



## Metoda radiacyjnego pomiaru temperatury z kompensacją wpływu promieniowania słonecznego

HENRYK MADURA, TADEUSZ PIĄTKOWSKI, MARIUSZ KASTEK,  
MARIUSZ KOŁODZIEJCZYK

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

**Streszczenie.** Bezkontaktowe pomiary temperatury obiektu w zakresie podczerwieni, prowadzone w warunkach zewnętrznych, mogą być obciążone znacznymi błędami. Błąd pomiaru temperatury może być bardzo duży dla przypadku, gdy promieniowanie słoneczne po odbiciu od obiektu propaguje się wzdłuż osi optycznej przyrządu pomiarowego (kamery termowizyjnej, pirometru). Strumienie odbitego od obiektu promieniowania słonecznego oraz promieniowania własnego obiektu sumują się i odczytana wartość temperatury jest zawyżona. W pracy przedstawiono wyniki teoretycznej oceny błędów pomiaru temperatury i porównano je z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej. Obliczenia i pomiary wykonano w zakresie widmowym 7,5-13  $\mu\text{m}$  dla obiektów o różnej emisyjności.

**Słowa kluczowe:** pirometr, bezkontaktowy pomiar temperatury

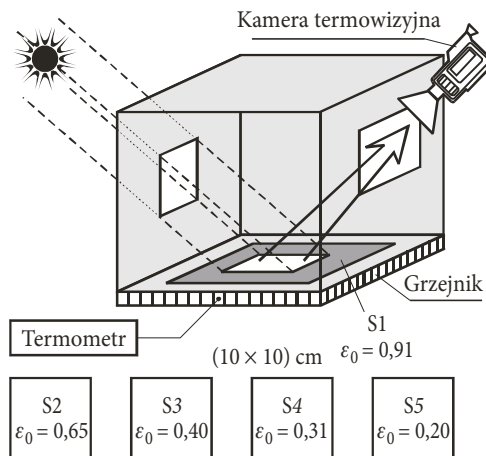
**Symbole UKD:** 536.52

### 1. Wprowadzenie

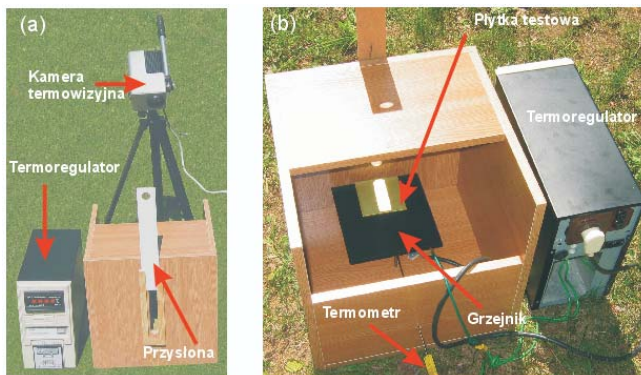
Wyniki zdalnych pomiarów temperatury obiektów o niskiej emisyjności wykonywane w warunkach silnego nasłonecznienia mogą być obciążone znacznymi błędami. W szczególności należy unikać takiej sytuacji pomiarowej, gdy promieniowanie słoneczne odbija się kierunkowo od powierzchni, której temperatura jest mierzona. W niektórych przypadkach możliwe jest stosowanie różnego rodzaju zasłon ograniczających wpływ promieniowania słonecznego. Przy automatycznych pomiarach temperatury problem wpływu zakłócającego promieniowania słońca pozostaje nierozwiązany.

Celem badań jest określenie wpływu promieniowania słonecznego na wyniki pomiarów temperatury za pomocą pirometrów lub kamer termowizyjnych oraz podanie sposobu minimalizacji błędów pomiarowych. Do określenia wpływu promieniowania słonecznego na błąd pomiaru temperatury w warunkach terenowych, wykonano stanowisko pomiarowe. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Za pomocą wykonanego stanowiska, kamerą termowizyjną badano temperaturę płytek metalowych S1-S5 o różnej emisyjności, które kolejno umieszczano wewnątrz obudowy tak, aby znajdowały się w środku pola widzenia kamery termowizyjnej. Odległość obiektu kamery do badanej płytki wynosiła 120 cm.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do badań wpływu promieniowania słonecznego na wyniki zdalnych pomiarów temperatury obiektu

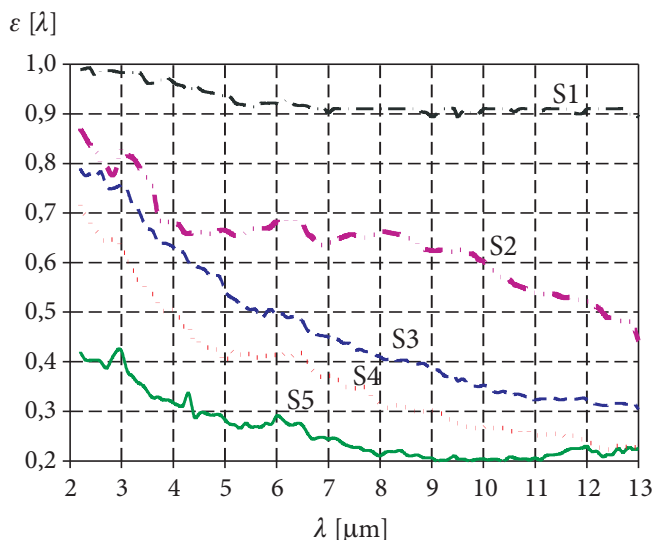


Rys. 2. Zdjęcie stanowiska pomiarowego: (a) widok ogólny, (b) widok od strony kamery

Promienie słoneczne docierają do badanej płytki metalowej przez prostokątny otwór wycięty w przedniej ścianie obudowy tak, aby była oświetlona tylko część płytki badanej. Umożliwia to jednoczesny pomiar temperatury fragmentu płytki, do którego docierają promienie słoneczne (na rysunku 1 zaznaczone jaśniejszym kolorem) oraz fragmentu, do którego promienie słoneczne nie docierają (kolor ciemniejszy). Promienie słoneczne po odbiciu od badanej płytki propagują się wzdłuż osi optycznej kamery termowizyjnej.

Aby wyeliminować efekt podgrzewania badanych płytek przez padające promieniowanie słoneczne, otwór prostokątny otwierany był tylko na czas trwania pomiaru, tj. ok. 2 s. Temperatura badanych płytek była ustalana i stabilizowana za pomocą grzejnika i monitorowana termometrem.

Emisyjność widmową płytek (rys. 3) wyznaczono za pomocą spektrofotometru Specord 71 IR. Do kamery wprowadzana była emisyjność uśredniona dla danego zakresu pracy kamery termowizyjnej.



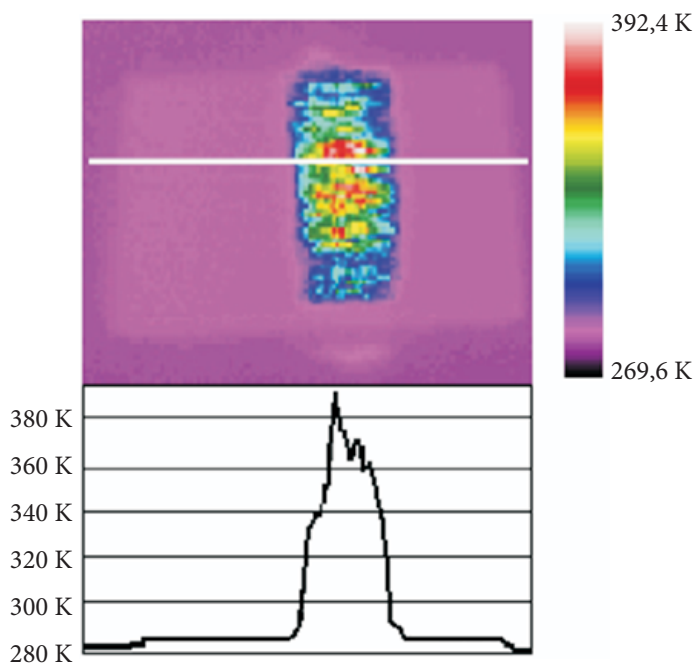
Rys. 3. Emisyjność widmowa płytek S1-S5

W tabeli 1 przedstawiono uśrednione wartości emisyjności płytek testowych wyznaczone dla zakresu pracy kamery termowizyjnej ThermaCam SC 3000. Na rysunku 4 przedstawiono termogram ilustrujący wpływ odbitego promieniowania słonecznego na wynik pomiaru płaskiej płytki aluminiowej pomalowanej farbą. Rzeczywista temperatura płytki wynosiła 285 K. Widoczne na rysunku prostokątne pole oświetlono światłem słonecznym (o natężeniu  $24 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) jedynie na czas wykonania termogramu.

TABELA 1

Uśredniona emisyjność płytek testowych S1-S5 dla wybranych widmowych zakresów pracy kamery termowizyjnej LWIR

Płytki testowa	Uśredniona emisyjność płytek testowych dla wybranych podzakresów widmowych			
	3÷5 $\mu\text{m}$	8÷9 $\mu\text{m}$	8÷12 $\mu\text{m}$	7,5÷13 $\mu\text{m}$
S1 (aluminium oksydowane)	0,95	0,91	0,91	0,91
S2 (aluminium + farba chromowa)	0,71	0,65	0,59	0,58
S3 (miedź)	0,64	0,40	0,36	0,35
S4 (balcha cynkowana)	0,50	0,31	0,27	0,27
S5 (blacha cynowana)	0,33	0,21	0,21	0,21



Rys. 4. Zarejestrowany za pomocą kamery termowizyjnej ThermoCam SC 3000 termogram płytki oświetlonej promieniowaniem słonecznym (płytki o współczynniku emisyjności  $\epsilon = 0,9$  i temperaturze  $T = 285$  K)

Wartości temperatury na oświetlonych i nieoświetlonych obszarach tego samego elementu (płytki) mogą się różnić od kilku do nawet kilkuset stopni [1]. W takim przypadku pomiar należy powtórzyć kilkakrotnie z różnych kierunków obserwacji. Jeżeli powierzchnia obiektu nie jest płaska, to efekt odbicia promieniowania słonecznego może być zauważalny nawet po zmianie położenia kamery względem obiektu. W pirometrach podczerwieni, w których wynik nie jest przedstawiany w postaci termogramu, ale w postaci pojedynczej wartości, interpretacja wyniku jest o wiele trudniejsza. Podejmowane są próby układowego ograniczenia wpływu promieniowania słonecznego na zdalne pomiary temperatury. Najczęściej stosuje się metody podobne do eliminacji wpływu współczynnika emisyjności na dokładność pomiaru temperatury, takiej jak np. metody wielowidmowe [2, 3, 4].

Obecnie nie są znane żadne przemysłowe rozwiązania pirometrów jednopasmowych, które miałyby układ korekcji czy eliminacji wpływu promieniowania słonecznego. Istnieją jednak specjalistyczne rozwiązania pirometrów wielowidmowych, w których użytkownik jest informowany, że pomiar może być obciążony błędem spowodowanym przez promieniowanie słoneczne [5] i należy pomiar powtórzyć.

## 2. Opis zależności i oznaczeń układu pomiarowego

Egzytancja energetyczna ciała doskonale czarnego o temperaturze  $T$ , dla danego zakresu widmowego  $\lambda_1 \div \lambda_2$  wynika z zależności Plancka:

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda, \quad (1)$$

gdzie:  $c_1, c_2$  — stałe promieniowania;  
 $\lambda$  — długość fali;  
 $T$  — temperatura ciała czarnego.

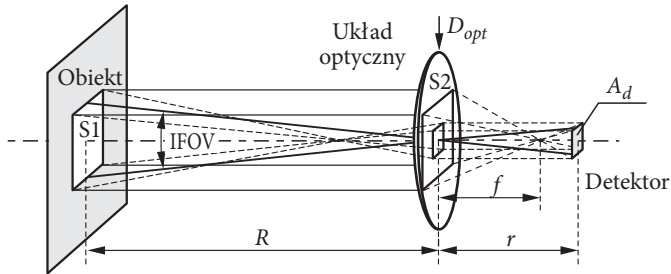
Wartość mocy promieniowania docierającego do powierzchni detektora wynosi (rys. 5):

$$P(T) = q M(T), \quad (2)$$

gdzie:  $q$  — stała konstrukcyjna wynikająca z budowy pirometru (rys. 5),

$$q = \left( D_{opt} \operatorname{tg} \frac{\text{IFOV}}{2} \right)^2, \quad (3)$$

przy czym:  $D_{opt}$  — średnica źrenicy wejściowej obiektywu; IFOV — kąt pola widzenia detektora (lub pojedynczego piksela matrycy detektorów).



Rys. 5. Geometryczne zależności pomiędzy obiektem a układem optycznym pirometru i detektorem

Współczynnik konstrukcyjny można zapisać w równoważnej postaci [6, 7, 8]:

$$q = \frac{A_d}{4F^2 \cdot \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2}, \quad (4)$$

przy czym:  $A_d$  — pole powierzchni detektora lub pojedynczego piksela w matrycy detektorów;

$F$  — liczba otworowa układu optycznego;

$r$  — odległość detektora od czoła obiektywu (soczewki);

$R$  — odległość obiektu od obiektywu pirometru (kamery);

$f$  — ogniskowa obiektywu.

### 3. Promieniowanie Słońca

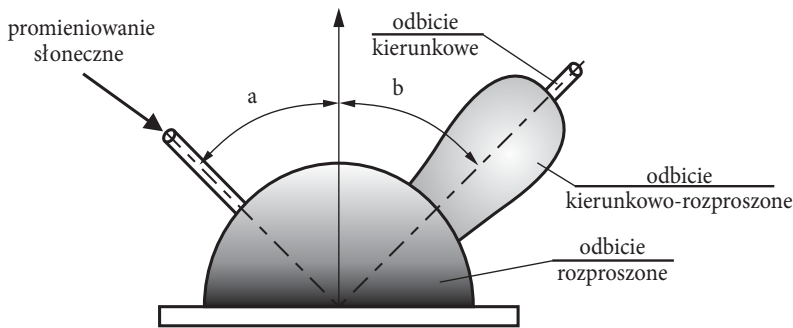
Temperatura powierzchni Słońca wynosi w przybliżeniu 5900 K. Widmowy rozkład promieniowania słonecznego jest najlepiej przybliżony przez widmowy rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 5770 K, którego rozmiar odpowiada rozmiarowi Słońca [9]. Ciało to emituje promieniowanie jednakowo we wszystkich kierunkach. Zanim dotrze do powierzchni Ziemi jest pochłaniane oraz rozpraszane przez gazy atmosferyczne i aerozole. Stosunek natężenia promieniowania słonecznego mierzonego na zewnątrz atmosfery ziemskiej  $E_e(\lambda)$  do natężenia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi  $E_s(\lambda)$ , wyznaczony dla poszczególnych długości fal, jest nazywany widmowym współczynnikiem przepuszczalności atmosfery ziemskiej  $\tau_E(\lambda)$ . Dokładne wyzna-

czenie  $\tau_E(\lambda)$  wymaga uwzględnienia wielu czynników i parametrów opisujących atmosferę. Do najważniejszych należy zaliczyć: zawartość i stopień kondensacji pary wodnej, temperaturę, ciśnienie atmosferyczne, grubość atmosfery ziemskiej oraz stężenie zawartych w niej cząsteczek gazów i aerozoli.

Natężenie promieniowania słonecznego całkowitego  $E_S$ , w wybranym zakresie widmowym  $\lambda_1 \div \lambda_2$ , można określić następująco:

$$E_S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_E(\lambda) E_e(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

W zależności od rozkładu przestrzennego strumienia promieniowania słonecznego po odbiciu od powierzchni obiektu możemy wyróżnić następujące typy odbicia (rys. 6): odbicie kierunkowe (ang. *specular reflection*, *regular reflection*), występujące przy odbiciu od gładkiej wypolerowanej powierzchni, odbicie rozproszone (ang. *diffuse reflection*), występujące przy odbiciu od powierzchni chropowatej, odbicie kierunkowo-rozproszone (ang. *directional diffuse reflection*, *mixed reflection*, *hybrid reflection*), wykazujące zarówno cechy odbicia kierunkowego, jak i rozproszonego [10].



Rys. 6. Rodzaje odbicia promieniowania słonecznego od powierzchni obiektu

Rozkład przestrzenny promieniowania słonecznego docierającego do detektora pirometru lub kamery termowizyjnej zależy więc od struktury powierzchni, stopnia jej chropowatości i umiejscowienia urządzenia pomiarowego względem kierunku padającego promieniowania słonecznego.

Przypadki odbicia kierunkowego i rozproszonego są przypadkami krańcowymi i rzadko występują w rzeczywistości. Moc promieniowania słonecznego  $P_S$ , dla przypadku odbicia kierunkowo-rozproszonego, może być określona wyrażeniem:

$$P_s = \begin{cases} A_d \left( \frac{R-f}{f} \right)^2 E_s = \left( 2 R \operatorname{tg} \frac{\text{IFOV}}{2} \right)^2 E_s, & \alpha = \beta \\ q E_s, & \alpha \neq \beta. \end{cases} \quad (6)$$

#### 4. Model obliczeniowy przyjęty do wyznaczenia temperatury obiektu

W rzeczywistych warunkach pomiarowych moc promieniowania docierającego do apertury wejściowej układu optycznego przyrządu pomiarowego zależy od bardzo wielu czynników. Do najważniejszych należy zaliczyć przede wszystkim właściwości promienne samego obiektu, które są określone jego temperaturą i emisyjnością. W praktyce pomiarowej emisyjność najczęściej nie jest znana i nawet korzystanie z gotowych tablic nie daje pewności, że do obliczeń jej wartość została przyjęta prawidłowo. Emisyjność zależy od takich czynników, jak np. struktura i stopień utlenienia powierzchni, jej temperatura, kierunek obserwacji czy przedział widmowy, dla którego ma być wyznaczona.

Pośród innych czynników mających wpływ na moc promieniowania docierającego do apertury wejściowej układu optycznego przyrządu pomiarowego należy wymienić: promieniowanie odbite od powierzchni obiektu, a także absorpcyjne, rozpraszające i promienne właściwości atmosfery.

Sumaryczną wartość mocy promieniowania docierającego do apertury wejściowej układu optycznego, dla typowych warunków pomiarowych, można określić wyrażeniem [11]:

$$P_c = \varepsilon \tau_a P(T) + (1 - \tau_a) P_a(T_a) + (1 - \varepsilon) \tau_a P_{ot}(T_{ot}), \quad (7)$$

przy czym:  $\varepsilon$  — emisyjność obiektu;

$\tau_a$  — współczynnik przepuszczalności atmosfery pomiędzy obiektem a kamerą;

$P(T)$  — moc promieniowania ciała czarnego o temperaturze  $T$ ;

$P_a(T_a)$  — moc promieniowania atmosfery o temperaturze  $T_a$ ;

$P_{ot}(T_{ot})$  — moc promieniowania otoczenia o temperaturze  $T_{ot}$ .

Jeżeli przyjąć, że każdy ze składników mocy promieniowania, tj.  $P(T)$ ,  $P_a(T_a)$ ,  $P_{ot}(T_{ot})$ , spowoduje wygenerowanie na wyjściu detektora proporcjonalnego do niej sygnału napięciowego odpowiednio  $U(T)$ ,  $U_a(T_a)$ ,  $U_{ot}(T_{ot})$ , to otrzymuje się wyrażenie na całkowitą wartość sygnału napięciowego:

$$U_c = \varepsilon \tau_a U(T) + (1 - \tau_a) U_a(T_a) + (1 - \varepsilon) \tau_a U_{ot}(T_{ot}). \quad (8)$$



W urządzeniach, w których powyższą zależność stosuje się w celu wyznaczenia temperatury obiektu użytkownik powinien oszacować i wprowadzić poprawki na wartości parametrów, takich jak: emisyjność obiektu  $\varepsilon'$ , współczynnik przepuszczalności atmosfery  $\tau_a'$ , temperatura atmosfery  $T_a'$ , temperatura otoczenia  $T_{ot}'$ .

Rozwiązując równanie (8) ze względu na  $U(T)$  i uwzględniając wprowadzone poprawki, otrzymujemy:

$$U(T_o) = \frac{1}{\varepsilon' \tau_a'} U_c - \frac{1 - \tau_a'}{\varepsilon' \tau_a'} U_a(T_a') - \frac{1 - \varepsilon'}{\varepsilon'} U_{ot}(T_{ot}'). \quad (9)$$

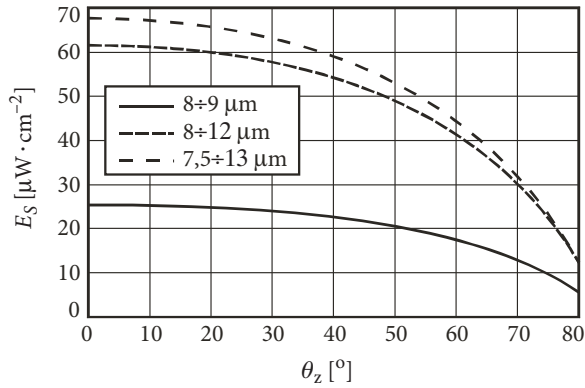
Znając wartość napięcia  $U(T_o)$ , można na podstawie charakterystyki kalibracyjnej urządzenia wyznaczyć temperaturę obiektu  $T_o$  (indeks wprowadzony dla odróżnienia wartości obliczonej od rzeczywistej). Błąd względny wyznaczenia temperatury obiektu

$$\delta_T = \frac{T_o - T}{T} 100\%, \quad (10)$$

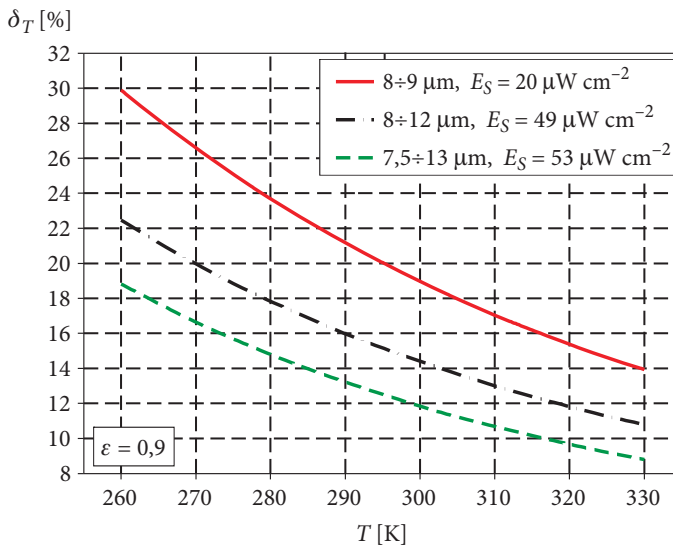
zależy w głównej mierze od różnicy pomiędzy rzeczywistymi wartościami parametrów występujących w równaniu (8), a wartościami wprowadzonymi. Należy zauważyć, że w metodzie tej przyjęto założenie, że poszczególne składniki promieniowania opisane są prawem Lamberta, co w przypadku odbicia kierunkowego i kierunkowo rozproszonego nie jest spełnione.

## 5. Wyniki obliczeń

Dla przedstawionego powyżej matematycznego opisu zjawisk przyjęto, że dla bliskich odległości współczynnik  $\tau_a = 1$ . Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla widma promieniowania słonecznego wyznaczonego w programie PcModWin 3.0 dla atmosfery letniej, warunków wiejskich, widoczności 23 km i kąta odchylenia Słońca od zenitu  $\theta_z = 30^\circ$ . Program PcModWin jest jednym z najlepszych programów symulacyjnych powszechnie stosowanych do obliczeń transmisji atmosfery czy rozkładu widmowego promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi po przejściu przez atmosferę. Na podstawie wykonanych obliczeń w programie PcModWin 3.0 wyznaczono całkowite natężenie promieniowania słonecznego  $E_s$  obliczono dla typowych zakresów pracy długofalowych pirometrów podczerwieni i kamer termowizyjnych, tj.  $8 \div 9 \mu\text{m}$ ,  $8 \div 12 \mu\text{m}$  oraz  $7,5 \div 13 \mu\text{m}$  (rys. 7). Do obliczeń względnego błędu odczytu temperatury przyjęto następujące wartości parametrów wejściowych  $R = 120 \text{ cm}$ ,  $f = 3,5 \text{ cm}$ ,  $D_{opt} = 5 \text{ cm}$ ,  $\text{IFOV} = 1,1 \text{ mrad}$ ,  $T = 260 \div 330 \text{ K}$ . Obliczone wartości błędu względnego temperatury dla obiektów o emisyjności  $\varepsilon = 0,9$  oraz  $\varepsilon = 0,6$  przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

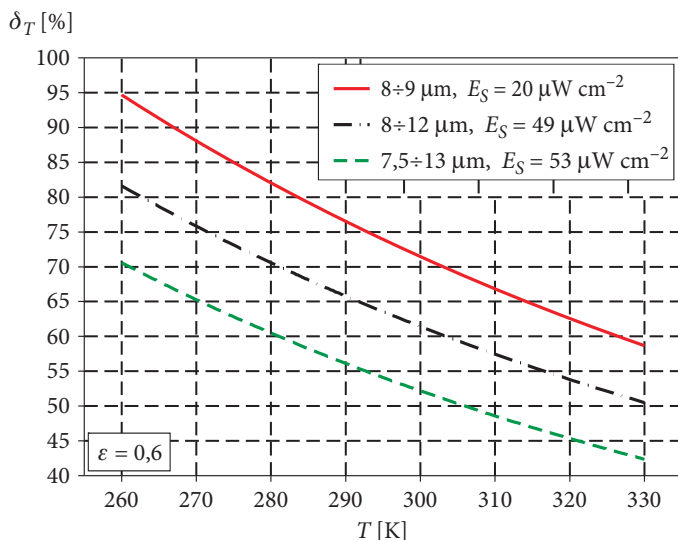


Rys. 7. Natężenie promieniowania słonecznego wyznaczonego w programie PcModWin 3.0 dla atmosfery letniej, w zależności od kąta odchylenia Słońca od zenitu



Rys. 8. Błąd względny wyznaczenia temperatury obiektu dla obiektu o współczynniku emisyjności  $\varepsilon = 0,9$  dla trzech zakresów widmowych i dla atmosfery letniej, warunków wiejskich, widoczności 23 km i kąta odchylenia Słońca od zenitu  $\theta_z = 50^\circ$

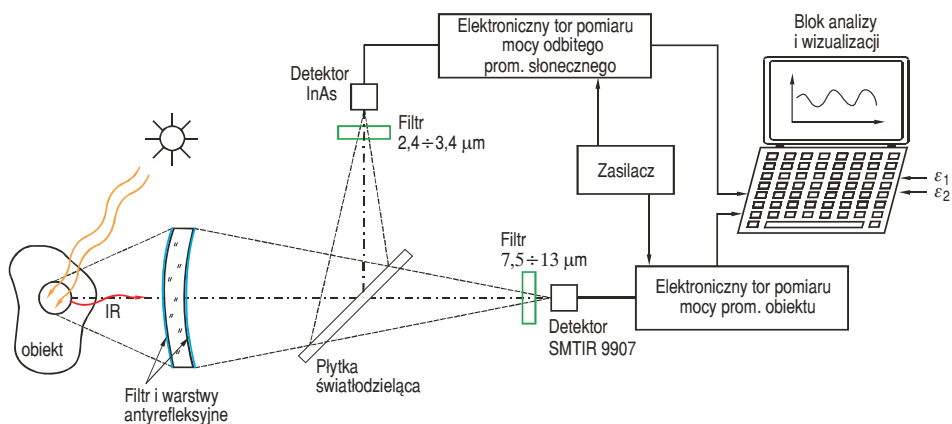
Z obliczeń wynika, że błąd względny pomiaru temperatury spowodowany promieniowaniem słonecznym zależy zarówno od emisyjności, jak i od temperatury obiektu. Zależy on również od szerokości pasma detekcji. Generalnie im węższe pasmo, tym większy błąd. Wynika to z tego, że maleje moc promieniowania własnego obiektu w stosunku do mocy promieniowania słonecznego odbitego od niego. Ponadto błąd rośnie, gdy rośnie natężenie promieniowania słonecznego.



Rys. 9. Błąd względny wyznaczenia temperatury obiektu dla obiektu współczynnika emisyjności  $\epsilon = 0,6$  dla trzech zakresów widmowych i dla atmosfery letniej, warunków wiejskich, widoczności 23 km i kąta odchylenia Słońca od zenitu  $\theta_z = 50^\circ$

## 6. Opis metody pomiaru

Metoda pomiaru temperatury w warunkach nasłonecznienia polega na jednoczesnym pomiarze mocy promieniowania obiektu w paśmie krótkofalowym  $2,4 \div 3,4 \mu\text{m}$  i długofalowym. Pole obserwacji układu optycznego jest identyczne dla obydwu pasm (rys. 10).



Rys. 10. Schemat pirometru z układem kompensacji wpływu promieniowania słonecznego

Pasmo krótkofalowe jest dostatecznie oddalone od pasma długofalowego. Zatem na wyjściu detektora krótkofalowego nie obserwuje się zmian sygnału spowodowanych promieniowaniem obiektu w tym paśmie. Właściwy pomiar temperatury obiektu odbywa się w paśmie długofalowym, zaś pasmo krótkofalowe służy wyłącznie do detekcji promieniowania słonecznego odbitego od obiektu.

W przypadku gdy obiekt zostanie oświetlony przez promieniowanie słoneczne, wartość sygnału na wyjściach obu detektorów wzrasta. Jeśli znana jest wartość sygnału na wyjściu detektora krótkofalowego, można ją skorygować na wyjściu detektora długofalowego, a tym samym zmniejszyć bądź całkowicie wyeliminować błąd odczytu temperatury obiektu spowodowany dodaniem się odbitego promieniowania słonecznego. Korekcja odbywa się poprzez podstawienie wartości sygnału zmierzonego w paśmie krótkofalowym do funkcji kalibracyjnej pirometru, a uzyskaną w ten sposób wartość sygnału odejmuje od sygnału zmierzonego na wyjściu detektora długofalowego. Funkcję kalibracyjną należy wyznaczyć eksperymentalnie, rejestrując odpowiedzi detektora dla kilku wartości temperatury obiektu.

Nadmienić należy, że emisyjność obiektu w paśmie krótkofalowym może być inna niż dla pasma długofalowego. Użytkownik przyrządu musi znać wartości tych emisyjności.

Na podstawie obliczeń w PcModWin 3.0 oraz na podstawie charakterystyk natężenia promieniowania słonecznego, uzyskanych za pomocą spektrometrii SR-5000, można wykazać, że zmiany natężenia promieniowania słonecznego w paśmie  $2,4\div 3,4\ \mu\text{m}$  są najlepiej skorelowane ze zmianami natężenia promieniowania słonecznego w zakresie długofalowym LWIR. Spadkowi/wzrostowi natężenia promieniowania słonecznego w zakresie  $2,4\div 3,4\ \mu\text{m}$  towarzyszy spadek/wzrost wartości natężenia promieniowania słonecznego w zakresie długofalowym.

Możliwe jest wyznaczenie natężenia promieniowania słonecznego w paśmie LW w funkcji natężenia promieniowania słonecznego w zakresie  $2,4\div 3,4\ \mu\text{m}$  dla dowolnego typu atmosfery ziemskiej.

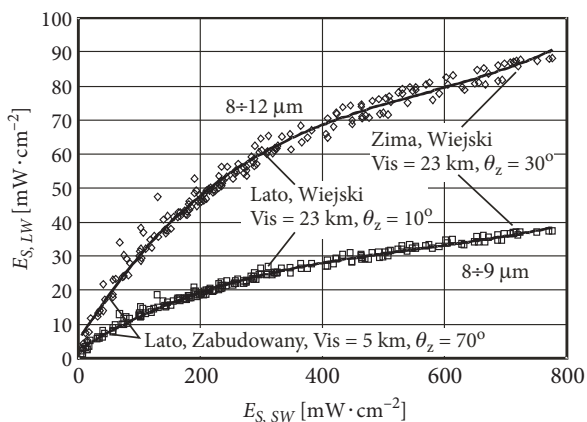
W celu weryfikacji powyższego stwierdzenia:

1. przeprowadzono analizę 180 widmowych rozkładów promieniowania słonecznego, które uzyskano za pomocą programu PcModWin dla następujących modeli atmosfery: Tropical, MidLatitude Summer, MidLatitudeWinter, 1976 US Standard, dla różnych modeli aerozolowych Rural Vis = 23 km, Rural Vis = 5 km, Navy Maritime, Maritime Vis = 23 km, Urban Vis = 5 km oraz kątów odchylenia Słońca od zenitu od  $0^\circ$  do  $80^\circ$  z krokiem co  $10^\circ$ ;
2. wyznaczono całkowite natężenie promieniowania słonecznego w paśmie korekcyjnym  $2,4\div 3,4\ \mu\text{m}$  i w wybranych długofalowych pasmach detekcji:  $8\div 9\ \mu\text{m}$ ,  $8\div 12\ \mu\text{m}$  oraz  $7,5\div 13\ \mu\text{m}$ ,
3. aproksymowano uzyskane dane wielomianem trzeciego stopnia postaci:

$$E_{S, LW} = a_1 (E_{S, SW})^3 + a_2 (E_{S, SW})^2 + a_3 E_{S, SW} + a_4, \quad (11)$$

gdzie:  $E_{S, SW}$  — natężenie promieniowania słonecznego w krótkofalowym paśmie korekcyjnym  $2,4 \div 3,4 \mu\text{m}$ ;  
 $E_{S, LW}$  — natężenie promieniowania słonecznego w wybranym paśmie detekcji:  $8 \div 9 \mu\text{m}$ ,  $8 \div 12 \mu\text{m}$  lub  $7,5 \div 13 \mu\text{m}$ ;  
 $a_1 \div a_4$  — współczynniki wielomianu wyznaczone dla poszczególnych zakresów LWIR.

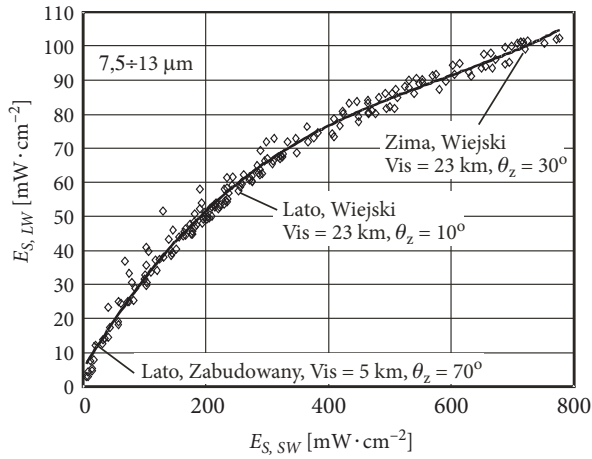
Uzyskane z obliczeń zmiany natężenia promieniowania słonecznego w pasmach  $8 \div 9 \mu\text{m}$  oraz  $8 \div 12 \mu\text{m}$  w funkcji zmian natężenia promieniowania słonecznego w paśmie  $2,4 \div 3,4 \mu\text{m}$  przedstawiono na rysunku 11, natomiast dla pasma  $7,5 \div 13 \mu\text{m}$  na rysunku 12.



Rys. 11. Natężenia promieniowania słonecznego w pasmach  $8 \div 9 \mu\text{m}$  oraz  $8 \div 12 \mu\text{m}$  w funkcji zmian natężenia promieniowania słonecznego w paśmie  $2,4 \div 3,4 \mu\text{m}$ , dla różnych modeli atmosfery

Skuteczność metody można oszacować, porównując, o ile zmniejszy się błąd względny pomiaru temperatury, jeżeli skompensowana zostanie wartość promieniowania słonecznego zgodnie z zależnością (11). W tym celu należy wyznaczyć różnicę  $\Delta E_S$  pomiędzy krzywą aproksymującą a rzeczywistymi wartościami promieniowania słonecznego, czyli wartość nieskompensowanego promieniowania słonecznego w procesie pomiaru temperatury jest równa:

$$\Delta E_S = E_{S, LWIR} - E_{S, LW}. \quad (12)$$



Rys. 12. Natężenia promieniowania słonecznego w pasmach  $7,5\div 13\ \mu\text{m}$  w funkcji zmian natężenia promieniowania słonecznego pasmie  $2,4\div 3,4\ \mu\text{m}$ , dla różnych modeli atmosfery

W przypadku gdy  $\Delta E_S = 0\ \mu\text{W cm}^{-2}$ , pomiar temperatury obiektu nie będzie obciążony błędem, ponieważ wartość skompensowanego natężenia promieniowania słonecznego  $E_{S, LW}$  jest taka sama jak jego wartość rzeczywista  $E_{S, LWIR}$ .

Gdy  $\Delta E_S > 0\ \mu\text{W cm}^{-2}$ , wskazana temperatura obiektu będzie wyższa od temperatury obiektu, gdyż skompensowana została tylko część promieniowania słonecznego.

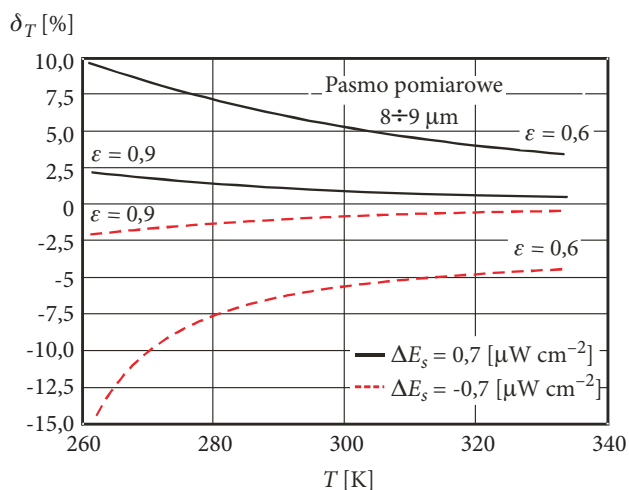
Jeśli  $\Delta E_S < 0\ \mu\text{W cm}^{-2}$ , wskazana temperatura obiektu będzie niższa od temperatury obiektu, gdyż skompensowana wartość natężenia promieniowania słonecznego jest większa niż w rzeczywistości.

Do obliczeń przyjęto  $\Delta E = \pm \Delta \bar{E}_S$ , gdzie  $\bar{E}_S$  jest średnią wartością natężenia nieskompensowanego promieniowania słonecznego:

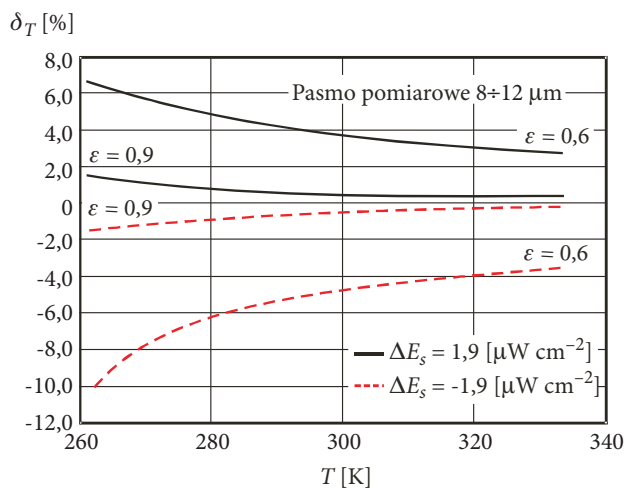
$$\Delta \bar{E}_S = \pm \frac{1}{180} \sum_{i=1}^{180} |E_{S, LWIR}^i - E_{S, LW}^i|. \quad (13)$$

Wartość  $\Delta \bar{E}_S$  dla pasm detekcji  $8\div 9\ \mu\text{m}$ ,  $8\div 12\ \mu\text{m}$  oraz  $7,5\div 13\ \mu\text{m}$  wynosi odpowiednio  $0,7\ \mu\text{W cm}^{-2}$ ,  $1,9\ \mu\text{W cm}^{-2}$ ,  $2,2\ \mu\text{W cm}^{-2}$ . Wyniki obliczeń maksymalnego błędu pomiaru temperatury obiektów metodą pirometryczną z kompensacją wpływu promieniowania słonecznego przedstawiono na rysunkach 13-15.

Uzyskane wyniki obliczeń potwierdzają poprawność wybranego pasma korekcyjnego oraz zaproponowanej metody pomiaru temperatury. Najmniejsze błędy pomiaru temperatury obiektów oświetlonych promieniowaniem słonecznym uzyskuje się dla pasma korekcji  $2,4\div 3,4\ \mu\text{m}$  oraz pasma pomiarowego  $7,5\div 13\ \mu\text{m}$ .

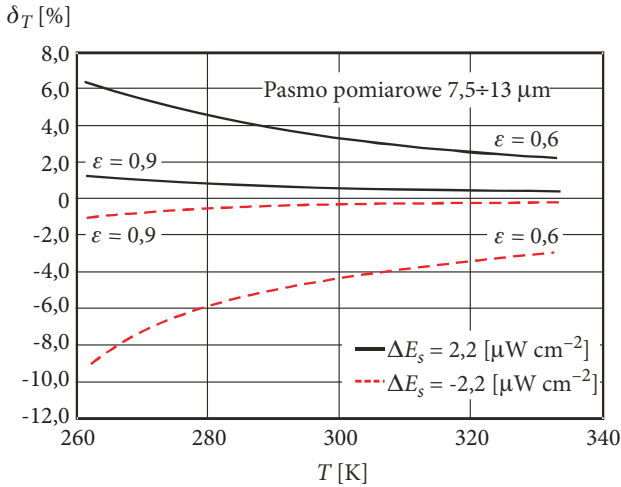


Rys. 13. Względny błąd odczytu temperatury obiektu o emisyjności  $\epsilon = 0,6$  i  $\epsilon = 0,9$  dla pasma pomiarowego  $8 \div 9 \mu\text{m}$  oraz  $\Delta E_s = \pm 0,7 \mu\text{W cm}^{-2}$



Rys. 14. Względny błąd odczytu temperatury obiektu o emisyjności  $\epsilon = 0,6$  i  $\epsilon = 0,9$  dla pasma pomiarowego  $8 \div 12 \mu\text{m}$  oraz  $\Delta E_s = \pm 1,9 \mu\text{W cm}^{-2}$

Otrzymane wyniki obliczeń wskazują również na to, że dla obiektów o emisyjności  $\epsilon \geq 0,6$ , a więc dla znacznej większości obiektów przemysłowych (np. wykonanych z blach ocynkowanych lub stalowych), wartość zmierzonej temperatury nie różni się od wartości rzeczywistej więcej niż 10%.



Rys. 15. Względny błąd odczytu temperatury obiektu o emisyjności  $\epsilon = 0,6$  i  $\epsilon = 0,9$  dla pasma pomiarowego  $7,5 \pm 13 \mu\text{m}$  oraz  $\Delta E_s = \pm 2,2 \mu\text{W cm}^{-2}$

## 7. Podsumowanie

Zaproponowano nową metodę kompensacji wpływu promieniowania słonecznego na wyniki pomiarów wykonywanych pirometrami lub kamerami termowizyjnymi pracującymi w długofalowym zakresie podczerwieni.

Symulacja komputerowa metody pozwala przypuszczać, że jej zastosowanie w algorytmie wyznaczania temperatury w pirometrach lub kamerach termowizyjnych pozwoli zredukować błędy pomiarów w niektórych przypadkach nawet o rząd wielkości. Na podstawie przedstawionych w artykule symulacji planuje się wykonanie modelu pirometru, w którym będzie eliminowany zakłócający wpływ promieniowania słonecznego na wyniki zdalnych pomiarów temperatury.

Artykuł wpłynął do redakcji 24.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2009 r.

## LITERATURA

- [1] H. MADURA, M. KOŁODZIEJCZYK, *Influence of sun radiation on results of non-contact temperature measurements in far infrared range*, Opto-Electronics Review, vol. 13, 3, 2005, 253-257.
- [2] H. MADURA, M. KASTEK, T. PIĄTKOWSKI, *Automatic compensation of emissivity in three-wavelength pyrometers*, Infrared Physics and Technology, vol. 51, 1, 2007, 1-8.
- [3] H. MADURA, T. PIĄTKOWSKI, *Emissivity compensation algorithms in double-band pyrometry*, Infrared Physics and Technology, vol. 46, 1-2 SPEC. ISS., 2004, 185-189.



- [4] Z. BIELECKI, K. CHRZANOWSKI, R. MATYSZKIEL, T. PIĄTKOWSKI, M. SZULIM, *Infrared pyrometer for temperature measurement of objects of both wavelength- and time-dependent emissivity*, *Optica Applicata* vol., 29, 3, 1999, 284-292.
- [5] H. MADURA, T. PIĄTKOWSKI, E. POWIADA, *Multispectral precise pyrometer for measurement of seawater surface temperature*, *Infrared Physics & Technology*, vol. 46, 2004, 69-73.
- [6] M. J. RIEDL, *Optical Design, Fundamentals for Infrared Systems*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001.
- [7] G. C. HOLST, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 1998.
- [8] R. DULSKI, H. MADURA, T. NIEDZIELA, Z. SIKORSKI, *Theoretical model of thermodetection system*, *Optica Applicata*, vol. 30, 2-3, 2000, 451-453.
- [9] J. G. ZISSIS, *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, vol. 1, Sources of Radiation, SPIE Press, Bellingham, 1993.
- [10] S. K. NAYAR, K. IKEUCHI, T. KANADE, *Determining shape and reflectance of lambertian, specular, and hybrid surfaces using extended sources*, International Workshop on industrial application of Machine Intelligence and Vision (MIV-89), Tokyo, 1989.
- [11] ThermaCAM<sup>TM</sup> Researcher, User's Manual, FLIR Systems.

H. MADURA, T. PIĄTKOWSKI, M. KASTEK, M. KOŁODZIEJCZYK

#### **Method for compensation of influence of sun radiation on radiative temperature measurements**

**Abstract.** Outdoor remote temperature measurements in the infrared range can be very inaccurate because of the influence of solar radiation reflected from a measured object. In a case of strong directional reflection towards a measuring device, the error rate can easily reach hundreds per cent as the reflected signal adds to the thermal emission of an object. As a result, the measured temperature is much higher than the real one. Error rate depends mainly on the emissivity of an object and intensity of solar radiation. The position of a measuring device with reference to an object and the Sun is also important.

The method for compensation of such undesirable influence of solar radiation is presented, based on simultaneous measurements in two different spectral bands, short and long-wave ones. The temperature of an object is derived from long-wave data only, whereas short-wave band, the corrective one, is used to estimate the solar radiation level. Both bands were selected to achieve proportional changes of output signal due to solar radiation. Knowing the relation between emissivity and solar radiation levels in both spectral bands it is possible to significantly reduce a measurement error.

**Keywords:** intensity of solar radiation, emissivity, pyrometers, thermography, radiometric temperature measurements

**Universal Decimal Classification:** 536.52

