

Tomasz ORŻANOWSKI, Tomasz SOSNOWSKI, Henryk MADURA

WOJKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Metoda korekcji czułości matrycowych detektorów podczerwieni

Dr inż. Tomasz ORŻANOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2004 roku w dyscyplinie naukowej elektronika, specjalność systemy cyfrowe. Zainteresowania naukowo-badawcze: metody korekcji niejednorodności odpowiedzi matryc detektorów podczerwieni, układy programowalne i systemy wbudowane. Jest autorem i współautorem ponad 35 publikacji i referatów konferencyjnych. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.

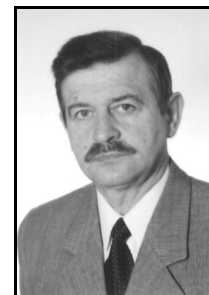
e-mail: torzanowski@wat.edu.pl



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 180 artykułów i referatów konferencyjnych. Autor i współautor 22 wdrożeń i 14 patentów. Od 2000 roku profesor Wojskowej Akademii Technicznej.

e-mail: hmadura@wat.edu.pl



Dr inż. Tomasz SOSNOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1996 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów mikroprocesorowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych w technice podczerwieni i analizie sygnałów wibroakustycznych. Autor i współautor ponad 50 publikacji.

e-mail: tsosnowki@wat.edu.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę korekcji czułości matrycowych detektorów podczerwieni, która nie wymaga pamiętania pełnej tablicy współczynników korekcyjnych. Wartości współczynników korekcji czułości dla każdej kolumny detektorów IR w matrycy są aproksymowane wielomianem n -tego stopnia w funkcji numeru wiersza. Pozwala to na zmniejszenie wymagań dla systemu cyfrowego przetwarzania sygnału z matrycy, ponieważ w pamięci są przechowywane tylko współczynniki wielomianów dla poszczególnych kolumn matrycy zamiast współczynniki korekcyjne dla wszystkich detektorów. Opracowana metoda jest tylko nieznacznie gorsza od metody dwupunktowej używającej kompletnych tablic współczynników korekcyjnych.

Słowa kluczowe: korekcja niejednorodności, matryca detektorów podczerwieni.

Response nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays

Abstract

In this paper a nonuniformity correction (NUC) method for infrared focal plane array (IRFPA) response that uses a reduced table of correction coefficients is presented. In this method the gain correction coefficients of infrared detectors in array are estimated by means of the approximation polynomials (Eq. 1) of the row number for the each detector column in the array. It allows reducing significantly hardware requirements for the IRFPA output readout system because the system has to store in a memory just the polynomial coefficients for particular columns instead of the correction coefficients for all detectors in the array. The polynomial coefficients are assigned by the least mean square method using the set of true gain coefficients which are obtained, as in the two-point correction procedure, by means of infrared blackbodies (Fig. 2). After that the gain coefficients estimated by these polynomials can be used in the standard NUC algorithm to compensate a detector response nonuniformity. The real-time processing of a detector response is possible especially when the field-programmable gate array devices are applied to the IRFPA readout system. The proposed NUC method is just a bit worse than the two-point correction with the full table of the gain correction coefficients (Fig. 4).

Keywords: nonuniformity correction, infrared focal plane array.

1. Wprowadzenie

Matryce detektorów podczerwieni (IRFPA) charakteryzują się pewną niejednorodnością odpowiedzi (*ang. response nonuniformity*) poszczególnych detektorów IR dla takiej samej mocy padającego promieniowania podczerwonego. Efektem niejednorodności jest zakłócenie zwane szumem FPN (*ang. Fixed Pattern Noise*) występujące w obrazie generowanym przez matrycę. Szum FPN powoduje zniekształcenie odwzorowania termicznego obserwowanej sceny i w rezultacie pogorszenie parametrów użytkowych kamery termowizyjnej.

W matrycy IRFPA poszczególne detektory mogą mieć różną czułości i zróżnicowane przesunięcie charakterystyk napięcia wyjściowego w funkcji mocy padającego promieniowania podczerwonego. Wynika to z warunków procesu technologicznego przy produkcji matrycy detektorów IR, właściwości elektronicznego układu odczytu ROIC (*ang. ReadOut Integrated Circuit*) zintegrowanego z matrycą oraz jej temperatury pracy. Ponadto, w urządzeniach termowizyjnych istotny wpływ na sygnał wyjściowy z matrycy IRFPA ma konstrukcja obiektywu oraz właściwości układu zasilania i sterowania.

Niejednorodność odpowiedzi detektorów w matrycy powoduje znaczne zniekształcenie odwzorowania termicznego obserwowanego obiektu i musi być najpierw skompensowana zanim obraz termiczny (termogram) zostanie wyświetlony na ekranie.

Korekcja niejednorodności (NUC) polega na odpowiednim cyfrowym przetwarzaniu sygnału wyjściowego z matrycy detektorów IR w celu usunięcia szumu FPN w generowanym termogramie. Odpowiednie współczynniki korekcyjne są obliczane na podstawie zarejestrowanych wcześniej sygnałów odpowiedzi detektorów dla kilku wartości strumienia promieniowania IR wzorcowych promienników podczerwieni. Najczęściej stosowanym algorytmem korekcji niejednorodności jest algorytm korekcji dwupunktowej TPNUC (*ang. Two-Point NUC*), który zakłada liniowy model odpowiedzi detektorów IR w matrycy [1]. Ponieważ rzeczywiste charakterystyki detektorów są nieliniowe, to w celu uzyskania lepszej kompensacji niejednorodności poza punktami kalibracji stosuje się nieliniowe algorytmy NUC, w których charakterystyki detektorów są aproksymowane wielomianami wyższego rzędu [2, 3]. W przypadku detektorów niechłodzonych (*ang. uncooled IRFPA*) istotny wpływ na sygnał wyjściowy z detektora ma również zmiana temperatury matrycy IRFPA oraz temperatury najbliższego otoczenia (obudowy). W publikacji [4] autorzy zaproponowali metodę kompensacji dryftu temperaturowego matrycy mikrobolometrycznej, która polega na umieszczeniu w torze optycznym matrycy półprzezroczystej przesłony z krzemu zamiast stosowanej zwykle migawki metalowej, która powoduje przerwy w rejestracji termogramów, gdy jest używana. W metodzie tej zakłada się, że obserwowana scena nie ulega zmianie przed i po użyciu przesłony krzemowej w celu wykonania kompensacji dryftu temperaturowego matrycy. Metody korekcji NUC wykorzystujące referencyjne źródła promieniowania IR, tzw. ciała

czarne nazywane są metodami kalibracyjnymi i są najczęściej stosowane w kamerach termowizyjnych [5]. Oddzielną grupę metod korekcji niejednorodności stanowią metody statystyczne SBNUC (*ang. Scene-based NUC*), w których współczynniki korekcyjne wyznacza się na podstawie parametrów statystycznych obserwowanej sceny [6].

W przypadku matryc IRFPA o wysokiej rozdzielczości (np. milion detektorów), znacznie rozrastają się i komplikują układy korekcyjne, wzrastają koszty produkcji kamer termowizyjnych i pogarszają się warunki ich eksploatacji, w tym wzrasta pobór mocy z zasilania. W niektórych zastosowaniach kamer termowizyjnych, liczba współczynników korekcyjnych wielokrotnie wzrasta, gdyż mogą one być zależne od temperatury pracy kamery i temperatury obserwowanych obiektów. Stąd istnieje potrzeba opracowania wystarczająco skutecznego, ale prostego i taniego sposobu korekcji czułości matrycowych detektorów podczewieni do kamer termowizyjnych, zapewniającego obniżenie kosztów produkcji kamer termowizyjnych, obniżenie wymagań na pojemność pamięci oraz mniejsze zużycia energii podczas eksploatacji kamery.

W p. 2 przedstawiono opis metody korekcji czułości detektorów w matrycy IRFPA, w której wartości współczynników korekcyjnych dla każdej kolumny detektorów są aproksymowane wielomianem n -tego stopnia w funkcji numeru wiersza matrycy. Wyniki symulacji proponowanej metody korekcji NUC oraz ocena jej skuteczności są przedstawione w p. 3.

2. Opis metody korekcji

Istota proponowanej metody korekcji czułości detektorów matrycy IRFPA polega na tym, że dla każdej j -tej kolumny detektorów jest określana funkcja $G_j(i)$ aproksymująca wartości współczynników korekcji czułości detektorów. Funkcja ta jest wielomianem n -tego stopnia, co najmniej drugiego, a zmienną wielomianu jest numer (i) wiersza matrycy.

$$G_j(i) = a_{0,j} + a_{1,j}i + a_{2,j}i^2 + \dots + a_{n,j}i^n \quad (1)$$

W pamięci kamery przechowywane są tylko współczynniki $a_{0,j}$, $a_{1,j}$, ..., $a_{n,j}$ wielomianów $G_j(i)$ poszczególnych kolumn matrycy. Dzięki temu, liczba pamiętanych współczynników korekcyjnych maleje wielokrotnie. Współczynniki wielomianu $G_j(i)$ dla j -tej kolumny oblicza się metodą najmniejszych kwadratów na podstawie zbioru rzeczywistych współczynników G_{ij} korekcji nachylenia charakterystyk detektorów w matrycy.

Zbiór rzeczywistych współczynników korekcyjnych G_{ij} wyznacza się na podstawie zarejestrowanych odpowiedzi $Y_{ij}(T)$ matrycy IRFPA dla strumienia promieniowania dwóch, kolejno umieszczonych przed obiektywem kamery, wzorcowych źródeł promieniowania podczerwonego o temperaturach odpowiednio T_1 , T_2 , przy czym $T_2 > T_1$. Uzyskane w ten sposób dane kalibracyjne uśrednia się dla kilkudziesięciu ramek obrazowych i na ich podstawie oblicza się rzeczywiste współczynniki korekcyjne G_{ij} w podobny sposób, jak w metodzie TPNUC:

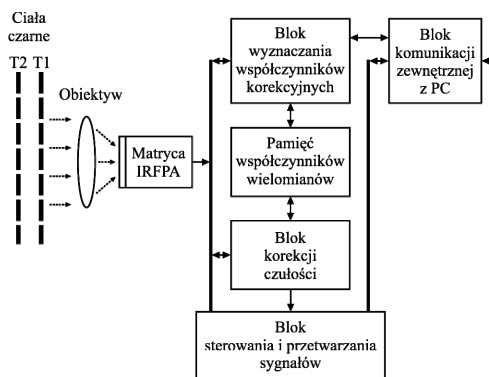
$$G_{ij} = \frac{Y(T_2) - Y(T_1)}{Y_{ij}(T_2) - Y_{ij}(T_1)}, \quad (2)$$

gdzie $Y(T)$ jest wartością średnią odpowiedzi detektorów w matrycy określoną wyrażeniem

$$Y(T) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{ij}(T). \quad (3)$$

Następnie wykonuje się nieliniową aproksymację wartości współczynników G_{ij} dla poszczególnych kolumn matrycy IRFPA wielomianami n -tego stopnia. Współczynniki wielomianów aproksymujących są wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.

Na rys. 1 pokazano uproszczony schemat blokowy układu korekcji czułości matrycy IRFPA według opisanego wyżej algorytmu.



Rys. 1. Schemat blokowy układu korekcji czułości matrycy IRFPA
Fig. 1. Block diagram of IRFPA response nonuniformity correction

Współczynniki $a_{n,j}$ wielomianów aproksymujących dla każdej kolumny są wyznaczone w bloku wyznaczenia współczynników korekcyjnych lub za pomocą komputera zewnętrznego i zapisywane następnie do pamięci współczynników. W bloku korekcji czułości dla każdej ramki obrazu, sygnały z detektorów ij są mnożone przez współczynniki $G_j(i)$, a skorygowana wartość sygnału jest przesyłana do dalszych bloków kamery termowizyjnej. Sterowanie procesem wyznaczenia współczynników korekcji czułości w kamerze termowizyjnej odbywa się za pomocą zespołu sterowania i przetwarzania sygnałów.

3. Wyniki badań

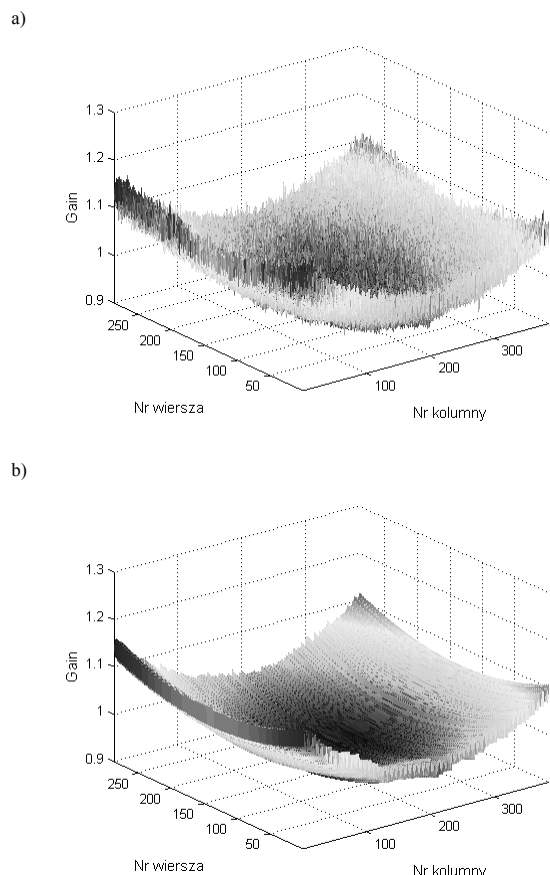
Badania skuteczności proponowanej metody korekcji czułości detektorów w matrycy IRFPA były prowadzone na stanowisku laboratoryjnym (rys. 2) z powierzchniowymi ciałami czarnymi i testowym układem odczytu zaprojektowanym do matrycy mikrobolometrycznej firmy ULIS (Francja).



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do korekcji NUC
Fig. 2. Laboratory stand for NUC correction

Na podstawie zebranych danych pomiarowych będących odpowiedziami matrycy mikrobolometrycznej na jednorodne promieniowanie ciała czarnego, wykonano symulację algorytmów korekcji NUC w środowisku MATLAB.

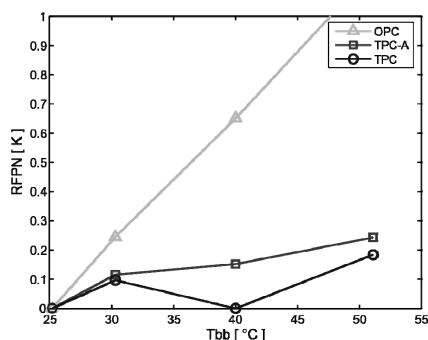
Na rys. 3a przedstawiono wykres wartości rzeczywistych współczynników korekcji czułości (*ang. Gain*) detektorów w matrycy, które wyznaczono dla punktów kalibracji $T_1 = 25,2^\circ\text{C}$ i $T_2 = 40^\circ\text{C}$. Rysunek 3b przedstawia wartości współczynników korekcji czułości, estymowane wielomianami 2. stopnia określonymi wcześniej dla każdej kolumny matrycy według metody opisanej w p. 2. Średni błąd aproksymacji współczynników korekcji czułości wyniósł 0,8%, a wartość maksymalna błędnie przekroczyła 5%. Dokładność aproksymacji może być zwiększona poprzez zwiększenie stopnia wielomianów.



Rys. 3. Współczynniki korekcji czułości detektorów w matrycy IRFPA: a) wartości rzeczywiste, b) wartości estymowane wielomianem 2. stopnia określonym dla każdej kolumny detektorów

Fig. 3. IRFPA detectors gain correction coefficients: a) true values, b) values estimated by the second-order polynomial defined for each column of IR detectors

Na rys. 4 przedstawiono porównanie skuteczności proponowanej metody korekcji czułości matrycy IRFPA z innymi znanymi metodami korekcji NUC. Parametrem porównującym metody była wartość szumu RFPN (*ang. Residual FPN*) pozostającego w termogramie po korekcji niejednorodności, wyrażona w K, jako odchylenie standardowe odpowiedzi detektorów w matrycy na jednorodne promieniowanie ciała czarnego o temperaturze T_{bb} [7]. Czułość badanej matrycy mikrobolometrycznej wynosiła 4,68 mV/K dla zakresu (T_1, T_2).

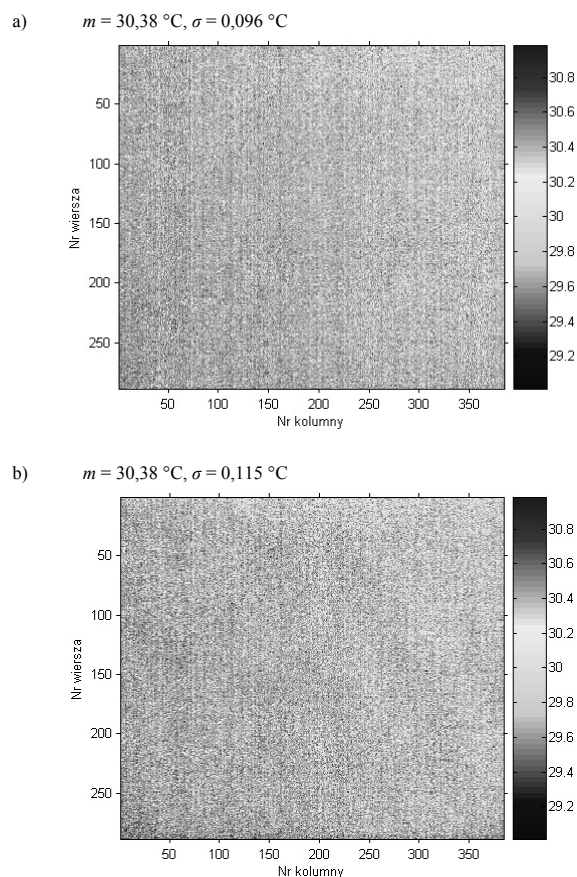


Rys. 4. Wartość niejednorodności odpowiedzi matrycy IRFPA po korekcji jednopunktowej (OPC), standardowej dwupunktowej (TPC) oraz dwupunktowej z aproksymacją wartości współczynników korekcji czułości wielomianami 2. stopnia (TPC-A)

Fig. 4. IRFPA response nonuniformity after one-point correction (OPC), standard two-point correction (TPC), and two-point correction with the second-order polynomials approximation of gain correction coefficients (TPC-A)

Rysunek 5 przedstawia termogramy ciała czarnego o temperaturze $T_{bb} = 30,3\text{ °C}$ otrzymane po korekcji dwupunktowej (rys. 5a)

oraz po korekcji z proponowaną metodą aproksymacji współczynników *Gain* wielomianami 2. stopnia (rys. 5b).



Rys. 5. Termogram ciała czarnego o temperaturze 30,3 °C: a) po korekcji dwupunktowej, b) po korekcji zgodnie z proponowaną metodą aproksymacji współczynników *Gain*

Fig. 5. Blackbody thermal image of 30.3 °C temperature: a) after standard two-point correction, b) after correction according to the proposed method of gain correction coefficients approximation

Z rys. 4 i rys. 5 wynika, że dla punktu pomiarowego $T_{bb} = 30,3\text{ °C}$ skuteczność proponowanej metody korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy IRFPA jest ponad 2 razy lepsza niż w metodzie jednopunktowej (bez korekcji czułości) i tylko o 19,8 % gorsza w odniesieniu do standardowej metody dwupunktowej.

4. Podsumowanie

Przedstawiona metoda korekcji czułości detektorów w matrycy IRFPA, dzięki zastosowaniu funkcji aproksymującej wartości współczynników korekcyjnych, zapewnia znaczną redukcję rozmiaru pamięci, wymaganej do przechowywania danych potrzebnych do wykonania korekcji sygnały wyjściowego z matrycy. Skuteczność proponowanej metody korekcji NUC jest większa niż metody korekcji jednopunktowej i tylko niewiele gorsza niż znanej metody dwupunktowej a przez to bez istotnego pogorszenia jakości uzyskiwanego zobrazowania, znacznie upraszcza konstrukcję układu przetwarzania sygnału z matrycy IRFPA, zmniejsza rozmiar pamięci, obniża koszty produkcji kamery termowizyjnej i obniża moc pobieraną przez kamerę ze źródła zasilania.

Metoda korekcji czułości matrycowych detektorów podczerwieni może znaleźć zastosowanie we wszelkich urządzeniach termowizyjnych z użyciem matryc IRFPA w procesie detekcji i przetwarzania a zwłaszcza korekcji obrazów w podczerwieni. Ograniczenia w jej stosowaniu wynikają głównie z wielkości rozrzutu czułości detektorów IR w matrycy oraz dokładności przyjętej aproksymacji współczynników korekcyjnych. Metoda została zgłoszona do opatentowania w Urzędzie Patentowym RP.

5. Literatura

- [1] Perry D. L. and Dereniak E. L.: Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors, *Opt. Eng.*, 32, 1993, pp. 1854-1859.
- [2] Shulz M. and Caldwell L.: Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays, *Infrared Phys. Techn.*, 36, 1995, pp. 763-777.
- [3] Wang R., Chen P. and Tsien P.: An improved nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays which is easy to implement, *Infrared Phys. Techn.*, 39, 1998, pp. 15-21.
- [4] Olbrycht R., Więcek B.: Korekcja dryftu temperaturowego detektorów mikrobolometrycznych, *PAK*, vol. 55, nr 11, 2009, s. 890-893.
- [5] Orżanowski T. and Madura H.: Test and evaluation of reference-based nonuniformity correction methods for microbolometer infrared detectors, *Opto-Electron. Rev.*, 18, 1, 2010, pp. 91-94.
- [6] Scribner D. A., et al.: Nonuniformity correction for staring focal plane arrays using scene-based techniques, *Proc. SPIE 1308*, 1990, pp. 224-233.
- [7] Tissot J. L.: Uncooled infrared detectors: state of the art, VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczermieni, Ustroń-Jaszowiec, 16-18 listopada 2006, s. 9-23.

otrzymano / received: 02.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK

Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO PAK
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl