

## WPROWADZENIE DO TECHNOLOGII SKANINGU LASEROWEGO W LEŚNICTWIE

### INTRODUCTION TO LASER SCANNING TECHNOLOGY IN FORESTRY

**Piotr Wężyk**

Wydział Leśny, Akademia Rolnicza w Krakowie

**Słowa kluczowe: lotniczy i naziemny skaniny laserowy (lidar), NMT, NMPT, chmura punktów**  
Keywords: airborne and terrestrial laser scanning (lidar), DTM, DSM, point cloud

## Wprowadzenie

Przez ostatnie dziesięciolecia przy urządzaniu i inwentaryzacji lasu możliwe było pozyskiwanie informacji przestrzennej metodami fotogrametrycznymi polegającymi na obserwacji stereoskopowej pary zdjęć lotniczych bądź naziemnych. Wiązało się to jednak z koniecznością opanowania skomplikowanego warsztatu obejmującego orientację, fotointerpretację i stereodigitalizację pary zdjęć. Nakład sił i czasu przeznaczony na generowanie numerycznego modelu terenu (NMT) czy odczyty wysokości drzew był niezmiernie duży i obciążony subiektywizmem interpretatora. Szczególnie w obszarach leśnych o dużym zwarciu koron drzew technologie fotogrametryczne miały i wciąż mają spore ograniczenia ze względu na możliwość opracowania tylko wierzchołkowych części koron i brak możliwości interpretacji w obszarach cienia.

W ostatnich latach pojawiły się fotogrametryczne stacje cyfrowe wyposażone w oprogramowanie wspomagające pracę obserwatora (interpretatora) m.in. przez zastosowanie algorytmu autokorelacji obrazu. Zaspokojone zostały na jakiś czas potrzeby w zakresie generowania numerycznego modelu powierzchni terenu (NMPT) i ortofotomapy ze zdjęć lotniczych oraz zasilania systemów GIS.

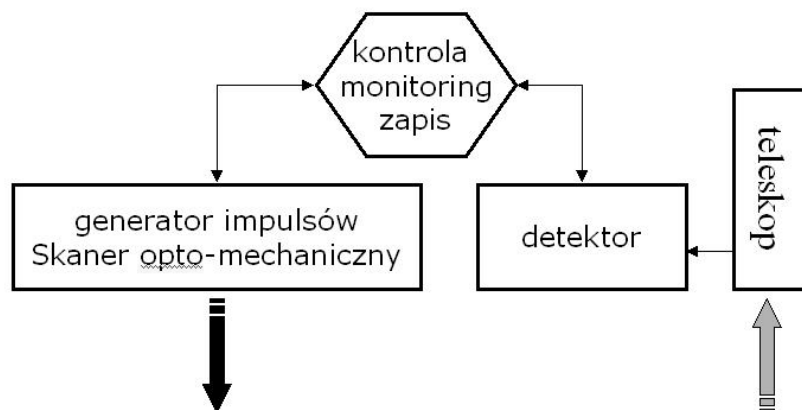
Szybki rozwój technik geoinformatycznych sprawił, że obecnie znaczącą rolę zaczyna odgrywać skaniny laserowy (lidar). Jest ono konkurencyjne w stosunku do tradycyjnych metod geodezyjnych i fotogrametrycznych ze względu na: dużą wydajność w wykonaniu opracowań masowych o wysokiej dokładności oraz możliwość integracji skaniny laserowego z sensorami rejestrującymi w zakresie optycznym promieniowania (skanery hiper-spektralne, kamery termowizyjne itp.).

## Technologia skaningu laserowego

Skaning laserowy znany najczęściej pod nazwą lidar (ang. *Light Detection and Ranging*) należy do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, wykorzystujących do obrazowania promieniowanie najczęściej z zakresu bliskiej podczerwieni tzw. NIR (ang. *Near InfraRed*). Dzięki temu jest niezależny od warunków oświetleniowych, co oznacza że obrazowania skanerem lidarowym można dokonywać nawet w nocy przy braku światła słonecznego, gdyż urządzenie zasilane jest niezależnym źródłem energii.

W ogromnym uproszczeniu, lidar składa się zazwyczaj z modułu generującego światło lasera (nadajnika, diody), systemu wirujących luster (ich zadaniem jest równomierne odchylenie wiązki i tym samym jej rozrzucenie po obiekcie badań), teleskopu skupiającego promieniowanie powracające (odbite) oraz rejestrującego go detektora (rys. 1). Nadajnik i detektor podlegają jednostce kontrolującej sterowanej komputerem. Tego typu skanery mogą być klasyfikowane jako opto-mechaniczne ze względu na zastosowane rozwiązania mechaniczne do odchylenia promieniowania z jednoczesnym precyzyjnym pomiarem tego kąta. Istnieją także inne specyficzne rozwiązania (np. Falcon, TopoSys) wykorzystujące światłowody, tzn. pojedyncze włókna przewodzące impulsy (wysyłające oraz odbierające, rozstawione w odpowiedniej odległości i pod znanym kątem) zamiast złożonej mechaniki z wirującymi lustrami. W tym przypadku plamka lasera dociera równomiernie do gruntu w określonych odstępach np. 12 cm przy prędkości samolotu 65 km/godz. (Schnadt, Katzenbeißer, 2004).

Działanie skanera laserowego polega na pomiarze odległości urządzenia od badanego obiektu (celu; ang. *target*). Realizowane to jest przez pomiar i rejestrację czasu jaki upływa od momentu wysłania światła lasera do jego powrotu do detektora, po uprzednim odbiciu od powierzchni celu. Znana wartość prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej (światła) oraz pomierzony czas, pozwalają na obliczenie odległości obiektu od skanera. Urządzenie rejestruje także kąt pod jakim wysyłana jest wiązka lasera. Pomierzone elementy tj. czas i kąt odchylenia wiązki pozwalają na wyznaczenie współrzędnych przestrzennych XYZ pomierzonych punktów (tzw. chmury punktów; ang. *point cloud*) w układzie lokalnym skanera. Znane współrzędne skanera bądź też dowolnych pomierzonych punktów w docelowym układzie współrzędnych np. WGS84 czy PUGW 1992/19 służą do wpasowania układu lokalnego i przeliczenia współrzędnych wszystkich punktów do układu docelowego.



Rys. 1. Schemat działania skanera laserowego (lidara)

Oprogramowanie do obsługi skanera umożliwia dobór parametrów skanowania, tj. częstotliwości generowania impulsu lasera oraz kąta uchylenia wiązki lasera. Odległość obiektów od skanera decyduje o rzeczywistej wielkości plamki (ang. *footprint*). Przykładowo zmiana wielkości kąta o 1 mrad dla wiązki lasera wysyłanej z wysokości względnej 1000 m generuje plamkę na gruncie o wielkości 1,0 metra.

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

Technologie skaningu laserowego dzieli się na:

- lotniczy skaningu laserowy (ang. ALS – *Airborne Laser Scanning*),
- satelitarny skaningu laserowy (ang. SLS – *Satellite Laser Scanning*);
- naziemny skaningu laserowy (ang. TLS – *Terrestrial Laser Scanning*).

### Lotniczy skaningu laserowy (ALS)

W ostatniej dekadzie technologia lotniczego skaningu laserowego uzyskała pełną akceptację użytkowników jako szybka i precyzyjna metoda trójwymiarowego obrazowania powierzchni Ziemi, wykorzystywana do generowania numerycznego modelu terenu (ang. DTM – *Digital Terrain Model*) bądź też numerycznego modelu powierzchni terenu (ang. DSM – *Digital Surface Model*). W przeciwieństwie do tradycyjnej fotogrametrii, ALS realizowany może być nawet w sytuacji występowania chmur wysokich (przy założeniu, iż rejestracja dokonywana jest z niższego pułapu). Występowanie deszczu, gradu opadów śniegu bądź mgły są jednak znacznym ograniczeniem dla stosowania tej technologii.

W technologii ALS, jako środek transportu skanera lidarowego, wykorzystane mogą być samolot lub śmigłowiec. Stosowanie śmigłowców, choć droższych w eksploatacji i mniej wydajnych niż samoloty, ma jednak swoje zalety. Podstawowymi zaletami jest niski pułap przelotu oraz niewielkie prędkości, w wyniku czego uzyskać można zagęszczenie punktów pomiarowych rzędu od 3–4 do 30–40 na 1 m<sup>2</sup>. Takiej gęstości pokrycia nie uzyska się w przypadku stosowania skanerów laserowych na samolotach, które zwykle podczas komercyjnych zastosowań uzyskują w granicach 1–2 do 3 punktów pomiarowych na 1 m<sup>2</sup>. Dlatego samoloty stosuje się przy generowaniu NMT lub NMPT dla dużych obszarów (parametry są wystarczające do uzyskania bardzo dokładnych modeli). Natomiast śmigłowce stosuje się zazwyczaj przy monitoringu sieci teleenergetycznych czy przy generowaniu modeli 3D obszarów miejskich w projektach wymagających integracji chmury punktów pomiarowych z obrazami cyfrowymi pochodzącymi z jednej lub nawet kilku kamer wideo (np. system FLI-MAP 400 firmy Fugro, system Visimind Ltd.).

Stosowane obecnie systemy lidarowe podzielić można wg kryterium generowania wiązki promieniowania, jej modulowania i interpretacji, tj. na:

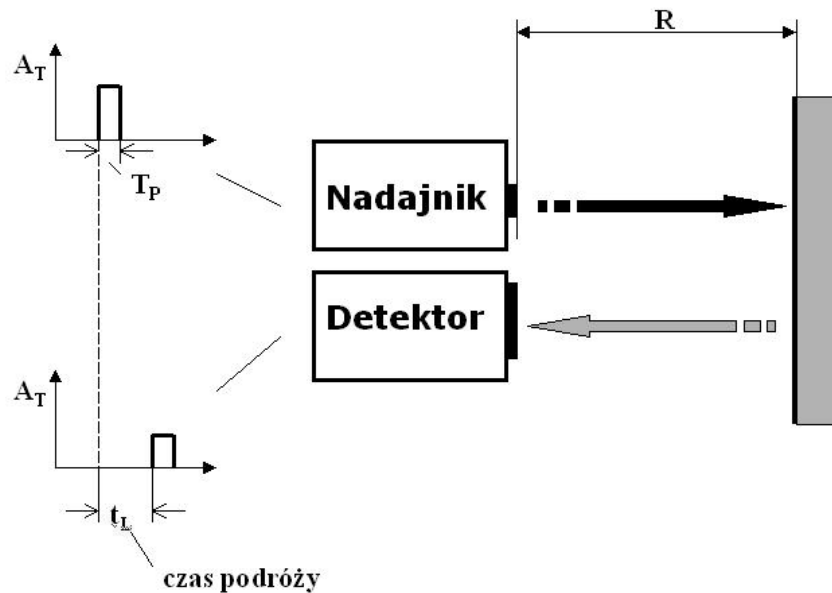
- systemy generujące impulsy promieniowania tzw. „pulsacyjne” (ang. *pulse ranging*),
- systemy tzw. „fali ciągłej” czy też „lasera falowego” (ang. CW – *continuous wave ranging*).

Poniżej omówione zostaną podstawowe typy skanerów lidarowych.

## Systemy pulsacyjne

Konwencjonalne rozwiązania polegają na użyciu lasera generującego bardzo silne impulsy światła, głównie z zakresu bliskiej podczerwieni (NIR), w niezmiernie krótkim czasie (wysoka częstotliwość rzędu np. 80 000 impulsów/sek = 80 kHz). Długość generowanego przez nadajnik impulsu  $T_p$  (rys. 2) determinuje rozdzielczość i dokładność pomiaru odległości  $R$  (Thiel, Wehr, 2004).

Rozdzielczość w przypadku systemów pulsacyjnych należy rozumieć jako rozróżnianie pierwszego i ostatniego odbicia (echa) od obiektu, tzn. minimalnej odległości pomiędzy pierwszym i ostatnim celem (np. warstwami wegetacji). Wartość ta waha się w zależności od rozwiązań technologicznych różnych systemów i wynosić może np. 1,0 metr jak w rozwiązaniach skanera lotniczego Falcon (TopoSys; Schnadt, Katzenbeißer, 2004) czy też poniżej 0,6 metra w przypadku skanera Riegl LMS-Q560 (Rieger i in., 2006). Utrata siły sygnału docierającego do detektora determinuje maksymalną odległość rejestrowanych celów. W dużej mierze siła sygnału rejestrowanego zależy od właściwości powierzchni samego obiektu, tj. powierzchni (rodzaju materiału, kształtu, struktury) i kąta nachylenia w stosunku do padającej plamki lasera (Thiel, Wehr, 2004). W rzeczywistości odbić od jednego celu (np. korony drzewa) może być bardzo wiele i mało jest przypadków w drzewostanie kiedy pierwsze echo odpowiada ostatniemu. Jedno odbicie występuje najczęściej w przypadku dachów budynków, odkrytego gruntu, skał bez wegetacji itp. W zależności od konstrukcji poszczególnych systemów, echa i zakłócenia (szumy, kolejne odbicia) są interpretowane i usuwane (jeśli istnieje taka potrzeba) poprzez:



Rys. 2. Schemat ideowy działania skanera lidarowego generującego impulsy lasera (źródło: Thiel, Wehr, 2004)

- założenie tzw. „progu czasu” (ang. *threshold*) na drodze analizy narastającej krzywej czasu upływającego podczas „podróży” światła lasera, od nadania impulsu do jego rejestracji (w zasadzie odległość = podwójny dystans do celu: nadajnik ⇒ obiekt + obiekt ⇒ detektor). W głównej mierze kształt tej krzywej zależy od właściwości (albedo) powierzchni obiektu wpływającej na moc odbijanego sygnału. Jeśli powracający sygnał jest słaby, to przekracza on założony próg (stały ang. *fixed*) stosunkowo późno. Długi czas „podróży” promienia lasera w efekcie oznacza ostry kąt nachylenia krzywej (rys. 3). Aby skorygować ten efekt różnej intensywności uzależniony od właściwości odbijania promieniowania przez różnie oddalone obiekty, wprowadza się odpowiednie korekty progu poprzez określenie mocy powracającego sygnału i zastosowanie odpowiedniej formuły. Jedną z możliwych korekt  $t_k$  (Thiel, Wehr, 2004) może przybrać postać:

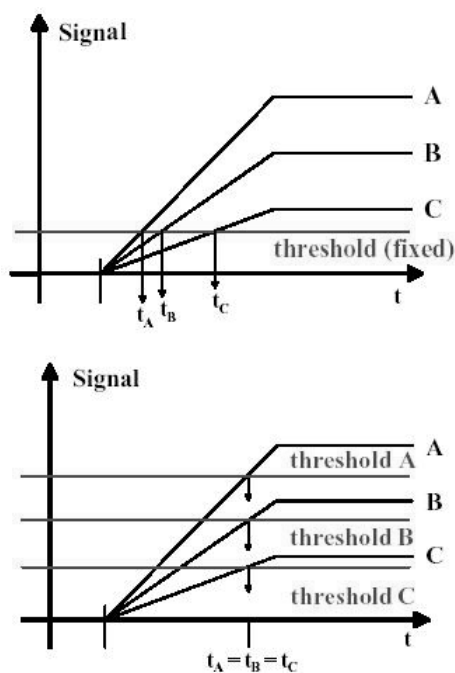
$$t_k = \frac{P_{thr} \cdot t_r}{P_{peak}}$$

gdzie:

$P_{thr}$  – poziom progu,

$P_{peak}$  – poziom impulsu (ekstremum),

$t_r$  – czas wznoszenia się krzywej sygnału.



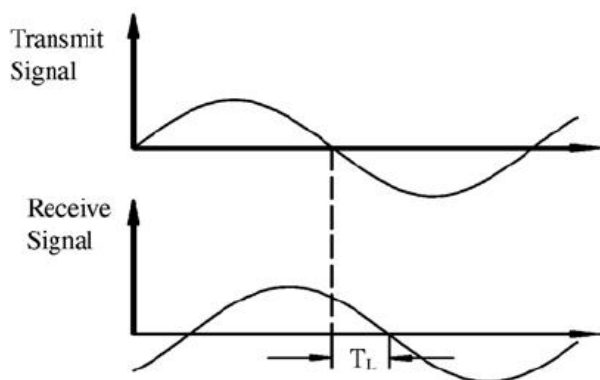
Rys. 3. Detekcja powracającego sygnału  
(źródło: Thiel, Wehr, 2004)

- użycie w bardziej zaawansowanych systemach tzw. „stałego dyskryminatora frakcji sygnału” (ang. *constant fraction discriminator*). Zasada polegająca na natychmiastowym ustaleniu przez system progu czasu (*threshold*) w zależności od poziomu sygnału powracającego;
- metodą detekcji tzw. „pełnej fali” (ang. *full waveform detection*) polegającą na cyfrowym próbkowaniu (digitalizacji) całej krzywej fali powracającej do detektora niosącej z sobą informacje o odbiciu nieraz od bardzo wielu obiektów (np. 7 poszczególnych warstw wegetacji od szczytu korony do podszytu i gruntu) podczas całej wędrówki plamki lasera przez pionową strukturę drzewostanu (Ducic i in., 2006). W zasadzie metoda ta znana była od lat 70. XX wieku, jednak dopiero rozwój techniczny (głównie zwiększenie pojemności dysków twardych oraz mocy obliczeniowych procesorów) umożliwił jej komercyjny zastosowanie. Należy mieć na uwadze, iż ta najnowocześniejsza w tym momencie technologia, operująca komercyjnymi skanerami Riegl LMS-Q560, TopEye MKII czy Optech ALTM 1225 (Reitberger i in., 2006), umożliwia zwiększenie ilości danych od 50 do 200 razy. Rejestracja i opracowanie danych wykonywane jest *off-line* w trybie tzw. *post-processing*. W ten sposób zapewniony został wielogodzinny zapis danych podczas lotu, a następnie możliwość ich kameralnego opracowania, które trwa również długo, ale

pozwala na wydobycie niezmiernie ważnych dla użytkownika informacji o strukturze pionowej wegetacji, np. o poszczególnych piętrach drzewostanu o złożonej budowie (Reitberger i in., 2006). Zatem – w stosunku do tradycyjnie dostępnych technologii lidarowych – niedogodność związana z długim czasem opracowania jest rekompensowana niewspółmiernie dużym bogactwem cennych dla leśnictwa danych (Dudic i in., 2006; Hug i in., 2004).

### Systemy fali ciągłej (CW)

W systemach typu fali ciągłej (lasera falowego) intensywność lasera jest modulowana odpowiednią funkcją np. sinusoidalną bądź wykładniczą. Modulacja obejmuje okres czasu



Rys. 4. Schemat modułowanej fali ciągłej i przesunięcia fazowego (źródło: Thiel, Wehr, 2004)

( $T_p$ ). Laser emituje światło w sposób ciągły modulując średni poziom sygnału. Czas wędrowki ( $T_L$ ) określany jest przez pomiar różnic w fazie pomiędzy wysyłanym a rejestrowanym sygnałem na detektorze (rys. 4). Ze względu na stosunkowo niską moc sygnału skanery typu CW mają ograniczony zasięg operacyjny do około 100 metrów, stąd w praktyce stosuje się je w aplikacjach skaningu naziemnego (TLS). W bardzo krótkim czasie skanery CW są w stanie pozyskać kilkadziesiąt milionów punktów pomiarowych. Nie są one jednak w stanie

rozdzielić sygnału pochodzącego z odbicia od wielu obiektów (poszczególnych ech sygnału) z powodu interpretacji przesunięcia fazowego na sygnale wspólnym. Technika CW zapewnia możliwość zapisu intensywności odbitego promieniowania lasera bez wpływu na niego światła tła. Technologia ta nadaje się więc bardzo dobrze np. do obserwacji obiektów z wysokim współczynnikiem albedo tła (np. roślinność na glebach piaszczystych) bądź zwarcia (tło nieboskłon).

### Laserowy skaning satelitarny (SLS)

Systemy lidarowe, takie jak VCL (*Vegetation Canopy Lidar*) umieszcza się na satelitach okołobiegunowych. Przykładowo przy realizacji projektu ESSP (*Earth System Science Pathfinder*) ten satelita NASA dostarczał danych dla obszarów Ziemi (pas: od 65°N do 65°S) przy wykorzystaniu pięciu wiązek lasera impulsowego MBLA (*Multi-Beam Laser Altimeter*) o wielkości plamki (ang. *footprint*) rzędu 25 metrów, odległych od siebie o 2 km (obrazowanie na szerokości pasa 8 km). Głównym jego zadaniem było obrazowanie wegetacji lasów deszczowych poddawanej silnej antropopresji.

Innym, nowszym przykładem jest altimetr lidarowy GLAS (*Geoscience Laser Altimeter System*) zamontowany na satelicie NASA w programie ICESat (*Ice, Cloud and land Eleva-*



tion). Jest to urządzenie typu „pełnej fali” (*full waveform*) składające się w zasadzie z 3 skanerów (jeden jest niestety uszkodzony) o wielości plamki 70 metrów (kolejno rejestrowanych na trasie obrazowania co 175 metrów). Pierwsze wyniki badań nad wykorzystaniem tego skanera do detekcji obszarów LAS/NIE-LAS oraz różnic w obrazowaniu drzewostanów zimą i latem z obszaru Francji i Holandii dają pozytywne rezultaty (Duong i in., 2006).

### Laserowy skaning naziemny (TSL)

Technologia skaningu naziemnego, dostarczająca dużej liczby precyzyjnych pomiarów przestrzennych (3D), przy dużej automatyzacji przetwarzania i klasyfikacji chmury punktów, jest od około 5 lat uznanym narzędziem architektów, inżynierów budowlanych i konstruktorów. Stosowane obecnie urządzenia do skaningu naziemnego mogą być klasyfikowane wg. różnych kryteriów, w tym m.in.:

- **metody pomiaru odległości** – większość z producentów sprzętu stosuje technologię pulsacyjnych skanerów (ang. *time-of flight*), których dokładność określenia odległości jest ograniczona do około 5–10 mm. Niektóre urządzenia wykorzystują modulowanie fali (CW) osiągając dokładności rzędu 1–3 mm. Wadą jednak tego typu urządzeń jest niewielki zasięg i dwuznaczność w interpretacji odbitego promieniowania;
- **poła obserwacji** – znaczna część skanerów oferuje panoramiczne obrazowanie (ang. *panoramic view scanners*): 360° horyzontalnie oraz kąt pionowej obserwacji od 80° (np. Riegl Z420i) do 135°, a nawet 320° (np. FARO SL). Nielicznie oferowane są modele rejestrujące wiązkę lasera wewnątrz zdefiniowanego kadru (np. 60° x 60°) linia po linii (tzw. *camera-like view scanners*) jak w przypadku skanera ILRIS-3D (Optech);
- **metody odchylenia wiązki lasera** – lidar obrazuje powierzchnie obiektów sekwencyjnie, rozrzucając systematycznie wiązkę za pomocą: zwierciadeł galwanicznych, rotujących eliptycznych luster, obrotu samego instrumentu, czy ich kombinacji;
- **maksymalnego zasięgu** – od około 20 metrów w skanerach CW, do ponad 1300 metrów w skanerach pulsacyjnych;
- **częstotliwości pracy lasera** – liczby impulsów promieniowania wysyłanych przez urządzenie (od 2000 do 625 000 na sekundę);
- **rozdzielczości przestrzennej** – liczby punktów pomiarowych uzyskanych w skanowanym polu operacyjnym;
- **integracji z kamerą cyfrową** – wiele urządzeń posiada na stałe wbudowane kamery (np. ILRIS 3D – kamera 6 mln pikseli) lub też posiada możliwość ich zamontowania (np. Riegl Z420i – Nikon 200D, wymienne obiektywy);
- **sposobu przechowywania danych** – zwykle dane są transferowane do przenośnych komputerów (np. Riegl) bądź też zapisywane na zintegrowanym z urządzeniem dysku twardego (FARO SL) lub przenośnym nośniku pamięci (ILRIS-3D; Optech).
- **typu lasera** – większość producentów wykorzystuje promieniowanie z zakresu NIR 785 nm (Faro SL) czy 900 nm (Riegl Z420i), ale zdarzają się też rozwiązania ze światłem zielonym 565 nm (np. Trimble® GX™ 3D, czy Lecia HDS 3000).

W przeciwieństwie do innych urządzeń geodezyjnych (takich jak TotalStation czy GPS) skanery laserowe nie doczekały się jeszcze konkretnych testów porównawczych wykonywanych przez niezależne instytuty w celu potwierdzenia parametrów oferowanych przez producentów. Dodatkowo różne ww. rozwiązania techniczne wprost uniemożliwiają doko-

nywania takich porównań. Nie ma po prostu uniwersalnych skanerów spełniających wymagania konkretnych aplikacji, w tym stosowanych lub wprowadzanych właśnie w leśnictwie.

## **Integracja lidar z innymi urządzeniami pozyskującymi geodane**

Podstawą właściwego wykorzystania chmury punktów pozyskanych ze skaningu laserowego jest ich właściwe umiejscowienie w przestrzeni geograficznej (choć nie wszystkie opracowania tego wymagają). Pełna integracja danych lidar z geodanymi pozyskanymi z innych źródeł, jak choćby z naziemnych powierzchni służących inwentaryzacji lasu czy z ortofotomapami lotniczymi i satelitarnymi, polega na przyjęciu jednego układu współrzędnych (np. WGS84, UTM). W zależności od typu lidar (ALS bądź TLS) mogą to być bardzo zaawansowane technologie jak INS/GPS bądź też tradycyjne instrumenty geodezyjne (w przypadku wpasowania chmury punktów z TSL).

### **Inercjalny system nawigacji (INS)**

W skład inercjalnego systemu nawigacji (INS) montowanego na pokładzie statków powietrznych, wchodzi zazwyczaj tzw. IMU (ang. *Inertial Measuring Unit*) zbudowany z akcelerometrów oraz żyroskopów. Zadaniem IMU jest rejestracja zmian w trójwymiarowej przestrzeni, samolotu bądź śmigłowca podczas jego lotu. Urządzenie określa niezmiernie precyzyjnie, takie elementy jak: wychylenia kątowe wzdłuż osi XYZ, przyspieszenia oraz czas. Pozwalają one określić przestrzenny wektor przemieszczenia względem przyjętego punktu początkowego w przestrzeni. Zazwyczaj na lotnisku, przed startem samolotu, dokonuje się inicjalizacji pracy przez wprowadzenie pozycji z odczytu odbiornika GPS. Sam odbiornik pozycji NAVSTAR-GPS przekazuje w cyklu co 1 sek. informacje traktowane jako referencyjne w celu wprowadzenia poprawek do akceleratorów IMU, który określa zmiany pozycji w trybie 128 lub 256 Hz, tj. 128 do 256 razy szybciej niż GPS (Hug i in., 2004). Oznacza to, iż bardzo precyzyjne odczyty IMU, przy jednoczesnym wykorzystaniu pozycji GPS (epoka jednosekundowa) podczas inicjalizowania pracy urządzenia oraz korekcji systemu inercjalnego, stwarzają możliwość prowadzenia ciągłych obserwacji położenia samolotu w przestrzeni i to o wiele bardziej precyzyjnych niż w przypadku stosowania tych urządzeń niezależnie. W przypadku chwilowego braku sygnału GPS bądź jego zakłócenia (np. błędy zegara satelitów NAVSTAR, zakłócenie jonosferyczne itp.) funkcję podstawową przejmuje IMU aż do czasu ponownego odbioru poprawnego sygnału GPS. Integracja odbiornika GPS z INS pozwala dla każdej setnej sekundy określić pozycję skanera wysyłającego pod określonym kątem impulsy lasera. Korzystając z różnych trybów pomiarów DGPS pamiętać należy aby stacja bazowa GPS nie znajdowała się dalej niż 30–40 km od skanowanego obszaru.

### **Integracja z sensorami optycznymi**

Integracja urządzeń zamontowanych na pokładzie samolotu bądź śmigłowca przybiera zazwyczaj konfigurację: lidar + kamera cyfrowa + IMU/GPS (INS). Coraz częściej wraz z wykonywaniem obrazowania laserem pozyskuje się też dane skanerami liniowymi (np. TopoSys – Schnadt, piksel 25 cm; Katzenbeißer, 2004) bądź hiperspektralnymi rejestrujący-



mi w kilkudziesięciu lub kilkuset kanałach jednocześnie (np. AISA). Do precyzyjnej nawigacji oraz rejestracji parametrów IMU/GPS czy danych ze skanera laserowego bądź kamery cyfrowej wykorzystuje się macierze dyskowe zintegrowane z dedykowanymi rozwiązaniami np. CCNS (*Computer Controlled Navigation System*; IGI, Niemcy) opartymi o komputery zarządzające urządzeniami i odpowiednie oprogramowanie. Umożliwia ono jednocześnie zaplanowanie nalotu (wyznaczenia środków rzutów cyfrowych zdjęć lotniczych, obliczenia szeregów i liczby zdjęć, włączenia i wyłączenia skanera itp.) jak i precyzyjną nawigację podczas nalotu. Pilot oraz operator obsługujący lidar oraz inne urządzenia, mają dzięki CCNS możliwość wyświetlania niezbędnych informacji na niewielkich ekranach ciekłokrystalicznych, co znacznie ułatwia im pracę. Coraz częściej integruje się także kamery termowizyjne czy średnioformatowe kamery cyfrowe z lidarami.

Większość skanerów naziemnych posiada zintegrowaną kamerę cyfrową dostarczającą wysokiej rozdzielczości obrazów. Zabarwienie chmury punktów dokonywane jest na podstawie synchronizacji z obrazami z kamery cyfrowej (z obiektywami szerokokątnymi) przez co obraz lidarowy staje się bardziej zbliżony do rzeczywistości. Jednocześnie można zastosować technikę układania (drapowania, ang. *draping*) obrazu z kamery na model 3D obiektu wygenerowany z chmury punktów pomiarowych.

## Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego w leśnictwie

Podstawowym zadaniem lotniczego skaningu laserowego (ALS) w leśnictwie jest dostarczanie informacji o zróżnicowaniu struktury poziomej i pionowej na dużych obszarach leśnych (Hyypä i in., 2006, Lim i in., 2002). Dwa podstawowe podejścia dotyczące opisu drzewostanu skanowaniem laserowym to: przestrzenny rozkład cechy wysokości górnej powierzchni drzewostanu (ang. *canopy*) oraz detekcja pojedynczych koron drzew (rozpoznanie, segmentacja obrazu, określenie obrysu koron).

Prace licznych autorów, szczególnie z Kanady, USA, krajów skandynawskich czy Niemiec od wielu lat jednoznacznie wskazują na możliwości praktycznego wykorzystania technologii lidarowej do określania wybranych cech taksacyjnych i charakterystyk drzewostanów takich jak:

- średnia wysokość drzewostanu (Hyypä i in., 2006; Persson i in., 2002; Vynne i in., 2002),
- miąższość związana z wysokością drzewa (Naesset, 1997; Nilsson, 1996; Hyypä i in., 2006),
- gatunek drzewa (Holmgren, Persson, 2004; Reitberger i in., 2006),
- pole przekroju (Lefsky i in., 2001; Means i in., 1999), stopnia defoliacji (Solberg i in., 2004),
- liczba drzew (Popescu i in., 2003),
- powierzchnia poszczególnych koron drzew (Koch i in., 2006),
- biomasa drzewostanów (Hyypä i in., 2006; Lefsky i in., 2001; Popescu i in., 2003).

Dokładność lidara (około 15–20 cm w pionie), w stosunku do innych rozwijających się dynamicznie aktywnych systemów teledetekcyjnych (np. interferometria radarowa – pasmo X), jest wciąż jeszcze nieco wyższa (Anderson i in., 2004).

Lidar, poza dostarczaniem informacji o strukturze drzewostanów, wykorzystywany jest także do tworzenia numerycznego modelu terenu (ang. DTM *Digital Terrain Model*) (Wack, Wimmer, 2002). DTM generuje się na drodze filtracji danych, zadaniem której jest wybór tych punktów z chmury pomiarowej, które zaklasyfikowane zostały jako ostatnie echo. Punkty interpretowane jako pierwsze echo pochodzą z odbić od części wierzchołkowych tworząc tzw. numeryczny model powierzchni terenu (ang. DSM – *Digital Surface Model*). W celu jednoznacznej interpretacji, do kalibracji i usunięcia błędów systematycznych stosuje się płaskie powierzchnie pozbawione wegetacji, na których pierwsze echo musi być równe ostatniemu (Hyypä i in., 2006). DTM jest niezbędny do obliczenia nDSM (ang. *normalised Digital Surface Model*) jako różnicy pomiędzy DSM a DTM, tj. modelu reprezentującego wysokości koron drzew (utożsamiany z modelem koron drzew; ang. CHM – *Canopy Height Model*). Opierając się na nDSM oraz innych danych, np. szerokości korony określanej w procesie segmentacji obrazu (Koch i in., 2006), można dokonywać obliczeń zasobności drzewostanów.

Należy brać pod uwagę pewne ograniczenia stosowania ALS w drzewostanach liściastych o dużym zwarcie w okresie wegetacji. Jak jednak wskazują liczne już projekty, nawet w sezonie letnim w drzewostanach liściastych do dna drzewostanu przenika 10-20% z wszystkich promieni lasera, znajdując niewielkie luki mieszczące plamkę lasera (ok. 20-30 cm). Dokładność określenia wysokości drzewa zależy nie tylko od liczby punktów pomiarowych na 1 m<sup>2</sup>, ale także od gatunku drzewa (formy korony, defoliacji, ekotypu). Wprawdzie łatwo można precyzyjnie określić powierzchnię pułapu koron liściastych, ale trudniej już zdefiniować, która część korony jest wierzchołkiem konkretnego drzewa. Tych problemów nie ma zwykle w przypadku drzewostanów iglastych (głównie świerkowych), jednak przy zbyt małej liczbie punktów pomiarowych, trafienie plamki lasera bezpośrednio w wierzchołek przy niskiej liczbie plamek lasera na 1 m<sup>2</sup> jest przypadkowe.

## Zastosowanie naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie

Przy urządzeniu i inwentaryzacji lasu, na przestrzeni wielu dziesiątków lat, wypracowano metody opisu lasu jako zjawiska przestrzennego i wielkopowierzchniowego z wykorzystaniem metod statystyczno-matematycznych opartych na siatce powierzchni kołowych. Metody te wymagają w głównej mierze pozyskania informacji o geometrii drzew tworzących drzewostany. W bardzo uproszczonym podejściu drzewo opisują 2 podstawowe parametry: pierśnica (średnica mierzona na 1,3 metra od poziomu gruntu) i wysokość.

Dość liczne już opracowania, wskazują jednoznacznie na możliwości stosowania skaningu naziemnego (TLS) w pracach z zakresu urządzenia lasu czy inwentaryzacji zapasu. Wyniki w dużej mierze uzależnione były od konkretnego typu skanera laserowego oraz od parametrów samego drzewostanu (Danson i in., 2006). Dlatego większość prac wskazuje na potrzebę stosowania takich urządzeń, które zapewniają uzyskanie: maksymalnej odległość co najmniej 20 do 100 metrów, częstotliwości wysyłania wiązki lasera co najmniej 10 kHz (10 000 punktów pomiarowych na 1 sekundę), pełnej panoramy w poziomie i niemal pełnej w pionie, oraz dokładności pomiaru nie gorszej niż 10 mm (Bienert i in., 2006).

Opierając się na przeglądzie prac naukowych i raportów projektów (Thies, Speicker, 2004; Danson i in., 2006; Bienert i in., 2006; Aschoff, Speicker, 2004) można stwierdzić, iż współczesny naziemny skaningu laserowy umożliwia automatyczne lub półautomatyczne pozyskiwanie takich cech taksacyjnych pojedynczych drzew jak: pierśnica, wysokość, długość korony, szerokość korony, długość strzały pozbawionej gałęzi, zwarcie koron drzew, zagęszczenie pni (szt./1ha), gatunek drzewa (obraz intensywności – kory drzewa bądź zdjęcie cyfrowe ze zintegrowanej ze skanerem kamery). Inne możliwe do pozyskania skanerem lidarowym cechy statystyczne i przestrzenne charakteryzujące drzewa i drzewostany, to: położenia pnia w przestrzeni, średnia pierśnica, zbieżystości pnia i jego krzywizna, stopień defoliacji korony (i związany z nim parametr *Leaf Area Index*, czy powierzchnia luk), kąt nasady gałęzi, całkowite pole przekroju G ( $m^2/ha$ ), minimalna i maksymalna wysokość drzewa, tzw. wysokość Lorey'a, zasobność ( $m^3/ha$ ), pionowy profil zmienności biomasy drzewostanu. Dodatkowe informacje takie jak „widoczność” wskazujące na istnienie lub brak podszytu są ważnym elementem w rozumieniu wielofunkcyjnego leśnictwa (np. walory estetyczne, turystyczne, zagrożenie pożarowe itp.).

## Podsumowanie

Szybkie pozyskiwanie informacji o stanie lasu i zmianach, które często bardzo dynamicznie zmieniają jego postać (huragany, gradacje, pożary, itp.) jest podstawowym zadaniem urzędowania lasu. Tradycyjne bazowało ono na podstawowej zasadzie dbałości o trwałość zasobów, m.in. przez zdefiniowanie okresu rębności, czy etatów cięć równoważonych odpowiednim przyrostem zasobów leśnych w okresie obowiązywania dziesięcioletniego planu.

Dzisiejsze rozumienie trwałości czy zrównoważonego rozwoju obejmuje również poza-produkcyjne funkcje lasu, takie jak: turystyczne, ochronne, estetyczne czy też dbałość o bioróżnorodność. Informacja musi być pozyskiwana niezmiernie szybko i precyzyjnie i to na dużych obszarach, a w dodatku nie powinna być ona obciążona subiektywizmem wielu obserwatorów. Technologia skaningu laserowego dostarcza olbrzymie ilości danych (o objętości wyrażonej w GB, a nawet TB pamięci komputerów). Danymi tymi trudno zarządzać, niosą jednak one ze sobą zupełnie nową jakość informacji (precyzję i brak subiektywizmu), której nawet do końca nie potrafimy obecnie wykorzystać.

Stosowanie skaningu laserowego wprowadza jednocześnie pojęcie „precyzyjnego leśnictwa”. Przy odpowiednim zagęszczeniu punktów pomiarowych przechodzi się od pojęcia drzewostanu do pojedynczych drzew jako obiektów, aby to na nich prowadzić modelowanie przyrostu i symulować scenariusze dla obszarów leśnych. Być może w niedalekiej przyszłości każde posadzone drzewo będzie miało w bazach danych wprowadzoną swą pozycję XYZ a jego parametry (podstawowe cechy taksacyjne) będą monitorowane właśnie skanowaniem laserowym z powietrza bądź z ziemi. Tak jak roboty już dziś zastępują w hali fabrycznej ludzi przy montażu samochodów, tak może kiedyś maszyny leśne wyposażone w skanery laserowe wybierać będą drzewa do pielęgnacji, czy pozyskania na podstawie automatycznego określenia parametrów i realizacji zaplanowanych decyzji.

Skaningu laserowego nie należy rozumieć jako bezpośredniej konkurencji w stosunku do klasycznej fotogrametrii, ale jako wspaniałe jej uzupełnienie, choć w niektórych zakresach może ją częściowo wyręczać. Możliwości interpretacyjne fotogrametrii kończą się wraz z górną powierzchnią koron drzew i cieniem tworzącym się w lukach drzewostanu. Zobrazo-

wania lidarowe uzupełniają te informacje dostarczając danych w znaczący sposób podnoszących jakość pracy algorytmów, zadaniem których jest automatyczne wyodrębnienie (określenie granic; segmentacja; ang. *delineation*) obiektów (koron drzew) na obrazach z kamer cyfrowych lub skanerów spektralnych.

Integracja chmury punktów ze skaningu naziemnego z obrazami pozyskanymi z poziomu lotniczego czy satelitarnego, wraz z jednoczesnym stosowaniem zaawansowanych modeli przyrostu drzew, może okazać się dopiero pełnym źródłem informacji zasilającym systemy wspomaganie decyzji obsługiwane przez decydentów zarządzających obszarami leśnymi.

### Literatura

- Anderson H.E., McGaughey R.J., Carson W.W., Reutbuch ST. E., Mercer B., Allan J., 2004: A Comparison of Forest Canopy Models Derived from LIDAR and INSAR Data in a Pacific Northwest Confer Forest. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34 (Part 3/W13): pp. 211-217.
- Aschoff T., Spiecker H., 2004: Algorithms for the Automatic Detection of Trees in Laser-Scanner Data. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H. and Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2. pp. 71-75.
- Bienert A., Maas H.G., Scheller St., 2006: Analysis of the information content of terrestrial laserscanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 44-49.
- Danson F.M., Hetherington D., Morsdorf F., Koetz B., Allgoewer B., 2006: Three-dimensional forest canopy structure from terrestrial laser scanning. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 50-54.
- Ducic V., Hollaus M., Ullrich A., Wagner W., Melzer Th., 2006: 3D vegetation mapping and classification using full-waveform laser scanning. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 211-218.
- Duong H., Pfeifer Nlindenbergh ., R., 2006: Analysis of repeated ICESAT full waveform data: methodology and leaf-on / leaf-off comparison. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 228-237.
- Holmgren J., Persson A., 2004: Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90, pp. 415-423.
- Hug C., Ullrich A., Grimm A., 2004: LiteMapper-5600 – a waveform-digitizing lidar terrain and vegetation mapping system. [In:] Thies, M., Koch, B., Spiecker, H. and Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2. pp. 24-29.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M., 2006: Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 63-78.
- Koch B., Diederhagen O., Straub Ch., Weinacker H., 2006: Standwise delineation based on 3-D information from LIDAR. Proceedings 3-D Remote Sensing in Forestry. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11., pp.1-14.
- Lefsky M., Cohen W., Harding D., Parker G., Acker S., Gower S., 2001: Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes. *Int. Arch. of Rem. Sens.* XXXIV-3/W4, Annapolis, pp. 6.
- Lim K., Treitz, P., Wulder M., St-Onge B., Flood M., 2002: Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27(1), pp. 88-106.
- Means J., Acker S., Harding D., Blair B., Lefsky M., Cohen W., Harmon M., McKee W., 1999: Use of large-footprint scanning airborne LIDAR to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of the Environment* 67: pp. 298-308.

- Naesset E., 1997: Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: pp. 246-253.
- Nilsson M., 1996: Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment* 56: pp.1-7.
- Persson A., Holmgren J., Sodermann U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(9), pp. 925-932.
- Popescu S.C., Wynne R.H., Nelson R.F., 2003: Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(5). pp. 564-577.
- Reitberger J., Krzystek P., Heurich M., 2006: Full-waveform analysis of small footprint airborne laser scanning data in the Bavarian Forest National Park for tree species classification. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.). 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 218-227.
- Rieger P., Ullrich A., Reichert R., 2006: Laser scanners with echo digitization for full waveform analysis. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.). 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. pp. 204-210.
- Solberg S., Næsset E., Lange H., Bollandsås O., 2004: Remote sensing of forest health. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H. and Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2. pp. 161-166.
- Schnadt K., Katzenbeißer R., 2004: Unique airborne fiber scanner technique for application-oriented LiDAR products. [In:] Thies, M., Koch, B., Spiecker, H. and Weinacker, H. (eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2. pp. 19-23.
- Thiel K.H., Wehr A., 2004: Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H. and Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2. pp. 14-18.
- Thies M., Spiecker H., 2004: Evaluation and Future Prospects of Terrestrial Laser-Scanning for Standardized Forest Inventories. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H. and Weinacker, H. (eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2. pp.192-197.
- Wack R., Wimmer A., 2002: Digital Terrain Models from Airborne Laserscanner Data – a Grid based approach Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium Graz. pp. 293-296.

### Summary

*Precise information about current state and recent changes of forest stands is important for forest inventory and forest management, traditionally based on the sample plots method and human-made measurement of some geometry parameters of trees. To reduce the time-consumed and subjective methods, several techniques were developed based on GPS, photogrammetry, remote sensing and in the last years also the airborne and terrestrial laser scanning (lidar). This technology can be categorized according to different criteria, for instance according to the position of scanner in space we distinguish airborne laser scanning (ALS), satellite laser scanning (SLS) and terrestrial laser scanning (TLS). On the other hand, according to the type of method used for handling the laser light we distinguish scanners based on time-of flight "pulse ranging" or on continuous wave ranging "cw". The newest development of lidar offers full-waveform scanners capturing new information about the vertical structure of the vegetation layer (except the first and the last echo).*

*Airborne laser scanning (ALS) is capable to generate small footprint diameters (10-30cm) allowing accurate determination of the height of a stand or even a single tree. Two main approaches to deriving forest information from lidar are: spatial distribution of canopy height and individual tree detection (recognition, segmentation, delineation). Depending on the number of laser pulses per sq meter (more than 3 or 4) and on the tree species and its age individual trees can be recognized. Based on the original point cloud, digital terrain model (DTM) and digital surface model (DSM) describing the treetops can be generated. Points for the interpolation of the DTM are selects with the use of special filtering algorithms. The canopy height model (CHM) is obtained by subtracting the DTM from the corresponding DSM. The DSM is calculated by means of the first pulse echo and the DTM with the last pulse echo.*

*Satellite laser scanning (SLS) uses large laser footprints (25-70m) delivering such data as: canopy top heights, vertical distribution of intercepted surfaces (e.g. leaves and branches), ground surface topographic elevations. Good example of SLS are: Vegetation Canopy Lidar (VCL) consisting of a five-beam instrument of 25 m contiguous along track resolution, with the beams spaced 2 km from one another on a distance of 8 km, or Geoscience's Laser Altimeter System (GLAS) which has 3 lidar on board, acquires elevation profiles of the entire earth consisting of footprints 70 m in diameter spaced every 175m along the profile.*

*Terrestrial laser scanning (TLS) is capable of collecting clouds (XYZ, intensity) of several million data points just in a few minutes. Applications making use of TLS in forest inventory and monitoring are focused on rapid semi-automatic recognition and determination of stand characteristics such as diameters on different heights, height, tree density, stem gap fraction in the canopy structure, defoliation and of course the position of the stem (XYZ).*

*Integration of airborne and terrestrial laser scanning opens new dimension in the forest inventory applications delivering in short time huge data sets which can be semi- or full-automatically processed. Lidar technology additionally supported by optical source of data like digital aerial photos or VHR satellite images can easily broaden the application of this geoinformation technology in the forestry.*

dr inż. Piotr Wężyk  
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl