

Waldemar Andrzej MINKINA, Sebastian DUDZIK

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA

Symulacyjna analiza wrażliwości modelu pomiaru temperatury systemem termowizyjnym

Prof. dr hab. inż. Waldemar Andrzej MINKINA

Kieruje Zakładem Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1983 r. – Instytut Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, a doktora habilitowanego w 1995 r. – Katedra Techniki Pomiarowo - Informacyjnych, Wydział Automatyki Politechniki Lwowskiej. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej szeroko rozumianej termometrii, termografii komputerowej, pomiarów ciepłych oraz teorii i techniki wymiany ciepła.

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



Mgr inż. Sebastian DUDZIK

W 2000 r. ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej uzyskując tytuł magistra inżyniera specjalność: Systemy Pomiarowe i Sterowania. 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



Streszczenie

W pracy przedstawiono oprogramowanie do symulacyjnej analizy wrażliwości modelu pomiaru temperatury na przykładzie kamery termowizyjnej ThermoCAM PM 595. Każda wielkość wejściowa algorytmu obliczeniowego jest reprezentowana przez dyskretną zmienną losową o zadanym rozkładzie częstości. Wynik działania algorytmu (temperatura mierzona) jest również dyskretną zmienną losową. W trakcie symulacji na podstawie zadanych parametrów rozkładów zmiennych losowych wejściowych oraz modelu pomiaru wyznaczany jest rozkład zmiennej wyjściowej. W pracy przedstawiono przykładowe wyniki analizy wrażliwości dla wielkości wejściowych modelowanych zmiennymi losowymi o rozkładzie logarytmicznym normalnym.

Słowa kluczowe: termografia komputerowa, błąd, niepewność

Simulation analysis of sensitivity of thermovision system measurement model

Abstract

In the paper there is presented the software to the simulation sensitivity analysis of the thermal camera PM595 measurement model. Every input quantity of the computational algorithm is presented as discrete random variable with specified frequency distribution. Algorithm result is also discrete random variable. In the simulation, on the basis of specified parameters of random variables distributions, distribution of output random variable is obtained. In the paper there are presented typical results of the sensitivity analysis for input variables, which are modeled by log-normal distributed random variables.

Keywords: computer thermographics, error, uncertainty

1. Model pomiaru temperatury

Klasyczną analizę błędów pomiaru temperatury kamerami ThermoCAM PM 595 opisano m. in. w pracach [1, 2]. W niniejszej pracy zaprezentowano oprogramowanie do analizy wrażliwości modelu sformułowanego w postaci następującego równania pomiaru [2]:

$$u = \varepsilon_{ob} \cdot P_{atm} \cdot u_{ob} + P_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{ob}) \cdot u_0 + (1 - P_{atm}) \cdot u_0, \quad (1)$$

gdzie: u - sygnał odpowiadający całkowitej gęstości strumienia promieniowania ciepłego docierającego do detektora, u_{ob} - sygnał odpowiadający natężeniu promieniowania własnego obiektu, ε_{ob} - współczynnik emisyjności obiektu, P_{atm} - współczynnik przepuszczania (transmisji) atmosfery, u_0 - sygnał z detektora odpowiadający natężeniu promieniowania ciepłego otoczenia. Temperaturę obiektu opisuje równanie:

$$T_{ob} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{u_{ob}} + F\right)}, \quad (2)$$

gdzie: T_{ob} - temperatura obiektu, R , B , F - stałe kalibracji kamery. Sygnał u_{ob} można wyznaczyć z zależności:

$$u_{ob} = \frac{1}{\varepsilon_{ob}} \cdot \left[\frac{1}{P_{atm}} \cdot u - (1 - \varepsilon_{ob}) \cdot u_0 - \left(\frac{1 - P_{atm}}{P_{atm}} \right) \cdot u_0 \right]. \quad (3)$$

W równaniu (3) do wyznaczenia sygnału u_{ob} niezbędna jest znajomość współczynnika P_{atm} . Współczynnik $P_{atm} = f(T_{atm}, \omega, d)$, tj. zależy od wartości temperatury atmosfery, wilgotności względnej ω otoczenia oraz odległości d kamera-obiekt [1, 3]. Z uwagi na to, że jawna postać wyrażenia na P_{atm} jest zastrzeżona przez producenta kamery nie będzie ona przedstawiona w niniejszej pracy. Uwzględniając (1), (2) oraz (3) model pomiaru temperatury systemem ThermoCAM PM595 przyjmuje funkcji postać pięciu zmiennych:

$$T_{ob} = f(\varepsilon_{ob}, T_{atm}, T_0, \omega, d) \quad (4)$$

gdzie: ε_{ob} - współczynnik emisyjności obiektu, T_{atm} - temperatura atmosfery, T_0 - temperatura otoczenia, ω - wilgotność względna, d - odległość od obiektu.

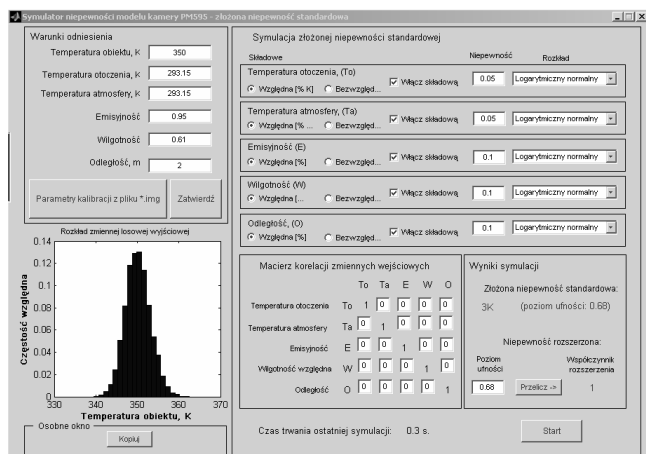
2. Metodyka badań symulacyjnych i podstawowe funkcje oprogramowania

Analiza wrażliwości modelu (4) z wykorzystaniem opisywanego pakietu oprogramowania przebiega w następujących etapach:

- 1) Wczytanie warunków odniesienia i parametrów kalibracji z pliku termogramu.
- 2) Wygenerowanie zmiennych losowych reprezentujących wielkości wejściowe (na podstawie zadanego typu i wymaganych parametrów).
- 3) Symulacja modelu (4) dla wygenerowanych rozkładów (składowe złożonej niepewności standardowej).
- 4) Symulacja modelu (4) dla wygenerowanych rozkładów (złożona niepewność standardowa).
- 5) Oszacowanie poziomu ufności wyznaczonej niepewności złożonej i wymaganego dla niej współczynnika rozszerzenia.

W pracy przyjęto, że wielkości wejściowe modelu (4) są reprezentowane przez dyskretne zmienne losowe o zadanym rozkładzie częstości. Zmienne te będą dalej nazywane zmiennymi wejściowymi modelu. Dodatkowo wielkość wyjściowa modelu jest reprezentowana przez zmienną losową zwaną dalej wielkością wyjściową. W pracy przyjęto, że modelem niepewności standardowej jest odchylenie standardowe rozkładu zmiennej wejściowej [4, 5, 6]. Dodatkowo przyjęto, że składową złożonej niepewności standardowej wyznacza się jako odchylenie standardowe rozkładu zmiennej wyjściowej. Analiza wrażliwości pozwala na badanie zmian parametrów rozkładu zmiennej wyjściowej (wartość oczekiwana, odchylenie standardowe) w funkcji zmian parametrów rozkładów wielkości wejściowej. Dodatkowo możliwe jest badanie wpływu stopnia korelacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi na niepewność złożoną [7, 8].

Prezentowany pakiet oprogramowania powstał w Zakładzie Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych Politechniki Częstochowskiej. Procedury obliczeniowe zaimplementowano w języku Matlab. Program posiada graficzny interfejs użytkownika, który w znaczny sposób upraszcza jego obsługę. Podstawową funkcją pakietu jest symulacyjna analiza wrażliwości modelu pomiarowego kamery ThermoCAM PM595. Ekran główny programu podzielono na trzy obszary funkcjonalne: danych wejściowych, wyboru wariantu obliczeń oraz symulacji składowych. W obszarze danych wejściowych możliwe jest wczytanie warunków pomiaru i parametrów kalibracji z pliku termogramu (*.img). W obszarze wariantu obliczeń istnieje możliwość wyboru: wariant pierwszy – różne wartości temperatury obiektu, wariant drugi – jedna temperatura, różne wartości wielkości wejściowych. Obszar trzeci służy do wyboru typu rozkładu zmiennych wejściowych oraz ustalania zakresu zmian niepewności wielkości wejściowych. Prezentowane oprogramowanie umożliwia badania symulacyjne dla dziesięciu tysięcy realizacji pięciu zmiennych losowych wejściowych modelu (4). Na obecnym etapie, pakiet umożliwia wybór pomiędzy dwoma typami rozkładów (logarytmicznym normalnym oraz jednostajnym). Moduł główny pakietu pozwala na prezentację wyników symulacji w formie wykresów. Dostępne opcje to: histogramy rozkładów częstości poszczególnych wielkości wejściowych, wykresy liniowe niepewności oraz histogramy rozkładów częstości wielkości wyjściowej. Dodatkowo w skład pakietu wchodzi moduł do obliczeń złożonej niepewności standardowej. Umożliwia on wyznaczenie poziomu ufności i współczynnika rozszerzenia dla niepewności złożonej. W trakcie pracy z programem istnieje możliwość eksportu macierzy wyników do przestrzeni roboczej programu MATLAB. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie dowolnych algorytmów przetwarzania danych czy też dalszy eksport do innych programów. Na poniższym rysunku przedstawiono okno główne modułu do obliczeń niepewności złożonej (rys. 1).



Rys. 1. Okno modułu do obliczeń złożonej niepewności standardowej

3. Przykładowe wyniki symulacyjnej analizy wrażliwości - symulacje składowych złożonej niepewności standardowej

Poniżej przedstawiono wyniki symulacyjnej analizy wrażliwości uzyskane z wykorzystaniem prezentowanego oprogramowania. Wyniki dotyczą wrażliwości składowych modelu na zmiany niepewności standardowych wielkości wejściowych. Symulacje przeprowadzono dla trzech wartości temperatur mierzonych: 30 °C (303.15 K), 60 °C (333.15 K) oraz 30 °C (363.15 K). Pierwsze dwa wykresy przedstawiają histogramy rozkładów dwóch zmiennych wejściowych (emisyjności i wilgotności). Następne wykresy przedstawiają wyniki symulacji poszczególnych składowych. Przyjęte w symulacji wartości wielkości odniesienia i zakresy zmian wartości wielkości wejściowych przedstawiono w tabelach 1, 2.

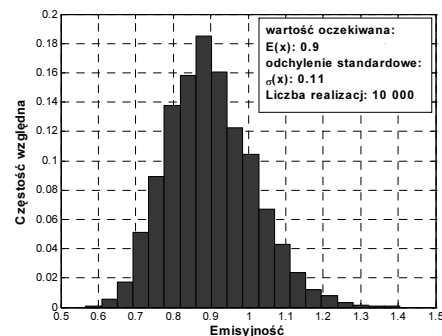
Tab. 1. Warunki odniesienia przyjęte w symulacjach składowych

| Wielkość modelu | Temperatura atmosfery T_{atm} | Temperatura otoczenia T_0 | Wilgotność względna ω | Emisyjność ε | Odległość d |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------|
| Wartość wielkości | 296,15 K | 296,15 K | 50 % | 0,9 | 50 m, 100 m |

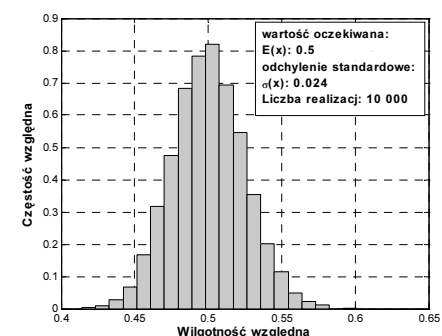
Tab. 2. Zakresy zmian niepewności standardowych wielkości zmiennych przyjęte w symulacjach składowych

| Wielkość modelu | Temperatura atmosfery $T_{atm}^{(*)}$ | Temperatura otoczenia $T_0^{(*)}$ | Wilgotność względna ω | Emisyjność ε | Odległość d |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------|
| Zakres zmian niepewności standardowej | 0 – 10 % | 0 – 10 % | 0 – 10 % | 0 – 30 % | 0 – 10 % |

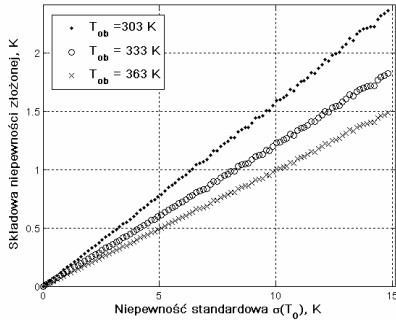
(*) Zakresy procentowe dotyczą Międzynarodowej Skali Temperatur MST-90



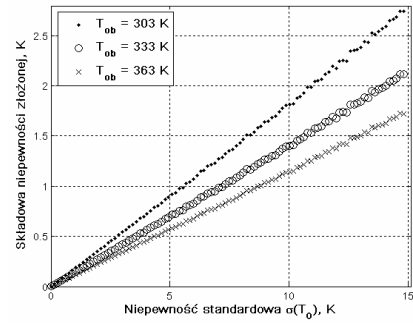
Rys. 2. Histogram częstości względnej rozkładu emisyjności (unormowany do szerokości przedziału)



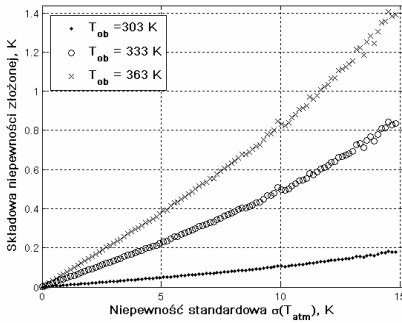
Rys. 3. Histogram częstości względnej rozkładu wilgotności (unormowany do szerokości przedziału)



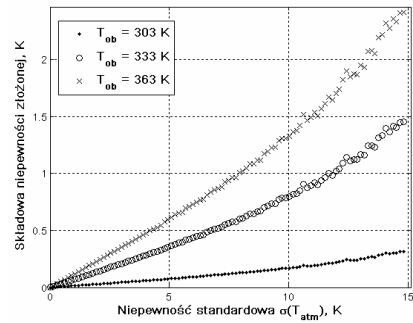
Rys. 4. Składowa niepewności złożonej związana z temperaturą otoczenia (d = 50 m)



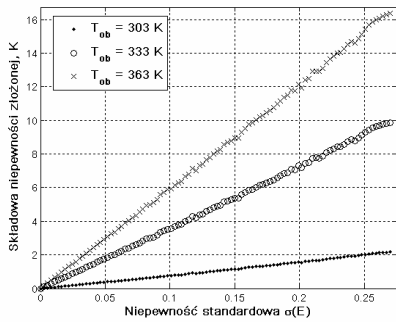
Rys. 9. Składowa niepewności złożonej związana z temperaturą otoczenia (d = 100 m)



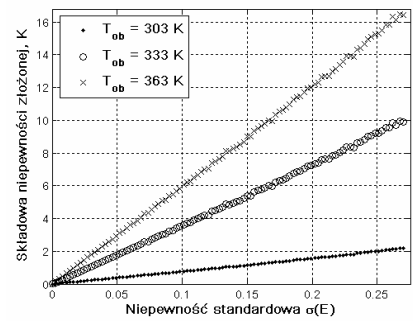
Rys. 5. Składowa niepewności złożonej związana z temperaturą atmosfery (d = 50 m)



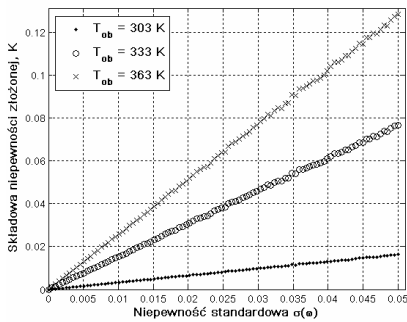
Rys. 10. Składowa niepewności złożonej związana z temperaturą atmosfery (d = 100 m)



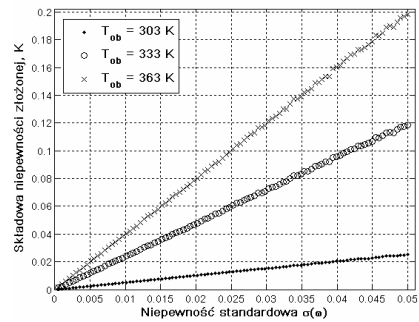
Rys. 6. Składowa niepewności złożonej związana z emisyjnością (d = 50 m)



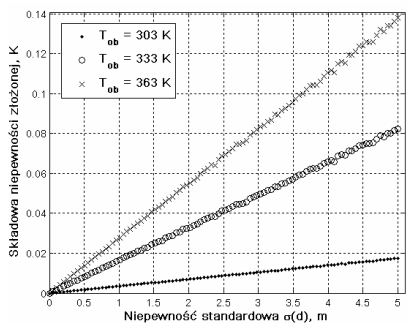
Rys. 11. Składowa niepewności złożonej związana z emisyjnością (odległość: 100 m)



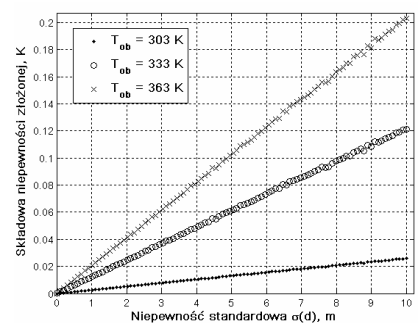
Rys. 7. Składowa niepewności złożonej związana z wilgotnością względną (d = 50 m)



Rys. 12. Składowa niepewności złożonej związana z wilgotnością względną (d = 100 m)



Rys. 8. Składowa niepewności złożonej związana z odległością (d = 50 m)



Rys. 13. Składowa niepewności złożonej związana z odległością (odległość: 100 m)

4. Wnioski

Analizując wykresy przedstawione na rys. 4 – 13 można stwierdzić, że:

1. Badany model wykazuje największą wrażliwość na zmiany emisyjności.
2. Najmniejszą wrażliwość modelu obserwuje się dla wilgotności względnej.
3. Wraz ze wzrostem temperatury obiektu rośnie wrażliwość modelu na zmiany takich wielkości wejściowych jak: temperatura atmosfery, emisyjność, wilgotność względna, odległość.
4. Wrażliwość modelu na zmiany temperatury otoczenia maleje wraz ze wzrostem temperatury obiektu. Wnioski podane w p. 3 oraz p. 4 mogą mieć ważne znaczenie w praktyce ze względu na częściową kompensację wzajemną wpływu składowych niepewności T_{atm} oraz T_o na niepewność łączną. Wynika to z właściwości modelu pomiarowego (3).
5. Wrażliwość modelu na zmiany temperatury atmosfery, wilgotności względnej i odległości rośnie wraz z odległością. Wyjaśnienie tego faktu jest związane z rolą przepuszczalności atmosfery. W badanym modelu parametrami funkcji opisującej przepuszczalność są właśnie temperatura atmosfery, wilgotność względna i odległość. Wyniki symulacji potwierdzają związek tych wielkości z przepuszczalnością.

5. Literatura

- [1] Minkina W. „Pomiary termowizyjne - przyrządy i metody”. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-237-5.
- [2] Minkina W., Bąbka R.: „Wpływ składowych błędów metody na błąd wskazania temperatury w oparciu o model pomiarowy kamery Therna CAM PM 595”. V Konferencja Krajowa "Termografia i Termometria w Podczerwieni", Ustroń 14-16 listopada 2002, s. 339-344.
- [3] Toolkit IC2 Dig 16, Developers Guide 1.00 AGEMA 550/570 AFF (AGEMA File Format) file description; FILR Systems AB Publication number: 557344 version B.
- [4] „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik”. Główny Urząd Miar 1999.
- [5] „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Supplement 1. Numerical Methods For The Propagations of Distributions”. Projekt dokumentu Międzynarodowego Biura Miar z 16.03.2004.
- [6] Chrzanowski M., Matyszkiewicz R.: „Pakiet oprogramowania do obliczania niepewności pomiaru temperatury za pomocą kamer termowizyjnych”. Materiały IV Konferencji Krajowej - Termografia i Termometria w Podczerwieni, Łódź 16-18.11.200r. str. 282-287.
- [7] Minkina W., Dudzik S.: „Symulacyjna analiza niepewności algorytmu przetwarzania toru pomiarowego kamery termowizyjnej Therna CAM PM595”. III Sympozjum: Metrologiczne Właściwości Programowalnych Przetworników Pomiarowych MWPPP'04, Gliwice 22-23.11.2004r. str. 173-187.
- [8] Dudzik S.: „Analiza wpływu wartości współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi modelu pomiaru na niepewność wyznaczania temperatury kamerą termowizyjną”. XXXVII Międzynarodowa Konferencja Metrologów i Konferencja Grantowa MKM'05, Zielona Góra 5-7.09.2005r. str. 195-203.

Artykuł recenzowany

NOMINACJE PROFESORSKIE

Waldemar Andrzej MINKINA

Prof. dr hab. inż. Waldemar Andrzej Minkina ukończył w roku 1977 Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał z wyróżnieniem w 1983 r. w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej a doktora habilitowanego w 1995 r. na Wydziale Automatyki Politechniki Lwowskiej z rekomendacji Katedry Techniki Pomiarowo - Informacyjnych. Dnia 22.06.2006 r. Prezydent RP wręczył Prof. Minkinie nominację i nadał tytuł profesora nauk technicznych. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej szeroko rozumianej termometrii, termografii komputerowej, pomiarów cieplnych oraz teorii i techniki wymiany ciepła. Jest autorem i współautorem 4 monografii z metrologii, 99 publikacji (w tym 25 ogłoszonych, w większości samodzielnie, w czasopiśmie z tzw. „listy filadelfijskiej” oraz wydawanych przez Polską Akademię Nauk i Akademię Nauk innych krajów), 4 patentów oraz 3 zgłoszeń patentowych. Promotor 2 obronionych z wyróżnieniem oraz 2 otwartych prac doktor-



skich. Kierował 1 projektem celowym oraz 4 grantami. Profesor Minkina odbył wielokrotnie staże zagraniczne w Instytutach Miernictwa Uniwersytetów: Karlsruhe, Berlina Zachodniego, Sankt Petersburga i Lwowa a także w Federalnym Urzędzie Miar (PTB w Berlinie) oraz Risø National Laboratory (Dania). Prowadził wykłady na studiach doktoranckich prowadzonych w Instytucie Elektroniki Ciała Stałego Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie. W zakresie termografii komputerowej ściśle współpracuje z Katedrą Miernictwa Uniwersytetu w Rostocku. Efektem tej współpracy, w ramach podpisanej umowy między Politechniką Częstochowską a Uniwersytetem w Rostocku, jest coroczne organizowanie w Rostocku oraz Częstochowie międzynarodowych Warsztatów: „Infrarot - Thermografie”. Jest członkiem: Sekcji „Aparatura i Systemy Pomiarowe” Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Rady Programowej Miesięcznika „Pomiary Automatyka Kontrola”, Polskiego Towarzystwa Techniki Sensorowej, Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej oraz Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Od roku 1996 kieruje Zakładem Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych. W latach 1999-2005 był dyrektorem Instytutu Elektroniki i Systemów Sterowania.