

Analiza porównawcza wybranych metod kalibracji kamery termowizyjnej z chłodzonym detektorem pracującym w zakresie MWIR

Karol Erd

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 01-476 Warszawa

Streszczenie: Do zdalnego pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej niezbędne jest przeprowadzenie kalibracji radiometrycznej. Pozwala to na przypisanie parametrów radiacyjnych obiektu, a co za tym idzie, jego temperatury, do odpowiedzi obserwującego go detektora podczerwieni. W artykule przedstawiono podstawowe pojęcia związane z kalibracją radiometryczną i czynniki wpływające na jej skuteczność. Dokonano także przeglądu najpowszechniejszych metod kalibracji, a następnie zrealizowano i porównano dwie z nich na specjalnie skonstruowanym stanowisku laboratoryjnym, wykorzystującym autorskie oprogramowanie i wyposażonym w chłodzoną kamerę podczerwieni, pracującą w zakresie MWIR. Kamery skalibrowano w zakresie temperatury 20–50 °C. Porównanie metod przeprowadzono na podstawie serii pomiarów temperatury, na podstawie analizy błędów bezwzględnych i względnych, a także analizy rozrzutu zmierzonych wartości temperatury.

Słowa kluczowe: kamera termowizyjna, kalibracja radiometryczna, zdalny pomiar temperatury

1. Wprowadzenie

Dokładny zdalny pomiar temperatury za pomocą kamery termowizyjnej jest zagadnieniem trudnym i na jego skuteczność ma wpływ wiele czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Kamery termowizyjne, bez względu na to czy działają na pojedynczym detektorze czy na matrycach detektorów, muszą zostać poddane kalibracji radiometrycznej.

W artykule omówiono dwie najczęściej stosowane metody kalibracji radiometrycznej kamer termowizyjnych, a także sprawdzono ich skuteczność i dokładność w zakresie temperatury 20–50 °C.

2. Podstawowe zagadnienia związane z radiometrią

Podstawowym prawem promieniowania ciał jest prawo Plancka, które określa promieniowanie ciała doskonale czar-

nego (cdc) [1–4]. Kształt charakterystyki spektralnej emisji cdc jest zależny tylko od jego temperatury T .

Przekształcenie prawa Plancka w celu wyznaczenia temperatury obiektu nie jest zagadnieniem skomplikowanym. Każdy detektor kamery termowizyjnej ma jednak najczęściej pasmową charakterystykę czułości. Oznacza to, że pochłaniane promieniowanie o różnej długości fali jest przekształcane na pojedynczą wartość sygnału elektrycznego. Brak informacji na temat udziału promieniowania o poszczególnych długościach fali w całkowitej zgromadzonej energii uniemożliwia idealne odwzorowanie jego charakterystyki spektralnej, a co z tego wynika, precyzyjne wyznaczenie temperatury źródła.

Z tego powodu kalibracja radiometryczna kamery termowizyjnej jest najczęściej realizowana przez przybliżenie zależności odpowiedzi rejestrowanej przez detektor od parametrów radiacyjnych źródła promieniowania funkcją podobną do funkcji Plancka.

Jednym z najprostszych równań, przybliżającym prawo Plancka, jest aproksymacja Wiena [5]:

$$U(T) = \frac{C}{e^{\frac{c_2}{AT}}}, \quad (1)$$

gdzie $U(T)$ jest odpowiedzią detektora, $c_2 = 0,014388 \text{ m} \cdot \text{K}$, C i A – współczynniki aproksymacji. Przybliżenie to jest jednak skuteczne tylko dla bardzo wąskich zakresów spektralnych, gdzie można pominąć zależność parametrów detektora od długości fali absorbowanego promieniowania [5].

Rozwiązaniem tego problemu zajęli się między innymi Fumihiro Sakuma i Susumo Hattori, którzy dodając dodatkowy

Autor korespondujący:

Karol Erd, karol.erd@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 17.07.2023 r., przyjęty do druku 28.01.2024 r.



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

współczynnik aproksymacji, zaproponowali równanie przedstawione wzorem (2):

$$U(T) = C \cdot e^{\left(-\frac{c_2}{AT+B}\right)} \quad (2)$$

Pozwala ono na lepsze uwzględnienie zależności spektralnej charakterystyki czułości detektora od temperatury obiektu i dobrze sprawdza się do kalibracji detektorów o małych szerokościach pasma czułości [5–7].

Równanie to pozwala na skuteczne przybliżenie funkcji Plancka w wąskich pasmach spektralnych, przez co znajduje zastosowanie w zdalnych pomiarach temperatury. Pomiar z jego użyciem są jednak obciążone błędami przez fakt, że charakterystyki emisji rzeczywistych obiektów odbiegają od charakterystyki ciała doskonale czarnego. Równanie Sakuma-Hattori jest bowiem zbliżone do przybliżenia Wiena. Istnieje wiele innych modeli przybliżających prawo Plancka, między innymi model RBF [4, 8–10], czy równanie aproksymacji [5, 11]. Nicolas Horny zaproponował aproksymację, wykorzystującą cztery współczynniki i wymagającą w metodzie większego nakładu obliczeń, ale lepiej uwzględniającego nieliniowość układu w szerszym paśmie długości fali [6, 12, 13]:

$$U(T) = \frac{R}{e^{\frac{B}{T}} - F} + O, \quad (3)$$

gdzie: R, B, F, O – współczynniki aproksymacji.

W pracy porównano skuteczność kalibracji kamery metodą Sakuma-Hattori (2), oraz metodą Horny’ego, nazywaną również metodą RBFO (3). W obu metodach kalibracja polega na zmierzeniu cyfrowej odpowiedzi detektora, dla kilku wartości temperatury ciała czarnego i dopasowaniu współczynników aproksymacji wybraną metodą. Liczba wykonanych pomiarów jest zależna od liczby współczynników. Minimalnie do wyznaczenia współczynników równania Sakuma-Hattori należy rozwiązać układ trzech równań, a w przypadku równania RBFO – czterech.

W celu uzyskania poprawnej kalibracji, należy także uwzględnić wpływ innych czynników wpływających na odpowiedź detektora. Wśród najważniejszych z nich znajduje się atmosfera, która pochłania oraz emituje promieniowanie, a jej wpływ wzrasta nieliniowo wraz ze wzrostem odległości od obserwowanego obiektu. Ponadto inne źródła, także te spoza pola widzenia kamery, emitują promieniowanie, które może ulec odbiciu od celu i trafić do detektora. Tych czynników zewnętrznych nie można wyeliminować.

Sam detektor, podobnie jak jego obudowa i elementy układu optycznego również emitują i odbijają promieniowanie mające wpływ na wartość zarejestrowanego za pomocą detektora sygnału. Można je nazwać czynnikami wewnętrznymi. Źródła

te, przez dużą mniejszą odległość od detektora, niż obserwowany obiekt, mogą całkowicie uniemożliwić pomiar. Dlatego też w wielu kamerach termowizyjnych, a w szczególności tych, które wykorzystują detektory fotonowe, stosuje się układy chłodzenia i tak zwane „zimne przesłony”. Dzięki nim wpływ promieniowania emitowanego przez elementy obudowy na zarejestrowany sygnał ulega znacznemu zmniejszeniu.

Kalibrowana kamera, wykorzystana w tej pracy, wyposażona jest w układ chłodzenia z chłodziarką Stirlinga. Można więc przyjąć, że do jej detektora docierają trzy różne składowe promieniowania, przedstawione na rysunku 1:

- składowa użyteczna emitowana przez obiekt i częściowo pochłaniana przez atmosferę, o współczynniku transmisji τ ,
- składowa pochodząca od otoczenia radiacyjnego, następnie odbita od obserwowanego obiektu i częściowo pochłaniana przez atmosferę,
- składowa wynikająca z emisji termicznej samej atmosfery.

Uwzględniając te składowe, całkowitą luminancję obserwowaną przed detektorem podczerwieni można opisać wzorem (4) [14]:

$$L_m(T) = \tau \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(T) d\lambda + \tau(1-\varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(T_R) d\lambda + (1-\tau) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(T_{atm}) d\lambda, \quad (4)$$

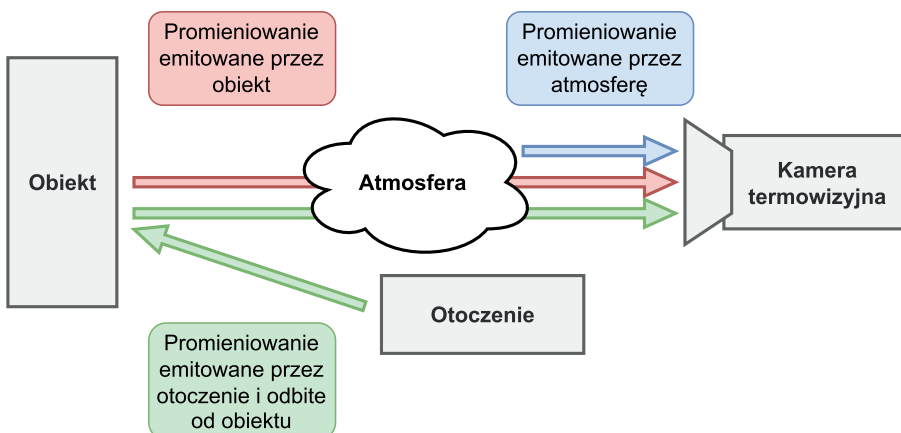
gdzie: $L_m(T)$ – luminancja zmierzona, $L_0(T)$ – luminancja ciała czarnego o temperaturze T , $L_0(T_R)$ – luminancja odpowiadająca emisji elementów otoczenia, $L_0(T_{atm})$ – luminancja odpowiadająca emisji atmosfery, λ_1 – minimalna długość fali promieniowania pochłanianego przez detektor, λ_2 – maksymalna długość fali promieniowania pochłanianego przez detektor, ε – współczynnik emisyjności obiektu.

3. Metoda pomiaru temperatury

3.1. Metoda kalibracji

Skuteczny pomiar temperatury obiektu z dużą dokładnością, wymaga przeprowadzenia kalibracji, w trakcie której wyznaczone są współczynniki aproksymacji. W tym celu należy przygotować specjalne stanowisko pomiarowe, którego schemat został przedstawiony na rysunku 2. Na rysunku 3 z kolei, przedstawiono zdjęcie jego realizacji. W skład stanowiska wchodzi:

- moduł kamery termowizyjnej z matrycowym detektorem chłodzonym, wykonanym z InSb, pracującym w zakresie MWIR, o rozdzielczości matrycy 640×512 pikseli,
- techniczne ciało czarne, o jednorodnym współczynniku emisyjności $\varepsilon = 0,98$ i regulowanej temperaturze,



Rys. 1. Model radiacyjny kamery z detektorem chłodzonym

Fig. 1. Radiative transfer model for a camera with cooled detector

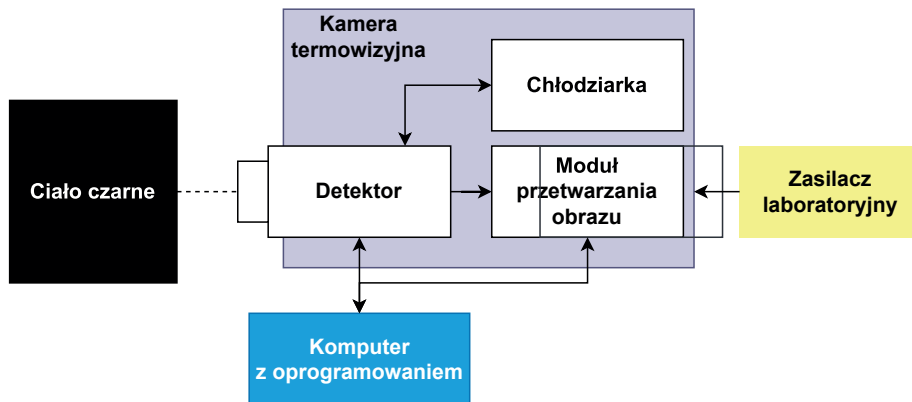

Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Fig. 2. Block diagram of a measurement station

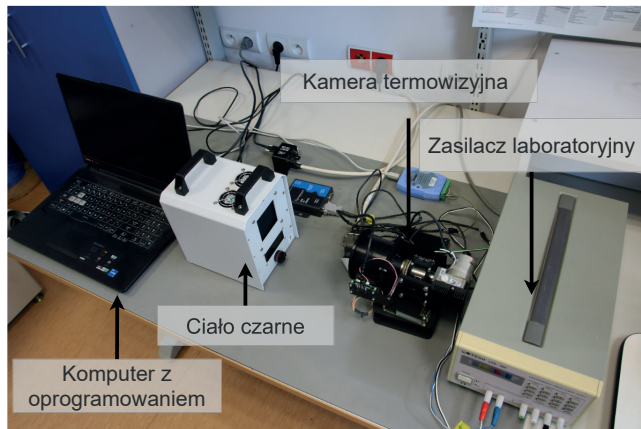

Rys. 3. Zdjęcie stanowiska pomiarowego

Fig. 3. Photo of a measurement station

- komputer ze specjalnie napisanym do badań, dedykowanym oprogramowaniem, realizującym rejestrację obrazu, zamianę go na odpowiedź cyfrową, w formacie 14-bitowym, obliczenia związane z aproksymacją, przeliczaniem odpowiedzi na temperaturę oraz analizą błędów i niepewności,
- zestaw interfejsów potrzebnych do połączenia komputera z kamerą,
- zasilacz laboratoryjny.

Wszystkie czynności związane z kalibracją kamery odbywały się w zamkniętym pomieszczeniu, w możliwie stałej temperaturze, bez dostępu światła słonecznego i z niewielkiej odległości.

Tabela 1. Zestawienie średnich wartości odpowiedzi detektora, oraz odpowiadających im temperatur ciała czarnego

Tab. 1. Comparison of the average detector response values and their corresponding blackbody temperatures

T_{BB} , K	Wartość średnia odpowiedzi, DL
293,15	2346,89
298,15	2552,09
303,15	2790,05
308,15	3058,56
313,15	3363,48
318,15	3706,22
323,15	4093,22

Wynika to z faktu, że kalibracja kamery jest wymagana do określenia wpływu czynników zewnętrznych na odpowiedź detektora, należy je więc na etapie kalibracji zminimalizować. Stanowisko pomiarowe składa się z kamery ustawionej na stabilnym podłożu tak, aby nie ulegała drganiom, wraz z przyrządami umożliwiającymi kalibrację i rejestrację obrazu oraz ciała czarnego o regulowanej wartości temperatury powierzchni i znanej, jednorodnej emisyjności. Ciało czarne jest położone w płaszczyźnie ogniskowania kamery i zajmuje możliwie jak największą część obrazu, bez występowania na nim wyraźnych zniekształceń. Płaszczyzna apertury układu optycznego kamery i płaszczyzna wzorca są względem siebie równoległe. Odległość obiektywu kamery od wzorca nie może być zbyt mała, aby nie zachodziła między nimi wymiana ciepła drogą konwekcji swobodnej, co mogłoby wpłynąć na uzyskiwane wyniki. Ponadto przed przeprowadzeniem kalibracji kamera została poddana korekcji niejednorodności.

Przeprowadzenie kalibracji wymaga zarejestrowania sygnału z kamery dla przynajmniej tylu różnych wartości temperatury ciała czarnego, ile współczynników aproksymacji ma dana metoda. Kamerę skalibrowano w zakresie temperatury 293,15–323,15 K, co odpowiada zakresowi 20–50 °C. Przybliżona zależność ma charakter silnie nieliniowy, więc w celu zwiększenia dokładności dopasowania do obu metod użyto siedmiu punktów pomiarowych z zadanego zakresu. Aby zredukować wpływ szumów, odczytywano wartości odpowiedzi z obszaru obrazu obejmującego fragment ciała czarnego oraz przeprowadzono pomiar w serii czasowej. Następnie uśredniono otrzymane wyniki, w celu uzyskania pojedynczej wartości liczbowej odpowiedzi.

Współczynniki obu metod kalibracji były wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów, bez ograniczonych przedziałów wartości dla współczynników. W celu uzyskania pojedynczej wartości odpowiedzi, zarejestrowano w każdym punkcie minimum 50 obrazów w ciągu 10 sekund, oraz wyznaczono obszar zainteresowania, obejmujący 60 % widocznej powierzchni ciała czarnego, oddalonego od obiektywu kamery o 10 cm, a następnie dokonano uśrednienia czasowego i przestrzennego. Średnie wartości sygnałów dla każdego punktu kalibracyjnego przedstawiono w tabeli 1. Uzyskane przy narzuconej liczbie iteracji algorytmu (równiej 10 000) wartości współczynników obu metod przedstawiono w tabeli 2, dla metody S-H oraz tabeli 3, dla metody RBFO.

Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych współczynników metody Sakuma-Hattori

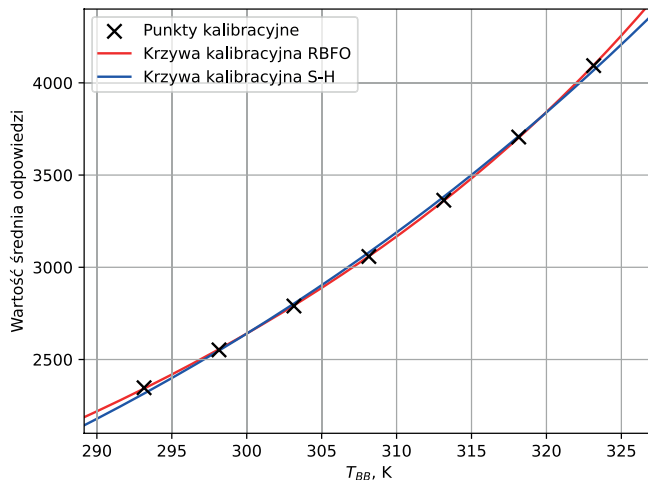
Tab. 2. Comparison of the calculated coefficients of the Sakuma-Hattori method

Współczynnik	Wartość	Jednostka
A	6,03e-7	m
B	4,94e-4	m · K
C	4,75e12	V

Tabela 3. Zestawienie wyznaczonych współczynników metody RBFO
 Tab. 3. Comparison of the determined coefficients of the RBFO method

Współczynnik	Wartość	Jednostka
R	1,62	DL
B	0,64	K
F	1,00	DL
O	-616,65	DL

Na podstawie uzyskanych współczynników wyznaczono krzywe kalibracyjne dla obu metod, które zostały przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Zestawienie punktów kalibracyjnych oraz wyznaczonych na ich podstawie krzywych kalibracyjnych metody S-H i metody RBFO
 Fig. 4. Comparison of calibration points and the corresponding calibration curves obtained using the S-H method and the RBFO method

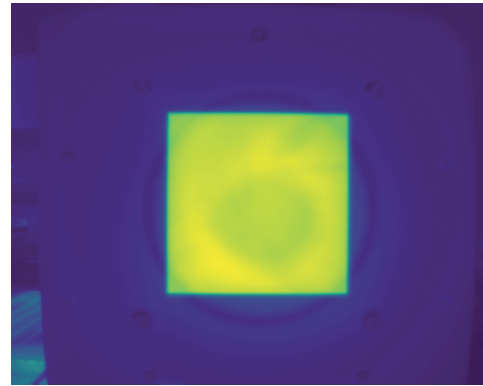
3.2. Weryfikacja skuteczności kalibracji

W celu weryfikacji skuteczności obu metod kalibracji wykonano 16 serii pomiarów temperatury, dla zadanych wartości temperatury cdc z zakresu 293,15–323,15 K, co 2 K. W każdym punkcie pomiarowym zarejestrowano 30 obrazów w ciągu 10 sekund i wyznaczano obszar zainteresowania tak samo, jak przy kalibracji. W tym przypadku jednak ciało czarne było umieszczone w odległości 30 cm od obiektywu kamery i uwzględniono przy tym pomiarze wpływ atmosfery oraz otoczenia radiacyjnego na odpowiedź detektora. Przykładowy fragment termogramu przy pomiarze temperatury przedstawiono na rysunku 5. Ponadto w celu weryfikacji kalibracji, temperatura została obliczona oddzielnie dla każdego pikselu obszaru zainteresowania każdego obrazu.

Pomiar temperatury opiera się na wyznaczeniu ze wzoru S-H oraz ze wzoru RBFO temperatury w funkcji odpowiedzi detektora, uzyskując kolejno wzory (5) i (6):

$$T_{SH} = -\frac{1}{A} \left(B + \frac{c_2}{\ln \frac{U}{C}} \right), \quad (5)$$

$$T_{RBFO} = \frac{B}{\ln \left(\frac{R}{U - O} + F \right)}. \quad (6)$$



Rys. 5. Przykładowy termogram z zaznaczonym obszarem zainteresowania i temperaturą cdc

Fig. 5. Sample thermogram with highlighted region of interest and the BB temperature

Zgodnie z przyjętym modelem radiacyjnym detektora chłodzonego, na całkowitą odpowiedź ma wpływ atmosfera i otoczenie radiacyjne spoza pola widzenia kamery. Na podstawie wzoru (4), otrzymuje się wyrażenie na całkowitą odpowiedź uwzględniającą wszystkie składowe sygnału, zgodnie z przyjętym modelem, co zostało przedstawione równaniem (7):

$$U_c = \tau \varepsilon U(T_0) + \tau(1 - \varepsilon)U(T_R) + (1 - \tau)U(T_{atm}). \quad (7)$$

Odpowiedź U została następnie zastąpiona podstawowymi postaciami równań aproksymacji (równania (2) i (3)). Podstawiając odpowiadające wpływowi atmosfery i otoczenia radiacyjnego temperatury, określono ich udziały w całkowitej odpowiedzi matrycy.

Za temperaturę atmosfery przyjęto 296,15 K, natomiast temperaturę odpowiadającą promieniowaniu odbitemu od cdc wyznaczono za pomocą metody odbiciowej zgodnie normą ISO 18434-1:2008. Zarejestrowano w ten sposób 30 termogramów, z których wyznaczono średnią wartość odpowiedzi pochodzącej od promieniowania odbitego. Następnie odpowiedź ta została przeliczona na temperaturę, zgodnie z wzorami (5) i (6), kolejno dla metody Sakuma-Hattori i metody RBFO, w wyniku czego otrzymano $T_{RSH} = 300,28$ K, oraz $T_{RRBFO} = 300,23$ K.

Za współczynnik emisyjności ciała czarnego przyjęto wartość 0,98. Transmisję atmosfery obliczono natomiast w oparciu o prawo Lamberta-Beera na odległości 30 cm, dzięki czemu uzyskano wartość 0,99997. Do obliczeń przyjęto więc zaokrągloną wartość równą 1. W ten sposób końcowe wyrażenia na temperaturę przyjmują postać zgodną z wzorem (8) dla metody Sakuma-Hattori, oraz wzorem (9) dla metody RBFO:

$$T_{SH} = -\frac{1}{A} \left(B + \frac{c_2}{\ln \frac{U_c - (1 - \varepsilon)U(T_R)}{C\varepsilon}} \right), \quad (8)$$

$$T_{RBFO} = \frac{B}{\ln \left(\frac{R}{\frac{U_c - (1 - \varepsilon)U(T_R)}{\varepsilon} - O} + F \right)}, \quad (9)$$

a wyniki tak obliczonych temperatur przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie obliczonych wartości temperatury
 Tab. 4. Comparison of calculated temperature values

T_{BB} , K	Wartość średnia odpowiedzi, DL	T_{RBFO} , K	T_{SH} , K
293,15	2335,54	293,18	293,78
295,15	2413,21	295,07	295,48
297,15	2496,53	297,01	297,25
299,15	2584,40	298,97	299,05
301,15	2677,27	300,96	300,91
303,15	2776,20	302,99	302,82
305,15	2880,45	305,04	304,77
307,15	2988,29	307,06	306,72

T_{BB} , K	Wartość średnia odpowiedzi, DL	T_{RBFO} , K	T_{SH} , K
309,15	3103,87	309,10	308,73
311,15	3224,63	311,15	310,78
313,15	3353,39	313,22	312,88
315,15	3485,57	315,23	314,96
317,15	3624,88	317,23	317,05
319,15	3772,06	319,25	319,22
321,15	3924,22	321,23	321,38
323,15	4088,06	323,20	323,58

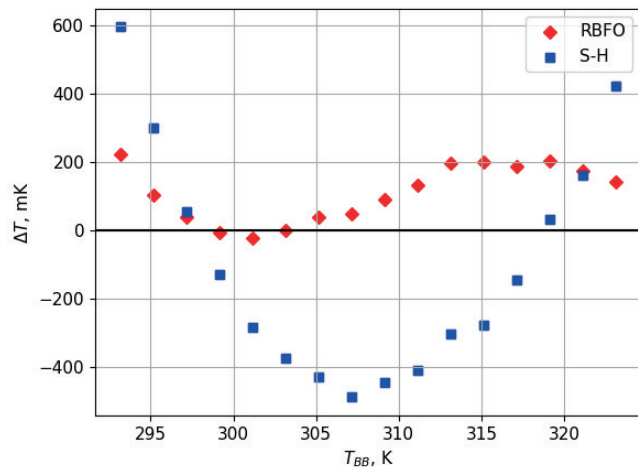
3.3. Analiza i porównanie wyników

W celu porównania skuteczności użytych metod kalibracji radiometrycznej, wyznaczono błąd bezwzględny ΔT i względny δT , oddzielnie dla każdej wartości temperatury cdc. Za wartość błędu bezwzględnego w każdej serii przyjęto różnicę między wartością średnią temperatury dla wszystkich pikseli obszaru zainteresowania a zadaną wartością temperatury wzorca. Wyznaczone wartości błędów zostały przedstawione na rysunku 6. Błąd względny wyznaczono jako procentowy stosunek wartości błędu bezwzględnego do wartości temperatury cdc. Wartości błędu względnego przedstawiono na rysunku 7.

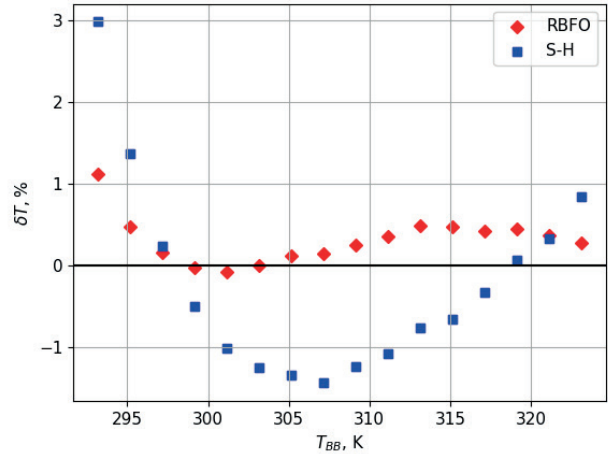
Ponadto jako dodatkową miarę skuteczności, zbadano statystyczny rozrzut wyznaczanych wartości temperatury wokół wartości średniej, dla obu metod kalibracji. W tym celu wyznaczono odchylenie standardowe s_T w każdej serii pomiarowej zgodnie ze wzorem (10):

$$s_T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (T_n - \bar{T})^2}, \quad (10)$$

gdzie: N – liczba pikseli w serii pomiarowej, T_n – wartość temperatury obliczona z n -tego pikselu, \bar{T} – wartość średnia temperatury z całej serii.

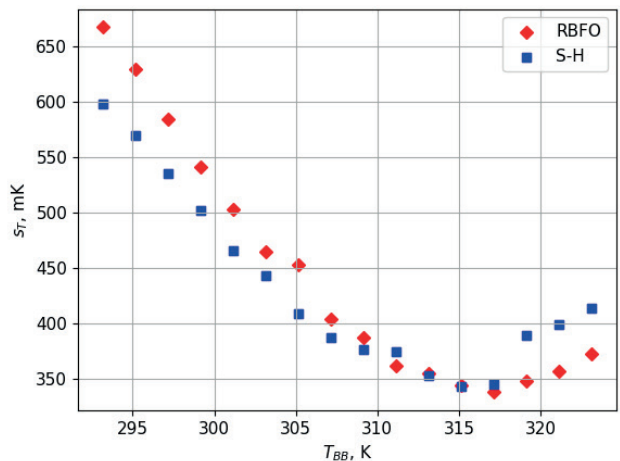


Rys. 6. Błąd bezwzględny dla kalibracji radiometrycznej metodą Sakuma-Hattori i RBFO
 Fig. 6. Absolute error for radiometric calibration using the Sakuma-Hattori method and RBFO method



Rys. 7. Błąd względny dla kalibracji radiometrycznej metodą Sakuma-Hattori i RBFO
 Fig. 7. Relative error for radiometric calibration using the Sakuma-Hattori method and RBFO method

Zestawienie obliczonych błędów i rozrzutu wyników przedstawiono w tabeli 5, zaś na rysunku 8 przedstawiono wykres wartości odchylenia standardowego.



Rys. 8. Odchylenie standardowe od średniej temperatury obliczonej dla kalibracji radiometrycznej metodą Sakuma-Hattori i RBFO
 Fig. 8. Standard deviation from average temperature value calculated for radiometric calibration using the Sakuma-Hattori method and RBFO method

Tabela 5. Zestawienie błędów pomiarowych i rozrzutu wyników kalibracji radiometrycznej metodą Sakuma-Hattori i RBFO

Tab. 5. Comparison of measurement errors and the spread of results in radiometric calibration using the Sakuma-Hattori method and RBFO method

T_{BB} , K	ΔT_{RBFO} , mK	δT_{RBFO} , %	ΔT_{SH} , mK	δT_{SH} , %	s_{TRBFO} , mK	s_{TSH} , mK
293,15	220	1,1	600	3,0	670	600
295,15	110	0,5	300	1,4	630	570
297,15	40	0,2	60	0,3	580	540
299,15	-10	-0,0	-130	-0,5	540	500
301,15	-20	-0,1	-290	-1,0	500	470
303,15	-0	-0,0	-380	-1,3	470	440
305,15	40	0,1	-420	-1,3	450	440
307,15	50	0,1	-480	-1,4	400	390
309,15	90	0,3	-460	-1,3	390	380
311,15	130	0,4	-420	-1,1	360	370
313,15	200	0,5	-320	-0,8	360	360
315,15	200	0,5	-250	-0,6	350	360
317,15	190	0,4	-150	-0,3	340	360
319,15	200	0,4	10	0,0	350	380
321,15	180	0,4	180	0,4	360	390
323,15	140	0,3	380	0,8	370	420

W większości przeprowadzonych serii pomiarowych wartość błędu bezwzględnego i względnego metody RBFO jest mniejsza, niż w przypadku metody Sakuma-Hattori. Relacja ta jest odwrotna dla wartości temperatury wzorca równej 297,15; 299,15 i 319,15 K. Może to jednak wynikać wprost z kształtów krzywych tworzących wykresy obu metod i zmianą znaków wartości błędów. Kształt obu wykresów błędu metody Sakuma-Hattori jest parabolą, a metody RBFO – sinusoidą lub fragmentem funkcji wielomianowej trzeciego rzędu. Różnica ta może wynikać z innej liczby wyznaczanych współczynników aproksymacji. Rozrzut wyników pomiaru temperatury jest zbliżony dla obu metod kalibracji.

4. Wnioski

W większości punktów pomiarowych temperatura obliczona za pomocą równania RBFO jest bliższa zadanej temperaturze wzorcowej obserwowanego ciała czarnego, niż ta uzyskana poprzez zastosowanie równania Sakuma-Hattori. Krzywa kalibracyjna równania RBFO przebiega także bliżej punktów kalibracyjnych. Kształt wykresów błędu obu metod może wynikać z nieliniowej natury aproksymacji i występowania innej liczby ich współczynników.

Liczba indywidualnych dla każdego piksela obliczeń powoduje, że cała procedura pomiaru, łącznie z wyznaczeniem współczynników krzywych kalibracyjnych, jest stosunkowo

czasochłonna i zajmuje około kilkadziesiąt sekund. Ponieważ rozrzut wyników pomiaru pochodząca od statystycznych różnic w odczytanym dla każdego piksela sygnale jest mała w porównaniu z innymi jej składowymi, w celu przyspieszenia pomiaru i obliczeń można zmniejszyć liczbę pozyskiwanych obrazów, bez znacznego pogorszenia dokładności.

Dzięki temu, że testowy pomiar temperatury przeprowadzony został z niewielkiej odległości, wpływ atmosfery na odpowiedź detektora był znikomy. Wraz ze wzrostem odległości od celu staje się on jednak coraz bardziej znaczący i może wprowadzać duże błędy. Chcąc zastosować tak skalibrowaną kamerę do pomiarów temperatury z większej odległości, należałoby dostosować przyjęte modele w celu uwzględnienia większej liczby zmiennych czynników. Wprowadzając takie parametry jak odległość, czy wilgotność powietrza, można jeszcze precyzyjniej odwzorować wpływ atmosfery i zmniejszyć powodowany przez nią spadek dokładności pomiarów poza warunkami laboratoryjnymi, co może być przedmiotem przyszłych badań.

Należy zaznaczyć, że cały proces kalibracji, oraz jej weryfikacji był przeprowadzany w warunkach laboratoryjnych. Poza nimi pomiar temperatury z wykorzystaniem ustalonych współczynników aproksymacji będzie znacznie mniej dokładny, z uwagi na widmową charakterystykę emisyjności celu, ale także przez większą niejednorodność i udział atmosfery w modelu radiacyjnym, oraz obecność wielu innych źródeł promieniowania wprowadzających dodatkowy szum.

Bibliografia

1. Bielecki Z., Rogalski A., *Detekcja sygnałów optycznych*. Wydawnictwo naukowe PWN, 2021.
2. Więcek B., De Mey G., *Termowizja w Podczerwieni Podstawy i Zastosowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
3. Howell J., Mengüç M.P., Siegel R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press Taylor & Francis, 2015, DOI: 10.1201/9780429327308.
4. Minkina W., Dudzik S., *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*, NJ: Wiley, 2009.
5. Park S.-N., Kim B.-H., Park C.-W., Lee D.-H., *Realization of Radiance Temperature Scale from 500K to 1,250K by a Radiation Thermometer with a Thermal Detector*, "International Journal of Thermophysics", Vol. 29, 2008, 301–311, DOI: 10.1007/s10765-007-0328-2.
6. Lane B., Whittenton E., Madhavan V., Donmez M., *Uncertainty of temperature measurements by infrared thermography for metal cutting applications*, "Metrologia", Vol. 50, No. 6, 2013, DOI: 10.1088/0026-1394/50/6/637.
7. Sakumam F., Hattori S., *Study for Establishing a Practical Temperature Standard by Using Silicon Narrow-Band Radiation Thermometer*, "Journal of the Society of Instrument and Control Engineers", Vol. 18, No. 5, 1982, 482–488, DOI: 10.9746/sicetr1965.18.482.
8. Minkina W., *Pomiary termowizyjne: przyrządy i metody*, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, 2004.
9. Martiny M., Schiele R., Gritsch M., Schulz A., Wittig S., *In situ calibration for quantitative infrared thermography*, Proceedings of the 1996 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, QIRT Council, 1996, DOI: 10.21611/qirt.1996.001.
10. Pron H., Menanteau W., Bissieux C., Beaudoin J., *Characterization of a focal plane array (FPA) infrared camera*, Proceedings of the 2000 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, QIRT Council, 2000, DOI: 10.21611/qirt.2000.061.
11. Ragheb H., Hamid M., *An approximation of Planck's formula for the inverse black body radiation problem*, "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", Vol. 35, No. 6, 1987, 739–742, DOI: 10.1109/TAP.1987.1144165.
12. Horny N., *FPA camera standardisation*, "Infrared Physics & Technology", Vol. 44, No. 2, 2003, 109–119, DOI: 10.1016/S1350-4495(02)00183-4.
13. Budzier H., Gerlach G., *Calibration of uncooled thermal infrared cameras*, "Journal of Sensors and Sensor Systems", Vol. 4, No. 1, 2015, 187–197, DOI: 10.5194/jsss-4-187-2015.
14. Sosnowski T., Bieszczad G., Gogler S., Madura H., Felczak M., Strąkowski R., *Radiacyjny model obudowy chłodzonego matrycowego detektora podczerwieni*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 25, Nr 4, 2021, 67–76, DOI: 10.14313/PAR_242/67.

Comparative Analysis of Selected Calibration Methods for a Thermal Imaging Camera with a Cooled Detector Operating in the MWIR Range

Abstract: For accurate remote temperature measurement with a thermal imaging camera, it is necessary to perform radiometric calibration. This allows the radiative parameters of an object, and therefore its temperature, to be related to the response of the infrared detector observing it. The article presents the basic concepts related to radiometric calibration and various factors influencing its effectiveness. The most common calibration methods were also reviewed, and then two of them were implemented and compared on a specially constructed laboratory station, using proprietary software and equipped with a cooled infrared camera, operating in the MWIR range. The camera was calibrated in the temperature range from 20 °C to 50 °C. The comparison of methods was carried out on the basis of a series of temperature measurements, analysis of absolute and relative errors, as well as analysis of the dispersion of the measured temperature values.

Keywords: Thermal camera, Radiometric calibration, Remote temperature measurement

mgr inż. Karol Erd

karol.erd@wat.edu.pl

ORCID: 0009-0007-0532-6578

Ukończył w 2023 r. Wojskową Akademię Techniczną w Instytucie Optoelektroniki. Obecnie zajmuje się zagadnieniami związanymi z przetwarzaniem obrazu, ich zastosowaniem w technice podczerwieni, a także zdalnym pomiarem temperatury.

