

Rozdział

Bezprzewodowe sieci osobiste standardu IEEE 802.15.4

Bartłomiej ZIELIŃSKI
Politechnika Śląska, Instytut Informatyki
Bartlomiej.Zielinski@polsl.pl

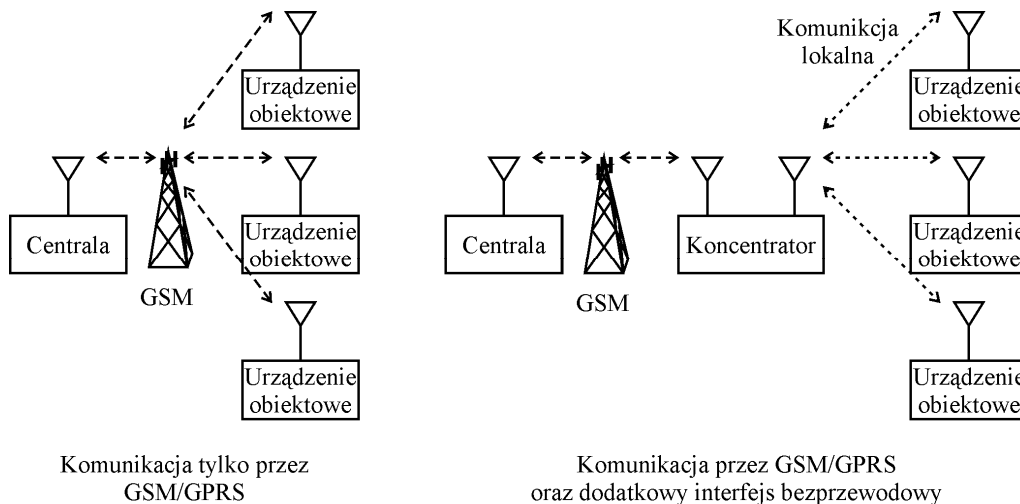
Streszczenie

Przedstawiono podstawy działania standardu IEEE 802.15.4, opisującego bezprzewodowe sieci osobiste o niskiej przepustowości. Opisano zagadnienia takie, jak formowanie sieci, organizację czasową, zasady komunikacji między urządzeniami. Pokazano także podstawowe zasady przetwarzania informacji na poziomie warstwy liniowej i fizycznej. Wskazano możliwości zastosowań standardu oraz jego rozwoju.

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilku lat można zaobserwować znaczny wzrost popularności sieci bezprzewodowych. Być może najbardziej dobitnym przykładem jest telefonia komórkowa, której pierwotne zastosowanie – przesył mowy – jest obecnie tylko jedną z kilku możliwych aplikacji. Wprowadzenie tzw. usług generacji 2.5, tj. szybkiej transmisji danych metodami GPRS czy EDGE, umożliwia traktowanie takiej sieci jako bezprzewodowej sieci rozległej z wbudowanym wsparciem dla mobilności stacji. Sieć GSM może stanowić zatem medium swobodnego – niemal niezależnego od lokalizacji geograficznej – dostępu do Internetu, istnieją także liczne zastosowania w systemach pomiarowo-kontrolnych oraz w systemach zdalnego nadzoru określonych obiektów, nie wyłączając tych o znaczeniu przemysłowym. Szczególnym przypadkiem tej grupy rozwiązań są sieci telemetryczne.

Często zdarza się, że zdalnie monitorowany lub sterowany obiekt wymaga instalacji wielu urządzeń komunikujących się bezprzewodowo. Jeśli są one umieszczone w małej odległości od siebie, używanie do transmisji tylko urządzeń GSM może stać się nieopłacalne. Warto wówczas rozważyć możliwość wprowadzenia do sieci koncentratorów-przełączników, wyposażonych w interfejs GSM, lecz komunikujących się z modułami obiektowymi za pomocą innego interfejsu, prostszego i tańszego w eksploatacji. Ideę takiej modyfikacji topologii sieci ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Topologie sieci zdalnego sterowania i monitorowania z wykorzystaniem GSM

W opisywanych zastosowaniach interfejs taki powinien charakteryzować się stosunkowo niską ceną i dużą prostotą, a także małym poborem mocy; parametry te można przy tym uzyskać kosztem prędkości transmisji. Interfejs powinien także umożliwiać gwarancję jakości usług. Wymogi te wynikają ze specyfiki sieci zdalnego monitorowania i sterowania, w których intensywność przesyłania danych jest stosunkowo niewielka, natomiast bardzo często istotna jest gwarancja dostarczenia wiadomości w możliwym do obliczenia, nieprzekraczalnym czasie.

Jak nietrudno zauważyć, wymagań tych nie spełniają popularne rozwiązania w zakresie bezprzewodowych sieci lokalnych, np. IEEE 802.11, czy też osobistych, jak np. Bluetooth [1]. Nieco lepiej wymogi te spełnia system IrDA [2, 3], jednak kierunkowa charakterystyka transmisji oraz bardzo mały zasięg ograniczają możliwości użycia tej klasy urządzeń. Stąd też potrzeba zdefiniowania nowego rozwiązania komunikacji bezprzewodowej, stworzonego z myślą o wspomnianych wyżej wymaganiach i zastosowaniach.

2. Standard IEEE 802.15.4

Standard IEEE 802.15.4 [4] stworzono w celu zapewnienia środka łączności bezprzewodowej, charakteryzującego się niskim kosztem, niewielką złożonością urządzeń i bardzo niskim poborem mocy. Z drugiej strony, urządzenia takie dają możliwość transmisji z relatywnie niskimi prędkościami, co jednak jest dopuszczalne dla pewnych aplikacji, takich jak np. sieci sensorowe, telemetryczne i pomiarowo-kontrolne, a także sterowanie urządzeniami domowymi czy interaktywne zabawki. Standard ten określa sposób działania warstwy fizycznej i liniowej sieci osobistej o małej prędkości (LR-WPAN, ang. *Low Rate Wireless Personal Area Network*), podczas gdy funkcje warstw wyższych (sieciowej i aplikacji) określono w specyfikacji ZigBee [7].

2.1. Topologie sieci

W sieci standardu 802.15.4 mogą znajdować się urządzenia pełno funkcjonalne (FFD, ang. *Full Functional Device*) oraz o ograniczonej funkcjonalności (RFD, ang. *Reduced Functional Device*). Urządzenie FFD może pełnić funkcję koordynatora, koordynatora sieci osobistej (PNC, ang. *Personal Network Coordinator*) oraz „zwykłego” urządzenia; może ono przesyłać informację do dowolnego innego urządzenia. Urządzenie RFD jest przeznaczone dla wyjątkowo prostych aplikacji, nie wymagających przesyłu dużej ilości informacji; może ono przesyłać informację jedynie do FFD.

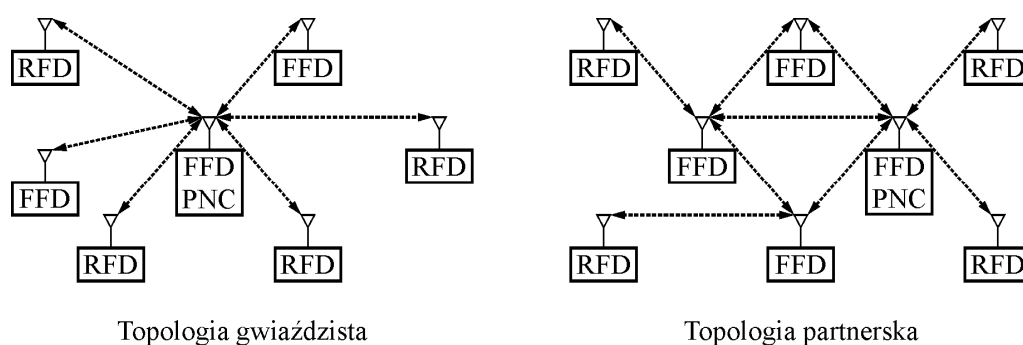
Sieć osobista może składać się z przynajmniej dwóch urządzeń. Jedno z nich musi być pełno funkcjonalne i obejmuje funkcję koordynatora sieci osobistej. W zależności od wymagań aplikacji, topologia sieci może być gwiazdzista (ang. *star*) lub partnerska (ang. *peer-to-peer*).

W topologii gwiazdzistej wszelka komunikacja odbywa się poprzez koordynatora sieci. Sieci gwiazdziste działające na wspólnym obszarze są całkowicie niezależne od siebie dzięki użyciu unikalnych identyfikatorów sieci. Do już utworzonej sieci można dołączać kolejne urządzenia FFD lub RFD.

W sieci partnerskiej można zestawzić dowolne połączenie bezpośrednio między urządzeniami FFD, z pominięciem koordynatora. Urządzenie RFD może natomiast wymieniać informację z tylko jednym urządzeniem FFD. Transmisja między urządzeniami wymaga ich wzajemnej widoczności. Można także przekazywać komunikaty do urządzeń bardziej odległych, znajdujących się poza zasięgiem nadawcy; zagadnienie to jest jednak rozwiązywane na poziomie warstwy sieciowej i jako takie wykracza poza ramy standardu 802.15.4.

Topologia partnerska umożliwia tworzenie sieci o bardzo dużym stopniu złożoności, np. sieci klastrowo-drzewiastej (ang. *cluster-tree*). Sieć taka składa się głównie z urządzeń FFD, natomiast RFD mogą się przyłączać na końcu gałęzi. Dzięki takiej konfiguracji można zwiększyć zasięg działania sieci, jednak odbywa się to kosztem powiększonych opóźnień w przekazywaniu informacji.

Przykłady topologii sieci pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Topologia gwiazdzista i partnerska w standardzie IEEE 802.15.4 [4]

2.2. Organizacja czasowa

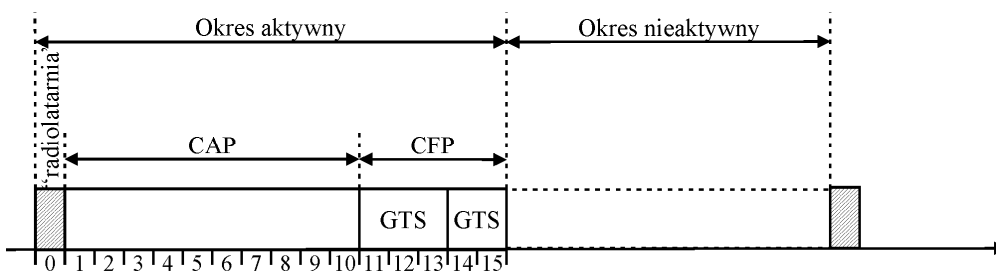
Organizacja czasowa sieci oparta jest na strukturze superramki (ang. *superframe*), której format jest określony przez koordynatora. Superramka składa się z 16 szczelin o równej długości, a w jej strukturze można wyróżnić następujące elementy:

- „radiolatarnia”¹ (ang. *beacon*);
- okres rywalizacyjny (CAP, ang. *Contention Access Period*);
- okres bezkolizyjny (CFP, ang. *Contention Free Period*) – ciąg szczelin „gwarantowanych” (GTS, ang. *Guaranteed Time Slots*).

Ramka „radiolatarni” zawiera informacje służące do identyfikacji sieci, synchronizacji pracy stacji i opisanie struktury superramki. Ramki te przesyła się zawsze, o ile tylko koordynator zamierza używać struktury superramki (nie jest to wymagane). Na ogół cała superramka zajęta jest przez okres rywalizacyjny CAP, podczas którego stacje współzawodniczą o dostęp do łącza zgodnie z protokołem CSMA/CA. W tym fragmencie przesyłane są wszystkie ramki sterujące. Dla aplikacji wymagających małych opóźnień transmisyjnych koordynator może przydzielić do 7 szczelin GTS, tworzących okres bezkolizyjny CFP. Szczelina GTS może zawierać pewną liczbę szczelin podstawowych.

Nie cała długość superramki musi być aktywnie wykorzystana. Koordynator sieci może ustalić czas trwania okresu aktywnego superramki, jak również odstęp między kolejnymi ramkami „radiolatarni”, w zakresie od 15.35 ms do 251.65 s [5]. Można także całkowicie zrezygnować z przesyłania ramek „radiolatarni”, co jest równoznaczne z rezygnacją ze struktury superramki. W takim przypadku dostęp stacji do łącza jest czysto rywalizacyjny, bez możliwości prowadzenia rezerwacji. Przy założeniu, że taki sposób jest raczej przeznaczony dla sieci o wyjątkowo małej intensywności transmisji, nie wyklucza to wsparcia dla aplikacji o określonych wymaganiach czasowych, gdyż ryzyko kolizji jest wówczas niewielkie.

Przyjęte rozwiązanie umożliwia okresowe wprowadzanie stacji w tryb energooszczędny. W przypadku urządzeń przenośnych, zasilanych bateryjnie, jest to szczególnie istotne.



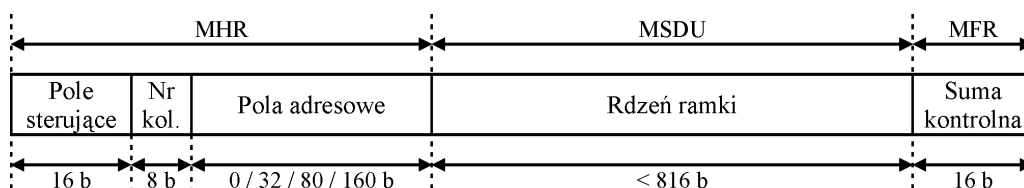
Rys. 3. Struktura przykładowej superramki w standardzie IEEE 802.15.4 [4].

¹ Użyte tłumaczenie słowa *beacon* stosowane jest wśród radioamatorów [6].

Strukturę przykładowej superramki – zawierającej okres aktywny rywalizacyjny i bezkolizyjny oraz okres nieaktywny – pokazano na rys. 3.

2.3. Ogólny format ramki

W strukturze ramki można wyróżnić nagłówek (MHR, ang. *MAC header*), rdzeń (MSDU, ang. *MAC service data unit*) oraz stopkę (MFR, ang. *MAC footer*). Nagłówek zawiera pole sterujące, numer kolejny oraz – zależnie od typu ramki – pola adresowe. Rdzeń ramki pełni funkcję zależną od typu ramki (radiolatarnia, dane, potwierdzenie, sterowanie), natomiast w stopce znajduje się tylko suma kontrolna. Ogólna struktura ramki pokazana jest na rys. 4.



Rys. 4. Ogólna struktura ramki w standardzie IEEE 802.15.4 [4].

Pole sterujące określa typ ramki, fakt użycia szyfrowania oraz pewne szczegóły transmisji jak np. wymaganie potwierdzenia, obecność kolejnej porcji danych czy też przesył między sieciami. Dodatkowo, na podstawie pola sterującego można określić sposób adresowania nadawcy i odbiorcy. Zależnie od sytuacji oraz typu ramki używane jest adresowanie skrócone (16-bitowe) lub rozszerzone (64-bitowe); adresy urządzeń są przy tym uzupełniane o 16-bitowy identyfikator sieci. W przypadku ramek potwierdzenia adresy nie są używane, a kojarzenie potwierdzenia z ramką odbywa się za pomocą unikalnego numeru kolejnego ramki.

Struktura rdzenia ramki zależy od jej typu. W ramkach danych cały rdzeń wypełniony jest danymi, zaś w potwierdzeniach nie występuje w ogóle. Rdzeń ramki sterującej zawiera polecenie (związane głównie z zarządzaniem strukturą sieci i jej pracą) oraz opcjonalnie dodatkową informację sterującą. W ramkach „radiolatarni” natomiast rdzeń niesie szereg informacji potrzebnych do właściwej organizacji pracy sieci, np. odstęp czasowy między superramkami, długość okresu aktywnego oraz harmonogram szczelin GTS (liczba i długość szczelin, kierunek transmisji, przydział poszczególnym urządzeniom). W razie potrzeby ramka „radiolatarni” może dodatkowo być nośnikiem informacji przesyłanej na poziomie wyższych warstw sieci.

Stopka ramki zawiera 16-bitową sumę kontrolną ITU-T CRC, wyliczaną według wyrażenia $G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ na podstawie zawartości części MHR oraz MSDU ramki.

2.4. Warstwa fizyczna

Standard IEEE 802.15.4 może pracować w kilku pasmach ISM. Są to pasma 868 (dostępne w Europie), 915 (dostępne w USA; w Europie nakłada się na zakres częstotliwości standardu GSM) oraz 2450 MHz (dostępne praktycznie na całym świecie, ale

współdzielone m. in. ze standardem IEEE 802.11 i Bluetooth), przy czym w każdym z nich osiągane są różne prędkości transmisji. Również sposoby przetwarzania sygnałów nie są jednakowe. Zestawienie ważniejszych parametrów łącza radiowego przedstawiono w tabeli 1.

W pasmie 2450 MHz stosuje się 16-wartościowy, prawie ortogonalny (ang. *quasi-orthogonal*) sposób modulacji. Każdy symbol przenosi informację o wartości czterech bitów w taki sposób, że na ich podstawie wybiera się jeden z szesnastu prawie ortogonalnych ciągów pseudolosowych. Ciągi te wysyła się kolejno, stosując modulację O-QPSK (ang. *Offset Quadrature Phase Shift Keying*).

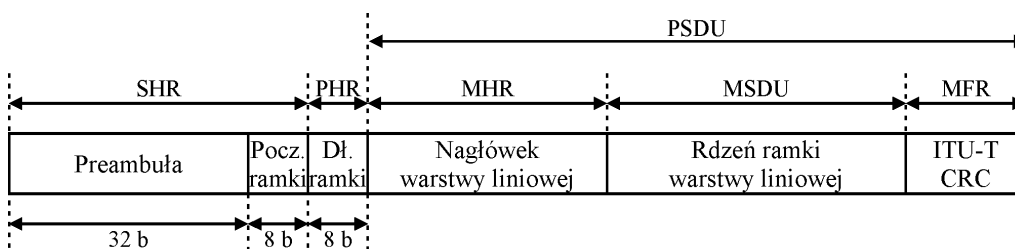
W pasmach 868 i 915 MHz stosowane jest „tradycyjne” rozpraszanie widma metodą kluczkowania bezpośredniego (DSSS, ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*). Zdefiniowane są dwa 15-bitowe ciągi, wybierane w zależności od wartości przesyłanego bitu. Wynikowy ciąg bitów podlega modulacji metodą BPSK. W obu pasmach prędkości ciągu rozpraszającego i prędkości symbolowe są różne.

Tabela 1. Wybrane parametry łącza radiowego w standardzie IEEE 802.15.4 [4]

Pasma [MHz]	Zakres [MHz]	Liczba kanałów	Rozpraszanie widma		Dane	
			Prędkość ciągu rozpraszającego [kb/s]	Metoda modulacji	Prędkość transmisji [kb/s]	Prędkość symbolowa [kBd]
868	868-868,6	1	300	BPSK	20	20
915	902-928	10	600	BPSK	40	40
2450	2400-2483,5	16	2000	O-QPSK	250	62,5

W stosunku do ramek warstwy liniowej, warstwa fizyczna wprowadza dodatkowe elementy. Mianowicie każda ramka poprzedzana jest nagłówkiem synchronizującym (SHR, ang. *Synchronisation Header*) oraz nagłówkiem warstwy fizycznej (PHR, ang. *Physical Header*). Nagłówek SHR zawiera 32-bitową preambułę oraz 8-bitowy znacznik początku ramki, natomiast PHR – 8-bitową długość ramki. Prócz wymienionych elementów, długość ramki nie może przekroczyć 127 bajtów.

Sposób przetwarzania ramki na poziomie warstwy fizycznej ilustruje rys. 5.



Rys. 5. Przetwarzanie ramki na poziomie warstwy fizycznej w standardzie IEEE 802.15.4 [4].

3. Podsumowanie

W chwili obecnej wydaje się, że standard IEEE 802.15.4 został zaakceptowany przez producentów radiowego sprzętu transmisyjnego. Na rynku dostępne są już liczne urządzenia zgodne z tym standardem, co pozwala przypuszczać, że nie będzie trudności z doбором odpowiedniej bazy elementowej dla konkretnej aplikacji. Otwartym pozostaje tylko pytanie, czy urządzenia te zdobędą większą popularność od licznych radiowych modułów nadawczo-odbiorczych, dostępnych na rynku od wielu lat.

Istnieją także rozwiązania konkurencyjne w stosunku do IEEE 802.15.4 – przykładem może być Z-Wave [8]. Jest to konkurencja dość poważna, gdyż oferowane są nie tylko moduły nadawczo-odbiorcze, lecz całe systemy m. in. automatyki domowej. System ten pozwala utworzyć bezprzewodową sieć ad-hoc, posiadającą właściwość automatycznego doboru trasy przesyłu komunikatów w przypadku, gdy nadawca i odbiorca nie mają wzajemnej łączności. Wadą tego rozwiązania jest brak otwartości – nie ma powszechnie dostępnej dokumentacji określającej szczegóły przyjętych rozwiązań w zakresie poszczególnych warstw sieci. Wszelkie dostępne informacje mają raczej charakter marketingowy – z trudem można doszukać się takich danych, jak prędkość transmisji (9600 b/s).

LITERATURA

1. Zieliński B., Tokarz K.: Transmisja bezprzewodowa w systemie Bluetooth. *Studia Informati- ca*, Vol. 22, Number 2 (44), Gliwice 2001, s. 207÷221.
2. Zieliński B., Tokarz K.: Transmisja bezprzewodowa w standardzie IrDA. *ZN Pol. Śl. s. In- formatyka*, z. 36 (nr 1414), Gliwice 1999, s. 661÷676.
3. Tokarz K., Zieliński B.: Rozszerzenia multimedialne w standardzie IrDA. *ZN Pol. Śl. s. In- formatyka*, z. 36 (nr 1414), Gliwice 1999, s. 677÷691.
4. 802.15.4™ IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and informa- tion exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific require- ments. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Speci- fications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, 2003.
5. Willig A., Matheus K., Wolisz A.: *Wireless Technology in Industrial Networks*. Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6, Jun 2005, s. 1130÷1151.
6. Dąbrowski K.: *Amatorska komunikacja cyfrowa*. PWN, Warszawa 1994.
7. ZigBee Specification v1.0. ZigBee Document 053473r00, ZigBee Alliance, San Ramon, 14.04.2005.
8. Z-Wave Alliance. <http://www.z-wavealliance.org/>.