

Nieselektywne powierzchnie referencyjne w teledetekcji hiperspektralnej w zakresie dalekiej podczerwieni

Andrzej Ligienza, Mariusz Kastek, Tomasz Sosnowski, Krzysztof Firmanty

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

Streszczenie: W niniejszym artykule skoncentrowano się na konstrukcji powierzchni referencyjnych o pożądanej charakterystyce promieniowania zbliżonej do ciała szarego. Używając drewnianej sklejki o chropowatej powierzchni oraz pokryw o różnych wartościach emisyjności, wykonane zostały powierzchnie o nieselektywnych właściwościach spektralnych. Potwierdzona została zgodność wyników pomiarów laboratoryjnych spektrometrem odbiciowym z danymi uzyskanymi za pomocą kamery hiperspektralnej. Przy użyciu kilku powierzchni referencyjnych o dokładnie znanych charakterystykach emisyjnych, możliwe będzie precyzyjne wyznaczenie składników promieniowania z otoczenia mierzonej sceny. Chociaż technologia tych powierzchni wymaga jeszcze udoskonalenia, ich użyteczność w pomiarach teledetekcyjnych jest niezaprzeczalna. Dodatkowo różnice w reakcji na promieniowanie słoneczne między różnymi powierzchniami referencyjnymi stanowią istotną informację, która może być wykorzystana w teledetekcji i identyfikacji materiałów. Uwzględnienie dynamiki nagrzewania się powierzchni badanych obiektów jest kluczowe w modelowaniu pomiarowym.

Słowa kluczowe: powierzchnie referencyjne, nieselektywne właściwości spektralne, ciało szare, emisyjność, kamera hiperspektralna, pomiar teledetekcyjny, identyfikacja materiałów, LWIR

1. Wprowadzenie

Pomiar i analiza danych teledetekcyjnych odgrywają kluczową rolę we współczesnych badaniach naukowych i aplikacjach przemysłowych. Dane zbierane przez satelity, samoloty i inne platformy teledetekcyjne dostarczają nieocenionych informacji na temat atmosfery, powierzchni Ziemi, klimatu i wielu innych zjawisk[1]. Teledetekcja hiperspektralna łączy spektrometrię z obrazowaniem, umożliwiając ekstrakcję informacji materiałowych z obiektów zdalnie obserwowanych w scenie. Takie możliwości mają szerokie zastosowanie w dziedzinach od geologii i nauk o Ziemi po obronę i pomoc w przypadku katastrof. Podstawową różnicą między teledetekcją hiperspektralną a tradycyjną spektroskopią jest możliwość obserwowania właściwości spektralnych zdalnie i bez kontrolowanego źródła. Ważnym aspektem pomiarów teledetekcyjnych jest wiedza o propagacji promieniowania elektromagnetycznego z różnych źródeł do sensora, obejmująca interakcje z obiektami, ich o-

tożym oraz atmosferą [2]. Opisuje ona fizyczny związek między zmierzoną charakterystyką spektralną, zwykle w postaci pomiaru spektralnej luminancji energetycznej w płaszczyźnie sensora, a widoczną charakterystyką materiału. Podstawowe właściwości spektralne materiałów często są opisywane jako zmierzony rozkład spektralnej egzytancji energetycznej lub temperatury radiacyjnej w funkcji długości fali, dla danej temperatury powierzchni. Ścisłe zależności luminancji energetycznej od kątów oświetlenia i obserwacji względem powierzchni materiału są powszechnie pomijane w teledetekcji hiperspektralnej, która opiera się na założeniu dyfuzyjnego rozpraszania.

Dwa główne źródła promieniowania brane pod uwagę w pasywnych systemach teledetekcji w zakresie podczerwieni to odbite światło słoneczne i emisja termiczna obiektów znajdujących się w scenie. W kontekście obrazowania hiperspektralnego, widmo elektromagnetyczne można podzielić na pięć podstawowych zakresów: widzialny (VIS) 0,4–0,7 μm , bliską podczerwieni (NIR) 0,7–1,1 μm , krótkofalową podczerwieni (SWIR) 1,1–3,0 μm , średniofalową podczerwieni (MWIR) 3–5 μm oraz długofalową podczerwieni (LWIR) 5–14 μm . Odbite światło słoneczne dominuje w zakresach VIS, NIR i SWIR, natomiast emisja termiczna dominuje w zakresie LWIR. W zakresie MWIR i LWIR informacja dostarczana przez obraz wynika z różnicy temperatury i emisyjności obiektów. W obu przypadkach informacje wyodrębnione z analizy obrazu szerokopasmowego mają głównie charakter przestrzenny, to znaczy że rejestrowane cechy obiektów i zjawiska mają fizycznie mierzalne wymiary i odległości między sobą, dostarczające informacji o lokalizacji, geometrii

Autor korespondujący:

Andrzej Ligienza, andrzej.ligienza@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 28.12.2023 r., przyjęty do druku 10.04.2024 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

i wartości luminancji energetycznej mierzonych obiektów. Pasma różnią się między sobą wartościami luminancji energetycznej. Różnice między pasmami dostarczają dodatkowych informacji, które zależą od tego, jak bardzo refleksyjność i emisyjność materiałów zmieniają się w zależności od długości fali. Rejestracja hiperspektralna umożliwia nie tylko dokładniejsze zobrazowanie sceny, ale także analizę ilościową opartą na cechach spektralnych obiektów. Na przykład, obrazowanie hiperspektralne może wspomagać klasyfikację obrazów lub mapowanie na podstawie treści spektralnej (materiałowej), lub wykrywanie obiektów na podstawie ich podstawowych cech spektralnych. Dzięki postępom w produkcji detektorów, urządzenia służące do obrazowania hiperspektralnego są w stanie jednocześnie rejestrować, z coraz większą rozdzielczością, zarówno treść przestrzenną jak i spektralną sceny.

Jednym z kluczowych elementów pomiarów hiperspektralnych jest kalibracja i weryfikacja sprzętu pomiarowego, co wymaga obecności w rejestrowanej scenie obiektów referencyjnych o znanych właściwościach. W technice podczerwieni i termowizji stosuje się różnego rodzaju ciała czarne. Najczęściej używane ciała czarne to ciała wnękowe oraz ciała powierzchniowe. Ciało wnękowe jest często stosowane jako wysokotemperaturowe ciało czarne, charakteryzujące się dużą stabilnością temperatury, jednorodnością promieniowania oraz względnie niewielką powierzchnią promieniującą. Jednak zastosowanie tego typu promienników w pomiarach teledetekcyjnych jest często niepraktyczne ze względu na duże odległości pomiarowe.

Wraz ze wzrostem odległości rejestracji, rozmiar kątowy danego promiennika maleje, co zmniejsza jego użyteczność w kontekście sceny. Oczywiście istnieje możliwość skonstruowania większych technicznych ciał czarnych, ale jest to niepraktyczne z dwóch powodów. Po pierwsze, aby zapewnić stabilność termiczną i jednorodność temperatury powierzchni promiennika, stosuje się płyty wykonane z miedzi, które są pokrywane materiałem o pożądanej charakterystyce spektralnej. Te płyty są zaprojektowane z odpowiednią grubością, która ma na celu zwiększenie inercji termicznej. Jednak zwiększanie powierzchni znacząco podnosi koszt produkcji tego typu urządzeń [3]. Po drugie, biorąc pod uwagę, że pomiary mogą być wykonywane w warunkach terenowych, gdzie często wymagane jest przenoszenie urządzenia, takie promienniki są niepraktyczne ze względu na swoją masę i, tym samym, ograniczoną mobilność.

Prowadzone badania mają na celu poznanie możliwości zastosowania systemów hiperspektralnych do wykrywania obiektów o charakterze wojskowym. Istnieją standaryzowane wymiary dla klasyfikowanych obiektów zgodne z normami NATO, które są używane do badań dotyczących zasięgów detekcji urządzeń obserwacyjnych. Wśród tych obiektów znajdują się obiekty odpowiadające człowiekowi (o wymiarach 1,8 m × 0,6 m), samochodowi (o wymiarach 2,3 m × 2,3 m) oraz samochodowi ciężarowemu (o wymiarach 4,0 m × 2,5 m) [4]. Ze względu na te wymiary, stosowanie typowych konstrukcji ciał czarnych jest niepraktyczne.

Dodatkowo większość technicznych ciał czarnych jest optymalizowana w celu uzyskania jak najwłaściwszych charakterystyk teoretycznego ciała doskonale czarnego. Jednak obiekty, które mają być wykrywane, nie są konstruowane z myślą o ich właściwościach promieniujących. Na przykład, odzież noszona przez człowieka, metale i tworzywa sztuczne stosowane w budowie coraz powszechniejszych platform autonomicznych, wprowadzają selektywne cechy emisji. Z tego powodu, do weryfikacji algorytmów detekcyjnych konieczne są obiekty referencyjne. Takie obiekty powinny być łatwe do przenoszenia, umożliwiać skalowanie powierzchni emisyjnej w zależności od scenariusza pomiarowego oraz posiadać charakterystykę spektralną zbliżoną do ciała szarego o pożądanej wartości emisyjności. Ponadto istotne jest, aby konstrukcja tych obiektów była powtarzalna, a emisja promieniowania miała charakter dyfuzyjny.

2. Teoria

W typowym scenariuszu obrazowania, materiał jest oświetlany przez Słońce. Ze względu na występowanie atmosfery, oświetlenie faktycznie składa się z dwóch składników: bezpośredniego oświetlenia słonecznego, które jest zmniejszone przez absorpcję atmosferyczną, oraz pośredniego oświetlenia słonecznego, wynikającego z energii rozproszonej przez składniki atmosferyczne, takie jak aerozole, chmury i otaczające obiekty.

W porównaniu do bezpośredniego składnika oświetlenia, który pada na obiekt z jednego konkretnego kierunku, składnik pośredni jest niezależny od kąta padania ze względu na dyfuzyjny charakter źródła tego promieniowania. Widmowa luminancja energetyczna w płaszczyźnie obiektywu jest strumieniem promieniowania na jednostkę powierzchni, kąt bryłowy i długość fali [5]. Strumień ten może być zmierzony dla określonej powierzchni w scenie. Rozkład spektralnej luminancji energetycznej emitowanej termicznie jest określony dla teoretycznej, idealnej powierzchni promieniującej opisanej przez Maksa Plancka wynikającej z kwantowej emisji ciała doskonale czarnego [6]. Emitowana spektralna luminancja energetyczna dla obiektu rzeczywistego jest iloczynem rozkładu luminancji energetycznej ciała doskonale czarnego dla temperatury materiału i emisyjności spektralnej. Spektralna luminancja energetyczna emitowana przez obiekt rzeczywisty w porównaniu do ciała doskonale czarnego jest właściwością materiału, znaną jako emisyjność spektralna, i definiowaną jako:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L(\lambda, T)}{L_{CDC}(\lambda, T)} \quad (1)$$

Wynika z tego, że spektralna luminancja energetyczna emitowana przez powierzchnię o emisyjności spektralnej $\varepsilon(\lambda)$ wynosi:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\varepsilon(\lambda)}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2)$$

gdzie: T – temperatura, λ – długość fali, h – stała Plancka, c – prędkość światła w próżni, k – stała Boltzmanna.

Emisyjność jest powiązana z absorpcją materiału. Współczynnik emisyjności jest równy współczynnikowi absorpcji zgodnie z prawem Kirchhoffa tylko w ściśle określonych warunkach równowagi termodynamicznej [7]. Gdy materiał jest w równowadze termicznej, związek między współczynnikiem emisyjności ε , a współczynnikiem absorpcji α jest określony przez:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (3)$$

Chociaż warunek równowagi termicznej rzadko jest spełniony ściśle, przybliżenie to jest powszechnie stosowane w teledetekcji. Dla obiektów nieprzezroczystych (współczynnik transmisji spektralnej $\tau(\lambda) = 0$), można przyjąć, że emisyjność spektralna jest jednoznacznie określona poprzez współczynnik refleksyjności widmowej $\rho(\lambda)$:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (4)$$

Podstawowym celem teledetekcji hiperspektralnej jest wydobywanie informacji związanych z właściwościami widmowymi obiektów obrazowanych zdalnie. W środowisku laboratoryjnym, gdzie warunki pomiarowe mogą być starannie kontrolowane, możliwe jest precyzyjne zmierzenie widma absorpcyjno-odbiciowego, za pomocą którego można identyfikować materiały. Jednak w kontekście teledetekcji zdalnej sytuacja może być bardziej złożona ze względu na niekontrolowany charakter źródeł oświetlenia, wła-

ściwości atmosferycznych i innych zmiennych środowiskowych. Aby poradzić sobie z tymi problemami, ważne jest zrozumienie wpływu tych zmiennych na rejestrowaną spektralną luminancję energetyczną i ostatecznie skompensowanie ich w celu korekcji wyników pomiarów. Transport promieniowania to zjawisko fizyczne, w którym promieniowanie z różnych źródeł oddziałuje z obiektami zainteresowania, atmosferą i ich lokalnym otoczeniem, w rezultacie docierając do płaszczyzny detektora jako wypadkowa spektralna luminancja energetyczna.

W zakresie dalekiej podczerwieni dominuje emisja termiczna. Jednak nie dotyczy to tylko bezpośredniej emisji z obiektu zainteresowania, ale obejmuje również emitowane promieniowanie z atmosfery i sąsiadujących obiektów, w tym powierzchni gruntu, które dociera bezpośrednio lub pośrednio do urządzenia pomiarowego.

Dla zakresu LWIR wyróżnia się cztery podstawowe składowe spektralnej luminancji energetycznej, które ostatecznie są odbierane przez sensor:

1. bezpośrednia emisja termiczna obiektu, która przechodzi przez atmosferę do sensora;
2. emisja termiczna atmosfery odbita od obiektu i przechodząca przez atmosferę do sensora;
3. emisja termiczna z gruntu i miejscowych obiektów odbita od obiektu i przechodząca przez atmosferę do sensora;
4. emisja termiczna atmosfery docierająca bezpośrednio do sensora.

Mając do dyspozycji powierzchnie referencyjne o charakterze nieselektywnym i z różnymi, dokładnie zmierzonymi charakterystykami emisyjności spektralnej, możliwe będzie zastosowanie technik kompensacji pomiaru z użyciem kontekstu rejestrowanej sceny.

3. Praktyka

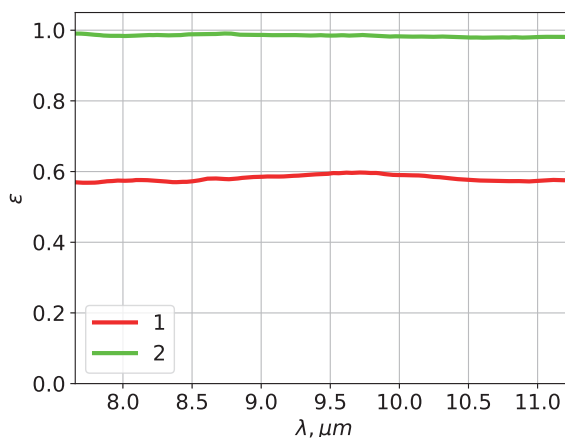
Podczas projektowania powierzchni referencyjnych, skoncentrowano się na wyborze materiału, który cechuje się lekkością, łatwością obróbki i przygotowania. Aby powierzchnie zachowywały się jak ciała szare o różnych wartościach emisyjności, ich charakter emisji promieniowania zarówno własnego jak i odbitego muszą być możliwie zbliżone do lambertowskiego (wartość luminancji energetycznej niezależna od kąta obserwacji).

Ostatecznie jako materiał podstawy powierzchni została wybrana drewniana, nieszlifowana sklejka, ze względu na swoją chropowatość powierzchni. Ta chropowatość, przy użyciu pokryć o różnej wartości emisyjności, nadaje powierzchni właściwości rozpraszające promieniowanie. Ponadto materiał ten ma małą gęstość i jest dostępny w postaci wielkowymiarowych płyt, z których można wykonać łatwe do przenoszenia i łączenia powierzchnie do pozycji celów o ustandaryzowanych wymiarach.

Pomiary wykonywane są na dużych odległościach, dlatego w celu zapewnienia możliwie dużej jednorodności powierzchni, skorzystano ze zjawiska emisyjności wewnętrznej. Biorąc pod uwagę naturalną chropowatość materiału oraz dostępność siatek o małej strukturze, wybrana została siatka z regularną strukturą otworów i przekrojem kwadratów o boku $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ [8], którą nałożono na drewniane płyty. Tak przygotowane obiekty pokryto natryskowo farbami o różnych współczynnikach emisyjności. Do zmierzenia współczynników refleksyjności spektralnej użyto spektroskopu odbiciowego Bruker FTIR ALPHA II.

Na bazie zależności (4) wyznaczone zostały współczynniki emisyjności badanych obiektów. Wizualizując charakterystyki spektralne wybranych obiektów na wykresie, można zaobserwować ich nieselektywny charakter w wybranym zakresie (rys. 1).

Zakres pomiarowy został zawężony do pasma pomiarowego kamery hiperspektralnej, której użyto do pomiarów – TELOPS Hyper-Cam LW, której zakres rejestracji wynosi $7,7\text{--}11,8\ \mu\text{m}$.



Rys. 1. Emisyjność spektralna dwóch obiektów; 1 – pokryta srebrną farbą o małej wartości współczynnika emisyjności; 2 – pokryta czarną farbą o dużej wartości współczynnika emisyjności

Fig. 1. Spectral emissivity of two objects; 1 – coated with silver paint with a low emissivity coefficient; 2 – coated with black paint with a high emissivity coefficient



Rys. 2. Zdjęcie stanowiska pomiarowego z kamerą TELOPS Hyper-Cam LW

Fig. 2. Photograph of the measurement setup with the TELOPS HyperCam LW camera

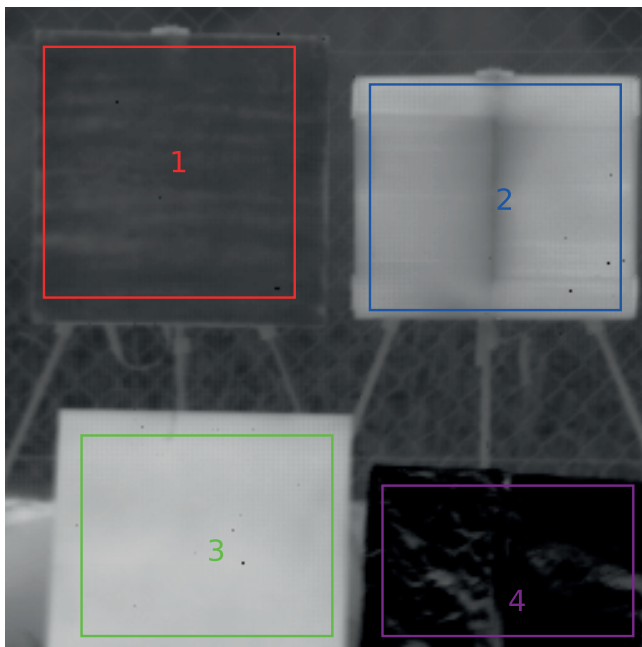
Pomiary przeprowadzono w warunkach terenowych, w celu zapewnienia odpowiedniego kontrastu termicznego jak i sprawdzenia wpływu różnorodnego promieniowania otoczenia na selektywny charakter promieniowania powierzchni. Stanowisko z kamerą pomiarową zostało osłonięte przed promieniowaniem słonecznym bezpośrednio trafiającym do obiektywu kamery. Rejestrowana scena została umiejscowiona w odległości 15 m od płaszczyzny obiektywu. Stanowisko pomiarowe z kamerą przedstawiono na rys. 2.

Na rejestrowanej scenie głównymi obiektami zainteresowania były cztery powierzchnie:

1. srebrna powierzchnia o średniej wartości współczynnika emisyjności (obiekt 1, którego współczynnik emisyjności spektralnej przedstawiono na rys. 1);
2. czarnej powierzchni o dużej wartości współczynnika emisyjności (obiekt 2, którego współczynnik emisyjności spektralnej przedstawiono na rys. 1);
3. płyty ze sklejki pokrytej folią aluminiową o nieregularnej powierzchni;
4. płyty z niebieskiego, karbowanego tworzywa sztucznego.



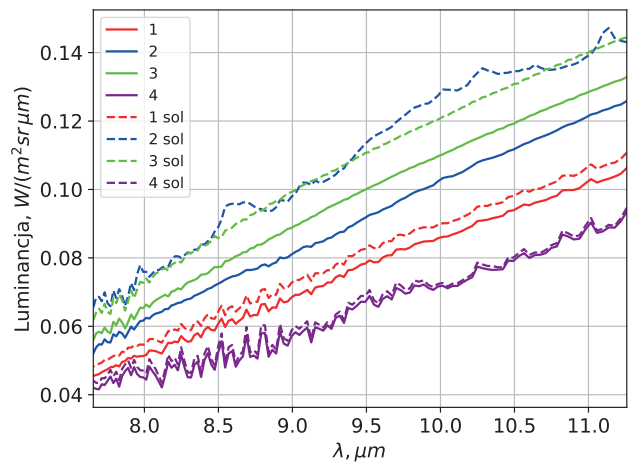
Rys. 3. Widok na rejestrowaną scenę z mierzonymi powierzchniami
Fig. 3. View of the recorded scene with the measured surfaces



Rys. 4. Obraz szerokopasmowy zarejestrowanej sceny po ekspozycji na bezpośrednie promieniowanie słoneczne. 1 – obiekt pokryty farbą srebrną o średniej wartości emisyjności; 2 – obiekt z tworzywa sztucznego; 3 – obiekt pokryty czarną farbą o dużej wartości współczynnika emisyjności; 4 – obiekt pokryty folią aluminiową o niskiej wartości współczynnika emisyjności

Fig. 4. Broadband image of the recorded scene after exposure to direct solar radiation. 1 – object coated with silver paint with a medium emissivity value; 2 – plastic object; 3 – object coated with black paint with a high emissivity coefficient; 4 – object covered with aluminum foil with a low emissivity coefficient

Folia aluminiowa służyła jako powierzchnia referencyjna o bardzo niskiej wartości współczynnika emisyjności spektralnej (0,03–0,05), często stosowanej przy pomiarach emisyjności z użyciem szerokopasmowych kamer termowizyjnych [9]. Tworzywo sztuczne, którego charakterystyka spektralna nie była zmierzona laboratoryjnie, służyło jako selektywna powierzchnia do porównania właściwości przygotowanych powierzchni szarych. Widok rejestrowanej sceny w zakresie widzialnym pokazano na rys. 3.



Rys. 5. Wykres zmierzonych spektralnych rozkładów luminancji energetycznej powierzchni przed (linia ciągła) i zaraz po ekspozycji na bezpośrednie promieniowanie słoneczne (linia przerywana). 1 – obiekt pokryty farbą srebrną o średniej wartości emisyjności; 2 – obiekt z tworzywa sztucznego; 3 – obiekt pokryty czarną farbą o dużej wartości współczynnika emisyjności; 4 – obiekt pokryty folią aluminiową o niskiej wartości współczynnika emisyjności

Fig. 5. Graph of the measured spectral distribution of surface radiance before (solid line) and immediately after exposure to direct solar radiation (dashed line). 1 – object coated with silver paint with a medium emissivity value; 2 – plastic object; 3 – object coated with black paint with a high emissivity coefficient; 4 – object covered with aluminum foil with a low emissivity coefficient

Serie pomiarów przeprowadzono w warunkach względnie dużego zachmurzenia nieba, tak by możliwe było zarejestrowanie sceny przy warunkach zmiennego oświetlenia słonecznego. W badaniu wykonano dwie serie pomiarowe. Pierwsza rejestracja odbyła się przy Słońcu całkowicie zasłoniętym przez chmury, a druga nieco później, po ekspozycji na bezpośrednie promieniowanie słoneczne. Temperatura otoczenia wynosiła 21 °C, a wilgotność powietrza 47,5 %. Obraz szerokopasmowy zarejestrowanej sceny wraz z zaznaczonymi obszarami zainteresowania został przedstawiony na rys. 4.

Wykresy zmierzonych rozkładów spektralnej luminancji energetycznej promieniowania dla obu sytuacji pomiarowych, zostały przedstawione na rys. 5.

Na podstawie otrzymanych wyników można zaobserwować kilka rzeczy. Mierzona luminancja energetyczna z powierzchni aluminiowej zmienia się nieznacznie po ekspozycji na promieniowanie słoneczne, jednak powyżej progu detekcyjnego, co może okazać się nieobojętne przy detekcji obiektów o małej i średniej wartości współczynników emisyjności. Jak wiadomo z prawa przesunięcia Wiena i efektywnej temperatury Słońca wynoszącej ok. 5778 K, maksimum rozkładu gęstości widmowej egzytancji promieniowania słonecznego przypada długości fali około 500 nm. Dlatego w użytym zakresie detekcyjnym 7,7–11,8 μm główną składową będzie promieniowanie własne obiektów oraz promieniowanie otoczenia odbite od obiektów. Wpływ słońca ewidentnie nie jest obojętny jednak w zakresie LWIR i MWIR będzie się przede wszystkim przejawiał jako emisja własna powierzchni ogrzanej przez zaabsorbowaną energię promieniowania słonecznego. Większość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi, którą bierze się pod uwagę przy konstrukcjach wyeksponowanych na promieniowanie słoneczne jest z zakresu 335–2500 nm. Dlatego zjawisko nagrzewania się obiektów i składowa emisji własnej promieniowania dominuje nad składową odbiciową luminancji energetycznej rejestrowanej przez urządzenie pomiarowe.

4. Wnioski

Wyniki pomiarów laboratoryjnych z użyciem spektroskopu odbiciowego są zbieżne z oczekiwaną charakterystyką promieniowania zarejestrowaną za pomocą kamery hiperspektralnej. Właściwości spektralne przygotowanych powierzchni referencyjnych są zbliżone do pożądanej, nieselektywnej charakterystyki. Jednoczesne użycie kilku takich powierzchni, których emisyjność spektralna jest dokładnie znana, umożliwi wyznaczenie składowych promieniowania pochodzącego z otoczenia mierzonej sceny z większą dokładnością. Skonstruowane powierzchnie nie są ciałami szarymi dla zakresu dalekiej podczerwieni, a ich technologia wytwarzania wymaga dopracowania pod kątem powtarzalności. Mimo to ich użyteczność w pomiarach teledetekcyjnych jest niezaprzeczalna.

Wyraźnie można zaobserwować różnicę w odpowiedzi na bezpośrednie promieniowanie słoneczne między powierzchnią wykonaną z tworzywa sztucznego a innymi powierzchniami referencyjnymi. Jest to wynik zarówno selektywnej emisyjności spektralnej tej powierzchni, jak i innych właściwości termicznych, które zależą od gęstości i struktury materiału.

Konieczne będzie uwzględnienie dynamiki nagrzewania się powierzchni badanego obiektu w modelu pomiarowym. Może być to kolejna cecha, która będzie użyteczna w teledetekcji i identyfikacji danego typu materiałów. Z użyciem obiektów o znanych właściwościach termicznych i emisyjnych, będzie możliwe wyznaczenie charakterystycznego pasma, w których te różnice są największe i skonstruowanie kamery do detekcji konkretnych obiektów na podstawie zarówno ich cech przestrzennych, jak i spektralnych.

Bibliografia

1. Roundy J.K., Santanello J.A., *Utility of Satellite Remote Sensing for Land–Atmosphere Coupling and Drought Metrics*, „Journal of Hydrometeorology”, Vol. 18, No. 3, 2017, 863–877, DOI: 10.1175/JHM-D-16-0171.1.
2. Howell J., Menguc M., Siegel R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press, 2016.
3. Ligienza A., Bieszczad G., Sosnowski T., Bartosewicz B., Firmanty K., *Nowatorskie pokrycia powierzchni ciał czarnych dla zakresu dalekiej podczerwieni*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Vol. 25, No. 4, 2021, 77–82, DOI: 10.14313/PAR_242/77.
4. Ligienza A., Sosnowski T., Bieszczad G., Bareła J., *Optoelectronic sensor system for recognition of objects and incidents*, Radioelectronic Systems Conference, Vol. 11442, SPIE, 2020, DOI: 10.1117/12.2565165.
5. Driggers R., Friedman M., Nichols J., *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*. Artech House, 2012.
6. Planck M., *The theory of heat radiation*, „Entropie”, Vol. 144, No. 190, 1900.
7. Kirchhoff G., *Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme*, Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1859, 783–787.
8. Więcek B., Pacholski K., Olbrycht R., Strąkowski R., Kałuża M., Borecki M., Wittchen W., *Termografia i spektrometria w podczerwieni. Zastosowania przemysłowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
9. Polakowski H., Madura H., Firmanty K., Bareła J., *Kamera termowizyjna w pomiarach emisyjności powierzchni metali*, „Pomiary, Automatyka, Komputery w Gospodarce i Ochronie Środowiska”, Vol. 2, No. 5, 2008, 21–23.

Non-selective Reference Surfaces for Hyperspectral Remote Sensing in the Long-Wave Infrared Range

Abstract: This article focuses on the construction of reference surfaces with the desired spectral characteristics similar to a gray body. Using wooden plywood with a rough surface and coatings of various emissivity values, surfaces with non-selective spectral properties were created. The consistency of laboratory measurement results using a reflectance spectrometer with data obtained from a hyperspectral camera was confirmed. By utilizing multiple reference surfaces with precisely known emissivity characteristics, it will be possible to accurately determine the radiation components of the measured scene's surroundings. Although the technology of these surfaces still requires improvement, their usefulness in remote sensing measurements is undeniable. Additionally, differences in response to solar radiation between various reference surfaces provide significant information that can be used in remote sensing and material identification. Incorporating the heating dynamics of the studied objects' surfaces is crucial for accurate measurement modeling.

Keywords: reference surfaces, non-selective spectral properties, gray body, emissivity, hyperspectral camera, remote sensing measurement, material identification, LWIR

mgr inż. Andrzej Ligienza

andrzej.ligienza@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5789-8531

Tytuł inżyniera otrzymał w 2014 r. po ukończeniu kierunku mechatronika ze specjalizacją inżynierii systemów mechatronicznych. Tytuł magistra otrzymał w 2016 r. po ukończeniu kierunku optoelektronika ze specjalizacją inżynieria systemów optoelektronicznych. W 2018 r. objął stanowisko starszego inżyniera w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT.



dr inż. Mariusz Kastek

mariusz.kastek@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7184-5228

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 r. jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2002 r. Zajmuje się problematyką detekcji obiektów w systemach podczerwieni, a także analizą sygnałów i algorytmami detekcji realizowanymi w urządzeniach podczerwieni. Autor i współautor ponad 70 publikacji. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej.



dr inż. Tomasz Sosnowski

tsosnowski@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4082-8366

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów cyfrowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych i programowalnych w technice podczerwieni.



dr inż. Krzysztof Firmanty

krzysztof.firmanty@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9124-6561

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1993 r. pracownik Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Zajmuje się problematyką detekcji obiektów w systemach podczerwieni oraz analizą sygnałów i algorytmami detekcji zaimplementowanymi w urządzeniach podczerwieni. Autor i współautor ponad 60 publikacji. Pracuje jako adiunkt w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej.

