



## Metoda korekcji charakterystyk odbiciowych wybranych materiałów naturalnych i sztucznych w skanerze laserowym średniego zasięgu

MIROŚŁAWA SZOPA, MAREK ZYGMUNT, JADWIGA MIERCZYK

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W artykule została zaprezentowana analiza charakterystyk odbiciowych wybranych materiałów pod kątem możliwości opracowania systemu skanowania laserowego do zdalnego wykrywania i charakteryzacji substancji, powierzchni oraz obiektów. Przedstawiono wyniki analiz literaturowych oraz badań własnych charakterystyk odbiciowych wybranych materiałów. Analiza została przeprowadzona dla wybranych trzech długości fal promieniowania elektromagnetycznego:  $\lambda_1 = 850$  nm,  $\lambda_2 = 900$  nm,  $\lambda_3 = 1500$  nm, w odniesieniu zarówno do materiałów naturalnych, jak i sztucznych. Rozpatrzono wpływ ekstynkcji atmosfery na stosunki sygnałów dla wybranych długości fal promieniowania oraz opracowano metodę korekcji powstających z tego powodu błędów pomiarowych.

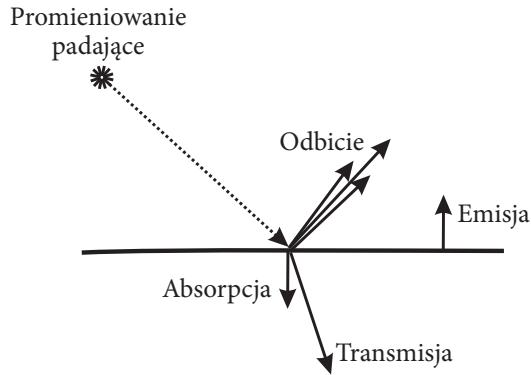
**Słowa kluczowe:** refleksyjność, charakterystyki odbiciowe materiałów, lidar, skaner laserowy, materiałoznawstwo, materiały — badania

**Symbole UKD:** 620.14

### 1. Wstęp

Promieniowanie elektromagnetyczne padające na granicę dwóch ośrodków, charakteryzujących się różnymi współczynnikami załamania, podlega czterem głównym zjawiskom:

- odbiciu od warstwy powierzchniowej,
- absorpcji we wnętrzu ośrodka drugiego,
- transmisji przez ośrodek,
- emisji.

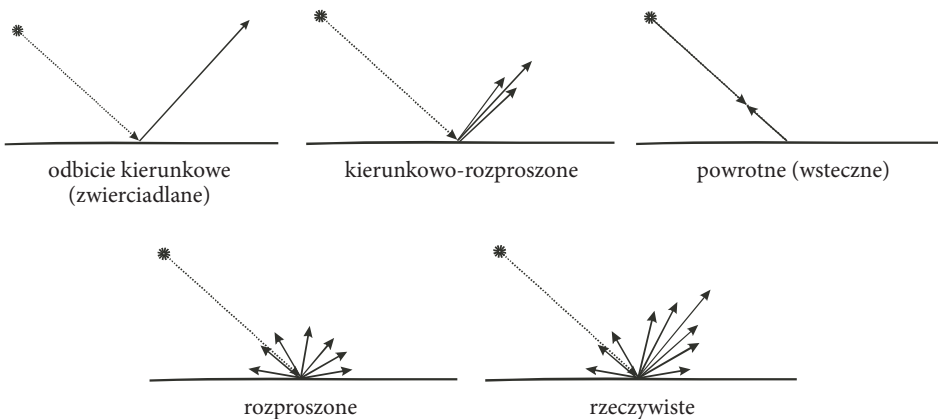


Rys. 1. Schemat zjawisk zachodzących na granicy ośrodków o różnych współczynnikach załamania promieniowania

Charakterystyka odbicia, absorpcji, transmisji i emisji zależy od właściwości fizycznych ośrodków, parametrów i stanu powierzchni granicznej oraz długości fali padającego promieniowania. Biorąc pod uwagę wymienione parametry, wyróżniamy odbicie:

- kierunkowe, zwierciadlane (idealne, teoretyczne),
- kierunkowo-rozproszone,
- powrotne,
- rozproszone,
- rzeczywiste.

Schemat rodzajów odbicia przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat podstawowych rodzajów odbicia od powierzchni

Stosunek mocy wiązki promieniowania odbitego do padającego na granicę dwóch ośrodków zwany jest reflektancją. Reflektancja może być wyrażana w ułamkach ( $R_1$ ), procentach ( $R_2$ ) lub decybelach ( $R_3$ ), zgodnie z wzorami:

$$R_1 = \frac{P_{ODB}}{P_{PAD}} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{P_{ODB}}{P_{PAD}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$R_3 = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{ODB}}{P_{PAD}} \right), \quad (3)$$

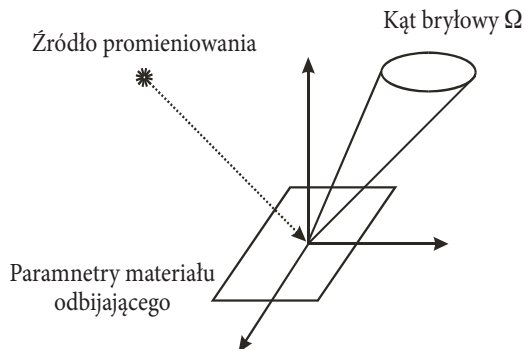
gdzie:  $P_{ODB}$  — moc promieniowania odbitego;  
 $P_{PAD}$  — moc promieniowania padającego.

Do celów zdalnej detekcji stosowana jest wielkość zwana „efektywnym przekrojem czynnym obiektu” ETCC (*Effective Target Cross Section*), który wyrażany jest wzorem:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} R \cdot A, \quad (4)$$

gdzie:  $R$  — reflektancja obiektu wyrażona w decybelach;  
 $A$  — powierzchnia obiektu;  
 $\Omega$  — kąt bryłowy.

Efektywny przekrój czynny obiektu definiowany jest jako powierzchnia czynna na oddziaływanie (zderzenie) promieniowania z materiałem, w wyniku którego promieniowanie padające na obiekt zostaje odbite w wybrany kąt bryłowy (rys. 3).



Rys. 3. Schemat odbicia promieniowania w wybrany kąt bryłowy

## 2. Charakterystyka reflektancji wybranych materiałów naturalnych

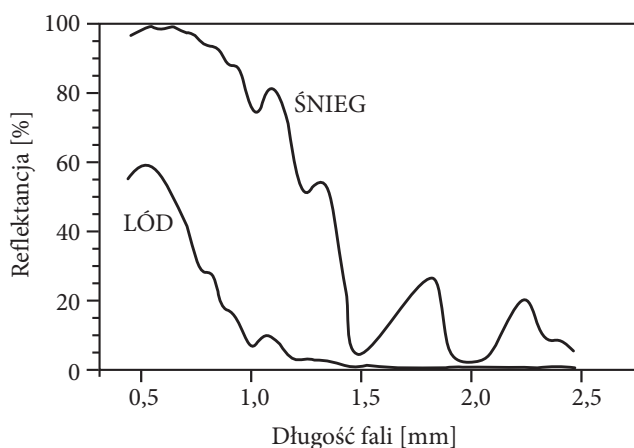
### 2.1. Woda w różnych stanach skupienia

Reflektancja wody jako związku chemicznego wykazuje silną zależność od stanu skupienia. Wartości reflektancji dla wody w stanie ciekłym oraz stałym (śnieg, szron i lód) zostały przedstawione w tabeli 1. Rysunek 4 prezentuje zależność reflektancji śniegu i lodu w funkcji długości fali promieniowania elektromagnetycznego.

TABELA 1

Wartości reflektancji wody zależnie od stanu skupienia dla długości fal: 850, 900, 1500 nm [1, 11]

Materiał	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
Śnieg drobnoziarnisty świeży	94	91	8,5
Śnieg średnioziarnisty świeży	90	84	1,5
Śnieg gruboziarnisty świeży	85	77	0,5
Śnieg stary	56	42	0
Szron	96	95	21
Lód	25	18	5
Woda	3	2,5	2



Rys. 4. Wartości reflektancji lodu i śniegu w zależności od długości fali padającego promieniowania [1]

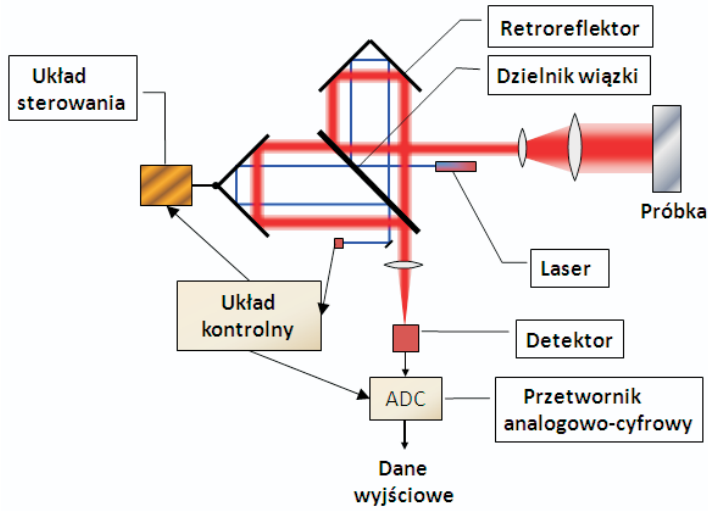
## 2.2. Minerale i skały

Wartości wybranych reflektancji, powszechnie występujących w litosferze minerałów i skał dla wybranych długości fali ( $\lambda_1 = 850$ ,  $\lambda_2 = 900$ ,  $\lambda_3 = 1500$  nm), zostały przedstawione w tabeli 2. Rysunek 6 pokazuje wartości reflektancji omawianych minerałów w zależności od długości fali padającego światła w zakresie 500-2500 nm. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika odbicia w funkcji długości fali dla wybranych minerałów. Pomiarów wykonano na spektrofotometrze fourierowskim FT-IR 1725x. Schemat funkcjonalny układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.

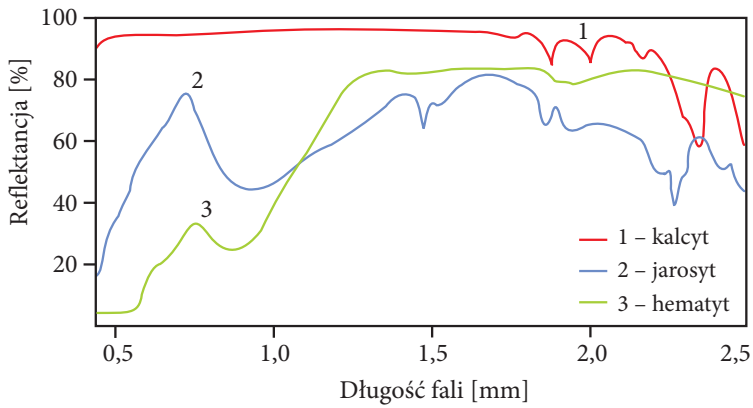
TABELA 2

Wartości reflektancji wybranych minerałów dla długości fal padającego promieniowania 850, 900 i 1500 nm [2, 3]

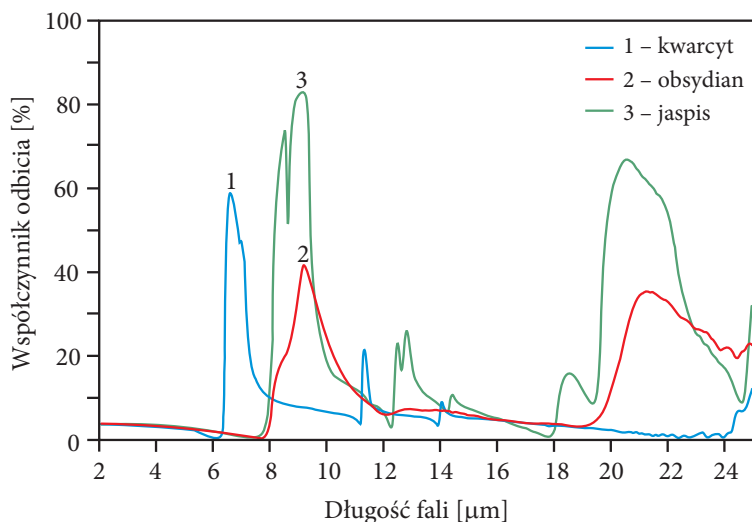
Materiał	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850$ nm	$\lambda_2 = 900$ nm	$\lambda_3 = 1500$ nm
Alunit	93	92	62
Kalcyt	95	95	95
Chalcedon	67	67	65
Dolomit	70	70	68
Jarosyt	49	45	75
Opal	80	80	70
Hematyt	23	25	83
Kwarc	80	80	83
Hektoryt	79	79	75
Haloizyt	92	90	68
Kaolinit	79	78	80
Montmorylonit	79	78	65
Nontronit	26	24	47
Saponit	83	81	58
Sepiolit	85	85	68
Ilit	34	33	45
Saukonit	62	60	54
Serpentynit	7	8	12



Rys. 5. Schemat funkcjonalny układu pomiarowego



Rys. 6. Wartości refleksyjności wybranych minerałów w zależności od długości fali padającego promieniowania [2]



Rys. 7. Wartości współczynnika odbicia wybranych minerałów w zależności od długości fali padającego promieniowania

### 2.3. Podłoża naturalne

Wartości refleksyjności różnego rodzaju gleb oraz podłoży mineralnych i organicznych dla analizowanych długości fali zostały przedstawione w tabeli 3.

TABELA 3

Wartości refleksyjności różnych podłoży mineralnych oraz organicznych dla długości fali padającego promieniowania  $\lambda = 850, 900, 1500$  nm [4, 5, 11]

Materiał	Refleksyjność [%]		
	$\lambda_1 = 850$ nm	$\lambda_2 = 900$ nm	$\lambda_3 = 1500$ nm
Podłoża mineralne			
Biały marmur	84	84	83
Wapień	42	44	53
Gips	89	88	65
Piasek	36	36	38
Błoto	6	7	13
Muł	33	35	47
Podłoża mineralno-organiczne			
Gleba	25	27	39
Ściółka leśna	16	17	29

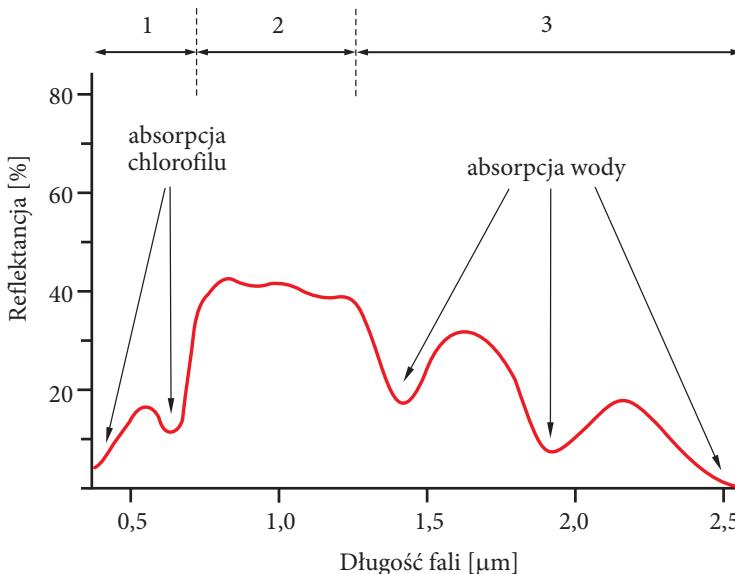
## 2.4. Materiały organiczne oraz organizmy żywe

Wartość reflektancji dla materiałów organicznych oraz organizmów żywych, determinowana jest przez kilka dominujących czynników związanych głównie z ich budową wewnętrzną (morfologią) oraz warunkami środowiska w jakich żyją. Typowy kształt wykresu zależności reflektancji od długości fali dla roślin zielonych został przedstawiony na rysunku 8.

TABELA 4

Wartości reflektancji różnych materiałów organicznych oraz organizmów żywych dla wybranych długości fali padającego promieniowania [6, 7, 11]

Materiał	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
Rośliny zielone	43	41	23
Rośliny liściaste	55	55	16
Rośliny iglaste	51	52	14
Skóra ludzka	55	52	
Włosy	5	7	



Rys. 8. Wpływ dominujących czynników determinujących wielkość reflektancji (1 — barwniki liści, 2 — struktura komórkowa, 3 — zawartość wody) oraz wartości reflektancji dla typowych roślin zielonych w zależności od długości fali padającego promieniowania [6]



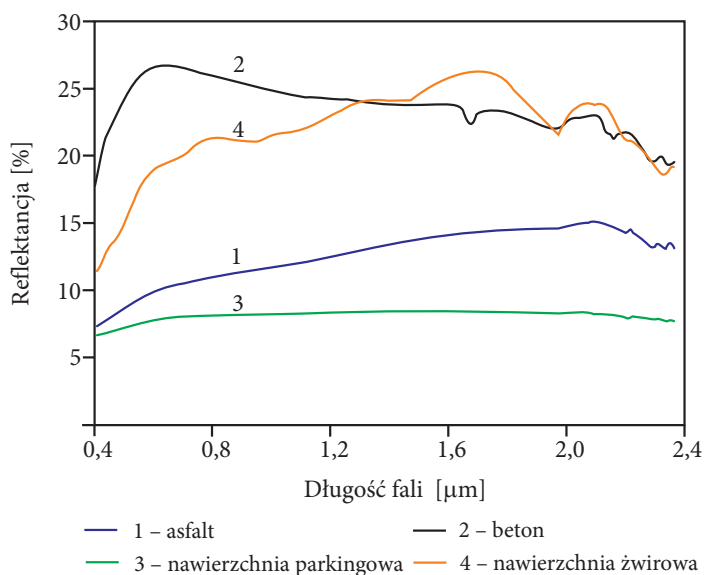
### 3. Charakterystyka reflektancji wybranych materiałów sztucznych

#### 3.1. Nawierzchnie sztuczne

TABELA 5

Wartości reflektancji różnych materiałów stanowiących typowe nawierzchnie sztuczne (powierzchnie suche) [4, 11]

Materiał	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
Asfalt	11	12	14
Beton	26	15	23
Żwir	22	22	25
Żużel	4	5	5
Powierzchnie parkingowe	8	8	8



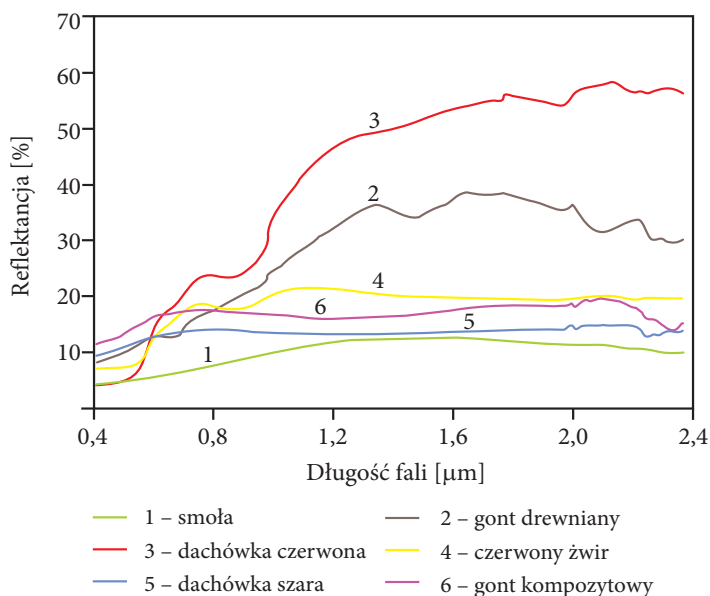
Rys. 9. Wartość reflektancji dla najpopularniejszych materiałów sztucznych w nawierzchniach (asfalt, beton, nawierzchnia parkingowa, żwir), w zależności od długości fali padającego promieniowania [4]

### 3.2. Pokrycia dachowe

TABELA 6

Wartości refleksyjności różnych materiałów w typowych pokryciach dachowych dla długości fal padającego promieniowania  $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 900 \text{ nm}$ ,  $\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$  [4, 11]

Materiał	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
Dachówka			
czerwona	23	24	52
szara	14	14	13
Gont			
drewniany	19	21	35
kompozytowy	18	18	18
łupkowy	19	19	17
Inne			
smoła	8	9	13
terrakota	16	16	17
żwir	18	18	20
guma	60	59	60



Rys. 10. Wartość refleksyjności dla najpopularniejszych materiałów sztucznych w pokryciach dachowych w zależności od długości fali padającego promieniowania [4]

### 3.3. Warstwy pokryciowe

TABELA 7

Wartości refleksyjności różnych materiałów w typowych warstwach pokryciowych [8, 11]

Materiał	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
Chromowo-niklowe	3	7	38
Guma syntetyczna (czarna)	6	5	6
Aluminium czyste	53	59	81
Stal galwanizowana	24	22	46
Stal oksydowana	18	17	26
Miedź	16	16	12



Rys. 11. Paleta analizowanych kolorów i odcieni

TABELA 8

Wartości refleksyjności różnych materiałów stanowiących typowe warstwy antyrefleksyjne [9]

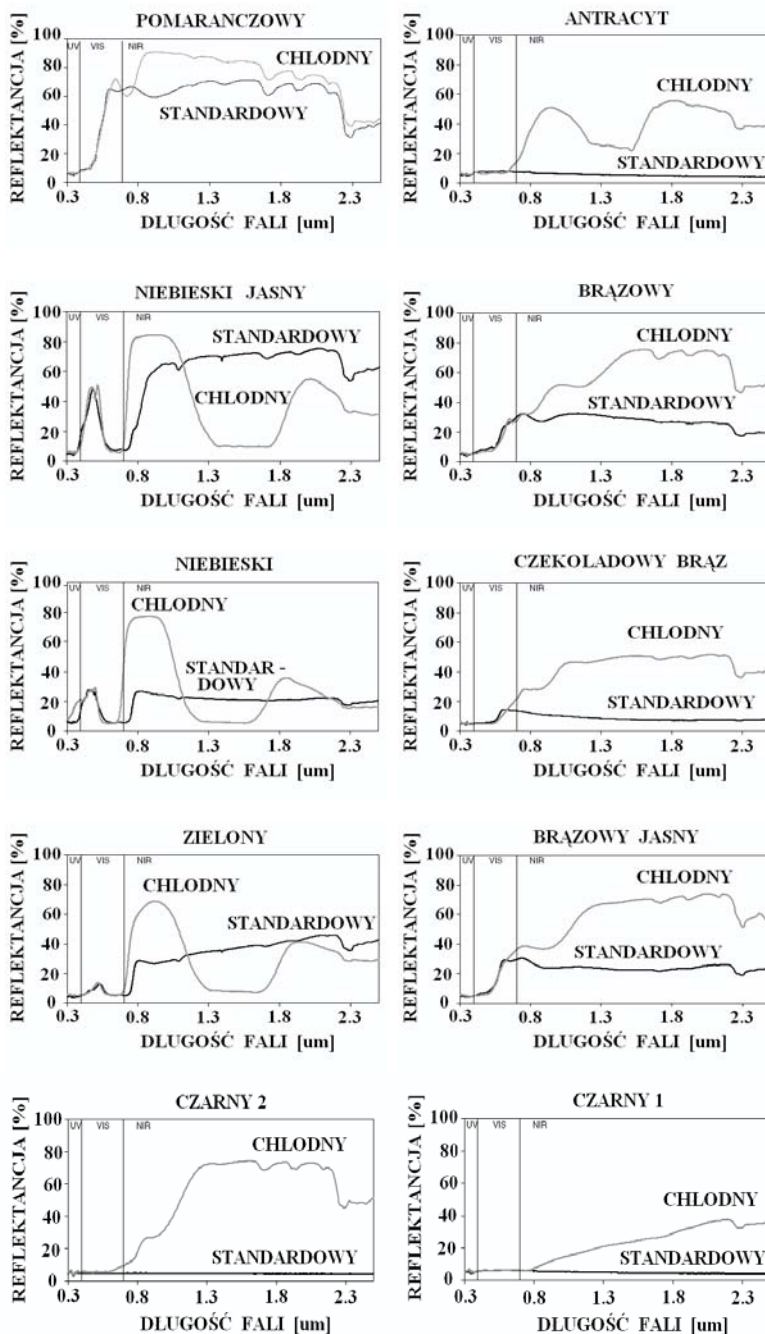
Reflektancja materiałów silikonowych [%]					
małe pory			duże pory		
$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
5	5	66	10	10	66

## 3.4. Farby kolorowe

TABELA 9

Wartości refleksyjności przedstawionych kolorów i odcieni [10]

Odcień	Reflektancja [%]		
	$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 900 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1500 \text{ nm}$
	Pomarańczowy		
chłodny	86	90	84
standardowy	63	60	71
	Antracyt		
chłodny	45	50	22
standardowy	6	6	5
	Niebieski jasny		
chłodny	84	85	12
standardowy	50	60	72
	Brązowy		
chłodny	38	45	75
standardowy	30	30	30
	Niebieski		
chłodny	79	80	7
standardowy	27	25	20
	Czekoladowy brąz		
chłodny	30	28	52
standardowy	10	10	8
	Zielony		
chłodny	65	70	10
standardowy	30	28	38
	Brązowy jasny		
chłodny	38	38	70
standardowy	28	25	23
	Czarny 2		
chłodny	28	28	75
standardowy	5	5	4
	Czarny 1		
chłodny	8	10	22
standardowy	5	5	4



Rys. 12. Zależność wartości refleksyjności poszczególnych kolorów i odcieni farb od długości fali padającego promieniowania [10]

#### 4. Wpływ ekstynkcji atmosfery dla wybranych długości fal promieniowania

Docierający do odbiornika sygnał, niosący informacje o reflektancji wybranego materiału, podlega na drodze w atmosferze osłabieniu (ekstynkcji). Osłabienie to wynika z zachodzących zjawisk absorpcji oraz rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego na zawieszonych cząstkach materii i opisane jest wzorem:

$$I = I_0 \cdot e^{-2R\gamma}, \quad (5)$$

gdzie:  $I$  — końcowe natężenie promieniowania;  
 $I_0$  — początkowe natężenie promieniowania;  
 $R$  — odległość;  
 $\gamma$  — współczynnik ekstynkcji.

Wartość ekstynkcji jest ściśle zależna od analizowanej długości fali promieniowania oraz składu atmosfery (ilości, rodzaju oraz stopnia dyspersji cząstek absorbujących i rozpraszających promieniowanie). Dlatego też parametry te powinny być wyznaczone przed przystąpieniem do analizy sygnału.

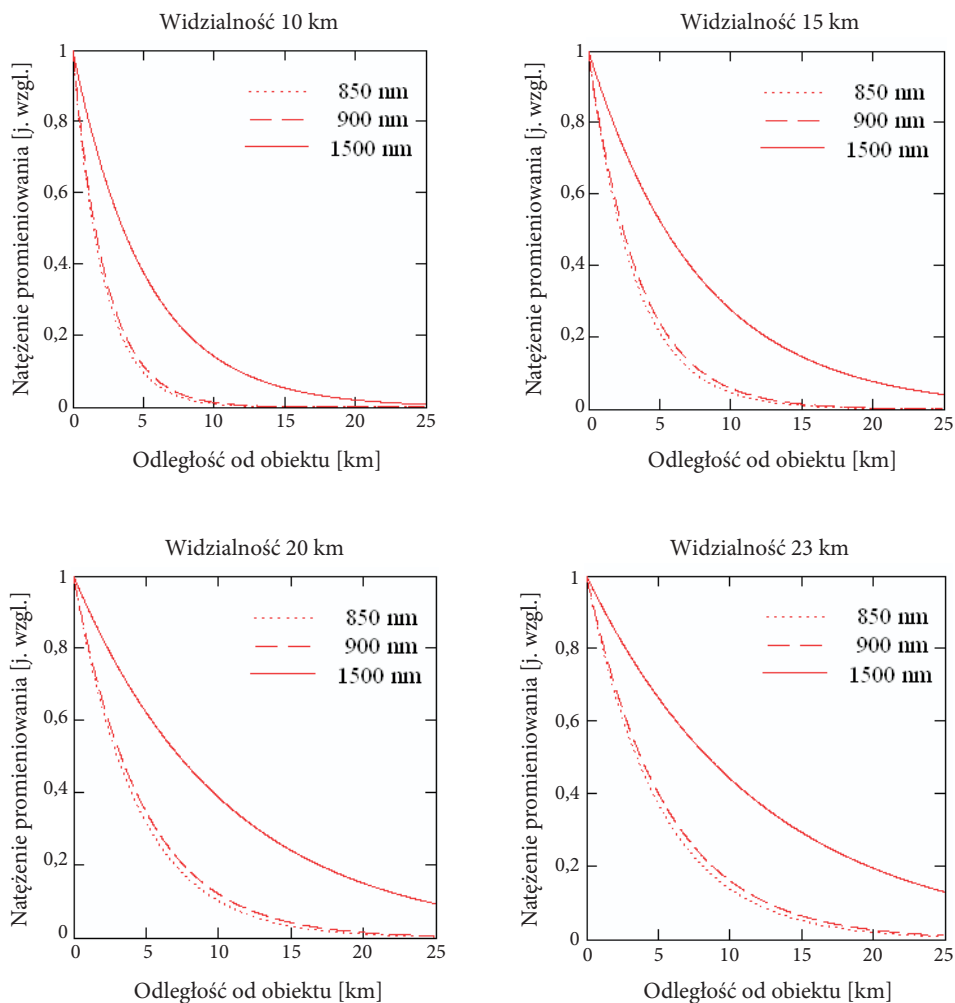
Wartości współczynnika ekstynkcji atmosfery dla analizowanych długości fal ( $\lambda_1 = 850$  nm,  $\lambda_2 = 900$  nm,  $\lambda_3 = 1500$  nm) przy wybranych warunkach meteorologicznych określonych przez widzialność meteorologiczną przedstawiono w tabeli 10. Obliczenia współczynnika ekstynkcji zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania LIDAR PC firmy Ontar Corp.

TABELA 10

Wartości współczynnika ekstynkcji dla analizowanych długości fal

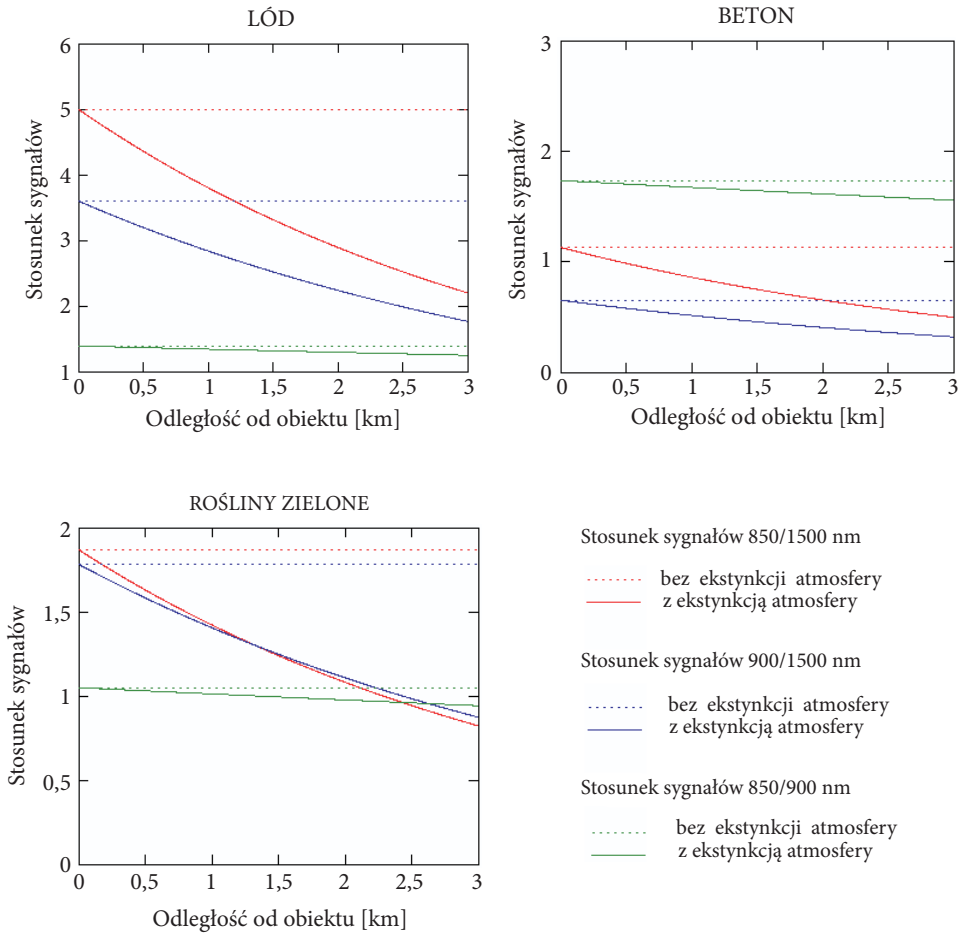
Widzialność meteorologiczna	Wartość współczynnika ekstynkcji [ $\text{km}^{-1}$ ]		
	$\lambda_1 = 850$ nm	$\lambda_2 = 900$ nm	$\lambda_3 = 1500$ nm
10 km	0,234	0,216	0,097
15 km	0,154	0,142	0,064
20 km	0,114	0,106	0,047
23 km	0,09860	0,091	0,041

Osłabienie wiązki promieniowania wraz z rosnącą odległością od obiektu w przypadku omawianych widzialności meteorologicznych zostały przedstawione na rysunku 13.



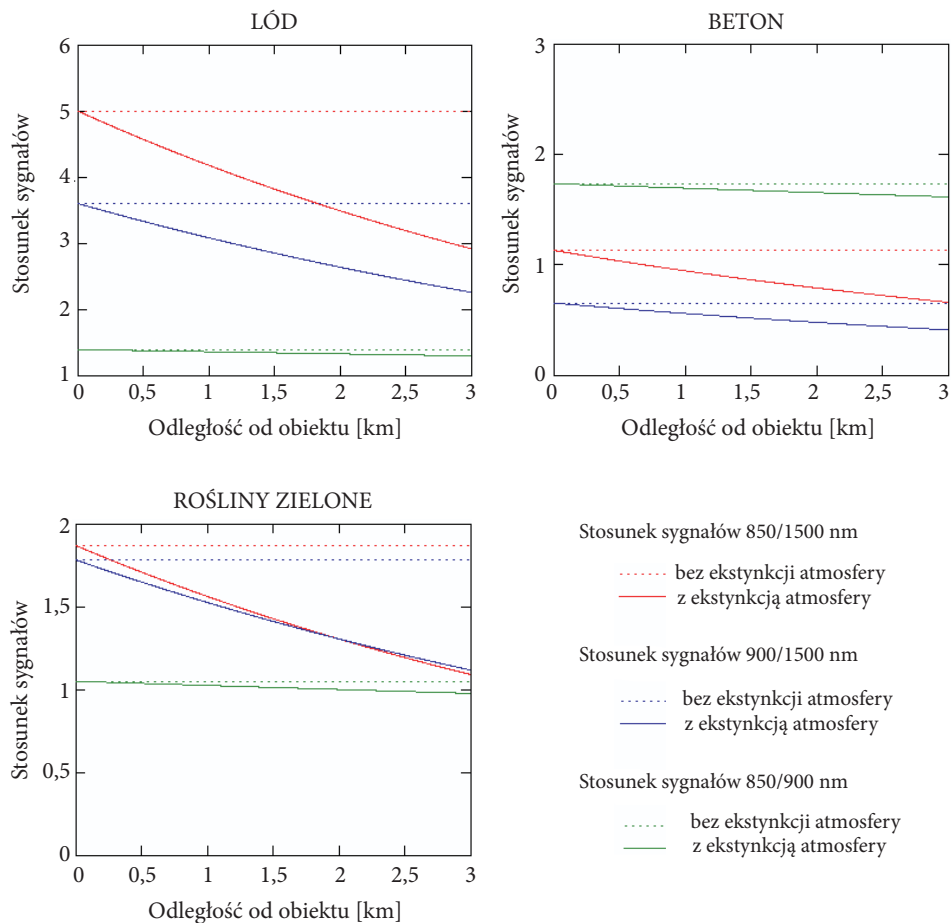
Rys. 13. Osłabienie wiązki promieniowania w funkcji odległości od obiektu, dla widzialności meteorologicznej równej 10, 15, 20 oraz 23 km

Osłabienie natężenia promieniowania na drodze w atmosferze powoduje zafałszowanie stosunków sygnałów dla wybranych długości fal. Różnice między rzeczywistymi wartościami tych stosunków a wartościami zmienionymi przez ekstynkcję atmosfery w funkcji odległości od obiektu dla wybranych materiałów przedstawiają rysunki 14, 15 oraz 16.

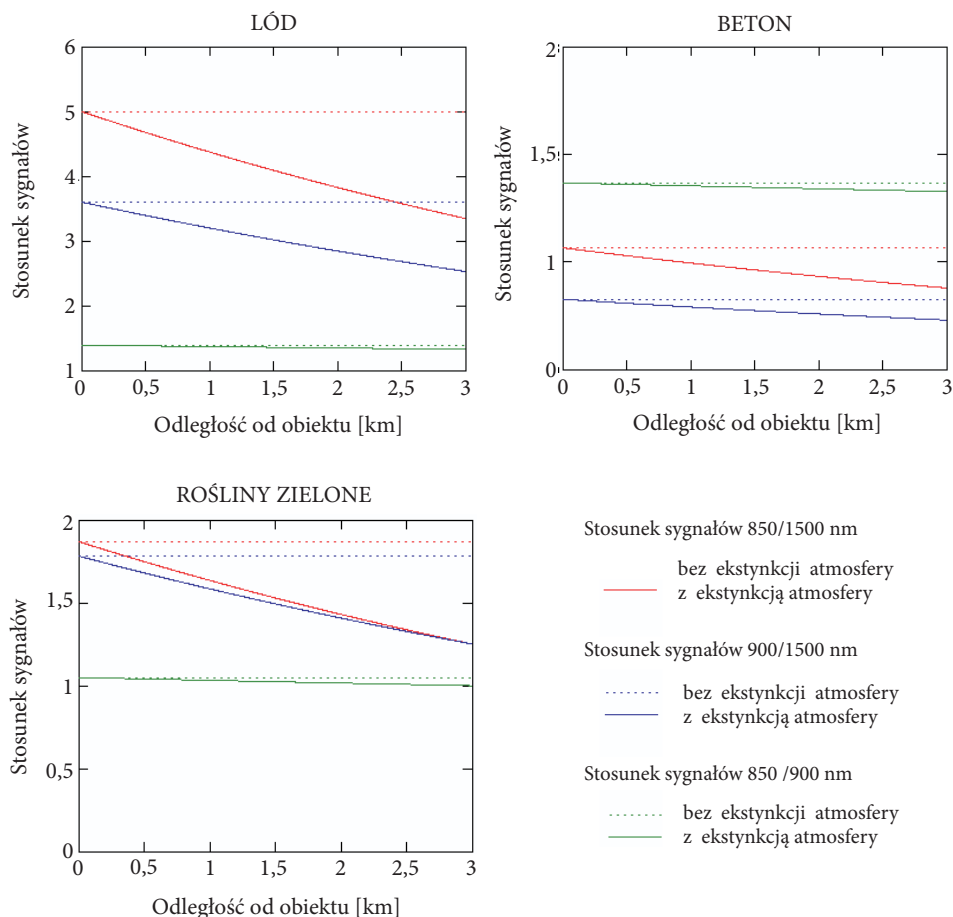


Rys. 14. Wartości stosunków wybranych trzech długości fal promieniowania bez wpływu oraz z wpływem tłumienia atmosfery, dla trzech materiałów: lód (a); beton (b); rośliny zielone (c) przy widzialności atmosferycznej równej 10 km





Rys. 15. Wartości stosunków wybranych trzech długości fal promieniowania bez wpływu oraz z wpływem tłumienia atmosfery, dla trzech materiałów: lód (a); beton (b); rośliny zielone (c) przy widzialności atmosferycznej równej 15 km



Rys. 16. Wartości stosunków wybranych trzech długości fal promieniowania bez wpływu oraz z wpływem tłumienia atmosfery, dla trzech materiałów: lód (a); beton (b); rośliny zielone (c) przy widzialności atmosferycznej równej 20 km

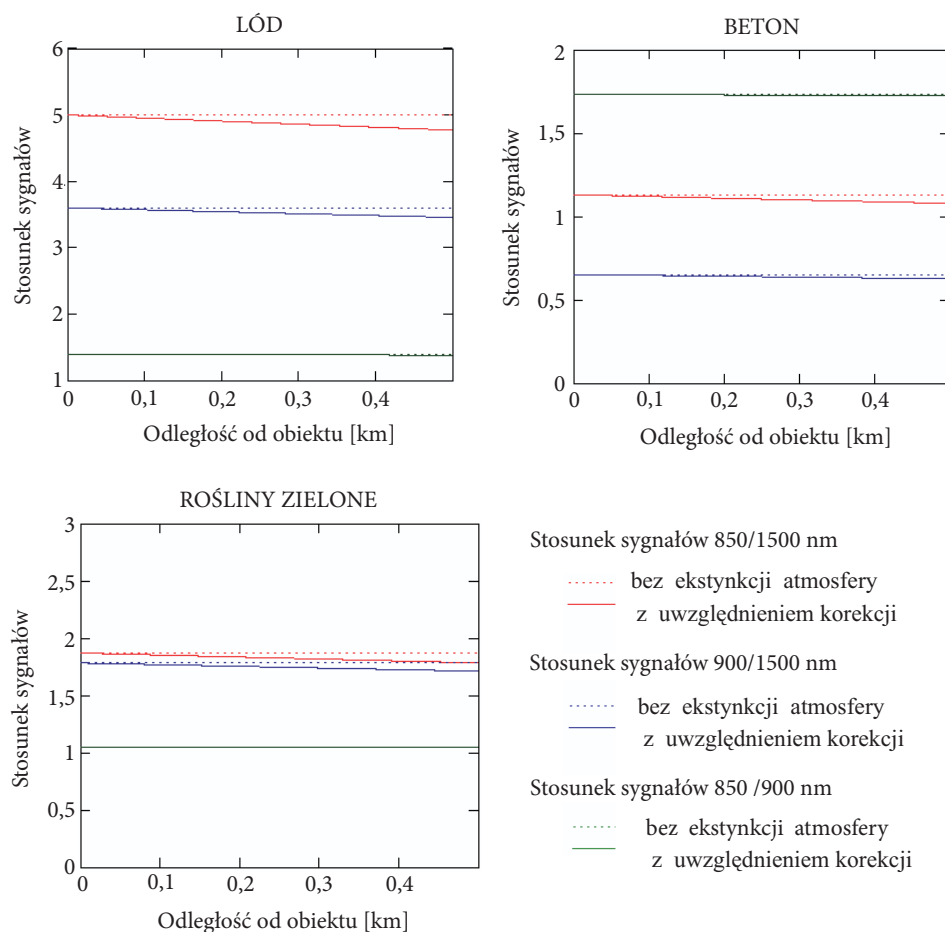
## 5. Korekcja wpływu atmosfery

Zafałszowanie realnych wartości stosunków sygnałów uniemożliwia poprawną analizę oraz identyfikację badanych materiałów. Konieczne było więc opracowanie i wprowadzenie korekcji wpływu atmosfery, która bez wymogów określania aktualnych parametrów atmosferycznych umożliwi zminimalizowanie powstających błędów pomiarowych.

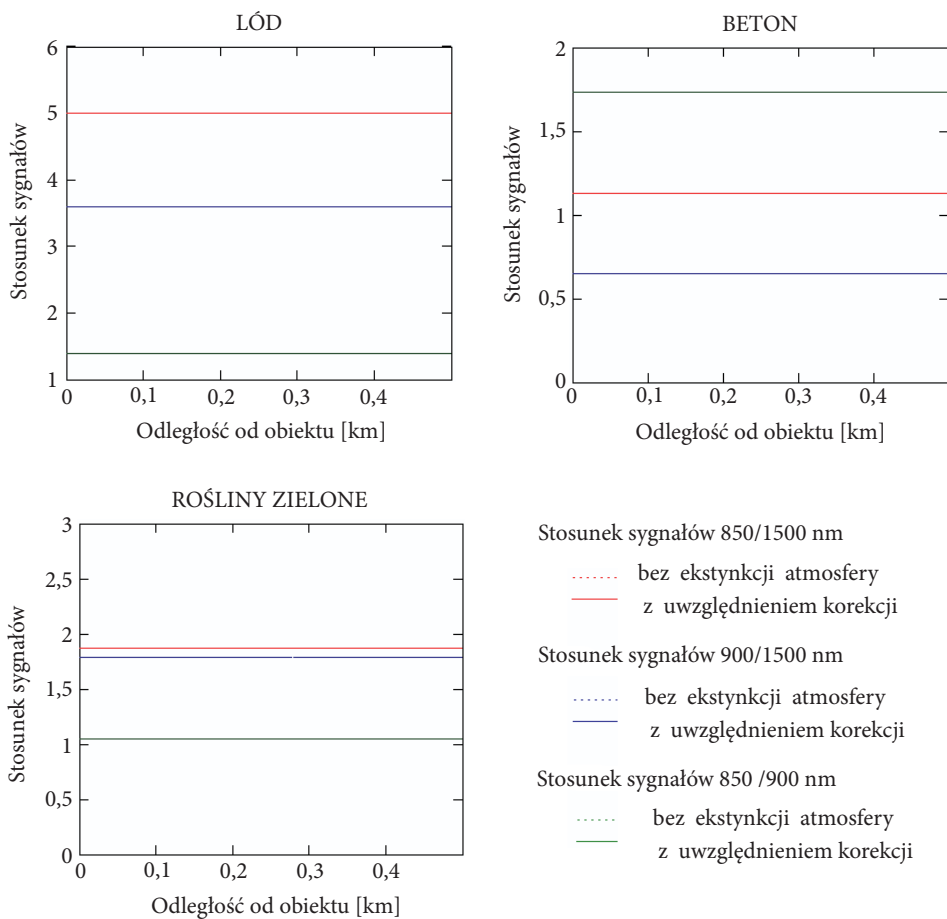
Korekcję przeprowadzono uwzględniając charakter odbicia promieniowania od analizowanych materiałów, różne warunki atmosferyczne wyrażone przez

widzialność meteorologiczną oraz charakterystyki spektralne tłumienia atmosfery.

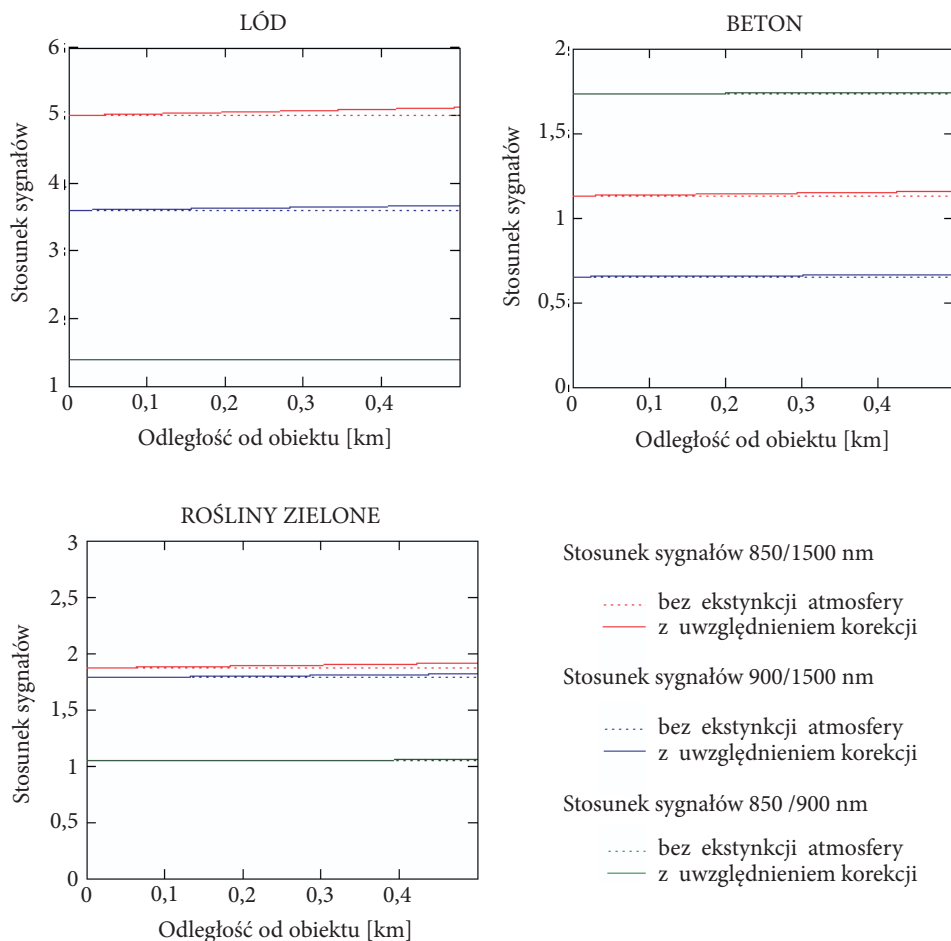
Różnice między wartościami stosunków sygnałów odbitych dla wybranych fal a wartościami stosunków sygnałów z uwzględnieniem zastosowanej korekcji przedstawiono na rysunkach 17, 18, 19. Procentową wartość różnicy między modelową wartością stosunku sygnałów a wartością otrzymaną po zastosowaniu korekcji atmosferycznej dla wybranych widzialności przedstawia rysunek 20.



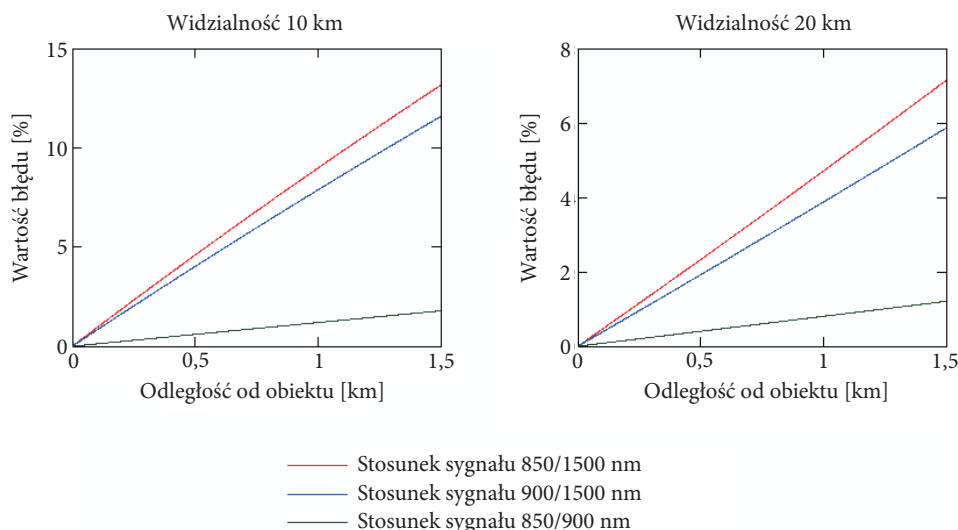
Rys. 17. Wartości stosunków wybranych trzech długości fal promieniowania bez wpływu tłumienia atmosfery oraz z jej wpływem, ale z uwzględnieniem korekcji, dla materiałów: lód (a); beton (b); rośliny zielone (c) przy widzialności atmosferycznej równej 10 km



Rys. 18. Wartości stosunków wybranych trzech długości fal promieniowania bez wpływu tłumienia atmosfery oraz z jej wpływem, ale z uwzględnieniem korekcji, dla materiałów: lód (a); beton (b); rośliny zielone (c) przy widzialności atmosferycznej równej 15 km



Rys. 19. Wartości stosunków wybranych trzech długości fal promieniowania bez wpływu tłumienia atmosfery oraz z jej wpływem, ale z uwzględnieniem korekcji, dla materiałów: lód (a); beton (b); rośliny zielone (c) przy widzialności atmosferycznej równej 20 km



Rys. 20. Odchylenie wartości stosunków trzech długości fal promieniowania po uwzględnieniu korekcji atmosferycznej w porównaniu z wartościami modelowymi, przy widzialności atmosferycznej równej 10 i 20 km

Opracowana metoda korekcji wpływu atmosfery, dla badań wykonanych z odległości 0,5 km (typowa wysokość przelotu BSP), pozwala na zmniejszenie wartości błędu, która nie przekracza 5% dla analizy przy widzialności równej 10 km oraz wartości 3% dla analiz w warunkach widzialności równej 20 km.

Przy widzialności atmosferycznej równej 15 km błędy są minimalne (poniżej 1%).

Bez zastosowania omawianej korekcji błędy otrzymane przy tych samych warunkach pomiarowych przekroczyłyby wartość 12%.

## 6. Wnioski

Bazując na podstawowym założeniu zdalnej detekcji i identyfikacji, która mówi, że każdy materiał ma własne charakterystyki spektralne oraz po dokładnym przeanalizowaniu charakterystyk reflektancji wybranych materiałów, a także opracowaniu odpowiednich baz danych, możliwe jest skonstruowanie skanera laserowego, którego zadaniem będzie wykrycie i określenie położenia wybranych substancji oraz przedmiotów w badanym obszarze przestrzeni na podstawie analizy sygnału odbiciowego. Możliwość komputeryzacji oraz pełnej automatyzacji pracy skanera laserowego pozwala na wyposażenie w taki system bezzałogowych statków powietrznych (BSP), a współpraca z istniejącymi systemami GPS (*Global Positioning System*) oraz INS (*Inertial Navigation System*)

umożliwia dokładne odwzorowanie otrzymywanych wyników na istniejące geograficzne charakterystyki terenu, tworząc mapy pokrycia powierzchni, zarówno w formie płaskiej, jak i trójwymiarowej.

Laserowy system skaningowy może stać się bardzo skutecznym narzędziem zdalnego rozpoznawania i charakteryzowania obiektów, analizy powierzchni (tereny zurbanizowane, uprawy, nieużytki, tereny leśne) analizy skażeń i zanieczyszczeń, stosowanym między innymi w inżynierii i ochronie środowiska, budownictwie, kartografii, przemyśle oraz technice militarnej.

Artykuł wpłynął do redakcji 6.03.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2008 r.

#### LITERATURA

- [1] G. ZUBORDI, G. P. MELONI, M. FREZZOTTI, *Snow and Ice Reflectance Spectra of The Nansen Ice Sheet Surfaces*, Cold Regions Science and Technology, vol. 24, 1996, 147-151.
- [2] B. PICKLES, *Bird's-Eye View Clarifies Research on the Ground*, Science and Technology Review, May, 2003.
- [3] D. H. KNEPPER, W. H. LANGER, S. H. MILEER, *Remote Sensing and Airborne Geophysics in the Assessment of Natural Aggregate Resources*, Open-File Report 94-158, Denver, 1994.
- [4] M. HEROLD, D. A. ROBERTS, M. E. GARDNER, P. E. DENNISON, *Spectrometry for urban area remote sensing — Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm*, Remote Sensing of Environment, vol. 91, 2004, 304-319.
- [5] L. BROWN, J. M. CHEN, S. G. LEBLANC, J. CIHLAR, *A Shortwave Infrared Modification to the Simple Ratio for LAI Retrieval in Boreal Forests: An Image and Model Analysis*, Remote Sensing of Environment, vol. 71, 2000, 16-25.
- [6] M. N. BOGONKO, *Hyperspectral Remote Sensing of Soil Moisture Gradients in the Millingerwaard*, The Netherlands, praca magisterska, 2005.
- [7] Z. PAN, G. HEALEY, M. PRASAD, B. TROMBERG, *Face Recognition in Hyperspectral Images*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, 2003, 1552-1560.
- [8] Y. CAO, X. HU, *Absorbing film on metal for solar selective surface*, Thin Solid Films, vol. 375, 2000, 155-158.
- [9] E. S. KOLESAR, V. M. BRIGHT, D. M. SOWDERS, *Optical reflectance reduction of texture silicon surfaces coated with an antireflective thin film*, Thin Solid Films, vol. 291, 1996, 23-29.
- [10] A. SYNNEFA, M. SANTAMOURIS, K. APOSTOLAKIS, *On the development, optical and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment*, Solar Energy, vol. 81, 2007, 488-497.
- [11] Aster Spectral Library (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>).

M. SZOPA, M. ZYGMUNT, J. MIERCZYK

#### **Correction of reflectance characteristics of chosen natural and anthropogenic materials for airborne laser scanning system**

**Abstract.** In the article, analyses of reflectance of chosen materials were presented in order to analyze the possibility of elaboration of laser scanning system for remote detection of substances, surfaces,

objects, pollution and contamination. One showed results of literature research and analyses of data related to reflection characteristics of materials. Analyses were carried out for three wavelengths of electromagnetic radiation:  $\lambda_1 = 850$  nm,  $\lambda_2 = 900$  nm,  $\lambda_3 = 1500$  nm, in reference to both natural and anthropogenic materials. The influence of atmospheric extinction on values of received proportions of signals for chosen wavelengths was investigated and one compiled the method of signal correction.

**Keywords:** reflectance, reflectance characteristics of materials, lidar, laser scanning system, materials science, materials — investigations

**Universal Decimal Classification:** 620.14