

**OCENA DOKŁADNOŚCI DANYCH LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO
SYSTEMU SCALARS**

**THE ACCURACY OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA RECEIVED FROM
THE SCALARS SYSTEM**

Piotr Gołuch, Andrzej Borkowski, Grzegorz Józków

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: lotniczy skaningu laserowy, system ScaLARS, NMT

STRESZCZENIE: Dokładność NMT interpolowanych na podstawie danych skanowania laserowego zależy w głównej mierze od dokładności danych źródłowych, jak również od zastosowanej metody filtracji tych danych i metody interpolacji. Na dokładność źródłowych danych lotniczego skaningu laserowego wpływa wiele czynników, między innymi stabilność nalotu fotogrametrycznego, jakość danych nawigacyjnych, dokładność kalibracji, terenowa wielkość śladu plamki promienia lasera (wysokości lotu i zbieżności wiązki), ukształtowanie terenu oraz pokrycie terenu. Wpływ poszczególnych czynników trudno jest rozdzielić i dlatego należy rozpatrywać ich ogólny wpływ na dokładność produktu końcowego. W pracy przedstawiono ocenę dokładności wysokościowej danych zarejestrowanych prototypowym skanerem ScaLARS. Skaningu laserowego zrealizowano dla 20 kilometrowego odcinka doliny rzeki Widawy. Rejestrację sygnałów z INS i GPS przeprowadzono przy użyciu systemu Applanix POS/AV 510. Skanowanie zrealizowano z pokładu samolotu AN-2, z wysokości 550 m. Terenowa wielkość śladu plamki lasera wyniosła około 0.6 m. Badanie dokładności danych skaningu przeprowadzono w oparciu o punkty pozyskane z bezpośredniego pomiaru terenowego technikami GPS i tachimetryczną. Pomiary przeprowadzono na czterech reprezentatywnych obszarach obiektu badawczego (razem 10 obszarów testowych o zróżnicowanym pokryciu terenu). Uzyskano dokładności wysokościowe rzędu: a) tereny zalesione i zadrzewione – obszary o bardzo zróżnicowanym ukształtowaniu pionowym – 0.40 m, b) teren wzdłuż koryta rzeki, z wysoką trawą i zaroślami – 0.40 m, c) tereny użytkowane rolniczo (pola orne, łąki, pastwiska) – generalnie obszary płaskie - 0.25 m, d) drogi asfaltowe, brukowe i gruntowe – 0.20 m.

1. WSTĘP

Lotniczy skaningu laserowy staje się w ostatnich latach coraz częściej dominującą technologią pozyskiwania danych do budowy Numerycznych Modeli Terenu (NMT) oraz Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu. Dokładność budowanych NMT zależy w głównej mierze od dokładności danych źródłowych, które stanowią podstawę budowy tych modeli, jak również od zastosowanej metody filtracji danych i metody interpolacji. Na dokładność źródłowych danych lotniczego skaningu laserowego wpływa wiele czynników, między innymi stabilność nalotu fotogrametrycznego, jakość danych nawigacyjnych, dokładność kalibracji, wielkość śladu plamki promienia lasera (wysokości lotu i zbieżności wiązki) na powierzchni terenu, ukształtowanie terenu oraz pokrycie terenu. Wpływ poszczególnych

czynników trudno jest rozdzielić i dlatego należy rozpatrywać ich ogólny wpływ na dokładność produktu końcowego.

Przedmiotem oceny dokładności w niniejszej pracy są dane lotniczego skanowania laserowego pozyskane za pomocą nietypowego systemu ScaLARS, dla którego tego rodzaju ocena terenowa nie była dotąd prowadzona. Najpierw przedstawiona zostanie jednak krótka charakterystyka systemu z naciskiem na elementy odróżniające rozpatrywany system od rozwiązań komercyjnych, a mających istotny wpływ na ostateczną dokładność pozyskanych danych terenowych.

2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU SCALARS

Skaner laserowy ScaLARS jest konstrukcją prototypową, powstałą w Instytucie Nawigacji Uniwersytetu w Stuttgarcie. Szereg szczegółów technicznych skanera podano między innymi w pracach: (Wehr i Lohr, 1999), (Schiele, 2005), (Borkowski *et al.*, 2006a, 2006b). Podstawowe, istotne z punktu widzenia dokładności, parametry techniczne zestawiono w tabeli (Tab 1).

Tab 1. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych skanera ScaLARS

Parametr	Wartość
Długość fali	810 nm (IR)
Częstotliwość modulacji fali	10 MHz, 1 MHz
Maksymalny zasięg pomiaru	~ 750 m
RMS (95%)	0.03 m .. 0.16 m
Zbieżność wiązki	1 mrad
Częstotliwość próbkowania	7,69 kHz
Częstotliwość obrotu lustra	20 Hz
Pole widzenia (FOV)	28° lub 40°

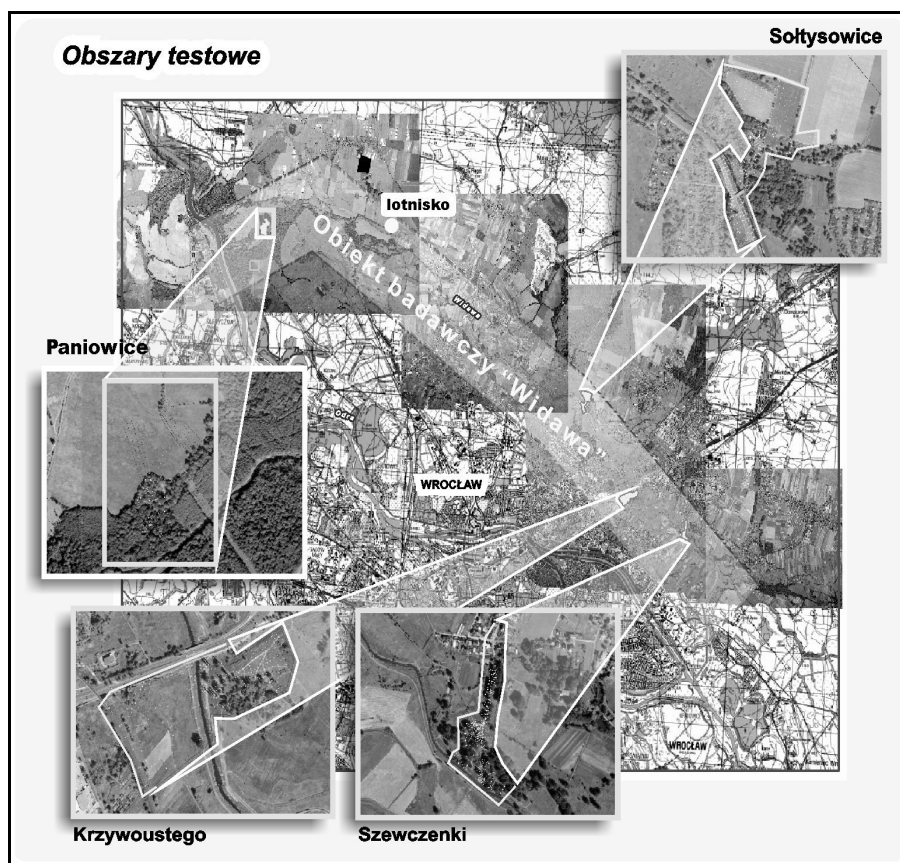
Podstawową cechą odróżniającą omawiany system jest sposób pomiaru odległości. W odróżnieniu od systemów komercyjnych, które bazują na impulsowym pomiarze odległości, ScaLARS wykorzystuje technologię *Continuous Wave* (CW), czyli pomiar fazowy w sposób podobny do tego jaki od lat wykorzystywany jest w instrumentach geodezyjnych. Fala nośna o długości $\lambda_T=810$ nm modulowana jest za pomocą dwóch sygnałów o długości $\lambda_1=150$ m i $\lambda_2=15$ m. Konsekwencją takiego rozwiązania jest brak możliwości rejestracji wielu odbić dla pojedynczego punktu. Ponadto część sygnału odbita od obiektów ponad powierzchnią terenu może pogorszyć dokładność punktu na powierzchni terenu. Aby temu zapobiec stosowane są, na etapie obliczania odległości, algorytmy uśredniania i eliminacji błędów grubych.

Emitowany promień lasera odchylany jest za pomocą lustra nutacyjnego. W złożeniu z ruchem samolotu daje to efekt taki, że rejestrowane punkty ułożone są wzdłuż przesuwanej się po powierzchni ziemi elipsy. Zastosowanie takiego sposobu pomiaru daje

jednolitą dokładność dla wszystkich punktów, w przeciwieństwie do systemów skanujących na przykład wahadłowo. Ponadto te same fragmenty powierzchni terenu (te same obiekty) skanowane są dwukrotnie, w przód i wstecz względem kierunku lotu. Fakt ten wykorzystywany jest do podniesienia dokładności i efektywności kalibracji.

3. OBIEKT BADAWCZY I OBSZARY TESTOWE

Ocenę dokładności danych lotniczego skaningu laserowego ScaLARS przeprowadzono na obiekcie badawczym „Widawa” (Borkowski *at al.*, 2006a). Jest to obszar leżący na północ od Wrocławia, obejmujący swoim zasięgiem ok. 40 km² doliny rzeki Widawy (Rys. 1).



Rys. 1. Obiekt badawczy „Widawa” z zaznaczonymi obszarami testowymi

Skaning laserowy został wykonany z użyciem systemu ScaLARS w listopadzie 2005 r. z pokładu samolotu AN-2, z wysokości 550 m. Obiekt (dolina rzeki) posiada szerokość około 2 km, dlatego wykonano skanowanie w 11 pasach – szerokość pasa skanowania w terenie wyniosła ok. 280m, natomiast wzajemne pokrycie pasów skanowania 30%.

Pewnym kryterium oceny jakości zrealizowanego skanowania jest brak pustych obszarów (*gaps*) pomiędzy poszczególnymi pasami skanowania. Świadczy to o tym, że projekt został wykonany i zrealizowany poprawnie, dzięki wykorzystaniu stabilnego samolotu, nawigowanego za pomocą GPS oraz precyzji i doświadczeniu pilota.

Kalibrację wyników skanowania laserowego przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania LASCAL (Schiele *et al.*, 2005). Parametry kalibracji wewnętrznej skanera oraz parametry kalibracji wyników pomiaru w układzie lokalnym w odniesieniu do pól kontrolnych (kalibracyjnych) pomierzonych techniką GPS podano w pracach (Borkowski *et al.*, 1996a, 1996b). W tabeli (Tab 2) przytoczono ostateczne wartości charakteryzujące dokładność kalibracji.

Tab 2. Zestawienie parametrów dokładności kalibracji względem pól kontrolnych.

	wzdłuż kierunku lotu	poprzecznie do kierunku lotu	składowa wysokościowa
Obliczone odchyłki	± 0.6 m	± 0.4 m	± 0.15 m
Błąd bezwzględny (średnia wartość)	0.3 m	0.3 m	0.1 m

Na obiekcie badawczym wybrano cztery reprezentatywne obszary testowe (Rys. 1) (Paniowice, Sołtysiwice, Krzywoustego i Szewczenki – nazwy pochodzą od nazw osiedli bądź ulic, w okolicach których te obszary się znajdują) o zróżnicowanym pokryciu terenu. Obszary te zlokalizowane są na dwóch końcach obiektu badawczego oraz w jego części środkowej, w znacznej odległości od płyty lotniska, względem której wykonana była podczas pomiarów kalibracja systemu.

Łącznie na obszarach testowych pomierzono 1728 punktów. Pomiar przeprowadzono bezpośrednio w terenie, wykorzystując technikę pomiaru GPS-RTK i metodę tachimetryczną. Dolina rzeczna charakteryzuje się dużą różnorodnością ukształtowania i pokrycia terenu. Analizę przeprowadzono dla czterech kategorii terenu:

- las i zadrzewienia – teren o bardzo urozmaiconym ukształtowaniu, z licznymi lokalnymi obniżeniami i oczkami wodnymi;
- teren odkryty – jest to obszar wzdłuż koryta rzeki, poza lasami, porośnięty zaroślami i bardzo wysoką trawą, z licznymi skarpmi;
- łąki i pola orne – teren użytkowany rolniczo, generalnie obszar płaski; do tej kategorii włączono również pastwiska i nieużytki ze średnio wysoką trawą (wysokość ok. 40-60 cm);
- drogi – są to drogi gruntowe, brukowe i asfaltowe, wzdłuż tych dróg często występują drzewa i zarośla, także są rowy i nieduże skarpy.

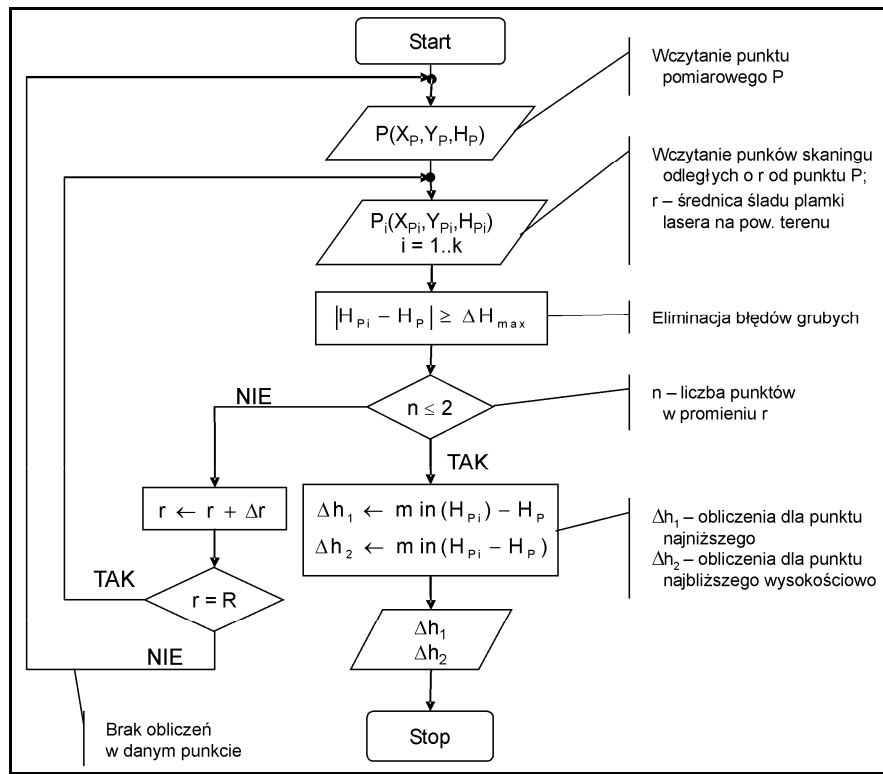
4. SCHEMAT OBLICZEŃ I WYNIKI

Określenie błędu wysokości polegało na obliczeniu różnicy wysokości pomiędzy punktami skaningu a punktami pomierzonymi bezpośrednio w terenie. Te ostatnie przyjęto jako punkty bezbłędne. Zasadniczym problemem w takim postępowaniu jest wybór punktu skaningu odpowiadającego punktowi bezbłędnemu. Przyczynia się do tego fakt, że ślad plamki lasera na powierzchni terenu wynosi około 0.6 m. Postanowiono zatem wybrać punkt z pewnego większego otoczenia punktu bezbłędnego. Otoczenie wybierane było jako okrąg, dla którego można założyć, że wszystkie znajdujące się wewnątrz niego punkty terenowe mają taką samą wysokość. W zbiorze punktów skaningu z każdego otoczenia konieczne było przeprowadzenie zgrubnej filtracji w celu eliminacji punktów nie będących odbiciami wiązki lasera od powierzchni terenu. Najniżej położony punkt skaningu wybierany był jako odpowiednik punktu bezbłędnego (wariant I obliczeń). Ze względu na szorstkość terenu nie zawsze punkt najniższy jest punktem charakteryzującym wysokość terenu w danym otoczeniu, postanowiono zatem jako odpowiednik punktu bezbłędnego wybrać również punkt skaningu najbardziej wysokościowo zbliżony do punktu bezbłędnego (wariant II obliczeń). To drugie podejście jest swego rodzaju kontrolą obliczeń wykonanych w wariantie I. Dzięki takiemu podejściu wyznaczone zostały dwie wartości Δh_1 i Δh_2 (Rys. 2) będące różnicami wysokości pomiędzy odpowiednio punktem najniższym a punktem bezbłędnym oraz punktem najbliższym wysokościowo a punktem bezbłędnym. Wartości te świadczą o dokładności określenia wysokości punktów skaningu. W większości przypadków ten sam punkt okazywał się być punktem najniższym i najbliższym wysokościowo.

Sposób wyznaczenia błędu wysokości pojedynczego punktu przedstawiono schematycznie na rysunku (Rys. 2). Początkowa wartość promienia r wybierana jest jako średnica śladu plamki lasera na powierzchni terenu. Następnie wybierane są punkty skaningu zawarte w otoczeniu r . Dla podzbioru tego przeprowadzana jest zgrubna filtracja poprzez eliminację punktów, dla których wysokość odbiega od wysokości punktu bezbłędnego o więcej niż ΔH_{\max} . Wartość ΔH_{\max} wybierana jest dla każdego z typów terenu oddzielnie ze względu na występujące na każdym z typów pokrycie o różnych wysokościach (największe w lasach, najmniejsze na drogach). Aby zminimalizować możliwości zakwalifikowania punktu nie należącego do powierzchni terenu jako punktu terenowego założono, że podzbiór w promieniu r musi zawierać minimum 2 punkty. Jeśli liczebność była mniejsza, wówczas zwiększany był promień poszukiwania r o wartość Δr . Ustalono również dla każdego z typów terenu graniczną wartość R promienia otoczenia punktu bezbłędnego, dla której można uznać, że punkty terenu w takim otoczeniu mają taką samą wysokość. W przypadku, jeśli dla granicznej wartości R w otoczeniu punktu bezbłędnego było mniej niż 2 punkty wówczas taki punkt nie był uwzględniany w dalszych obliczeniach. Sytuacja taka zdarzała się najczęściej w lasach i świadczyła o tym, że wszystkie punkty w otoczeniu rozpatrywanego punktu są odbiciami od pokrycia terenu.

Jeżeli natomiast uzyskano otoczenie o liczebności minimum 2 punkty wówczas wybierane były punkt najniższy i punkt najbliższy wysokościowo względem punktu bezbłędnego oraz obliczane były wartości residuów Δh_1 , Δh_2 . Jako miarę dokładności określenia wysokości punktów skaningu przyjęto błąd średni obliczony ze wszystkich

wartości Δh_1 , Δh_2 uzyskanych dla punktów pomierzonych bezpośrednio dla każdej kategorii terenu.



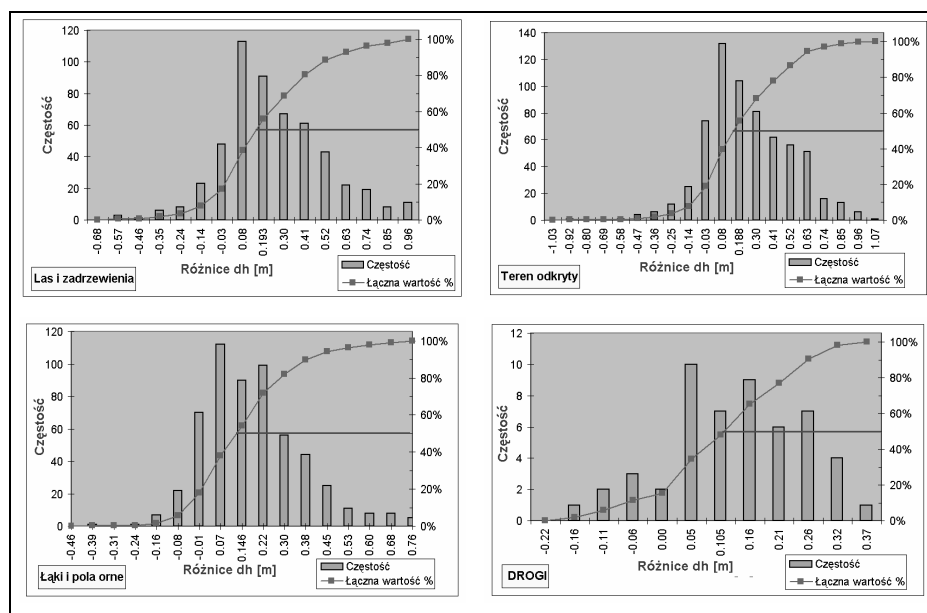
Rys. 2. Schemat określenie błędu wysokości dla pojedynczego punktu

Według schematu przedstawionego na rysunku (Rys. 2) wykonano obliczenia dla 1728 punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie. W tabeli (Tab 3) przedstawione zostały statystyczne charakterystyki opisowe różnic wysokości dla każdej kategorii terenu sumarycznie i w rozbiciu na poszczególne obszary testowe.

Dodatkowo, dla sumarycznych zestawień różnic wysokości otrzymanych w II wariancie obliczeń (punkty „najbliższe wysokościowo”), wykonane zostały histogramy (Rys. 3) i wykresy wartości skumulowanych odchyłek pomiędzy wartościami wysokości ze skaningu a wysokościami punktów pomierzonych w terenie, które przyjęto jako bezbłędne. Analizując wartości zestawione w tabeli należy stwierdzić, że dokładności wyznaczenia wysokości wynoszą od 0.16 do 0.45m, w zależności od kategorii terenu i obszaru testowego. Dokładności te należy uznać za dobre, zwłaszcza na terenach zalesionych.

Otrzymane wartości dla dróg pokrywają się z dokładnością oszacowaną na podstawie mapy zasadniczej w oparciu o wysokości armatury naziemnej sieci uzbrojenia terenu (Borkowski et al., 2006a). Analiza histogramów przedstawionych na rysunku (Rys. 3) oraz wartości zestawione w tabeli (np. wartość średnia, mediana) prowadzi do wniosku, że pomiędzy danymi pomierzonymi a danymi otrzymanymi ze skaningu laserowego występuje pewne przesunięcie, pewien błąd systematyczny na poziomie kilkunastu centymetrów. Punkty skaningu laserowego leżą nieznacznie powyżej rzeczywistej powierzchni terenu. Defekt ten jest znany i podawany w literaturze. Wynika on głównie z szorstkości powierzchni terenu oraz częściowo ze specyfiki metody.

Ponieważ przedmiotem zainteresowania były różnice wysokości, podane oszacowania błędów nie są obciążone ewentualnymi błędami wyznaczenia quasigeoidy na danym obszarze.



Rys. 3. Histogramy i wartości skumulowane odchyłek wysokości

Tab 3. Zestawienie wyników obliczeń w rozbiciu na kategorie terenu i obszary testowe.

		Wariant obliczeń					
		„minimalna wysokość”	„najbliższa wysokość”				
			OBSZARY TESTOWE				
			RAZEM	RAZEM	Krzywoustego	Sołtysowice	Paniowice
LAS i zadrzewienia							
Średnia Δh	[m]	0.11	0.19	0.18	0.33	0.26	0.17
Min Δh	[m]	-1.09	-0.58	-0.58	-0.30	-0.58	-0.57
Max Δh	[m]	0.92	0.92	0.73	0.91	0.90	0.92
Mediana Δh	[m]	0.15	0.16	0.17	0.32	0.25	0.13
Średnia wartość bezwzględna Δh	[m]	0.31	0.25	0.27	0.36	0.32	0.22
Błąd średni - m_0	[m]	0.39	0.33	0.34	0.45	0.39	0.30
Liczebność		524	60	29	65	370	
TEREN ODKRYTY (skarpy i zarośla)							
Średnia Δh	[m]	0.10	0.19	0.29	0.15		
Min Δh	[m]	-1.00	-0.97	-0.42	-0.97		
Max Δh	[m]	0.97	0.97	0.93	0.97		
Mediana Δh	[m]	0.14	0.15	0.27	0.11		
Średnia wartość bezwzględna Δh	[m]	0.32	0.25	0.32	0.22		
Błąd średni - m_0	[m]	0.40	0.33	0.39	0.30		
Liczebność		645	191	454			
ŁĄKI i pola orne							
Średnia Δh	[m]	0.11	0.15	0.22	0.09	0.13	
Min Δh	[m]	-0.56	-0.41	-0.20	-0.41	-0.23	
Max Δh	[m]	0.74	0.74	0.74	0.66	0.74	
Mediana Δh	[m]	0.11	0.12	0.18	0.06	0.11	
Średnia wartość bezwzględna Δh	[m]	0.19	0.17	0.23	0.13	0.16	
Błąd średni - m_0	[m]	0.24	0.23	0.29	0.18	0.21	
Liczebność		559	166	137	256		
DROGI asfaltowe, brukowe i gruntowe							
Średnia Δh	[m]	0.08	0.10				
Min Δh	[m]	-0.35	-0.20				
Max Δh	[m]	0.32	0.32				
Mediana Δh	[m]	0.09	0.11				
Średnia wartość bezwzględna Δh	[m]	0.15	0.13				
Błąd średni - m_0	[m]	0.18	0.16				
Liczebność		52					
OGÓŁEM							
Średnia Δh	[m]	0.11	0.18				
Min Δh	[m]	-1.09	-0.97				
Max Δh	[m]	0.97	0.97				
Mediana Δh	[m]	0.13	0.14				
Średnia wartość bezwzględna Δh	[m]	0.28	0.22				
Błąd średni - m_0	[m]	0.35	0.30				
Liczebność		1728					

5. PODSUMOWANIE

Na dokładność danych lotniczego skaningu laserowego wpływa szereg czynników. O ostatecznej dokładności decyduje zastosowany sprzęt, warunki pomiaru (nalotu) oraz jakość (dokładność) kalibracji. Wpływ poszczególnych czynników na dokładność wyników skanowania trudno jest wydzielić. Ostateczną dokładność danych można oszacować tylko poprzez ich porównanie z wynikami bezpośrednich pomiarów terenowych.

Na podstawie przeprowadzonych, w oparciu o bezpośrednie pomiary terenowe, analiz można stwierdzić, że dokładność wyznaczenia wysokości danych punktowych lotniczego skanowania laserowego, zrealizowanego prototypowym systemem ScaLARS, porównywalna jest z komercyjnymi systemami impulsowymi. Dla poszczególnych kategorii terenu należy się spodziewać dokładności rzędu:

- w terenie zalesionym i zadrzewionym – obszary o bardzo zróżnicowanym ukształtowaniu terenu – 0.40 m;
- w terenie wzdłuż koryta rzeki, z bardzo wysoką trawą i zaroślami – 0.40 m;
- w terenie użytkowanym rolniczo (pola orne, łąki, pastwiska) – generalnie obszary płaskie - 0.25 m;
- drogi asfaltowe, brukowe i gruntowe – 0.20 m.

Biorąc pod uwagę specyfikę terenu, na którym przeprowadzono badania, należy uzyskane wyniki ocenić jako dobre.

6. LITERATURA

Borkowski A., Gołuch P., Wehr A., 2006a. Rejestracja doliny rzeki Widawy z wykorzystaniem lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16., s. 53-62.

Borkowski A., Gołuch P., Wehr A., Schiele O., Thomas M., 2006b. Airborne laser scanning for the purpose of hydrodynamic modelling of Widawa river valley. Reports on Geodesy, No 2(77), pp. 85-94.

Schiele O. 2005. Ein operationelles Kalibrierverfahren für das flugzeuggetragene Laserscannersystem ScaLARS. DGK, Rehe C, Nr 592.

Schiele, O., Wehr, A., Kleusberg, A., 2005, Operational Calibration of Airborne Laserscanners by Using LASCAL. *Proc. Optical 3-D Measurement Techniques*, vol. 1, Vienna Oct. 3-5, pp. 81-89.

Wehr A., Lohr U., 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, pp. 68-82

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy nr 4T12E01729. Obliczenia wykonano w systemie MATLAB, licencja nr 101979, grant obliczeniowy Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego

THE ACCURACY OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA RECEIVED FROM THE SCALARS SYSTEM

KEY WORDS: airborne laser scanning, ScaLARS system, DTM

SUMMARY: The accuracy of DTMs interpolated based on laser scanning data depends mainly on the accuracy of original data, filtering and interpolation method. There are many factors that influence the accuracy of original data, namely the stability of photogrammetric flight, quality of navigation data, accuracy of calibration, size of the footprint on the ground (flight height and beam convergence), landscape and land cover. It is difficult to separate the influence of each factor, therefore the total impact of all factors on the final product should be taken into consideration. In this work, the evaluation of height accuracy of data acquired by prototypical scanner ScaLARS was presented. Laser scanning was performed for 20-kilometer section of Widawa river valley. Registration of INS and GPS signals was carried out using Applanix POS/AV 510 system. Scanning was performed from airplane AN-2 at flight height 550 m. Terrain size of footprint was about 0.6 m. The study of scanning data accuracy was executed based on points obtained from direct terrain measurements using GPS and tachometry techniques. From the 20-kilometer section, four representative areas were selected. In those areas, there were ten testing fields of miscellaneous land cover. The height accuracy results obtained were as follows: a) forestry terrains – areas of considerable height differences – 0.40 m, b) terrain along river bed with high grass and bush – 0.40 m, c) agricultural terrain (arable fields, meadows, pastures) – mainly flat terrain – 0.25 m, d) tarmac, cobblestone and gravel roads – 0.20 m.

Dr inż. Piotr Gołuch
e-mail: goluch@kgf.ar.wroc.pl
telefon: 71-3205693

Dr hab. inż. Andrzej Borkowski, prof. nadzw.
e-mail: borkowski@kgf.ar.wroc.pl
telefon: 71-3205609

Mgr inż. Grzegorz Jóźków
e-mail: jozkow@kgf.ar.wroc.pl
telefon: +71 3201951
fax: +71 3205617