

Wysokotemperaturowa kalibracja kamery termowizyjnej w szerokim zakresie widmowym

Tomasz Sosnowski, Sławomir Gogler

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

Streszczenie: Rozwój technologii podczerwieni i termowizji umożliwił szerokie zastosowanie kamer termograficznych w różnych dziedzinach, takich jak wojsko, medycyna, motoryzacja czy systemy nadzoru. Kamery te służą do zdalnego pomiaru temperatury obiektów, a także do analizy mocy promieniowania, co jest istotne w kontekście spalania substancji. Pomiar wysokotemperaturowych obiektów, przekraczających 500 °C, wiąże się z wyzwaniami, takimi jak konieczność stosowania filtrów ograniczających energię docierającą do detektora. W artykule opisano model systemu pomiarowego, w którym kamera termograficzna rejestruje promieniowanie podczerwone, a oprogramowanie oblicza temperaturę na podstawie emisyjności obiektu. Kluczowym elementem jest kalibracja radiometryczna, która pozwala na dokładne wyznaczenie parametrów kamery. Przeprowadzone testy wykazały wysoką dokładność pomiarów, z maksymalnym błędem względnym nieprzekraczającym 0,9 %. Opracowana metoda kalibracji umożliwia pomiar temperatury obiektów w zakresie od 300 °C do 1200 °C, co potwierdza jej użyteczność w praktycznych zastosowaniach.

Słowa kluczowe: kamera termowizyjna, zdalny pomiar temperatury, pomiar wysokich temperatur

1. Wprowadzenie

Rozwój technologiczny w dziedzinie podczerwieni i termowizji spowodował, że kamery termowizyjne znajdują zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach, w takich jak sprzęt wojskowy [1, 2], policyjny, w medycynie, w badaniach naukowych, a także [3] motoryzacji, systemach alarmowych, systemach nadzoru produkcji. Jednym z zasadniczych celów zastosowania kamery termowizyjnej jest dokonanie zdalnego pomiaru temperatury obiektów. W tym celu stosowane są pomiarowe kamery termowizyjne o odpowiednich parametrach. Coraz częściej jednak kamera termowizyjna służy do pomiaru mocy promieniowania w celu określenia właściwości badanych materiałów. Jednym z takich pomiarów jest pomiar właściwości spalania substancji w celu określenia nie tyle temperatury spalania (ta jest najczęściej znana), ile pomiaru mocy promieniowania emitowanego przez te produkty spalania w założonym zakresie widmowym. Takie pomiary mogą posłużyć do rozpoznania/zakwalifikowania spalanych substancji do danej grupy. Jest to często istotne ze względu na szybką ocenę intensywności spalania.

Bardzo dużym problemem jest pomiar spalania substancji, których temperatura przekracza 500 °C. Najczęściej w celu pomiaru tak wysokich wartości temperatury stosuje się filtry ograniczające ilość energii docierającej do detektora. Najczęściej filtry te mają zawężone (w stosunku do detektora) pasmo. Przykładowo dla zakresu średniej podczerwieni MWIR (3–5 μm) stosuje się filtry o szerokości widmowej rzędu 40–50 nm. Takie podejście ułatwia pomiar temperatury jednak uniemożliwia pomiar mocy promieniowania w pełnym zakresie widmowym kamery termowizyjnej.

2. Model systemu pomiarowego

Kamera termowizyjna jest urządzeniem o znacznej złożoności zbudowanym z takich podstawowych elementów jak [2–5]: moduł matrycy detektorów podczerwieni, obiektyw dla zakresu podczerwieni, układy elektroniczne zapewniające odczyt sygnału z detektora oraz rejestrację i analizę sygnału, a także moduł wyświetlania. Ogólny schemat kamery termowizyjnej został przedstawiony na rys. 1.

W pomiarach obiektów wysokotemperaturowych dobrze sprawdza się pomiarowa kamera termowizyjna. Pomiarowa kamera termowizyjna rejestruje rozkład promieniowania podczerwonego pochodzącego od obserwowanych obiektów i na tej podstawie oblicza rozkład temperatury. Kamery termowizyjne z natury mierzą natężenie napromienienia, a nie temperaturę. Oprogramowanie kamery oblicza temperaturę na podstawie znanej emisyjności obiektu docelowego. W rzeczywistości pomiar temperatury za pomocą kamery termowizyjnej wymaga uwzględnienia wielu często nieoczywistych parametrów kamery i parametrów mierzonej sytuacji [4, 6–9], przez co jest proce-

Autor korespondujący:

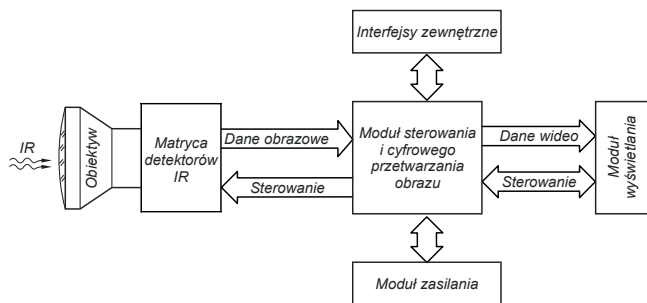
Tomasz Sosnowski, tomasz.sosnowski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 11.07.2025 r., przyjęty do druku 06.10.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.



Rys. 1. Ogólny schemat kamery termowizyjnej z podziałem na podstawowe moduły funkcjonalne

Fig. 1. The following diagram provides a general overview of the constituent components of a thermal imaging camera, delineated into fundamental functional modules

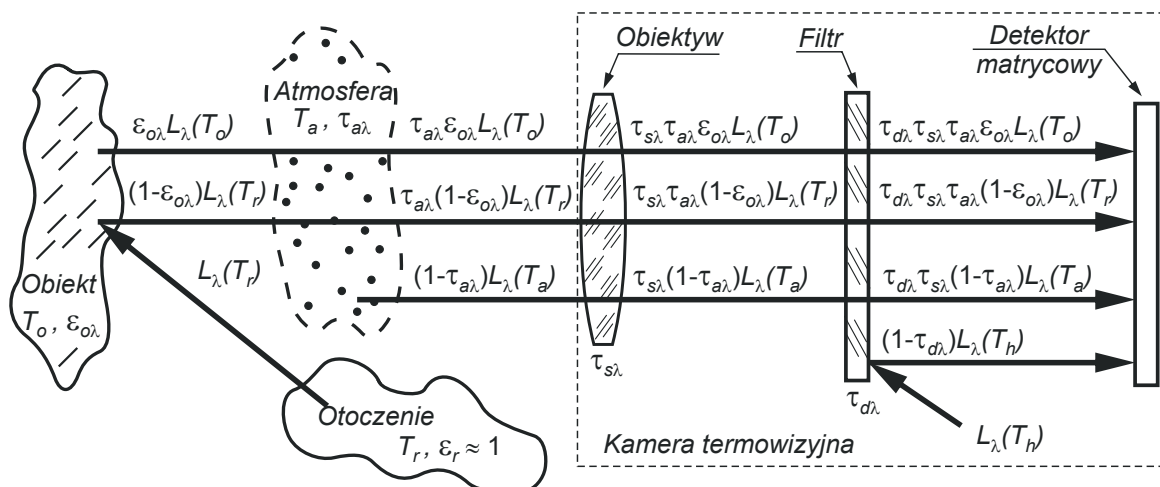
sem złożonym i trudnym. Bardzo trudna jest analiza zjawisk zachodzących we wnętrzu kamery związanych z rozkładem temperatury [10]. Mimo iż konstrukcja i oprogramowanie współczesnych pomiarowych kamer termowizyjnych przyczyniły się do ułatwienia posługiwania się nimi to, aby uzyskać dokładne, rzetelne wyniki użytkownik musi znać i rozumieć podstawy termografii, propagacji promieniowania podczerwonego, układów optycznych i metody kalibracji. Często także musi mieć znaczne doświadczenie w realizacji pomiarów termowizyjnych. Ponadto kamery termowizyjne mierzą bezwzględną temperaturę z dokładnością rzędu $\pm 2^\circ\text{C}$. Wymienione uwarunkowania dla pomiarów termowizyjnych powodują, że pomiar temperatury rzeczywistego ciała jest trudny oraz obarczony dużym błędem pomiarowym.

Do kamery termowizyjnej dociera nie tylko promieniowanie podczerwone pochodzące od obserwowanego obiektu, ale także promieniowanie z wielu innych źródeł, np. pochodzące od elementów otoczenia (ogniska, ludzie, drzewa, budynki) i promieniowanie odbite od powierzchni obiektu. Uwzględnienie wszystkich źródeł zakłócających w algorytmie wyznaczania temperatury jest niemożliwe i często niecelowe. W urządzeniach termograficznych najczęściej przyjmuje się, że do kamery dociera promieniowanie podczerwone ze źródeł przedstawionych na rys. 2.

Zgodnie z sytuacją przedstawioną na rysunku 2 są cztery podstawowe składniki mocy promieniowania docierające do detektora kamery, co można zapisać za pomocą wzoru:

$$M_C = W_o + W_r + W_a + W_d, \quad (1)$$

gdzie: W_o – promieniowanie obiektu, W_r – promieniowanie odbite od obiektu, W_a – promieniowanie atmosfery, W_d – promieniowanie odbite od filtra.



Rys. 2. Model promieniowania podczerwonego sceny w pomiarach termograficznych z uwzględnieniem elementów kamery termowizyjnej
Fig. 2. Infrared scene radiation model for thermographic measurements, including thermal camera elements

Aby nie doszło do nasycenia detektorów wskutek oświetlenia ich promieniowaniem o dużej luminancji konieczne jest zastosowanie filtra tłumiącego. Wartość tłumienia oblicza się przyrównując luminancję ciała doskonale czarnego (skałowaną w zakresie widmowym odpowiedzi detektora) dla granicznej temperatury kalibracji (tutaj 300°C) do luminancji ciała szarego o zadanej temperaturze (tutaj 2700°C), skałowaną w tym samym zakresie. Obliczony w ten sposób średni wymagany współczynnik transmisji filtra wynosi ok. 0,15 %. Ponieważ uzyskanie tak dużego tłumienia na skutek absorpcji jest trudne, zastosowano filtr odbiciowy w postaci warstwy aluminium o grubości ok. 30 nm naniesionej na podłoże krzemowe. Promieniowanie własne filtra o temperaturze 20°C jest pomijalnie małe w zakresie widmowym odpowiedzi detektorów ($1,5\text{--}5,1\text{ }\mu\text{m}$), tym bardziej, że materiał podłoża filtra (krzem) praktycznie pozbawiony jest absorpcji w tym zakresie. Absorpcja promieniowania w warstwie aluminium o grubości 30 nm również jest zaniedbywalna.

Promieniowanie obiektu W_o można zapisać za pomocą wzoru:

$$W_o = \tau_{d\lambda} \tau_{s\lambda} \varepsilon_{o\lambda} \tau_{a\lambda} L_\lambda(T_o), \quad (2)$$

gdzie: $L_\lambda(T)$ – luminancja energetyczna powierzchni o temperaturze T , $\varepsilon_{o\lambda}$ – emisyjność obiektu, $\tau_{s\lambda}$ – współczynnik przepuszczalności obiektywu, $\tau_{a\lambda}$ – współczynnik przepuszczalności atmosfery, T_o – temperatura obiektu.

Promieniowanie odbite od obiektu W_r pochodzące ze źródeł w otoczeniu można zapisać za pomocą wzoru:

$$W_r = \tau_{d\lambda} \tau_{s\lambda} (1 - \varepsilon_{o\lambda}) \tau_{a\lambda} L_\lambda(T_r), \quad (3)$$

gdzie $(1 - \varepsilon_{o\lambda})$ reprezentuje współczynnik odbicia dla ciał nieprzezroczystych, T_r to wartość temperatury źródeł w otoczeniu, przy czym całe otoczenie traktujemy jako ciało doskonale czarne o temperaturze T_r .

Promieniowanie atmosfery W_a można opisać wzorem:

$$W_a = \tau_{d\lambda} \tau_{s\lambda} (1 - \tau_{a\lambda}) L_\lambda(T_a), \quad (4)$$

gdzie $(1 - \tau_{a\lambda})$ jest emisyjnością atmosfery (przy założeniu, że $\tau_{a\lambda} = 0$). Temperatura atmosfery wynosi T_a .

Promieniowanie odbite od filtra W_d pochodzące ze źródeł w jego otoczeniu można zapisać za pomocą wzoru:

$$W_d = (1 - \tau_{d\lambda}) L_\lambda(T_h), \quad (5)$$

gdzie $(1 - \tau_{d\lambda})$ reprezentuje współczynnik odbicia filtra. Temperatura źródeł w otoczeniu filtra wynosi T_h .

Całkowita moc promieniowania odbierana przez kamerę termowizyjną z obserwowanej sceny (docierająca do detektora kamery) po zastosowaniu filtra wynosi (zgodnie z sytuacją przedstawioną na rys. 2):

$$L_{C\lambda} = \tau_{d\lambda} \tau_{s\lambda} \varepsilon_{o\lambda} \tau_{a\lambda} L_\lambda(T_o) + \tau_{d\lambda} \tau_{s\lambda} (1 - \varepsilon_{o\lambda}) \tau_{a\lambda} L_\lambda(T_r) + \tau_{d\lambda} \tau_{s\lambda} (1 - \tau_{a\lambda}) L_\lambda(T_a) + (1 - \tau_{d\lambda}) L_\lambda(T_h). \quad (6)$$

Matrycowy detektor podczerwieni odbiera promieniowanie w paśmie $\lambda \in \langle \lambda_1, \lambda_2 \rangle$. Jeśli dodatkowo przyjmujemy, że dla tego zakresu długości fali wartości wszystkich emisyjności i wartości transmisji są stałe (nie zależą od długości fali):

$$\varepsilon_{o\lambda} = \varepsilon_o = \text{const}, \quad \tau_{a\lambda} = \tau_a = \text{const},$$

$$\tau_{s\lambda} = \tau_s = \text{const}, \quad \tau_{d\lambda} = \tau_d = \text{const},$$

to wówczas zależność (6) można zapisać w następujący sposób:

$$L_C = \tau_d \tau_s \varepsilon_o \tau_a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(T_o) d\lambda + \tau_d \tau_s (1 - \varepsilon_o) \tau_a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(T_r) d\lambda + \tau_d \tau_s (1 - \tau_a) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(T_a) d\lambda + (1 - \tau_d) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(T_h) d\lambda. \quad (7)$$

Przyjmując oznaczenie:

$$L_D(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(T) d\lambda. \quad (8)$$

ze wzoru (7) otrzymujemy:

$$L_C = \tau_d \tau_s \varepsilon_o \tau_a L_D(T_o) + \tau_d \tau_s (1 - \varepsilon_o) \tau_a L_D(T_r) + \tau_d \tau_s (1 - \tau_a) L_D(T_a) + (1 - \tau_d) L_D(T_h). \quad (9)$$

Wyznaczenie za pomocą wzoru (8), wartości luminancji energetycznej promieniowania odbieranego przez detektor L_D w funkcji temperatury T obserwowanych obiektów oraz dla ograniczonego zakresu widmowego $\lambda \in \langle \lambda_1, \lambda_2 \rangle$ wydaje się metodologicznie proste, szczególnie w przypadku stosowania całkowania numerycznego. Jednak takie podejście wymaga znajomości dokładnej charakterystyki gęstości widmowej czułości napięciowej. Ze względu na znaczny rozrzut wykonania detektorów podczerwieni niezbędny jest pomiar tej charakterystyki dla każdego z detektorów matrycy, który jest w zasadzie możliwy jedynie na etapie produkcji detektorów. Zmierzenie charakterystyki widmowej czułości dla każdej produkowanej matrycy detektorów jest trudne i bardzo kosztowne. Z tego powodu charakterystyki czułości detektorów są podawane przez producentów tylko dla rodziny matryc detektorów, mają ograniczoną rozdzielczość widmową oraz obciążone są znacznym rozrzutem (charakterystycznym dla rodziny detektorów).

W związku z tym najlepszym sposobem jest określenia wartości mocy promieniowania docierającego do detektora L_D w funkcji temperatury T obserwowanych obiektów dla zakresu widmowego jest zastosowanie funkcji aproksymującej zgodnie ze zmodyfikowanym wzorem Sakuma-Hattori [11, 12]:

$$L_D^*(T) = \frac{R^*}{e^{\frac{B}{T}} - F} + O^*, \quad (10)$$

gdzie R^* , B , F , O^* są stałymi wyznaczanymi na etapie kalibracji kamery termowizyjnej.

W związku z tym, że w laboratoryjnych warunkach pomiarowych można przyjąć, że:

$$T_r = \text{const}, \quad T_a = \text{const}, \quad T_h = \text{const}$$

to wzór (9) można zapisać jako:

$$L_C^*(T_o) = \frac{R}{e^{\frac{B}{T_o}} - F} + O, \quad (11)$$

W celu wyznaczenia temperatury obserwowanego obiektu należy przekształcić wzór (11) do postaci:

$$T_o = B \left\{ \ln \left[\frac{R}{L_C^* - O} + F \right] \right\}^{-1}. \quad (12)$$

3. Stanowiska laboratoryjne

W celu pomiaru temperatury obiektu odczytuje się wartość luminancji energetycznej detektora L_C^* z kamery termowizyjnej a następnie wstawia do wzoru (12). Skorzystanie z funkcji aproksymującej (11) wymaga znajomości wartości jej parametrów R , B , F i O . W celu wyznaczenia wartości tych parametrów należy przeprowadzić kalibrację radiometryczną. Kalibracja radiometryczna polega na zmierzeniu wartości luminancji energetycznej L_C^* detektora dla różnych wartości temperatury obiektu T_o . Mierzony obiekt powinien być ciałem doskonale czarnym o wysokiej emisyjności. W tym przypadku najbardziej interesujące jest zachowanie ogólnego charakteru krzywej (funkcji aproksymującej), która najlepiej przybliża zmierzone punktu pomiarowe. Do tego zadania wykorzystywana jest optymalizacja metodą najmniejszych kwadratów. Obliczenia niezbędne do wyznaczenia parametrów R , B , F i O metodą najmniejszych kwadratów zostały wykonane za pomocą cyfrowych metod przetwarzania danych.

Do wyznaczenia wartości parametrów R , B , F i O opracowano specjalne zautomatyzowane stanowisko pomiarowe. Stanowisko składa się z takich podstawowych elementów jak:

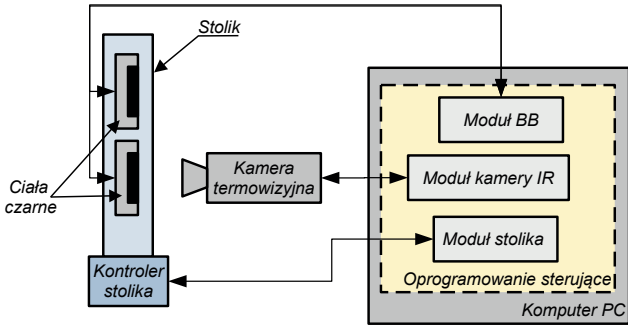
- zestaw dwóch wysokotemperaturowych ciał doskonale czarnych SR-200N-33 firmy CI Systems,
- stół z wózkiem,
- kontroler stolika,
- oprogramowanie do analizy i przetwarzania danych,
- komputer z oprogramowaniem sterującym,
- kamera termowizyjna SC7500 firmy FLIR.

Schemat blokowy stanowiska do rejestracji danych, kalibracji i wyznaczania parametrów kamery termowizyjnej przedstawiono na rysunku 3, zaś w tabeli 1 zestawiono parametry zastosowanej do pomiarów kamery termowizyjnej SC7500 firmy FLIR. Na rysunku 4a zaprezentowano zdjęcie ciała czarnego SR-200N-33 na stanowisku laboratoryjnym oraz przykładowy obraz termowizyjny rejestrowany na stanowisku do kalibracji i testowania dokładności pomiaru temperatury.

Kamera FLIR SC7500 standardowo umożliwia pomiar temperatury w dwóch podstawowych zakresach:

- 5–300 °C (bez filtra widmowego, w pełnym zakresie widmowym kamery),
- 200–1500 °C (z zastosowaniem wąskopasmowego filtra).

Pomiar wysokich temperatur w pełnym zakresie widmowym kamery wymaga zastosowania filtra szerokopasmowego (o możliwie płaskiej charakterystyce widmowej) o odpowiednio małej przepuszczalności. W kamerze zastosowano szerokopasmowy filtr odbiciowy o transmisji wynoszącej ok. 0,00144. Zastosowanie



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska do kalibracji radiometrycznej i testowania kamery termowizyjnej
Fig. 3. The block diagram of the radiometric calibration and test station for the thermal camera

Tabela 1. Podstawowe parametry kamery termowizyjnej SC7500 firmy FLIR
Table 1. The basic parameters of the FLIR SC7500 thermal imaging camera

Parametr	Wartość
Rozdzielczość	320 × 256
Rodzaj detektora	InSb
Pixel pitch	30 μm
Zakres widmowy	1,5 μm – 5,1 μm
NETD	< 20 mK
Ogniskowa	50 mm
Kąt pola widzenia	11° × 8.8°
Liczba klatek na sekundę	25 Hz
$F_{\#}$	3,0

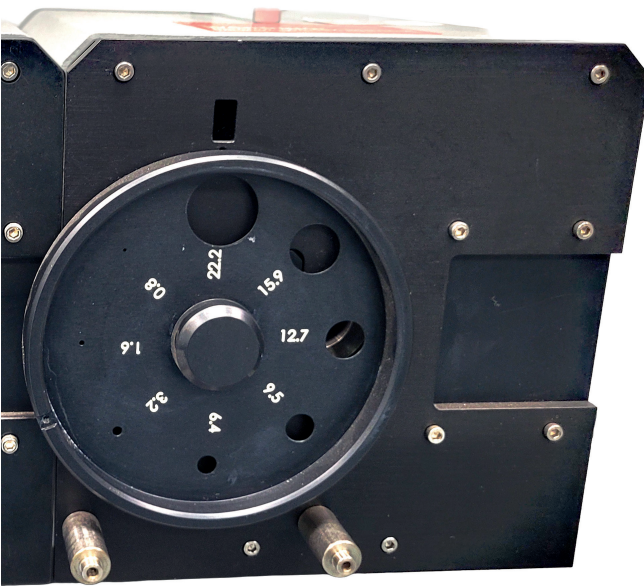
Tabela 2. Podstawowe parametry ciała czarnego SR-200N-33 firmy CI Systems
Table 2. Basic parameters of the SR-200N-33 black body from CI Systems

Parametr	Wartość
Zakres temperatury	50–1200 °C
Rozdzielczość	1 °C
Dokładność temperatury	±2 °C
Stabilność temperatury	±0,50 °C
Emisyjność	0,99 ±0,01
Rozmiar apertury mm	0,8, 1,6, 3,2, 6,4, 9,5, 12,7, 15,9, 22,2
Komunikacja	Ethernet, RS-232
Temperatura działania	0 – 50 °C

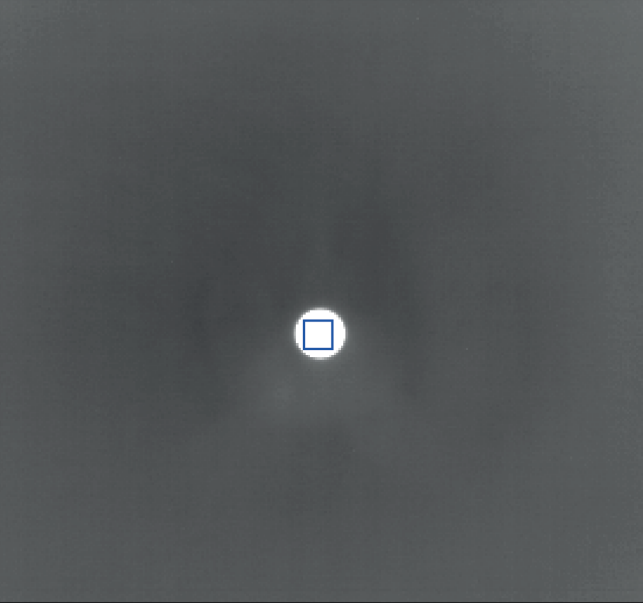
wykonanego na potrzeby pomiarów filtra umożliwia rejestrację i pomiar obiektów wysokotemperaturowych w zakresie do ok. 2700 °C. W rzeczywistości kamerę skalibrowano radiometrycznie do pomiaru temperatury 1200 °C.

Zasadniczym składnikiem stanowiska do pomiaru parametrów kamer termowizyjnych jest oprogramowanie sterujące. Dane termograficzne z kamery termowizyjnej są rejestrowane przez oprogramowanie sterujące z zastosowaniem interfejsu Ethernet. Dodatkowo za pomocą komputera jest realizowane ustawianie parametrów ciał czarnych oraz sterowanie stolikiem umożliwiającym przemieszczanie ciał.

Niezbędnym elementem składowym stanowiska do wyznaczania parametrów kamer termowizyjnych są wysokotemperaturowe techniczne ciała doskonale czarne. Zadaniem ciał czarnych jest generowanie, zależnego od ich temperatury, promieniowania podczerwonego oświetlającego matrycę detektorów kalibrowanej kamery termowizyjnej. W związku z tym ciało doskonale czarne



a)



b)

Rys. 4. Widok ciała czarnego SR-200N-33 na stanowisku laboratoryjnym (a) oraz przykładowy obraz termowizyjny rejestrowany na stanowisku do kalibracji i testowania dokładności pomiaru temperatury (b)
Fig. 4. A view of the SR-200N-33 blackbody on the laboratory bench (a) and an example of a thermal image recorded on the bench for calibration and testing of temperature measurement accuracy (b)

musi cechować się wysokim współczynnikiem emisyjności i bardzo dobrą stabilnością zadanej temperatury. W tabeli 2 zostały umieszczone wybrane parametry ciała doskonale czarnego. Na rysunku 4b został przedstawiony przykładowy obraz termowizyjny zarejestrowany przez testowaną kamerę termowizyjną.

4. Analiza niepewności pomiaru temperatury

Jednym z najważniejszych parametrów pomiarowej kamery termowizyjnej jest charakterystyczny dla niej rozrzut wartości temperatury czyli niepewność pomiaru [13].

Niepewność pomiaru temperatury za pomocą skalibrowanej kamery termowizyjnej może zostać wyznaczona na podstawie pomiaru temperatury wzorca promieniowania podczerwonego (ciała czarnego). Błąd bezwzględny takiego pomiaru jest określony za pomocą wzoru [14]:

$$\Delta T = T_D - T_{BB}, \quad (13)$$

gdzie: T_D – wartość temperatury zmierzona za pomocą kamery termowizyjnej, T_{BB} – wartość „rzeczywista” temperatury wskazana przez ciało doskonale czarne, ΔT – niepewność graniczna pomiaru temperatury.

W przyjętej metodzie oszacowania błędu pomiaru temperatury niepewność pomiaru wynika z:

- statystycznego rozrzutu wyników pomiarów (u_T) – niepewność typu A,
- niepewności granicznej pomiaru temperatury wzorca (u_{BB}) – niepewność typu B,
- niepewności granicznej pomiaru temperatury przez kamerę termowizyjną (u_{CAM}) – niepewność typu B.

W związku z tym budżet niepewności pomiaru (niepewność standardowa) (ang. *standard uncertainty*) [13] dla można opisać za pomocą następującego wzoru:

$$u = \sqrt{u_T^2 + u_{BB}^2 + u_{CAM}^2}. \quad (14)$$

Metoda typu A wyznaczania niepewności pomiaru [13] (ang. *type A evaluation of uncertainty*) polega na wyznaczaniu niepewności na podstawie analizy statystycznej serii N pomiarów bezpośrednich (N elementowej próbki) $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_N$. Jeżeli warunki zapewniają taką samą dokładność niezależnych pomiarów, to zmienna losowa, jaką jest wynik pojedynczego pomiaru podlega rozkładowi normalnemu (rozkładowi Gaussa). Za wynik pomiaru przyjmuje się średnią arytmetyczną N wyników pomiarów:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (15)$$

którą uznaje się za dobre oszacowanie (estymator) wartości prawdziwej. W takim przypadku wartość niepewności standardowej wyniku pomiaru wielkości można wyznaczyć ze wzoru:

$$u_T = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}, \quad (16)$$

Czynnikami mającym duży wpływ na niepewności pomiaru temperatury w zastosowanej procedurze analizy błędów jest zastosowany wzorec temperatury (ciało czarne). Dla takiego przy-

padku niepewność pomiaru typu B [13] (ang. *type B evaluation of uncertainty*) jest związana z niepewnością graniczną pomiaru temperatury wzorca (ciała czarnego). Jeżeli wartość niepewności wzorcowania zastosowanego ciała czarnego wynosi ΔT_{BB} , to przy założeniu, że rozkład gęstości prawdopodobieństwa tej wielkości jest rozkładem jednostajnym (prostokątnym), niepewność standardowa może zostać obliczona ze wzoru:

$$u_{BB} = \frac{\Delta T_{BB}}{\sqrt{3}}. \quad (17)$$

Najbardziej znaczącym czynnikiem mającym wpływ na niepewności pomiaru temperatury w zastosowanej procedurze analizy błędów jest zastosowany przyrząd pomiarowy (kamera termowizyjna). Dla takiego przypadku niepewność pomiaru typu B [13] (ang. *type B evaluation of uncertainty*) jest związana z niepewnością graniczną pomiaru temperatury przez kamerę termowizyjną. Jeżeli wartość niepewności wzorcowania zastosowanej kamery termowizyjnej wynosi ΔT_{CAM} , to przy założeniu, że rozkład gęstości prawdopodobieństwa tej wielkości jest rozkładem trójkątnym, niepewność standardowa może zostać obliczona ze wzoru:

$$u_{CAM} = \frac{\Delta T_{CAM}}{\sqrt{6}}. \quad (18)$$

Z powyższych założeń oraz ze wzoru (14) wynika, że niepewność standardowa pomiaru temperatury za pomocą opracowanej kamery termowizyjnej jest opisana wzorem:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N(N-1)} + \frac{\Delta T_{BB}^2}{3} + \frac{\Delta T_{CAM}^2}{6}}. \quad (19)$$

Niepewność standardowa u określa przedział od $x - u$ do $x + u$, w którym znajduje się prawdziwa wartość mierzonej temperatury. W celu porównania wyników pomiarów temperatury uzyskiwanych w różnych warunkach należy wyznaczyć niepewności rozszerzoną U [13]. Niepewność rozszerzona jest to zwiększona wartość niepewności standardowej tak, aby w przedziale $x \pm U$ znalazła się przeważająca liczba uzyskanych wyników. W przypadku pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej przyjęto, że niepewność rozszerzona będzie wyznaczana zgodnie ze wzorem:

$$U = k \cdot u, \quad (20)$$

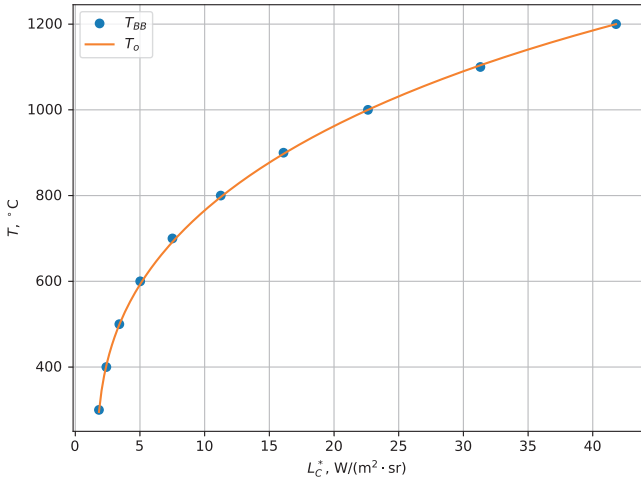
gdzie k to współczynnik rozszerzenia. W przyjętej procedurze oceny niepewności przyjęto, że wartość współczynnika rozszerzenia wynosi $k = 2$, co oznacza uzyskanie poziomu ufności równego 95 %.

5. Wyniki pomiaru

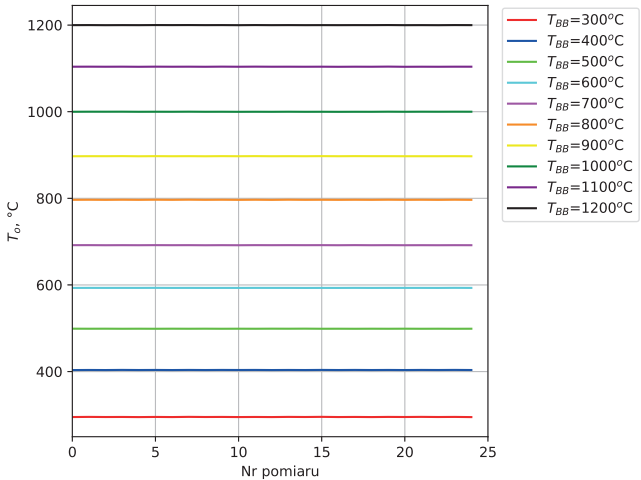
W celu wyznaczenia wartości parametrów R , B , F i O na stanowisku kalibracyjnym przeprowadzono kalibrację radiometryczną. W czasie kalibracji dokonano $K = 5$ punktów pomiarowych złożonych z wartości luminacji L_{ck}^* i odpowiadającym im wartościom temperatury T_{ok} . Dla tak zebranych danych przeprowadzono obliczenia umożliwiające wyznaczenie parametrów funkcji aproksymacyjnej (11). W ten sposób uzyskano następujące wartości parametrów R , B , F i O :

$$\begin{aligned}
 R &= 5,124322 \times 10^2, \\
 B &= 4,378804 \times 10^3, \\
 F &= 6,792942, \\
 O &= 1,597744.
 \end{aligned}$$

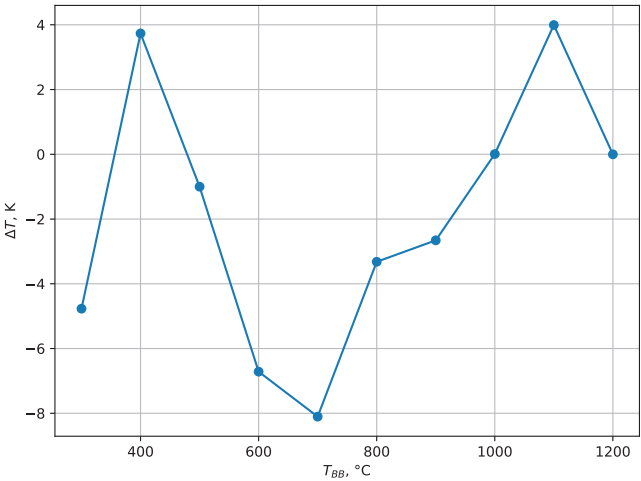
Skalibrowana kamera termowizyjna z opracowanym algorytmem wyznaczania temperatury została przetestowana podczas testowej sesji pomiarowej (na stanowisku laboratoryjnym takim samym, jak dla kalibracji). W czasie testów przeprowadzono rejestrację sceny z obiektami – ciałami czarnymi, których temperaturę ustawiono na 10 różnych wartości. Sytuacja pomiarowa została przedstawiona na rys. 3. Pomiaru testowe wykonano zarówno dla wartości temperatury, dla których przeprowadzono kalibrację, jak i dla innych wartości temperatury. Na rysunku 5 przedstawiono wykres temperatury ciała czarnego oraz temperatury wyznaczonej za pomocą algorytmu w funkcji luminancji odczytanej z kamery termowizyjnej (przed kalibracją).



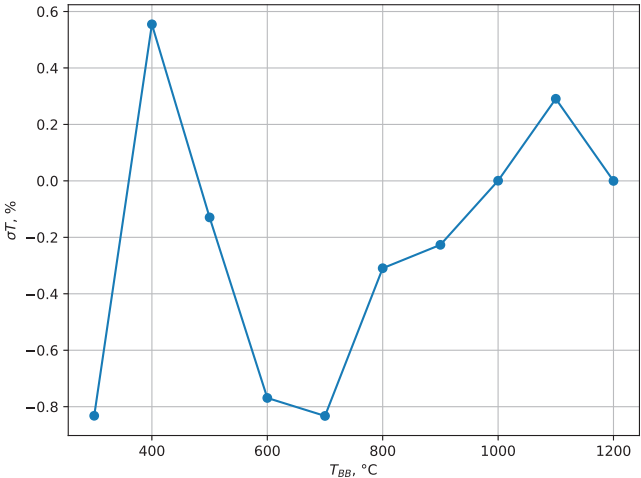
Rys. 5. Wykres temperatury zmierzonej dla referencyjnych ciał czarnych w funkcji luminancji odczytanej z kamery termowizyjnej
Fig. 5. Plot showing the measured temperature of reference black bodies as a function of luminance, as read from the thermal imaging camera



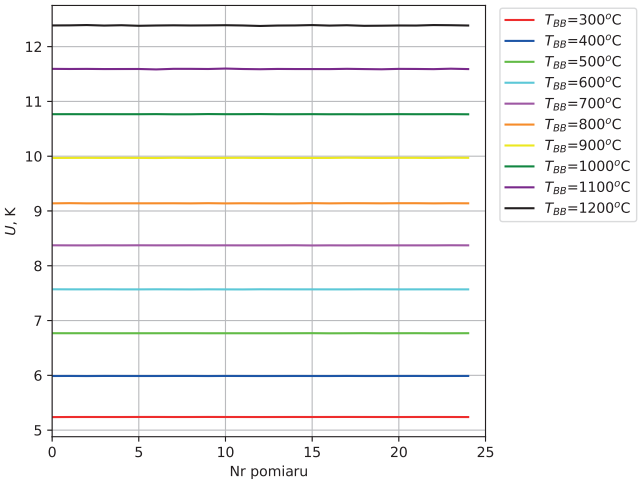
Rys. 6. Wykres temperatury zmierzonej dla referencyjnych ciał czarnych
Fig. 6. Plot of the measured temperatures for the reference black bodies



Rys. 7. Błąd bezwzględny pomiaru temperatury dla referencyjnych ciał czarnych
Fig. 7. The absolute error of the temperature measurement for the reference black bodies



Rys. 8. Błąd względny pomiaru temperatury dla referencyjnych ciał czarnych
Fig. 8. Relative error in temperature measurements for reference black bodies



Rys. 9. Niepewność rozszerzona o poziomie ufności 95 % dla referencyjnych ciał czarnych
Fig. 9. Extended uncertainty with a confidence level of 95 % for reference black bodies

Wyniki pomiaru temperatury testowych ciał czarnych zostały przedstawione na rys. 6. Dla temperatury zmierzonej w każdym z punktów obliczono błąd bezwzględny (rys. 7), błąd względny (rys. 8) oraz niepewność rozszerzoną o poziomie ufności 95 % (rys. 9).

6. Podsumowanie

Opracowana metoda wysokotemperaturowej kalibracji pomiarowej kamery termowizyjnej z uwzględnieniem zastosowanego filtra szeroko pasmowego o niewielkiej transmisji została przetestowana na podstawie testowej sesji pomiarowej. Dane z sesji posłużyły do wyznaczenia współczynników R , B , F i O za pomocą wzoru aproksymującego. Dodatkowo przeprowadzono rejestrację sceny z ciałami czarnymi o zmiennej wartości temperatury.

Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką dokładność pomiaru temperatury za pomocą skalibrowanej kamery termowizyjnej. Maksymalny błąd względny dla mierzonych ciał referencyjnych nie przekraczał 0,9 %. Uzyskano także niewielkie wartości niepewności rozszerzonej o poziomie ufności 95 % dla referencyjnych ciał czarnych. Niepewność pomiarowa zależy od mierzonej temperatury i wynosi od ok. 5,5 K (dla $T_{BB} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) do ok. 12,5 K (dla $T_{BB} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że kamera termowizyjna z filtrem szerokopasmowym i skalibrowana za pomocą opracowanej metody może zostać zastosowana do pomiaru obiektów wysokotemperaturowych w zakresie od 300 °C do 1200 °C.

Podziękowania

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 531-000078-W600-22.

Bibliografia

1. Sosnowski T., Madura H., Bieszczad G., Kastek M., Chmielewski K., *Construction, parameters, and research results of thermal weapon sight*, [in:] Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 8193, 2011, DOI: 10.1117/12.900867.
2. Sosnowski T., Bieszczad G., Madura H., Kastek M., *Thermovision system for flying objects detection*, [in:] URSI 2018 – Baltic URSI Symposium, 2018, 141–144, DOI: 10.23919/URSI.2018.8406757.
3. Bieszczad G., Krupiński M., Madura H., Sosnowski T., *Thermal camera for autonomous mobile platforms*, [in:] Nawrat A., Kuś Z. (eds.), Vision Based Systems for UAV Applications, 2013, 95–114, Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-00369-6_6.
4. Sosnowski T., Bieszczad G., Kastek M., Madura H., *Digital image processing in high resolution infrared camera with use of programmable logic device*, [in:] Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 7838, 2010, DOI: 10.1117/12.86502.
5. Holst G.C., *Electro-optical imaging system performance*, SPIE, 2008, DOI: 10.5555/1525534.
6. Perry D.L., Dereniak E.L., *Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors*, "Optical Engineering", Vol. 32, No. 8, 1993, 1854–1859, SPIE, DOI: 10.1117/12.145601.
7. Bieszczad G., Sosnowski T., Madura H., Kastek M., Bareła J., *Adaptable infrared image processing module implemented in FPGA*, [in:] Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 7660, 2010, DOI: 10.1117/12.85114.

8. Bieszczad G., Gogler S., Sosnowski T., Madura H., Kucharz J., Zarzycka A., *Determining the responsivity of microbolometer FPA using variable optical aperture stop*, [in:] Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 8541, 2012, DOI: 10.1117/12.976032.
9. Sosnowski T., Kastek M., Sawicki K., Ligienza A., Gogler S., Więcek B., *High-Accuracy Calibration Method of a Thermal Camera Using Two Reference Blackbodies*, "Sensors", Vol. 24, No. 17, 2024, DOI: 10.3390/s24175831.
10. Felczak M., Sosnowski T., Strąkowski R., Bieszczad G., Gogler S., Stępień J., Więcek B., *Electrothermal analysis of a TEC-less IR microbolometer detector including self-heating and thermal drift*, "Quantitative InfraRed Thermography Journal", Vol. 21, No. 4, 2024, 217–241, DOI: 10.1080/17686733.2023.2179280.
11. Sakuma F., Hattori S., *Study for Establishing a Practical Temperature Standard by Using Silicon Narrow-Band Radiation Thermometer*, "Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers", Vol. 18, No. 5, 1982, 482–488, DOI: 10.9746/sicetr1965.18.482.
12. Horny N., *FPA camera standardisation*, "Infrared Physics and Technology", Vol. 21, No. 4, 2003, 109–119, DOI: 10.1016/S1350-4495(02)00183-4.
13. JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, First edition September 2008.
14. Abramowitz M., Stegun I. (eds.), *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, National Bureau of Standards, 1972.

High-Temperature Calibration of Thermal Imaging Camera Over a Wide Spectral Range

Abstract: The development of infrared and thermal imaging technology has allowed for widespread use of thermographic cameras across a plethora of disciplines, including military, medical, automotive and surveillance systems. These cameras are utilised for the remote measurement of object temperature, as well as the analysis of radiant power, a crucial aspect in the domain of substance combustion. The measurement of high-temperature objects, with temperatures in excess of 500 °C, poses significant challenges. These include the necessity for filters to limit the energy reaching the detector. The present paper sets out a model of a measurement system in which a thermographic camera is employed to capture infrared radiation, and software is utilised to calculate the temperature based on the emissivity of the object in question. A fundamental aspect of this process is radiometric calibration, which facilitates the precise determination of the camera parameters. Tests carried out have demonstrated high measurement accuracy, with a maximum relative error of no more than 0.9 per cent. The developed calibration method allows the temperature of objects to be measured in the range from 300 °C to 1200 °C, thus confirming its usefulness in practical applications.

Keywords: thermal imaging camera, remote temperature measurement, high temperature measurement

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. Sławomir Gogler

slawomir.gogler@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3002-6362

Ukończył Politechnikę Warszawską w 2011 r. na Wydziale Mechatroniki. W 2020 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w Wojskowej Akademii Technicznej. Zajmuje się zagadnieniami konstrukcji układów optycznych oraz modelowaniem matematyczno-fizycznym.

