

**Janusz TOKARSKI, Ryszard BOGACZ, Beata KRUPANEK**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI,  
Akademicka 10, 44-100 Gliwice

## Wpływ odległości pomiędzy urządzeniami w sieci ZigBee na parametry transmisyjne na dystansie do 100 metrów w otwartej przestrzeni

**Dr inż. Janusz TOKARSKI**

Współautor jest adiunktem w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego. Prace naukowe, badawcze i projektowe prowadzi w zakresie mikroprocesorowych przyrządów pomiarowych, głównie mikromanometrów, termooanometrów, higrometrów, termometrów i przepływomierzy elektromagnetycznych oraz w zakresie rozproszonych systemów pomiarowych. Działalność dydaktyczna obejmuje przedmioty z obszaru techniki cyfrowej i mikroprocesorowej.

e-mail: janusz.tokarski@polsl.pl



**Mgr inż. Beata KRUPANEK**

Autorka jest doktorantką Instytutu Metrologii Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego. Zajmuje się zagadnieniami z zakresu sieci komputerowych a zwłaszcza sieci i systemów bezprzewodowych. Prowadzi badania związane z opóźnieniami komunikacyjnymi spowodowanymi różnymi zaburzeniami. Działalność dydaktyczna obejmuje zajęcia z techniki cyfrowej, sieci komputerowych i programowania mikrokontrolerów.

e-mail: beata.krupanek@polsl.pl



**Mgr inż. Ryszard BOGACZ**

Współautor jest wykładowcą w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z techniką cyfrową i mikroprocesorową oraz programowaniem układów mikroprocesorowych. Obszar zainteresowań obejmuje także systemy bezprzewodowej transmisji danych oraz zdalnego odczytu liczników energii elektrycznej.

e-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl



**Keywords:** wireless networks, ZigBee, quality of transmission, delays, delay model.

### 1. Wprowadzenie

Bezprzewodowe rozproszone systemy pomiarowo-sterujące są obecnie coraz częściej stosowane w wielu gałęziach przemysłu i nauki. Dostępnych jest wiele standardów transmisji bezprzewodowej, jednak najbardziej przyszłościowym rozwiązaniem, w obszarze systemów kontrolno - pomiarowych, wydaje się być transmisja oparta na standardzie ZigBee. Standard i specyfikacja ZigBee opisują model komunikacji zorganizowanej warstwowo oraz zasady tworzenia programów użytkownika, które mają ułatwić budowanie bezprzewodowych sieci małego zasięgu. Urządzenia wykorzystujące standard IEEE 802.15.4 charakteryzują się łatwym nawiązywaniem połączenia z istniejącą siecią, niskim zużyciem energii oraz dużą odpornością na zakłócenia spowodowane wpływem urządzeń działających w innych systemach bezprzewodowych [3].

Ze względu na znaczenie danych przesyłanych drogą radiową ważnym parametrem sieci staje się liczba prawidłowo przyjętych przez odbiornik pakietów, przypadająca na całkowitą liczbę pakietów wysłanych przez nadajnik. Parametr ten pozwala określić ilość zagubionych pakietów. Kolejnym istotnym parametrem jest efektywny czas transmisji pomiędzy modułami bezprzewodowymi, definiowany jako czas pomiędzy wysłaniem pakietu danych do nadajnika (np. z komputera), a czasem ich odebrania przez odbiornik. Czas ten powinien uwzględniać pojawiające się retransmisje danych w przypadku ich zagubienia. To zagubienie może być spowodowane wieloma czynnikami środowiskowymi np. ścianami budynków, innymi sieciami bezprzewodowymi lub nadmierną odległością między urządzeniami [3].

Opracowany system pozwala na badania wpływu różnych przeszkód na transmisję, a w szczególności wpływu tłumienia wolnej przestrzeni. Układ pomiarowy składa się z mikrokontrolera, który kontrolując nadawanie i odbiór danych umożliwia pomiar czasu pomiędzy wysłaniem pakietu danych do jednego modułu, a ich odbiorem przez drugi moduł. Wynik pomiaru jest zapisywany w czasie rzeczywistym. Zbudowany układ jest prosty w obsłudze, przenośny i łatwo montowalny.

### 2. Model opóźnień komunikacyjnych

Wśród parametrów opisujących właściwości sieci bezprzewodowych, najbardziej istotne są te parametry, które charakteryzują ich właściwości czasowe. Opóźnieniem komunikacyjnym jest nazywany czas pomiędzy momentem zainicjowania transmisji w węźle nadawczym sieci a momentem, kiedy informacja zostanie odebrana w węźle, dla którego jest przeznaczona [2].

#### Streszczenie

Publikacja przedstawia opracowany system mikroprocesorowy, służący do pomiaru zależności efektywnego czasu transmisji od odległości pomiędzy urządzeniami w sieci ZigBee, wyniki uzyskanych pomiarów oraz nowatorski sposób opisu opóźnień komunikacyjnych w sieci bezprzewodowej za pomocą modelu probabilistycznego. Opracowany system pozwala również na badanie innych parametrów transmisyjnych. Jego głównym zadaniem jest pomiar czasu pomiędzy wysłaniem pakietu danych, a informacją z modułu odbiorczego potwierdzającą odbiór.

**Słowa kluczowe:** sieci bezprzewodowe, ZigBee, jakość sieci, opóźnienia komunikacyjne, model opóźnień.

### Effect of distance between devices in ZigBee network on transmission parameters

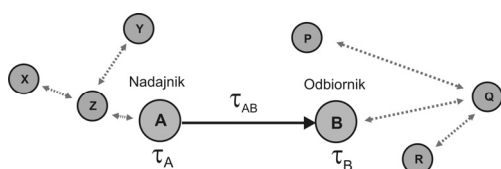
#### Abstract

This paper presents a microprocessor system for measuring the influence of a distance between ZigBee network devices on the effective transmission time. The system was developed by the authors. The measurement results obtained are given. A new way of communication delays in a wireless network is described. The developed system allows studying the effects of various obstacles in the transmission, in particular the impact of suppression of free space. The measuring system consists of a microcontroller to supervise the broadcasting and receiving data. Its main task is to measure the time between sending a data packet and receiving information from the module confirming receipt. The measurement result is stored in a file in real time. The system is easy to use. The XBee ZigBee and XBee-Pro modules by Digi International were used for taking measurements. They provide live coverage of two or more elements of the final network, allowing for the construction of wide area networks based on star and mesh configuration. A new probabilistic model was used to describe the delay. It allows you also to save the delay as well as the relative number of packets received during each transmission and retransmission of the data. The model is simple to implement in simulation programs. The data obtained from measurements show that increase in the distance between the modules has an impact on the number of retransmission and lost data packets. This enables designating certain guidelines to aid the design of a wireless network.

Na opóźnienie ma wpływ wiele czynników fizycznych, które można nazwać zaburzeniami. Zaburzenia powodują głównie spadek mocy sygnału radiowego lub też przekłamania w przesyłanych danych. Opóźnienia można opisać zarówno w sposób deterministyczny, jak i probabilistyczny. Przy użyciu zależności deterministycznych są wyznaczane maksymalne opóźnienia w sieciach komputerowych, podczas gdy środki probabilistyczne są wykorzystywane do uzyskiwania rozkładów opóźnień powstających na skutek czynników opisywanych losowo.

Na rysunku 1 pokazano dwa wybrane węzły w sieci pełniące rolę nadajnika i odbiornika oraz źródła opóźnień w sieci. Opóźnienie  $\tau_A$  jest związane z czasem dostępu do medium transmisyjnego, natomiast  $\tau_{AB}$  oznacza czas transmisji komunikatu, zatem  $\tau_B$  jest wypadkowym czasem i jest nazywane opóźnieniem transmisji, co można zapisać jako:

$$\tau_B = \tau_A + \tau_{AB}. \quad (1)$$



Rys. 1. Ilustracja opóźnienia pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem w sieci bezprzewodowej

Fig. 1. Delay between the transmitter and receiver in a wireless network

Do probabilistycznego opisu składników najdogodniej jest użyć funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Biorąc pod uwagę, że opóźnienie nie może przyjmować wartości ujemnych, funkcję gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia  $\tau_A$  dostępu węzła A do medium transmisyjnego można opisać funkcją ciągłą i ograniczoną  $g_A(\tau_A)$ , gdzie  $\tau_A \geq 0$ . Funkcja spełnia warunek normalizujący co pokazano w pracy [2].

Zakładając, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa  $g_{AB}(\tau_{AB})$ , opisująca rozkład opóźnień spowodowanych transmisją przez medium, jest dana szeregiem o następującej postaci:

$$g_{AB}(\tau_{AB}) = a_0 \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_B) + a_1 \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_1) + \dots + a_k \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_k) \quad (2)$$

gdzie  $\delta$  jest symbolem funkcji delta Dirac'a.

Można wykazać [2], że funkcję gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia całkowitego opisuje splot funkcji zależnych od opóźnień  $\tau_{AB}$  i  $\tau_A$ :

$$g_B(\tau_B) = g_A(\tau_A) \otimes g_{AB}(\tau_{AB}). \quad (3)$$

przy czym można pokazać, że dla składnika o numerze  $i$  zachodzi:

$$g_{B_i}(\tau_B) = g_A(\tau_A) \otimes \delta(\tau_B - \tau_i) = g_A(\tau_B - \tau_i). \quad (4)$$

Uwzględniając, zatem zależności (2) i (4) można zapisać [1]:

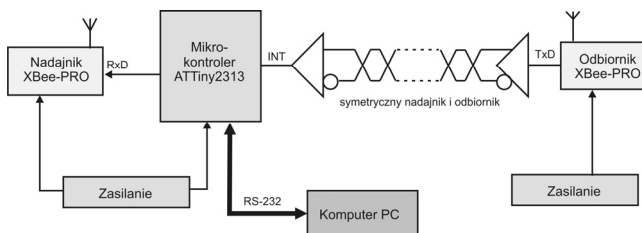
$$g_B(\tau_B) = a_0 g_A(\tau_B - \tau_0) + a_1 g_A(\tau_B - \tau_1) + \dots + a_k g_A(\tau_B - \tau_k). \quad (5)$$

Z zależności (5) wynika, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia całkowitego jest sumą iloczynów, z których każdy składa się z dwóch czynników. Jednym jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia powstającego w węzle A podczas uzyskiwania dostępu do medium, przesunięta o wartość  $\tau_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ , drugim współczynnik wagowy  $a_i$ , określający udział danego iloczynu w rozkładzie wypadkowym [2].

### 3. Układy pomiarowe

Istnieje wiele rozwiązań sprzętowych modułów ZigBee różnych producentów o zdecydowanie różnych parametrach. Spośród dostępnych urządzeń wybrano moduły XBee-PRO ze zintegrowaną anteną oraz moduły firmy Atmel ATZB-A24-UFL z gniazdem UFL i dołączaną anteną. Układy te umożliwiają budowę stosunkowo tanich sieci bezprzewodowych o niewielkim poborze mocy. Każdy moduł zapewnia efektywną wymianę danych w sieci przy zużyciu minimum energii, która wydatkowana jest jedynie w czasie nadawania i odbierania komunikatów. Oba typy modułów pracują z częstotliwością 2,4 GHz, mają porty do transmisji danych łączem szeregowym (UART), wejścia analogowe i wejścia/wyjścia cyfrowe [5, 6].

W celu przeprowadzenia badań zbudowano dwa układy pomiarowe. Jeden z wykorzystaniem modułów Xbee, a drugi z wykorzystaniem modułów ATZB-A24-UFL. Ogólna koncepcja budowy systemu pomiarowego [1, 4] opierała się na użyciu dwóch modułów przesyłających dane pomiędzy sobą, co określony odcinek czasu. Pomiar opóźnienia wykonywany był przy wykorzystaniu przewodowego sprzężenia zwrotnego pomiędzy rozdzielonymi częściami układu pomiarowego, co pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Układ pomiarowy  
Fig. 2. The measuring system

W badaniach wykorzystano transmisję pojedynczych bajtów. Od momentu wystawienia bitu startu na wejście RxD nadawczego modułu XBee-PRO, mikrokontroler rozpoczyna pomiar czasu, uruchamiając wewnętrzny zegar. Otrzymane dane moduł nadawczy wysyła poprzez łącze radiowe. Drugi z modułów, znajdujący się w tej samej sieci i pracujący na tym samym kanale radiowym, odbiera te dane drogą radiową i wystawia je na wyjściu portu szeregowego TxD. Pojawienie się bitu startu danych na tej linii, która połączona jest do wejścia przerwania INT mikrokontrolera powoduje zgłoszenie przerwania i zatrzymanie zegara. Czas pomiędzy wysłaniem danych, a przyjęciem przerwania rejestrowany jest jako bezprzewodowe opóźnienie komunikacyjne. Dokładność pomiaru czasu w użytych mikrokontrolerze wynosi 2  $\mu$ s. Zmierzona wartość czasu przesyłana jest z mikrokontrolera do komputera. Dane przychodzące z układu pomiarowego do PC są rejestrowane i zapisywane do pliku tekstowego. Kolejny bajt danych wysyłany jest do modułu nadawczego po upływie 100 ms od wysłania pierwszego bajtu danych. Wartość ta jest stała i na tyle duża, aby nie zakłócać transmisji poprzedniego bajtu, a także możliwych powtórzeń (retransmisji) danych [4].

### 4. Badania transmisji radiowej

W trakcie realizacji badań postanowiono przeanalizować wpływ odległości między modułami na opóźnienia w transmisji danych. Badania przeprowadzono w wolnej przestrzeni na terenie o powierzchni około 1 km<sup>2</sup> pozbawionym zabudowań i lokalnych sieci bezprzewodowych [4].

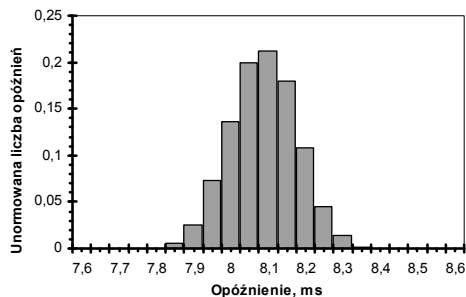
Celem wykonanych pomiarów było zbadanie podstawowych parametrów transmisji bezprzewodowej, a w szczególności:

- liczby prawidłowo odebranych danych w stosunku do całkowitej liczby wysłanych bajtów,

- opóźnienia komunikacyjnego rozumianego, jako czas pomiędzy wysłaniem bajtu przez mikroprocesor, a jego odebraniem przez drugi moduł,
- wskaźnika mocy odbieranego sygnału radiowego,
- liczby retransmitowanych bajtów do całkowitej liczby bajtów wysłanych.

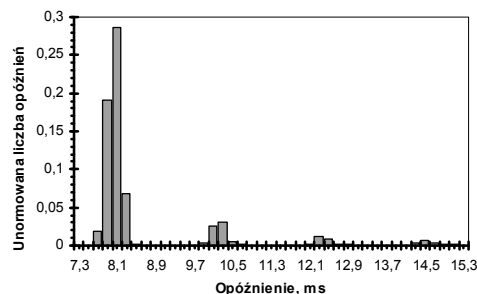
Pomiary wykonano przy użyciu dwóch różnych zestawów modułów bezprzewodowych. Jednym z nich były wspomniane moduły XBee-PRO, a drugim moduły firmy Atmel ATZB-A24-UFL.

W trakcie pomiarów zwiększano odległość między wybranymi modułami. Dla każdej odległości zarejestrowano około 20 tysięcy wyników pomiaru. Pomiary wykonano dla 1 m, 20 m, 40 m, 60 m, 80 m i 100 m. Zarejestrowane wyniki zebrano w tabeli 1. Przez termin transmisja bezpośrednia rozumie się pierwszą próbę transmisji z modułu pierwszego do drugiego, nie będącą retransmisją danych. Dla odległości 1 m nie odnotowano ani prób retransmisji danych ani utraconych pakietów. Uzyskany rozkład opóźnienia pokazany na rysunku 4 można w takim przypadku nazwać szablonem.



Rys. 4. Rozkład opóźnienia dla odległości 1 m (szablon) dla XBee-PRO  
Fig. 4. The delay distribution for the distance of 1 m (template) for XBee-PRO

Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy modułami zaobserwowano wzrost liczby danych retransmitowanych i utraconych. Wzrost liczby utraconych danych występuje już przy odległości ok. 40 m, a przy odległości 100 m już większość pakietów jest tracona. Na rysunku 5 przedstawiono unormowaną liczbę opóźnień przy transmisji na odległość 80 m. W tym przypadku ponad 56% danych jest transmitowanych przy pierwszej próbie, a pozostałe dane są retransmitowane lub tracone. Przy tej odległości prawie 33% danych nie dociera z nadajnika do odbiornika. Poszczególne retransmisje występują, zgodnie z danymi producenta, co ok. 2 ms.



Rys. 5. Rozkład opóźnienia dla odległości 80 m dla modułów XBee-PRO  
Fig. 5. The delay distribution for the distance of 80 m for XBee-PRO

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów ilości odebranych pakietów przy różnych odległościach. Wyraźny wzrost traconych pakietów następuje już przy odległości 60 m, a powyżej około 90 m większość pakietów zostaje utracona. Uzyskane wyniki są podobne jak te przedstawione w publikacji [4] pomimo innej metody pomiarowej, ze względu na dokonywaną wcześniej korekcję programową w celu uzyskania „opóźnienia w jedną stronę”.

Tab. 1. Wyniki pomiarów dla modułów XBee-PRO  
Tab. 1. The results for XBee-PRO

Odległość:	Ilość pakietów odebranych w %				
	20 m	40 m	60 m	80 m	100 m
Transmisja bezpośrednia (8,1 ms)	99,8	93,6	74,7	56,4	18,4
Pierwsza retransmisja (10,2 ms)	0,2	4,3	5,2	6,7	6,6
Druga retransmisja (12,4 ms)	0	0,6	1,7	2,5	4,1
Trzecia retransmisja (14,6 ms)	0	0,3	0,9	1,5	2,9
Pakiety utracone	0	1,2	17,5	32,9	68,0

Na podstawie uzyskanych pomiarów można zapisać, że funkcja rozkładu prawdopodobieństwa opóźnienia w węzle drugim, dla każdej odległości, jest dana następującymi zależnościami uzyskanymi na podstawie tabeli 1:

- dla 1 metra:

$$g_B(\tau_B) = 1 \cdot g_A(\tau_B - 8,1) \quad (6)$$

- dla 20 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,998 \cdot g_A(\tau_B - 8,1) + 0,002 \cdot g_A(\tau_B - 10,2) \quad (7)$$

- dla 40 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,936 \cdot g_A(\tau_B - 8,1) + 0,043 \cdot g_A(\tau_B - 10,2) + 0,006 \cdot g_A(\tau_B - 12,4) + 0,003 \cdot g_A(\tau_B - 14,6) \quad (8)$$

- dla 60 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,747 \cdot g_A(\tau_B - 8,1) + 0,052 \cdot g_A(\tau_B - 10,2) + 0,017 \cdot g_A(\tau_B - 12,4) + 0,009 \cdot g_A(\tau_B - 14,6) \quad (9)$$

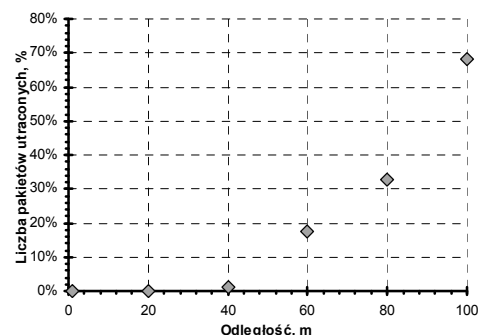
- dla 80 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,564 \cdot g_A(\tau_B - 8,1) + 0,067 \cdot g_A(\tau_B - 10,2) + 0,025 \cdot g_A(\tau_B - 12,4) + 0,015 \cdot g_A(\tau_B - 14,6) \quad (10)$$

- dla 100 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,184 \cdot g_A(\tau_B - 8,1) + 0,066 \cdot g_A(\tau_B - 10,2) + 0,041 \cdot g_A(\tau_B - 12,4) + 0,029 \cdot g_A(\tau_B - 14,6) \quad (11)$$

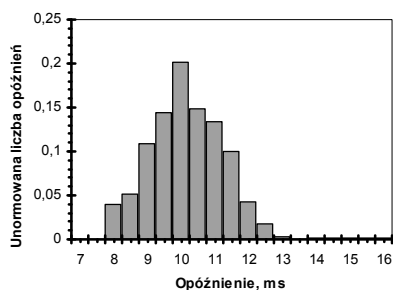
We wzorach (6-11) poszczególne współczynniki wagowe odpowiadają względnej liczbie pakietów przesłanych w czasie kolejnych prób transmisji, natomiast czas po których następuje retransmisja otrzymywany jest w czasie pomiarów jako wartość średnia.



Rys. 6. Zależność liczby utraconych danych od odległości dla XBee  
Fig. 6. Relationship between the number of lost data and the distance for XBee

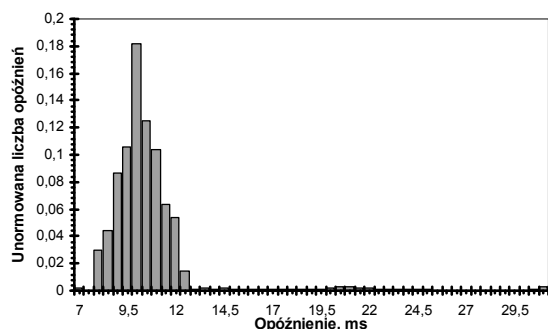
Na rysunku 6 przedstawiono wykres liczby utraconych pakietów w funkcji odległości. Widać z niego, że praktycznie użyteczny zakres odległości, przy których można używać moduły XBee-PRO, nie może przekraczać 90 m.

Pomiary wykonano także dla modułów ATZB-A24-UFL, co pokazano w tabeli 2. Dla wspomnianych modułów również nie odnotowano strat pakietów w wolnej przestrzeni, gdy są one rozsunięte na odległość 1 m.



Rys. 7. Rozkład opóźnienia dla odległości 1 m (szablon) dla ATZB-A24-UFL  
Fig. 7. The delay distribution for the distance of 1 m for ATZB-A24-UFL

W przypadku modułów ATZB-A24-UFL zauważono występowanie retransmisji przy wzroście odległości między modułami. Istotny wzrost liczby danych transmitowanych w trakcie powtórzeń zaobserwowano dopiero przy odległości 100 m. W porównaniu do modułów XBee-PRO liczba retransmitowanych danych przy tych samych odległościach jest dużo mniejsza. Dla modułów ATZB-A24-UFL uzyskane dane zestawiono w tabeli 2.



Rys. 8. Rozkład opóźnienia dla odległości 100 m dla ATZB-A24-UFL  
Fig. 8. The delay distribution for the distance of 100 m for ATZB-A24-UFL

Ze względu na retransmisję pojedynczych bajtów staje się mało istotne wyznaczenie współczynników dla modelu. Współczynniki te można wyznaczyć dopiero dla odległości powyżej 100 m ze względu na bardzo dobry zasięg testowanych modułów. Zmierzone jednak względną liczbę utraconych danych rejestrując momenty gdy moduł tracił zasięg co mogło mieć związek z dodatkowymi zaburzeniami występującymi w krótkim czasie.

Tab. 2. Wyniki pomiarów dla modułów ATZB-A24-UFL  
Tab. 2. The results for ATZB-A24-UFL

Odległość:	Ilość pakietów odebranych w %				
	20 m	40 m	60 m	80 m	100 m
Transmisja bezpośrednia (10,5 ms)	98,8	98,7	98,4	96,1	86,3
Pierwsza retransmisja (19 ms)	0,6	0,6	0,7	1,6	4,2
Druga retransmisja (21 ms)	0,3	0,4	0,5	1,0	2,6
Trzecia retransmisja (23 ms)	0,1	0,1	0,1	0,4	1,8
Pakiety utracone	0,2	0,2	0,3	0,9	5,1

Na podstawie uzyskanych pomiarów można zapisać, że funkcja rozkładu prawdopodobieństwa opóźnienia, dla modułów ATZB-A24-UFL dla każdej odległości, jest dana następującymi zależnościami uzyskanymi na podstawie tabeli 1:

- dla 1 metra:

$$g_B(\tau_B) = 1 \cdot g_A(\tau_B - 10,5) \quad (12)$$

- dla 20 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,988 \cdot g_A(\tau_B - 10,5) + 0,006 \cdot g_A(\tau_B - 19) + 0,003 \cdot g_A(\tau_B - 21) + 0,001 \cdot g_A(\tau_B - 23) \quad (13)$$

- dla 40 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,987 \cdot g_A(\tau_B - 10,5) + 0,006 \cdot g_A(\tau_B - 19) + 0,004 \cdot g_A(\tau_B - 21) + 0,001 \cdot g_A(\tau_B - 23) \quad (14)$$

- dla 60 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,984 \cdot g_A(\tau_B - 10,5) + 0,007 \cdot g_A(\tau_B - 19) + 0,005 \cdot g_A(\tau_B - 21) + 0,001 \cdot g_A(\tau_B - 23) \quad (15)$$

- dla 80 metrów:

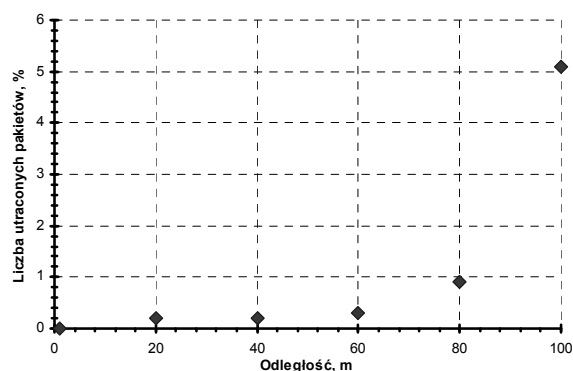
$$g_B(\tau_B) = 0,961 \cdot g_A(\tau_B - 10,5) + 0,016 \cdot g_A(\tau_B - 19) + 0,010 \cdot g_A(\tau_B - 21) + 0,004 \cdot g_A(\tau_B - 23) \quad (16)$$

- dla 100 metrów:

$$g_B(\tau_B) = 0,863 \cdot g_A(\tau_B - 10,5) + 0,042 \cdot g_A(\tau_B - 19) + 0,026 \cdot g_A(\tau_B - 21) + 0,018 \cdot g_A(\tau_B - 23) \quad (17)$$

Wykreślając zależność względnej liczby utraconych pakietów od odległości można uzyskać wykres przedstawiony na rysunku 9.

Jednym z ważniejszych aspektów przy budowie sieci bezprzewodowej jest określenie pewnych granicznych parametrów jakie ma spełniać transmisja danych, np. czy dopuszcza się straty pakietów czy też nie, jakie maksymalne opóźnienie może wystąpić w sieci itp. Wtedy, gdy znane są takie parametry, należy tak dobrać odległość pomiędzy modułami radiowymi, aby nie przekroczyć zadanych parametrów (często konieczne jest ustawienie ruterów lub kilku ruterów).



Rys. 9. Zależność liczby utraconych danych od odległości dla ATZB-A24-UFL  
Fig. 9. The number of the lost data vs. the distance for ATZB-A24-UFL

Natomiast gdy nie są one znane zachodzi problem jak wyznaczyć granicą liczbę utraconych pakietów, powyżej której konieczne jest umieszczenie ruterów. W tym celu można wykorzystać wykres przedstawiony na rysunku 6 lub 9. Aproxymując otrzymane punkty wielomianem można wyznaczyć punkt przegięcia funkcji aproxymującej. Wyznaczając maksimum funkcji pochodnej możliwe jest określenie krytycznej odległości między modu-

łami ZigBee powyżej, której transmisja danych bez punktu wzmacniającego (routera) jest nieprzydatna. Dla modułów XBee-PRO wyznaczono punkt przęgięcia dla odległości 90 m. W przypadku modułów ATZB-A24-UFL należałoby uzupełnić pomiary dla odległości większych niż 100 m. W praktyce takie odległości są rzadko wykorzystywane (najczęściej używa się ZigBee wewnątrz budynków i hal produkcyjnych).

## 5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań widać, że już niewielka odległość pomiędzy modułami ZigBee może być przyczyną utraty danych. Retransmisje pojawiają się powyżej 20m. Porównując dwa typy badanych modułów można zauważyć, że duży wpływ na jakość transmisji ma moc nadajnika i czułość anteny. W przypadku modułów XBee-PRO utrata danych następowała już przy 40 m, a praktycznie powyżej 90 m transmisja jest nieskuteczna. W przypadku modułów ATZB-A24-UFL utraty pakietów nie zaobserwowano nawet przy odległości 100 m w terenie otwartym. Widoczne jednak były niewielkie retransmisje już od odległości 20 m. Zastosowana metoda opisu opóźnień pozwala na wyraźne zobrazowanie występujących retransmisji w zależności od odległości oraz oceny utraconych pakietów danych. Zastosowany

model pozwala opisywać sieci bezprzewodowe ZigBee i umożliwia oszacowanie jakości transmisji danych w zależności od odległości pomiędzy modułami.

## 6. Literatura

- [1] Tokarski J., Bogacz R., KrupaneK B.: Mikroprocesorowy system do pomiaru parametrów transmisji sieci bezprzewodowych zbudowanych w oparciu o moduły Xbee. Metrologia dziś i jutro, Białystok, 2011.
- [2] Jakubiec J., KrupaneK B., Grygiel M.: Probabilistyczne modelowanie opóźnień komunikacyjnych w sieciach komputerowych. ZN Elektryka, nr 216, Gliwice, 2011.
- [3] Farahani S., ZigBee Wireless Network and Transceivers, Elsevier Ltd., Oxford 2008.
- [4] Tokarski J., Bogacz R., KrupaneK B.: Badania wpływu odległości pomiędzy urządzeniami w sieci ZigBee na efektywny czas transmisji. Materiały konferencji PPM 2012 w Krynicy Zdroju, s.220-223.
- [5] Nota katalogowa układów XBee-PRO, www.digi.com.
- [6] Nota katalogowa układów ATZB-A24-UFL, www.atmel.com.

otrzymano / received: 05.06.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2012

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

# Regionalne Seminare / Szkolenia dla Służb Utrzymania Ruchu

[www.energoelektronika.pl](http://www.energoelektronika.pl)  
WORTAL BRANŻOWY

**03.10.2012 – Szczecin**  
**24.10.2012 – Katowice**  
**05.12.2012 – Poznań**







Jeżeli jesteś zainteresowany uczestnictwem w Seminarium, zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania napisz do nas: [marketing@energoelektronika.pl](mailto:marketing@energoelektronika.pl)  
Energoelektronika.pl tel. (+48) 22 70 35 291

Ilość miejsc ograniczona

Partnerzy:













