2006	10	Pomiar wyremontowanej drogi
Szczecinek	2007	20	Poligon do oceny metod inwentaryzacji dróg metodą klasyczną i MMS
Świeradów-Zdrój	2006–2007	300	Poligon do analiz sieciowych
Szklarska Poręba	2006–2007	200	Poligon do analiz sieciowych
Czarnobór	2008	150	Poligon do porównania korzyści i kosztów inwentaryzacji wykonanej metodą klasyczną oraz metodą z wykorzystaniem MMS

wsze próby budowy struktury bazy danych, która mogłaby korespondować z bazami SILP i była zgodna ze Standardem LMN. W kolejnych projektach, prowadzonych w latach 2006–2008, prace były kontynuowane, co doprowadziło do opracowania struktury bazy danych opisowych i geometrycznych, możliwych do pozyskania z wykorzystaniem technologii MMS, ortofotomapy oraz numerycznego modelu terenu, uwzględniającej wymogi SILP i SLMN (Pogoda 2001, Strzelczak i in. 2007). W omawianym okresie eksperymenty nad zastosowaniem MMS przeprowadzono w nadleśnictwach przedstawionych w tab. 14.8.3.1. (Szewczyk 2000). Prace były realizowane przez ten sam zespół w ramach następujących projektów:

- „Urządzenie obrębu leśnego z wykorzystaniem zdjęć lotniczych” (2005–2006), Nadleśnictwo Milicz;
- „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi” (2006–2008), Nadleśnictwo Milicz;

- „Opracowanie barwnej, cyfrowej ortofotomapy miasta Wrocławia, opracowanie modelu wysokościowego terenu, modelu powierzchni terenu i przeprowadzenie na ich podstawie wektoryzacji, analiz spektralnych i klasyfikacji obiektów oraz instalacja i konfiguracja wyników opracowania w bazach danych SIP Urzędu Miejskiego Wrocławia” (2006), Wrocław, Nadleśnictwo Miękinia;
- „Koordynacyjne Centrum Edukacji i Promocji Przyrodniczo-Leśnej w Świeradowie-Zdroju wraz z systemem regionalnej informacji przestrzennej (SRIP) w formie mapy numerycznej i bazy danych” (2007–2008), nadleśnictwa Świeradów-Zdrój i Szklarska Poręba;
- „Projekt docelowej sieci dróg leśnych” (2008), Nadleśnictwo Czarnobór.  
Ponieważ dane pochodzące z MMS dobrze integrowały się z danymi ze zdjęć lotniczych i lotniczego skaningu laserowego, było możliwe opracowanie zestawu danych wieloźródłowych, który umożliwił zebranie wszystkich atrybutów zgodnie z wymogami SILP i SLMN.

#### **14.8.3.4. Metoda inwentaryzacji obiektów liniowych w lasach z wykorzystaniem MMS**

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pozwoliły na opracowanie metody inwentaryzacji obiektów liniowych w lasach z wykorzystaniem jednego z narzędzi geomatycznych – MMS. Metoda opiera się na następujących założeniach:

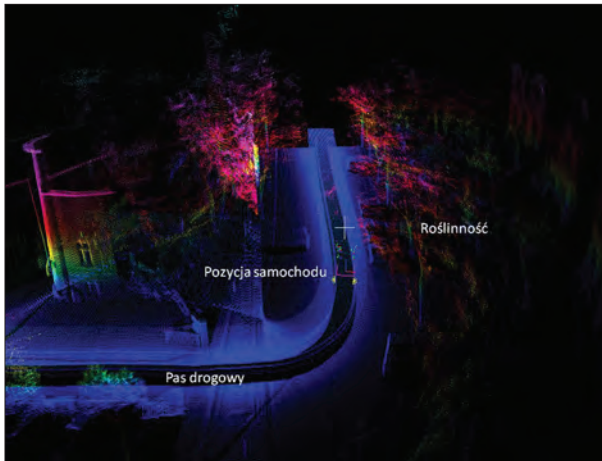
- błąd położenia elementów drogi nie przekracza 0,3 mm w skali mapy, co w wypadku LMN odpowiada odległości nie większej niż 1,5 m;
- atrybutowanie powinno być zgodne z atrybutami z tabel „drogi”, „obiekty mostowe” oraz pozostałymi tabelami SILP;
- koszty pozyskania i przetworzenia zintegrowanych danych o drogach nie powinny przekraczać 25% kosztów sporządzenia planu urządzenia lasu, odnoszonych do 1 ha.

Z uwagi na dotychczasowe doświadczenia z wykorzystaniem MMS można przyjąć, że tak postawione cele mogą być realizowane na podstawie:

- zdjęć cyfrowych lub (i)
- chmury punktów laserowych.

Oba rozwiązania, których wady oraz zalety przedstawiono w tab. 14.8.3.2, mogą być z powodzeniem wykorzystywane do inwentaryzacji obiektów liniowych w lasach. Jednak ze względu na szybkość przetworzeń oraz efektywniejsze modelowanie przestrzenne większe nadzieje należy wiązać z technologiami wykorzystującymi chmury punktów laserowych (ryc. 14.8.3.3).

Osiągnięcie powyższych celów może się odbywać poprzez jednoczesne pozyskanie zdjęć stereoskopowych oraz chmury punktów laserowych z te-



**Ryc. 14.8.3.3.** Chmura punktów laserowych pochodząca ze skaningu samochodowego

chnologii MMS i przetworzenie ich do modeli przestrzennych. Tak przygotowane informacje podstawowe można uzupełnić informacjami pochodzącymi z cyfrowych zdjęć lotniczych o pikselu od 15 cm do 25 cm, przetworzonymi

**Tabela 14.8.3.2.**

Zalety i wady technologii MMS zastosowanej w lasach, wykorzystującej zdjęcia cyfrowe i chmury punktów laserowych

Zalety	Wady
Możliwość szybkiego zbierania danych	Problemy z lokalizacją (głównie w lasach) – błąd średni położenia 2,44 m (Milicz 2008)
Dane zbierane bezpośrednio do bazy danych	Zmienna jakość filmów (problemy z identyfikacją obiektów)
Możliwa bezpośrednia atrybutacja obiektów	Złej jakości dane ze skanerów laserowych (dane niewykorzystywane)
Pomiar i wektoryzacja na obrazach stereoskopowych	Ograniczone (niepełne) pole widzenia (kamer i skanerów)
Technologia dedykowana do zbierania danych ewidencji drogowej	Dane pozyskiwane z obrazów są danymi dwuwymiarowymi (brak wartości z)
Znany błąd położenia punktu	

do postaci ortofotomapy, bazującej na modelu terenu o dokładności od 0,5 m do 1 m. Integracja informacji z MMS i ortofotomapy do postaci zestawu danych wieloźródłowych pozwala na wykorzystanie tegoż zestawu do atrybutowania cech taksacyjnych zbiorowisk roślinnych w pasie drogowym. Umożliwia także budowanie zaawansowanych modeli decyzyjnych.

- Do realizacji powyższego powinny być spełnione następujące warunki:
- samochód pomiarowy należy wyposażyć w INS typu SPAN, umożliwiającą uzyskanie zakładanego błędu położenia, oraz w nowe rozwiązania

integrujące systemy INS z GPS, pozwalające na skrócenie reakcji określania pozycji samochodu w wypadku braku sygnału GPS (Lipiński 2007);

- samochód pomiarowy należy wyposażyć w skanery umożliwiające pozyskiwanie chmury punktów laserowych do 150 m, w płaszczyźnie poziomej – 3600, w płaszczyźnie pionowej – do 900, z możliwością rejestracji wszystkich odbić;
- oprogramowanie do analizowania chmury punktów powinno umożliwiać wykorzystanie zarejestrowanej intensywności odbicia.

Dzięki temu można efektywniej modelować obiekty przestrzenne, np. drzewa, a tym samym poprawiać dokładności pomiarów oraz zmniejszać koszty analiz.

W celu inwentaryzacji elementów liniowych w lasach należy uwzględnić następujące etapy działań:

1. Określenie komponentów fizycznych sieci. Wykonanie projektu sieci drogowej, uwzględniającej wymogi inwestycyjne, ochrony przeciwpożarowej, transportu drewna oraz zagospodarowania turystycznego.
2. Określenie komponentów logicznych sieci. Wykonanie projektu bazy danych sieciowych, określającego parametry techniczne pomiaru.
3. Sporządzenie projektu struktury bazy danych, zasilającej SILP i LMN, możliwych do pozyskania z MMS. Należy przyjąć wymóg zgodności danych pod względem jakości ze Standardem Leśnej Mapy Numerycznej oraz z Polską Normą: PN-EN ISO 19113, 2009, Informacja geograficzna.
4. Pozyskanie danych z MMS.
5. Przygotowanie zgromadzonych filmów i chmur punktów laserowych do pomiarów.
6. Rejestracja zdarzeń drogowych – atrybutowanie.
7. Redakcja kompletnej bazy ewidencyjnej.
8. Przeniesienie posiadanych przez nadleśnictwo danych dodatkowych, archiwalnych do opracowanej struktury.
9. Opracowanie projektu aplikacji, w tym formularzy i raportów ułatwiających korzystanie z bazy przez użytkowników.
10. Zbudowanie wynikowego modelu danych sieciowych oraz złożonego modelu decyzyjnego.

Postępowanie według powyższego schematu umożliwi zebranie informacji o drogach leśnych zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi, wynikającą z nich jakością danych oraz umożliwi analizę kosztów i korzyści zastosowania przedstawionej metody.

W budowie zaawansowanego modelu decyzyjnego, stanowiącego ostatni etap inwentaryzacji obiektów liniowych z zastosowaniem MMS i innych narzędzi geomatycznych, powinno się integrować informacje pochodzące:

- ze zdjęć lotniczych przetworzonych do ortofotomap o pikselu 15–25 cm;
- z laserowego skaningu z mobilnego systemu kartowania, przetworzone do modeli 3D;

- z laserowego skaningu lotniczego o parametrach pozwalających na zbudowanie numerycznego modelu terenu o dokładności 0,5–1 m, (w wypadku wykorzystywania tego rodzaju danych, również do innych celów, np. taksacji w opracowywanym planie urządzenia lasu).

Przedstawiona metoda zawiera określenie zakresu zbierania danych z pasa drogowego, ich jakości oraz kosztów i korzyści. Innym czynnikiem, który przemawia za zastosowaniem metody inwentaryzacji obiektów liniowych w lasach, opartej na danych pochodzących z MMS, jest podstawowa jej cecha, czyli mobilność. Porównując obie technologie – skaningu lotniczego i skaningu samochodowego – można zauważyć, że czas realizacji projektu jest zdecydowanie krótszy w drugiej technologii. Cecha ta jest decydującą w wypadku małych projektów oraz projektów realizowanych w sytuacjach kryzysowych (Marasco 2006).

**Tabela 14.8.3.3.**

**Zalety i wady nowych technologii MMS (np. StreetMapper) w porównaniu z MMS PPWK**

Zalety	Wady
Dobra lokalizacja (GPS, INS + szybka inicjalizacja) – przewidywany błąd średni położenia ok. 1 m	Brak bezpośredniej współpracy z bazami danych (obecnie)
Możliwość szybkiego zbierania danych	Olbrzymie zbiory pozyskiwanych danych
Pomiar kombinowany (chmura punktów 3D + zdjęcia mono) – możliwość wybrania dowolnego kąta widzenia	Technologia nie przetestowana do zastosowań w lasach
Dobre wyniki podczas zbierania danych ewidencji drogowej	Nieznany jest błąd średni położenia punktu, określany z wykorzystaniem technologii w warunkach leśnych
Możliwość wyłączania części danych (ułatwiona digitalizacja obiektów częściowo zasłoniętych)	Brak pomiaru stereoskopowego
Pełne pole widzenia skanerów laserowych (360°)	
Dane ze skanerów laserowych doskonałej jakości (duża gęstość + intensywność odbicia)	
Możliwość modelowania obiektów 3D na podstawie chmury punktów i wykonywania analiz na tych obiektach	

Podchodząc krytycznie do przeprowadzonych badań i analiz, zaprojektowano rozszerzenie zakresu inwentaryzacji obiektów liniowych w lasach (Rutkowski 2009). Kontynuacji wymaga badanie wykorzystania zbieranych danych do:

- modelowania 3D pasa drogowego i jego otoczenia,
- pomiaru masy drzew stojących i leżących,
- pomiaru biomasy,
- korzyści i kosztów pomiaru.

Analizy takie powinny być wykonane np. z wykorzystaniem technologii MMS, której wady i zalety zostały zestawione w tab. 14.8.3.3.

Dotychczasowe eksperymenty wykonane z zastosowaniem nowej technologii MMS, bez włączonego sygnału GPS, zostały opisane w raporcie StreetMapper Tunnel Test (2009). Analiza wyników tych pomiarów wskazuje, że w trudnych, leśnych warunkach, gdzie ze względu na okap liści i konarów bardzo często nie ma dostępu do sygnału GPS, zastosowanie najnowszych technologii lokalizacyjnych pozwoli na osiągnięcie kilkudziesięciocentymetrowych błędów położenia (tab. 14.8.3.4). W rezultacie zastosowania technologii (np. MMS StreetMapper) można będzie w lasach pozyskiwać dane wykorzystywane do modelowania 3D (np. do celów projektowych dróg i infrastruktury), aktualizacji LMN.

Przyjmując powyższe wyniki, otrzymane podczas testu StreetMapper Tunnel (2009), w tab. 14.8.3.4. zestawiono przewidywane koszty zastosowania MMS oraz dodatkowo koszty opracowania ortofotomap i numerycznego modelu terenu, które pokazują, że rozwój technologii opisywanej w niniejszym rozdziale będzie prowadził do znaczącej obniżki kosztów inwentaryzacji dróg leśnych, a także skrócenia czasu wykonywania opracowań.

Zerowy koszt jednostkowy oraz zerowy czas opracowania numerycznego modelu terenu, wykazane w tym zestawieniu, wynikają z tego, że NMT

Tabela 14.8.3.4.

Zestawienie błędów współrzędnych ( $x, y, z$ ) z wykonanych pomiarów MMS StreetMapper z wyłączonym sygnałem GPS, symulującym trudne warunki leśne

Długość drogi, na której wyznaczono odcinki pomiarowe (m)	Długości odcinków pomiar. (m)	Czas pomiaru (s)	Błąd (m)			
			współrzędnej			położenia
			$x$	$y$	$z$	$m_p$
3000	500	31	0,01	0,06	0,02	0,06
	1000	58	0,06	0,1	0,03	0,12
	1500	86	0,14	0,17	0,04	0,22
	2000	114	0,27	0,21	0,07	0,34

będzie stanowił integralną część opracowania MMS. Wyniki tego eksperymentu pozwalają także sądzić, że w projektach z zastosowaniem nowych technologii MMS (np. StreetMapper) do inwentaryzacji pasa drogowego w lesie nie będzie potrzeby wykorzystywania danych z lotniczego skaningu laserowego.

Tabela 14.8.3.5.

Zestawienie przewidywanych kosztów zastosowania nowej technologii MMS, ortofotomap oraz numerycznego modelu terenu w odniesieniu do kosztów MMS PPWK

Źródła danych	Zakres kosztów (zł/ha)		Czas opracowania danych dla 100 ha (h)	
	MMS PPWK	MMS	MMS PPWK	MMS
MMS	6–9	9–12	5	5
Ortofotomapa	3–5	3–5	2–3	2–3
NMT	9–11	w kosztach MMS	0	4–5
Zestaw danych wieloźródłowych	18–25	12–17	7–8	11–13

Wykorzystanie chmury punktów pochodzącej ze skaningu samochodowego może skrócić czas realizacji inwentaryzacji i wpłynąć na obniżenie kosztów (tab. 14.8.3.5).

### 14.8.3.5. Analiza korzyści i kosztów

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można wysnuć sformułowane poniżej wnioski dotyczące inwentaryzacji obiektów liniowych (dróg) z wykorzystaniem metody wykorzystującej technologię MMS:

- W porównaniu z metodami klasycznymi technologia MMS umożliwia znacznie bardziej efektywne zbieranie i gromadzenie danych o drogach w lasach. Jednocześnie pozwala na pozyskanie atrybutów zgodnie z wymogami SILP i LMN.
- Nowe rozwiązania technologiczne integrujące dane z GPS i INS pozwalają zwiększyć dokładność pozycjonowania samochodu pomiarowego, z błędem nie przekraczającym 1 m.
- Posługując się danymi wieloźródłowymi, można uzyskiwać dokładności położenia lepsze niż 1 m, optymalizując ekonomicznie gromadzenie danych i dostosowując powstające informacje do potrzeb użytkowników.

- Metoda umożliwiła wyspecyfikowanie jakości danych z uwzględnieniem kompletności, spójności logicznej, dokładności położenia, dokładności czasowej, dokładności tematycznej.

Powyższe wnioski pozwalają sądzić, że wykorzystanie technologii MMS w praktyce leśnej zaowocuje:

- uzyskaniem wymaganej jakości danych przestrzennych o drogach, z zapewnieniem topologii koniecznej do przeprowadzania analiz sieciowych i biznesowych, co umożliwi znacznie efektywniejsze nimi zarządzanie. Będzie to również „platforma” do negocjacji leśników z odbiorcami drewna;
- usprawnieniem działań straży pożarnych oraz zarządzania zarówno sytuacjami kryzysowymi, jak i bieżącą działalnością nadleśnictw;
- umożliwieniem nawigacji po drogach leśnych, co byłoby naturalnym uzupełnieniem nawigacji po drogach publicznych;
- uzupełnieniem bazy danych o dane zdefiniowane przez obowiązujące standardy;
- optymalizacją kosztów inwentaryzacji obiektów liniowych.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można również przeprowadzić analizę korzyści i kosztów zastosowania metody inwentaryzacji obiektów liniowych (dróg) z wykorzystaniem technologii MMS. Wyniki tej analizy zestawiono w tab. 14.8.3.6 i 14.8.3.7.

Z przedstawionych tabel wynika, że koszt opracowania zgromadzonych danych dla 1 ha (oszacowany na podstawie przytaczanych projektów) wynosi od 18 do 25 zł. Na wielkość tej kwoty wpływają: koszt opracowania

Tabela 14.8.3.6.

Zestawienie kosztów MMS, ortofotomap numerycznego modelu terenu oraz czasu opracowania danych

Źródła danych	Zakres kosztów (zł/ha)	Dane z projektów realizowanych w nadleśnictwach i w LZD w Krynicy	Czas opracowania danych dla 100 ha (h)
MMS	6–9	Milicz, Świeradów-Zdrój, Szklarska Poręba, Miękinia, Czarnobór	5
Ortofotomapa	3–5	Brzozów, Chojna, Jagielek, LZD w Krynicy, Milicz, Miękinia, Świeradów Zdrój, Stare Jabłonki, Szklarska Poręba	2–3
Numeryczny model terenu	9–11	Milicz, Świeradów-Zdrój, Szklarska Poręba, Miękinia	4–5
Zestaw danych wieloźródłowych	18–25		11–13

ortofotomapy, NMT oraz rejestracji i przetworzeń MMS. Na zakres przedziału kosztów jednostkowych ma przede wszystkim wpływ: wielkość sieci, zdefiniowane oczekiwane błędy pomiaru, zakres atrybutów sieciowych do pozyskania, czas opracowania oraz dostępność dróg. Do przedstawionych analiz przyjęto uśrednione koszty z projektów realizowanych w latach 2005–2008. Ponieważ należały one do najbardziej znaczących projektów pod względem jakościowym, rzeczowym i finansowym, realizowanych w tym czasie dla jednostek PGL Lasy Państwowe, to koszty jednostkowe wykorzystania poszczególnych technologii geomatycznych ukształtowały pewien poziom referencyjny. Dlatego w powyższych analizach odnoszono się do tych kosztów. W analizie korzyści wyodrębniono oszczędności, korzyści dla organizacji oraz korzyści przyszłe i zewnętrzne.

**Tabela 14.8.3.7.**  
**Korzyści płynące z wdrożenia metody inwentaryzacji obiektów liniowych z wykorzystaniem MMS**

Oszczędności	Korzyści dla organizacji	Korzyści przyszłe i zewnętrzne
Uregulowanie zobowiązań wobec przepisów (SILP i SNMT)	Określenie warunków odbioru pod względem jakości oraz korzyści i kosztów	Stworzenie interfejsu komunikacji między organizacjami, np. PGL Lasy Państwowe, i odbiorcami drewna, w ramach obowiązujących standardów
	Regulowanie sytuacji zewnętrznej i wewnętrznej oraz umożliwienie wykonywania analiz sieciowych, których celem jest dostarczenie informacji decyzyjnych w zakresie planowania finansowo-gospodarczego	
	Umożliwienie nawigacji po drogach leśnych w ramach wielofunkcyjnego udostępniania lasu	

Analizy korzyści i kosztów przeprowadzono na podstawie projektów realizowanych z wykorzystaniem technologii MMS PPWK-TeleAtlas (Choromański i Rutkowski 2009).

## 14.9. Dostępność zdjęć lotniczych i obrazowań satelitarnych

dr inż. PIOTR WĘŻYK – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie,  
Wydział Leśny

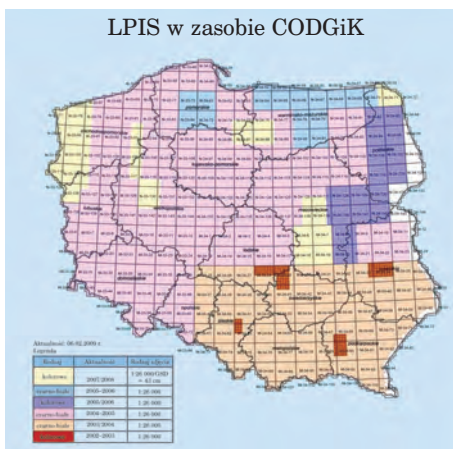
### 14.9.1. Zdjęcia lotnicze

Obecnie wykonywane zdjęcia lotnicze z pokładu statku powietrznego, w zależności od pozycjonowania kamery oraz użytej technologii, można podzielić na:

- pionowe (prawie pionowe), nachylone i perspektywiczne;
- wykonywane fotogrametryczną kamerą analogową: diapozytywy (slajdy) – spektrostrefowe barwne (ang. CIR – Color InfraRed), np. Kodak Aerochrom 1443, spektrostrefowe panchromatyczne lub filmy negatywowe – materiały czarno-białe (B&W) oraz barwne (RGB);
- wykonywane lotniczą kamerą cyfrową: wielkoformatową (np. Intergraph Z/I Imaging DMC, UltraCam-Vexcel) lub małoformatową (np. Rolleiflex 6000, DigiCAM-IGI) – obrazy w zapisie 8-, 11- lub 16-bitowym, TIFF, JPEG: RGB, stosowanie filtrów w celu uzyskania NIR, kanały spektralne separowane: R, G, B oraz NIR + kanał panchromatyczny;
- wykonywane amatorskimi kamerami (najczęściej cyfrowymi, np. Nikon czy Canon) z pokładu statków bezzałogowych lub balonów.

Głównym źródłem pozyskania w Polsce archiwalnych zdjęć lotniczych (i produktów ich przetworzenia, np. ortofotomap) jest Państwowy Zasób Geodezyjny i Kartograficzny (PZGiK). Zgodnie z postanowieniami ustawy „Prawo geodezyjne i kartograficzne”, gromadzenie, prowadzenie i udostępnianie materiałów zasobu należy do zakresu działania ośrodków dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej. Centralny Ośrodek (CODGiK – [www.codgik.gov.pl](http://www.codgik.gov.pl)) oraz wojewódzkie ośrodki dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej (WODGiK) udostępniają zarówno zdjęcia lotnicze (ryc. 14.9.1), bardzo pomocne w opracowaniach fotogrametrycznych: struktury, stanu zdrowotnego i innych cech przestrzennych drzewostanów na obrazach stereoskopowych 3D, jak i ortofotomapy cyfrowe (GeoTIFF), ewentualnie wydruki wielkoformatowe.

Ortofotomapy udostępniane są w skalach: 1:10 000, 1:5000 lub 1:2000, w układach PUWG 1992 oraz PUWG 2000. Poprawniej jest jednak posługiwać się sformułowaniem „cięcie arkuszowe” opracowania, gdyż cyfrowa ortofotomapa nie ma określonej skali, lecz jedynie rozdzielczość terenową (wielkość piksela uzależniona od skali zdjęcia, gęstości skanowania, kompresji itd.). W głównej mierze ortofotomapy zostały opracowane na podstawie (ryc. 14.9.2):



**Ryc. 14.9.1.** Skorowidze zdjęć lotniczych zgromadzonych w zasobie CODGiK (od góry: czarno-białe i barwne; wykonane w ramach LPIS), (źródło: [www.codgik.gov.pl](http://www.codgik.gov.pl))

- zdjęć lotniczych Phare z lat 1996–1997 – zdjęcia barwne (RGB), skala 1:26 000, niemal pełne pokrycie całego kraju; piksel cyfrowej ortofotomapy 0,75 m;
- zdjęć Phare 2001, realizacja w latach 2003–2005: tzw. Standard I – zdjęcia 1:26 000, piksel terenowy ortofotomapy 0,5–1,0 m; Standard II – zdjęcia 1:13 000, piksel terenowy ortofotomapy 0,25m (Polska południowa), (ryc. 14.9.1);
- wysokorozdzielczych scen satelitarnych (VHRS) – dla obszarów, których zdjęcia Phare są najstarsze (północno-zachodnia Polska) i przeważają działki o dużej powierzchni oraz dla pasa przygranicznego o szerokości 15 km po stronie wewnętrznej i 5 km po stronie zewnętrznej (nie ma konieczności uzyskania stosownej zgody państwa ościennego na nalot); piksel terenowy ortofotomapy 1,0 m.

Wybrane WODGiK lub też PODGiK (ośrodki powiatowe), a czasami urzędy miast, dysponują bardziej aktualnymi zdjęciami lub ortofotomapami (ortomozaikami – nie wszystkie opracowania zostały zgłoszone do CODGiK), opracowanymi na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych w ostatnich latach dla poszczególnych miast czy powiatów (np. Łódź, Wrocław, Kraków – piksel



Godło	Wielkość Piksela	Aktualność	Skala Orta	Skala Zdjęcia	Kolor	Układ Wsp.	Źródło
N-34-80-B-a-2-1	0,5 m	2005/2006	1:5000	1:26000	czarno-biały	1992,2000	zdjęcia analogowe

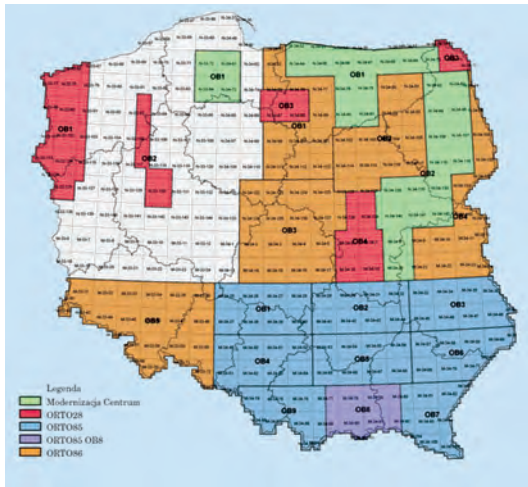
Godło	Wielkość Piksela	Aktualność	Skala Orta	Skala Zdjęcia	Kolor	Układ Wsp.	Źródło
N-34-80-D-c-3-4	0,5 m	2002	1:5000	1:26000	RGB	1992,2000	zdjęcia analogowe

Godło	Wielkość Piksela	Aktualność	Skala Orta	Skala Zdjęcia	Kolor	Układ Wsp.	Źródło
N-34-58-D-c-1-4	1,0 m	2002	1:5000	0	RGB	1992,2000	scena satelitarna

**Ryc. 14.9.2.** Ortofotomapy zgromadzone w zasobie CODGiK  
(źródło: [www.codgik.gov.pl](http://www.codgik.gov.pl))

terenowy osiąga nawet 10–15 cm, obrazy z kamer cyfrowych). Na rok 2009 została zaplanowana przez ARiMR modernizacja i aktualizacja baz danych Systemu LPIS (IACS), w tym opracowanie ortofotomap na potrzeby LPIS/IACS dla obszaru południowo-wschodniej Polski (ok. 82 tys. km<sup>2</sup>), który podzielono na dziewięć bloków (ryc. 14.9.3). Zaplanowano wykonanie zdjęć barwnych (RGB) wielkoformatowymi kamerami cyfrowymi, aby uzyskać materiały w skali 1:14 000 (cztery kanały wielospektralne + kanał panchromatyczny). Zdjęcia lotnicze i ortofotomapy (piksel terenowy 25 cm) przekazane zostaną do CODGiK (układ PUGW 2000). Jest to pierwsza w Polsce kampania fotolotnicza dla tak dużego obszaru z wykorzystaniem kamer cyfrowych, które mogą dostarczyć także interesujących dla leśników informacji z zakresu bliskiej podczerwieni (NIR). Trzeba mieć jednak na uwadze fakt, że sporym ograniczeniem jest sezon wykonywania zdjęć, tj. wczesna wiosna 2009 r.

WODGiK udostępniła materiały z PZGiK na podstawie złożonego zamówienia, w którym wnioskodawca określa typ i format materiałów. Ortofotomapy (zwykle GEOTIFF + plik TFW) udostępniane są także użytkownikom systemów GIS on-line poprzez serwisy (WMS) Geoportalu ([www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)). Ceny udostępniania większości materiałów regu-



Ryc. 14.9.3. Aktualizacja LPIS (ortofotomapy) przeprowadzana w roku 2009 (źródło: ARiMR)

luje Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 19 lutego 2004 r. w sprawie wysokości opłat za czynności geodezyjne i kartograficzne oraz udzielanie informacji, a także za wykonywanie wyrysów i wypisów z operatu ewidencyjnego (Dz.U. z dnia 9 marca 2004 r.). Zgodnie z tym rozporządzeniem, ceny wynoszą: 12 zł za zdję-

cie lotnicze, a dla ortofotomap opracowanych ze zdjęć w skali 1:5000 – 5 zł/ha (dla obszaru poniżej 100 ha, dla większych obszarów ustalone zostały zniżki od 30 do 85%). Najczęściej materiały LPIS (2003–2005) sprzedawane są w cenie 20 zł za arkusz (cięcie sekcyjne mapy 1:10 000 PUWG 1992), z tym że Lasy Państwowe otrzymują bardzo wysokie upusty (90%), a zdarza się, iż do wybranych projektów otrzymują materiały całkowicie bezpłatnie (wynika to z nowelizacji ustawy o ochronie przyrody z dnia 3 października 2008 r. i dotyczy jednostek, na terenie których występują obszary ESE Natura 2000).

Dodatковым źródłem pozyskania aktualnych zdjęć lotniczych i opracowanych na ich bazie ortofotografii czy ortofotomap są firmy fotolotnicze świadczące takie usługi. Wśród nich wymienić należy przede wszystkim MGGP Aero ([www.mggpaero.com](http://www.mggpaero.com)) – firmę, która od kilku lat poza dwiema lotniczymi kamerami analogowymi ma także kamerę cyfrową DMC oraz dysponuje własnymi dwoma samolotami. Kamera DMC ma możliwość obrazowania z pikselem do 5 cm oraz separowanymi kanałami spektralnymi (w tym bliska podczerwień). MGGP Aero prowadzi kompleksową obsługę, od pozyskania danych do ich przetworzenia w postaci ortofotomapy (piksel 20–40 cm). Inne firmy świadczące usługi związane z pozyskaniem cyfrowych zdjęć, generowaniem ortofotomap, NMT czy skanowaniem lotniczym (ALS) to: DEPHOS, EUROSENSE Nadarzyn, FinSkog Geomatics International, Fotokart, Geokart-International, GEOMAR, GEOSYSTEMS Polska, GISPRO (niebawem otrzyma wielozadaniowy samolot z kamerą fotogrametryczną Vexcel), PGI COMPASS, PHU POLKART, ProGea Consulting, Tukaj Mapping Central Europe oraz OPGiK. Niektóre firmy (np. GEOSYSTEMS Polska czy MGGP Aero) prowadzą własne archiwa obrazów fotolotniczych, pozyskanych w ostatnich latach kamerami analogowymi lub cyfrowymi. Bardzo duże archiwalne zbiory udostępniane były kiedyś przez

Wojskowy Ośrodek Geodezji i Teledetekcji (jednostka podlegająca Zarządowi Geografii Wojskowej). Niestety, liczne modernizacje struktury w Wojsku Polskim spowodowały likwidację gospodarstw pomocniczych wraz ze świadczonymi przez nie usługami, takimi jak np. wykonywanie kopii zdjęć archiwalnych będących w zasobach WP.

## 14.9.2. Zobrazowania satelitarne

W pozyskiwaniu, przetwarzaniu i udostępnianiu zobrazowań satelitarnych główną pozycję w Polsce zajmują firmy komercyjne. PZGiK (COD-GiK) oferuje w tym zakresie wyłącznie ortofotomapy opracowane na bazie wysokorozdzielczych scen satelitarnych (IKONOS, kanał panchromatyczny) dla części północno-zachodniej Polski oraz pasa przygranicznego. Firmy komercyjne mają w swojej ofercie zarówno archiwalne zobrazowania satelitarne, jak i nowo zamawiane, stanowiące materiał wyjściowy do opracowania zaawansowanych produktów, np. ortofotomap cyfrowych (B&W, RGB czy CIR). Czołowe firmy w tym sektorze to Satelitarne Centrum Operacji Regionalnych SA (SCOR ma własne centrum odbioru w Komorowie i dostęp do satelitów IKONOS, QuickBird oraz WorldView-1) oraz Techmex (75% udziału w SCOR). Firmy te w ostatnich latach dostarczyły wielu przetworzonych zobrazowań dla Ministerstwa Środowiska i Lasów Państwowych. Pozostałe, takie jak: Fin Skog Geomatics International, GEOSYSTEMS Polska, mają podpisane umowy na dystrybucję w Polsce zobrazowań różnych światowych konsorcjów oferujących dane satelitarne. Poniżej omówiono wybrane satelity, zaliczane do tzw. wysokorozdzielczych (ang. VHRS), dostarczające zobrazowań najbardziej zbliżonych jakościowo (rozdzielczość terenowa) do zdjęć lotniczych, a często informacją radiometryczną (bliska podczerwień) przewyższających zdjęcia RGB czy B&W, używane w opracowaniach na potrzeby leśnictwa (urządzanie lasu: detekcja koron, określanie składu gatunkowego, aktualizacja LMN, szacowanie uszkodzeń i zniszczeń itp.).

### 14.9.2.1. Satelita IKONOS-2 (GeoEye)

Informacje techniczne o satelicie i pozyskiwanych obrazach:

- właściciel: GeoEye (dawniej Space Imaging), data i miejsce wystrzelenia: 29 października 1999 r., Kalifornia, orbita: 681 km, 98,1°, synchroniczna do Słońca;
- rozdzielczość terenowa: 0,82 m kanał panchromatyczny (PAN) nadir, 3,20 m kanały wielospektralne (MS: RGB + NIR) przy uchyleniu 26° kamery od nadiru: 1 m PAN, 4 m MS;
- szerokość pasa rejestracji obrazu: 12,2 km, możliwość obrazowania stereo (3D);

- maksymalne wychylenie sensora: dowolne, czas rewizyty: 3 dni, rozdzielczość radiometryczna: 11 bitów/piksel;
- zakres spektralny kanału PAN:  $0,526 \div 0,929 \mu\text{m}$ , niebieski (Blue):  $0,445 \div 0,516 \mu\text{m}$ , zielony (Green):  $0,506 \div 0,595 \mu\text{m}$ , czerwony (Red):  $0,632 \div 0,698 \mu\text{m}$  oraz bliska podczerwień (InfraRed):  $0,757 \div 0,853 \mu\text{m}$ .  
Typy oferowanych produktów:
- jednokanałowy obraz panchromatyczny (PAN) o rozdzielczości terenowej  $1 \times 1 \text{ m}$ ;
- wielokanałowe obrazy wielospektralne o rozdzielczości  $4 \times 4 \text{ m}$ : 3-kanałowy (RGB), kompozycja z podczerwienią, tzw. CIR (G, R, NIR) lub czterema wszystkimi kanałami MS;
- wielokanałowe obrazy MS o rozdzielczości  $1 \times 1 \text{ m}$  (po procesie tzw. pan-sharpening, czyli wyostrażania krawędzi obrazów MS kanałem PAN);
- jednokanałowy obraz panchromatyczny (PAN) o rozdzielczości  $1 \text{ m}$  oraz kanały MS w trzech opcjach: RGB, CIR lub cztery separowane jednokanałowe obrazy MS.

W dniu 6 sierpnia 2008 r. następcą satelity IKONOS został **GeoEye-1**, umieszczony na orbicie (681 km) kosztem 502 mln dol. Dostarcza już zobrażeń o podobnej rozdzielczości spektralnej i podwyższonej rozdzielczości terenowej (0,41 m piksel kanału PAN oraz 1,65 m kanałów MS). Obrazy zapisywane są w rozdzielczości radiometrycznej 11 bitów/piksel. Szerokość sceny wynosi 15,2 km. Produkty bazujące na przetworzonych obrazach charakteryzują się wielkością 0,5 m piksel PAN oraz 2,0 m kanałów MS. W procesie „pan-sharpening” produkt przewyższa jakością (geometria i radiometria) ortoobrazy ze zdjęć lotniczych Phare, wykonywanych w skali 1:26 000 (piksel 0,75 m).

Zamawianie scen satelitarnych IKONOS i produktów odbywać się może za pośrednictwem firmy SCOR i Techmex. Pojedyncze arkusze ortofotomap archiwalnych dostępne są na witrynie internetowej Geoserwer.

### 14.9.2.2. Satelita QuickBird-2

Informacje techniczne o satelicie i pozyskiwanych obrazach:

- właściciel: konsorcjum DigitalGlobe, data i miejsce wystrzelenia: 18 października 2001 r., Kalifornia;
- orbita: 450 km,  $97,2^\circ$ , synchroniczna do Słońca;
- rozdzielczość terenoowa: w nadirze 0,61 m kanał PAN, 2,44 m kanały MS, wychylenie kamery  $25^\circ$  od nadiru: 0,72 m kanał PAN oraz 2,88 m kanały MS;
- szerokość pasa rejestracji obrazu: 16,5 km, możliwość obrazowania stereo (3D);
- maksymalna wielkość pozyskanej sceny:  $16,5 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ , maks. wychylenie sensora:  $45^\circ$ ;
- czas rewizyty: 1–3,5 dnia, głębia pikseli: 11 bitów/piksel;

- zakres spektralny kanału PAN:  $0,45 \div 0,90 \mu\text{m}$ , w kanałach wielospektralnych – niebieski (B):  $0,45 \div 0,52 \mu\text{m}$ , zielony (G):  $0,52 \div 0,60 \mu\text{m}$ , czerwony (R):  $0,63 \div 0,69 \mu\text{m}$ , podczerwony (NIR):  $0,76 \div 0,90 \mu\text{m}$ .

Następcą satelity QuickBird stał się od 18 września 2007 r. satelita **WorldView-1**, choć te dwa systemy dalej działają równolegle. WorldView-1 obrazuje z rozdzielczością terenową 0,5 m (nadir), ale jedynie w kanale PAN (brak kanałów RGB oraz NIR stwarza poważne ograniczenia dla leśnictwa). Pełna scena satelitarna to  $17,6 \text{ km} \times 14 \text{ km}$ . Istnieje możliwość pozyskania scen o pokryciu stereo. Prawdziwym następcą QuickBird-2 i przy okazji konkurentem dla systemu GeoEye-1 jest wystrzelony w październiku 2009 r. satelita **WorldView-2**, który charakteryzuje się rejestracją w kanale PAN (0,48 m) oraz w ośmiu kanałach wielospektralnych (MS) z rozdzielczością terenową 1,8 m. Niezmiernie ważne jest zwiększenie nie tylko rozdzielczości terenowej, ale także – co bardzo istotne dla wykorzystania tych obrazów w leśnictwie czy ochronie przyrody – zwiększenie liczby kanałów wielospektralnych o kolejne cztery. Pojawia się więc: bardzo ważny „red edge” (monitorowanie stanu zdrowotnego drzewostanów), „yellow”, „coastal” oraz „NIR2”.

Zamawianie zobrazowań z archiwum i pozyskiwanie nowych obrazów satelitarnych realizować można przez firmy Fin Skog Geomatics International oraz SCOR. W zależności od wymagań klienta dostarczane są wstępnie przetworzone i skorygowane geometrycznie i radiometrycznie dane lub gotowe produkty (ortofotomapy w różnych kompozycjach). Archiwalnych zobrazowania DigitalGlobe można przeglądać na witrynie internetowej <http://archivetool.digitalglobe.com> bądź najprościej w programie Google Earth.

### 14.9.2.3. Satelita SPOT

Informacje techniczne o satelicie i pozyskiwanych obrazach:

- właściciel: Spot Image, Francja, data i miejsce wystrzelenia: 3 maja 2002 r., Kourou, Gujana Francuska;
- orbita: 822 km,  $98,7^\circ$ , synchroniczna do Słońca;
- rozdzielczość terenowa w nadirze: 2,5 m kanał PAN (tryb super mode), 5 (10) m kanały wielospektralne (G, R, NIR), SWIR 20 m;
- szerokość pasa rejestracji obrazu: 60 km, możliwość obrazowania stereo (3D);
- maksymalna wielkość sceny:  $60 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ , maksymalne wychylenie sensora:  $45^\circ$ ;
- czas rewizyty: od 2 do 3 dni, rozdzielczość radiometryczna: 8 bitów/piksel;
- zakres spektralny kanału PAN:  $0,48 \div 0,71 \mu\text{m}$ , w kanałach wielospektralnych – zielony (G):  $0,50 \div 0,59 \mu\text{m}$ , czerwony (R):  $0,61 \div 0,68 \mu\text{m}$ , bliska podczerwień (NIR):  $0,71 \div 0,89 \mu\text{m}$ ; podczerwony SWIR:  $1580 \div 1750 \mu\text{m}$ .

Zamawianie produktów w firmach: Fin Skog Geomatics International oraz GEOSYSTEMS Polska, a przeglądanie pozyskanych scen dostępne na witrynie internetowej: <http://sirius.spotimage.fr>. W ostatnim czasie na potrzeby monitorowania obszarów ESE Natura 2000 dostarczono do Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska mozaikę dla obszaru całej Polski z lat 2006–2008.

#### 14.9.2.4. Inne systemy satelitarnego obrazowania

Poniżej przedstawiono inne zobrazowania, które do różnych celów wykorzystywane są w leśnictwie i w ochronie przyrody. Firma GEOSYSTEMS Polska oferuje dostawę zobrazowań pozyskanych przez satelity:

- KOMPSAT-2 (Korea, 2006), rozdzielczość terenowa (nadir) 1 m PAN, 4 m kanały MS (10 bitów/piksel), szerokość pasa rejestracji obrazu: 15 km, maksymalne wychylenie sensora: 30°, czas rewizyty: 3 dni;
- FORMOSAT-2 (Tajwan, 2004), rozdzielczość terenowa (nadir) 2 m kanał PAN, 8 m kanały MS, szerokość pasa rejestracji obrazu: 24 km, maksymalne wychylenie sensora:  $\pm 45^\circ$ , czas rewizyty: 1 dzień;
- IRS P6 (Resourcesat 1, Indie, 2003), rozdzielczość terenowa (nadir) 6 m kanał PAN (6 bitów/piksel), kanał LISS (G, R, NIR, SWIR) 23,5 m, szerokość pasa rejestracji obrazu: 70 km, czas rewizyty: 5 dni, wychylenie sensora: do 26° (PAN).

Oferowane produkty są wstępnie skorygowane geometrycznie, zawierają zestaw danych niezbędnych do samodzielnego przeprowadzenia ortorektyfikacji na podstawie parametrów satelity (RPC). Korekcja radiometryczna, a także ortorektyfikacja i wizualizacje 3D dostarczane są na zamówienie.

W ofercie GEOSYSTEMS Polska znajdują się także zobrazowania radarowe, bardzo ważne ze względu na możliwość pozyskiwania obrazów podczas braku światła słonecznego (system aktywny), zachmurzonego nieba, mgły czy pożaru (zadymienie):

- Terra SAR-X (Niemcy, DLR, Atrium – 2007), obrazowanie w paśmie X promieniowania mikrofalowego, scena: 10 km  $\times$  5 km, zakres kątów: 20°–50°, rozdzielczość – tryby: Spotlight 1 m, StripMap 3 m, ScanSAR 16 m, polaryzacja: HH, VH, HV, VV;
- RADARSAT-2 (Kanada), radar boczno-wybiegający (SAR), scena: 20 km  $\times$  20 km, zakres kątów: 20°–60°, rozdzielczość terenowa: do 3 m.

Inne niezmiernie cenne dla leśnictwa zobrazowania dostarczane są przez satelity EROS A, EROS B (ImageSat International, rozdzielczość 0,7 m PAN) oraz przez pięć satelitów RapidEye AG, wystrzelonych w roku 2008 (5 m rozdzielczość terenowa, pięć kanałów spektralnych, w tym „red edge”), przeznaczonych do monitorowania obszarów rolniczych w UE, niezmiernie ważnych w wypadku zdarzeń klęskowych w leśni-

ctwie, a to ze względu na czas rewizyty – 1 dzień. W roku 2009, w okresie od kwietnia do września, satelity RapidEye (obrazy dostarczane na rynek polski przez firmę ProGea Consulting) zarejestrowały niemal 90% powierzchni naszego kraju. W roku 2010 planowane jest czterokrotne pokrycie Polski obrazami wielospektralnymi RapidEye. Inne satelity, takie jak Cartosat-1 i CartoSat-2, są już operacyjne, jeszcze inne wciąż czekają na start (np. seria Pleiades-HR).

## 14.10. Możliwości wykorzystania teledetekcji i fotogrametrii w Lasach Państwowych

mgr inż. KRZYSZTOF OKŁA – Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Wydział Urządzania Lasu i Geoinformatyki

### 14.10.1. Wprowadzenie

Wiele problemów z różnych dziedzin leśnictwa można rozwiązać taniej, szybciej i dokładniej niż dotychczas stosowanymi metodami, wykorzystując do tego nowoczesne technologie teledetekcyjne. Odpowiednio przygotowane zdjęcia o szczegółowości terenowej poniżej 1 m, potencjalnie informacji zarejestrowanym w paśmie promieniowania widzialnego i (lub) bliskiej podczerwieni, dają użytkownikowi źródło informacji o środowisku przyrodniczym. Wiedzę tę, najczęściej w połączeniu z LMN i bazą opisową SILP, można wykorzystywać do rozwiązywania problemów w różnych działach gospodarki leśnej.

#### **1. Urządzanie lasu:**

- wyznaczenie prawidłowego przebiegu granic wyłączeń taksacyjnych z wykorzystaniem ortofotomapy jest najwierniejszym odzwierciedleniem faktycznej lokalizacji pododdziałów,
- analizy teledetekcyjne pozwalają na pozyskiwanie informacji o wielu cechach taksacyjnych drzewostanu.

#### **2. Aktualizacja SILP (w tym LMN):**

- użycie aktualnych zdjęć (satelitarnych, lotniczych lub nawet niemytrycznych) do rejestracji zmian w geometrii nowo powstałych wydzieleń i powierzchni nie stanowiących wydzieleń, utworzonych w wyniku przeprowadzonych czynności gospodarczych, jest najdokładniejszą metodą aktualizacji granic podziału wewnętrznego;
- przeprowadzając analizy teledetekcyjne aktualnego zdjęcia, można odczytać wiele zmian w atrybutach drzewostanów, zmian zaistniałych w trakcie realizacji planu urzędzeniowego, co stanowi istotną pomoc w bieżącej aktualizacji bazy opisowej w SILP.

- 3. Ochrona lasu** – stan zdrowotny i sanitarny lasu, a zwłaszcza obszary zagrożone występowaniem szkodliwych owadów i grzybów pasożytniczych, można przeanalizować na podstawie aktualnej ortofotomapy (zwłaszcza wykonanej na bazie zdjęcia spektrostrefowego), opierając się na stopniu defoliacji, co pozwoli na dokładne określenie zasięgu granic czynnika szkodliwego oraz szybkie i precyzyjne wyznaczenie obszaru likwidacji szkody.
- 4. Klęski żywiołowe** – wykonane w odpowiednim czasie zdjęcie lotnicze lub wysokorozdzielcze zobrazowanie satelitarne, a w niektórych przypadkach (zwłaszcza przy niewielkich powierzchniowo zdarzeniach) nawet zdjęcie niemetryczne, może być nieocenione przy analizowaniu skutków klęsk żywiołowych, szczególnie wyliczeniu powierzchni i wielkości poniesionych strat, zaplanowaniu odnowienia powierzchni pokłeskowej czy nawet (np. przy powodziach) bieżącym monitorowaniu postępu zniszczeń.
- 5. Ochrona przeciwpożarowa lasu:**
  - profilaktyka: identyfikacja obszarów przesuszonych, projektowanie miejsc pod nowe wieże ppoż. z uwzględnieniem różnic wysokości i widoczności (ortofotomapy);
  - akcja gaśnicza: monitorowanie zasięgu strefy ogniowej dużych i długo trwających pożarów, zwłaszcza pożarów torfowisk (przekaz online kamery zamontowanej na samolocie czy lotnicze zdjęcia niemetryczne wykonywane z dużej wysokości lub aktualne zdjęcia satelitarne);
  - monitoring pokłeskowy: lokalizacja pożarzyska, pomiar powierzchni pożaru, szacowanie strat sortymentowych (ortofotomapa w połączeniu z LMN i bazami opisowymi);
  - działania odnowieniowe: wyznaczanie terenów pod odnowienie, lokalizacja fragmentów lasu mało uszkodzonych pożarem (ortofotomapa w połączeniu z LMN).
- 6. Ochrona przyrody** – analiza teledetekcyjna, prowadzona w kierunku lokalizacji zasięgu obszarów chronionych oraz jednorodnych powierzchni noszących cechy obiektów podlegających ochronie (dotyczy zwłaszcza dyrektywy siedliskowej programu Natura 2000).
- 7. Hodowla lasu** – analiza teledetekcyjna, prowadzona w kierunku szczegółowej lokalizacji miejsc o znanym spadku i ekspozycji, znajdowanie samosiewów i nierejestrowanych zalesień oraz szkód defraudacyjnych, zwłaszcza na terenie lasów nadzorowanych.
- 8. Użytkowanie lasu** – analiza teledetekcyjna, prowadzona w kierunku lokalizacji miejsc składowania pozyskanego drewna, projektowanie szlaków zrywkowych i dróg wywozowych, znajdowanie nierejestrowanego pozyskania na terenie lasów nadzorowanych.
- 9. Inżynieria leśna** – ortofotomapa w połączeniu z LMN i bazami opisowymi może być przydatna przy projektowaniu terenów pod budownictwo drogowe (zwłaszcza planowane autostrady), wraz z szacowaniem wartości drzew przewidzianych do usunięcia, przy projektowaniu no-

wych dróg leśnych i zabudowy potoków (istotne w górach), w inwentaryzacji dróg (zwłaszcza z wykorzystaniem kartowania mobilnego).

- 10. Turystyka** – ortofotomapa pozwala na określenie pola widoczności z punktów obserwacyjnych, projektowanie szlaków turystycznych, wykorzystanie zdjęć w działaniach promocyjnych.
- 11. Edukacja przyrodniczo-leśna** – wykorzystywanie zdjęć (nie tylko fotogrametrycznych) w celu przybliżenia społeczeństwu walorów środowiska naturalnego.

## **14.10.2. Przykłady zastosowania zdjęć lotniczych i satelitarnych w gospodarce leśnej**

Technika rejestracji informacji o drzewostanach, informacji pozyskiwanych metodami teledetekcyjnymi, opracowana przez polską naukę leśną (SGGW, IBL, UR w Krakowie, UP w Poznaniu) i dopuszczona przez „Instrukcję urządzania lasu”, jest stosowana w praktyce, przede wszystkim przez wykonawców planów urządzania lasu dla nadleśnictw. Jest niezwykle przydatna, zwłaszcza do określania granic wyłączeń taksacyjnych podczas rewizji urzędniowej oraz przy interpretacji teledetekcyjnej cech drzewostanów, ale także w innych niż urządzanie lasu dziedzinach leśnictwa.

Poniżej przedstawiono przykłady możliwych zastosowań wyników interpretacji teledetekcyjnej, którą można wykonać z wykorzystaniem zdjęć lotniczych, obrazowań satelitarnych wysokiej rozdzielczości, a w kilku przypadkach – zdjęć niemetrycznych i kartowania mobilnego (MMS). Niektóre z zastosowań mają w dużym stopniu znaczenie praktyczne, inne – na razie wyłącznie teoretyczne.

### **1. Weryfikacja podziału powierzchniowego**

Stosunkowo duże rozbieżności pomiędzy informacją zawartą na leśnych mapach numerycznych a stanem rzeczywistym wskazują na potrzebę weryfikacji podziału powierzchniowego lasu (zwłaszcza wydzieleń drzewostanowych) z wykorzystaniem ortofotomapy wykonanej na bazie zdjęć lotniczych lub wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych.

### **2. Analizy teledetekcyjne**

Przy zastosowaniu analizy teledetekcyjnej zdjęć wykonanych w paśmie widzialnym i w bliskiej podczerwieni istnieją możliwości pozyskiwania informacji o niektórych cechach taksacyjnych drzewostanu, takich jak: skład gatunkowy, zwarcie, zagęszczenie, a nawet wysokość drzew, oraz zgrubne szacowanie zasobności. Niewątpliwie więcej informacji będzie można pozyskać, gdy do praktyki trafią metody lidarowe, znajdujące się jeszcze w fazie badań.



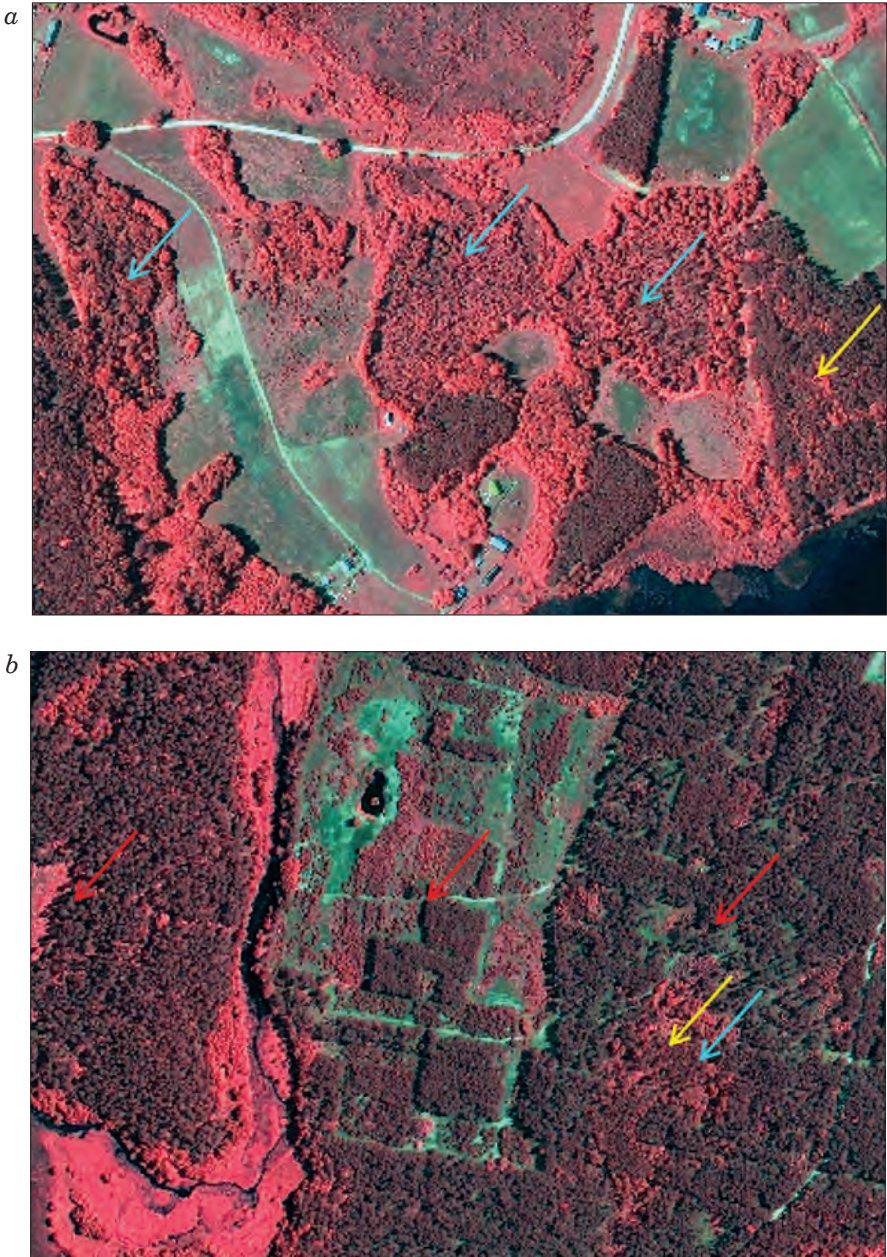
**Ryc. 14.10.1.**  
Ortofotomapa  
z nałożonym  
podziałem  
powierzchniowym  
z poprzedniego  
okresu  
urzędzeniowego.  
Żółte strzałki  
wskazują  
wydzielienia,  
na które należy  
zwrócić szczególną  
uwagę przy  
inwentaryzacji  
lasu (źródło:  
Techmex SA;  
zdjęcie z satelity  
IKONOS)

Analizy mogą być pomocne, na przykład, do przeprowadzania szacunkowego opisu taksacyjnego przed przystąpieniem do prac terenowych urzędzenia lasu, co powinno znacznie skrócić czas pobytu taksatora w lesie.

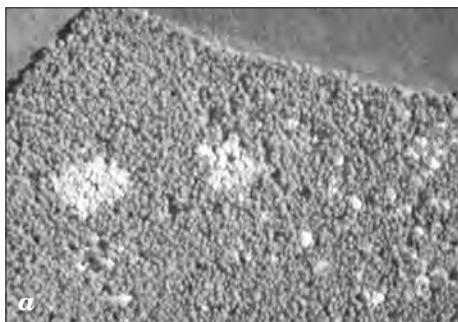
Na ryc. 14.10.2 pokazano kilka elementów zdjęć satelitarnych, z których można odczytać informacje przydatne do analiz.

### 3. Uzupełnienie pomiarów naziemnych

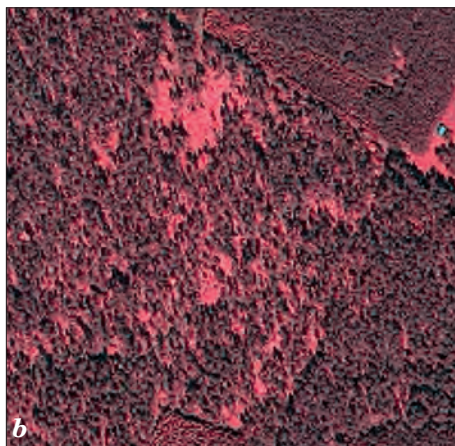
Zdjęcia lotnicze lub wysokorozdzielcze zobrażenia satelitarne, ze względu na szczegółowość, obiektywizm i łatwość dostępu do prezentowanych informacji, są niezwykle przydatnym uzupełnieniem pomiarów naziemnych wykonywanych w ramach prac urzędzeniowych.



**Ryc. 14.10.2.** Kompozycja w barwach umownych, utworzona z obrazu wielospektralnego satelity IKONOS.  
W drzewostanach wskazanych strzałką żółtą (→) można ustalić zmieszanie i zwarcie, niebieską (→) – skład gatunkowy według udziału powierzchniowego, czerwoną (→) – oszacować wysokość drzew (źródło: Techmex SA; zdjęcie z satelity IKONOS)



**Ryc. 14.10.3a.** Różnogatunkowość w zwartym drzewostanie. Dokładny pomiar widocznych na zdjęciu kęp brzozy (jasne plamy) w zwartym drzewostanie sosnowym najlepiej wykonać z wykorzystaniem zdjęcia „z lotu ptaka” (źródło: Techmex SA; zdjęcie z satelity IKONOS)



**Ryc. 14.10.3b.** Luki i przerzedzenia. Zdjęcia, wykorzystujące zwłaszcza kanał podczerwieni, pozwalają na dokładne zlokalizowanie luk i przerzedzeń (źródło: Techmex SA; zdjęcie z satelity IKONOS)



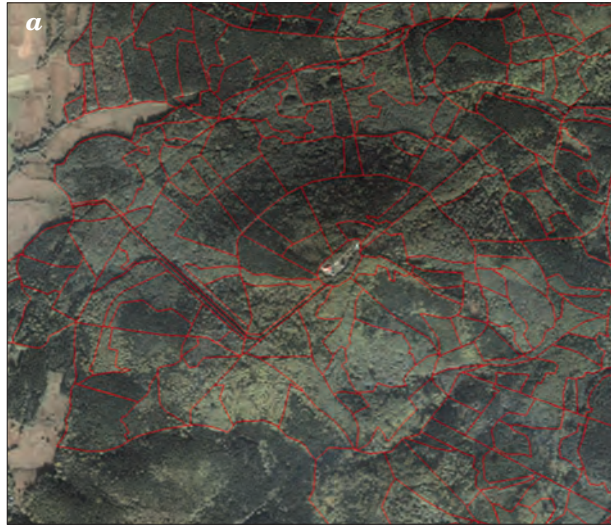
**Ryc. 14.10.3c.** Teren trudno dostępny dla taksacji. Wkartowanie wydzieleń w miejscach trudno dostępnych (np. na wyspie) można najdokładniej wykonać na obrazie teledetekcyjnym (źródło: Techmex SA; zdjęcie z satelity IKONOS)

Na zamieszczonych powyżej zdjęciach (ryc. 14.10.3a, b, c) pokazano sytuacje, w których analiza teledetekcyjna jest najbardziej optymalnym sposobem dokładnego zlokalizowania przez taksatora opisywanych powierzchni.

#### 4. Określenie ekspozycji i nachylenia stoku

Określenie ekspozycji i nachylenia stoku jest konieczne przy taksacji w rejonach górskich. Dotychczas taksator szacował ich średnią wartość dla całego pododdziału. Precyzyjnie można to ustalić na podstawie leśnej mapy numerycznej i numerycznego modelu terenu. Wielce pomocne do tego

**Ryc. 14.10.4.**  
Generowanie nachylenia  
stoków.  
Na ortofotomapę zdjęcia  
satelitarnego Ikonos  
nałożono granice  
wyłączeń taksacyjnych (a)  
i wygenerowano z modelu  
numerycznego terenu  
nachylenia stoków  
według parametrów  
z „Instrukcji urządzania  
lasu” (b)  
(źródło: Techmex SA;  
zdjęcie z satelity  
IKONOS przedstawiające  
fragment  
Nadleśnictwa Wałbrzych;  
przekształcenie  
P. Kyc – RDLP  
we Wrocławiu)



celu może się okazać zastosowanie ortofotomapy wykonanej ze zdjęcia satelitarnego lub lotniczego.

## 5. Przebieg granic wyłączeń taksacyjnych

Od wielu lat pracownicy Lasów Państwowych narzekają na jakość inwentaryzacji wykonanej w ramach prac urzędzeniowych, w tym na przebieg granic wyłączeń taksacyjnych. W wyniku prowadzonych czynności gospodarczych często dopiero w trakcie realizacji planu ujawniają się różne nieprawidłowości, które utrudniają właściwe prowadzenie gospodarki

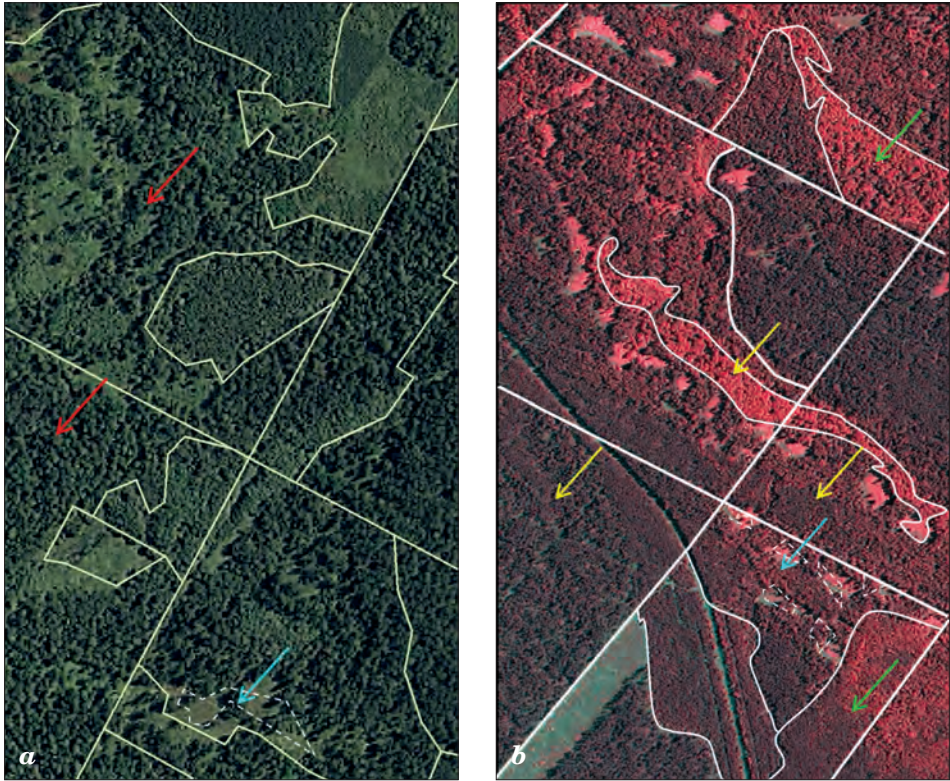


**Ryc. 14.10.5.** Błędy w granicach wydziałów taksacyjnych.  
*Obramowane na czerwono granice wyłączeń taksacyjnych wymagają niewątpliwie weryfikacji terenowej przed podpisaniem protokołu odbioru prac taksacyjnych od wykonawcy inwentaryzacji (źródło: Techmex SA; zdjęcia z satelity IKONOS)*

leśnej. Ściśle związana jest z tym powierzchnia pododdziału. Niejednokrotnie odbija się to na wynagrodzeniach robotników leśnych, które uzależnione są od powierzchni podanej w opisie taksacyjnym, na wyliczaniu liczby sadzonek przewidzianych w planie odnowienia lasu, na szacowaniu miąższości w wydzieleniu czy w szacunkach brakarskich. Analizy teledetekcyjne w pewnym stopniu mogą temu zaradzić.

## **6. Weryfikacja opisu taksacyjnego z wykorzystaniem analizy teledetekcyjnej**

Niektóre elementy opisu taksacyjnego można sprawdzać, wykorzystując prostą wizualną interpretację teledetekcyjną. Informacje zapisane przez taksatora dotyczące składu gatunkowego, zwarcia, form mieszanina, ekspozycji i nachyleniu stoku, a także liczby, wielkości i lokalizacji powierzchni nie stanowiących wydziałów (tzn. kęp, gniazd, luk, przerzedzeń), mogą zostać zweryfikowane ze zdjęcia, co pokazano na ryc. 14.10.6.



**Ryc. 14.10.6.** Ortofotomapa w barwach naturalnych (a) i w bliskiej podczerwieni (b) z nałożonymi wektorami granic wydzieleń.  
Na zdjęciu możliwe jest sprawdzenie, czy w opisie taksacyjnym wprowadzono prawidłowo w przykładowych drzewostanach wskazanych strzałką:  
zieloną (→) – skład gatunkowy,  
żółtą (→) – formy mieszanica,  
czerwoną (→) – zwarcie,  
niebieską (→) – wielkości i usytuowanie w wydzieleniach luk, przerzedzeń, gniazd i kęp (źródło: Techmex SA; zdjęcie z satelity IKONOS)

## 7. Bieżąca aktualizacja leśnej mapy numerycznej

Gdy zna się dostępność oraz aktualność zdjęć i materiałów teledetekcyjnych u ich dostawców, istnieje możliwość wykonywania bieżącej aktualizacji zmian zaistniałych w wyniku prowadzonych czynności gospodarczych lub wynikających z błędnego wkartowania granic wydzieleń taksacyjnych. Zmiany te będą dotyczyły najczęściej zmian w geometrii wydzieleń i powierzchni nie stanowiących wydzieleń. Możliwe jest również przeprowadzanie analiz teledetekcyjnych zmian zaistniałych w czasie realizacji planu lub pominiętych przy odbiorze prac taksacyjnych w cechach drzewostanów (korekta składu gatunkowego, zwarcia, zagęszczenia).



**Ryc. 14.10.7.** Aktualizacja wykonanych czynności gospodarczych.

Na zdjęciu z prawej strony kolorem czerwonym wrysowano granice nowych wydziełów powstałych w wyniku prowadzenia bieżącej działalności gospodarczej, kolorem żółtym – poprawioną granicę wydziałenia, nieprawidłowo wkartowanego przez taksatora (źródło: Techmex SA; zdjęcie z satelity IKONOS)

## 8. Inwentaryzacja dróg leśnych

Inwentaryzację dróg leśnych metodą systemu kartowania mobilnego (MMS) można śmiało zakwalifikować do działu teledetekcji i fotogrametrii, a to ze względu na sposób rejestracji, pomiaru i interpretacji danych przestrzennych obejmujących pas drogowy wraz z jego najbliższym otoczeniem. Przykłady praktycznego wykorzystywania MMS w lasach znajdzie Czytelnik w rozdz. 14.8.3.

## 9. Inwentaryzacja stanu zdrowotnego i sanitarnego lasu

Inwentaryzację stanu zdrowotnego i sanitarnego lasu na podstawie czynnika defoliacji najlepiej wykonywać na zdjęciach w podczerwieni. Można na nich z dużym prawdopodobieństwem określić partie drzewostanów, które w różnym stopniu zostały zaatakowane przez czynnik szkodliwy powodujący przebarwienie igieł lub liści. Najwyraźniej na zdjęciach można zaobserwować posusz (ryc. 14.10.8).

**Ryc. 14.10.8.** Posusz w drzewostanie sosnowym. Kępy drzew w kolorze szarym pokazują zasięg występowania huby korzeniowej (źródło: J. Irlik, Nadleśnictwo Świerklaniec)



## 10. Zasięg gradacji szkodliwych owadów

Na zdjęciach w barwach nienaturalnych można dokładnie określić granice zasięgu gradacji szkodliwych owadów, co pozwoli na precyzyjne wyznaczenie obszaru oprysku.



**Ryc. 14.10.9.** Zasięg gradacji brudnicy mniszki. Barwne zdjęcie lotnicze w podczerwieni, na którym kolorem szaroniebieskim ukazane są partie drzew opanowane przez brudnicę mniszkę, a odcieniem czerwieni – drzewa zdrowe (źródło: IGiK – Opolis)

## 11. Monitorowanie klęsk żywiołowych

Wykorzystanie ortofotomapy do analizy skutków klęsk żywiołowych (wiatry wywalające, powodzie, duże pożary, śniegołomy itp.) pozwoli na szybkie (w ciągu kilku, najwyżej kilkunastu dni) zinwentaryzowanie zasięgu i obliczenie powierzchni pokłękowej, a w połączeniu z leśną mapą numeryczną i SILP – również wyliczenie wielkości poniesionych strat w miąższości powalonych lub uszkodzonych drzew. W wypadku zagrożenia powodziowego istnieje możliwość przeprowadzenia symulacji, która umożliwi określenie potencjalnej granicy zalanego terenu. Da to czas na podjęcie z wyprzedzeniem działań interwencyjnych (np. wywóz zerwanego surowca drzewnego, wzmocnienie infrastruktury drogowej i wodnej, ewakuację ludzi i zwierząt).

Analiza zdjęć pokłękowych pozwoli również zaplanować wielkość i sposób odnowienia powierzchni z uwzględnieniem możliwości pozostawienia na gruncie pojedynczych drzew lub ich grup, które rokują nadzieję na dalszy rozwój.

## 12. Wykorzystanie zdjęć do edukacji przyrodniczo-leśnej i turystycznego udostępniania terenów leśnych

Zdjęcia wyświetlane na ekranie komputera wraz z leśną mapą numeryczną prezentującą zasięg i strukturę nadleśnictwa będą lepiej przemawiały do odbiorców niż wykład ilustrowany wyłącznie mapą.



**Ryc. 14.10.10.** Drzewostany uszkodzone przez wiatr. Na zdjęciu spektrostrefowym kolor szaroniebieski pokazuje drzewa powalone lub uszkodzone przez wiatr, a odcień czerwony – drzewa, które oparły się huraganowi (źródło: zdjęcie lotnicze z Nadleśnictwa Pisz, wykonane po huraganie z 4 lipca 2002 r.)



*a*



*b*

**Ryc. 14.10.11.** Atrakcyjne formy terenowe. Ciekawa struktura pokrycia terenu i oryginalne formy leśne widziane z lotu ptaka, zwłaszcza w barwach naturalnych, pozwolą odbiorcy zobaczyć las z rzadko oglądanej perspektywy (źródło: Techmex SA; zdjęcia z satelity IKONOS)



**Ryc. 14.10.12.**  
*Pożar lasu.  
Kompozycja w barwach  
umownych, wykonana  
z obrazu  
wielospektralnego satelity  
IKONOS, pokazująca  
pożar lasu w Arizonie  
(USA). Kolor czerwony  
– roślinność żywa,  
nie objęta pożarem  
(źródło: [www.techmex.com.pl/uds.asp?currrent\\_id=1090&i=37](http://www.techmex.com.pl/uds.asp?currrent_id=1090&i=37))*

### 13. Zdjęcia w postaci wydruków

Wydruki fragmentów ortofotomapy utworzonej ze zdjęć lotniczych i satelitarnych mogą być przydatne do zilustrowania atrakcyjnych miejsc, które znajdują się w każdym nadleśnictwie. Wybrany obszar może być wydrukowany w dowolnym formacie i dowolnej skali. Istnieje możliwość uzupełniania wydruków warstwami wektorowymi LMN, które wzbogacą treść obrazu o dodatkową informację (np. linie podziału powierzchniowego). Dopisanie nazw (np. miejscowości, numerów oddziałów) pozwoli obserwatorowi szybciej zlokalizować rzeczywiste położenie obszaru prezentowanego na obrazie.

Istnieją również możliwości wykonywania folderów i druków reklamowych opartych na zdjęciach satelitarnych i danych LMN. Można na nich umieszczać trasy ścieżek przyrodniczoleśnych lub okolice jakiegoś ośrod-

**Ryc. 14.10.13.** Zdjęcia satelitarne  
w formie wydruków:  
a) w izbie edukacji przyrodniczo-leśnej,  
b) prezentacja przenośna, eksponowana  
w kularach konferencji SGGW  
(źródło: K. Okła – DGLP)



ka wyciecznikowego czy rezerwatu. Prezentowane na ryc. 14.10.14 przykłady pochodzą z IV wydania „Leśnego Przewodnika Turystycznego”, zdjęcia zostały nadesłane przez dyrekcję Wigierskiego PN.

### 14.10.3. Praktyczne stosowanie metod teledetekcyjnych w LP

Podane w rozdz. 14.10.2 przykłady wskazują na duże możliwości wspomagania zdjęciami wielorakich czynności prowadzonych w nadleśnictwie, związanych z lokalizacją terenową w różnych działach gospodarki leśnej. Najczęściej jednak zdjęcia lotnicze bądź satelitarne wykorzystywane są w pracach urządzeniowych. Wynika to niewątpliwie z rachunku ekonomicznego, prowadzonego przez wykonawców tych prac. Zamówienie aktualnego zdjęcia lotniczego bądź zakup wysokorozdzielczego zobrazowania satelitarne-

go, wykonanych w okresie bezpośrednio poprzedzającym prace terenowe, pozwala na przeprowadzenie wstępnej analizy pod kątem przebiegu granic podziału wewnętrznego oraz określenia niektórych elementów taksacyjnych. Informacje te nie tylko zwiększają dokładność opracowania, ale także obniżają jego koszty.

Mniejsze zainteresowanie zdjęciami lotniczymi i satelitarnymi na poziomie nadleśnictw również wynika z rachunku ekonomicznego. Koszt zdjęć aktualnych (zamawianych) jest znacznie wyższy niż korzyści, które można z nich



**Ryc. 14.10.14.**

*Zdjęcia lotnicze wykorzystane w udostępnianiu turystycznym lasów w Wigierskim PN (źródło: „Leśny Przewodnik Turystyczny 2005” – ORWLP w Bedoniu)*

uzyskać. Zakup tanich zdjęć archiwalnych – przy dużej zmienności geometrii podziału wewnętrznego w lasach – także jest ekonomicznie nieuzasadniony. Korzystne pod względem ekonomicznym jest pozyskiwanie dla niewielkich powierzchni aktualnych zdjęć niometrycznych, szczególnie przy aktualizacji LMN w trudno dostępnym terenie.

Teledetekcja i ściśle z nią związana fotogrametria wydają się jednak przyszłością geomatyki w lasach. Przy zwiększonej podaży zdjęcia zamawiane niewątpliwie potanieją, a wówczas analiza aktualnego obrazu lasu widzianego z lotu ptaka stanie się standardem.



# 15.

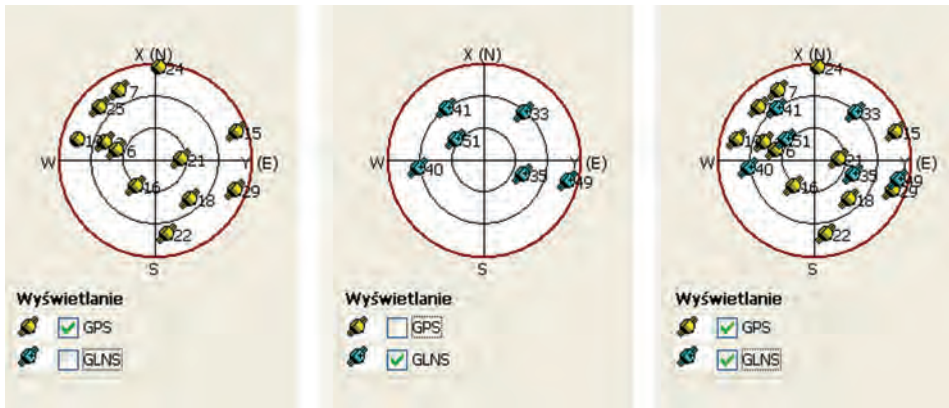
## Globalne systemy nawigacji satelitarnej

dr inż. MICHAŁ BRACH – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Leśny

### 15.1. Wstęp

Globalne systemy nawigacji satelitarnej (Global Navigation Satellite Systems – GNSS) można rozumieć jako systemy satelitów pozwalających na autonomiczne wyznaczenie położenia w jednolitym układzie odniesienia za pomocą odbiorników sygnałów satelitarnych. Dodatkowym atutem tej technologii jest możliwość określenia dokładnego czasu, ciągłość pracy niezależnie od warunków pogodowych oraz darmowy dostęp dla nieograniczonej liczby użytkowników na całym świecie. Budowę własnych systemów nawigacyjnych podjęło się kilka państw, jednak w praktyce pełną zdolność operacyjną osiągnął jedynie system amerykański GPS Navstar w kwietniu 1995 r. Istotnym ogniwem GNSS jest również rosyjski system Glonass, który mimo że nie pozwala na realizację procesu pomiarowego, wzbogaca konstelację satelitów GPS Navstar, przyczyniając się do wydajniejszej pracy wybranych odbiorników nawigacyjnych. Spośród innych systemów nawigacyjnych, znajdujących się na różnych etapach budowy, warto wymienić: Galileo (Unia Europejska), Compass (Chiny) oraz systemy o zasięgu regionalnym IRNSS (Indie) i QZSS (Japonia).

Ideę nawigacji satelitarnej można przedstawić na przykładzie amerykańskiego systemu GPS Navstar, będącego wzorem dla budowy podobnych rozwiązań realizowanych przez inne państwa, podstawowe bowiem założenia są takie same, a różnice uwidaczniają się dopiero w szczegółowych parametrach technicznych. Każdy system nawigacyjny składa się

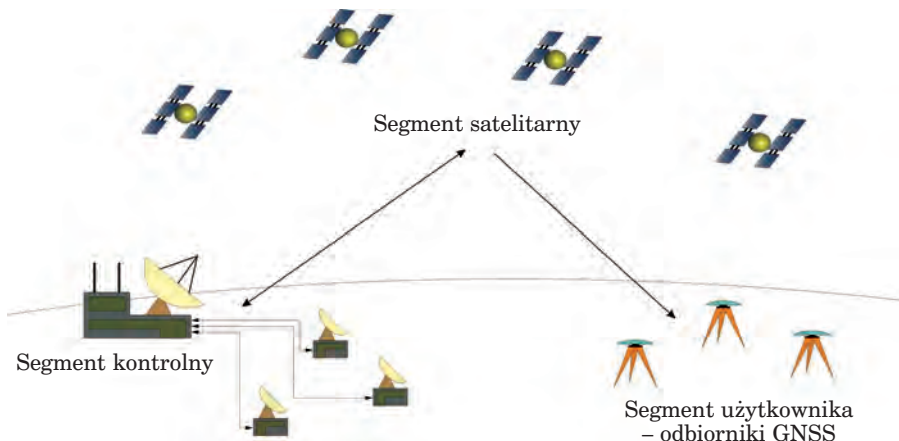


**Ryc. 15.1.** Konstelacja satelitów GPS Navstar oraz Glonass (GLNS) w dniu 20 listopada 2009 r. w okolicach Warszawy

z trzech zasadniczych elementów: segmentu satelitarnego, naziemnego i użytkownika – odbiorników GNSS (ryc. 15.2).

## 15.2. Segment satelitarny

Trzon systemu stanowi segment satelitarny, składający się z konstelacji 21 satelitów uzupełnionych o trzy zapasowe. Rozmieszczone są równomiernie na sześciu orbitach kołowych, nachylonych pod kątem  $55^\circ$  do płaszczyzny równika.



**Ryc. 15.2.** Schemat głównych elementów systemów nawigacyjnych

szczyzny równika i na wysokości ok. 20 200 km nad Ziemią. Czas obiegu satelitów to prawie 12 h, a ich ustawienie po cztery na każdej orbicie gwarantuje, że zdecydowana większość użytkowników systemu ma zagwarantowany dostęp do sygnału z minimum pięciu satelitów w dowolnym miejscu na Ziemi, z prawdopodobieństwem 0,9996. W praktyce liczba satelitów GPS Navstar jest większa i na początku lutego 2009 r. wynosiła 31. Taki stan rzeczy podyktowany jest zarówno koniecznością ciągłej modernizacji sprzętu, jak i przygotowaniem do zastąpienia starszych satelitów.

Przykładowy satelita z bloku II to urządzenie wyprodukowane przez firmę Rockwell International Satellite Systems Division, ważące ok. 900 kg, o żywotności przewidzianej na siedem i pół roku. Oprócz zaawansowanych rozwiązań nadawczo-odbiorczych satelity posiadają baterie słoneczne, po dwa rubidowe i cezowe zegary atomowe oraz baterie niklowo-kadmowe, mające zapewnić stałe zasilanie w wypadku braku dostępu do światła słonecznego (ryc. 15.3).

Głównym zadaniem satelitów jest wysyłanie sygnału na dwóch częstotliwości radiowych – L1 (1575,42 MHz) i L2 (1227,60 MHz). Obecnie zestaw ten jest stopniowo rozszerzany o częstotliwość L2C (1227,6 MHz) i L5 (1176,45 MHz), stworzonych z myślą o zastosowaniach lotniczych i obsłudze cywilnego serwisu ratunkowego (Safety of Life). Fale nośne L1 i L2 są kodowane fazowo następującymi sygnałami:

- precyzyjnym kodem P, stworzonym na potrzeby armii amerykańskiej oraz wojsk 40 państw sojuszniczych. Z punktu widzenia zwykłego użytkownika kod P jest praktycznie bezużyteczny, gdyż wymaga specjalnego



**Ryc. 15.3.** Satelita systemu nawigacyjnego GPS Navstar (źródło: <http://pnt.gov>)

klucza deszyfrującego. Wybrane cywilne odbiorniki GNSS mogą wykorzystywać część kodu P do przyspieszenia procesu inicjalizacji oraz ułatwienia śledzenia satelitów. Kod ten jest wysyłany za pomocą fali nośnych L1 i L2;

- cywilnym kodem C/A (Coarse Acquisition Code). Jest on zsynchronizowany z kodem P i stanowi podstawę do wyznaczania współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  przez użytkowników cywilnych. Każdy satelita generuje inny kod, wykorzystując do tego celu falę nośną L1;
- depeszą satelitarną (nawigacyjną). To zbiór informacji nałożonych na kod P i C/A, zawierający informacje na temat aktualnego stanu segmentu satelitarnego, przybliżoną lokalizację satelitów (Almanach) oraz szczegółowe dane orbitalne każdego z satelitów, niezbędne do wyznaczenia czasu i pozycji (efemeryda). Depesza jest przesyłana za pomocą fal nośnych L1 i L2 i aktualizowana co cztery godziny.

Dodatkowym elementem opisującym ten segment jest kąt zawarty między horyzontem a daną lokalizacją satelity. Wartość ta nazywana jest elewacją i ze względu na wpływ troposfery oraz przeszkody terenowe powinna wynosić minimum  $10^\circ$  (patrz rozdział 15.6). W warunkach nawigacji morskiej akceptowalne są sygnały z elewacji  $5^\circ$ .

## 15.3. Segment kontrolny

Zdolność operacyjna satelitów musi być na bieżąco monitorowana przez naziemny segment kontrolny. W wypadku systemu GPS Navstar mamy do czynienia z główną stacją kontrolną (Master Control Station – MCS), zlokalizowaną w Colorado Springs, oraz dodatkowymi stacjami monitorującymi na Hawajach, Kwajalein, Diego Garcia i Ascension. Podstawowym zadaniem segmentu kontrolnego jest aktualizacja depeszy satelitarnej. Dzięki funkcjonowaniu sieci stacji kontrolnych możliwe jest stałe obserwowanie wszystkich satelitów, wyznaczenie nowych efemeryd i poprawek zegarów atomowych zainstalowanych na satelitach. Aktualizacja depeszy może się odbywać nawet kilka razy dziennie.

### 15.3.1. Zróżnicowanie dokładności pomiarów

Jednym z zadań realizowanych przez segment kontrolny GPS Navstar jest utrzymywanie dwóch serwisów pozycyjnych, co wprowadza tym samym dwa różne poziomy dokładności; można to uzyskać, wykorzystując odbiorniki nawigacyjne. Technika celowego wprowadzania zakłóceń sygnału przez segment kontrolny nazywana jest Selective Availability (SA) i definiuje dwa podstawowe poziomy dokładności:

1. Dokładny serwis pozycyjny (Precise Positioning Service – PPS). Pozwala określić współrzędną  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  z dokładnością nie gorszą niż 16 m. Serwis ten dostępny jest jedynie dla autoryzowanych użytkowników, w praktyce jedynie dla armii amerykańskiej i państw sojuszniczych. Odbiornik z dostępem do PPS, do wyznaczenia pozycji, korzysta zarówno z kodu P, C/A, jak i długości fali nośnej.
2. Standardowy serwis pozycyjny (Standard Positioning Service – SPS). Przygotowany jest z myślą o cywilnych użytkownikach systemu GPS Navstar. Początkowo dokładność wyznaczania pozycji wynosiła 100 m, co było spowodowane generowaniem celowych zakłóceń sygnału oraz wprowadzaniem błędów w depeшы nawigacyjnej. Względy polityczne sprawiły, że w maju 2000 r. prezydent USA Bill Clinton nakazał zaniechanie celowej degradacji sygnału satelitów nawigacyjnych. Tym samym dokładność wyznaczania współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  wzrosła do ok. 12 m z prawdopodobieństwem 95%.

## 15.4. Segment użytkownika

Wyznaczenie współrzędnej  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  możliwe jest dzięki odbiornikowi satelitarnych sygnałów nawigacyjnych. Podstawowym zadaniem tego urządzenia jest zdekodowanie wszystkich danych zawartych w falach nośnych od każdego z dostępnych satelitów w tym samym czasie, a następnie dokonanie odpowiednich przeliczeń matematycznych, pozwalających na określenie bieżącej lokalizacji. Rozwój techniki komputerowej i elektroniki pozwolił na zbudowanie odbiorników, które mogą jednocześnie odbierać sygnał z 72 satelitów. Jest to oczywiście uzasadnione tylko wtedy, kiedy korzystamy z kilku systemów nawigacyjnych, co w chwili obecnej oznacza rejestrowanie sygnałów systemów GPS Navstar i Glonass. Ważnymi elementami odbiornika są ponadto zaawansowane systemy elektroniczne, pozwalające na minimalizację błędów generowanych przez systemy nawigacyjne, oraz zastosowane oprogramowanie, umożliwiające realizację różnorodnych zadań obliczeniowych.

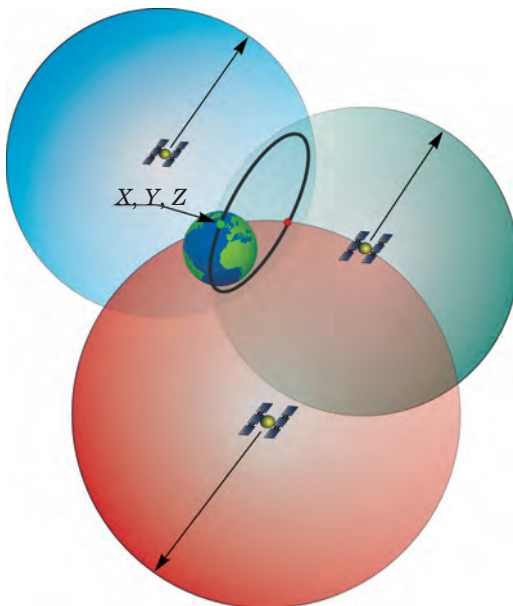
## 15.5. Zasada działania odbiornika nawigacyjnego

Obliczenie współrzędnej  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  przez procesor odbiornika nawigacyjnego możliwe jest po spełnieniu kilku głównych warunków:

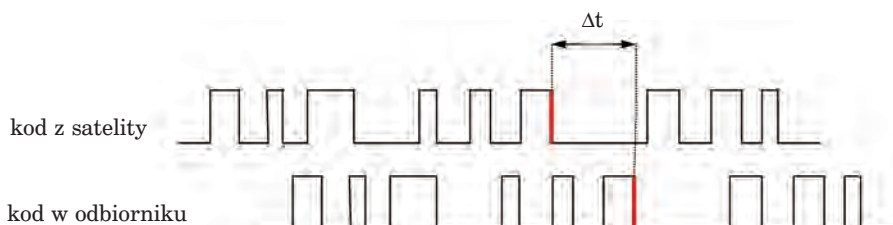
1. Podstawa wyznaczenia współrzędnej opiera się na zasadach triangulacji przy wykorzystaniu satelitów o znanym położeniu na orbicie. Dysponując odległością pomiędzy jednym satelitą a odbiornikiem, możemy

otrzymać sferę o ogromnym promieniu, która w żaden sposób nie pozwoli na lokalizację odbiornika. Podobnie jest w wypadku pomiarów odległości z dwóch satelitów, kiedy to wyznaczany obszar ma postać okręgu powstałego w wyniku przecięcia dwóch sfer. Rozwiązanie tego problemu znaleźć można dopiero po pomiarze odległości do trzech satelitów. Wynik obliczeń pozwala określić położenie odbiornika w dwóch punktach, z których jeden położony jest bardzo wysoko nad powierzchnią Ziemi i tym samym można wykluczyć go z dalszych analiz, drugi zaś wskazuje prawidłową lokalizację (ryc. 15.4).

2. Obliczenie odległości niezbędnych do wyznaczenia współrzędnych realizowane jest dzięki pomiarowi czasu, w jakim sygnał z satelity dociera do odbiornika nawigacyjnego. Każdy z satelitów wyposażony jest w zegar atomowy, wyznaczający dokładny czas, który jest dodatkowo na bieżąco korygowany przez segment kontrolny. Informacja o czasie oraz dokładnym położeniu satelity transmitowana jest do odbiornika z prędkością światła, co w wypadku systemu GPS Navstar zajmuje ok. 67 milisekund. Odbiornik przed wykonaniem pomiaru wykorzystuje jeden z kanałów do synchronizacji swojego zegara i rozpoczyna generowanie kopii kodu, który dociera z satelity. Porównanie kodu z satelity z tą samą częścią kodu w odbiorniku umożliwi obliczenie ich wzajemnego przesunięcia. Spowodowane jest to faktem, że fala nośna wysłana z satelity pokonuje drogę blisko 20 200 km, docierając na Ziemię z pewnym opóźnieniem. Wartość ta pozwala wyznaczyć czas, który po przemnożeniu przez prędkość światła daje odległość niezbędną do procesu triangulacji (ryc. 15.5).



**Ryc. 15.4.** Zasada triangulacji w systemach nawigacyjnych



**Ryc. 15.5.** Metoda porównywania kodów do obliczenia czasu

3. W praktyce pomierzona odległość nie jest dokładna, ponieważ zegar znajdujący się w odbiorniku ma zdecydowanie gorsze parametry niż zegar atomowy satelity. Niedokładność zegara danego odbiornika w wypadku pomiaru trzech odległości jest taka sama. Konieczne jest zatem wykorzystanie sygnału z czwartego satelity i rozwiązanie równania z czterema niewiadomymi:

- długość geograficzna,
- szerokość geograficzna,
- wysokość elipsoidalna,
- błąd pomiaru czasu.

Zarówno system GPS Navstar, jak i wszystkie pozostałe, jest zaprojektowany w ten sposób, aby w każdym miejscu na Ziemi możliwy był odbiór minimum czterech sygnałów z satelitów nawigacyjnych; jest to wymagana liczba do wyznaczenia współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

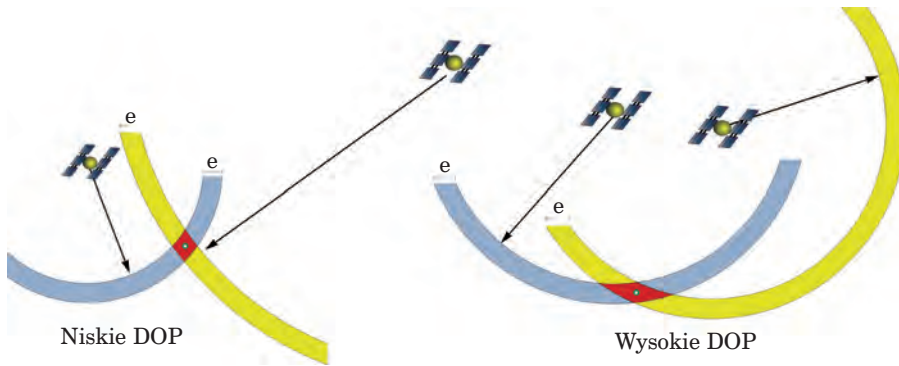
Współrzędne, wyznaczone przez odbiornik nawigacyjny, wyrażone są w długości i szerokości geograficznej oraz wysokości elipsoidalnej. Podstawą odniesienia dla tych wielkości jest elipsoida quasi-geocentryczna WGS '84 (patrz rozdz. 4). Większość odbiorników pozwala ponadto odczytać współrzędne w układach lokalnych, których liczba może być praktycznie nieograniczona. Współrzędne  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  w docelowym układzie współrzędnych są przeliczane automatycznie z obserwacji zarejestrowanych na elipsoidzie WGS '84.

## 15.6. Czynniki obniżające dokładność pomiarów odbiornikiem nawigacyjnym

Istnieje wiele czynników, które wpływają na dokładność wyznaczania współrzędnych w systemach GNSS:

1. Dokładność wyznaczania czasu w odbiorniku jest znacznie gorsza niż na satelitach wyposażonych w zegary atomowe. Błąd rzędu 10 nanosekund może pogorszyć docelową lokalizację o mniej więcej 3 m. Zwiększ-

- szenie dokładności zegarów w odbiornikach pociąga za sobą istotny wzrost ich ceny.
2. Ważnym elementem w procesie triangulacji jest znajomość dokładnego położenia danego satelity na orbicie. W chwili obecnej system GPS Navstar pozwala wyznaczyć współrzędne satelitów z dokładnością do 1–5 m. Związane jest to z różnymi czynnikami, do których zaliczyć można m.in.: pole grawitacyjne Ziemi, opór atmosfery, oddziaływanie ciał niebieskich, pływy czy wreszcie efekty relatywistyczne. Te ostatnie odnoszą się do opóźnienia zegarów atomowych, a to ze względu na wolniej płynący czas w przestrzeni kosmicznej. Istotną rolę odgrywa segment kontrolny, który na bieżąco koryguje wskazania zegarów atomowych na satelitach.
  3. Prędkość światła, z którą porusza się fala nośna, przechodząc przez jonosferę i troposferę, zmienia się. Szczególnie jonosfera jest ośrodkiem zarówno o dużej zmienności dobowej, jak i długookresowej. Redukcję tego zjawiska częściowo przeprowadza sam system nawigacyjny za pomocą specjalnych modeli matematycznych. Pozwala to zmniejszyć opóźnienie jonosferyczne o połowę. Dalsza eliminacja tego niekorzystnego efektu możliwa jest w odbiornikach dwuczęstotliwościowych, które poprzez porównanie rezultatów pomiarów z dwóch fal L1 i L2 są w stanie zniwelować błąd jonosferyczny, mogący w skrajnych przypadkach przekraczać kilka metrów. Wpływ troposfery istotny jest dla sygnałów docierających z satelitów znajdujących się poniżej  $10^\circ$  nad horyzontem i może skutkować błędem większym niż 1 m.
  4. Podatność na odbicie sygnału satelitarnego od różnych obiektów przed dotarciem do odbiornika to najpoważniejsza wada systemów GNSS. Efekt ten – zwany wielodrożnością sygnału – może powodować błędy rzędu kilkunastu metrów. Eliminacja zjawiska odbicia jest często dokonywana dzięki modyfikacjom w oprogramowaniu odbiorników. Najlepszym sposobem jest jednak unikanie obszarów, w których horyzont może zostać przesłonięty przez jakiegokolwiek przeszkody. Podobne błędy w wyznaczaniu współrzędnych można zaobserwować również w miejscach o silnym polu elektromagnetycznym.
  5. Geometria satelitów opisywana wartością liczbową jest tym parametrem, który – choć niezależny od użytkownika – może być na bieżąco monitorowany. W literaturze występuje pod angielskojęzycznym terminem DOP (Dilution of Precision) i opisuje układ satelitów na nieboskłonie. Wyróżnia się następujące terminy związane z DOP:
    - GDOP (Geometric DOP) – geometryczne rozmycie dokładności, opisujące wpływ konstelacji satelitów na współrzędne  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  oraz pomiar czasu;
    - PDOP (Positional DOP) – trójwymiarowe rozmycie dokładności, opisujące wpływ konstelacji satelitów na współrzędne  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – wartość najczęściej interpretowana przez użytkowników;
    - HDOP (Horizontal DOP) – poziome rozmycie dokładności, opisujące wpływ konstelacji satelitów na współrzędne  $X$ ,  $Y$ ;



**Ryc. 15.6.** Zasada wyznaczania wartości DOP.

*Im bardziej spłaszczony obszar przecięcia dwóch sygnałów satelitarnych o stałych błędach, tym większa wartość DOP*

- VDOP (Vertical DOP) – pionowe rozmycie dokładności, opisujące wpływ konstelacji satelitów na współrzędną  $Z$ ;
- TDOP (Time DOP) – wpływ konstelacji satelitów na błędy czasu.

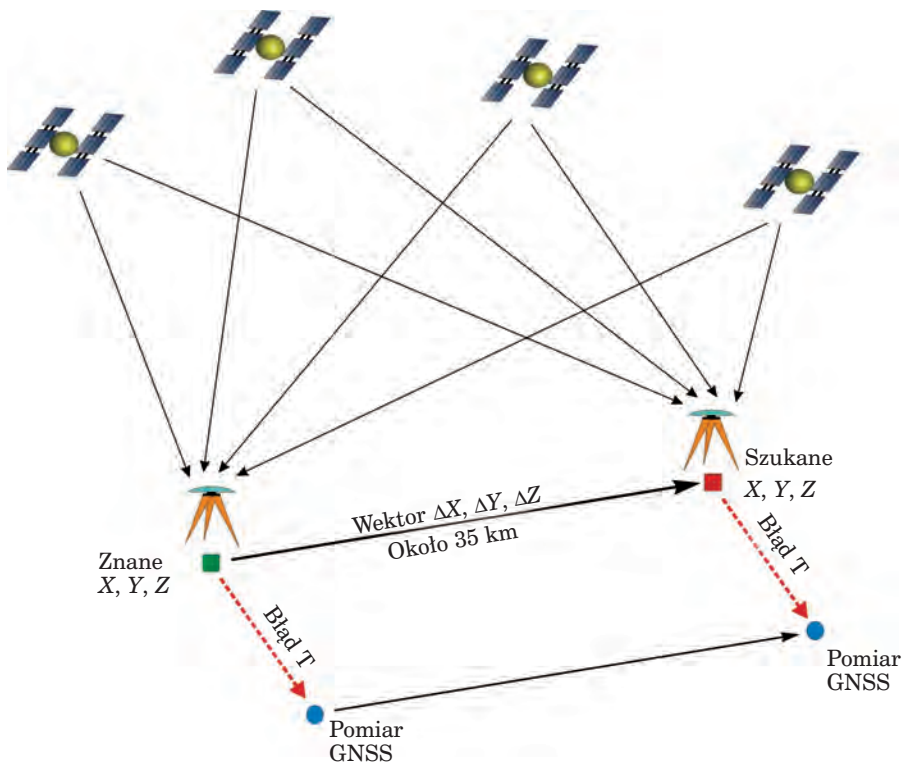
Wpływ wartości DOP można stosunkowo łatwo przeanalizować, mając do dyspozycji tylko dwa pomiary odległości od satelitów do odbiornika. W momencie, kiedy satelity są od siebie wyraźnie oddalone, błąd wyznaczania pozycji jest mniejszy niż wtedy, gdy satelity znajdują się w małych odległościach. Układ taki jest prawdziwy w sytuacji, kiedy pomiar odległości z obu satelitów obarczony jest tym samym błędem (ryc. 15.6). Systemy GNSS w swoim założeniu gwarantują dostęp do kilku satelitów w tym samym czasie, zatem w praktyce to oprogramowanie odbiornika decyduje, z jakich sygnałów należy korzystać w danej chwili.

Dokładność wyznaczania współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  jest ściśle związana ze wszystkimi opisywanymi czynnikami i wprost proporcjonalna do wartości DOP. Inaczej mówiąc, jeżeli współczynnik DOP podwoi się, błąd lokalizacji będzie również dwa razy większy. Przyjmując, że wartość HDOP wynosi 1,3, dokładność wyznaczania pozycji przez pojedynczy odbiornik nawigacyjny w terenie otwartym wynosi odpowiednio ok. 6 m z prawdopodobieństwem 68% i ok. 12 m z prawdopodobieństwem 95%.

## 15.7. Różnicowa metoda pomiaru – DGPS

Pomiar współrzędnych za pomocą pojedynczego odbiornika obarczony jest tak dużym błędem, że zaczęto poszukiwać rozwiązań technologicznych, które mogą temu zaradzić. Okazało się, że błędy wyznaczania współrzędnych są zbliżone dla urządzeń pracujących w podobnych warun-

kach oraz znajdujących się od siebie w odległości ok. 35 km. Dysponując zatem obserwacjami z dwóch odbiorników i z tego samego okresu, możemy wyznaczyć między nimi poprawny wektor odległości. Jeżeli wektor ten dodamy do punktu referencyjnego o dokładnie obliczonych współrzędnych, uzyskamy właściwe wartości dla nowo rejestrowanych punktów (ryc. 15.7).



Ryc. 15.7. Zasada działania różnicowej metody pomiaru

Metodę tę nazwano DGPS (Differential Global Positioning System) i początkowo zaczęto stosować jedynie w nawigacji precyzyjnej (dokładności centymetrowe). Polega ona na odbieraniu informacji generowanych przez stacje referencyjne umieszczone w punktach o znanych współrzędnych. Dane te, zwane poprawką korekcyjną, dostarczają wartości, o jaką należy skorygować rejestrowane obserwacje. Technika DGPS pozwala na:

- redukcję błędów związanych z opóźnieniem jonosferycznym i troposferycznym, niedokładnością efemeryd, celowym zafałszowaniem sygnału oraz błędami czasu;

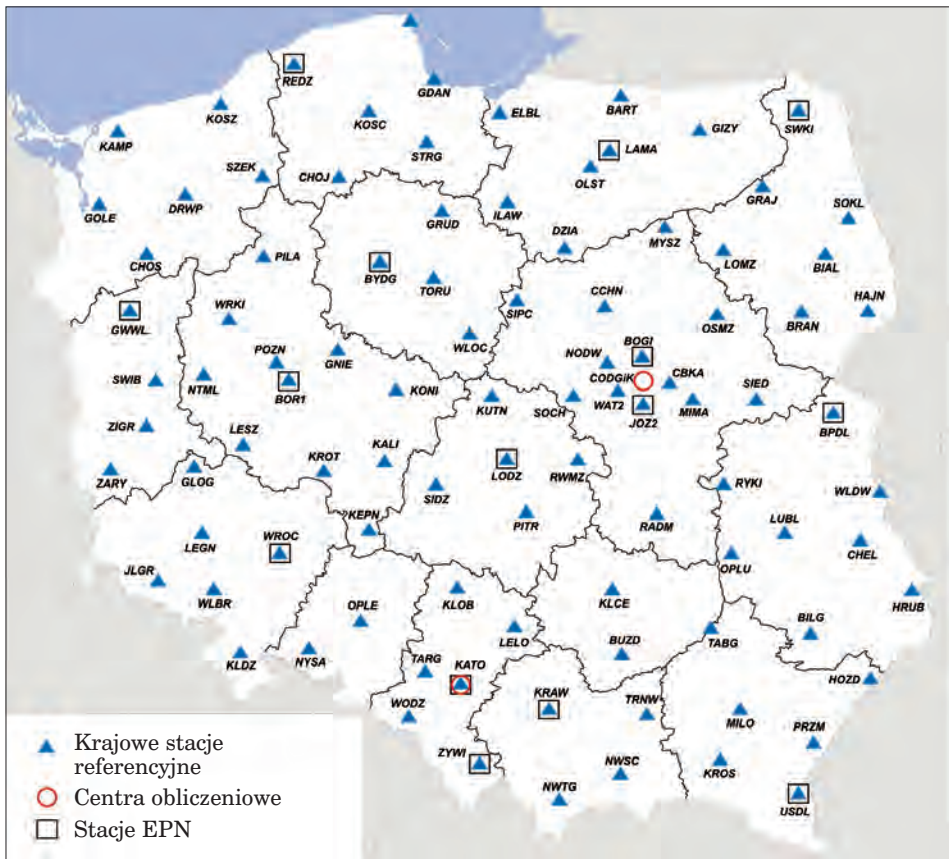
- lepsze wpasowanie wyników pomiarów w lokalne układy współrzędnych;
- zredukowanie błędu pomiaru współrzędnych do kilku centymetrów dla odbiorników klasy geodezyjnej.

### 15.7.1. Metody wykonywania korekcji różnicowej (DGPS)

Dość skomplikowany mechanizm korygowania współrzędnych wymaga dostępu do stacji referencyjnych, co może być realizowane na trzy podstawowe sposoby:

1. Zakup własnej stacji referencyjnej i zlokalizowanie jej w pobliżu miejsca wykonywania pomiarów. Metoda ta jest bardzo kosztowana i stosowana najczęściej przez zaawansowanych użytkowników. Poprawki mogą być przesyłane drogą radiową w czasie rzeczywistym lub też obliczone po dokonaniu pomiarów, z zastosowaniem techniki tzw. post-processingu, za pomocą specjalnego oprogramowania.
2. Wykorzystanie globalnych systemów SBAS (Satellite Base Augmentation System), generujących poprawki przesyłane bezpośrednio do odbiorników drogą satelitarną. W wypadku Europy można odbierać poprawki z satelitów EGNOS, będących częścią projektu systemu nawigacyjnego Galileo. W praktyce prawie każdy odbiornik rejestruje sygnały EGNOS, jednak ze względu na niską elewację satelitów wysyłających poprawki (około  $20^\circ$ ), dostęp do tych sygnałów jest znacznie ograniczony. Według deklaracji twórców systemu, dokładność wyznaczania pozycji tą metodą jest lepsza niż 5 m.
3. Podłączenie do systemu stacji referencyjnych za pomocą łączy telekomunikacyjnych. Dla obszaru Polski jest to sieć ASG-EUPOS. Tą drogą uzyskuje się darmowy dostęp do ponad 100 polskich i zagranicznych stacji referencyjnych. Sieć ASG-EUPOS wprowadziła nową jakość w pomiarach odbiornikami GNSS, ponieważ jej ogólnopolski zasięg pozwala prowadzić pomiary z wysoką dokładnością w każdym miejscu naszego kraju (ryc. 15.8).

Stacje referencyjne sieci ASG-EUPOS stanowią osnowę geodezyjną w rozumieniu przepisów ustawy z dnia 17 maja 1989 r. „Prawo geodezyjne i kartograficzne” (Dz.U. z 2000 r. Nr 100, poz. 1086). Budowę sieci oparto na najnowszych rozwiązaniach technologicznych i wprowadzono dla użytkowników kilka serwisów o różnych poziomach dokładności. Analiza wyników pomiarów wykazała, że błędy wyznaczania pozycji wahają się od kilku centymetrów do kilku metrów w zależności od warunków obserwacji i rodzaju wykorzystywanego serwisu. Ze względu na dynamiczne zmiany wprowadzane przez centrum zarządzające siecią ASG-EUPOS warto na bieżąco odwiedzać stronę <http://www.asgeupos.pl>. Od momentu



**Ryc. 15.8.** Rozmieszczenie stacji referencyjnych sieci ASG-EUPOS  
(źródło <http://www.asgeupos.pl>)

uruchomienia sieci w dniu 2 czerwca 2008 r. aż do dziś (jesień 2009 r.) dostęp do serwisu jest darmowy.

Podstawą korekcji różnicowej pozwalającej uzyskać najdokładniejsze wyniki jest technologia VRS (Virtual Reference Station), stosowana między innymi przez sieć ASG-EUPOS. Polega ona na wykorzystaniu do korekcji obliczeń z kilku pracujących w tym samym czasie stacji referencyjnych. Odbiornik wysyła za pomocą łącza telekomunikacyjnego (sieci GSM, WLAN itp.) informacje o swoim położeniu, a następnie centrum obliczeniowe generuje wirtualną stację referencyjną znajdującą się w odległości kilku metrów od osoby wykonującej pomiary. W ten sposób zarówno stacja referencyjna, jak i odbiornik mają identyczne warunki pracy, a krótki wektor odległości gwarantuje bardzo dokładne wyniki dla wyznaczanych współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

## 15.8. Pomiary fazowe odbiornikiem GNSS

Wykorzystując kody C/A i P nałożone na fale nośne i stosując technikę DGPS, otrzymujemy dokładności od 0,5 do 3 m przy odpowiednich warunkach rejestracji. Uzyskanie wyższych dokładności jest możliwe przy wykorzystaniu odbiornika śledzącego fazę fali nośnej. Są to tzw. pomiary fazowe, pozwalające wyznaczyć współrzędną z dokładnością centymetrową w trybie DGPS. Warunkiem niezbędnym jest posiadanie odbiornika dwuczęstotliwościowego, dzięki któremu możliwe są eliminacja opóźnień jonosferycznego oraz pomiar długości fali nośnej. Metoda ta opiera się na porównaniu częstotliwości fali nośnej z satelity z tą samą częstotliwością generowaną w odbiorniku. Do pomiaru odległości potrzebna jest wartość nieoznaczoności  $N$ , opisująca liczbę pełnych odłożeń fali plus faza ostatniej niepełnej fali, co można opisać następującym wzorem:

$$d = N\lambda + \varphi\lambda$$

gdzie:

$d$  – odległość,

$N\lambda$  – liczba pełnych cykli fali,

$\varphi\lambda$  – faza ostatniej niepełnej fali.

Znając długość fali systemu GPS Navstar, wynoszącą ok. 19 cm, pozycję satelity na orbicie, prędkość fali oraz czas jej wysłania, możemy policzyć odległości z bardzo dużą dokładnością, sięgającą milimetrów. Zadanie to realizują odbiorniki klasy geodezyjnej, charakteryzujące się jednak wysoką ceną ze względu na zastosowanie zaawansowanych technik obliczeniowych.

## 15.9. Planowanie sesji pomiarowej

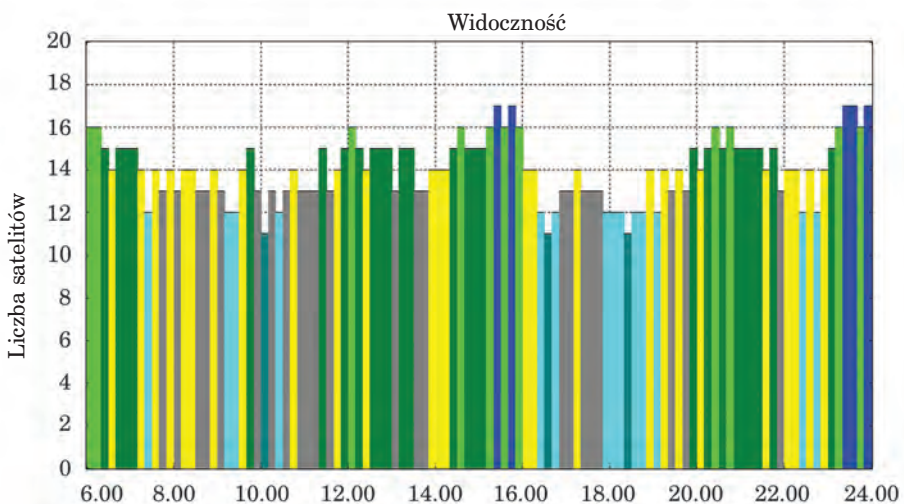
Co prawda konstelacja systemu nawigacyjnego jest tak opracowana, aby o dowolnej porze dnia można było zawsze rejestrować sygnały z minimum czterech satelitów, to jednak szersza informacja o stanie systemu może być przydatna dla zaawansowanych użytkowników. Wiele cennych informacji, których standardowo nie wyświetla odbiornik GNSS, jest ukrytych w depeszach nawigacyjnej odświeżanej codziennie przez system. Na przykład w warunkach o ograniczonej widoczności (choćby w drzewostanie) korzystniejszy będzie dostęp do sygnałów z większej liczby satelitów znajdujących się wyżej nad horyzontem. Chcąc uzyskać bardzo dobre wyniki w terenie otwartym, należy dążyć do minimalnych wartości współczynnika DOP, a dysponując odbiornikiem GNSS, warto wiedzieć coś więcej o aktywności systemu Glonass. Te i inne informacje można odczytać za pomocą darmowego oprogramowania Quickplan firmy Trimble. Aktualną depeszę znaleźć można na stronie internetowej: <http://www.trimble.com>. Podając wstępne parametry,

takie jak przybliżona lokalizacja, data pomiarów i maska horyzontu (standardowo  $10^\circ$ ), możemy odczytać następujące parametry:

- rozmieszczenie i trajektorie satelitów nad powierzchnią Ziemi (World projection);
- liczbę widocznych satelitów w ciągu dnia (Number of satellites), (ryc. 15.9);
- widoczność satelitów w ciągu dnia (Visibility);
- wysokość satelitów nad zadaną maską horyzontu (Elevation);
- geometryczne parametry konstelacji satelitarnej (GDOP, PDOP, HDOP, VDOP i TDOP);
- trajektorie satelitów obserwowane przez antenę odbiornika (Sky Plot).

Wszystkie dane można zagregować w postaci gotowych do wydrukowania raportów, będących zarówno cenną wskazówką podczas pracy w terenie, jak i pozwalających świadomie zaplanować czas rejestracji sygnałów nawigacyjnych. Mając na uwadze pomiary w warunkach leśnych, warto pamiętać również o następujących faktach:

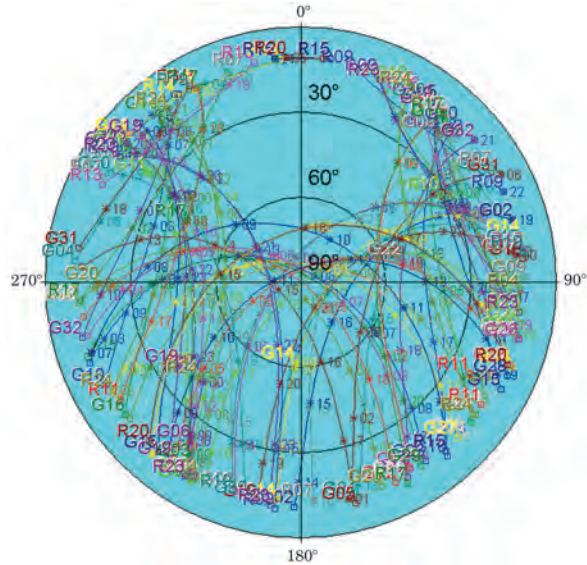
- ilość światła docierającego do dna lasu jest wprost proporcjonalna do siły sygnału satelitarne;
- aktywowanie odbiornika należy przeprowadzić w terenie otwartym, gdyż dzieje się to zdecydowanie szybciej i przy mniejszym zapotrzebowaniu na energię;
- wykonywanie pomiarów w środku sezonu wegetacyjnego może istotnie pogorszyć dokładność współrzędnych lub nawet całkowicie uniemożliwić pomiary;



**Ryc. 15.9.** Liczba satelitów systemów GNSS dla obszaru Warszawy w dniu 28 sierpnia 2009 r.

**Ryc. 15.10.** Przybliżone trajektorie satelitów dla obszaru Polski

- wietrzna i wilgotna pogoda przyczynia się do zwiększenia zjawiska wielodrożności sygnału nawigacyjnego;
- zadrzewienie jest elementem zdecydowanie bardziej pogarszającym dokładność pomiaru niż wysokość drzewostanu;
- większość sygnałów satelitarnych na obszarze Polski odbierana jest z kierunku południowego, należy zatem unikać przesłaniania tej części horyzontu (ryc. 15.9),
- odbiornik powinien mieć ustawioną maskę horyzontu na wartość minimum  $10^\circ$  oraz blokadę zapisu obserwacji przy wartości współczynnika PDOP większej niż 5–6.



## 15.10. Wybór odbiornika nawigacyjnego

Na rynku znajduje się duży wybór odbiorników rejestrujących sygnały nawigacyjne. Ich podaż szczególnie wzrosła po spopularyzowaniu oprogramowania do nawigacji samochodowej oraz do szeroko rozumianej turystyki. Niewątpliwie jest to zjawisko korzystne, ponieważ powoduje nie tylko obniżenie cen urządzeń, lecz także wzrost zainteresowania systemami informacji geograficznej. Podział odbiorników jest zadaniem dość trudnym przy obecnym poziomie miniaturyzacji i zaawansowania technologii komputerowej. Zasadniczo jednak można wyróżnić trzy podstawowe grupy scharakteryzowane poniżej.

1. Odbiorniki do nawigacji osobistej i turystycznej. Są to urządzenia praktycznie nieprzystosowane do dokładnych pomiarów. Ich głównym celem jest dostarczenie przybliżonych (w granicach  $\pm 15$  m) danych lokalizacyjnych, które następnie są odpowiednio interpretowane przez zainstalowane oprogramowanie. Pozwalają na zapis współrzędnych punktów i ślad przebytej drogi (tzw. track). Brakuje możliwości pracy na własnych mapach czy wykonywania zapisu danych prze-

strzennych łącznie z informacją opisową. Są najbardziej popularną grupą urządzeń, gdyż zarówno prostota ich obsługi, cena, jak i użyteczność w zakresie nawigacji samochodowej i turystycznej są doceniane przez największą liczbę użytkowników.

2. Segment odbiorników klasy GIS odpowiada na zapotrzebowanie osób, które chcą wykonywać podstawowe pomiary oraz pracować na własnych mapach. Urządzenia te są właściwie niewielkimi komputerami wyposażonymi najczęściej w system Windows i zintegrowany moduł do rejestracji sygnałów nawigacyjnych. Zaletą tych odbiorników jest przede wszystkim możliwość instalacji dowolnego oprogramowania oraz otwartość na różnego typu urządzenia peryferyjne, takie jak aparaty fotograficzne, czytniki kodów kreskowych czy wreszcie anteny wysokiej klasy. W większości wypadków możliwe jest wykonanie korekcji różnicowej w czasie rzeczywistym, dzięki czemu uzyskiwane dokładności wyznaczania współrzędnych sięgają nawet 0,5 m. Pozwalają na zapis współrzędnych punktów, linii i poligonów oraz aktualizację opisowej bazy danych. Urządzenia te projektuje się z myślą o pracach w trudnych warunkach, dzięki czemu mają one odporną na uszkodzenia obudowę oraz moduły częściowo eliminujące sygnały odbite.
3. Odbiorniki geodezyjne pozwalają na pomiar współrzędnych z najwyższą dokładnością. Są to urządzenia, w których stosuje się zaawansowane rozwiązania technologiczne celem uzyskania wiarygodnych, z punktu widzenia geodety, wyników. Głównym elementem odbiornika jest niezwykle czuła antena, pozwalająca rejestrować wszystkie sygnały nawigacyjne o różnych częstotliwościach, włączając w to systemy, które jeszcze nie osiągnęły zdolności operacyjnej, jak w przypadku Galileo. Odbiorniki tej klasy dokonują przede wszystkim obliczeń długości, stosując metodę fazową powiązaną z korekcją różnicową w czasie rzeczywistym. Gwarantuje to uzyskanie dokładności wyznaczania współrzędnych na poziomie kilku centymetrów bezpośrednio w terenie. Wybrane odbiorniki geodezyjne mają 72 kanały i pozwalają na pełną aktualizację oprogramowania, co w praktyce oznacza, że skonstruowano je z myślą o nowych systemach nawigacyjnych. Urządzenia tej klasy wyznaczają trendy w rozwoju wszystkich odbiorników GNSS, stanowiąc tym samym najdroższą grupę odbiorników.

Decydując się na zakup odbiornika, należy przewidzieć nie tylko koszt samego urządzenia, lecz także koszt oprogramowania pozwalającego zapisać obserwacje. Jest to bardzo istotna inwestycja, ponieważ od funkcjonalności oprogramowania zależy nie tylko zakres metod pomiarowych, z których korzysta się w terenie, ale także możliwość pracy na własnych zestawach danych.

Na jakość samego odbiornika wpływa szereg innych czynników, takich jak: metoda śledzenia satelitów, zastosowany zegar, zdolność rejestracji fazy nośnej czy wreszcie implementacja rozwiązań pozwalających odbierać sygnały z satelitów Glonass i systemów korekcji różnicowej (ASG-EUPOS, EG-

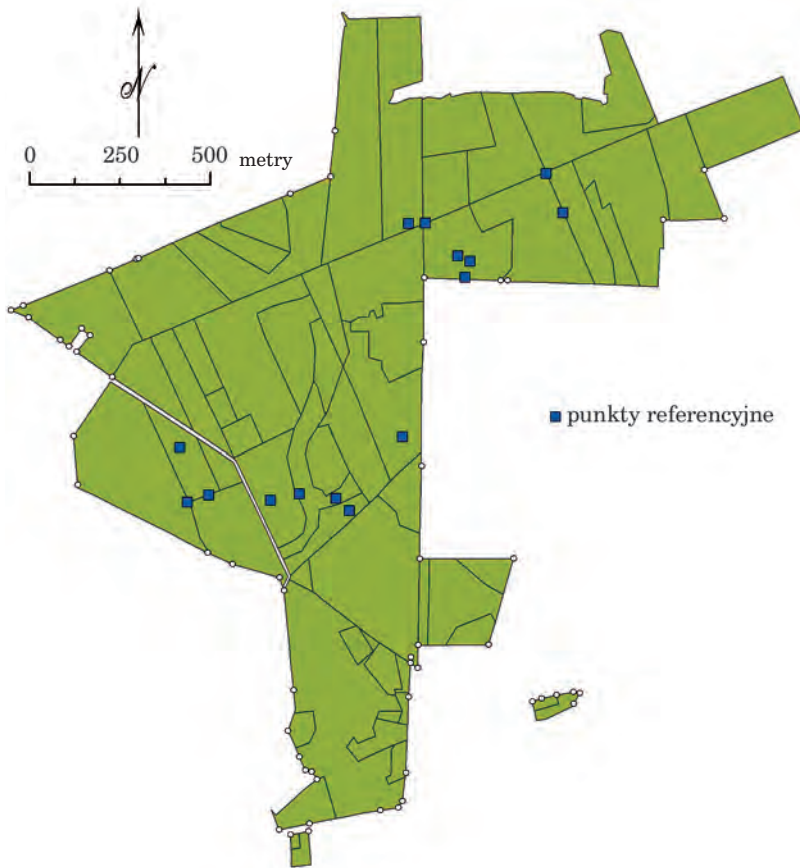
NOS). Ze względu na konieczność dostępu do serwerów udostępniających poprawki korekcyjne warto zwrócić uwagę na to, czy rejestrator pozwala na łączność technologią bezprzewodową Bluetooth, WLAN lub złączem dla kart SIM. Ponieważ pomiary mogą być przeprowadzane w trudnych warunkach terenowych i przy zmiennej aurze, należy także sprawdzić, czy urządzenia spełniają normy wodo- i pyłoszczelności.

Warto w tym miejscu przypomnieć podawany już wcześniej fakt, że wyznaczenie współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  za pomocą pojedynczego odbiornika można wykonać z dokładnością od kilku do kilkunastu metrów z prawdopodobieństwem 95%. Rozrzut wartości jest zatem bardzo duży, a trzeba też liczyć się z tym, że 5% pomiarów może znacząco przekraczać wartości deklarowane przez producenta. Agresywne działania marketingowe niektórych firm mogą prowadzić do obniżenia wartości prawdopodobieństwa, w którym wyniki będą się mieścić w deklarowanym przedziale dokładności, i ukrywania tym samym faktycznych możliwości odbiornika. Dokładność poszczególnych modeli odbiorników nawigacyjnych testowana jest najczęściej w warunkach idealnych do rejestracji tego typu sygnałów. Są to zatem tereny otwarte, z dobrą widocznością widnokregu i przy odpowiedniej konstelacji satelitarnej. Właśnie te wyniki zostają następnie podawane przez producenta, a przecież środowisko przyrodnicze nie zawsze wygląda tak samo. Doskonałą metodą w takich przypadkach jest wypożyczenie odbiornika do przeprowadzenia własnych testów lub też zaproszenie przedstawiciela firmy do miejsca (punktu) o znanych współrzędnych, znajdującego się w środowisku leśnym. Zakup współrzędnych kilku punktów geodezyjnych to niewielki koszt w stosunku do cen niektórych odbiorników GNSS, a wiedza na temat faktycznych dokładności odbiornika może się okazać bardzo cenna.

## 15.11. Poligon doświadczalny w Margoninie

Lasy Państwowe od wczesnych początków udostępnienia systemu GPS Navstar użytkownikom cywilnym były żywo zainteresowane wykorzystaniem tej technologii w praktyce leśnej. Mnogość zastosowań w połączeniu z dynamicznie rozwijającym się rynkiem odbiorników nawigacyjnych przyczyniła się do stworzenia poligonu doświadczalnego w Margoninie (RDLP Piła). Założono w tym celu sieć 15 punktów, rozmieszczonych w różnych drzewostanach, dla których dokładnie pomierzono współrzędne, stosując klasyczne metody geodezyjne (ryc. 15.11).

Podobnie wyznaczono linię opisującą granice gniazda w rębni IIIId. Tak pomierzone punkty stały się znakomitą referencją do przebadania szerokiej gamy odbiorników nawigacyjnych dostępnych na rynku. W analizie uwzględniono kilkanaście odbiorników klasy turystycznej oraz klasy GIS, których producenci deklarowali bardzo różne dokładności wyzna-



**Ryc. 15.11.** Lokalizacja punktów referencyjnych na poligonie doświadczalnym w Margoninie

czania współrzędnych. Na każdym punkcie rejestrowano 30 obserwacji, które uśredniano, otrzymując ostateczny wynik. Za główne kryterium dokładności przyjęto procent pomiarów różniących się o mniej niż 5 m od współrzędnych referencyjnych. Dodatkowo wyznaczono błędy średnie, maksymalne i odchylenie standardowe. Okazuje się, że rozrzut uzyskanych wyników jest ogromny. Wielkość ta dla procentu pomiarów znajdujących się w promieniu 5 m od punktu referencyjnego kształtowała się od 7 do prawie 87%. Błędy maksymalne wahały się od kilku do kilkudziesięciu metrów, a w skrajnych przypadkach zbliżyły się do prawie 200 m. Jest to doskonały dowód na nieprzewidywalność technologii nawigacyjnej w pewnym zakresie. Wartości te są, rzecz jasna, w większości przypadków zawarte w 5% prawdopodobieństwa, których producent nie uwzględnił w charakterystyce opisującej odbiornik.

Badania w Margoninie wykazały również istotną przewagę odbiorników klasy GIS nad odbiornikami turystycznymi. Urządzenia te są droższe i dają lepsze wyniki, ponieważ projektowano je z myślą o wykonywaniu pomiarów w trudnych warunkach. Pomiary na poligonie doświadczalnym potwierdziły ponadto, że dokładność większości odbiorników rejestrujących dane bez korekcji różnicowej jest zbliżona do granic 6–12 m deklarowanych przez system GPS Navstar. To dobry wynik, zważywszy na to, że odbiorniki pracowały w warunkach niekorzystnych dla propagacji sygnału satelitarnego.

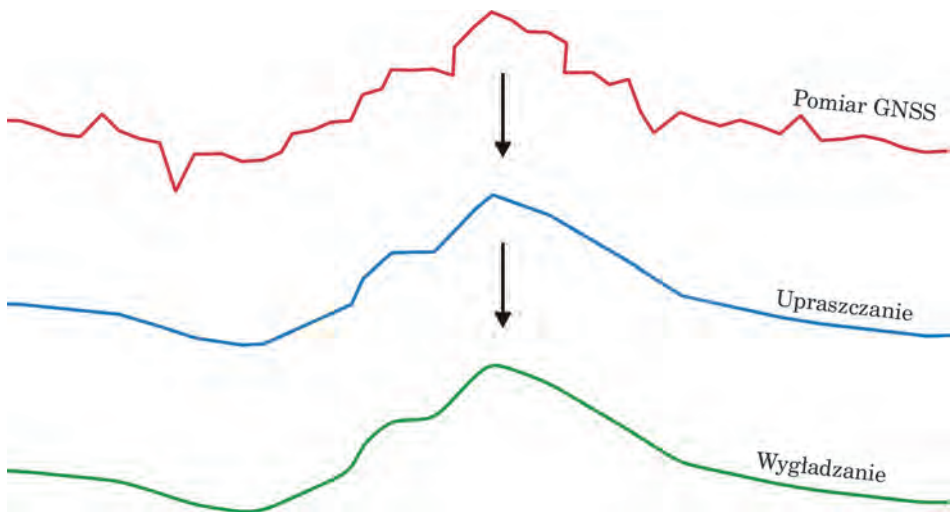
## 15.12. Pomiary odbiornikiem GNSS

Mając na względzie zarówno specyfikę pomiarów leśnych, jak i strukturę geometrycznej bazy danych leśnej mapy numerycznej, możemy mieć do czynienia z koniecznością lokalizacji obiektów o charakterze punktowym, liniowym i poligonowym. Dane te zapisywane są w formacie dowolnego pliku wektorowego, co w praktyce oznacza, że zapisane są w postaci punktów o znanych współrzędnych.

Podczas rejestracji danych punktowych zasadniczym elementem jest uśrednianie współrzędnych. Polega ono na zapisaniu większej liczby obserwacji dla interesującego nas obiektu, a następnie obliczeniu średniej dla wartości  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Badania wykazują, że rejestrując dane w interwale jednosekundowym bez korekcji różnicowej, warto wydłużyć czas pomiaru do 3 min. W zależności od typu odbiornika i zainstalowanego oprogramowania obliczenie to wykonywane jest automatycznie. Metoda ta pozwala uniknąć dużych błędów związanych z czasem, który jest potrzebny na inicjalizację urządzenia, oraz zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania poprawnych współrzędnych.

Zdarza się, że podczas rejestracji danych o charakterze liniowym i powierzchniowym, przy interwale czasowym wynoszącym jedną sekundę, uzyskane linie nie odzwierciedlają rzeczywistości zgodnej z oczekiwaniem. Przebieg linii jest falisty i poszarpany, a czasem zapisane są miejsca, w których nie dokonywano pomiaru. Jest to dość charakterystyczne zjawisko dla sygnałów nawigacyjnych, które wiąże się z dokładnością samego odbiornika oraz występowaniem sygnałów odbitych. Wskazane jest zatem poddanie gotowych obiektów wektorowych procesom generalizacji, pozwalającym dostosować wyniki pomiarów do wymaganych parametrów. Dobrym przykładem może być użycie algorytmów matematycznych odnajdujących linię trendu, która przeważnie pokrywa się z faktycznym przebiegiem mierzonej linii. W razie konieczności gotowy obiekt można poddać procesowi wygładzania, niwelując sztuczny kształt wyrażony za pomocą linii łamanej (ryc. 15.12).

W trakcie sesji pomiarowej warto jest zarejestrować współrzędne dla obiektów, których położenie zostało wcześniej ustalone na mapie. Pozwoli



**Ryc. 15.12.** Przykład generalizacji przebiegu linii z pomiarów odbiornikiem GNSS

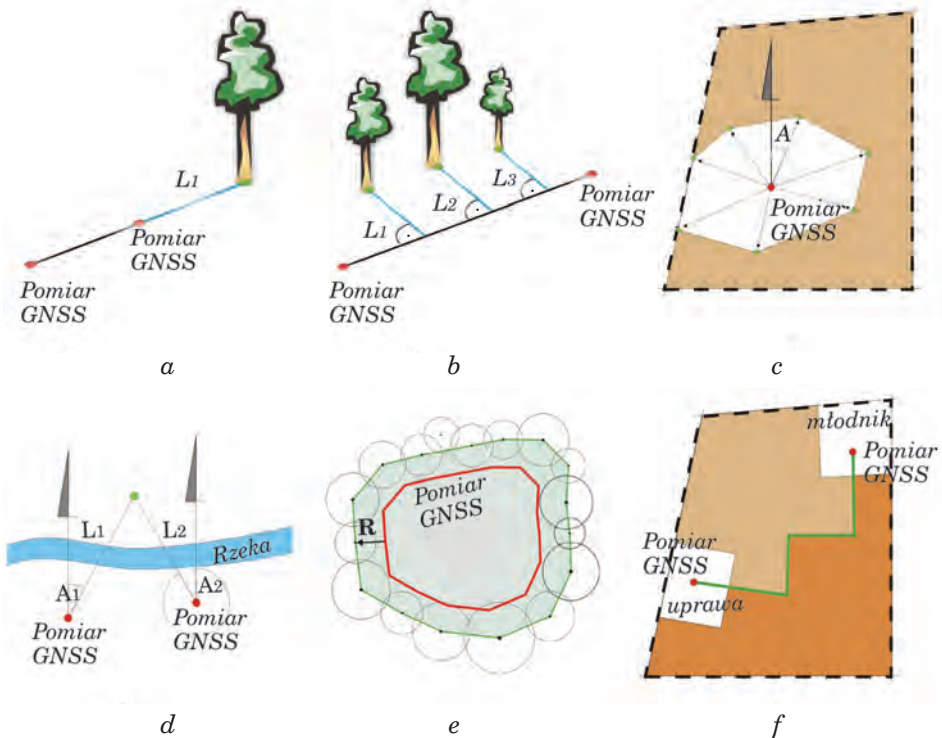
to na łatwiejszą interpretację wyników pomiarów w wypadku niejednoznaczności układów współrzędnych bądź też istotnych błędów odbiornika.

Odbiornik GNSS nie musi być jedynym źródłem informacji przestrzennej. Aby uzyskać dokładniejsze wyniki, warto posługiwać się metodami łączącymi różne techniki, oparte na pomiarze kąta i odległości. Zastosowanie prostych konstrukcji geometrycznych pozwala ponadto efektywnie zbierać dane w miejscach niedostępnych. Większość odbiorników klasy GIS pozwala na realizację następujących zadań pomiarowych:

1. Wyznaczenie położenia punktu leżącego na przedłużeniu linii utworzonej z obserwacji GNSS poprzez pomiar odległości. Technika ta może być szczególnie przydatna wówczas, gdy potrzebne jest wyznaczenie środka grubego drzewa o szerokiej koronie, mogącej utrudnić rejestrację sygnałów nawigacyjnych (ryc. 15.13a).
2. Zastosowanie metody domiarów prostokątnych, umożliwiającej odłożenie odległości wzdłuż istniejącej linii, a następnie pod kątem prostym do mierzonego obiektu. Jest to dobry sposób wyznaczania współrzędnych dla punktów zlokalizowanych wzdłuż jednej linii (ryc. 15.13b).
3. Tworzenie obiektów liniowych lub poligonowych na podstawie wyznaczonego za pomocą odbiornika GNSS punktu referencyjnego. Wykorzystując dalmierz laserowy z busolą, rejestruje się azymut i odległość do wierzchołków linii (ryc. 15.13c).
4. Zastosowanie metody wcięć liniowych lub kątowych pozwalającej obliczyć położenie punktu na podstawie pomiaru odległości lub azymutu z dwóch punktów referencyjnych. W ten sposób można pomierzyć położenie obiektów niedostępnych (ryc. 15.13d).

5. Automatyczne tworzenie obiektu liniowego w zadanej odległości od osi, wzdłuż której dokonywana jest rejestracja sygnałów satelitarnych. Metoda ta jest przydatna wówczas, gdy pomiar dokonywany jest w pobliżu obiektów mogących ograniczyć odbiór sygnałów satelitarnych. Można ją również zastosować wtedy, gdy trzeba wyznaczyć oś rzeki, kanału czy drogi i zdecydowanie łatwiej jest poruszać się wzdłuż krawędzi obiektu (ryc. 15.13e).
6. Wyznaczenie linii lub poligonu na podstawie ciągu busolowego dowiązanego do punktów referencyjnych pomierzonych odbiornikiem GNSS. Punkty odniesienia można pomierzyć na obszarach gwarantujących lepszy odbiór sygnałów nawigacyjnych, a konstrukcję ciągu busolowego realizować w gęstym lub wysokim drzewostanie.

Pomiar odległości można wykonać za pomocą tradycyjnej taśmy mierzniczej (ruletki) lub stosując dalmierze laserowe, których wybór na rynku jest dość duży. W wypadku pomiaru kąta najprostszym rozwiązaniem jest użycie tradycyjnej lub elektronicznej busoli. Coraz częściej zdarza się, że zarówno dalmierz laserowy, jak i busola elektroniczna są monto-



Ryc. 15.13. Przykłady metod pomiarowych z wykorzystaniem odbiornika GNSS

wane w tym samym urządzeniu, które przesyła wyniki pomiarów do odbiornika GNSS za pomocą technologii Bluetooth.

## 15.13. Zastosowanie odbiorników GNSS

Lasy Państwowe, będąc w posiadaniu mapy numerycznej, są w doskonałej sytuacji, wszelkie bowiem aktualizacje oraz pomiary najłatwiej jest wykonywać za pomocą odbiorników GNSS dostarczających danych w postaci cyfrowej i w docelowym układzie współrzędnych. Zadanie to można realizować, mając świadomość błędów, które mogą wynikać na skutek oddziaływania środowiska leśnego na sygnał nawigacyjny. Nie należy zatem oczekiwać centymetrowych dokładności nawet przy zastosowaniu najdroższych odbiorników geodezyjnych z poprawką z sieci ASG-EUPOS. Wyniki badań pokazują, że należy w tym wypadku oczekiwać błędów w granicach od 2 do 5 m wyznaczania współrzędnych X, Y, Z. Warto zatem się zastanowić, czy zakup poręcznych odbiorników klasy GIS o zbliżonych dokładnościach nie jest lepszym rozwiązaniem. Stosowanie odbiorników klasy turystycznej jest oczywiście możliwe pod warunkiem sprawdzenia ich faktycznej skuteczności na podstawie punktów referencyjnych lub też innych wiarygodnych testów. Warto jednak pamiętać, że w tym wypadku zastosowanie korekcji różnicowej jest praktycznie niemożliwe, co istotnie wpływa na jakość uzyskiwanych wyników.

Różnorodność zadań realizowanych w gospodarce leśnej oraz ochronie drzewostanów uzasadnia stosowanie systemów nawigacyjnych. Potwierdzenie tego faktu znalazło odzwierciedlenie w zarządzeniu numer 74 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 23 sierpnia 2001 r., w którym wskazano odbiorniki GPS jako urządzenia dostarczające wiarygodnych danych do kartowania zmian wewnątrz działek oraz aktualizacji leśnej mapy numerycznej. Podane niżej przykłady wykorzystania odbiorników GNSS potwierdziły przydatność stosowania tej technologii w praktyce leśnej.

1. Pomiar powierzchni zrębów, gniazd i luk pod warunkiem, że nie są to obiekty bardzo małe i jest zapewniona widoczność satelitów. Odbiornik GNSS w tym wypadku jest niejednokrotnie wspomagany dalmierzem laserowym. Oprócz zastosowań w gospodarce leśnej znajomość powierzchni może być przydatna przy wypełnianiu wniosków do ARiMR związanych z dopłatami dla obszarów rolno-łąkowych.
2. Wyznaczanie ścieżek leśnych i edukacyjnych, tras rowerowych i wycieczkowych jest szczególnie istotne przy obecnym dużym zainteresowaniu społeczeństwa korzystaniem z obszarów znajdujących się pod zarządem Lasów Państwowych.
3. Dokładne dane geometryczne potrzebne są w gospodarce zrębowej do wytyczania szlaków zrywkowych oraz działek zrębowych i aktualizacji granic.

4. Kontrola podziału powierzchniowego nadleśnictwa, odtwarzanie przebiegu linii oddziałowych, granic wydzieleń drzewostanowych, granicy nadleśnictwa oraz wszystkich innych obiektów o charakterze geometrycznym.
5. Określanie położenia drzew i drzewostanów nasiennych, wyznaczanie powierzchni i lokalizacja odnowień naturalnych.
6. Szerokie zastosowanie odbiorników nawigacyjnych znaleźć można w ochronie przeciwpożarowej. Wozy bojowe straży pożarnej są coraz częściej standardowo wyposażane w odbiorniki nawigacyjne. Lokalizacja pożaru z podaniem współrzędnych jest najlepszą metodą, umożliwiającą podjęcie szybkich działań ratowniczych zarówno przez jednostki naziemne, jak i lotnicze. Znając powierzchnię i lokalizację spalonego drzewostanu, łatwiej jest podjąć właściwie decyzje gospodarcze.
7. Zgodnie z Zarządzeniem nr 18 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z 6 kwietnia 2007 r. w sprawie ograniczenia zagrożeń ze strony szkodliwych owadów, grzybów patogenicznych i innych zjawisk szkodliwych w lasach, w 2007 r., wprowadzono konieczność stosowania systemów DGPS AGRO przy przeprowadzaniu oprysków przez firmy lotnicze. Z jednej strony gwarantuje to bardzo wysoką dokładność nalołów, daje możliwość precyzyjnej kontroli ich wykonania, pozwala na dokładne monitorowanie wylatanego przez samolot czasu. Z drugiej – zleceniodawca ma obowiązek podania wykonawcy oprysku dokładnej lokalizacji obszarów leśnych objętych zabiegami agrolotniczymi. Najszybszą i zarazem tanią metodą jest zebranie takich obserwacji za pomocą odbiornika GNSS, wspomaganego korekcją różnicową z sieci ASG-EUPOS.
8. Odbiornik GNSS to wreszcie znakomite urządzenie wspomagające prowadzenie bieżących zadań gospodarczych. Specjalnie napisane oprogramowanie, wykorzystujące leśną mapę numeryczną oraz dane z SILP, w połączeniu z nawigacją satelitarną pozwala nie tylko na szybkie lokalizowanie drzewostanów, ale także wyświetlanie aktualnych informacji o opisie taksacyjnym, planach i pozyskaniu drewna.

