

## OGRANICZENIA TECHNOLOGII BLUETOOTH PODCZAS TRANSMISJI DANYCH W UKŁADACH MASTER-SLAVE

*W pracy przedstawiono główne cechy różnych technologii bezprzewodowej transmisji danych w paśmie 2,4 GHz. Szczególną uwagę poświęcono technologii Bluetooth. Zasygnalizowano problem związany z pracą torów radiowych wykorzystujących nadawanie w rozproszonym paśmie. Przedstawiono wyniki badań opóźnienia wnoszonego przez tor radiowy wykorzystujący technologię Bluetooth, w porównaniu ze zwykłymi układami pracującymi na jednej częstotliwości.*

### 1. Wstęp

Znaczna część danych na świecie przesyłana jest za pomocą sieci przewodowych – telefony stacjonarne, systemy oparte na kablach koncentrycznych, sieci lokalne i te części Internetu, które wykorzystują połączenia kablowe. Większość stacji telewizyjnych podłączona jest do systemów telewizji kablowej, również przeważająca część komputerów pracujących w sieci, korzysta z linii telefonicznych lub sieci przewodowych takich jak Ethernet. Nawet telefony przenośne i komórkowe przy zestawianiu połączenia pomiędzy dwoma punktami bazują na kablowych systemach telefonicznych. Tym nie mniej, koncepcja komunikacji bezprzewodowej nie jest czymś nowym. Najpopularniejszymi systemami komunikacji bezprzewodowej są emisje sygnałów radiowych i telewizyjnych. To również telewizja satelitarna, czy telefony komórkowe. Większość tych przykładów opiera się na wykorzystaniu fal radiowych. Mogą być również stosowane systemy łączności oparte na technice laserowej, czy podczerwieni, jednak wymagają one widoczności optycznej, lub też promieniują sygnał tylko w ściśle określonym kierunku. Pod tym względem wykorzystanie fal radiowych daje dużo większe możliwości. Pożądaną charakterystykę promieniowania (dokólną lub kierunkową) można elastycznie kształtować w zależności od zastosowanych anten, natomiast łączność radiowa w wielu zastosowaniach może być ustanawiana bez konieczności zapewnienia widzialności optycznej, bowiem fale elektromagnetyczne tylko częściowo są tłumione przez budynki, ściany, czy obudowy urządzeń, itd.

### 2. Komunikacja bezprzewodowa na częstotliwościach radiowych

Zasady komunikacji radiowej, obejmującej przydziały częstotliwości, dopuszczalne poziomy mocy sygnałów emitowanych przez nadajniki, itp. regulują stosowne przepisy i koncesje. Jednak istnieje obszar fal radiowych, przeznaczony do nielicencjonowanego wykorzystania. Do najważniejszych z nich należą pasma: 27 MHz, 433 MHz, 868 MHz, 2,4 GHz i 5,4 GHz. W Polsce zasady korzystania

z wymienionych pasm reguluje rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 sierpnia 2002 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych i nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia opublikowane w Dzienniku Ustaw Nr 138 poz. 1162. Zgodnie z tym rozporządzeniem, w podanych pasmach częstotliwości można nadawać bez konieczności uzyskania dodatkowych pozwoleń pod warunkiem, że moc promieniowania nadajnika nie przekracza dopuszczalnego poziomu. Dla każdego pasma jest ona podawana oddzielnie.

Możliwość bezlicencjonowanego korzystania z radiowej łączności bezprzewodowej została szeroko wykorzystana zarówno w przemyśle, do kontroli procesów automatyki produkcji, jak również w sprzęcie powszechnego użytku (alarmy, systemy kontroli dostępu, łączność CB, multimedia).

Obecnie pasmo 27 MHz wykorzystywane jest głównie przez urządzenia łączności CB radio. Częstotliwości w zakresie 433 i 686 MHz, to systemy alarmowe, automatyka i sprzęt powszechnego użytku. Pasmo 2,4 GHz i 5 GHz to dziedzina bezprzewodowych sieci komputerowych, oraz zastosowań najnowszej technologii w dziedzinie bezprzewodowego połączenia urządzeń multimedialnych, urządzeń domowych, podłączania urządzeń peryferyjnych PC, medycznych itp. W zakresie najwyższych częstotliwości istnieje kilka standardów łączności.

### **Wi-Fi**

Nazwa „Wi-fi” nie dotyczy właściwie standardu, a raczej technologii, która dedykowana jest głównie do transmisji danych, na średnie i duże odległości (kilkadziesiąt metrów – kilka kilometrów). Pod swym określeniem kryje on właściwie trzy standardy bazujące na specyfikacji 802.11 opublikowanej przez IEEE w 1997 roku. Specyfikacja standardu, oraz jego implementacja w urządzeniach predysponuje go transmisji TCP/IP w bezprzewodowych sieciach komputerowych. Taki też zamysł przyświecał jego twórcom – wyeliminowanie kabli połączeniowych kategorii 5 w sieciach komputerowych. Wyprodukowano już miliony egzemplarzy bezprzewodowych kart sieciowych, czy też punktów dostępowych, a obecnie „bezprzewodowość” laptopów, czy komputerów kieszonkowych PDA jest prawie standardem. Pojęcie „Wi-Fi” obejmuje swym znaczeniem trzy specyfikacje:

- 802.11b o prędkości przesyłania 11Mbps z wykorzystaniem technologii DSSS<sup>1</sup> w paśmie 2,4 GHz. Urządzenia automatycznie mogą dostosowywać szybkość transmisji (1, 2, 5,5 lub 11 Mbps) w zależności od jakości i mocy sygnału.
- 802.11g o prędkości przesyłania 54 MHz z kodowaniem OFDM<sup>2</sup> w paśmie 2,4 GHz. W celu zapewnienia zgodności ze standardem 802.11b urządzenia mogą być przełączane do pracy z kodowaniem DSSS.
- 802.11a o prędkości przesyłania 54 MHz z kodowaniem OFDM, ale w paśmie 5 GHz.

### **Bluetooth**

---

<sup>1</sup> DSSS – ang. Direct Sequence Spread Spektrum – rozpraszanie widma za pomocą kluczkowania bezpośredniego.

<sup>2</sup> OFDM – ang. Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ortogonalne zwielokrotnianie w dziedzinie częstotliwości.

W odróżnieniu od Wi-Fi, Bluetooth miał za zadanie wyeliminować wszystkie inne kable połączeniowe pomiędzy komputerem, a urządzeniami peryferyjnymi (drukarkami, klawiaturą, myszą itp.). Urządzenia tej technologii pracują również w paśmie 2,4 GHz, jednak z tzw. przeskokiem częstotliwości. Interfejs radiowy wykorzystuje transmisję z widmem rozproszonym uzyskanym poprzez technikę FHSS<sup>3</sup>, gdzie w sposób losowy następuje zamian częstotliwości nadawania na jednym z spośród 79<sup>4</sup> kanałów radiowych. Sumaryczny czas przebywania na jednej częstotliwości w ciągu 30s nie może przekroczyć 0,4 s, co oznacza, że szybkość przeskoków wynosi ok. 1600 razy na sekundę. Technologia ta posiada zaimplementowane różne protokoły transmisji na różnych warstwach i w różnych aplikacjach (transmisja danych, transmisja audio, protokół wyszukiwania usług SDP, wirtualny port szeregowy RFCOM, protokół IrDA, specyfikacja obsługi telefonii TCS, USB, RS232, UART, TCP, UDP, HTTP). Z wykorzystaniem technologii Bluetooth powstała tzw. sieć osobista PAN<sup>5</sup> łącząca takie urządzenia jak telefony komórkowe, aparaty fotograficzne, drukarki, palmtopy, klawiatury, myszy i oczywiście komputery. Należy jednak mieć na uwadze, że obecnie graniczna szybkość tej technologii to 1MB/s, więc wykorzystanie jej do łączenia komputerów z Internetem jest mało celowe. Natomiast idealnie nadaje się do jednoczesnej transmisji danych i głosu na niewielkie odległości. Typowy zasięg urządzeń Bluetooth wynosi 10 m, choć znane są rozwiązania urządzeń o zasięgu 30, a nawet 100 m.



Rysunek nr 1. Przykłady urządzeń wykorzystujących technologię Bluetooth (od lewej: łącze bezprzewodowe RS232, bezprzewodowy print-server, słuchawka bezprzewodowa).

## **GPRS**

Jest to usługa transmisji danych dostępna w sieciach pracujących w technologii GSM. Początkowo szybkość transmisji danych wynosiła 9600 bps. Obecnie może ona sięgać 300Kbps. GPRS jest protokołem transmisji pakietowej, co oznacza, że urządzenie nadaje tylko wówczas, gdy ma dane do wysłania. Pozwala to na oszczędność zasilania i minimalizację kosztów. Jest to usługa płatna wobec operatora sieci GSM. Technologia ta jest alternatywą, gdy dostępne rozwiązania za pomocą technologii 802.11 nie spełniają wymogów zasięgowych, lub gdy mamy do czynienia z bardzo dużym rozproszeniem punktów pomiarowym (w skali kraju). Z zasady wyko-

<sup>3</sup> FHSS – ang. Frequency Hopping Spread Spektrum.

<sup>4</sup> Istnieją kraje, gdzie uwarunkowania prawne wymuszają stosowanie mniejszej ilości kanałów.

<sup>5</sup> PAN – ang. Personal Area Network.

rzystywana jest w aplikacjach M2M<sup>6</sup>. Komunikacja M2M między urządzeniami polega na zastosowaniu bezprzewodowej transmisji danych w celu zapewnienia skutecznego i oszczędnego połączenia między systemami, zdalnymi urządzeniami i poszczególnymi osobami. Przykłady bezprzewodowych rozwiązań M2M obejmują automaty do sprzedaży przekazujące dane o stanie towarów i ilości gotówki, urządzenia domowe włączane lub wyłączane za pomocą telefonu komórkowego, zdalne monitorowanie służb użyteczności publicznej, samochody automatycznie wzywające pomocy, komputery przenośne i urządzenia PDA z bezprzewodowymi modemami umożliwiającymi dostęp do Internetu, stacje meteorologiczne, systemy ochrony budynków.



**Features:**

- Dual Band EGSM 900/1800 MHz (GT47) or GSM 850/1900 MHz (GT48)
- Size (excluding connectors): 77 x 67 x 26 mm
- Weight (including shielding): <130 grams
- Data, Fax, SMS and Voice
- HSCSD (2+1), up to 19.2 kbps
- MS Class B, GPRS Class 8 & P Channels
- Integrated TCP/IP stack
- Type Approved for GSM phase 2+ standards (GT47) / FCC/PTCRB approved (GT48)
- -30°C to +75°C operation

Rysunek nr 2. Przykłady urządzenia firmy SONY/Ericson z serii M2M (na zdjęciu gotowe rozwiązanie Terminala GT47/GT48 GSM/GPRS z widocznym złączem RS232, złączem antenowym i miejscem na kartę SIM).

**ZigBee**

Jest to technologia bezprzewodowej transmisji danych zbliżona do Bluetooth. Jej specyfikacje obejmuje standard IEEE 802.15.4. ZigBee zapewnia transfer na poziomie od 20 Kb/s przy paśmie 868 MHz do 250 Kb/s przy paśmie 2,4 GHz. Zasięg urządzenia może wynieść nawet 30 metrów. Bluetooth, szybszy, bo zdolny transmitować dane nawet z prędkością 1 Mb/s działa bez wzmocnienia na odległości około 10 m. Zastosowania, jakie planowane są dla urządzeń wykorzystujących ZigBee to między innymi zabezpieczenia domu, zdalnie sterowane termostaty, zdalna obsługa oświetlenia, uniwersalne piloty dla systemów audio-wideo, bezprzewodowe klawiatury, myszy i kontrolery do gier, bezprzewodowe wykrywacze dymu, zabawki itp. Cena pojedynczych układów z tą technologią jest ok. dwukrotnie mniejsza, podobnie jak mniejszy pobór prądu. Z tego powodu Bluetooth może zostać wyparty przez ZigBee, za wyjątkiem aplikacji związanych z transmisją audio.

Przykładem nowego rozwiązania w tej dziedzinie jest układ CC2420 firmy Chipcon. Jest to pierwszy transceiver na pasmo 2,4 GHz zgodnym ze standardem IEEE 802.15.4 Został on wykonany w nowoczesnej technologii CMOS SmartRF-03 0,18um. Charakteryzuje się niewielkim poborem mocy, niską ceną i niewielką liczbą elementów zewnętrznych niezbędnych do jego prawidłowej pracy. Dzięki tym cechom, CC2420 jest optymalną propozycją dla wszelkich dwukierunkowych torów radiowych, zwłaszcza gdy projektantowi zależy na utrzymaniu niewielkich wymiarów urządzenia.

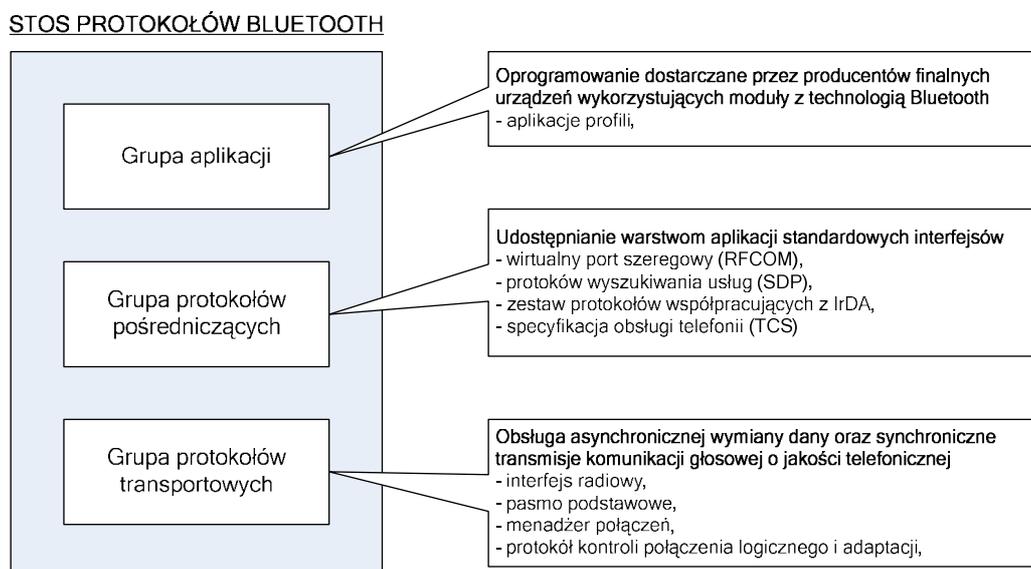
<sup>6</sup> M2M – ang. Machine-to-machine.

Oprócz przytoczonych wyżej standardów i technologii istnieje szeroka grupa urządzeń i układów do ich budowy, która wykorzystuje do bezprzewodowej transmisji danych pasmo radiowe 433 MHz lub 868 MHz. Transmisja w tych pasmach nie została nigdy specjalnie poddana procesom standaryzacji w celu ujednoczenia protokołów transmisji. Każdy z producentów może właściwie zaimplementować dowolny algorytm kodowania i stosować dowolny rodzaj modulacji.

### 3. Ograniczenia technologii *Bluetooth*

Grupa Bluetooth Special Interest Group (SIG) została założona w 1998 roku przez firmy Ericson, Intel, IBM, Nokia i Toshiba. Jej celem było opracowanie globalnego, otwartego standardu bezprzewodowej komunikacji o małym zasięgu na częstotliwościach radiowych<sup>7</sup>. Grupa SIG opublikowała specyfikację interfejsu radiowego Bluetooth oraz warstwę pasma podstawowego wraz z zestawem odpowiednich protokołów komunikacyjnych, zawartych w programowym stosie protokołów, wykorzystywanym przez sprzęt warstwy radiowej Bluetooth. Projekt modułu radiowego zoptymalizowano pod kątem bardzo niskiego poboru mocy, niewysokich kosztów, niewielkiego pokrycia radiowego oraz możliwości wykorzystania w dowolnej części świata.

Zasadnicza część specyfikacji Bluetooth koncentruje się na stosie protokołów, który pozwala urządzeniom na wzajemne lokalizowanie i łączenie się, a także umożliwia wymianę danych z każdym z nich. Główne elementy stosu protokołów Bluetooth przedstawia rys. 3.



Rysunek 3. Ogólny podział stosu protokołów Bluetooth.

Wykorzystując technologię Bluetooth do bezprzewodowej wymiany danych nie ma potrzeby szczegółowej znajomości jej specyfikacji<sup>8</sup>. Konstruowane urządzenia, lub aparatura pomiarowa może wykorzystywać funkcjonalność bezprzewodowej wymiany danych w tej technologii w oparciu o gotowe urządzenia Bluetooth, moduły

<sup>7</sup> Brent A. Miller, Bluetooth – uwolnij się od kabli.

<sup>8</sup> Liczy ona 1500 stron – tylko dla pierwszej specyfikacji 1.0, bez poprawek i uzupełnienia.

z wymaganymi interfejsami, czy też same układy radiowe.



Rysunek 4. Przykłady rozwiązań gotowych modułów i urządzeń radiowych wykorzystujących technologię Bluetooth ( od lewej: moduł firmy Bluegiga z interfejsem i W-RAP ASCII oraz PCM, moduł firmy ConnectBlue z interfejsem RS232, Serial Port Adapter RS422).

Główne cechy transmisji radiowej urządzeń z technologią Bluetooth to:

- nielicencjonowane pasmo pracy ICM (2,4 ÷ 2,48 GHz);
- transmisja z widmem rozproszonym metodą skakania po częstotliwościach,
- szerokość kanału częstotliwości 1MHz,
- ilość kanałów 79 (lub 23),
- przynajmniej 75 z 79 kanałów musi być wykorzystywana w sposób pseudolosowy,
- czas pozostawania na jednej częstotliwości nie może przekroczyć 0,4 s w ciągu 30 sekund,

Przy pełnej ilości wykorzystywanych kanałów interfejs radiowy wykona 1600 przeskoków na sekundę w sposób pseudolosowy, w pełnym zakresie częstotliwości, dzięki czemu uzyskuje się dobry efekty szumowy, przy czym okres pozostawania na jednej częstotliwości wynosi ok. 625  $\mu$ s.

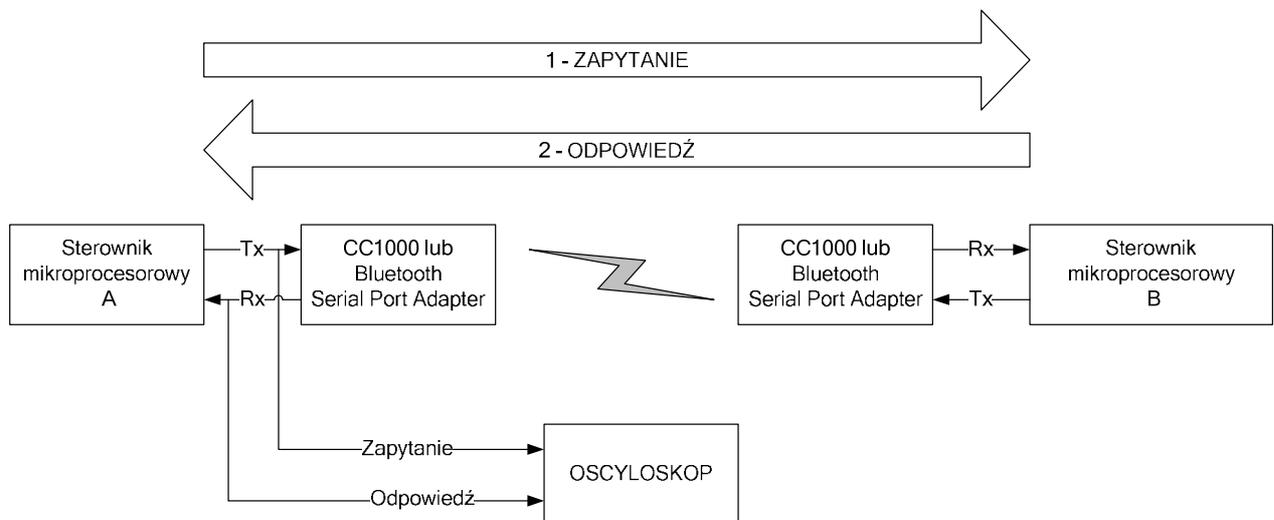
Urządzenia mogą komunikować się ze sobą tylko w sytuacji, gdy każde z nich w tym samym czasie dobiera taką samą częstotliwość i nadaje na niej. W każdej Sieci bluetooth, nawet złożonej tylko z dwóch urządzeń, jedno z nich spełnia rolę nadrzędnego (master), który m.in. odpowiada za realizację procedury doboru kolejnej częstotliwości.

W pewnych aplikacjach specyfika technologii Bluetooth, polegająca na losowym przeskakiwaniu częstotliwości może być przeszkodą w jej zastosowaniu. Zmiany częstotliwości muszą być skoordynowane w obydwu urządzeniach. W efekcie istnieje pewien kwant czasu potrzebny na zsynchronizowanie się dwóch urządzeń ze sobą. Czas ten wprowadza opóźnienie pomiędzy nadawaniem, a odbiorem transmitowanych danych. Proces doboru częstotliwości zachodzi pod wpływem różnorodnych warunków zewnętrznych. Przy kolejnym przeskoku częstotliwości, może nastąpić sytuacja braku możliwości przesłania pojedynczego pakietu informacji ze względu na zajętość bieżącego kanału przez inną sieć radiową pracującą w paśmie 2,4 GHz, lub wysoki poziom zakłóceń w tym kanale. Przesłanie elementarnego pakietu może nastąpić dopiero z chwilą kolejnego przeskoku, na kolejną częstotliwość.

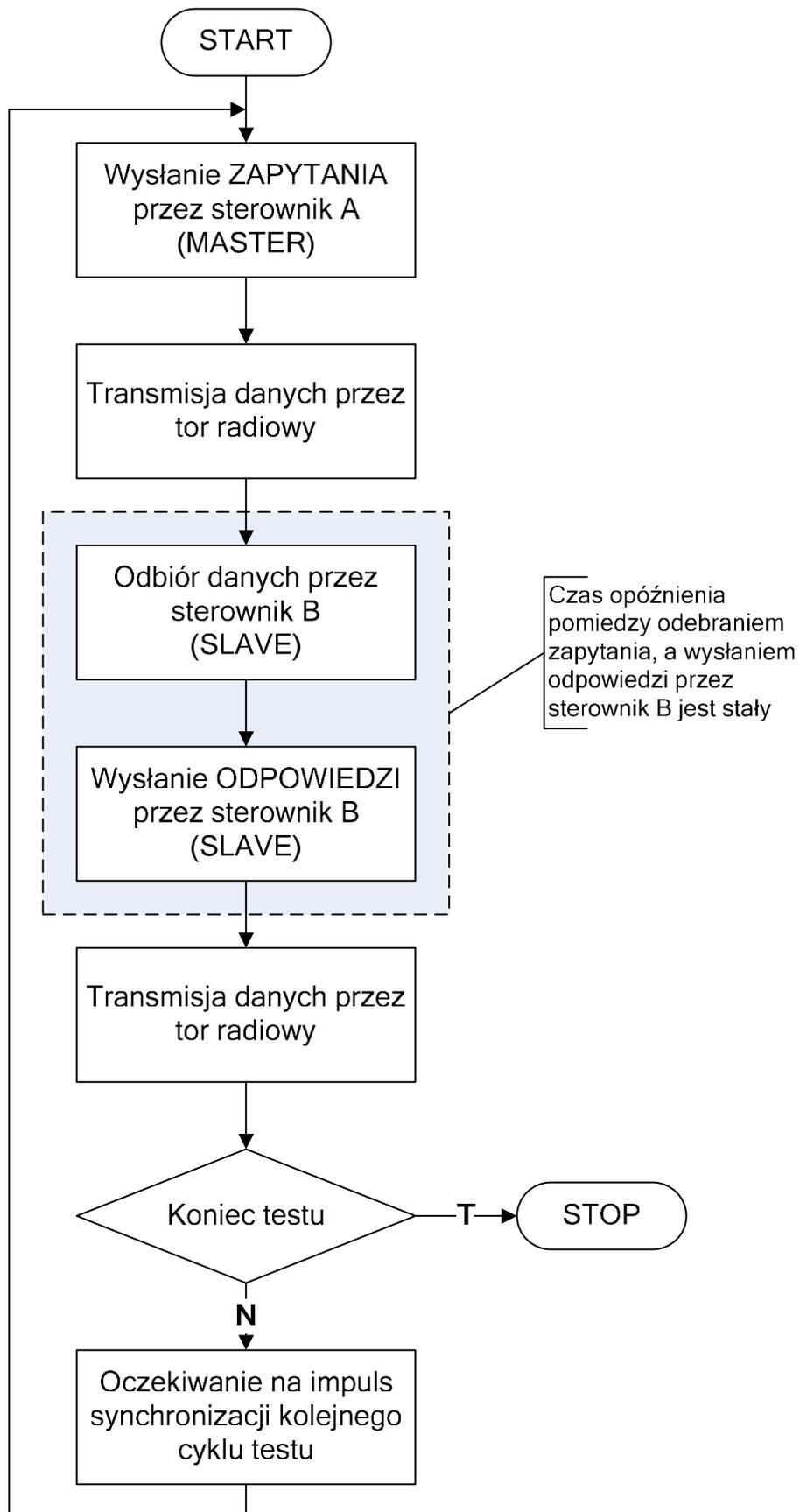
Z tych względów nie jest możliwe wykorzystanie układów radiowych Bluetooth do transmisji danych, gdy wymagana jest ścisła synchronizacja przesyłanych pakie-

tów danych z badanym obiektem, oraz w aplikacjach kładących nacisk na minimalizację opóźnienia transmisji danych.

Pomiary wykonano wykorzystując dwa rodzaje torów radiowych. Pierwszy oparty na układach transmisji bezpośredniej zbudowany w oparciu o scalone transceiver'y CC1000 firmy Chipcon. W drugim wykorzystano gotowe urządzenia do bezprzewodowej transmisji danych z interfejsem portu szeregowego RS232 – Serial Port Adaptery firmy ConnectBlue. Układy z transmisją bezpośrednią, w przeciwieństwie do układów Bluetooth pracują na jednej, wybranej częstotliwości. Badania przeprowadzono w układzie pokazanym na rysunku 5. Badanie czasu transmisji danych drogą radiową z wykorzystaniem łącza radiowego Bluetooth przeprowadzono zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 6.



Rys. 5. Układ pomiarowy do badania opóźnień torów radiowych.



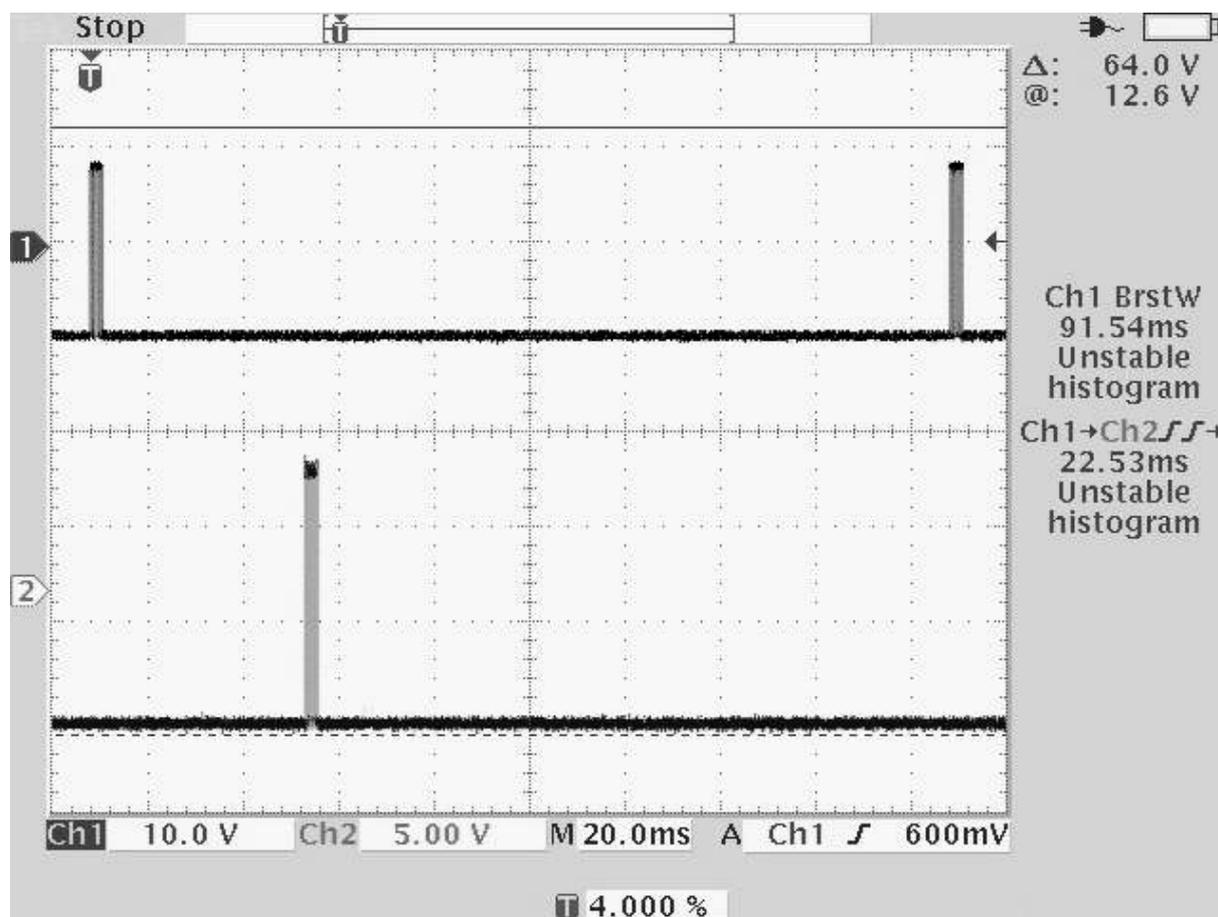
Rys. 6. Algorytm testu podczas badania wpływu toru radiowego na opóźnienia transmisji danych.



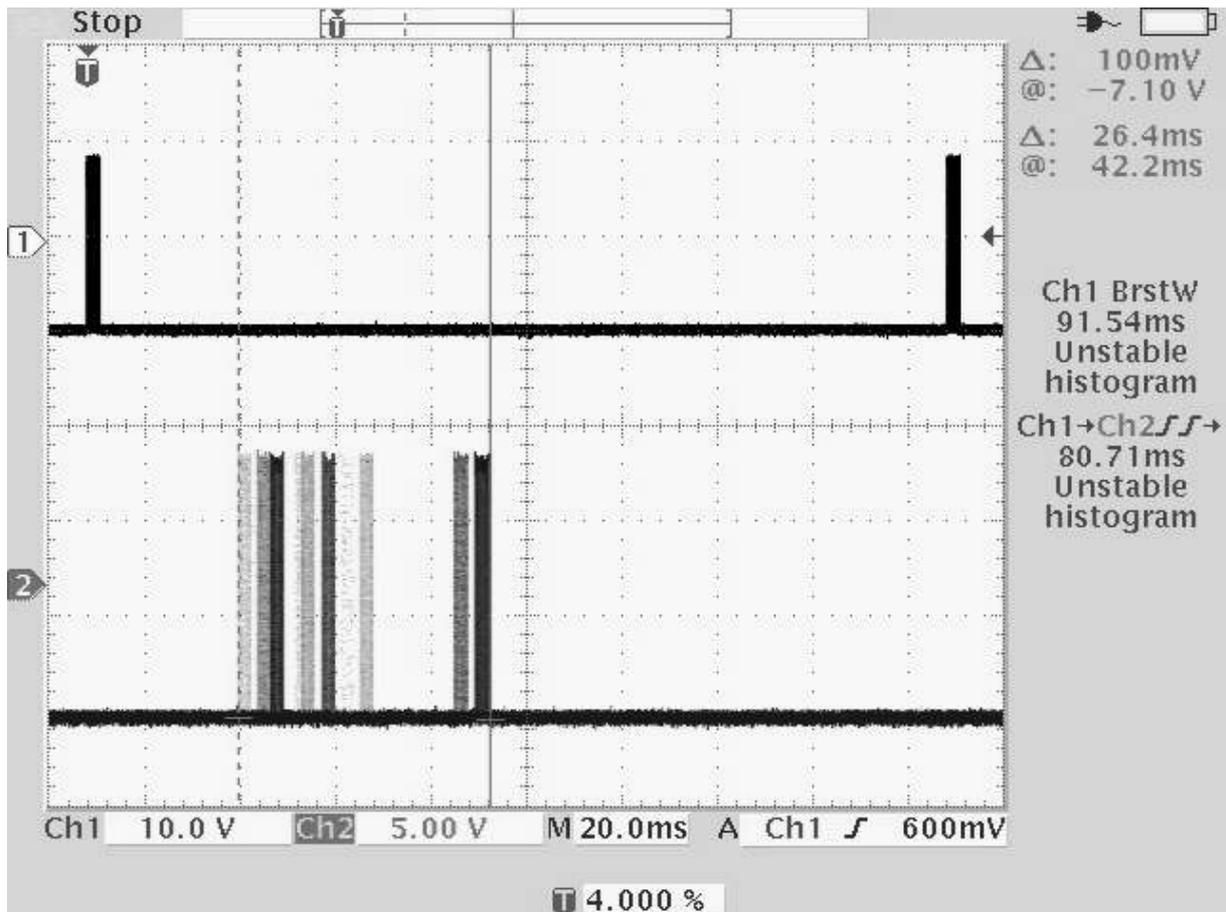
Na dokładność pomiarów zasadniczy wpływ miała dokładność i powtarzalność opóźnienia pomiędzy odebraniem danych przez sterownik mikroprocesorowy B, a czasem wysłania odpowiedzi. W skonstruowanych urządzeniach stabilność ta była na poziomie  $1\mu\text{s}$ , przy czasach opóźnienia całego toru radiowego rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu milisekund.

Wyniki badań opóźnień torów radiowych przedstawiają rysunki 7 i 8. Pomiary wykonano wykorzystując oscyloskop TDS3000B firmy Tektronix. Posiada on funkcję DPO (Digital Phosfor Oscilloscope), która umożliwia wyświetlanie informacji o rozkładzie sygnału w kolejnych cyklach pomiarowych (powtarzalność sygnału). Technologia DPO pozwala wykryć i scharakteryzować wszelkie zaburzenia sygnału, takie jak przypadkowe szpilki czy szum, które pozostałyby zupełnie niezauważone w zwykłym oscyloskopie cyfrowym.

Przedstawione oscylogramy prezentują podstawową różnicę torów radiowych pracujących na jednej częstotliwości i układów wykorzystujących transmisję w widmie rozproszonym. W przypadku wykorzystywania układów Bluetooth czas opóźnienia transmisji przez tor radiowy nie jest stały. Na rys. 8 sygnały odpowiedzi z różnych okresów są przesunięte względem siebie i względem sygnału zapytania.



Rys. 7. Opóźnienie w torze radiowym z transmisją bezpośrednią (układy CC1000).



Rys. 8. Opóźnienie w torze radiowym z transmisją z widmem rozproszonym (Bluetooth Serial Port Adapter).

Podczas testu przesyłano jednorazowo paczkę danych o długości 100 bitów (w każdą stronę). Średni czas transmisji wynosił ok. 45 ms. Rzeczywista prędkość transmisji wynosiła ok. 2,17 kbit/s. Jest to wielkość znacząco odbiegająca od prędkości transmisji danych 921 kbit/s deklarowanych przez producenta.

Otrzymane wyniki pomiarów zmusiły do ponownej analizy samej metody pomiaru. Jednak nie udało się znaleźć ewentualnej przyczyny tak rozbieżnych danych. Ponownie wykonane pomiary z innymi modułami Bluetooth dały prawie identyczne wyniki. W związku z powyższym zwrócono się do producenta modułów firmy ConnectBlue z prośbą o zajęcie stanowiska wobec uzyskanych rezultatów szybkości transmisji danych, tak znacznie odbiegających od ich deklaracji.

W odpowiedzi stwierdzono, że deklarowane maksymalne prędkości transmisji danych na poziomie 921 kbit/s można uzyskać tylko podczas „pracy ciągłej”, gdy strumień danych jest bez przerwy transmitowany. Dwa urządzenia Bluetooth w chwili rozpoczęcia transmisji potrzebują minimalną ilość czasu na zsynchronizowanie generatora przeskoków częstotliwości, dlatego przesłanie jednej paczki danych jest obciążone pewnym czasem opóźnienia, ale przy ciągłym przesyłaniu danych jest on pomijalny.

## 4. Podsumowanie

Transmisja radiowa na bliskie odległości z wykorzystaniem gotowych urządzeń, lub modułów radiowych jest bardzo atrakcyjną możliwością dla konstruktorów. Technologia i urządzenia Bluetooth posiadają zaimplementowane algorytmy i gotowe protokoły transmisji danych, oraz głosu. Jednak decydując się na wykorzystanie tej technologii należy mieć świadomość jej ograniczeń wynikających z pracy torów radiowych w rozproszonym paśmie i konieczności synchronizacji przeskoków częstotliwości.

Według posiadanych informacji, żaden z producentów gotowych urządzeń z tym systemem transmisji nie wymienia czasu opóźnienia potrzebnego do nawiązania łączności i przesłania danych pomiędzy dwoma urządzeniami, nie precyzuje również jego wielkości.

Według własnych badań czas ten dla modułów łącza szeregowo RS232 firmy ConnectBlue wynosi od 5 ms do 40 ms – przy jednokierunkowej transmisji. W przypadku sekwencyjnego przesyłania danych w trybie nadawania/odbiór czas ten wzrasta dwukrotnie, nawet do 80 ms. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że wielkość wspomnianego opóźnienia jest przypadkowa, zależna głównie od warunków propagacji i obecności innych nadajników obecnych w pobliżu, a pracujących w paśmie 2,4 GHz. Ponadto, nawet w tych samych warunkach opóźnienie to może się zmieniać w podanych wcześniej granicach (od nadawania, do nadawania paczki danych). Jest to cecha charakterystyczna urządzeń z technologią Bluetooth, wynikająca z zastosowanej technologii FHSS w łączu radiowym.

### Literatura:

1. B. A. Milller – „Uwolnij się od kabli – Bluetooth”, 2003 r.
2. R. Flickenger – „100 sposobów na sieci bezprzewodowe”,
3. Bluetooth Special Interest Group – „Specification of the Bluetooth System”, 2001r.
4. Bluetooth Special Interest Group – „Bluetooth Qualification Program”, 2001r.
5. IBM Corporation – „Personal Area Networks”, 1996 r.
6. Institute of Electrical and Electronics Engineers – „Wireless Standards Package (802.11)”; 1999 r.
7. Chipcon – „CC1000 Data Sheet”, 2004 r.
8. Chipcon – „CC1000P User Manual v. 1.22”, 2004 r.
9. P. Vizmuller – „RF Design Guide”, 2000 r.
10. S. A. – „Mass Nonlinear Microwave and RF Circuits”, 2004 r.
11. D. K. Misra – „Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits”, 2003 r.