

Mariusz KOŁODZIEJCZYK, Henryk MADURA, Tadeusz PIĄTKOWSKI, Mariusz KASTEK
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ZAKŁAD TECHNIKI PODCZERWIENI I TERMOWIZJI

Metoda kompensacji promieniowania słonecznego w pirometrach podczerwieni

Mgr inż. Mariusz KOŁODZIEJCZYK

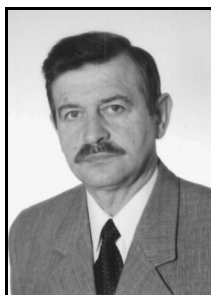
Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1999). Od 2002 roku uczestnik dziennych studiów doktoranckich w WAT. Zajmuje się problematyką związaną z pirometrycznymi oraz termowizyjnymi pomiarami temperatury oraz metodami eliminacji zakłóceń słonecznych w urządzeniach podczerwieni. Przygotowuje rozprawę doktorską na temat „Metoda radiacyjnego pomiaru temperatury z korekcją wpływu promieniowania słonecznego”.



e-mail: mkolodziejczyk@wat.edu.pl

Dr hab. inż. Henryk MADURA

Specjalista w dziedzinie optoelektroniki, techniki podczerwieni i termowizji. Absolwent Wydziału Elektroniki WAT (1976). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1983, a stopień doktora habilitowanego w 1999 roku. W latach 1991-1997 zastępca Komendanta Instytutu Optoelektroniki. Opublikował ponad 140 artykułów i referatów konferencyjnych. Autor i współautor 19 wdrożeń i 12 patentów. Od 2000 roku profesor Wojskowej Akademii Technicznej.



e-mail: hmadura@wat.edu.pl

Dr inż. Tadeusz PIĄTKOWSKI

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



e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl

Dr inż. Mariusz KASTEK

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2002. Zajmuje się problematyką detekcji obiektów w systemach czujników podczerwieni stosowanych w systemach ochrony, a także analizą sygnałów oraz algorytmami detekcji implementowanymi w czujnikach podczerwieni. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.



e-mail: mkastek@wat.edu.pl

Streszczenie

Zdalne pomiary temperatury obiektów zewnętrznych wykonywane w zakresie podczerwieni mogą być obciążone błędami spowodowanymi zakłócającym oddziaływaniem promieniowania słonecznego. W przypadku skierowanego do przyrządu odbicia promieniowania słonecznego błędy mogą wynosić nawet kilkaset procent, gdyż promieniowanie to zsumuje się z promieniowaniem własnym obiektu i spowoduje zawyżenie wartości zmierzonej temperatury. W artykule zaproponowano metodę kompensacji wpływu promieniowania słonecznego polegającą na pomiarze mocy promieniowania słonecznego odbitego od obiektu w krótkofalowym zakresie podczerwieni i w oparciu o otrzymany wynik tego pomiaru dokonywana jest korekcja mierzonej temperatury. Opisano także model promieniowania obiektu z uwzględnieniem promieniowania słonecznego. Ponadto zamieszczono wyniki obliczeń symulacyjnych błędu wyznaczenia temperatury nasłonecznionych obiektów.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, emisyjność, pirometria, termowizja, bezkontaktowe pomiary temperatury

Method for compensation of sun radiation in infrared pyrometers

Abstract

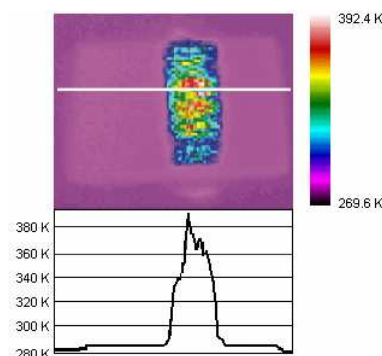
Non-contact measurements of an object temperature in IR carried out in outdoor conditions can suffer from significant errors. An error of temperature measurement can be very high when sun radiation after reflection from an object propagates along optical axis of a measuring device (thermal imaging camera, pyrometer). Radiation beams reflected from an object and own object's radiation are added and final value of temperature is higher. The paper presents a proposal for compensation of solar radiation influence on non-contact temperature measurements of object with emissivity less than one in far infrared range $7.5\div 13\mu\text{m}$. The method consists in measuring the power of solar radiation reflected from the object in near infrared range $2.4\div 3.4\mu\text{m}$ (correction range) and then the solar energy in the measurement range is calculated and subtracted from the total power measured in LWIR.

Keywords: solar radiation, emissivity, pyrometry, thermography, non-contact temperature measurements

1. Wprowadzenie

Wyniki zdalnych pomiarów temperatury obiektów o niskiej emisyjności 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.

Na rys. 1 przedstawiono termogram płaskiej płytki aluminiowej pomalowanej farbą ilustrujący wpływ odbitego promieniowania słonecznego na wynik pomiaru. Rzeczywista temperatura płytki wynosiła 285K. Widoczne na rysunku prostokątne pole oświetlone światłem słonecznym (o natężeniu $24\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) jedynie na czas wykonania termogramu.



Rys. 1. Termogram płytki o emisyjności $\varepsilon = 0,9$ i temperaturze $T = 285\text{K}$ oświetlonej światłem słonecznym wykonany kamerą ThermoCAM™ SC3000 pracującą w zakresie widmowym $8\div 9\mu\text{m}$ - zakres poniżej termogramu przedstawia profil rozkładu temperatury wzdłuż linii zaznaczonej na termogramie

Fig. 1. A thermogram of plate of the emissivity $\varepsilon = 0,9$ and the temperature $T = 285\text{K}$ illuminated by solar radiation made with thermal imaging camera ThermoCAM™ SC3000 working in $8\div 9\mu\text{m}$ infrared range. Below a profile of temperature distribution along straight line is shown

Wartości temperatury na oświetlonych i nieoświetlonych obszarach tego samego elementu mogą się różnić od kilku do nawet kilkaset stopni [1]. W takim przypadku pomiar należy powtórzyć kilkakrotnie z różnych kierunków obserwacji. W przypadku, gdy powierzchnia obiektu nie jest płaska, 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 więc próby układowego ograniczenia wpływu promieniowania słonecznego na zdalne pomiary temperatury.

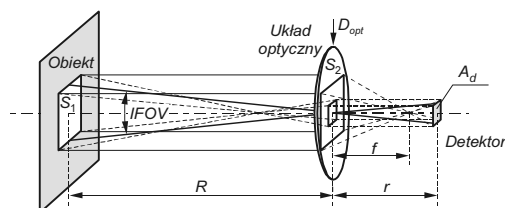
Obecnie nie są znane żadne przemysłowe rozwiązania pirometrów jednopasmowych, które posiadałyby układ korekcji, czy eliminacji promieniowania słonecznego. Istnieją jednak specjalistyczne rozwiązania pirometrów wielowidmowych, w których użytkownik informowany jest, że pomiar może być obciążony błędem spowodowanym przez promieniowanie słoneczne [2] i należy go powtórzyć.

2. Przyjęte oznaczenia

Egzytancja energetyczna ciała doskonale czarnego o temperaturze T , dla danego zakresu widmowego $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ 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, λ - długość fali, T - temperatura ciała czarnego.



Rys. 2. Zależności geometryczne w układzie optycznym z ogniskowaniem obiektu na powierzchni detektora

Fig. 2. Geometrical relations in an optical unit with focusing the object on detector

Wartość mocy promieniowania docierającego do powierzchni detektora wynosi (rys. 2):

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

gdzie: q - stała konstrukcyjna wynikająca z budowy pirometru (rys. 4)

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

Współczynnik konstrukcyjny można zapisać w równoważnej postaci [3, 4]:

$$q = \frac{A_d}{4F^2 \cdot (1 + \beta)^2} \quad (4)$$

przy czym:

$$\beta = \frac{r}{R} \quad (5)$$

A_d - pole powierzchni detektora lub pojedynczego piksela w macyry detektorów, F - liczba otworu układu optycznego.

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 [5]. 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 $E_c(\lambda)$ do natężenia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi $E_S(\lambda)$, dla poszczególnych długości fal nazywamy widmowym współczynnikiem przepuszczalności atmosfery ziemskiej $\tau_E(\lambda)$. Dokładne wyznaczenie $\tau_E(\lambda)$ wymaga uwzględnienia wielu czynników i parametrów opisujących atmosferę. Do najważniejszych należy zaliczyć: zawartość i stopień kondensacji pary wodnej, temperaturę, ciśnienie atmosferyczne oraz grubość atmosfery ziemskiej oraz zawartych w niej cząsteczek gazów i aerozoli.

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

$$E_S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_E(\lambda) \cdot E_c(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

W zależności od rozkładu przestrzennego strumienia promieniowania słonecznego po odbiciu od powierzchni obiektu (rys. 3) możemy wyróżnić następujące typy odbicia [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 (rys. 4),

odbicie kierunkowo-rozproszone (ang. *directional diffuse reflection*, *mixed reflection*, *hybrid reflection*), wykazujące zarówno cechy odbicia kierunkowego jak i rozproszonego (rys. 5).

Rozkład przestrzenny promieniowania słonecznego docierającego do detektora zależy więc od struktury powierzchni i stopnia jej chropowatości.

Przypadki odbicia kierunkowego i rozproszonego są przypadkami krańcowymi, dlatego też do obliczeń przyjęto, że moc promieniowania słonecznego P_S docierającego do detektora po odbiciu od powierzchni obiektu może być określona wyrażeniem:

$$P_S = \begin{cases} A_d E_S \left(\frac{R-f}{f} \right)^2 = \left(2 R \operatorname{tg} \frac{IFOV}{2} \right)^2, & \text{dla odbicia kierunkowego} \\ q E_S, & \text{dla odbicia rozproszonego.} \end{cases} \quad (7)$$

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 została przyjęta prawidłowo. Emisyjność zależy bowiem od takich czynników jak np.: struktura i stopień utlenienia powierzchni, jej temperatura, kierunek obserwacji czy przedział widmowy, dla którego ma być wyznaczona.

Spośród 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.

Sumaryczna wartość mocy promieniowania docierającego do apertury wejściowej układu optycznego, dla typowych warunków pomiarowych, można określić wyrażeniem [7]:

$$P_c = \varepsilon \tau_a P(T) + (1 - \tau_a) P_a(T_a) + (1 - \varepsilon) \tau_a P_{ot}(T_{ot}) \quad (8)$$

przy czym: ε - emisyjność obiektu, τ_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 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:

$$U_c = \varepsilon \tau_a U(T) + (1 - \tau_a) U_a(T_a) + (1 - \varepsilon) \tau_a U_{ot}(T_{ot}) \quad (9)$$

W urządzeniach, w których wykorzystuje się powyższą zależność, w celu wyznaczenia temperatury obiektu użytkownik powinien oszacować i wprowadzić poprawki na wartość takich parametrów jak: emisyjność obiektu ε' , współczynnik przepuszczalności atmosfery τ_a' , temperatura atmosfery T_a' , temperatura otoczenia T_{ot}' .

Rozwiązując równanie (9) ze względu na $U(T)$ i uwzględniając wprowadzone poprawki otrzymujemy:

$$U(T_o) = \frac{1}{\varepsilon' \tau_a'} U_c - \frac{1 - \tau_a'}{\varepsilon' \tau_a'} U_a(T_a') - \frac{1 - \varepsilon'}{\varepsilon'} U_{ot}(T_{ot}') \quad (10)$$

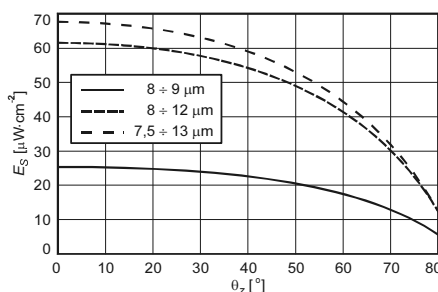
Znając wartość napięcia $U(T_o)$, można na podstawie charakterystyki kalibracyjnej urządzenia wyznaczyć temperaturę obiektu T_o (indeks wprowadzony dla odróżnienia wartości obliczonej od rzeczywistej). Błąd względny wyznaczenia temperatury obiektu

$$\delta_T = \frac{T_o - T}{T} 100\% \quad (11)$$

zależy w głównej mierze od różnicy pomiędzy rzeczywistymi wartościami parametrów występujących w równaniu (9), a wartościami wprowadzonymi. Należy zauważyć, że w metodzie tej przyjęto założenie, że promieniowanie poszczególnych składników promieniowania opisane jest 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 $\tau_a = 1$. 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 $\theta_z = 30^\circ$. Całkowite natężenie promieniowania słonecznego E_S obliczono dla typowych zakresów pracy długofalowych piroometrów 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. 3).

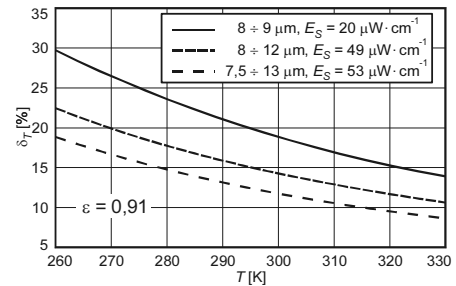


Rys. 3. Całkowite natężenie promieniowania słonecznego w funkcji kąta odchylenia Słońca od Zenitu θ_z dla wybranych podzakresów podczerwieni

Fig. 3. Total solar irradiance versus zenith solar angle for selected infrared ranges

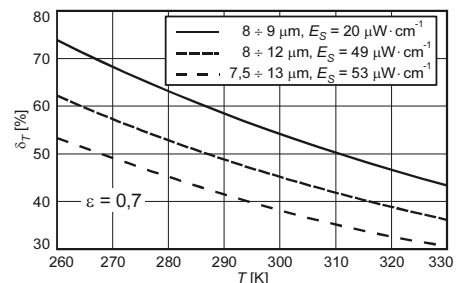
Do obliczeń względnego błędu odczytu temperatury przyjęto następujące wartości parametrów wejściowych $R=120\text{cm}$, $f=3,5\text{cm}$, $D_{opt}=5\text{cm}$, $IFOV=1,1\text{mrad}$, $T=243 \div 363\text{K}$.

Poniżej przedstawiono wartości błędu względnego temperatury dla obiektów o emisyjności $\varepsilon = 0,91$ (rys. 4) oraz $\varepsilon = 0,7$ (rys. 5).



Rys. 4. Obliczony błąd względny odczytu temperatury obiektu o emisyjności $\varepsilon = 0,91$, dla trzech podzakresów widmowych, (atmosfera typu Summer, Rural, $Vis=23\text{km}$, $\theta_z=50^\circ$)

Fig. 4. Calculated relative error of temperature reading for the object with emissivity $\varepsilon = 0.91$ for three infrared ranges, for Summer model atmosphere, and Rural profile of aerosol, $Vis=23\text{km}$, $\theta_z=50^\circ$



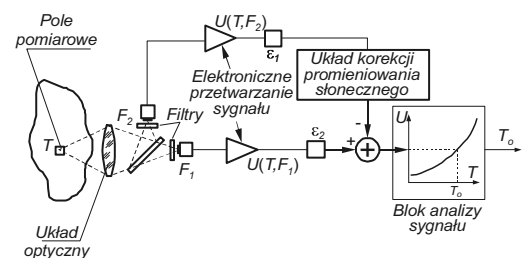
Rys. 5. Obliczony błąd względny odczytu temperatury obiektu o emisyjności $\varepsilon = 0,7$, dla trzech podzakresów widmowych, (atmosfera typu Summer, Rural, $Vis=23\text{km}$, $\theta_z=50^\circ$)

Fig. 5. Calculated relative error of temperature reading for the object with emissivity $\varepsilon = 0.7$ for three infrared ranges, for Summer model atmosphere, and Rural profile of aerosols, $Vis=23\text{km}$, $\theta_z=50^\circ$

Z otrzymanych wyników obliczeń wynika, że błąd względnego 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 faktu, że maleje moc promieniowania własnego obiektu w stosunku do mocy promieniowania słonecznego odbitego od niego. Ponadto błąd rośnie, gdy rośnie natężenie promieniowania słonecznego.

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. 6).



Rys. 6. Schemat pirometru z układem kompensacji promieniowania słonecznego

Fig. 6. Scheme of pyrometer with the unit for solar radiation compensation

Pasma krótkofalowe jest dostatecznie oddalone od pasma długofalowego, tak że na wyjściu detektora 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 wyjściu obu detektorów wzrasta. Znajac wartość sygnału na wyjściu detektora krótkofalowego można skorygować wartość sygnału 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 należy odjąć od sygnału zmierzonego na wyjściu detektora długofalowego.

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.

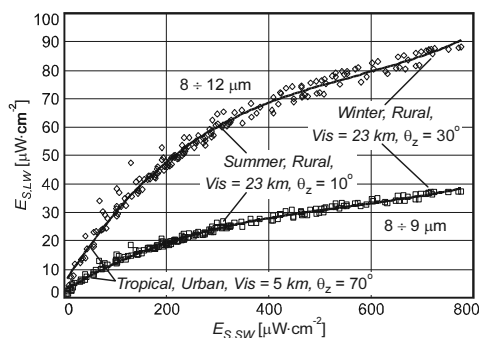
Możliwe jest zatem wyznaczenie natężenia promieniowania słonecznego w paśmie LW w funkcji natężenia promieniowania słonecznego w zakresie $2,4\div 3,4\mu\text{m}$ dla dowolnego typu atmosfery ziemskiej.

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, MidLatitude Winter, 1976 US Standard*, dla różnych modeli aerozolowych *Rural Vis=23km, Rural Vis=5km, Navy Maritime, Maritime Vis=23km, Urban Vis=5km* oraz kątów odchylenia Słońca od Zenitu od 0° do 80° z krokiem co 10° ;
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 3-go stopnia o postaci:

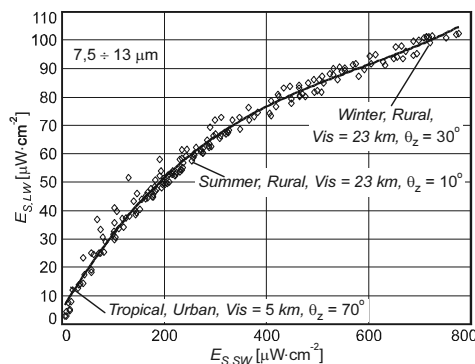
$$E_{S,LW} = a_1 \cdot (E_{S,SW})^3 + a_2 \cdot (E_{S,SW})^2 + a_3 \cdot E_{S,SW} + a_4 \quad (12)$$

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.



Rys. 7. Zmiana natężenia promieniowania słonecznego w zakresach $8\div 9\mu\text{m}$ i $8\div 12\mu\text{m}$ w funkcji zmian natężenia promieniowania słonecznego w zakresie $2,4\div 3,4\mu\text{m}$

Fig. 7. Solar irradiance in $8\div 9\mu\text{m}$ and $8\div 12\mu\text{m}$ ranges versus solar irradiance in $2,4\div 3,4\mu\text{m}$ band



Rys. 8. Zmiana natężenia promieniowania słonecznego w zakresie $7,5\div 13\mu\text{m}$ w funkcji zmian natężenia promieniowania słonecznego w zakresie $2,4\div 3,4\mu\text{m}$

Fig. 8. Solar irradiance in $7,5\div 13\mu\text{m}$ range versus solar irradiance in $2,4\div 3,4\mu\text{m}$ band

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 paśmie $2,4\div 3,4\mu\text{m}$ przedstawiono na rys. 7, natomiast dla pasma $7,5\div 13\mu\text{m}$ na rys. 8.

Skuteczność metody można oszacować porównując o ile zmniejszy się błąd względny pomiaru temperatury, jeżeli skompensowana zostanie wartość promieniowania słonecznego zgodnie z zależnością (12). W tym celu należy wyznaczyć różnicę ΔE_S pomiędzy krzywą aproksymującą, a rzeczywistymi wartościami promieniowania słonecznego.

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. W oparciu o przedstawione w artykule symulacje planuje się wykonanie modelu pirometru, który będzie automatycznie kompensował szkodliwy wpływ promieniowania słonecznego na wyniki zdalnych pomiarów temperatury.

8. Literatura

- [1] H. Madura, M. Kołodziejczyk: Influence of sun radiation on results of non-contact temperature measurements in far infrared range, *Opto-Electronics Review* 13 (3), 2005.
- [2] H. Madura, T. Piątkowski, E. Powiada: Multispectral precise pyrometer for measurement of seawater surface temperature, *Infrared Physics & Technology* Vol. 46, 2004.
- [3] M. J. Riedl: *Optical Design, Fundamentals for Infrared Systems*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001.
- [4] G., C. Holst: *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 1998.
- [5] J.G Zissis: *The Infrared&Electro-Optical Systems Handbook*, vol.1. Sources of Radiation, SPIE Press, Bellingham, 1993.
- [6] 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.
- [7] *ThermaCAMTM Researcher, User's Manual*, FLIR Systems.