

Lotnicze skanery jednofotonowe i skanery Geigera kontra skanery wielofotonowe, cz. I

Rewolucja nadchodzi



Tytuł nie jest precyzyjny. Rewolucja w lotniczym skanowaniu laserowym nie nadchodzi, tylko już nadeszła. Mowa tu o skanerach jednofotonowych i skanerach Geigera. Technologia ta – znana w sektorze militarnym od 15-20 lat – do zastosowań cywilnych przeniknęła jakieś 3 lata temu.

Zdzisław Kurczyński

W przeciwieństwie do „tradycyjnych” skanerów, które można obecnie uznać za technikę dojrzałą, nowe skanery są dopiero w fazie rozwoju i nie powiedziały jeszcze ostatniego słowa. Ideą tego artykułu jest przybliżenie podstaw działania skanerów jednofotonowych – SPL (Single Photon LiDAR) oraz skanerów Geigera – GmL (Geiger Mode LiDAR), ich możliwości, a także krytyczne wskazanie zalet oraz ograniczeń. Nie będzie to łatwe, bo zdania specjalistów na temat tych technologii są raczej podzielone i niejednoznaczne, a doniesienia w literaturze nadal niezbyt liczne. Mimo to spróbuję dokonać oceny perspektyw rozwoju nowatorskich rozwiązań i ich możliwego miejsca na rynku skanerów lotniczych i szerzej – na rynku geoproduktów 3D.

● **Klasyka, czyli skanery wielofotonowe**

Lotniczy skaner laserowy – LiDAR (Light Detection and Ranging), często

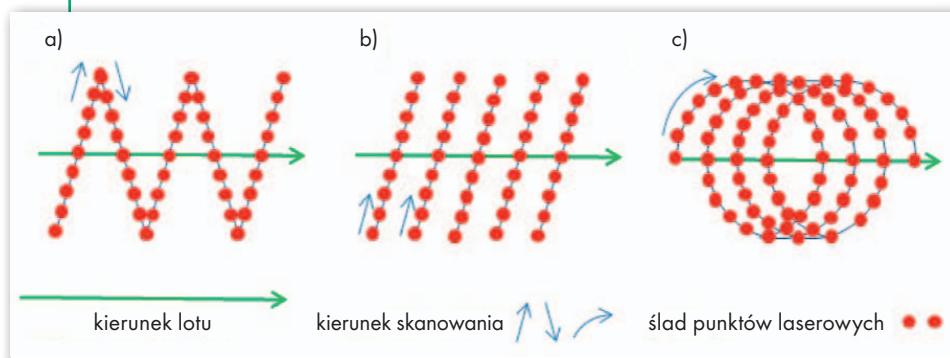
określany też jako ALS (Airborne Laser Scanner), posiada pojedynczą diodę laserową emitującą krótkie (rzędu kilku nanosekund), silne impulsy energii. Dioda laserowa emituje energię w zakresie bliskiej podczerwieni (długość fali 1064 nm lub 1550 nm) albo rzadziej – w zakresie zielonym (532 nm). Promień lasera skierowany jest na powierzchnię terenu poprzez optyczny układ przeczesujący (skanujący), np. wirujący pryzmat o posrebrzonych (lustrzanych) powierzchniach. Układ ten kieruje kolejno impulsy laserowe poprzecznie do kierunku lotu. W miarę ruchu samolotu ich ślad terenowy tworzy poprzeczne linie, kryjąc pas terenu równoległe do kierunku lotu (rys. 1 a i b).

Każdy impuls laserowy dociera do terenu, odbija się i rozprasza. Niewielka część tej energii wraca do układu optycznego skanera i jest rejestrowana przez tzw. fotodiody lawinową – APD (Avalanche Photo Diode). Tu następuje zamiana odebranej energii na sygnał elektryczny, który w przetworniku analogowo-cyfrowym ADC (Analog to Digital Converter) uzyskuje postać cyfrową. Dioda zamienia pa-

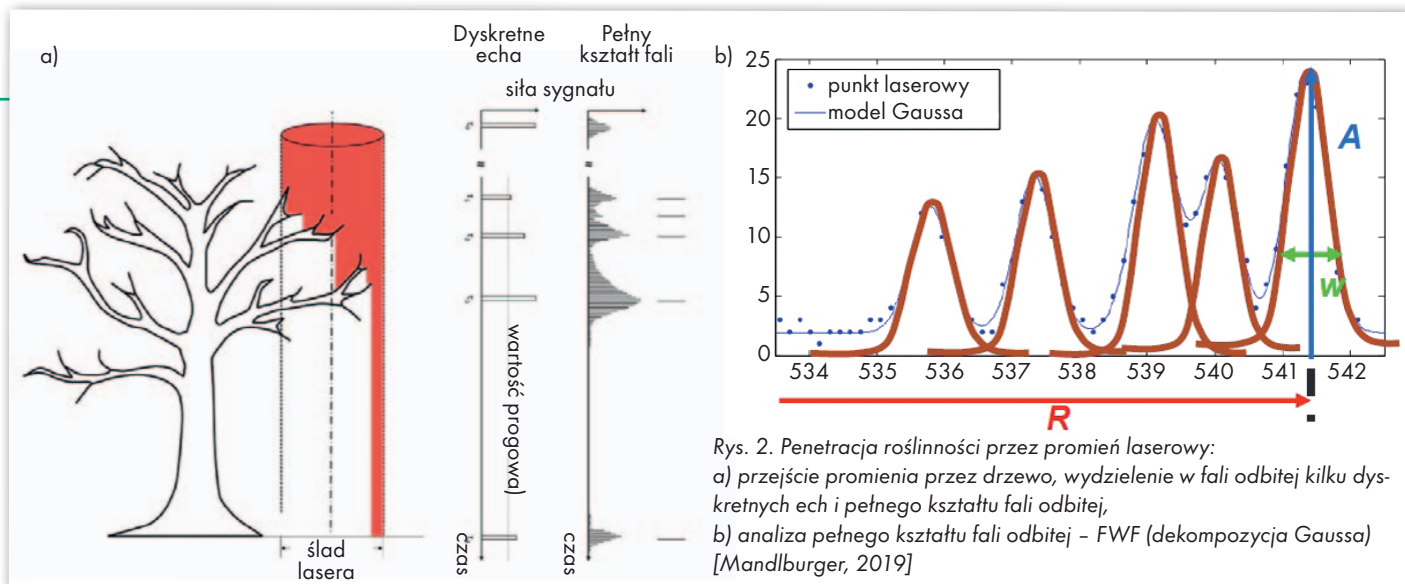
dającą energię świetlną na proporcjonalny do niej prąd (wykorzystywana tu jest liniowa charakterystyka diody), stąd skanery tego typu określane są jako liniowe (linear LiDAR). Próg aktywizacji diody jest tak ustawiany, aby reagowała na powracający sygnał wyróżniający się z poziomu szumu tła. Dolna granica czułości dla długości fali 1064 nm odpowiada sygnałowi równemu około 250 fotonom energii [Ullrich, Pfenningbauer, 2016]. Powracające sygnały mają zwykle energię znacznie większą, odpowiadającą dziesiątkom tysięcy fotonów, stąd mówi się, że są to skanery wielofotonowe – MPL (Multi-Photon LiDAR).

Czas między emisją sygnału a jego powrotem jest podstawą pomiaru odległości (jak w impulsowym dalmierzu laserowym). Współpracujący z dalmierzem system pozycjonowania GPS mierzy trajektorię, a INS (inercyjny system nawigacyjny) – kąty nachylenia platformy skanującej, co pozwala określić dokładnie kierunek wysłanego impulsu. W połączeniu z odległością daje to współrzędne przestrzenne XYZ punktu terenowego, od którego nastąpiło odbicie. Efektem działania skanera jest więc tzw. chmura punktów przestrzennych XYZ pokrywających pas terenu wraz z obiektami „wystającymi” ponad teren.

Różne obiekty terenowe w różnym stopniu odbijają padającą na nie energię lasera, rejestracja wartości powracającej energii daje więc podstawę do tworzenia tzw. obrazu intensywności. Jeżeli impuls lasera pada na powierzchnię np. gruntu, asfaltu czy dachu, wówczas powraca (i jest rejestrowany) jeden impuls odbity, mówimy – jedno echo. Jeżeli jednak impuls pada na złożony przestrzennie obiekt, np. drzewo,



Rys. 1. Terenowy ślad punktów skanerowych: a) skaner z oscylującym lustrem, b) skaner z wirującym pryzmatem o posrebrzonych ścianach, c) skaner Palmera – stożkowy [Stoker, 2018]



Rys. 2. Penetracja roślinności przez promień laserowy:
 a) przejście promienia przez drzewo, wydzielenie w fali odbitej kilku dyskretnych echa i pełnego kształtu fali odbitej,
 b) analiza pełnego kształtu fali odbitej – FWF (dekompozycja Gaussa) [Mandlburger, 2019]

nastąpi kilka odbić: od góry korony, gałęzi i wreszcie od gruntu pod drzewem. Powracający sygnał ma bardziej złożoną formę, z której można wydzielić kilka odbić – echa (rys. 2a).

• Doskonalenie dotychczasowych rozwiązań

Bardziej zaawansowane LiDAR-y mogą rejestrować pełny kształt fali odbitej FWF (Full Waveform) i dopiero w procesie późniejszej obróbki pozwalają wydzielić „piki” fali odpowiadające kolejnym echom. Idąc jeszcze dalej, można wydzielić w złożonym powracającym sygnale szereg odbić, zwykle w kształcie krzywej Gaussa (rys. 2b). Każdą taką krzywą, stanowiącą ślad energii odbitej od kolejnych elementów, opisuje się parametrami – zwykle amplitudą i szerokością echa. Proces ten określa się mianem dekompozycji Gaussa. Ponieważ rejestracja pełnego kształtu fali mocno obciąża pamięć, stosuje się dekompozycję w czasie rzeczywistym (już w trakcie skanowania). Daje to bardzo bogaty materiał pomiarowy pozwalający rozpoznawać i charakteryzować naturę fizyczną obiektów. Mowa tu o klasyfikacji danych lidarowych (tj. wydzieleniu kilku

klas obiektów naziemnych) i możliwości prowadzenia dalszych złożonych analiz mających na celu rozpoznanie i charakterystykę obiektów naziemnych.

Innym trendem rozwoju systemów lidarowych jest dążenie do zwiększenia częstotliwości generowania impulsów (rys. 3). Wzrost częstotliwości skanera ma oczywisty pożądany skutek praktyczny: zwiększenie gęstości punktów laserowych (a więc ich użyteczności) lub wzrost wydajności skanowania przy założonej gęstości i wyższym pułapie lotu. Pewną barierę stanowi tu prędkość światła. Paradoksalnie udało się ją częściowo przewyżczyć: system może nie czekać na powrót sygnału odbitego i wysłać kolejny impuls. Tym samym w przestrzeni może „wędrować” z prędkością światła kilka impulsów jednocześnie – MPIA (Multi-pulse-in-the-air). Problem nieoznaczoności narzuca ograniczenia wzrostu częstotliwości lasera (system „musi wiedzieć”, który sygnał odbiera w danym momencie).

Podsumowując, systemy lidarowe wielofotonowe (LiDAR-y liniowe) są wprawdzie stosunkowo młodą techniką, bo liczącą nieco ponad 20 lat, ale już dojrzałą. Jej doskonałość przejawia się m.in.:

- dużą dokładnością geometryczną punktów chmury, szczególnie wysokościową,
- dużą precyzją (na płaskiej powierzchni rozrzut wysokości punktów chmury jest poniżej 5 cm),
- dużym zakresem możliwych gęstości chmur,
- detekcją złożonych przestrzennie obiektów (dzięki Full Waveform),
- penetracją roślinności,
- wysoką jakością pomiaru intensywności,
- możliwością klasyfikacji chmur punktów.

Za rozwojem samej techniki podąża rozwój metod opracowania i oprogramowanie. Można zaryzykować stwierdzenie, że skanery wielofotonowe, obecna klasyka, osiągnęły kres swoich możliwości i dalszego rozwoju. A zatem co dalej?

• Wkraczają nowe technologie

Skanery Geigera i skanery jednofotonowe to innowacyjne i być może przełomowe technologie w zakresie skanowania lotniczego. Środowisko geoinformacyjne dowiedziało się o nich zaledwie kilka lat temu, a przedmiotem liczniejszych publikacji są od roku 2016. Technika ta jest wprawdzie znana od ponad 15 lat, ale do niedawna tylko w sektorze wojskowym.

Skanery te są w fazie rozwoju. Rynek producentów jest jeszcze ubogi, właściwie można wymienić dwóch: firmę Harris IntelliEarth rozwijającą skaner Geigera (GmL) i firmę Sigma Space rozwijającą technologię skanera jednofotonowego (SPL). Tabela 1 na następnej stronie prezentuje zestawienie podstawowych parametrów obu tych nowych technologii oraz tradycyjnych skanerów wielofotonowych (MPL) [Jutzi, 2017]. Skaner jednofotonowy HRQLS-2, po niewielkich modyfikacjach, jest rozprowa-

Rys. 3. Trend wzrostu częstotliwości lasera w „tradycyjnych” skanerach oraz miejsce skanera jednofotonowego SPL100 [Musäus, 2019]

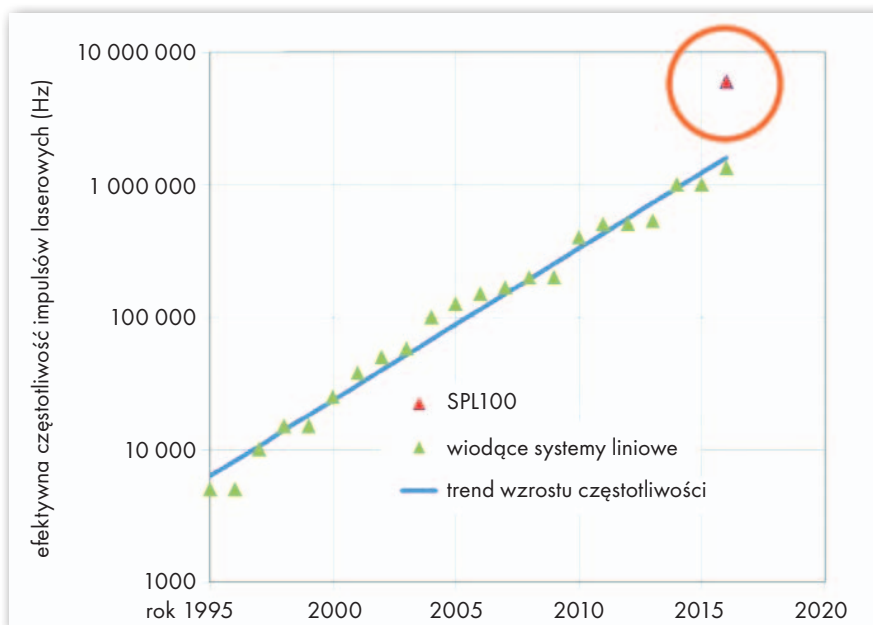
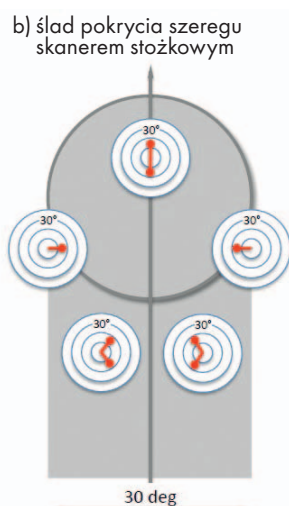
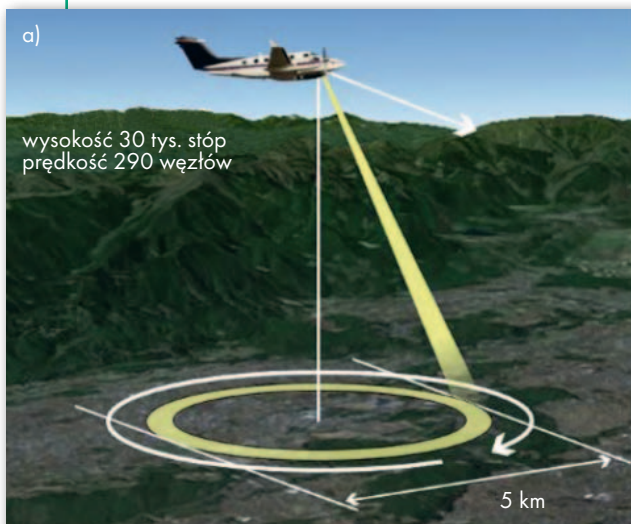


Tabela 1. Specyfikacja skanerów wielofotonowych (jako kombinacja specyfikacji różnych modeli), skanera Geigera (GmL) firmy Harris IntelliEarth i skanerów jednofotonowych HRQLS-1/HRQLS-2 firmy Sigma Space [Jutzi, 2017]

Typ	Multi-Photon LiDAR (MPL)	Geiger Mode LiDAR (GmL)	Single Photon LiDAR (SPL)
Technologia	Różne firmy	Harris IntelliEarth	Sigma Space
Nazwa instrumentu			HRQLS-1/HRQLS-2
Długość fali lasera	532/1064/1550 nm	1064 nm	532 nm
Szerokość impulsu laserowego	1-5 ns	0,55 ns	0,7/0,5 ns
Rozbieżność promienia lasera	0,25-1 mrad	ok. 5 mrad	ok. 0,2 mrad/ promień
Pole widzenia (FoV)	≤ 72°	30°	0-40/20, 30, 40 lub 60°
Elementy detektora	1-2 PIN/APD	128 x 32 = 4096 GmAPD	10 x 10 = 100 MCP-PMT
Minimalna detekcja powierzchni	250-1000 fotonów	8-10 fotonów	1 foton
Chwilowe pole widzenia	0,25-1 mrad	0,035 mrad	0,2 mrad
Czas reakcji (precyzja)	50-500 ps	250-500 ps	50-100 ps
Czas odnowy	nie dotyczy	typowo 50-1600 ns	1,6 ns
Częstotliwość impulsów laserowych	≤ 1000 kHz	50-60 kHz	25/60 kHz
Maksymalna wysokość lotu (AGL)	≤ 5000 m	≤ 11 000 m	≤ 5500 m
Pokrycie powierzchni przy gęstości 8 pkt/m ²	≤ 450 km ² /h	≤ 2100 km ² /h	≤ 808/2350 km ² /h

Tabela 2. Podstawowe parametry skanera SPL100 (Leica Geosystems)

Długość fali lasera	532 nm
Rozbieżność promienia lasera	0,08 mrad
Szerokość impulsu laserowego	0,4 ns
Częstotliwość impulsów laserowych	60 kHz (efektywnie 6 MHz)
Liczba rejestrowanych ech	do 10 odbić na kanał na jeden impuls laserowy wraz z intensywnością
Wysokość lotu	2000 - 4500 m
Częstotliwość skanowania	do 25 Hz (1500 razy/min)
Pole widzenia	20°, 30°, 40°, 60°
Gęstość punktów	typowo 20 pkt/m kw. z wys. 4000 m
Dokładność wysokościowa	< 10 cm
Masa	83,8 kg



dzany na rynku przez firmę Leica Geosystems jako SPL100 (szczegóły w tabeli 2). Ponadto warto wspomnieć o skanerze ICESat-2 – pierwszym instrumencie jednofotonowym pracującym w kosmosie.

Oba typy skanerów (GmL i SPL), choć istotnie się różnią, mają kilka cech wspólnych, odmiennych od tradycyjnych. Oba wykorzystują tzw. skaner Palmera. Promień laserowy kierowany jest na wirującą klinę, które odchylają go od linii pionu o stały kąt i obracają o 360°, zataczając stożek. W rezultacie ślad punktów laserowych na powierzchni terenu formuje okręgi przesuwające się w kierunku lotu samolotu (rys. 1c, 4a). Oznacza to, że promień laserowy pada zawsze pod tym samym kątem, zwykle 15°, a pas terenu jest obrazowany dwukrotnie: promieniem skierowanym do przodu i wstecz. Jeśli planuje się szeregi obrazowania

z pokryciem poprzecznym 50% (a tak się zwykle robi), to każdy obiekt terenowy jest obrazowany wokół, nie ma więc tzw. martwych pól (stref za przeszkodą, np. budynkiem, pozbawionych punktów laserowych) – rys. 4b.

Kolejną cechą odróżniającą nowe konstrukcje od klasycznych skanerów liniowych jest możliwość skanowania z dużych wysokości, z szybko lecącego samolotu. To istotnie zwiększa wydajność prac.

O ile w klasycznym skanerze mamy jedną diodę emitującą impuls laserowy i jedną diodę odbierającą sygnał odbity, to w nowych konstrukcjach mamy całą tablicę fotodiod, a w konsekwencji sto (dla SPL) lub kilka tysięcy (dla GmL) punktów laserowych zamiast jednego. To przekłada się na skokowy wzrost gęstości punktów laserowych lub wzrost obrazowanego obszaru przy tej samej gęstości. Kluczowe znaczenie ma tu optyczny układ odbiorczy skanera, a w tym szczególnie układ superczułych fotodiod.

• Skaner Geigera

GmL konstrukcji firmy Harris IntelliEarth pracuje w zakresie bliskiej pod-

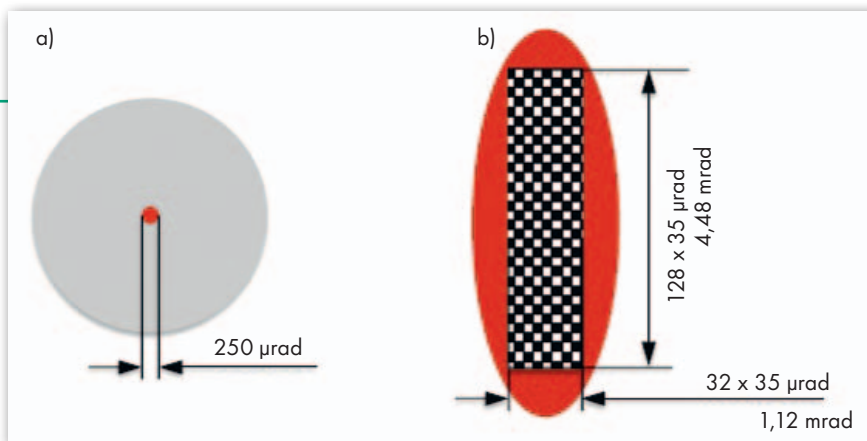
Rys. 4. Obrazowanie skanerem Palmera (stożkowym): a) widok ogólny [Romano, 2015], b) ślad pokrycia terenu pojedynczym szeregiem – czerwone strzałki wskazują kąt padania promienia lasera w różnych częściach szeregu [Ullrich, Pfennigbauer, 2016; Ullrich, 2016]

czerwieni (1064 nm). Kluczowy jest optyczny układ odbiorczy – mamy tu tablicę złożoną ze $128 \times 32 = 4096$ superczułych fotodiód lawinowych. Tak więc skaner jednym impulsem laserowym pokrywa efektywnie prostokątny obszar pod kątem $1,12 \times 4,48$ mrad (rys. 5b), a chwilowe pole widzenia pojedynczej fotodiody określające rozdzielczość przestrzenną skanera wynosi $0,035$ mrad. To o rząd wielkości lepiej niż w konstrukcjach tradycyjnych (patrz tabela 1). Bardzo duża jest też czułość fotodiód, każda reaguje na energię sygnału powracającego na poziomie 8-10 fotonów (to 2-3 rzędy wielkości mniej niż tradycyjnie).

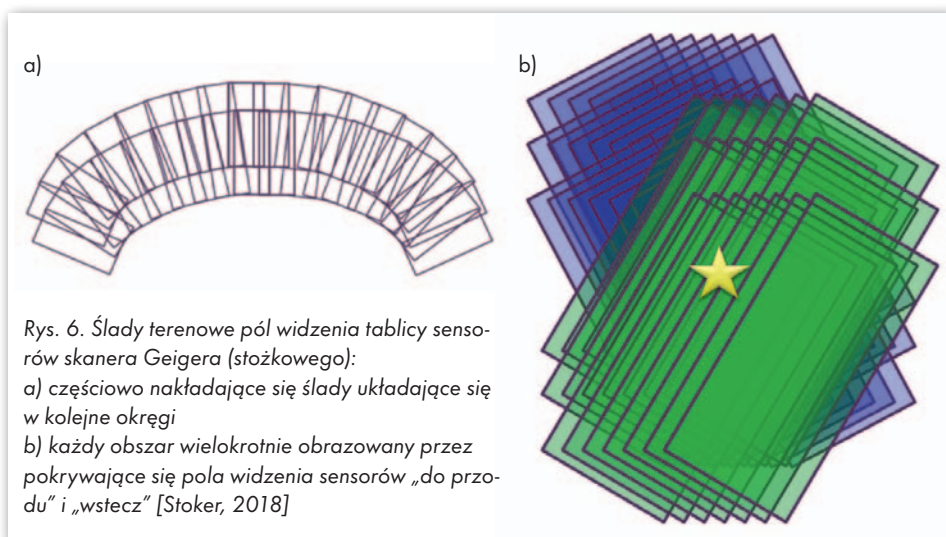
Stosunkowo duży obszar terenu pokryty jednym impulsem laserowym wraz z kołowym śladem kolejnych impulsów powoduje, że sąsiednie, prostokątne pola widzenia częściowo pokrywają się i układają w nakładające się okręgi. Jeśli dodać do tego (opisane wcześniej) obrazowanie „w przód” oraz „wstecz”, otrzymujemy sytuację, w której każdy element terenowy jest obrazowany wielokrotnie (rys. 6). To zwiększa wynikową gęstość punktów, poprawia detekcję obiektu i pozwala skutecznie filtrować znaczne zaszumienie źródłowej chmury.

Niestety, detektor (tablica fotodiód) ma istotne ograniczenia. Każda dioda „wyzwolona” przez przychodzące fotony światła przez krótki czas (rzędu 50-1600 ns, co odpowiada przebyciu przez światło drodze 7,5 cm – 240 m) nie może odbierać (rejestrować) kolejnych porcji energii [Jutzi, 2017]. W praktyce każda z fotodiód w danym cyklu (tj. dla każdego wysłanego impulsu laserowego) może zarejestrować tylko jeden pomiar (tylko „pierwsze echo”). Skutkiem jest ograniczona penetracja wegetacji – mamy liczne odbicia od góry koron drzew i nieliczne od gruntu. To oznacza dobry numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) i problemy z numerycznym modelem terenu (NMT) w obszarze zalesionym. Przewyciężyć to ograniczenie mają asynchroniczne zintegrowane obwody odczytowe – ROICs (Readout Integrated Circuits) umożliwiające rejestrację wielokrotną w każdym cyklu [Jutzi, 2017]. Wydaje się, że problem już rozwiązano – przykłady chmur punktów w obszarach zalesionych wskazują na detekcję gruntu.

Innym mankamentem jest brak możliwości bezpośredniego pomiaru radiometrii wynikający z binarnej charakterystyki detektora. Oznacza to w konsekwencji brak tzw. obrazu intensywności. Dostarczany jest pewien substytut. Wynika on jednak nie z jej pomiaru, lecz oszacowa-



Rys. 5. Ślady terenowe punktów laserowych: a) skaner tradycyjny - liniowy (śląd punktu laserowego na tle większego pola widzenia układu odbierającego), b) śląd pola widzenia matrycy diod APD skanera Geigera na tle większego ślądu promienia laserowego [Ullrich, 2016; Mandlbürger i inni, 2019]



Rys. 6. Ślady terenowe pól widzenia tablicy sensorów skanera Geigera (stożkowego): a) częściowo nakładające się ślady układające się w kolejne okręgi b) każdy obszar wielokrotnie obrazowany przez pokrywające się pola widzenia sensorów „do przodu” i „wstecz” [Stoker, 2018]

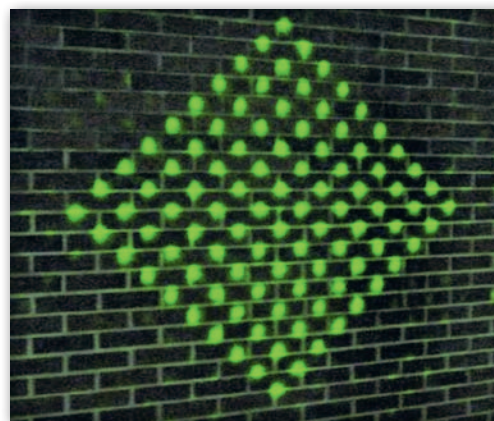
nia w procesie obróbki surowych danych na podstawie lokalnej gęstości punktów [Mandlbürger i inni, 2019].

Należy również dodać, że bardzo duża czułość fotodiód oznacza nie tylko same zalety. Fotodiody rejestrują odbicia zarówno od obiektu, jak i od atmosfery, szczególnie gdy skaner operuje na dużej wysokości (do 11 km) – tzw. szum solarne. Wynikowe chmury punktów są bardzo zaszumione i wymagają intensywnej wstępnej filtracji.

• Skaner jednofotonowy

Instrumenty HRQLS-1 i HRQLS-2 firmy Sigma Space (skanery jednofotonowe) wykorzystują laser zielony (532 nm). Krótki impuls laserowy jest rozszczepiany w pasywnym dyfrakcyjnym elemencie optycznym – DOE (Diffractive Optical Element) na $10 \times 10 = 100$ regularnie zorganizowanych promieni wychodzących ze skanera i oświetlających teren. Terenowy śląd tych promieni stanowi regularną siatkę punktów (rys. 7).

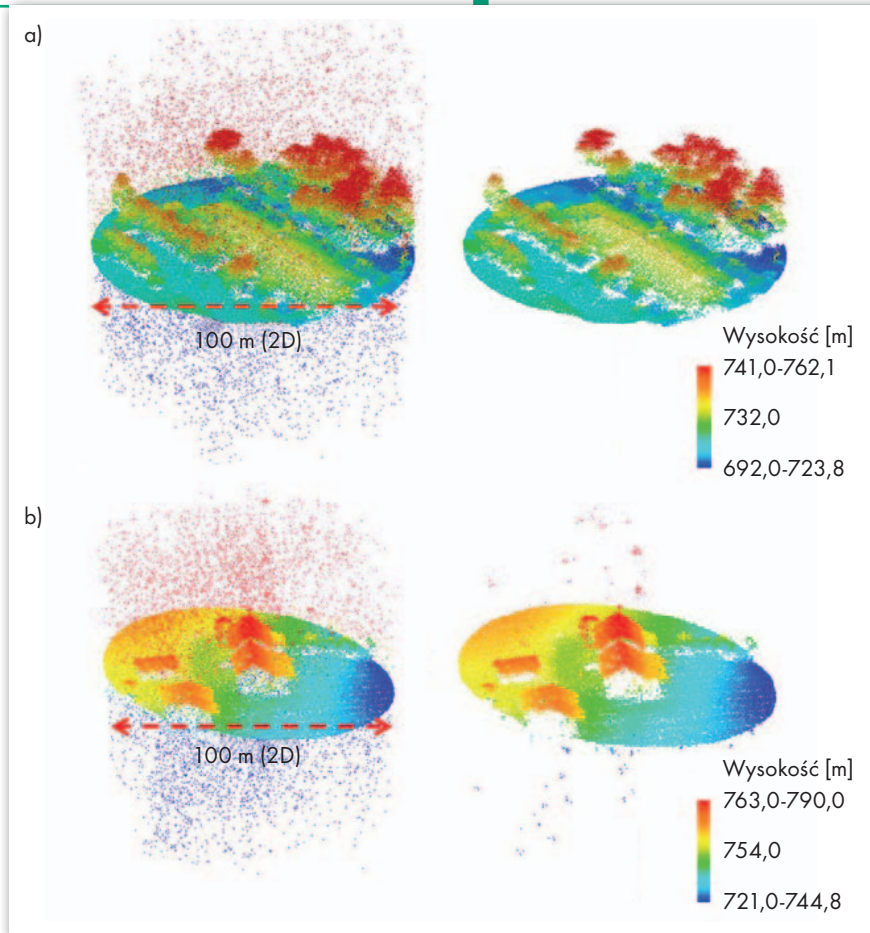
Optyczny układ odbiorczy również składa się z tablicy 10×10 fotodiód – MCP-PMT (Micro Canal Plate photomultiplier tubes). Każda fotodioda to rodzaj mikrorurki (określonej jako mikrokanał), która „widzi” i rejestruje od-



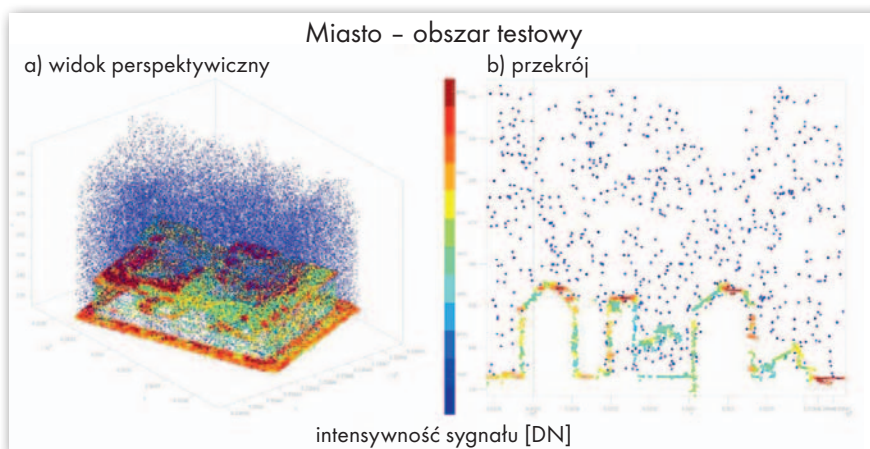
Rys. 7. Śląd promienia laserowego rozszczepionego przez pasywny dyfrakcyjny element optyczny - skaner jednofotonowy [Stoker, 2018]

bieraną energią od odpowiedniego ślądu terenowego układu „oświetlającego”.

To właściwości fotodiód (MCP-PMT) w pierwszej kolejności determinują użyteczne parametry skanera. Czas reakcji (Jitter time) mikrokanału jest niezmiernie krótki, rzędu 50-100 ps (co odpowiada drodze przebytej przez światło równej 0,75-1,5 cm!). Również tzw. czas odnowy (Recovery time), tj. czas gotowości fotodiody do przyjęcia kolejnej porcji energii, jest bardzo krótki (1,6 ns, co odpo-



Rys. 8. Chmury punktów przed i po wieloetapowej filtracji szumu: a) bardziej efektywna filtracja nad powierzchniami z niskim albedo, jak np. wegetacja, b) mniej efektywna nad powierzchniami z dużym albedo, jak np. jasne dachy budynków, widoczne pozostałości szumu [Stoker, 2018; Swatantran, 2016]



Rys. 9. Surowa chmura punktów w obszarze miejskim – kolorowanie intensywnością, skaner jednofotonowy SPL100: a) widok perspektywiczny, b) przekrój przez chmurę [Mandlbürger, 2019; Mandlbürger i inni, 2019]

wiada drodze 24 cm) [Jutzi, 2017]. Daje to możliwość rejestracji wielu odbić (ech) w jednym cyklu, a w konsekwencji – penetracji wegetacji i zbiorników wodnych.

Bardzo krótki czas odnowy mikrodiody i relatywnie krótki impuls lasera (szerokość impulsu to 0,5-0,7 ns) oznaczają, że mikrodioda jest „wzbudzana” przez pojedynczy foton energii, niezależnie od liczby fotonów, które dotarły. W konsekwencji trudno określić intensywność

sygnału powracającego. Występuje więc podobny problem jak w skanerze Geigera. Nie jest możliwa dyskretyzacja powracającego sygnału i analiza pełnego kształtu fali (FWF). W przeciwieństwie do skanera Geigera możliwy jest za to skumulowany pomiar intensywności przez detektor. Jakość i radiometryczna zdolność rozdzielcza tego pomiaru jest jednak niższa niż ma to miejsce w konwencjonalnych skanerach wielofotonowych [Mandlbürger

i inni, 2019]. Leica Geosystems donosi o postępach w zakresie oprogramowania generującego taki syntetyczny obraz intensywności [Roth, 2019].

Zostało powiedziane, że chmury punktów ze skanera Geigera są zaszumione. W przypadku skanera jednofotonowego sytuacja jest jeszcze mniej korzystna. Wynika to m.in. z tego, że:

- używany jest laser zielony, bardziej podatny na zakłócenia atmosferyczne,
- czułość skanera jest jeszcze wyższa (reaguje na pojedynczy foton światła), co oznacza więcej odbić w atmosferze.

Problemy te występują szczególnie podczas obrazowania w ciągu dnia, przy silnej radiacji słonecznej. Nocna pora byłaby pod tym względem lepsza.

• Filtracja chmur punktów

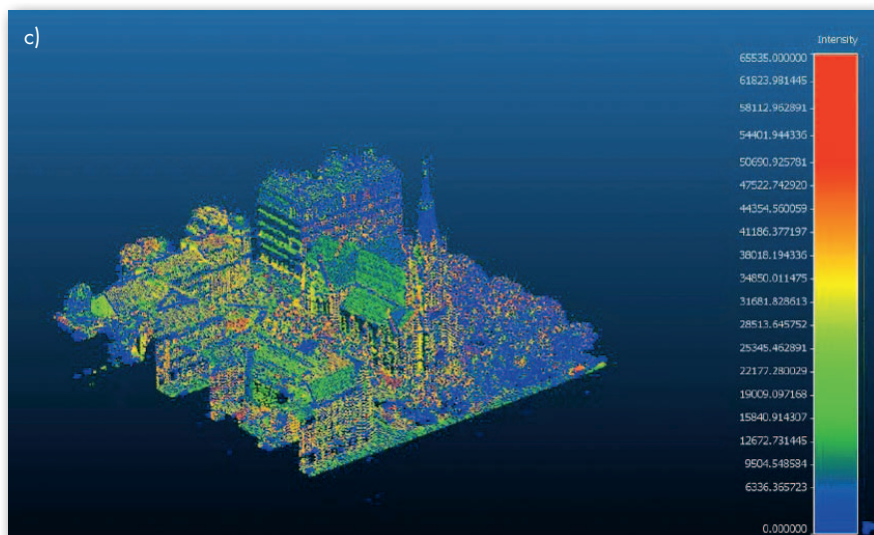
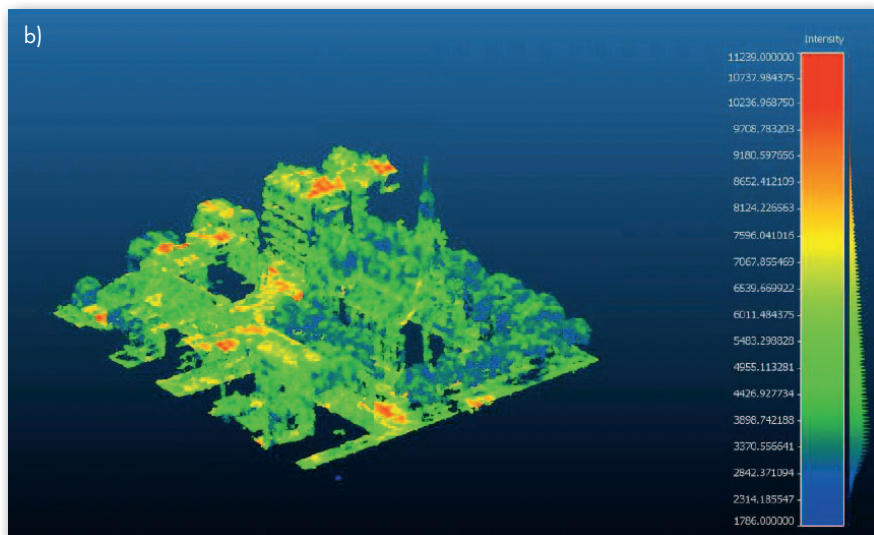
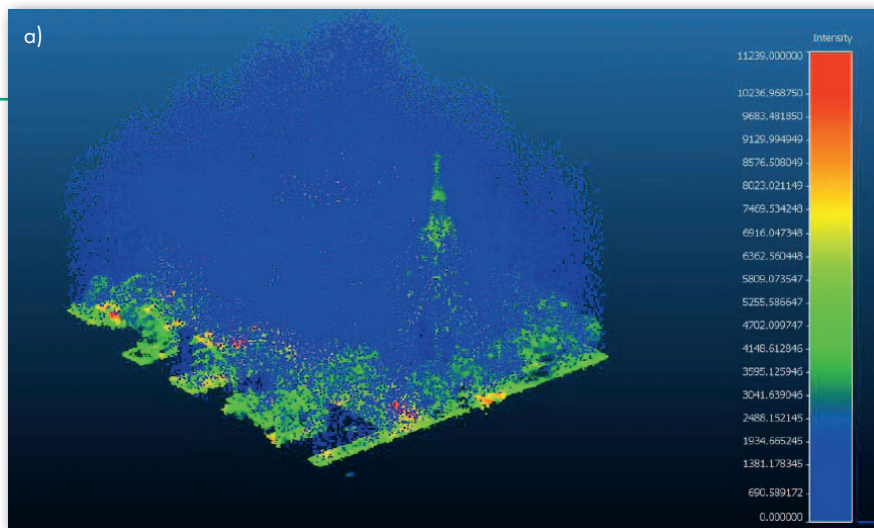
Opis działania systemów SPL i GmL wskazuje, że w wyniku ich pracy otrzymujemy ogromne zbiory danych. Każdy fragment terenu jest obrazowany wielokrotnie, co jest rezultatem działania skanera stożkowego. W skanerach typu GmL mamy do czynienia ze wzajemnym pokrywaniem się kolejnych pól widzenia układu optycznego skanera, a wynikowa chmura punktów powstaje poprzez agregację tych pól, występuje więc tzw. efekt wielokrotnego odwzorowania (Multi-look) – rys. 6. Surowe dane zawierają dodatkowo dużą liczbę fałszywych odbić (głównie od atmosfery) stanowiących szum. Ocenia się, że około 25% punktów w surowych danych to szum (rys. 8, 9, 10). Opracowanie danych stanowi więc poważne wyzwanie przekraczające możliwości „zwykłych” stacji roboczych używanych do obróbki danych tradycyjnego skaningu.

W procesie filtracji (odfiltrowanie szumu) stosuje się podejście wieloetapowe. Proces bazuje na dwóch założeniach:

- fałszywe odbicia stanowiące szum mają w przestrzeni 3D rozkład przypadkowy, w przeciwieństwie do odbić od obiektów, które grupują się w klastry,
- gęstość punktów szumu jest mniejsza od gęstości odbić od obiektów [Swatantran i inni, 2016].

Dlatego w pierwszym kroku przestrzeń dzielona jest na duże woksele (sześciiany) o boku 30 m. Woksele o największej gęstości punktów interpretowane są jako zawierające powierzchnię terenu i obiekty na nim położone. Dla uniknięcia pominięcia bierze się do dalszej analizy dodatkowo woksel powyżej i poniżej, łącznie więc wybiera się warstwę punktów o grubości 90 m.

W drugim kroku wydzieloną przestrzeń 3D dzieli się na mniejsze woksele, np. 5 m. Punkty w danym wokselu traktuje się jako szum, jeśli w otaczających go 27 wokse-



Rys. 10. Kolorowanie intensywnością chmur punktów: a) przed filtracją – skaner jednofotonowy SPL100, b) po filtracji – SPL100, c) skaner tradycyjny RIEGL VQ-1560i [Mandlbürger, 2019]

lech łączna liczba punktów jest mniejsza niż przyjęty próg (np. 30 punktów).

Trzeci krok jest podobny do drugiego, z tą różnicą, że woksele mają wymiar 1 m, a próg wynosi 2 punkty. Doświadczenie wskazuje, że duże woksele (30 m) skutecznie usuwają szum pochodzący z atmosfery, średnie (5 m) dobrze odfiltrowują szum między obiektami (np. między koronami drzew), a najmniejsze (1 m) odfiltrowują izolowane punkty na granicy

warstw. Taka wielopoziomowa filtracja szumów jest skuteczna szczególnie nad obszarami ciemniejszymi, jak lasy i pola uprawne. Pozostałość szumu jest zauważalna nad powierzchniami silnie odbijającymi, np. niektórymi dachami budynków (rys. 8b). Trwają intensywne prace w zakresie doskonalenia filtracji szumów.

Są już opisane pierwsze doświadczenia produkcyjne z wykorzystania lotniczych skanerów jednofotonowych i ska-

nerów Geigera. Duże firmy i organizacje branży geoinformacyjnej realizują pionierskie projekty obliczone bardziej na testowanie nowej technologii niż rutynową produkcję. Ale o tym w przyszłym wydaniu GEODETY.

prof. Zdzisław Kurczyński
Politechnika Warszawska

Problematykę najnowszych skanerów autor przedstawi także na Forum Użytkowników LiDAR – POLSCAN (więcej na s. 59)

Literatura

- Bernard C. i inni, 2019: Investigation into the Potential of Single Photon Airborne Laser Scanning Technology, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, ISPRS Geospatial Week, Enschede, The Netherlands, <https://www.gsw2019.org>;
- Higgins S., 2017: The Future of Aerial LiDAR, International LiDAR Mapping Forum, Denver, CO;
- John J. Degnan J.J., 2018: Airborne and Spaceborne Single Photon 3D Imaging LiDARs, 21st IIRS Workshop, Canberra, Australia;
- Jutzi B., 2017: Less Photons for More LiDAR? A Review from Multi-Photon Detection to Single Photon Detection, Photogrammetric Week, Stuttgart;
- Leica Geosystems AG, Leica SPL100, www.leica-geosystems.com;
- Leusink J., 2019: SPL compared to traditional and other high performance laser systems, Single Photon and Geiger Mode LiDAR Workshop, Barcelona, Spain, <http://www.eurosd.net>;
- Mandlbürger G. i inni, 2019: A Comparison of Single Photon and Fullwaveform LiDAR, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-2/W5, ISPRS Geospatial Week, Enschede, The Netherlands, <https://www.gsw2019.org>;
- Mandlbürger G., 2019: Single Photon vs Full Waveform LiDAR – technological differences and point cloud properties, Single Photon and Geiger Mode LiDAR Workshop, Barcelona, Spain, <http://www.eurosd.net>;
- Musäus S., 2019: The SPL 100 in Europe, Single Photon and Geiger Mode LiDAR Workshop, Barcelona, Spain, <http://www.eurosd.net>;
- Romano M.E., 2015: Commercial Geiger Mode LiDAR, ASPRS, www.asprs.org;
- Roth R., 2019: Update: SPL100 LiDAR, software for filtering/quality control, Single Photon and Geiger Mode LiDAR Workshop, Barcelona, Spain, <http://www.eurosd.net>;
- Sirota J.M.: Single Photon LiDAR, www.sigmaspace.com;
- Stoker J., 2018: Evaluation of Single Photon and Geiger-mode LiDAR, HRT workshop;
- Swatantran A. i inni, 2016: Rapid, High-Resolution Forest Structure and Terrain Mapping over Large Areas using Single Photon LiDAR, Scientific Reports, 6:28277;
- Ullrich A., Pfennigbauer M., 2016: Linear LiDAR versus Geiger-mode LiDAR: impact on data properties and data quality, Laser Radar Technology and Applications XXI. Proc. of SPIE Vol. 9832, 983204;
- Ullrich A., 2016: Linear LiDAR versus Geiger-mode LiDAR: data properties and data quality. EuroCOW, Lausanne, Switzerland;
- Wästlund A., 2019: Single photon LiDAR in forestry applications, Single Photon and Geiger Mode LiDAR Workshop, Barcelona, Spain, <http://www.eurosd.net>.