

Sebastian DUDZIK, Waldemar MINKINA

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA

Ocena wpływu korelacji zmiennych wejściowych modelu pomiaru kamery termowizyjnej na dokładność wyznaczania temperatury obiektów o niskiej emisyjności

Mgr inż. Sebastian DUDZIK

Urodził się w 1975 r. w Łodzi. W 2000 r. ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej uzyskując tytuł magistra inżyniera. Od 2000 r. jest zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych Politechniki Częstochowskiej. Jego naukowe zainteresowania obejmują wykorzystanie termografii komputerowej i strojonych modeli wymiany ciepła do pomiarów indywidualnego zużycia energii cieplnej w budownictwie wielorodzinnym.

e-mail: sebdud@el.pcz.czest.pl



Prof. dr hab. inż. Waldemar MINKINA

Kieruje Zakładem Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1983 r., a doktora habilitowanego w 1995 r. Tytuł profesora nauk technicznych otrzymał 22 czerwca 2006 r. z rekomendacji Katedry Metrologii oraz Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w Krakowie. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej termometrii, termografii komputerowej, pomiarów ciepłych oraz teorii i techniki wymiany ciepła.

e-mail: minkina@el.pcz.czest.pl



Streszczenie

W pracy [1] przedstawiono ogólne podejście do symulacyjnej analizy niepewności algorytmu przetwarzania toru pomiarowego kamery termowizyjnej, na przykładzie kamery ThermoCAM PM 595. Przeprowadzono tu analizę wpływu wartości współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi modelu pomiaru dla współczynników emisyjności obiektu bliskich jedności. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych modelu pomiaru kamery ThermoCAM PM 595 na dokładność wyznaczania temperatury obiektów o niskiej emisyjności, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu korelacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi. Przyjęto, że wielkości wejściowe modelu reprezentowane są przez zmienne losowe o rozkładzie jednostajnym [8]. Niepewności wielkości wejściowych określono przez odchylenia standardowe eksperymentalne reprezentujących je zmiennych losowych. Przyjęto, że przy odpowiednio dużej liczbie realizacji zmiennych wejściowych obciążenie estymatora odchylenia standardowego jest pomijalne.

Słowa kluczowe: termografia w podczerwieni, emisyjność, zmienne wejściowe skorelowane.

The estimation of the influence of correlation between input variables of infrared camera model on the accuracy of temperature evaluation with low emissivity objects

Abstract

The simulation analysis of uncertainty of the processing algorithm of measurement path of infrared camera ThermoCAM PM 595 was described in the paper [1]. The analysis deals with the case, when the object emissivity is high enough (close to one). In this paper there was presented results of simulation research of ThermoCAM measurement model, regards with the influence of correlation between input variables on the accuracy of temperature measurements, when the object emissivity is low. It is assumed, that input variables of model are represented by random variables with uniform distribution [8]. Uncertainty of input quantities are modeled by means experimental standard deviations of corresponding random values. It is assumed that, when the number of realizations of variables is big enough, bias of estimator is negligible.

Keywords: infrared thermography, emissivity, correlated input variables.

1. Wprowadzenie

Wyniki badań symulacyjnych modelu pomiaru temperatury kamerą ThermoCAM PM595 były przedstawione m. in. w pracach [1, 2, 3]. Głównym przedmiotem analizy było wyznaczenie składowych złożonej niepewności standardowej modelu związanych z poszczególnymi wielkościami wejściowymi. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki symulacji wpływu zależności pomiędzy poszczególnymi wielkościami wejściowymi modelu na złożoną

niepewność standardową temperatury obiektu T_{ob} przy emisyjnościach obiektu mniejszych od 0,5. W symulacjach posłużono się metodą generowania zmiennych losowych opisywaną w [4].

Szczegółowy opis modelu matematycznego pomiaru temperatury kamerą termowizyjną podano w pracy [2, 5]. Model ten można wyrazić jako:

$$s = \varepsilon_{ob} \cdot P_{atm} \cdot s_{ob} + P_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{ob}) \cdot s_o + (1 - P_{atm}) \cdot s_o, \quad (1)$$

gdzie: s – sygnał z detektora odpowiadający całkowitej gęstości strumienia promieniowania cieplnego docierającego do detektora, s_{ob} – sygnał z detektora odpowiadający gęstości strumienia promieniowania własnego obiektu, s_o – sygnał z detektora odpowiadający gęstości strumienia promieniowania cieplnego otoczenia, ε_{ob} – pasmowy współczynnik emisyjności obiektu, P_{atm} – współczynnik przepuszczania atmosfery.

Współczynnik P_{atm} , aproksymujący średnią przepuszczalność atmosfery w paśmie czułości detektora, wyraża się funkcją trzech zmiennych:

$$P_{atm} = f(\omega, d, T_{atm}), \quad (2)$$

gdzie: ω – wilgotność względna atmosfery, d – odległość kamera - obiekt, T_{atm} – temperatura atmosfery. Na podstawie wzorów (1, 2), można wyznaczyć wartość temperatury obiektu jako funkcję pięciu zmiennych:

$$T_{ob} = f(\varepsilon_{ob}, T_{atm}, T_o, \omega, d), \quad (3)$$

gdzie: T_o – temperatura otoczenia. Jawna postać zależności (3) została zastrzeżona przez firmę FLIR Systems AB i podana autorem niniejszej publikacji jedynie dla celów badawczych. Zawiera ona ponadto osiem współczynników (dobrych empirycznie) i jest bardzo złożona. Z tego powodu możliwe jest jedynie zaprezentowanie jej w formie wzoru (3). Zależność ta jest punktem wyjściowym dla dalszych symulacji komputerowych.

2. Metodyka badań

Badania symulacyjne prowadzono w następujących etapach [6, 7, 8]:

1. Wyznaczanie parametrów rozkładów zmiennych losowych wejściowych.
2. Generowanie ciągów realizacji zmiennych losowych wejściowych o zadanych rozkładach, z uwzględnieniem współczynnika korelacji pomiędzy tymi zmiennymi.
3. Analiza modelu metodami symulacyjnymi.
4. Wyznaczenie współczynnika rozszerzenia w celu oszacowania niepewności rozszerzonej.
5. Analiza wyników badań symulacyjnych.

Etapy te opisano szczegółowo w pracach [1, 4, 6]. Na szczególną uwagę zasługuje algorytm korelacyjny przedstawiony w pracy [4, 6]. Zgodnie z nim, aby wygenerować zmienne losowe charakteryzujące się zadaniem rozkładem gęstości prawdopodobieństwa, o określonych parametrach, można wykorzystać następujący algorytm oparty na metodzie inwersji:

1. Wygenerowanie wymaganej liczby par wartości dwóch zmiennych losowych o rozkładach normalnych. Zmienne te są ze sobą skorelowane w stopniu zadany poprzez wyspecyfikowanie macierzy kowariancji.
2. Zastosowanie funkcji dystrybuanty (CDF – Cumulative Distribution Function) rozkładu normalnego (oznaczonej tu ϕ) do standaryzowanej zmiennej losowej Z o rozkładzie normalnym. W wyniku zastosowania funkcji CDF rozkładu normalnego do standaryzowanej zmiennej losowej Z o rozkładzie normalnym otrzymuje się zmienną losową U o rozkładzie jednostajnym na przedziale $[0; 1]$. Funkcję CDF ze zmiennej $U = \phi(Z)$ wyraża się następująco [4]:

$$\Pr\{U \leq n_0\} = \Pr\{\phi(Z) \leq n_0\} = \Pr\{Z \leq \phi^{-1}(n_0)\} = n_0 \quad (4)$$

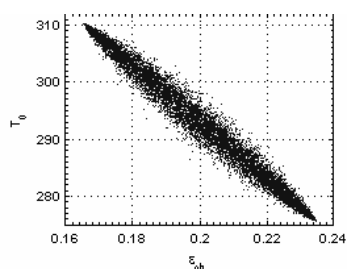
Jest to funkcja dystrybuanty zmiennej losowej U o rozkładzie jednostajnym na przedziale $[0; 1]$. Zgodnie z teorią generatorów pseudolosowych jednowymiarowych zmiennych losowych, zastosowanie odwrotnej funkcji dystrybuanty jakiegokolwiek rozkładu prawdopodobieństwa F do zmiennej losowej U (o rozkładzie jednostajnym) na przedziale $[0; 1]$ daje w wyniku zmienną losową o rozkładzie identycznym z F .

Algorytm umożliwia wygenerowanie zmiennych losowych o dowolnych kształtach rozkładu, jeśli tylko znana jest jego dystrybuanta. Poniżej przedstawiono wyniki działania algorytmu dla różnych kombinacji skorelowanych zmiennych wejściowych modelu. W symulacjach założono jednostajny rozkład prawdopodobieństwa tych zmiennych. Badania przeprowadzono dla trzech wartości współczynnika emisyjności. Parametry rozkładów zmiennych losowych wykorzystane w symulacjach zestawiono w tabeli 1.

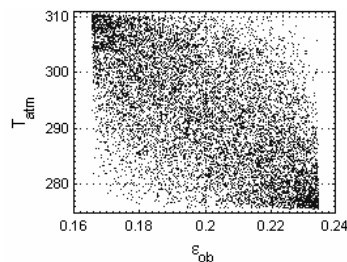
Tab. 1. Zestawienie wymaganych parametrów zmiennych losowych
Tab. 1. Setting-up of expected parameters of random variables

| Zmienna losowa wraz z interpretacją fizyczną | Wartość oczekiwana | Odchylenie standardowe |
|--|--------------------|------------------------|
| Emisyjność | 0,1; 0,3; 0,5 | 0,01; 0,02; 0,03 |
| Temperatura atmosfery | 293 K | 1 K |
| Temperatura otoczenia | 293 K | 1 K |
| Odległość | 2 | 0,002 |
| Wilgotność względna | 0,5 | 0,05 |

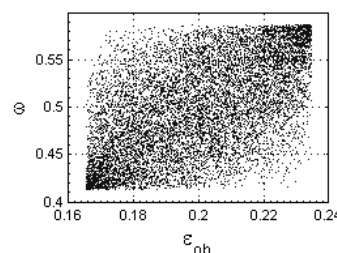
Na rys. 1-4 przedstawiono korelacje pomiędzy emisyjnością a pozostałymi zmiennymi wejściowymi opisywanego modelu, wygenerowane dla wartości oczekiwanej emisyjności równej 0,2. Zmienne wygenerowano przy różnych wartościach współczynnika korelacji ρ . Przyjęto liczbę realizacji równą 10 000 próbek [7].



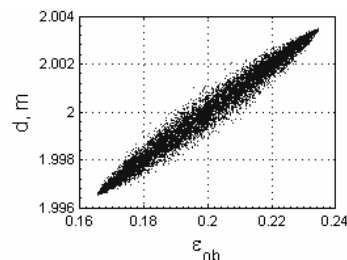
Rys. 1. Wynik działania algorytmu korelacyjnego dla zmiennych reprezentujących temperaturę otoczenia i emisyjność obiektu ($\rho = -0,9$)
Fig. 1. The results of correlation algorithm for variables representing ambient temperature and emissivity ($\rho = -0,9$)



Rys. 2. Wynik działania algorytmu korelacyjnego dla zmiennych reprezentujących temperaturę atmosfery i emisyjność obiektu ($\rho = -0,6$)
Fig. 2. The results of correlation algorithm for variables representing temperature of atmosphere and emissivity ($\rho = -0,6$)



Rys. 3. Wynik działania algorytmu korelacyjnego dla zmiennych reprezentujących wilgotność względną i emisyjność obiektu ($\rho = 0,6$)
Fig. 3. The results of correlation algorithm for variables representing relative humidity and emissivity ($\rho = 0,6$)



Rys. 4. Wynik działania algorytmu korelacyjnego dla zmiennych reprezentujących odległość i emisyjność obiektu ($\rho = 0,9$)
Fig. 4. The results of correlation algorithm for variables representing distance and emissivity ($\rho = 0,9$)

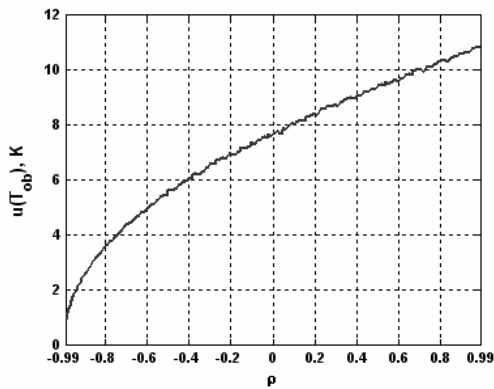
3. Wyniki badań

Badania modelu (3) przeprowadzono w środowisku MATLAB w wersji R14. Do analizy zastosowano oprogramowanie [3] stworzone w Zakładzie Technik Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych Politechniki Częstochowskiej. Wartości odniesienia przyjęte w symulacjach zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie warunków odniesienia w symulacjach opisywanego modelu
Tab. 2. Setting-up of reference conditions accepted in simulations of described model

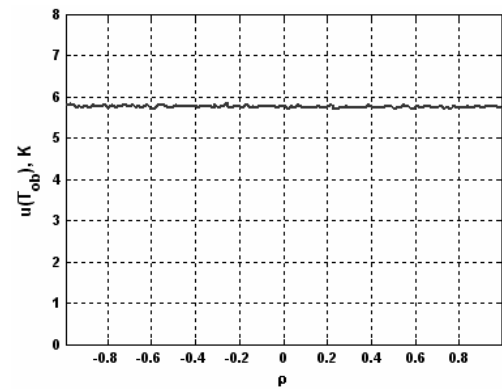
| Wielkość wejściowa reprezentowana przez zmienną losową | Wartość oczekiwana | Odchylenie standardowe |
|--|--------------------|------------------------|
| Emisyjność, - | 0,1; 0,3; 0,5 | 0,01; 0,02; 0,03 |
| Temperatura otoczenia, K | 293 | 10 |
| Temperatura atmosfery, K | 293 | 10 |
| Wilgotność względna, - | 0,5 | 0,05 |
| Odległość, m | 2 | 0,002 |

Badania przeprowadzono dla temperatury odniesienia obiektu $T_{ob} = 60^{\circ}\text{C}$ (333 K). Wyniki symulacji, w postaci charakterystyk zależności niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi modelu, przedstawiono na rys. 5 - 10.



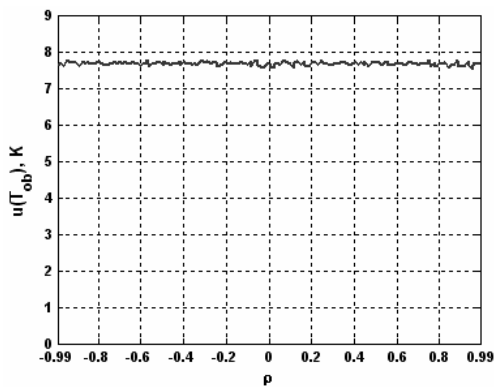
Rys. 5. Zależność niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi emisyjność i temperaturę otoczenia, przy $\epsilon_{ob} = 0.1$

Fig. 5. Dependence between complex uncertainty of object temperature and correlation coefficient between variables representing emissivity and ambient temperature, for $\epsilon_{ob} = 0.1$



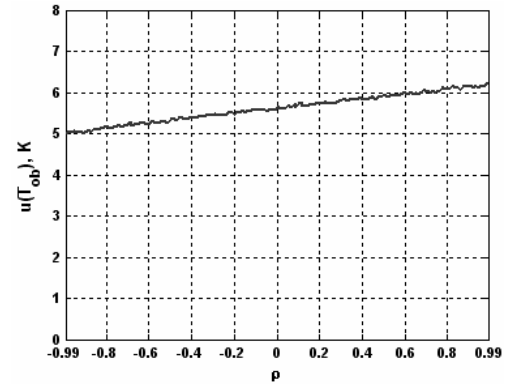
Rys. 8. Zależność niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi emisyjność i wilgotność względną, przy $\epsilon_{ob} = 0.3$

Fig. 8. Dependence between complex uncertainty of object temperature and correlation coefficient between variables representing emissivity and relative humidity, for $\epsilon_{ob} = 0.3$



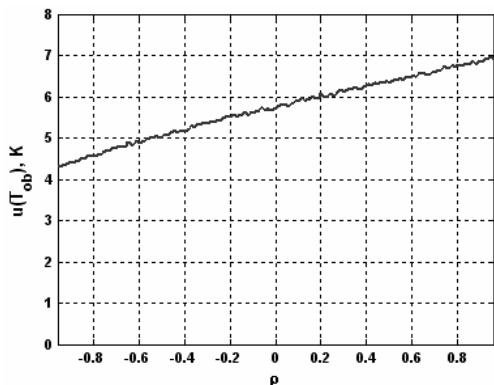
Rys. 6. Zależność niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi emisyjność i wilgotność względną, przy $\epsilon_{ob} = 0.1$

Fig. 6. Dependence between complex uncertainty of object temperature and correlation coefficient between variables representing emissivity and relative humidity, for $\epsilon_{ob} = 0.1$



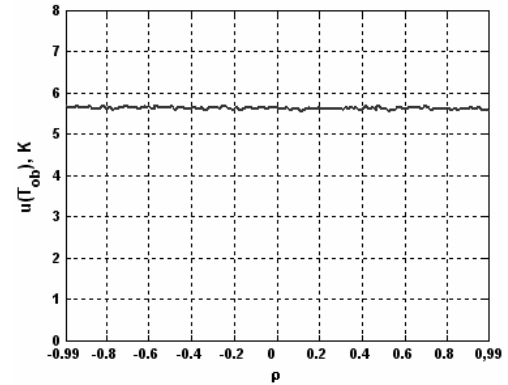
Rys. 9. Zależność niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi emisyjność i temperaturę otoczenia, przy $\epsilon_{ob} = 0.5$

Fig. 9. Dependence between complex uncertainty of object temperature and correlation coefficient between variables representing emissivity and ambient temperature, for $\epsilon_{ob} = 0.5$



Rys. 7. Zależność niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi emisyjność i temperaturę otoczenia, przy $\epsilon_{ob} = 0.3$

Fig. 7. Dependence between complex uncertainty of object temperature and correlation coefficient between variables representing emissivity and ambient temperature, for $\epsilon_{ob} = 0.3$



Rys. 10. Zależność niepewności złożonej temperatury obiektu od współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi emisyjność i wilgotność względną, przy $\epsilon_{ob} = 0.5$

Fig. 10. Dependence between complex uncertainty of object temperature and correlation coefficient between variables representing emissivity and relative humidity, for $\epsilon_{ob} = 0.5$

4. Wnioski

Analizując wyniki badań symulacyjnych można wyciągnąć kilka ważnych wniosków dla praktyki pomiarów termowizyjnych:

1. Stosując metodę inwersji, opisaną w p. 2 niniejszej pracy, jest możliwe wygenerowanie zmiennych losowych, skorelowanych ze sobą w zadanym stopniu. Zmienne te mogą służyć jako zmienne wejściowe w symulacjach modelu pomiaru.
2. Największy wpływ na niepewność złożoną pomiaru temperatury obiektu ma korelacja występująca pomiędzy zmiennymi losowymi reprezentującymi emisyjność i temperaturę otoczenia.
3. Niepewność złożona temperatury obiektu praktycznie nie zależy od wartości współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi reprezentującymi wilgotność względną – rys. 6, 8, 10, temperaturę atmosfery oraz odległość – ze względu na ograniczenia objętościowe artykułu tych symulacji nie zamieszczono.
4. Wpływ korelacji pomiędzy wejściowymi zmiennymi losowymi analizowanego modelu na wartość niepewności złożonej silnie zależy od warunków pomiaru. Na podstawie symulacji przeprowadzonych w niniejszej pracy zaobserwowano, że wpływ ten silnie rośnie wraz ze zmniejszaniem się wartości emisyjności (rys. 5, 7, 9).

5. Literatura

- [1] Minkina W., Dudzik S.: „Symulacyjna analiza niepewności algorytmu przetwarzania toru pomiarowego kamery termowizyjnej ThermoCAM PM 595” Materiały III Symposium „Metrologiczne Właściwości Programowanych Przetworników Pomiarowych”, Gliwice,

22-23.11.2004 r., Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 1670, seria „Elektryka”, Zeszyt nr 195, 2005 r., str. 173-185.

- [2] Minkina W. „Pomiary termowizyjne - przyrządy i metody”. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-237-5.
- [3] Minkina W., Dudzik S.: „Pakiet oprogramowania do symulacyjnej analizy wrażliwości modelu pomiaru temperatury systemem ThermoCAM PM595” Materiały VI Konferencji Krajowej „Termografia i Termometria w Podczewieni”, Ustroń - Jaszowiec, 04-06.11.2004r, str. 215-221.
- [4] „Simulation dependent random variables using copulas”. Pliki pomocy systemu Matlab R14. The MathWorks Inc. Published with Matlab 7.0.4.
- [5] Minkina W., Dudzik S.: „Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path” Measurement 39 (2006) Nr 8 pp. 758-763, Elsevier Ltd.
- [6] Dudzik S. „Analiza wpływu wartości współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi modelu pomiaru na niepewność wyznaczania temperatury kamerą termowizyjną” Materiały XXXVII Międzuczelnianej Konferencji Metrologów, Zielona Góra, 05-07.09.2005 r, str. 195-203.
- [7] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Supplement 1 - Numerical Methods for the propagation of Distributions – projekt dokumentu Międzynarodowego Biura Miar z dnia 16.03.2004.
- [8] „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik”. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999, ISBN 83-906546-1-X (wydanie polskie opracowane przez J. Jaworskiego).

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2007 roku

**Cena prenumeraty rocznej: 180,00 zł/1 egz.
Cena prenumeraty półrocznej: 90,00 zł/1 egz.**

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

**WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 535, 00-050 Warszawa,
tel./fax: (0-22) 827 25 40**

**Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: (0-32) 237 19 45, e-mail: pak.redaktor@polsl.pl**

Dane o prenumeracie dostępne są na stronie internetowej:

www.pak.home.pl

Prenumeratę można rozpocząć w dowolnym momencie.
Koszt wysyłki czasopisma pokrywa Redakcja.