

Metoda pomiaru parametrów kamer termowizyjnych za pomocą zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego

Mariusz Mścichowski, Krzysztof Sawicki, Tomasz Sosnowski, Krzysztof Firmanty, Mariusz Kastek, Jarosław Bareła

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

Streszczenie: W celu wykonania precyzyjnych i powtarzalnych pomiarów parametrów kamer termowizyjnych należy wykluczyć błąd ludzki. W tym celu opracowano zautomatyzowane stanowisko do pomiaru parametrów kamer termowizyjnych z możliwością sterowania całkowicie automatycznego, półautomatycznego i manualnego. Wykonane stanowisko umożliwia pracę zdalną za pomocą interfejsu Ethernet lub bezpośredniego połączenia USB. Opracowane oprogramowanie umożliwia sterowanie, rejestrację danych i wyznaczanie parametrów kamer. Stanowisko gwarantuje wysoką jakość i niezawodność pomiarów termowizyjnych, umożliwiając kontrolowane badanie charakterystyk kamer przy minimalnym udziale operatora.

Słowa kluczowe: ciała czarne, automatyzacja pomiarów, stanowisko pomiarowe, systemy termowizyjne

1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój technologii wiąże się ze zwiększonym zapotrzebowaniem na coraz większą liczbę coraz lepszych urządzeń, w tym również kamer termowizyjnych. Kamery termowizyjne, oprócz standardowego pomiaru temperatury ciał mają również zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, np. w medycynie [1–3], astronomii [4, 5] czy techniki: rolnictwie [6, 7], zabezpieczeniach [8, 9] czy geologii [10]. Wykorzystywane są również do nieinwazyjnych badań uszkodzeń, zarówno w stosunkowo małych elementach mieszczących się na stole [11], jak i całych budynków [12]. Wszystko co łączy te dziedziny to ciągły rozwój i zwiększające się wymagania co do precyzji pomiaru. Aby kamera termowizyjna pracowała z wymaganą precyzją, należy urządzenie odpowiednio zaprojektować, przebadać oraz skalibrować w celu ustalenia wszystkich wymaganych współczynników zespołu kamery termowizyjnej. Są to procesy żmudne ale możliwe do zautomatyzowania. W tym celu zaprojektowano specjalnie przygotowane stanowisko do pomiarów parametrów kamer termowizyjnych.

2. Wyznaczanie podstawowych parametrów dla matrycy detektorów

Jednym z najważniejszych elementów kamery termowizyjnej jest matryca detektorów podczerwieni. Od parametrów związanych z zastosowaną matrycą oraz od związanych z nią układów elektronicznych i optycznych zależy jakość uzyskanego termogramu. Dlatego bardzo ważne jest wyznaczanie podstawowych parametrów dla matrycy detektorów. Generalnie dla kamer termowizyjnych są wyznaczane trzy główne parametry do których należą MRTD (ang. *Minimum Resolvable Temperature Difference*), NETD (ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*) oraz FPN (ang. *Fixed Pattern Noise*). Standardowo wyznaczanie tych parametrów jest związane najczęściej z obecnością tzw. wyszkolonego obserwatora. W związku z tym zautomatyzowanie procesu wyznaczania parametrów kamery termowizyjnej wymaga zmiany sposobu ich wyznaczania. W opracowywaniu sposobu wyznaczania parametrów należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność obliczeń numerycznych oraz na wykrywanie i zautomatyzowaną reakcję na wystąpienie niewłaściwych danych wejściowych (zarejestrowanych z kamery) i błędnych wartości obliczeń.

2.1. Metoda pomiaru mocy równoważnej szumom NETD

Moc równoważna szumom NETD to parametr wykorzystywany w termowizji do określenia możliwości reakcji detektora na małe zmiany temperatury. NETD jest istotne w ocenie jakości detektorów termowizyjnych, ponieważ wpływa na zdolność detektora do rozpoznawania małych różnic temperatur na termogramie. Im niższa wartość NETD, tym lepiej detektor radzi sobie z wykrywaniem subtelnych zmian temperatury, co

Autor korespondujący:

Mariusz Mścichowski, mariusz.mscichowski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 17.07.2023 r., przyjęty do druku 23.04.2023 r.



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

przekłada się na lepszą jakość termogramu i bardziej precyzyjne pomiary.

W celu wyznaczenia szumów czasowych wysokiej częstotliwości NETD należy przeprowadzić pomiary wartości skutecznej napięcia sygnału szumu przestrzennego U_n , wartości napięcia sygnału pochodzącego od testu U_2 o temperaturze T_2 , oraz wartości napięcia sygnału pochodzącego od tła U_1 o temperaturze T_1 . Zarówno test, jak i jego tło powinno charakteryzować się dużym współczynnikiem emisyjności. Różnica temperatury tła T_1 i temperatury testu T_2 nie powinna być większa niż kilka stopni. Badane urządzenie powinno być tak ustawione, aby otrzymać centralnie położony termogram testu na jego ekranie. Szum czasowy wysokiej częstotliwości NETD wyznaczony jest na podstawie wyników pomiarów według wzoru [13, 14]:

$$\text{NETD} = \frac{|T_2 - T_1| U_n}{|U_2 - U_1|} \quad (1)$$

gdzie: NETD – rozdzielczość temperaturowa, T_1 – temperatura tła, T_2 – temperatura testu, U_n – wartość skuteczna szumów, U_1 – wartość sygnału tła, U_2 – wartość sygnału testu.

Ze względu na to, że opisany sposób wyznaczania NETD nie może zostać łatwo zautomatyzowany, należy go zmodyfikować. W tym celu parametr NETD dla detektora (m, n) matrycy jest określony wzorem:

$$\text{NETD}(m, n) = \frac{\text{noise}(m, n)}{R(m, n)}. \quad (2)$$

gdzie: $R(m, n)$ – czułość matrycy detektora (m, n) , $\text{noise}(m, n)$ – wartość skuteczna szumu detektora (m, n) , m – numer wiersza, n – numer kolumny.

Czułość matrycy detektorów wyznacza się przez pomiar odpowiedzi detektorów matrycy na termogram z powierzchniowego źródła promieniowania mającego cechy ciała doskonale czarnego w dwóch różnych temperaturach T_1 i T_2 . Wówczas czułość każdego detektora matrycy można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$R(m, n) = \frac{V(m, n, k, T_2) - V(m, n, k, T_1)}{T_2 - T_1}, \quad (3)$$

gdzie $V(m, n, k, T)$ oznacza sygnał napięciowy odczytany z detektora położonego w m -tym wierszu i n -tej kolumnie na k -tym termogramie (ramce), który został wywołany promieniowaniem obiektu o temperaturze T .

Wartość skuteczną szumu danego detektora matrycy można wyznaczyć przez obliczenie pierwiastka kwadratowego wariancji sygnału odczytanego dla kolejnych chwil czasowych. Zakłada się, że natężenie promieniowania padającego na detektor jest niezmiennie w czasie pomiaru. Dla termogramów dyskretnych w czasie wartość skuteczną szumu detektora położonego w m -tym wierszu i n -tej kolumnie jest określona jako pierwiastek kwadratowy nieobciążonego estymatora wariancji i jest wyrażona równaniem:

$$\text{noise}(m, n) = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [V(m, n, k) - \bar{V}(m, n)]^2}, \quad (4)$$

gdzie $V(m, n)$ jest wartością średnią odpowiedzi detektora położonego w m -tym wierszu i n -tej kolumnie określona wzorem (5).

$$\bar{V}(m, n, T) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K V(m, n, k, T), \quad (5)$$

Parametr NETD dla matrycy detektorów jest określony jako średni NETD detektorów matrycy za pomocą wzoru:

$$\text{NETD}_{FPA} = \frac{1}{N_{VR}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{NETD}_{VR}(m, n), \quad (6)$$

gdzie: $\text{NETD}_{VR}(m, n)$ – wartość NETD dla detektora, który nie jest uważany jako detektor uszkodzony, N_{VN} – liczba nieuszkodzonych detektorów.

2.2. Wyznaczania charakterystyki minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur MRTD

Charakterystyka minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur MRTD to parametr używany w termowizji do określenia minimalnej różnicy temperatur, która może być rozpoznawana przez detektor termowizyjny. Jest to miara zdolności detektora do rozróżniania małych detali na termogramie w zależności od różnicy temperatur między tymi detalami a tłem.

Procedura wyznaczenia charakterystyki minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur MRTD urządzeń termowizyjnych jest procedurą opracowaną na podstawie wymogów normy NATO STANAG no. 4349 [15]. Charakterystyka minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur MRTD jest definiowana jako zależność minimalnej różnicy temperatury pasków testu czteropaskowego i temperatury tła, zapewniającej rozróżnienie wszystkich pasków testów przez obserwatora, od częstości przestrzennej testu.

W celu wyznaczenia charakterystyki MRTD prowadzi się pomiar minimalnej różnicy temperatury pasków testu i temperatury tła, przy której obserwator jest w stanie rozróżnić wszystkie cztery paski testu. Obserwator może w trakcie badań optymalizować wartości wzmocnienia toru elektronicznego, jaskrawość ekranu, oraz inne mechanizmy regulacji w ramach ograniczeń istniejących w realnych warunkach pracy, natomiast czas obserwacji nie jest ograniczony.

Badania są przeprowadzone najpierw dla dodatniej różnicy temperatury pasków testu względem temperatury tła, a następnie dla ujemnej różnicy. Określa się różnice temperatur, przy których obserwator zaczyna rozróżniać wszystkie paski testu. Końcowe wartości MRTD otrzymane dla pojedynczego obserwatora wyznacza się według wzoru [15]:

$$\text{MRTD}(v) = \frac{\Delta T_+(v) - \Delta T_-(v)}{2}, \quad (7)$$

gdzie: MRTD – minimalna rozpoznawalna różnica temperatur w funkcji częstości przestrzennej, $\Delta T_+(v)$ – dodatnia różnica temperatur między słupkami testowymi a temperaturą tła w odniesieniu do momentów, w których obserwator zaczyna rozróżniać słupki testowe, $\Delta T_-(v)$ – ujemna różnica temperatur między słupkami testowymi a temperaturą tła w odniesieniu do momentów, w których obserwator zaczyna rozróżniać słupki testowe.

Opisany sposób wyznaczania MRTD nie może zostać zautomatyzowany, ponieważ do jego wyznaczenia niezbędny jest wyszkolony obserwator. W związku z tym, do pomiaru MRTD za pomocą zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego zastosowano metodę pomiaru MRTD w funkcji rozogniskowania układu optycznego. Szczegółowa metoda pomiaru została zaprezentowana w literaturze [16].

2.3. Wyznaczanie współczynników korekcji niejednorodności

Zastosowane w kamerach termowizyjnych matryce detektorów podczerwieni zwracają informację w postaci sygnału elektrycznego. Matryca detektorów charakteryzuje się pewną niejednorodnością odpowiedzi poszczególnych detektorów na takie samo wymuszenie (moc padającego promieniowania podczerwonego). Efektem niejednorodności jest występowanie w termogramie generowanym przez matrycę tzw. stałego wzoru szumu FPN. Niejednorodność odpowiedzi matrycy jest powodowana rozrzutem technologicznym parametrów matrycy. Układ odczytu zintegrowany z matrycą zwykle nie realizuje funkcji korekcji niejednorodności NUC (ang. *Non-Uniformity Correction*). W związku z tym korekcja NUC jest wykonywana za pomocą zewnętrznego układu. Najczęściej stosowaną metodą korekcji niejednorodności to korekcja dwupunktowa.

Dwupunktowa korekcja niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów polega na skorygowaniu wartości każdego detektora za pomocą równania:

$$V^*(m, n, k, T) = G(m, n) \cdot V(m, n, k, T) + O(m, n). \quad (8)$$

gdzie: $G(m, n)$ – współczynniki korekcji wzmocnienia, $O(m, n)$ – współczynniki korekcji przesunięcia.

W celu wyznaczenia współczynników korekcji $G(m, n)$ i $O(m, n)$ należy rozwiązać następujący układ równań:

$$\begin{cases} \tilde{V}(T_1) = G(m, n) \cdot \bar{V}(m, n, T_1) + O(m, n) \\ \tilde{V}(T_2) = G(m, n) \cdot \bar{V}(m, n, T_2) + O(m, n) \end{cases}, \quad (9)$$

gdzie: $\bar{V}(m, n, T)$ – wartość odpowiedzi detektora (m, n) będąca skutkiem padającego na niego promieniowania pochodzącego od obiektu o temperaturze T , $\tilde{V}(T_1)$ – oczekiwana odpowiedź detektora na skutek padającego na niego promieniowania pochodzącego od obiektu o temperaturze T .

Odejmując stronami równania układu równań (9) oraz dokonując przekształceń otrzymujemy następujący wzór:

$$G(m, n) = \frac{\tilde{V}(T_2) - \tilde{V}(T_1)}{\bar{V}(m, n, T_2) - \bar{V}(m, n, T_1)}. \quad (10)$$

Przekształcając pierwsze równanie układu (9) otrzymujemy:

$$O(m, n) = \tilde{V}(T_1) - G(m, n) \cdot \bar{V}(m, n, T_1). \quad (11)$$

Do tak otrzymanego równania wstawiamy za G równanie (10) oraz przekształcając otrzymujemy wzór:

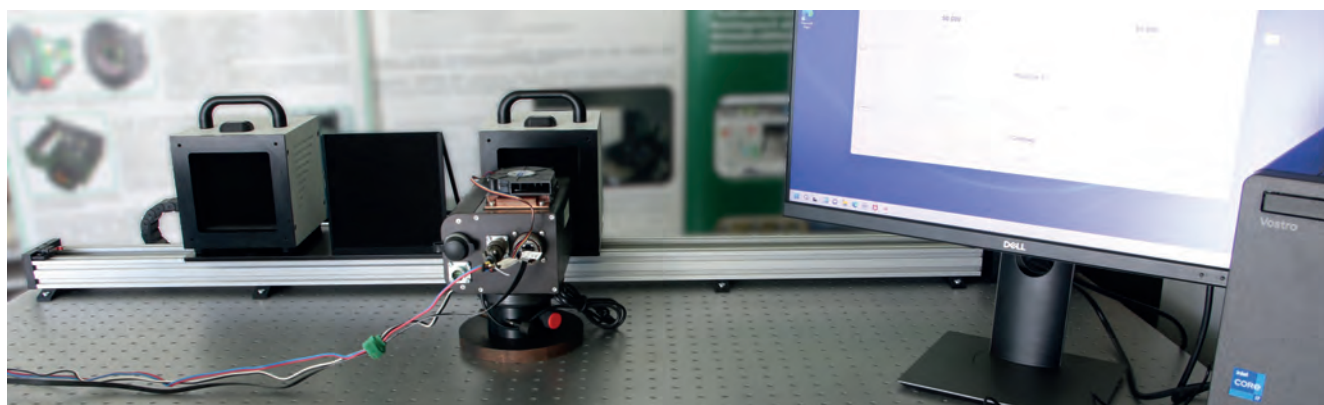
$$O(m, n) = \frac{\tilde{V}(T_1)\bar{V}(m, n, T_2) - \tilde{V}(T_2)\bar{V}(m, n, T_1)}{\bar{V}(m, n, T_2) - \bar{V}(m, n, T_1)} \quad (12)$$

3. Budowa stanowiska

Wykonywanie wielu pomiarów jest czasochłonne i obciążone ryzykiem wystąpienia błędów spowodowanych przez czynnik ludzki. Aby temu zapobiec zostało opracowane specjalne zautomatyzowane stanowisko do pomiarów parametrów kamer termowizyjnych. Zautomatyzowane stanowiska pomiarowe są niezwykle ważnym narzędziem w dziedzinie oceny jakości i kalibracji kamer termowizyjnych [17]. Pozwalają na dokładne badanie różnych parametrów i charakterystyk kamer termowizyjnych w sposób powtarzalny i kontrolowany. Dzięki temu możliwe jest zapewnienie wysokiej jakości i niezawodności tych urządzeń. Ponadto, opracowane stanowisko pomiarowe jest prawie całkowicie bezobsługowe, co znacznie przyspiesza wykonywanie pomiarów kalibracyjnych. Stanowisko składa się z elementów:

- technicznych ciał czarnych z możliwością nastaw temperatur,
- ciała czarnego o temperaturze otoczenia,
- stołu optycznego z blatem z otworami montażowymi w postaci siatki ortogonalnej otworów co 25 mm,
- przewodnicy ze śrubą kulową wraz z wózkiem podwójnym,
- kontrolera przewodnicy liniowej,
- stołu optycznego,
- komputera z oprogramowaniem sterującym.

Stanowisko umożliwia pracę całkowicie zdalną przez zaprogramowanie odpowiednich parametrów wewnątrz zainstalowanego kontrolera oraz sterowanie zewnętrzne przy zastosowaniu interfejsu komunikacyjnego USB lub/i Ethernet w celu sparowania stanowiska z własnym oprogramowaniem. Takie rozwiązanie umożliwia pracę automatyczną w procesach powtarzalnych lub podczas pojedynczych, często zmiennych pomiarów. Podstawowym interfejsem komunikacyjnym wykorzystywanym na przedstawionym stanowisku jest Ethernet. Testowane kamery jak i wykorzystane ciała czarne również komunikują się w ten sposób, co przyspieszyło wykonanie oprogramowania do sterowania zestawem z miejsca dogodnego dla osoby użytkującej sprzęt. Ważnym składnikiem stanowiska służącego do określania parametrów kamer termowizyjnych są powierzchnie techniczne ciała czarnego. Ciała te mają za zadanie generować równomierne



Rys. 1. Zdjęcie stanowiska do pomiaru parametrów kamer termowizyjnych
Fig. 1. Image of the test bench for measuring thermal camera's parameters

Tabela 1. Podstawowe parametry technicznego ciała czarnego opracowanego i wykonanego w IOE WAT

Table 1. Basic parameters of the technical blackbody developed and manufactured at IOE WAT

Nazwa parametru	Wartość
Powierzchnia ciała czarnego	100 mm × 100 mm
Zakres stabilizacji temperatury absolutnej	15–80 °C
Średnia emisyjność kierunkowa pod kątem 20°	0,985
Średnia emisyjność kierunkowa pod kątem 60°	0,973
Średnia emisyjność hemisferyczna	0,944
Dokładność ustawiania temperatury	0,01°C

Tabela 2. Podstawowe parametry technicznego ciała czarnego opracowanego i wykonanego w IOE WAT

Table 2. Basic parameters of the technical blackbody developed and manufactured at IOE WAT

Nazwa parametru	Wartość
Powierzchnia ciała czarnego	148 mm × 148 mm
Średnia emisyjność kierunkowa pod kątem 20°	0,985
Średnia emisyjność kierunkowa pod kątem 60°	0,973
Średnia emisyjność hemisferyczna	0,944

promieniowanie podczerwone, które oświetla matrycę detektorów badanej kamery termowizyjnej. Jednocześnie strumień generowanego promieniowania zależy od temperatury ciała czarnego. Dlatego też ciało czarne musi charakteryzować się wysokim współczynnikiem emisyjności oraz bardzo dobrą stabilnością utrzymywanej temperatury. W Tabeli 1 przedstawione zostały wybrane parametry wykorzystanego technicznego ciała czarnego.

W celu umożliwienia automatycznej zmiany ciała czarnego, obserwowanego przez kamerę termowizyjną, zastosowano stolik wyposażony w programowalny kontroler. Ten stolik pełni rolę kompletnego urządzenia do realizacji modułu przemieszczeń liniowych. Konstrukcja modułu oparta jest na profilu aluminiowym, przewodnicy liniowej oraz dwóch wózkach. Moduł jest napędzany silnikami krokowym, a ruch obrotowy kół zębatych przekształcany jest na ruch liniowy za pomocą śruby trapezowej, która nie rozciąga się w porównaniu do standardowo wykorzystywanych pasków zębatych. Rozdzielczość pozycjonowania wynosi 0,01 mm. Takie rozwiązanie gwarantuje precyzyjne i powtarzalne pozycjonowanie. Na płycie optycznej modułu przemieszczeń liniowych zaprojektowane zostały otwory w rozstawie 25 mm, umożliwiające precyzyjne mocowanie ciał czarnych i innych wymaganych elementów. Sterowanie silnikiem modułu odbywa się za pośrednictwem wbudowanego kontrolera, który umożliwia ustalenie dowolnego położenia wózka w całym zakresie pracy przewodnicy. Kontroler realizuje przesyłane polecenia sterujące przez interfejs USB i Ethernet we współpracy z oprogramowaniem sterującym lub oprogramowaniem zewnętrznym.

Na stanowisku zamontowane zostało również ciało czarne referencyjne o temperaturze otoczenia. Jego parametry przedstawione zostały w Tabeli 2. Dzięki temu rozwiązaniu jesteśmy w stanie sprawdzić poprawność wyznaczonych parametrów korekcji kamer termowizyjnych. Na wózkach zaprojektowano płytę optyczną z otworami w standardowej siatce ortogonalnej o rozstawie 25 mm, co pozwala na dodatkowy montaż wymaganych ustandaryzowanych elementów.

Jednym z najbardziej istotnych elementów zautomatyzowanego stanowiska do pomiaru parametrów kamer termowizyjnych

jest oprogramowanie. Ze względu na unikalność zastosowanych na stanowisku sposobów analizy i przetwarzania danych nie można było zastosować dostępnego oprogramowania. W związku z tym, całe oprogramowanie zostało opracowane w ramach prac nad tym stanowiskiem pomiarowym. Składa się ono z trzech modułów funkcjonalnych realizujących następujące zadania:

- sterowanie wszystkimi elementami stanowiska pomiarowego,
- rejestracja i wstępne przetwarzanie danych pomiarowych,
- wyznaczenie parametrów kamery termowizyjnej.

Sterowanie elementami stanowiska polega na m.in. ustawianiu parametrów ciał czarnych, sterowaniu stolikiem umożliwiające przemieszczanie ciał itp. Sposób sterowania jest bardzo istotny ze względu na konieczność osiągnięcia automatyzacji pomiarów i rejestracji. W tym celu oprogramowanie musi nie tylko ustawiać parametry poszczególnych elementów stanowiska, ale dokonywać tego w wymaganej kolejności oraz w odpowiednim czasie. W związku z tym, zostały opracowane scenariusze badawcze, które realizowało oprogramowanie. Algorytm przykładowego scenariusza służącego do wyznaczania współczynników został przedstawiony na rys. 2.

Rejestracja i wstępne przetwarzanie danych jest zasadniczym etapem pomiaru. Dane zebrane podczas rejestracji służą do wyznaczenia parametrów kamery termowizyjnej. Podstawowa trudność rejestracji jest związana z terminowością wykonania rejestracji, wstępnego przetwarzania i zapisania danych na dysku. Terminowość pomiarów należy rozpatrywać w dwóch aspektach. Po pierwsze rejestracja musi zostać przeprowadzona w ściśle określonym momencie, w którym zostały poprawnie ustawione wszystkie parametry elementów stanowiska. W związku z tym rejestracja pomiarów musi zostać przewidziana w scenariuszu pomiarowym. Drugi aspekt terminowości jest związany z ilością rejestrowanych danych. Na stanowisku większość rejestrowanych danych to dane w postaci sekwencji termogramów. W związku

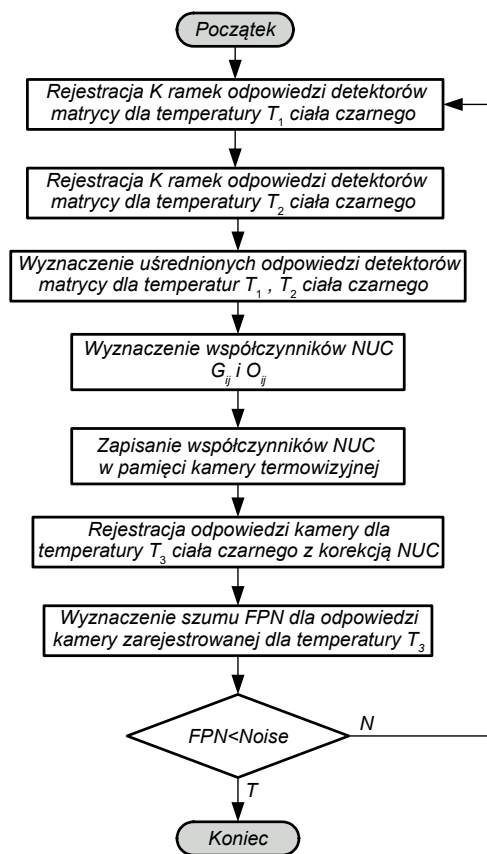
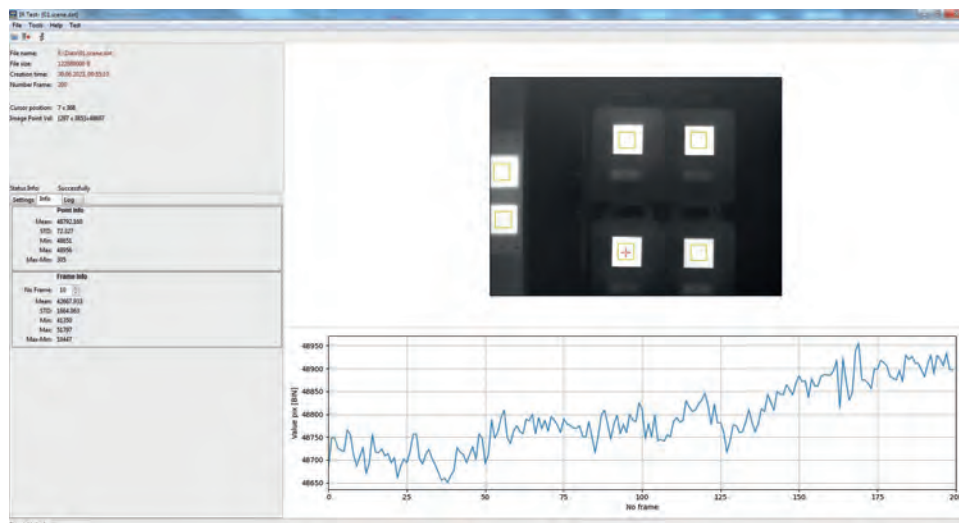
**Rys. 2. Algorytm przykładowego scenariusza do wyznaczania współczynników NUC**

Fig. 2. Example of NUC coefficient determination algorithm



Rys. 3. Widok przykładowego okna oprogramowania do wyznaczenie parametrów kamery termowizyjnej dla różnych rejonów zainteresowania

Fig. 3. Exemplary view of the thermal camera's service software window to adjust parameters for different regions of interest

z tym, należy w krótkim czasie zapisać dużą ilość informacji. Rejestracja danych jest o tyle krytyczna, ponieważ żadna dana nie może zostać utracona lub pominięta. Pominięcie jakiegokolwiek danej musi zostać przez oprogramowanie wykryte, a zarejestrowane dane uznane jako niewiarygodne. Dane termograficzne z kamery termowizyjnej są rejestrowane przez oprogramowanie z zastosowaniem interfejsu Ethernet. Zastosowanie tego interfejsu umożliwia przesyłanie danych do komputera bez konieczności użycia dodatkowego sprzętu.

Kończącym etapem działania stanowiska jest wyznaczenie parametrów kamery termowizyjnej. Operacja jest mniej krytyczna ze względu na czas, jednak wymaga dużej dokładności obliczeń. Ze względu na ilość przetwarzanych danych najczęściej nie jest możliwy bezpośredni nadzór i ocena badacza. Z tego powodu należy opracować metody obliczeniowe charakteryzujące się małymi błędami numerycznymi oraz odporne na krytyczne błędy np. dzielenie przez zero.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy ekran oprogramowania realizującego wyznaczenie parametrów kamery termowizyjnej dla różnych rejonów zainteresowania.

4. Podsumowanie

W wyniku realizacji prac badawczych zostały opracowane metody pomiaru takich parametrów kamer termowizyjnych takich jak MRTD, NETD oraz korekcja niejednorodności odpowiedzi detektorów matrycy. Metody zostały zoptymalizowane w celu umożliwienia zautomatyzowanego pomiaru na specjalnie do tego celu opracowanym stanowisku. W ramach testowania stanowiska wykonano pomiary parametrów kamery termowizyjnej opracowanej na bazie detektora mikrobolometrycznego PICO640 Gen2 firmy LYNRED. Podstawowe parametry badanej kamery zostały przedstawione w tabeli 3.

W wyniku przeprowadzonych rejestracji danych na stanowisku pomiarowym udało się wyznaczyć wartości wszystkich zamierzonych parametrów zarówno matrycy detektorów oraz całej kamery. Przykładowe wyniki rejestracji zostały przedstawione na rysunkach 4, 5, 6 i 7.

Pomiary tych samych parametrów, tej samej kamery termowizyjnej zostały przeprowadzone w Laboratorium Akredytowanym Instytutu Optoelektroniki WAT na stanowisku pomiarowym METS-S-12. Stanowisko to składa się z: wzorca promieniowania podczerwieni, sterownika wzorca promieniowania, obrotowej

tarczy z zestawem testów, kolimatora podczerwieni, komputera wraz z oprogramowaniem i kartą video. W wyniku porównania rezultatów stwierdzono, że wartości NETD obiema metodami różnią się o ok. 3 mK (46 mK dla opracowanej metody, i 49 mK dla stanowiska METS-S-12). Wyznaczone niejednorodności resztkowe różnią się poniżej 0,6 %, zaś charakterystyki MRTD uzyskane obydwoma metodami są zbliżone.

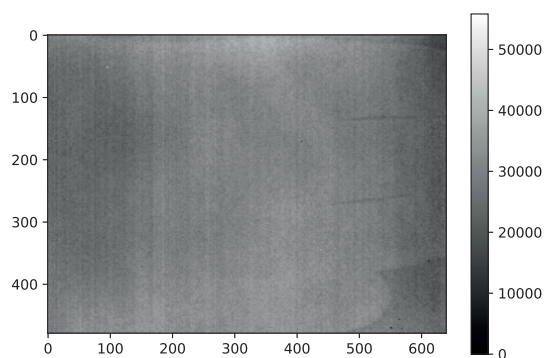
Tabela 3. Parametry kamery termowizyjnej

Table 3. Thermal camera parameters

Nazwa parametru	Wartość
Zakres widmowy LWIR	8–14 μm
Rozdzielczość	640 px \times 480 px
Wielkość detektora	17 μm
Częstotliwość ramki	30 Hz
Ogniskowa	19 mm
Kąty pola widzenia	32° \times 24°
F – number (liczba otworowa)	F/1.0
Transmisja obiektywu	> 94 %

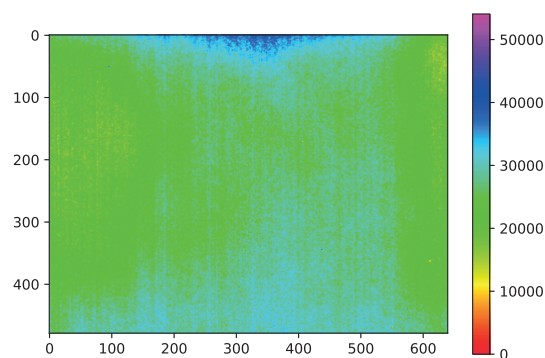
Dla obu sposobów pomiaru parametrów kamery wyznaczono niepewności wyniku pomiaru zgodnie z wytycznymi określającymi model matematyczny procesu pomiarowego, w którym wielkości wejściowe reprezentują wszystkie istotne źródła błędów [18, 19] (np. dokładność i stabilność ciała doskonale czarnego, wahania temperatury otoczenia). Przykładowo dla obu metod pomiaru MRTD niepewność rozszerzona nie przekraczała 0,02 K.

Niezaprzeczalną zaletą stanowiska jest znaczna automatyzacja pomiarów i wyznaczania parametrów, uzyskaną głównie przez zastosowanie autorskiego oprogramowania do sterowania, rejestracji i obliczania wartości parametrów. Oprogramowanie pozwala na wielokrotne powtarzanie pomiarów z dużą wiarygodnością oraz zmniejszenie wpływu błędów popełnianych przez człowieka. Opracowane metody i stanowisko umożliwiają symulowanie różnych warunków pomiarowych. Pozwala to na



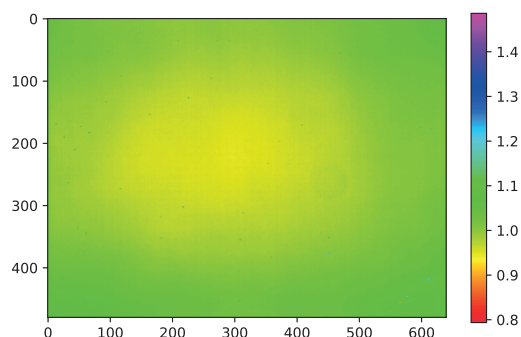
Rys. 4. Termogram zarejestrowany kamerą termowizyjną przed korekcją

Fig. 4. Thermal image before correction



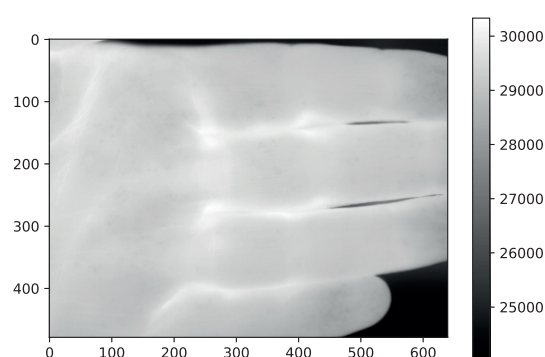
Rys. 5. Rozkład współczynników korekcji offsetu wyznaczone dla badanej kamery

Fig. 5. Distribution of the correction coefficients' offsets determined for the tested camera



Rys. 6. Rozkład współczynników korekcji wzmocnienia $G(m, n)$ wyznaczone dla badanej kamery

Fig. 6. Distribution of the gain correction coefficients $G(m, n)$ determined for the tested camera



Rys. 7. Termogram po zastosowaniu korekcji offsetu i wzmocnień

Fig. 7. Thermogram after applying offset and gain corrections

ocenę jakości i porównanie badanych kamer termowizyjnych pod kątem bardzo wielu parametrów.

Podziękowania

Badania współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Ścieżka dla Mazowsza w projekcie pt. „FOTONICA (Fully-automated Optoelectronic System for Noninvasive Imaging in Clinical Applications) – Sztuczna Inteligencja wspomagająca zaawansowane rozwiązania fotoniczne w automatycznych diagnostycznych systemach medycznych” umowa nr MAZOWSZE/0167/19-00. Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 724/2022.

Bibliografia

- Machoy M., Szyszka-Sommerfeld L., Rahnama M., Koprowski R., Wilczyński S., Woźniak K., *Diagnosis of temporomandibular disorders using thermovision imaging*, “Pain Research and Management”, 2020, DOI: 10.1155%2F2020%2F5481365.
- Fricova J., Janatova M., Anders M., Albrecht J., Rokyta R., *Thermovision: a new diagnostic method for orofacial pain?* “Journal of Pain Research”, Vol. 11, 2018, 3195–3203, DOI: 10.2147%2FJPR.S183096.
- Wideł M.P., Masarczyk W., Grzegorzczyn S., *Thermovision analysis of the surface of the lower limbs in patients with symptomatic lumbosacral discopathy before and after surgery*, “Polish Annals of Medicine”, Vol. 29, No. 1, 2022, DOI: 10.29089/2020.20.00160.
- Roelfsema P.R., Shibai H., Armus L., Arrazola D., Audard M., Audley M., Bradford C., Charles I., Dieleman P., Doi Y. i in., *SPICA—a large cryogenic infrared space telescope: unveiling the obscured universe*, “Publications of the Astronomical Society of Australia”, Vol. 35, 2018, DOI: 10.1017/pasa.2018.15.
- Veenendaal I., Naylor D., Gom B., Christiansen A., Jellema W., Feenstra C., Ridder M., Eggens M., Ade P., *An angle-scanned cryogenic Fabry–Pérot interferometer for far-infrared astronomy*, “Review of Scientific Instruments”, Vol. 91, No. 8, 2020, DOI: 10.1063/5.0012432.
- Klapp I., Yafin P., Oz N., Brand O., Bahat I., Goldshtein E., Cohen Y., Alchanatis V., Sochen N., *Computational end-to-end and super-resolution methods to improve thermal infrared remote sensing for agriculture*, “Precision Agriculture”, Vol. 22, 2021, 452–474, DOI: 10.1007/s11119-020-09746-y.
- Ranilović B., Cukrov A., Boras I., Svačić S., Zovko M., *Infrared Thermography as a Prediction Tool for the Irrigation Requirement in Agriculture*, “Transactions of FAMENA”, Vol. 45, No. SI-1, 2021, 23–34, DOI: 10.21278/TOF.SI1006621.
- Gršić J.Z., Jurečić D., Golubić L.T., Žiljak V., *Hidden Information in Uniform Design for Visual and Near-Infrared Spectrum and for Inkjet Printing of Clothing on Canvas to Enhance Urban Security*, “Applied Sciences”, Vol. 12, No. 4, 2022, DOI: 10.3390/app12042152.
- Liu Q., Yuan D., Fan N., Gao P., Li X., He Z., *Learning dual-level deep representation for thermal infrared tracking*,

- “IEEE Transactions on Multimedia”, Vol. 25, 2022, 1269–1281, DOI: 10.1109/TMM.2022.3140929.
10. Yang C.S., Jin F., Trivedi S., Brown E., Hömmerich U., Nemes L., Samuels A.C., *In situ chemical analysis of geology samples by a rapid simultaneous ultraviolet/visible/near-infrared (UVN) + longwave-infrared laser induced breakdown spectroscopy detection system at standoff distance*, “Optics Express”, Vol. 27, No. 14, 2019, 19 596–19 614, DOI: 10.1364/OE.27.019596.
 11. Pastuszek P., *Termografia aktywna w analizie uszkodzeń cylindrycznych struktur kompozytowych*; “Przegląd Spawalnictwa”, R. 86, Nr 11, 2014.
 12. Noszczyk P., Nowak H., *Termografia aktywna jako nowoczesna metoda badań elementów żelbetowych*, „Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury”, Vol. 63, Nr 3, 2016, 279–286, DOI: 10.7862/rb.2016.211.
 13. Holst G.C., *Electro-optical imaging system performance*, Sixth Edit. Washington: Society of Photo Optical, 2017, ISBN: 978-1-5106-1102-3, DOI: 10.1117/3.2588947.
 14. Bareła J., Firmanty K.L., Kastek M.W., Długaszek A., *Stanowiska do pomiaru podstawowych parametrów kamer termowizyjnych spełniające wymagania metrologiczne WP*, „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej”, T. 61, Nr 2, 2012, 81–91.
 15. NATO, *STANAG 4349*, NATO Standardization Agency, 1995.
 16. Gogler S., Sawicki K., Ligienza A., Mścichowski M., *Metoda pomiaru minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatury w funkcji rozogniskowania kamery termowizyjnej*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Vol. 28, No. 2, 2024, 99–106, DOI: 10.14313/PAR_252/99.
 17. Sosnowski T., Madura H., Firmanty K., Bareła J., Bieszcza G., Kubicki J., *Zautomatyzowane stanowisko do wyznaczania wartości parametrów i kalibracji obserwacyjnych kamer termowizyjnych*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 59, No. 9, 2013, 962–965.
 18. Test Operations Procedure (TOP) 6-3-040. Thermal Imaging Systems, Section: Technical Reports, Alabama, 2009.
 19. Test Operations Procedures (TOP) 6-3-014 Methodology Plan For resolvable Temperature Difference (MRTD) testing of Aircraft Installed Sensors, Section: Technical Reports, Alabama, 2011.

Measurement of Thermal Camera's Parameters' Method Using an Automated Test Bench

Abstract: To achieve precise and repeatable measurements of thermal camera's parameters, it is essential to eliminate human error. For this purpose, an automated test bench has been developed that allows fully automatic, semi-automatic and manual control of the measurement process. The designed stand supports remote control via Ethernet interface or USB connection. The developed software enables control, data recording and parameter determination of thermal cameras. The test bench ensures high quality and reliability of thermal measurements, enabling controlled examination of camera characteristics with minimal operator involvement.

Keywords: thermal cameras, parameter measurement, automated test bench, NETD, MRTD, non-uniformity correction, thermovision system

inż. Mariusz Mścichowski

mariusz.mscichowski@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-0079-1960

Student Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jego zawodowe zainteresowania skupiają się na cyfrowych pomiarowych układach elektronicznych oraz szybkim prototypowaniu FDM.



dr inż. Krzysztof Sawicki

krzysztof.sawicki@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-1368-3854

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2009 r.; rozprawa doktorska z tematyki steganografii w sieciach bezprzewodowych obroniona w WAT w 2019 r.; jego zainteresowania skupiają się na sieciach bezprzewodowych, bezpieczeństwie teleinformatycznym, steganografii i systemach wbudowanych.



dr inż. Tomasz Sosnowski

tomasz.sosnowski@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.



dr inż. Mariusz Kastek

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

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 r. pracuje w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2002 r. Zajmuje się problematyką związaną z detekcją obiektów w systemach podczerwieni, a także analizą sygnałów i algorytmami detekcji implementowanymi w urządzeniach podczerwieni. Autor lub współautor ponad 70 publikacji.



dr inż. Jarosław Bareła

jaroslaw.barela@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0001-9158-1354

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1997). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2004 r. w zakresie elektroniki – specjalność optoelektronika. Głównym obszarem jego pracy jest programowanie systemów mikroprocesorowych, projektowanie odbiorników promieniowania w zakresie podczerwieni, prowadzenie badań przyrządów noktowizyjnych i termowizyjnych. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 40 publikacji, w tym artykuły, referaty i wdrożenia.

