

Łukasz KRZAK, Dominik RZEPKA, Cezary WOREK
 AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,
 ul. Mickiewicza 30, 30-103 Kraków

Algorytm odtwarzania zegara transmisji dla pakietowych systemów radiokomunikacyjnych o zmiennej szybkości bitowej

Mgr inż. **Łukasz KRZAK**

Absolwent kierunku Elektronika w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie a obecnie asystent w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki. W swojej pracy zajmuje się bezprzewodowymi sieciami sensorowymi i przemysłowymi systemami radiokomunikacyjnymi. Jego zainteresowania obejmują również tworzenie oprogramowania dla systemów wbudowanych.



e-mail: lkrzak@agh.edu.pl

Mgr inż. **Dominik RZEPKA**

Ukończył studia w Akademii Górniczo-Hutniczej na kierunku Elektronika, a obecnie jest uczestnikiem studiów doktoranckich w Katedrze Elektroniki, pracując w zespole Bezprzewodowych Sieci Sensorowych. Jego zainteresowania obejmują radiowe techniki transmisji danych, przetwarzanie sygnałów cyfrowych i sprzętową implementację algorytmów.



e-mail: drzepka@agh.edu.pl

Dr inż. **Cezary WOREK**

Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Elektroniki AGH. Jego badania skupiają się m.in. na zagadnieniach kompatybilności elektromagnetycznej, budowy zasilaczy impulsowych z rezonansową końcówką mocy, układów zasilania i systemów radiowych przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Jest autorem lub współautorem ponad 40 publikacji w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, oraz kilkunastu patentów.



e-mail: worek@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano metodę wykorzystania preambuły radiowej ramki transmisyjnej jako nośnika dodatkowych informacji np. o szybkości bitowej pakietu. Metoda ta znajduje zastosowanie w systemach radiokomunikacyjnych o adaptacyjnej przepływności danych i polega na wykorzystaniu i rozróżnieniu więcej niż jednego ciągu synchronizacyjnego. W opisywanym rozwiązaniu układ FPGA odtwarza zegar na podstawie sygnału binarnego w paśmie podstawowym pochodzącego z odbiornika radiowego. W artykule zaprezentowano algorytm detekcji i odtwarzania zegara wraz z metodologią doboru jego parametrów. Przedstawiono analizę prawdopodobieństwa błędnej synchronizacji oraz przykładową implementację wykorzystującą cztery 64-bitowe preambuły.

Słowa kluczowe: preambuła, odtwarzanie zegara, transmisja radiowa.

Clock recovery algorithm for multi-rate packet radiocommunication systems

Abstract

The paper presents a way of using radio packet preamble as a carrier of additional information about a packet, such as data transmission rate. This method can be used in multi-rate radiocommunication systems and is based on distinguishing more than one preamble, as opposed to IEEE 802.11 standard, which provides special packet fields for that purpose. The algorithm is implemented in a FPGA device which processes base band data from a radio transceiver and feeds it along with the recovered clock to a microcontroller (fig.1). Section 3 describes the algorithm used. The input signal is processed by parallel correlators and a preamble is considered to be detected when one of the outputs goes above a certain threshold (Fig.2). Section 4 presents an analytical model of the system as well as the synchronization error probability definition and estimation. It also provides guidance on how to choose the right preamble sequences. In Section 5 the analytical model is confronted with behavioral simulation of an exemplary system that uses four different 64-bit long preambles (Fig.4). Additionally, two binary sequence families are studied (Fig.5): the Gold codes [4] and minimum peak side lobe codes [6]. This section also presents a method for choosing the threshold level parameter in the preamble detection algorithm. The last section summarizes the paper.

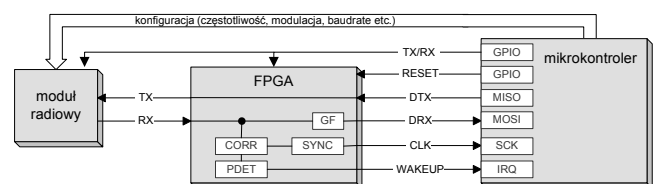
Keywords: preamble, clock recovery, radio transmission.

1. Wstęp

W systemach radiokomunikacyjnych, wykorzystujących cyfrową transmisję pakietową, jednym z zadań odbiorczego jest detekcja obecności sygnału w kanale oraz odtwarzanie, na podstawie odbieranych danych, zegara transmisji. Jedną z najczęściej stosowanych technik, umożliwiających realizację tych procesów jest wprowadzenie na początku pakietu tzw. preambuły, czyli znanego ciągu symboli, którego obecność może być wykrywana w odbiorniku [1]. Jak pokażemy w dalszej części artykułu, kosztem pewnego pogorszenia jakości odtwarzania zegara można zastosować preambułę pakietu jako nośnik dodatkowych informacji o polu danych pakietu, np. szybkości symbolowej użytej w nadajniku. Umożliwia to realizację pakietowych transmisji, w których szybkość symbolowa pola danych może być dobierana adaptacyjnie, na podstawie np. aktualnie estymowanej charakterystyki kanału komunikacyjnego. Podobne podejście stosowane jest m.in. w urządzeniach standardu 802.11, w których szybkość bitowa jest zazwyczaj dopasowywana na podstawie stopy udanych transmisji pakietów (algorytm ARF – Auto Rate Fallback) lub pomiaru stosunku sygnału do szumu (RBAR – Receiver Based Auto Rate oraz OAR – Opportunistic Auto Rate) [5]. W protokołach rodziny 802.11 informacja o przepływności bitowej pola danych pakietu jest zawarta w specjalnym polu, występującym za preambułą pakietu. Sama preambuła pozostaje niezmienna.

2. Tor nadawczo-odbiorczy w paśmie podstawowym

Na podstawie wykrytej preambuły odbiornik może estymować właściwą fazę zegara transmisji w rezultacie poprawnie odtwarzać dane. Funkcja ta bardzo często jest realizowana sprzętowo przez scalone moduły radiowe (np. rodziny Texas Instruments CC1xxx, Analog Devices ADF702x i wiele innych), jednak nie umożliwiają one wykrywania jednej z wielu preambuł jednocześnie.



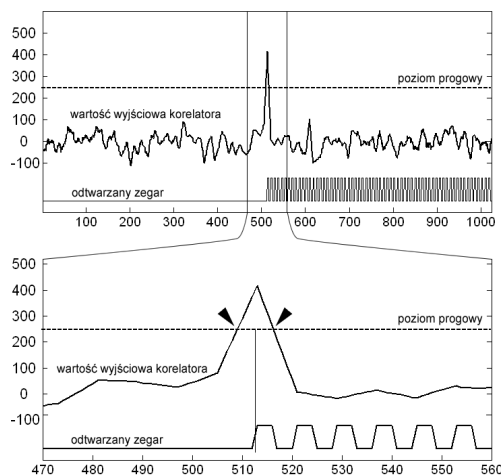
Rys. 1. Architektura cyfrowego, radiowego toru nadawczo-odbiorczego opisanego w artykule: CORR – bank korelatorów, SYNC – układ odtwarzania zegara, GF – filtr zakłóceń, PDET – układ sygnalizacji wykrycia preambuły
 Fig. 1. Architecture of the digital radio transceiver described: CORR – correlator bank, SYNC – clock recovery, GF – glitch filter, PDET – signalization of preamble detection

Zadanie to można jednak efektywnie zrealizować w układzie FPGA, wykorzystując sprzętowy algorytm korelacji i odtwarzania zegara. Przykładową architekturę takiego toru nadawczo odbiorczego przedstawiono na rys. 1.

W przedstawionym rozwiązaniu, stos komunikacyjny zaimplementowany jest w mikrokontrolerze. Moduł radiowy to właściwie dowolny układ nadawczo odbiorczy, pozwalający na przezroczystą transmisję binarną w paśmie podstawowym.

3. Algorytm wykrywania preambuły i odtwarzania zegara

Dwustanowy sygnał danych w paśmie podstawowym jest próbkowany z częstotliwością ośmiokrotnie wyższą niż szybkość bitowa z jaką nadawana jest preambuła. Tak nadpróbkowany sygnał trafia równoległe na bank korelatorów, z których każdy wykrywa inny wzorzec preambuły. Sygnał wyjściowy każdego z korelatorów porównywany jest z poziomem progowym t . W przypadku wykrycia narastającego a potem opadającego zbocza przekraczającego próg, sygnalizowane jest wykrycie preambuły związanej z danym korelatorem. Punkt środkowy pomiędzy próbkami, które odpowiadają w/w zdarzeniom uznawany jest za punkt zerowej fazy dla układu odtwarzania zegara (rys. 3), zaś częstotliwość syntezy zegara zależy od numeru korelatora, który wykrył preambułę.



Rys. 2. Ilustracja algorytmu detekcji preambuły i odtwarzania zegara
Fig. 2. Illustration of the preamble detection and clock recovery algorithm

4. Prawdopodobieństwo błędnej synchronizacji

W przypadku równoległej detekcji wielu preambuł, przez zdarzenie błędnej synchronizacji rozumieć będziemy wszystkie sytuacje, w których nadając pakiet z preambułą, jej obecność nie zostanie zasygnalizowana przez właściwy korelator we właściwym czasie, pozwalającym poprawnie odtworzyć zegar transmisji. Wystąpienie zdarzenia błędnej synchronizacji powoduje, że ramka nie może być poprawnie zdekodowana, tak więc prawdopodobieństwo tego zdarzenia stanowi dolne ograniczenie dla pakietowej stopy błędów (ang. PER – *packet error rate*) w systemie.

Zakładamy, że w systemie występują preambuły o długości N bitów należące do zbioru zdefiniowanych sekwencji,

$$a_j \in \{a_0, a_1, \dots, a_{j-1}\}, \quad a_j[n] \in \{-1, 1\}, \quad n = 0..N-1 \quad (1)$$

oraz że są one nadawane na początku pakietu, a więc poprzedzający je sygnał zależy wyłącznie od charakteru kanału komunikacyjnego. Dla uproszczenia rozważań nie uwzględniamy nadpróbkowania

sygnału. Co prawda zwiększa ono precyzję synchronizacji, ale przyjmując, iż zbocze próbujące odtworzonego zegara musi trafić w którąkolwiek z próbek bitu, którego dotyczy, precyzja ta nie zmienia w naszym modelu prawdopodobieństwa błędnej synchronizacji. Jako kanał komunikacyjny rozpatrujemy kanał z addytywnym szumem białym, charakteryzujący się pewną bitową stopą błędów p (ang. BER – *bit error rate*), która powoduje zniekształcenie sygnału preambuły. Modelowany proces polegać będzie na wsuwaniu sygnału wejściowego (rys. 3) do rejestru przesuwanego korelatora w obecności szumu.

szum (N-1) symboli	preambuła (N symboli)
-----------------------	--------------------------

Rys. 3. Model sygnału wejściowego
Fig. 3. Model of an input signal

Sygnał wejściowy można opisać jako:

$$x[n] = \begin{cases} w_n, & n \in \langle 0, N-1 \rangle \\ a_i^*[n], & n \notin \langle 0, N-1 \rangle \end{cases}, \quad x[n] \in \{-1, 1\} \quad (2)$$

gdzie a_i^* jest wartością nadawanej sekwencji preambuły a_i zniekształconą przez szum, natomiast w_n to próbki odpowiadająca szumowi w kanale. Wartość na wyjściu dowolnego j -tego korelatora w chwili k może być zapisana jako:

$$c_j[k] = \sum_{n=0}^{N-1} a_i[n] \cdot x[n+k] \quad k \in 1..N \quad (3)$$

Odwierciedla ona ilość zgodnych symboli w korelowanych wektorach. Zauważmy, iż k opisuje ile bitów preambuły wsunęto już do rejestru przesuwanego korelatora. Zdefiniujemy zmienną losową $C_k^{i,j}$ opisującą ilość symboli zgodnych ze wzorcem i w j -tym korelatorze w chwili k :

$$C_k^{i,j} \sim B_{eq} + B_{neq} + B_n \quad (4)$$

Wartość tej zmiennej losowej związana będzie z trzema procesami stochastycznymi, opisanymi rozkładami dwumianowymi:

a) symbole zgodne pozostają nadal zgodne z prawdopodobieństwem równym $1-p$:

$$B_{eq} \sim B(R_{i,j}(k), 1-p) \quad (5)$$

b) symbole niezgodne są zamieniane na zgodne z prawdopodobieństwem równym p :

$$B_{neq} \sim B(k - R_{i,j}(k), p) \quad (6)$$

c) symbole reprezentujące szum przyjmują wartości $\{-1, 1\}$ z równym prawdopodobieństwem:

$$B_n \sim B(N-k, 0.5) \quad (7)$$

gdzie $R_{i,j}(k)$ jest funkcją korelacji sekwencji wzorcowych, opisującą ilość zgodnych symboli, zdefiniowaną następująco:

$$R_{i,j}(k) = \frac{1}{2} \left(N - \sum_{n=0}^{N-1} a_i[n] a_j[n+k] \right) \quad (8)$$

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej $C_k^{i,j}$ jest więc spletem funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładów (5), (6) i (7) [2]:

$$f_c^{i,j}(x, k) = f_{B_{eq}}(x) * f_{B_{neq}}(x) * f_n(x) \quad (9)$$

gdzie dla rozkładu dwumianowego:

$$f_{B(n,p)}(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (10)$$

Dla $k < \theta$ wartości zmiennej losowej $C_k^{i,j}$ zależą będą jedynie od szumu, i wówczas składniki B_{eq} i B_{neq} staną się elementami neutralnymi sumy (4) - taki model opisuje prawdopodobieństwo fałszywej detekcji. Dla k dążących do N , coraz bardziej na wartości wyjściowe korelatorów wpływ będzie miała funkcja $R_{i,j}(k)$ reprezentująca własności korelacyjne wzorców.

Przy równoległej detekcji wielu preambuł należy rozpatrzyć dwa przypadki: pierwszy, gdy sygnał preambuły jest wykrywany przez korelator o właściwym wzorcu ($i=j$) i drugi, gdy sygnał preambuły trafia na niewłaściwy korelator, szukający innego wzorca niż nadawany ($i \neq j$).

W pierwszym przypadku zdarzenie poprawnej synchronizacji polegać będzie na tym, że poziom progowy zostanie przekroczony dla $k = N$ i nie zostanie przekroczony dla $k < N$. Prawdopodobieństwo błędu synchronizacji dla tego przypadku będzie więc wynosić:

$$P_A^i = 1 - \sum_{x=\theta+1}^N f_c^{i,i}(x, N) \cdot \prod_{k=1}^{N-1} \sum_{x=0}^{\theta} f_c^{i,i}(x, k) \quad (11)$$

W celu minimalizacji prawdopodobieństwa wystąpienia takiego zdarzenia, sekwencja preambuły powinna charakteryzować się przebiegiem funkcji autokorelacji o możliwie wąskim listku głównym i niskim poziomie listków bocznych [6].

W drugim przypadku zdarzenie błędnej synchronizacji polegać będzie na przekroczeniu poziomu θ dla dowolnego k .

$$P_B^{i,j} = 1 - \prod_{k=1}^N \sum_{x=0}^{\theta} f_c^{i,j}(x, k) \quad (12)$$

Aby zminimalizować prawdopodobieństwo tego zdarzenia należałoby wybrać sekwencje preambuły, dla których przebiegi funkcji wzajemnej korelacji aperiodycznej posiadają możliwe najmniejsze wartości.

Ostatecznie, prawdopodobieństwo wystąpienia błędu synchronizacji w przypadku nadawania i -tej sekwencji jest równe:

$$P_{serr}^i = P_A^i + \sum_{\substack{j=0, \dots, J-1 \\ j \neq i}} P_B^{i,j} \quad (13)$$

Warto zauważyć, iż drugi składnik sumy (13) odpowiada za zwiększenie prawdopodobieństwa błędu synchronizacji dla zwiększającej się ilości sekwencji w systemie i nie występuje dla systemu z jedną preambułą.

5. Dobór preambuły i poziomu progowego

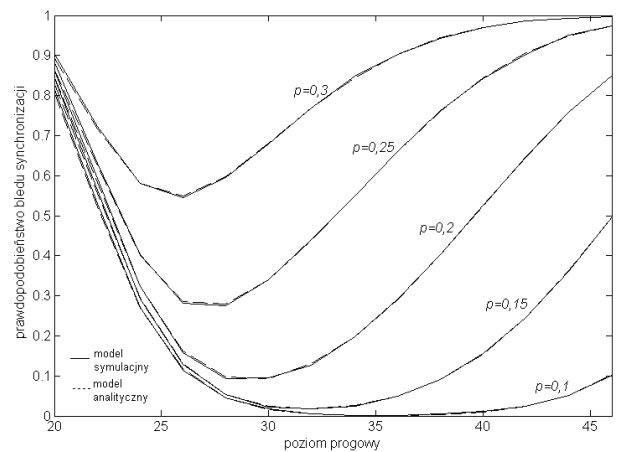
Wykorzystując przedstawiony model probabilistyczny zbadano prawdopodobieństwo błędu synchronizacji w systemie posługującym się $J=4$ preambułami, będącymi kodami z dwóch rodzin sekwencji binarnych, posiadających dobre własności autokorelacyjne: kodów Golda [4] oraz kodów o minimalnym poziomie listków bocznych (MPSL – ang. minimum peak side lobe) [6]. Przyjęto długość sekwencji $N=64$ symbole, co dla kodów Golda wymagało uzupełnienia o jeden symbol (kody te są zdefiniowane dla $N=2^m-1$). W ramach każdej z rodzin wybrano 4 sekwencje w ten sposób, że maksymalna wartość funkcji korelacji wzajemnej dowolnej kombinacji tych kodów była jak najmniejsza. Dla rodziny kodów Golda były to sekwencje (zapis heksadecymalny):

fc10c53d1c96ecd4, ecd4cd8af71a00ca
c83a1a932f2695ff, 70fcdcb7786878303

zaś dla rodziny kodów MPSL:

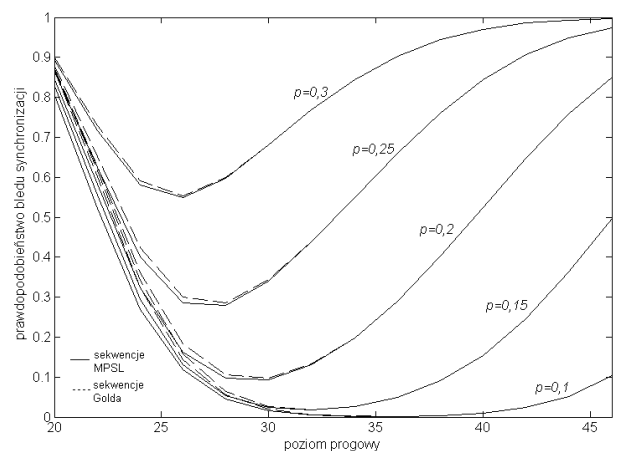
514d38913efc37a1, 42817f333cb2ae2d
7bc0e7aae44c134b, 463296aa03c7ec9f

Następnie, dla obu zestawów kodów przeprowadzono symulacje w programie Matlab, w których symulowano odbiór sygnału (2) algorytmem opisanym w pkt. 3. Jako parametr symulacji zmieniano wartość progową θ oraz bitową stopę błędów kanału, czyli prawdopodobieństwo p . Wyniki dla 20000 transmisji (po 5000 na każdą sekwencję preambuły) dla rodziny kodów MPSL przedstawiono na rys. 4. Naniesiono na nim również teoretyczne przewidywania wynikające z modelu opisanego w pkt.4. Pokrywają się one z symulacjami, co potwierdza słuszność przyjętego modelu probabilistycznego. Rys. 5 przedstawia natomiast porównanie stopy błędów synchronizacji dla sekwencji Golda i MPSL. Jak łatwo zauważyć wyniki są bardzo zbliżone, przy czym kody MPSL są minimalnie lepsze.



Rys. 4. Stopa błędów synchronizacji w funkcji poziomu progowego przy różnej bitowej stopie błędów (p) dla rodziny sekwencji MPSL

Fig. 4. Synchronization error rate as a function of threshold level at different bit error rates (p) for MPSL code family



Rys. 5. Stopa błędów synchronizacji w funkcji poziomu progowego przy różnej bitowej stopie błędów (p) dla rodzin sekwencji Golda i MPSL

Fig. 5. Synchronization error rate as a function of threshold level at different bit error rates (p) for two code families: Gold and MPSL

Minimum prawdopodobieństwa błędu synchronizacji zmienia się wraz z bitową stopę błędów. Aby wybrać optymalną wartość poziomu progowego θ należy więc oszacować tą stopę dla danego kanału komunikacyjnego, a w przypadku gdy jest ona zmienna

w czasie oszacować jej rozkład prawdopodobieństwa. Poziom progowy należy dobrać tak, aby dla wyznaczonego rozkładu zminimalizować prawdopodobieństwo błędu synchronizacji. Istnieje również możliwość adaptacyjnego doboru θ na podstawie estymowanej na bieżąco bitowej stopy błędów.

6. Podsumowanie

Zaprezentowany sposób wykorzystania preambuły pakietu pozwala wpleść w nią informację o szybkości bitowej. Jest to alternatywne podejście do stosowanego powszechnie umieszczania tej informacji w dodatkowym polu w nagłówku pakietu. Podejście to dobrze sprawdza się w przedstawionej architekturze toru odbiorczego, gdyż informacja o szybkości transmisji jest rzeczywiście przetwarzana przez warstwę fizyczną (układ radiowy i FPGA). Artykuł prezentuje model analityczny umożliwiający oszacowanie kosztu rozróżniania dodatkowych preambuł, samego ich doboru oraz doboru parametrów algorytmu detekcji i synchronizacji. Przedstawiona metoda w powiązaniu ze znanymi algorytmami doboru szybkości bitowej może znaleźć zastosowanie m.in. w niskomocowych sieciach sensorowych.

7. Literatura

- [1] Krzak Ł., Rzepka D.: Niskomocowa metoda przetwarzania danych w paśmie podstawowym dla bezprzewodowych sieci sensorowych z wykorzystaniem układów FPGA, *Elektronika*, 2008, vol. 49, nr 6, s. 45-47.
- [2] Papoulis A.: *Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne*, WNT, Warszawa 1972.
- [3] Lin W.C., Liu K.C., Wang C.K.: Differential matched filter architecture for spread spectrum communication systems, *Electronics Letters*, vol. 32, no.17, pp.1539-1540, 15 Aug 1996.
- [4] Fanucci L., Giannetti F., Luise M., Rovini M.: *An Experimental Approach to CDMA and Interference Mitigation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2004.
- [5] Ashraf M., Jayasuriya A.: Improved Opportunistic Auto Rate Protocols for Wireless Networks, *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Sept. 2008.
- [6] Levanon N. and Mozeson E.: *Radar signals*, J. Wiley, 2004.

otrzymano / received: 13.05.2011

przyjęto do druku / accepted: 04.07.2011

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