

Radosław MACIASZCZYK

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY WYDZIAŁ INFORMATYKI,
ul. Żołnierska 49, Szczecin

Transmisja danych z pojazdów bezzałogowych z wykorzystaniem modułów XBee

Dr inż. Radosław MACIASZCZYK

Ukończył studia na Wydziale Informatyki w roku 2000, w roku 2006 obronił pracę doktorską. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Architektury Komputerów i Telekomunikacji na Wydziale Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Je go zainteresowania naukowe to techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz systemy mobilne.



e-mail: rmaciaszczyk@wi.zut.edu.pl

Streszczenie

W artykule zostały przedstawione moduły radiowe przeznaczone do urządzeń bliskiego zasięgu, które z powodzeniem można wykorzystać do transmisji danych z obiektów ruchomych do stacji naziemnych, lub pomiędzy obiektami ruchomymi. Porównano moduły pracujące w paśmie 868 MHz oraz 2,4 GHz. Zostały wykonane badania dotyczące osiągalnego zasięgu oraz przeprowadzono analizę widmową sygnału transmitowanego przez moduły. Przedstawione zostały podstawowe różnice pomiędzy modułami. Uzyskano wyniki dające duże szanse na praktyczne wykorzystanie modułów zwłaszcza w paśmie 868 MHz.

Słowa kluczowe: urządzenia bliskiego zasięgu, Xbee, Zigbee, testy zasięgu, UAV.

Data transmission from unmanned aerial vehicles using XBee modules

Abstract

This paper presents radio modules for short range devices. They can be successfully used for transmission of telemetry data between unmanned vehicles and a ground station or between vehicles. A comparison of two modules, XBee Pro 868 (operating frequency 868 MHz) and XBee 802.15.4 (operating frequency 2.4 GHz) is made. They are designed for high-throughput applications requiring low latency and predictable communication timing. XBee modules are ideal for low-power, low-cost applications. XBee-PRO modules are power-amplified versions of XBee modules for extended-range applications. All modems are all pin compatible and weigh around 2 grams without antennas. The modules were tested for the maximum achievable range and the spectral analysis of the signal transmitted by the modules was performed. The study was realized with use of omnidirectional antennas. The spectral analysis showed that the modules were compatible with the law in Poland and Europe. The maximum range for the module operating at 2.4 GHz is 750 meters, while the modules operating in 868 MHz frequency range reach 3100 meters. The measured delays in communication timing are small and amount up to approximately 50-60 ms for both bands. The results show chances for practical use of modules for communication with unmanned vehicles, especially in band 868 MHz.

Keywords: short range device, Xbee, ZigBee, range test, UAV.

1. Wstęp

Ciągły rozwój technologiczny sprawia, iż na rynku dostępnych jest coraz więcej zminiaturyzowanych sensorów możliwych do zastosowania w pojazdach bezzałogowych [1]. Nowe czujniki zwłaszcza wykonane w technologii MEMS pozwalają na doskonalenie istniejących konstrukcji, zmniejszeniu ich masy czy ograniczeniu poboru prądu. Wielość dostępnych sensorów na pojedździe powoduje, że coraz częściej konstruktorzy korzystają z dwukierunkowej transmisji danych telemetrycznych, dzięki czemu możliwe jest obserwowanie zachowania pojazdu w trakcie pracy jak i zdalna korekta ich parametrów. Wykorzystanie transmisji prze-

wodowej w większości przypadków jest całkowicie niepraktyczne, czy wręcz wykluczone. Dlatego jedynym rozsądnym rozwiązaniem jest transmisja z wykorzystaniem systemów bezprzewodowych.

Powszechność zastosowania telefonii komórkowej powoduje, że w znacznej części zastosowań z powodzeniem można wykorzystać ten rodzaj transmisji. Jednak w sytuacjach klęsk żywiołowych, w których zniszczeniu uległa infrastruktura stała te systemy z góry skazane są na niepowodzenie. Ponadto znane są również problemy z opóźnieniem transmisji danych [2], co w niektórych zastosowaniach jest niedopuszczalne. Dlatego poszukuje się innych rozwiązań pozwalających na transmisje pomiarów do urządzeń koncentrujących lub pomiędzy systemami sensorowymi.

2. Moduły radiowe Xbee

Jednym z przykładów układów do dwukierunkowej transmisji danych są gotowe moduły radiowe o nazwie handlowej XBee firmy Digi. W ofercie producenta można znaleźć układy pracujące w różnych pasmach (2,4 GHz, 900 MHz, 868 MHz) z różnymi poziomami mocy dostosowanymi do danego pasma.

W Europie sprzedawane są produkty przeznaczone dla pasm ISM 2,4 GHz oraz 868 MHz. Dla pasma 2,4 GHz sprzedawane są, jako moduły radiowe zgodne ze standardem ZigBee IEEE 802.15.4. Umożliwiają one prowadzenie transmisji radiowych w paśmie 2,4 GHz z rozpraszaniem widma DSSS. Moduły te oferowane są w dwóch wersjach. Standardowej Xbee o mniejszej mocy nadawczej a tym samym mniejszym zużyciu energii, oraz w wersji XBee-Pro ze zwiększoną mocą nadawczą. Wszystkie dostępne moduły firmy Digi są ze sobą zgodne mechanicznie oraz programowo. Pozwala to na swobodną wymianę układów w zależności od zapotrzebowania. Występują jednak niewielkie różnice w diagnostyce tych modułów wykorzystując komendy AT.

Tab. 1. Porównanie własności modułów Xbee [3,4,5]
Tab. 1. Comparison of properties of XBee modules

	Xbee-Pro 868	Xbee 802.15.4	Xbee-Pro 802.15.4
Częstotliwość operacyjna	869.525 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Moc nadawcza	+25 dBm	0dBm	+16 dBm
Czułość	-112 dBm	-92dBm	-100dBm
Przepustowość interfejsu radiowego	24 kbps	250 kbps	250 kbps
Zasięg LOS (wg producenta)	40 km	100 m	1600 m
Prąd podczas nadawania	500 mA	45 mA	215 mA
Prąd podczas odbioru	55 mA	50 mA	55 mA
Prąd w trybie uśpienia	55 µA	< 10 µA	< 10 µA

Istotne różnice pomiędzy modułami zostały pokazane w tabeli nr 1. Jak można zauważyć układy różnią się zasięgiem, ale także poborem prądu. Moduły Xbee-Pro pobierają około 4 razy więcej prądu od układów Xbee [6], co może być kluczowe w części zastosowań. Układy pozwalają także na różne sposoby podłączenia anten. Występują układy z wbudowanymi antenami, z wyproszonym złączem U.FL lub gniazdem RP-SMA.

Jednym z możliwych zastosowań pasma 868 MHz jest wykorzystanie go do urządzeń bliskiego zasięgu w skrócie SRD (ang. Short Range Device). Zgodnie z Zarządzeniem nr 22 Prezesa UKE z dnia 17 września 2007 r pasmo to może być wykorzystywane bez pozwolenia radiowego przez urządzenia bliskiego zasięgu między innymi do sterowania [7]. Z podanego zakresu jedynie zakres częstotliwości 869,40-869,65 MHz pozwala na pracę z poziomami mocy do 500mW ERP przy aktywności nadajnika

poniżej 10% [8]. Producent modułów deklaruje, że Xbee-Pro 868 są zgodne z obowiązującym prawem w UE, przy czym efektywna prędkość transmisji spada do 2,4 kbs (moduły nie mają zaimplementowanych funkcji wykrywania wolnego kanału).

Jeżeli chodzi o pasmo 2,4 GHz to zgodnie z Zarządzeniem Nr 36 Prezesa Urzędu Komunikacji Elektronicznej z dnia 30 listopada 2007 r. w sprawie planu zagospodarowania częstotliwości dla zakresu 2400,0 – 2483,5 MHz możliwe jest także korzystanie z urządzeń SRD z maksymalną mocą 10 mW [9]. W tym samym rozporządzeniu określono, że dla transmisji szerokopasmowej możliwa jest transmisja danych z maksymalną mocą EIRP wynoszącą 100 mW. Również w tym przypadku moduły firmy Digi dla tego pasma są zgodne z obowiązującym prawem w Polsce.

3. Stanowisko testowe

W niniejszym artykule do badań zostały użyte pary modułów pracujących w pasmach 868 MHz oraz 2,4 GHz w wersji Pro. Własności użytych układów zostały wyszarzane w tabeli 1.

Do potrzeb artykułu zostało stworzone stanowisko testowe składające się z dwóch adapterów do podłączenia układów, komputera przenośnego oraz oprogramowania do wysyłania i odbierania danych. Pierwszy adapter XBee Explorer USB [10] pozwala na podłączenie układu radiowego do portu USB w komputerze. Adapter zawiera w sobie układ FTDI, dzięki któremu po podłączeniu do komputera moduł w adapterze dostępny jest przez port szeregowy. Napisany do celów tego artykułu program komunikuje się z modułem radiowym poprzez port szeregowy. Wykorzystując komendy AT odczytywane są wartości sygnału RSSI, liczby poprawnych i niepoprawnie otrzymanych ramek, oraz łączny czas transmisji danych w obu kierunkach. Program cyklicznie wysyła porcję danych i czeka na odbiór takiej samej paczki z modułu zdalnego. Po prawidłowym odbiorze odczytywana jest wartość RSSI, obliczany jest czas transmisji danej paczki danych oraz także w przypadku układów Xbee-Pro 868 odczytywana jest liczba poprawnych i błędnych ramek.

Drugi adapter XBee Explorer Regulated [11] służy do podłączenia modułu do portu UART mikrokontrolera. W tym stanowisku testowym ten zestaw służy jako zdalny. W trakcie testów linia wejściowa została zwarta z linią wyjściową, dzięki czemu moduł pracował w pętli zwrotnej.

4. Badania

Obydwa rodzaje układów zostały przetestowane pod kątem maksymalnego zasięgu w terenie otwartym, na którym występowały nieliczne drzewa oraz dokonano analizy spektrum sygnału w różnych odległościach od nadajnika.

Do modułów Xbee-Pro 868 zostały podłączone anteny dookółne o zysku 2,15 dBi za pomocą 30 cm pigtaili U.FL-RPSMA.

Natomiast w zestawie Xbee-Pro 802.15.4 użyto różnych anten, w module zdalnym była wykorzystana antena dookólna wbudowana o zysku 0,5 dBi, zaś w module bazowym antena dookólna o zysku 3 dBi podłączona do modułu za pomocą pigtaila U.FL-RPSMA.

4.1. Analiza widmowa

Analizę widma sygnału dokonano z wykorzystaniem urządzenia Spectran HF 6080 firmy Aaronia AG. wraz z antena HyperLOG 6080.

Badania zostały dokonane na otwartej przestrzeni z dala od ewentualnych źródeł sygnałów oraz bez możliwości odbicia się od przeszkód. Pomiarów dokonano w odległości 4m, oraz 20 m od źródła sygnału. Pierwszy pomiar wynikał z minimalnej odległości zalecanej przez producenta urządzenia.

Dla każdego rodzaju badania skaner dokonywał pomiarów w dłuższym okresie akumulując maksymalne wyniki, co zaznaczone jest na rysunkach 1-2 niebieskim kolorem. Na tych samych rysunkach kolorem różowym oznaczono wartość sygnału w danym przebiegu. Rysunek 1 przedstawia pomiar w odległości 4 m

od źródła. Maksymalna wartość sygnału to -22,48 dBm przy częstotliwości 869,5 MHz, (czyli częstotliwość operacyjna układu). Na rysunku 2 prezentowany jest pomiar w odległości 20 m od źródła. Wartość maksymalna przypada również dla częstotliwości 869,5 MHz i wynosi -46,88 dBm. Porównując obydwa wykresy można zauważyć, że wraz ze zwiększeniem odległości zmniejsza się obwódka sygnału. Jednak jej kształt jest podobny.

Podobne pomiary wykonano również dla modułów pracujących w paśmie 2,4 GHz. Jednak ze względu na fakt, iż moduły Xbee-Pro 802.15.4 prowadzą transmisję radiową w paśmie 2,4 GHz z rozpraszaniem widma DSSS, uzyskane wyniki pomiarów pomiędzy wyłączeniem nadajnika a pomiarem w trakcie pracy różnią się nieznacznie i dlatego zrezygnowano z prezentacji ich w niniejszym artykule.

4.2. Badanie zasięgu

Celem kolejnego badania było sprawdzenie w rzeczywistych warunkach, na jakie odległości możliwa jest transmisja danych. Badanie zostanie przeprowadzone na otwartym terenie. Moduł zdalny został umieszczony na wysokości około 10 m nad powierzchnią ziemi. W odległości do około 600 m od modułu zdalnego możliwe było przeprowadzenie testów bez obecności innych obiektów. Teren był w miarę płaski. Później na drodze bezpośredniej widoczności pomiędzy modułem zdalnym a modułem bazowym pojawiały się nieliczne drzewa i teren zaczynał być pofalowany. Powyżej 3 km pojawiły się liczniejsze zadrzewienia. Występowanie przeszkód dość mocno wpłynęło na uzyskane wyniki. Każdy pomiar został wykonany dziesięciokrotnie, w tabelach 2 i 3 zostały przedstawione wartości sygnału RSSI w funkcji odległości pomiędzy modułami a także wartość minimalna i maksymalna RSSI z danej próby. W ostatniej kolumnie przedstawione są wartości opóźnienia transmisji danych. Badania zostały oddzielnie przeprowadzone dla każdej pary modułów. Odległość była wyliczona na podstawie odczytu pozycji z odbiornika GPS.

Tab. 2. Pomiar RSSI oraz opóźnienia w funkcji odległości dla Xbee-Pro 868
Tab. 2. Measurement of RSSI and delays as a function of the distance for Xbee-Pro 868

odległość	RSSI [dBm]			opóźnienie [ms]
	Min	Max	średnia	średnia
20	-59	-59	-59,0	8,0
200	-67	-73	-70,8	7,5
350	-77	-79	-77,7	7,3
500	-87	-93	-89,4	8,0
650	-89	-96	-93,5	8,0
800	-85	-91	-89,0	9,6
900	-85	-93	-90,0	9,0
1000	-91	-95	-92,0	7,4
1100	-88	-94	-90,5	10,0
1200	-88	-92	-91,0	7,8
1300	-91	-102	-94,2	8,6
1400	-95	-101	-96,8	9,2
1500	-96	-106	-96,3	7,4
1550	-96	-106	-99,9	15,0
1650	-94	-98	-96,1	8,3
1800	-94	-100	-97,5	10,0
2000	-93	-106	-98,3	9,3
2200	-97	-103	-99,2	20,25
2350	-97	-103	-99,0	13,5
2550	-97	-108	-99,6	49,0
2700	-96	-105	-97,8	12,2
2800	-95	-109	-100,1	9,3
2900	-96	-99	-97,0	9,0
3000	-98	-104	-102,0	20,0
3100	-99	-102	-100,0	21,0

Tabela 2 przedstawia uzyskane wyniki pomiarów dla modułów Xbee-Pro 868. Jak możemy zobaczyć maksymalna wartość sygna-

łu RSSI wynosi -59 dBm, zaś najmniejszy -109 dBm, przy deklarowanej czułości modułu to -112 dBm. Podczas badań maksymalną odległość transmisji wyniosła około 3300 m, jednak większość pakietów nie została poprawnie odebrana stąd nie uwzględniono tego pomiaru w wynikach. Przy odległości 3100 m łącze było stabilne, że pozwalało na poprawne przesłanie większości pakietów. Jeżeli w aplikacji zaimplementowano by mechanizm sprawdzania poprawności i potwierdzeń uzyskano by łącze zapewniające odpowiedni poziom jakości. Jeżeli chodzi o opóźnienie to nie zauważono znacznych różnic w odczycie średnich wartości. Niektóre jednostkowe odczyty były większe od pozostałych, ale występowało to powyżej odległości 1000 m, w której występowały obiekty w I strefie Fresnela.

Tab. 3. Pomiar RSSI oraz opóźnienia w funkcji odległości dla Xbee-Pro 802.15.4
Tab. 3. Measurement of RSSI and delays as a function of the distance for Xbee-Pro 802.15.4 2,4 GHz

odległość	RSSI [dBm]			opóźnienie [ms]
	min	max	średnia	Średnia
10	-40	-40	-40,0	37,0
50	-65	-69	-66,7	37,6
100	-68	-75	-72,0	39,0
150	-72	-78	-74,1	36,1
200	-73	-79	-75,2	40,8
250	-78	-82	-79,0	42,5
300	-74	-82	-76,5	46,2
350	-75	-82	-79,2	49,4
400	-76	-82	-78,5	44,0
450	-75	-79	-76,2	47,0
500	-77	-80	-78,5	43,3
550	-75	-82	-78,0	42,3
600	-77	-83	-80,8	45,6
650	-78	-84	-80,25	50,2
700	-79	-84	-81,0	48,4
750	-82	-88	-83,7	51,1

Dla badań zasięgu (tab. 3) modułu ZigBee-Pro 802.15.4, większość pomiarów robionych w bezpośredniej widoczności nadajnika i odbiornika. Największa wartość uzyskanego sygnału to -40 dBm natomiast najmniejsza to -88 dBm. Jednak w tym przypadku deklarowana czułość odbiornika, czyli -100 dBm zdecydowanie różni się od osiągniętych parametrów. Wpływ zapewne ma na to fakt, iż w odległości 600 m pojawiły się nieliczne drzewa. Niestety mimo wielu prób nie udało się uzyskać niższej wartości sygnału RSSI. W porównaniu do urządzeń pracujących w paśmie 868 MHz znacznie wzrosło opóźnienie transmisji do średnio 40 ms. Jednak taki poziom opóźnienia jest jak najbardziej akceptowalny. Osiągnięty maksymalny zasięg to około 750 m, przy czym obserwowano dużą utratę pakietów.

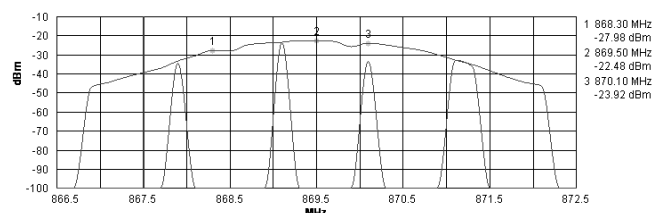
5. Podsumowanie

W pracy zostały przedstawione gotowe moduły radiowe, które można wykorzystać do transmisji danych z obiektów ruchomych do stacji naziemnych, tak jak to się odbywa w przypadku komunikacji pomiędzy zdalnie sterowanymi pojazdami bezzałogowymi. Zaprezentowane i porównane zostały dwa moduły firmy Digi. Jeden pracujący w paśmie 868 MHz, drugi w paśmie 2,4 GHz. Dla obydwu par modułów przeprowadzono badania zasięgu oraz dokonano analizy widmowej sygnału nadawanego przez moduły. Zgodnie z oczekiwaniami moduły Xbee-Pro 868 MHz pozwalają na transmisję danych na większe odległości niż w przypadku modułów Xbee-Pro 802.15.4. Jednak zaletą modułów 2,4 GHz jest możliwość uzyskania większej prędkości danych. Osiągnięte zasięgi są zadawalające, i w przypadku zastosowania modułów do komunikacji z pojazdami bezzałogowymi powinny osiągnąć się większe odległości, ze względu na brak jakichkolwiek przeszkód.

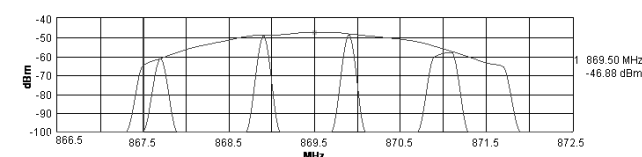
Obydwa zaprezentowane moduły są zgodne z obowiązującym prawem. Jednak w przypadku pasma 868 MHz należy zwrócić uwagę na fakt, iż w rozporządzeniu Ministra Transportu [8] okre-

ślono, że dla urządzeń o 10% zajętości pasma minimalna przerwa pomiędzy kolejnymi aktywnościami nadajnika wynosi 3,6 s. Fakt ten powoduje, iż celowa jest implementacja w układzie modułu do wykrywania nośnej, dzięki czemu ma zastosowanie zasada LBT (ang. Listen Before Talk).

Dalsze prace z modułami radiowymi będą prowadzone w kierunku wykorzystania modułów Xbee do zastosowania, jako alternatywnego sposobu sterowania pojazdem bezzałogowym w razie utraty zasięgu podstawowego źródła sterowania. Problem ten jest niezwykle istotny z punktu widzenia bezpieczeństwa. Plany dotyczą także budowy anteny kierunkowej zamontowanej na ruchomej platformie, która będzie śledziła poruszający się pojazd.



Rys. 1. Analiza widmowa w odległości 4 m dla modułu Xbee-Pro 868 MHz
Fig. 1. Spectral analysis at a distance of 4 m for the Xbee-Pro module 868 MHz



Rys. 2. Analiza widmowa w odległości 20 m dla modułu Xbee-Pro 868 MHz
Fig. 2. Spectral analysis at a distance of 20 m for the Xbee-Pro module 868 MHz

6. Literatura

- [1] Tariov A., Maciaszczyk R., Dębski I., Antosik A.: Mikroprocesorowa czterowirnikowa platforma latająca, czterowirnikowa platforma latająca Pomiary, Automatyka, Kontrola Vol. 57, nr 8 (2011), s. 836-838.
- [2] Xiaoyan Fang, Dipak Ghosal: Analyzing Packet Delay Across A GSM/GPRS Network, <http://www.cs.ucdavis.edu/research/tech-reports/2003/CSE-2003-3.pdf>, dostęp dnia 20.02.2012.
- [3] XBee - RF Family Comparison Matrix http://www.digi.com/pdf/chart_xbee_rf_features.pdf – dostęp 20.02.2012.
- [4] Product Manual: XBee-PRO 868 RF Modules, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001020_B.pdf – dostęp 20.02.2012.
- [5] Product Manual: XBee / XBee-PRO 802.15.4 RF Modules, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_F.pdf – dostęp 20.02.2012.
- [6] Gawryluk A.: Modemy ZigBee firmy MaxStream, Elektronika Praktyczna 4/2007, str. 69-70.
- [7] Zarządzenie Nr 22 Prezesa Urzędu Komunikacji Elektronicznej z dnia 17 września 2007 r. w sprawie planu zagospodarowania częstotliwości dla zakresu 868 – 870 MHz, Dziennik Urzędowy Urzędu Komunikacji Elektronicznej Nr 27 z 28 września 2007 pozycja 140.
- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu z dnia 3 lipca 2007 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego, Dziennik Ustaw nr 138 Poz 972, str. 10051-10071.
- [9] Zarządzenie Nr 36 Prezesa Urzędu Komunikacji Elektronicznej z dnia 30 listopada 2007 r. w sprawie planu zagospodarowania częstotliwości dla zakresu 2400 – 2483,5 MHz, Dziennik Urzędowy Urzędu Komunikacji Elektronicznej Nr 32 z dnia 13 grudnia 2007 r. pozycja 183.
- [10] XBee Explorer USB, <http://www.sparkfun.com/products/8687> - dostęp 20.02.2012.
- [11] XBee Explorer Regulated, <http://www.sparkfun.com/products/9132> - dostęp 20.02.2012.

otrzymano / received: 26.04.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.06.2012

artykuł recenzowany / revised paper