

Rafał DULSKI, Tadeusz PIĄTKOWSKI, Tomasz SOSNOWSKI, Mirosław DĄBROWSKI
 WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ZAKŁAD TECHNIKI PODCZERWIENI I TERMOWIZJI

Metoda komputerowej symulacji sceny termalnej

Dr inż. Rafał DULSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od roku 1994 pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT, obecnie na stanowisku adiunkta w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji. W roku 1998 uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w specjalności optoelektronika. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji. Jego zainteresowania to zastosowania termowizji, komputerowe modelowanie sceny termalnej oraz modelowanie działania urządzeń termodetekcyjnych.

e-mail: rdulski@wat.edu.pl



Dr inż. Tomasz SOSNOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1996 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów mikroprocesorowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych w technice podczerwieni i analizie sygnałów wibroakustycznych. Autor i współautor ponad 20 publikacji.

e-mail: tsosnowski@wat.edu.pl



Dr inż. Tadeusz PIĄTKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej (1981) i Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1984). Od 1995 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 roku. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się zdalnymi pomiarami temperatury, projektowaniem układów optycznych i elektronicznych oraz systemów mikroprocesorowych. Jest autorem i współautorem ponad 30 publikacji.

e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl



Mgr inż. Mirosław DĄBROWSKI

Absolwent Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej (1984). Od 1985 roku pracuje w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji. Jego zainteresowania to zastosowania termowizji, modelowanie sceny termalnej oraz projektowanie zespołów mechanicznych do urządzeń podczerwieni. Współautor kilkudziesięciu publikacji naukowych z dziedziny techniki podczerwieni.

e-mail: mdabrowski@wat.edu.pl



Streszczenie

W artykule opisano metodę komputerowej symulacji i analizy sceny termalnej. Modelowanie układu detekcji, obserwowanego obiektu oraz otoczenia umożliwia wyznaczenie parametrów istotnych z punktu widzenia skuteczności detekcji obiektu w podczerwieni oraz zaprezentowano przykładowe termogramy, będące wynikiem przeprowadzonych symulacji. Wykorzystanie opisanej metody umożliwia uzyskanie odpowiedzi na wiele pytań konstrukcyjnych już na etapie projektowania urządzenia termodetekcyjnego oraz daje możliwość ograniczenia do minimum dróg i czasochłonnych badań eksperymentalnych na rzeczywistych obiektach.

Słowa kluczowe: modelowanie sceny termalnej, sygnatury termalne, symulacje komputerowe

Method of a computer simulation of a thermal scene

Abstract

The paper presents a method for simulation and analysis of a thermal scene. The simulation of detection system and observed object together with surrounding scenery makes it possible to determine several parameters crucial in terms of IR detection efficiency. It answers many questions at the early stage of design of a thermodetection device. Utilization of the method described here also reduces the needs for expensive and time-consuming field tests on real objects.

Keywords: thermal scene modeling, thermal signature, computer simulations

1. Wprowadzenie

Należy sądzić, że obserwowany w ostatnich latach rozwój technologii wytwarzania detektorów podczerwieni spowoduje rozszerzenie zakresu zastosowań techniki podczerwieni o nowe obszary. Jednocześnie pojawi się zapewne zapotrzebowanie na narzędzia wspomagające projektowanie nowoczesnych systemów pracujących w podczerwonym zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego. Do takich narzędzi należy zaliczyć programy symulacji i analizy sceny termalnej. Modelowanie właściwości układu detekcji, obiektu i otoczenia pozwala odpowiedzieć na wiele ważnych pytań konstrukcyjnych już na etapie projektowania urządzenia termodetekcyjnego.

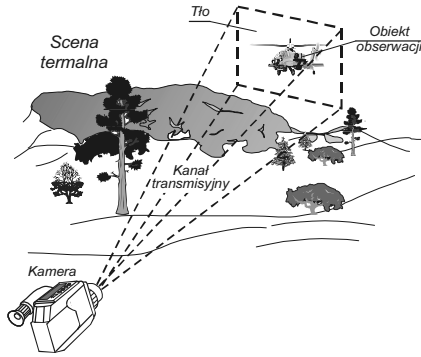
Do najistotniejszych należy ocena możliwego do uzyskania stosunku sygnału do szumu na wyjściu projektowanego urządzenia oraz wybór odpowiedniego sposobu analizy otrzymanego sygnału elektrycznego [1, 2]. Analiza ta może być stosowana zarówno do prostego komparatora sygnału jak i do rozbudowanych algorytmów przetwarzania obrazu np. filtracji pasmowej, erozji czy też konturowania obiektu.

Dostępne komercyjne programy modelujące i symulacyjne nie spełniają wielu oczekiwań konstruktorów sprzętu. Główną tego przyczyną jest wojskowy rodowód tych programów, ze wszystkimi konsekwencjami wynikającymi z tego faktu. Dla przykładu, jeden z nielicznych dostępnych komercyjnie (w krajach należących do NATO), program NVTERM [3] umożliwia wyznaczenie zasięgów urządzenia termodetekcyjnego z uwzględnieniem dużej ilości parametrów urządzenia, ale sam obiekt reprezentowany jest jedynie poprzez kontrast termiczny i dwa wymiary liniowe, co w konsekwencji uniemożliwia analizę obrazową sygnału.

2. Modelowanie zobrazowania termalnego

W opracowanej metodzie i programie symulacyjnym *IR Analysis* [4] uwzględniono najistotniejsze czynniki, mające wpływ na wartości sygnału wyjściowego systemu termodetekcyjnego, tzn. jego układ detekcji oraz scenę termalną obejmującą: obiekt, tło, otoczenie i kanał transmisyjny. Efektem końcowym symulacji jest wyjściowy sygnał elektryczny z układu detekcji lub rozkład wyznaczonych temperatur radiacyjnych. Szkic ilustrujący rozmieszczenie poszczególnych elementów sceny termalnej w procesie symulacji przedstawiono na rys. 1.

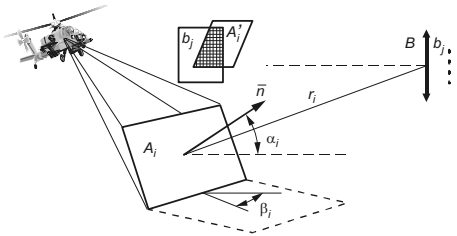
Podczas symulacji wyliczana jest moc promieniowania termicznego docierającego do układu detekcji, pochodząca od tła i obiektu. Symulowany układ detekcji ma formę macierzy $n \times m$ pojedynczych detektorów. Obliczenia wykonywane są oddzielnie dla każdego detektora. Program zapewnia skalowalność układu detekcji w dół. W zależności od przewidywanego zastosowania, a tym samym typu wykorzystywanego detektora, można symulować detektory aż do liczby 2×2 lub 1×2 dla zespołów detekcji np. w systemach ochrony, a nawet 1×1 np. w pirometrach. Dla układów obrazowych liczba detektorów wynika z symulowanej macierzy urządzenia.



Rys. 1. Szkic ilustrujący rozmieszczenie elementów sceny termalnej w procesie symulacji

Fig. 1. Arrangement of objects in the simulated thermal scene

Na promieniowanie ciepłe obiektu składa się promieniowanie jego powierzchni oraz odbite od obiektu promieniowanie otoczenia. Moc promieniowania ciała fizycznego można wyznaczyć na podstawie prawa Plancka przy określonych parametrach promiennych. Rzeczywiste ciała są obiektami przestrzennymi (3D). W procesie wyznaczenia odpowiedzi detektora następuje podział powierzchni obiektu 3D na dostatecznie małe, płaskie wielokąty elementarne nazywane dalej ściankami. Następnie wyliczana jest moc promieniowana emitowanego przez ścianki oraz, po uwzględnieniu wzajemnego położenia w przestrzeni analizowanej ścianki i detektora, obliczenie mocy padającej na detektor. Rys. 2 przedstawia zależności geometryczne między elementami sceny termalnej.



Rys. 2. Szkic ilustrujący zależności geometryczne pomiędzy elementami sceny termalnej

Fig. 2. Geometric relations between elements of the simulated thermal scene

Kąty α , β są kątami między osią optyczną układu detekcji a normalną do powierzchni ścianki obiektu, natomiast r jest odległością między układem detekcji a ścianką. Składowe sygnału na danym detektorze uwzględniają sytuację częściowego pokrycia obrazu ścianki A_i i pojedynczego detektora b_j , czyli taką, gdy na powierzchni jednego detektora tworzony jest obraz z więcej niż jednej ścianki modelu obiektu. Możliwa jest również sytuacja odwrotna, tzn. gdy obraz jednej ścianki jest tworzony na wielu detektorach. Podobną segmentację jak dla obiektu przeprowadzono dla tła. W konsekwencji można również uwzględnić sytuację, gdy na jednym detektorze tworzony jest obraz zarówno ścianki obiektu jak i tła.

2.1. Promieniowanie obiektu i tła

Podstawową wielkością wyliczaną dla każdej ścianki obiektu jest moc emitowanego promieniowania. Zależy ona od temperatury T_i oraz emisyjności spektralnej $\varepsilon_i(\lambda)$ ścianki obiektu. Dla poszczególnych fragmentów obiektu wartość emisyjności oraz charakter jej zmian widmowych mogą się zasadniczo różnić. Wynika to z różnych materiałów występujących na powierzchni, np. karoseria i szyby w samochodzie lub też skóra i odzież dla człowieka. W programie symulacyjnym przyjęto aproksymacje emisyjności spektralnej trzyparametrowymi funkcjami: liniową, wykładniczą oraz potęgową [5].

Od obiektu odbija się promieniowanie ciepłe otoczenia. Moc tego promieniowania wynika z prawa Plancka określonego dla

temperatury otoczenia T_{amb} . Współczynnik odbicia η_i można z kolei wyliczyć na podstawie znajomości emisyjności spektralnej powierzchni obiektu.

Do detektora dociera również promieniowanie tła [6]. Uwzględnienie promieniowania tła polega na wyliczeniu promieniowania od specyficznego rodzaju obiektu, który występuje za płaszczyzną obiektu właściwego. Z tego względu przyjęto, że tło zawsze będzie dzielone na czworokąty elementarne opisane emisyjnością spektralną i temperaturą T_b . Przyjęto także uproszczony model tła opisany tylko temperaturą. Przykładem takiego tła jest bezchmurne niebo [7].

2.2. Sygnał z detektora

Zakres spektralny $\lambda \in \langle \lambda_1, \lambda_2 \rangle$, w którym przeprowadzane są obliczenia wynika z charakterystyki spektralnej detektora, charakterystyki spektralnej okna wejściowego detektora i, jeśli takie występują, układu optycznego oraz filtrów optycznych wprowadzonych w tor optyczny [8].

Całkowity sygnał dla j -tego detektora jest następującą sumą:

$$S_j(T) = S_{o_j}(T) + S_{b_j}(T_b) + S_{e_j}(T_a) + S_n \quad (1)$$

$S_{o_j}(T)$ jest sygnałem pochodzącym od promieniowania cieplnego obiektu, opisanym zależnością:

$$S_{o_j}(T) = \sum_{\forall i: A_i \cap b_j \neq \emptyset} \left\{ \frac{(A_i \cap b_j)}{b_j} k R_{jMax} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \varepsilon_i(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \right. \\ \left. (A_i \cap b_j) \cos \alpha_i \frac{B \cos \beta_i}{r_i^2} \tau_o(\lambda) \tau_{atm}(\lambda) d\lambda \right\} \quad (2)$$

Sygnał ten jest sumą odpowiedzi związanych ze wspólnym obszarem j -tej części detektora oraz obrazów ścianek obiektu $b_j \cap A_i$. Czulość spektralna detektora $R(\lambda)$ ma stałą wartość na całej powierzchni matrycy detektorów. Różnice w czułości między poszczególnymi detektorami matrycy detektorów opisuje czulość maksymalna danego detektora R_{jMax} . Stała k wynika z parametrów układu optycznego oraz toru elektronicznego. Analogicznie obliczane są składowe sygnały pochodzące od promieniowania odbitego od obiektu $S_{b_j}(T_b)$ oraz promieniowania tła $S_{e_j}(T_a)$. Składnik S_n wyraża szumy i zakłócenia elektryczne.

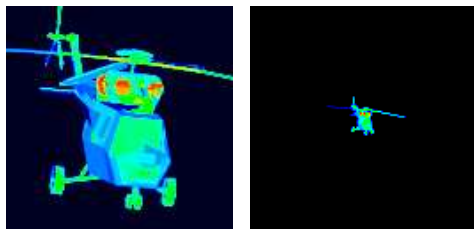
Baza danych programu symulacyjnego zawiera informacje o detektorach najczęściej stosowanych w systemach termodetekcyjnych. Są to charakterystyki spektralne matryc (mikrobolometrycznych, *MCT*, *PtSi*, *InGaAs*) oraz złożonych i pojedynczych detektorów *PbS*, *PbSe*, *InSb* i piroelektrycznych. W bazie dostępne są również charakterystyki przepuszczania typowych filtrów optycznych: dla krótko i długofalowego okna atmosferycznego oraz odcinających promieniowanie widzialne.

3. Wyniki symulacji

Efektem procesu symulacji jest obraz cieplny obserwowanego obiektu w ustalonych warunkach „widziany” przez obserwującego urządzenie termodetekcyjne. Takie obrazy mogą być traktowane jako podstawowe sygnatury obiektu. Wyznaczenie sygnatury obiektu do zastosowań w konkretnym urządzeniu termodetekcyjnym wymaga odpowiedniego przetworzenia obrazów oraz ekstrakcji specyficznych jego cech, możliwych do wykrycia przez dane urządzenie detekcyjne z wysokim prawdopodobieństwem. W praktyce dąży się oczywiście do wyznaczenia możliwie prostej sygnatury obiektu, w celu zapewnienia krótkiego czasu podejmowania przez układ decyzyjny decyzji o wykryciu (rozpoznanie) obiektu oraz w celu zmniejszenia kosztów całego urządzenia. Poniżej zaprezentowano przykładowe termogramy obiektu (śmigłowca) wygenerowane za pomocą oprogramowania *IR Analysis*, prezentujące możliwości metody i oprogramowania.

3.1. Obiekt obserwowany z różnych odległości

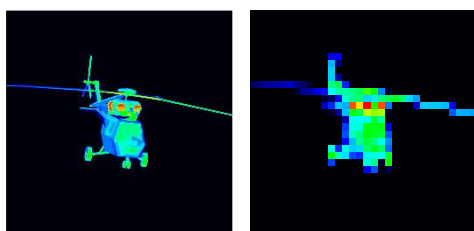
Na rys. 3 pokazano termogramy obiektu dla ustalonego położenia względem obserwującej go kamery. Termogramy pokazują jak zmienia się obraz na detektorze ze zmianą odległości pomiędzy obiektem i kamerą. Obiekt obserwuje wirtualna kamera z matrycą detektorów zawierającą 128x128 elementów w przedziale widmowym 3-5 μ m. Rozmiar pojedynczego detektora matrycy wynosi 200 μ m. Na termogramach występuje sam obiekt na jednorodnym tle o ustalonej temperaturze, znacznie niższej od najniższej temperatury występującej w obiekcie.



Rys. 3. Porównanie termogramów obiektu dla odległości 25m i 150m
Fig. 3. Comparison between thermal images for the distances of 25m and 150m

3.2. Obiekt obserwowany przez matrycę o różnej rozdzielczości

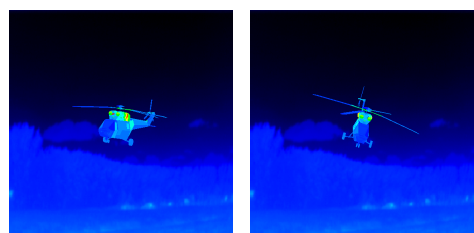
Na rys. 4 pokazano termogramy obiektu dla tej samej odległości i ustalonego położenia obiektu względem obserwującej go kamery. Termogramy pokazują jak zmienia się obraz na detektorze ze zmianą liczby detektorów w matrycy detekcyjnej, przy zachowaniu tego samego pola widzenia matrycy, tzn. zmniejszenie liczby detektorów jest kompensowane proporcjonalnym zwiększeniem ich wymiarów. Na obydwu termogramach pokazano ten sam obiekt na jednorodnym tle o ustalonej temperaturze, znacznie niższej od najniższej temperatury powierzchni obiektu.



Rys. 4. Porównanie termogramów obiektu dla matrycy 256x256 i 32x32
Fig. 4. Comparison between thermal images of the object for 256x256 and 32x32 matrices

3.3. Obiekt obserwowany z różnych kierunków

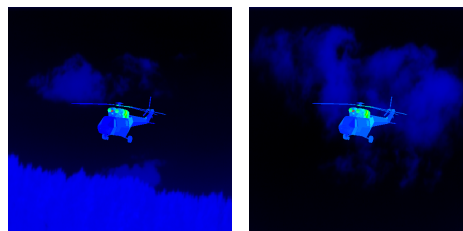
Na rys. 5 pokazano termogramy obiektu na tym samym tle dla ustalonego położenia kamery. Termogramy pokazują jak zmienia się obraz na detektorze ze zmianą położenia obiektu (obrót obiektu) w polu widzenia kamery.



Rys. 5. Porównanie termogramów obiektu obserwowanego z różnych kierunków
Fig. 5. Comparison between thermal images of the object observed from different directions

3.4. Obiekt na różnym tle

Na rys. 6 pokazano termogramy obiektu przy zmieniającym się tle dla ustalonego, stałego położenia kamery i obiektu. Obiekt obserwuje wirtualna kamera z matrycą detektorów zawierającą 256x256 elementów, z odległości 100m w przedziale widmowym 3-5 μ m. Rozmiar pojedynczego detektora matrycy wynosi 100x100 μ m.



Rys. 6. Termogramy obiektu dla dwóch rodzajów tła
Fig. 6. Thermal images of the object for two different types of the background

Przeprowadzona analiza porównawcza termogramów zarejestrowanych kamerą termowizyjną w warunkach poligonowych i odpowiadających tym rejestracjom termogramów wygenerowanym za pomocą oprogramowania symulacyjnego potwierdza poprawność przyjętych założeń i użyteczność metody oraz opracowanego oprogramowania [9].

4. Podsumowanie

Metodę komputerowej symulacji sceny termalnej oraz oprogramowanie *IR Analysis* można z powodzeniem wykorzystać do opracowywania algorytmów decyzyjnych dla systemów rozpoznania zbudowanych w oparciu o matrycowe detektory podczerwieni. Możliwe jest także wykorzystanie oprogramowania do badania skuteczności metod maskowania obiektów w zakresie promieniowania podczerwonego. Metoda i oprogramowanie jest szczególnie przydatne do analizy sceny za pomocą metod przetwarzania obrazu.

5. Literatura

- [1] J.S. Ascetta: The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, vol. 4 Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham (1993).
- [2] G. C. Holst: Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing II. Proceedings of the SPIE, 1488, (1991).
- [3] Night Vision Thermal Imaging System Performance Model, User's Manual & Reference Guide, U.S. Army Night Vision and Electronic Sensor Directorate (2002).
- [4] T. Sosnowski, R. Dulski, T. Piątkowski: Programowa symulacja działania kamery termowizyjnej. Artykuł w tym numerze PAK.
- [5] Opracowanie i weryfikacja trójwymiarowego, komputerowego modelu sygnatur termalnych śmigłowców bojowych na bazie poligonowych rejestracji termograficznych i spektrometrycznych. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczej KBN nr 0 T00A 008 23, Warszawa (2004).
- [6] N. Ben-Yosef, B. Rahat, G. Feigin: Simulations of IR images of natural backgrounds. Applied Optics, 22, 190, (1983).
- [7] A. Ben-Shalom, A.D. Devir, S.G. Lipson: Infrared spectral radiance of the sky. Optical Engineering, 22, 460-463, (1983).
- [8] T. Piątkowski: Metoda bezkontaktowego pomiaru temperatury obiektów o dużej dynamice procesów termicznych. Rozprawa doktorska. Warszawa, BG WAT (2003).
- [9] R. Dulski, T. Niedziela: Verification of the correctness of thermal imaging modeling. Optica Applicata, Vol. XXXI, No 1, 2001, str. 193-202.