

**Jakub OLSZYNA, Wiesław WINIECKI**  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT RADIOELEKTRONIKI

## Bezprzewodowy rozproszony system pomiarowy z wykorzystaniem technologii ZigBee

Mgr inż. Jakub OLSZYNA

Doktorant na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych PW. Aktualne obszary zainteresowań: rozproszone systemy pomiarowo-sterujące, systemy multimedialne, architektura oprogramowania aplikacji internetowych.



e-mail: J.Olszyna@ire.pw.edu.pl

Prof. nzw. dr hab. inż. Wiesław WINIECKI

Prof. nzw. na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych PW. Kierownik zespołu Komputerowej Techniki Pomiarowej. Autor lub współautor 4 książek i ponad 150 publikacji naukowych. Obszary zainteresowań: systemy pomiarowe, przyrządy wirtualne, nowoczesne technologie komunikacyjne i programowe w skupionych i rozproszonych systemach pomiarowo-kontrolnych. Prezes POLSPAR, członek Komitetu Metrologii PAN, członek IEEE.



e-mail: W.Winiecki@ire.pw.edu.pl

### Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań weryfikujących przydatność technologii ZigBee (IEEE 802.15.4) w rozproszonych systemach pomiarowo-kontrolnych oraz wyniki badań warunków koegzystencji różnych technologii transmisji bezprzewodowej wykorzystujących pasmo ISM 2,4 GHz. Przedstawiono najważniejsze założenia technologii ZigBee. Dalej opisano środowisko pomiarowe i zestawiono najważniejsze uzyskane wyniki. Badania wykazały poprawność pracy ZigBee w rozproszonym systemie pomiarowym - jedynym problemem mogą być zakłócenia pochodzące od innych technologii wykorzystujących pasmo ISM 2,4 GHz.

**Słowa kluczowe:** bezprzewodowe rozproszone systemy pomiarowo-sterujące, ZigBee, pasmo ISM 2,4 GHz, koegzystencja.

### Wireless distributed measurement system utilizing ZigBee technology

#### Abstract

The aim of this study was experimental verification of the practical application of ZigBee technology (IEEE 802.15.4) in distributed measurement systems. The assumption was to analyze the coexistence issues among different wireless technologies working in the ISM 2,4 GHz band. This paper presents a brief technical description of the ZigBee technology along with the description of the test environment. Experimental results prove the ability of ZigBee to work in a distributed measurement system - the main problem is the co-existence issue. The impact of Bluetooth (Fig.7) and WLAN (Fig.5, 6) on ZigBee results in frame loss (increase of PER factor), which should be taken into account during the early phases of distributed systems' development.

**Keywords:** wireless distributed measurement systems, ZigBee, co-existence.

## 1. Wstęp

Obecna metrologia umożliwia pomiar dowolnej wielkości fizycznej, w szczególności dokonywany na odległość. Powszechne zastosowanie zyskały rozproszone systemy pomiarowo-sterujące [1], których elementy mogą być fizycznie rozdzielone i zachowywać autonomię w podejmowaniu decyzji. Umożliwia to podział zadań pomiędzy poszczególne elementy systemu, co optymalizuje wydajność jego pracy oraz dostęp do zasobów. Istotnym parametrem systemu jest technologia wykorzystywana do wymiany informacji pomiędzy jego elementami. Olbrzymi postęp w dziedzinie telekomunikacji sprawia, że standardowe technologie przewodowe są wypierane przez nowoczesne technologie komunikacji bezprzewodowej reprezentowane przez telefonię komórkową GSM i UMTS, jak i bezprzewodowe technologie sieci o zasięgu lokalnym (WLAN) czy osobistym (Bluetooth, ZigBee).

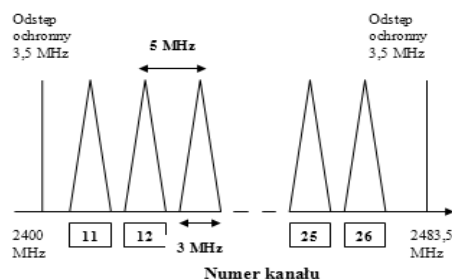
W dziedzinie transmisji bezprzewodowej coraz popularniejsze stają się technologie wykorzystujące nielicencjonowane pasmo ISM 2,4 GHz, jak np. wymienione powyżej: IEEE 802.11

(WLAN), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) czy IEEE 802.15.4 (ZigBee). Jedną z korzyści ich wykorzystania jest globalna implementacja, to samo pasmo jest dostępne na całym świecie. Współdzielenie zasobów radiowych z innymi systemami jest co prawda ułatwione chociażby przez stosowanie technik rozpraszania widma, lecz stwarza ryzyko powstawania błędów transmisji, co może być krytyczne dla danego zastosowania.

Technologia ZigBee uchodzi za wciąż nową. Wobec niedostatecznej ilości dostępnych prac ciekawym zagadnieniem wydaje się zbadanie możliwości zastosowania tej technologii na gruncie rozproszonych systemów pomiarowo-sterujących, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnienia koegzystencji w paśmie ISM 2,4 GHz w kontekście jakości pracy systemu.

## 2. Wprowadzenie do ZigBee

Standard IEEE 802.15.4 (warstwa fizyczna i MAC) i uzupełniająca go specyfikacja ZigBee [2] (rozwijana przez stowarzyszenie największych firm z branży elektronicznej, definiuje warstwy sieci oraz aplikacji, w tym bezpieczeństwa transmisji) stanowią odpowiedź na wymagania stawiane przez bezprzewodowe systemy rozproszone, w szczególności projektowane do zastosowań na gruncie czujników pomiarowych i kontrolerów. Standard zakłada niski koszt wytworzenia urządzeń, niski poziom skomplikowania oraz bardzo niski pobór mocy dla urządzeń łączności bezprzewodowej w różnorodnych środowiskach pracy.

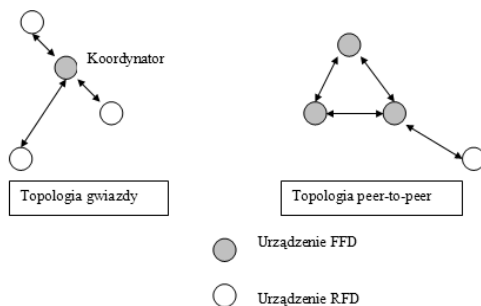


Rys. 1. Rozmieszczenie kanałów ZigBee w paśmie 2,4 GHz  
Fig. 1. ZigBee channels in 2,4 GHz band

Specyfikacja interfejsu radiowego ZigBee zakłada wykorzystanie jednego z kilku pasm częstotliwościowych, najpopularniejsze obejmuje 16 kanałów o szerokości 3 MHz w paśmie ISM 2,4 GHz (rys. 1). ZigBee wykorzystuje modulację O-QPSK z rozpraszaniem widma sekwencją bezpośrednią. Maksymalna przepływność transmisji wynosi 250 kb/s, co wystarcza do większości zadań pomiarowych, lecz nie pozwala chociażby na konkurencję na gruncie zastosowań multimedialnych. Mechanizm transmisji danych zależy od rodzaju sieci - możliwy jest swobodny dostęp do kanału przy pomocy CSMA/CA lub też stosowanie struktury

szczelinowej kontrolowanej przez urządzenie koordynujące. Niezawodność transmisji zapewniają mechanizmy gwarantowanych szczelin czasowych, potwierdzenia odbioru czy detekcji emisji w paśmie (w połączeniu ze zdolnością do wymuszania zmiany kanału w sieci przez koordynatora).

W standardzie ZigBee zdefiniowano dwa typy urządzeń: urządzenia o pełnej funkcjonalności (ang. *Full Function Device*) oraz urządzenia o ograniczonej funkcjonalności (ang. *Reduced Function Device*). Urządzenia typu RFD mogą pracować tylko w topologii gwiazdy gdzie komunikują się z koordynatorem, ale dzięki temu możliwa jest prosta implementacja i zmniejszenie zużycia energii. W oparciu o dwie podstawowe topologie sieci (rys. 2) możliwe jest zdefiniowanie dowolnych zależności połączeń. Przestrzeń adresowa obejmuje 64-bitowy adres urządzenia i 16-bitowy adres sieci.



Rys. 2. Podstawowe topologie sieci w standardzie ZigBee  
Fig. 2. Basic ZigBee network topologies

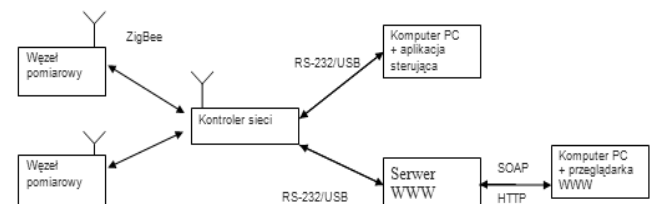
Jak już stwierdzono wcześniej, w przypadku wykorzystywania pasma ISM 2,4 GHz należy brać pod uwagę współdzielenie zasobów z innymi systemami łączności radiowej. Dwa lub więcej urządzeń bezprzewodowych **koegzystuje** jeżeli możliwe jest takie ich rozmieszczenie, że podczas ich jednoczesnej pracy wydajność żadnego z nich nie jest znacząco zmniejszona [3]. Należy wziąć przy tym pod uwagę, że każde z urządzeń może należeć do innego systemu i pracować w oparciu o inne reguły.

Badania wzajemnego wpływu różnych systemów w paśmie ISM 2,4 GHz stały się przedmiotem prac wydzielonej grupy organizacji IEEE [4]. Zaproponowano teoretyczne ulepszenia, poprawiające warunki koegzystencji. Podobne badania były publikowane wielokrotnie – szczególnie te dotyczące wzajemnego wpływu Bluetooth i WLAN. W powyższym kontekście ciekawe wydaje się porównanie Bluetooth i ZigBee – technologii konkurujących w obszarze rozproszonych systemów pomiarowych. Wpływ ZigBee na WLAN jest bowiem znacząco mniejszy, niż analogiczny wpływ Bluetooth [5]. Jednocześnie wszystkie prace dowodzą, że wpływ innych technologii na ZigBee nie może być pominięty i szczególnie objawia się w przypadku sieci WLAN [6].

### 3. Środowisko pomiarowe

Jako przykład zastosowania technologii ZigBee w rozproszonych systemach pomiarowo-sterujących oraz jako środowisko do prowadzenia dalszych badań zrealizowano bezprzewodowy rozproszony system do pomiaru parametrów klimatycznych pomieszczenia tj. temperatury/wilgotności powietrza (rys. 3). Pomiar parametrów pracy systemu, a także możliwość udostępnienia go w postaci usługi WWW zostały zaimplementowane w aplikacji sterującej na platformie .NET. Transmisja ZigBee w systemie została zrealizowana przy pomocy modułów XBee firmy MaxStream [7]. Zakłócenia pochodzące od Bluetooth były modelowane przy pomocy zestawu słuchawka-telefon, a także laptop-PDA. Zakłócenia pochodzące od WLAN tworzono generując stały ruch w sieci, przy wykorzystaniu routera 802.11 g i laptopa z odpowiednią kartą interfejsu WLAN.

Badania systemu przebiegały na dwóch płaszczyznach: praca systemu jako całości (warunki neutralne) oraz praca bezprzewodowej części systemu (warunki neutralne, obecność zakłóceń). Podczas wszystkich prezentowanych badań transmisja odbywała się w łączu typu punkt-punkt pomiędzy dwoma modułami, na częstotliwości 2435 MHz (kanał 17) ze stałą przepływnością 57 600 kb/s. Moduł odbiornika dzięki dołączonemu adapterowi sprzęgającemu do portu szeregowego odsyłał z powrotem wszystkie otrzymane dane (w niezmienionej formie). Podejście takie umożliwiło znaczne uproszczenie procesu pomiarowego.

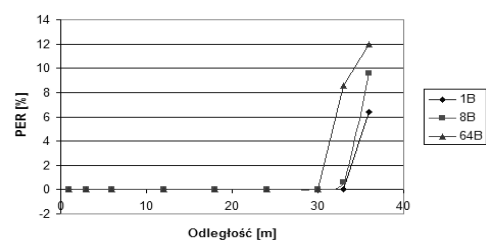


Rys. 3. Architektura środowiska pomiarowego  
Fig. 3. Test environment architecture

Prezentowane badania dotyczyły sytuacji ekstremalnych, w których ujawniają się niepożądane efekty pracy systemu. Dlatego też nie wykorzystywano zabezpieczeń oferowanych przez ZigBee. Aby zminimalizować wpływ czynników losowych podczas każdego eksperymentu transmitowano 1000 pakietów. Każdorazowo dokonywano pomiaru stopnia utraty pakietów (ozn. PER), poziomu mocy odbieranej (ozn. RSSI) oraz wartości opóźnień czasowych.

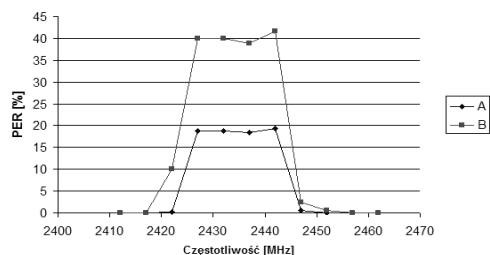
### 4. Wyniki badań

W pierwszej serii pomiarów badano zasięg transmisji w łączu radiowym, osobno dla trzech różnych wielkości pakietów wysyłanych (**rozmiar użyteczny**, bez uwzględnienia narzutu wprowadzanego przez protokół komunikacyjny). Współczynnik stopnia utraty pakietów podczas pracy w odległościach do 30 m pozostaje stały (rys. 4) – podczas pracy na maksymalnym zasięgu ilość błędów gwałtownie rośnie, proporcjonalnie do rozmiaru danych. Podobne zależności można uzyskać mierząc opóźnienia transmisji. Moc odbierana maleje wraz ze wzrostem odległości pomiędzy urządzeniami lecz nie jest to zależność liniowa.



Rys. 4. Stopień utraty pakietów jako funkcja odległości pomiędzy urządzeniami  
Fig. 4. Packet Error rate as a function of the distance between devices

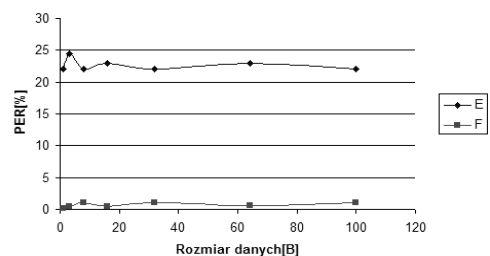
Drugi eksperyment dotyczył badania wpływu transmisji w sieci WLAN na pracę rozważanego rozproszonego systemu pomiarowego. Przy zachowaniu stałej konfiguracji środowiska pomiarowego (sytuacja A- urządzenia ZigBee pomiędzy urządzeniami WLAN, odległość 3 m, widoczność optyczna; sytuacja B- podobnie jak w A, ale odległość 5m i brak widoczności optycznej) zmieniano kanał pracy WLAN. Można zaobserwować, że wpływ sieci WLAN na transmisję ZigBee zależy od separacji częstotliwościowej obu systemów (rys. 5). Stopień utraty pakietów maleje do zera dla separacji powyżej 22 MHz (szerokość widma WLAN). Większą liczbę błędów zanotowano przy braku widoczności optycznej pomiędzy urządzeniami ZigBee.



Rys. 5. Wpływ WLAN na ZigBee (różne kanały)  
Fig. 5. WLAN impact on ZigBee performance (different channels)

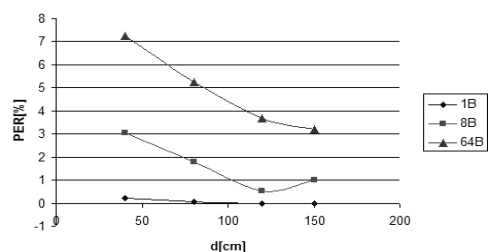
Trzeci eksperyment zakładał zbadanie wpływu rozmiaru transmitowanego pakietu na prawdopodobieństwo jego utraty. Wybrano kanał WLAN tak, by uzyskać najgorsze statystycznie warunki transmisji (kanał 5, 2432 MHz). Podobnie jak poprzednio pomiary prowadzono w jednej z dwóch konfiguracji: sytuacja E – urządzenia ZigBee w odległości 20 cm od siebie w linii z urządzeniami WLAN; sytuacja F – podobnie jak w E, lecz urządzenia ZigBee umieszczone prostopadłe do linii łączącej urządzenia WLAN. Wyniki zestawiono na wykresie (rys. 6).

Jak widać w opisanym przypadku PER nie zależy od rozmiaru transmitowanych danych. Wiąże się to z rodzajem techniki rozpraszania widma sekwencją bezpośrednią, która równomiernie kształtuje charakterystykę widmową. Warto zauważyć, że liczba błędów jest znacząco większa gdy urządzenia ZigBee pracują pomiędzy urządzeniami WLAN (sytuacja E).



Rys. 6. Wpływ WLAN na ZigBee (różny rozmiar danych)  
Fig. 6. WLAN impact on ZigBee performance (different data size)

Czwarty eksperyment dotyczył badań analogicznych do opisanych powyżej, przy zastąpieniu urządzeń WLAN urządzeniami Bluetooth. Można zaobserwować, że inaczej niż poprzednio, w tym przypadku prawdopodobieństwo utraty pakietu zależy od rozmiaru danych (rys. 7).



Rys. 7. Wpływ Bluetooth na ZigBee (różny rozmiar danych)  
Fig. 7. Bluetooth impact on ZigBee performance (different data size)

Wraz ze zwiększaniem separacji przestrzennej pomiędzy urządzeniami prawdopodobieństwo błędu maleje (odstępstwa od reguły mogą być spowodowane lokalnymi warunkami, lub aktywnością innych urządzeń np. należących do sieci WLAN). Warto zauważyć, że o ile podczas 64B danych tracono średnio ponad 7% pakietów, o tyle dla 1B wartość ta była niewiele większa od 0. Bluetooth stosując rozpraszanie widma z przeskokiem częstotliwości 1600 razy na sekundę, co oznacza transmitowanie więcej niż jednego symbolu

w danym kanale (pomiędzy przeskokami). Tłumaczy to specyfikę występowania błędów – często tracone jest kilka pakietów po kolei.

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można potwierdzić przydatność technologii ZigBee. Umożliwia ona projektowanie rozbudowanych sieci czujnikowych, a także efektywne zarządzanie transmisją danych (automatyczne wprowadzanie węzłów sieci w stan uśpienia przez kontroler). Dwie podstawowe topologie sieci pozwalają na tworzenie praktycznie dowolnych kombinacji węzłów i połączeń, sieci mogą być tworzone i zarządzane automatycznie. Możliwe jest korzystanie z gotowych układów, lub budowanie własnych elementów w oparciu o bloki radiowe realizujące operacje warstwy fizycznej standardu IEEE 802.15.4. Rozbudowa funkcjonalności może obejmować zastosowanie protokołów routingu, co prowadzi do bardziej niezawodnego systemu, który może radzić sobie z zerwanymi łączami. Przydatna jest też koncepcja węzłów o ograniczonej funkcjonalności, która umożliwia stosowanie tysięcy węzłów czujnikowych w sieci sprowadzając koszty do minimum. Już dziś, w oparciu o powyższe właściwości, konstruuje się wielowęzłowe sieci czujnikowe ZigBee, które pozwalają np. na monitorowanie parametrów ściółki leśnej (ochrona przed pożarami) czy kompleksowe sterowanie sprzętami gospodarstwa domowego zgodnie z koncepcją „domu inteligentnego”.

Zarówno transmisja Bluetooth jak i WLAN może prowadzić do utraty pewnej części pakietów w sieci ZigBee. Wpływ ten zależy od odległości, a także od separacji częstotliwościowej kanałów transmisji i jest znacznie większy w przypadku sieci WLAN. Dla porównania: w najgorszym przypadku transmisja Bluetooth powoduje utratę ok. 10% pakietów, a WLAN – ok. 40% pakietów. Wpływ Bluetooth uwidacznia się dla dłuższych pakietów, co wynika wprost ze stosowanej modulacji (rozpraszanie widma z przeskokiem częstotliwości). W przypadku separacji częstotliwościowej na poziomie 22 MHz wpływ WLAN na ZigBee znacząco się zmniejsza. Nie stwierdzono przy tym wpływu Bluetooth czy WLAN na opóźnienia transmisji ZigBee, ani na moc odbieraną (rozumianą jako wartość RSSI).

W przypadku systemów pomiarowych utrata nawet niewielkiej liczby pakietów może być krytyczna. Należy jednak pamiętać, że warunki testowe znacznie odbiegały od neutralnych. Negatywne skutki współdzielenia pasma mogą być zniwelowane dzięki wykonywaniu funkcjonalności ZigBee tj. wykrywania emisji w paśmie i mechanizmu potwierdzeń w połączeniu z protokołami routingu, co czyni wpływ Bluetooth na ZigBee niezauważalnym (ew. błędy objawiają się przez spadek przepływności transmisji). Przeprowadzone badania również dostarczają recept na ww. problem w postaci właściwego planowania infrastruktury sieci bezprzewodowych na etapie wykonywania projektu. Jak widać na rys.5 odpowiednie dobranie częstotliwości pracy oraz mocy nadawania pozwala na ograniczenie wzajemnego wpływu WLAN i ZigBee. Warto zaznaczyć, że przy ustalonym kanale ZigBee co najmniej 4 kanały WLAN umożliwiają bezkolizyjną pracę obu systemów.

## 6. Literatura

- [1] W.Nawrocki: Rozproszone systemy pomiarowe. WKŁ 2006
- [2] P.Kinney: ZigBee Technology. Wireless Control that Simply Works. Communications Design Conference, 2003
- [3] K.Shuaib, M.Boulmalf, F.Sallabi, A.Lakas: Co-existence of ZigBee and WLAN, a performance study. Wireless Telecommunications Symposium, 2006 (1 - 6)
- [4] IEEE Standard for Information technology 802.15.2. IEEE 2003
- [5] I.Howitt, J.A.Gutierrez: IEEE 802.15.4 low rate – wireless personal area network coexistence issues. IEEE Wireless Communications and Networking, 2003 vol.3 (1481 - 1486)
- [6] A.Sikora, V.Groza: Coexistence of IEEE 802.15.4 with other Systems in the 2.4 GHz-ISM-Band. Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005 (1786 - 1791)
- [7] <http://www.maxstream.net>