

Mirosław BONIEWICZ, Marek ZIELIŃSKI
 INSTYTUT FIZYKI UNIwersYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA,
 Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

Pomiarowa sieć radiowa o niskim zużyciu energii

Mgr inż. Mirosław BONIEWICZ

Urodzony 29.11.1982. r. w Toruniu. Studia rozpoczął w 2001 roku na kierunku Fizyka Techniczna na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. W latach 2007-2009 studiował dodatkowo na kierunku Automatyka i Robotyka. W latach 2006-2008 należał do Koła Naukowego reprezentując Uniwersytet na Zawodach Robotów Sumo. od 2008 roku jest doktorantem i pracownikiem naukowo-technicznym w Instytucie Fizyki. Sieciami radiowymi zajmuje się od 2005 roku. Praca doktorska jest kontynuacją pracy magisterskiej.



e-mail: m.boniewicz@fizyka.umk.pl

Dr hab. inż. Marek ZIELIŃSKI

Od roku 2003 pracuje na stanowisku profesora nadzwyczajnego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu gdzie jest kierownikiem zakładu Fizyki Technicznej i Zastosowań Fizyki oraz pełni funkcję kierownika Studium Politechnicznego. Dr hab. inż. Marek Zieliński zajmuje się: systemami pomiarowymi, pomiarami wielkości elektrycznych i nieelektrycznych. Jest członkiem IEEE oraz sekcji „Aparatury i Systemów Pomiarowych” Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.



e-mail: marziel@fizyka.umk.pl

Streszczenie

W artykule opisano prace badawcze służące zaprojektowaniu, symulacji i realizacji radiowej sieci pomiarowej charakteryzującej się niskim zużyciem energii. Proponowana sieć ma charakteryzować się równomiernym zużyciem energii przez wszystkie moduły oraz dynamicznym algorytmem trasowania pozwalającym na długotrwałą pracę sieci. W artykule opisano stanowisko służące do badań i kontroli sieci, metodę trasowania, a także sposób symulacji w środowisku Scilab. Podano także parametry charakteryzujące projektowaną sieć, takie jak czasy transmisji i pobór energii.

Słowa kluczowe: sieć radiowa, CC1100, moduł radiowy, Scilab, Metanet, graf skierowany, stanowisko pomiarowe, niskie zużycie energii.

Energy efficient wireless sensor network

Abstract

This paper presents research, design and simulations of an energy efficient wireless sensor network. It describes a routing protocol designed for evenly energy consumption. There is shown how to simulate a network in the Scilab environment. The test wireless sensor network including a measurement station and construction of radio modules are presented. The radio modules consists of Texas Instruments/chipcon's CC1100 transceiver and Atmel's ATmega32 microcontroller. The network can join up to 65535 radio modules (16 bit addressing). The measurement station consists of programmable power supply, an oscilloscope, precise multimeters and a JTAG module. It allows measuring the current consumption in different working modes, checking the time of operations and controlling the radio system. This solution will be used in a wireless water meter network. The most important feature in this application is a long working time (up to 10 years). The even energy consumption should extend the network reliability and its time of work.

Keywords: wireless sensor network, CC1100, radio module, Scilab, Metanet, directed graph, measurement system, low energy consumption.

1. Wstęp

W systemach pomiarowych coraz częściej wykorzystuje się komunikację radiową. Rozwiązania bezprzewodowe stosuje się ze względu na krótki czas instalacji oraz możliwość pomiarów na stanowiskach ruchomych. Zastosowanie przewodowych sieci czujników wiąże się z koniecznością zaprojektowania oraz wykonania instalacji sygnałowych i zasilających. Koszty projektu oraz materiałów często przewyższają cenę urządzeń pomiarowych, a sam montaż może być utrudniony, zwłaszcza w dużych budynkach i w obszarach miejskich, takich jak osiedla domów jednorodzinnych. W przypadku sieci bezprzewodowych uruchomienie systemu polega wyłącznie na konfiguracji modułów. Wady rozwiązań bezprzewodowych to podatność na zakłócenia, niewielki zasięg oraz mniejsza szybkość transmisji w porównaniu z ich klasycznymi odpowiednikami. Sieci czujników bezprzewodowych nadają się głównie do zastosowań w lokalnych systemach pomiarowych.

Bardzo istotnym aspektem projektowania sieci o niskim zużyciu energii jest opracowanie algorytmów trasowania. Algorytmy te, pozwalają na znalezienie drogi pomiędzy dwoma węzłami, w celu przesłania między nimi danych. W przypadku sieci urządzeń pomiarowych zasilanych bateryjnie należy tak dobrać algorytmy trasowania, aby podczas transmisji danych zużyć jak najmniej energii zapewniając w ten sposób jak najdłuższy czas pracy systemu.

2. Cele projektu

Celem badań jest opracowanie nowych metod trasowania w bezprzewodowym systemie pomiarowym, a także zaprojektowanie i wykonanie sieci testowych modułów pomiarowych. System ma służyć do przesyłania niewielkich pakietów danych w relatywnie dużych odstępach czasu. Podstawowym zastosowaniem jest pomiar zużycia mediów takich jak gaz czy woda. Założono brak możliwości doładowywania urządzeń w trakcie pracy lub wymiany źródła zasilania. Algorytmy zostaną sprawdzone w praktyce w testowej sieci pomiarowej. Sieć czujników ma charakteryzować się równomiernym zużyciem energii przez wszystkie moduły pomiarowe. Takie rozwiązanie zwiększy niezawodność całego systemu. Klasycznym sposobem przekazywania danych w sieci jest szukanie trasy o najmniejszej liczbie skoków. Jest to rozwiązanie korzystne ze względu na liczbę obliczeń. Obliczenia najkrótszych tras dla wszystkich punktów pomiarowych wykonywane są tylko raz, a następnie trasy te są wykorzystywane bez żadnych modyfikacji. Rekonfiguracja następuje wyłączenie w razie awarii lub dodania kolejnego węzła sieci. Wadą takiego rozwiązania jest nierównomierne obciążenie transmisją poszczególnych modułów, co wiąże się z nierównym zużyciem energii. Urządzenia, przez które będzie przesyłane najwięcej danych, będą zużywać najwięcej energii. W przypadku zasilania baterijnego spowoduje to ich szybsze wyłączenie i uniemożliwi poprawną pracę systemu. Zastosowany algorytm ma zapobiegać takim zjawiskom. Za każdym razem sieć połączeń będzie rekonfigurowana w zależności od energii, którą już wykorzystano. Reprezentowane jest to przez wagi danych tras aktualizowane w tablicy połączeń. W przesyłanych danych zawarta jest także informacja o stopniu naładowania ogniw zasilających. Umożliwi to wykrycie uszkodzonych ogniw zasilających i przekierowanie ruchu na inne, poprawnie funkcjonujące moduły.

W projekcie przyjęto następujące założenia:

- komunikacja radiowa w paśmie pracy 433 MHz (nielicencjonowane pasmo ISM),
- zasięg pomiędzy modułami co najmniej 30 metrów wewnątrz budynku, do 100 metrów na otwartej przestrzeni,
- maksymalnie 65535 urządzeń (szesnastobitowy adres modułu),

- czas pracy do 10 lat,
- identyczna konstrukcja wszystkich urządzeń w sieci,
- jeden układ nadrzędny podłączony do komputera sterującego i zewnętrznego źródła zasilania,
- możliwość przeprogramowania i diagnostyki dowolnych modułów w sieci,
- transmisja zawsze rozpoczynana przez układ nadrzędny,
- obliczenia trasy wykonywane przez komputer sterujący,
- dane przekazywane poprzez układy pośredniczące – retransmisja danych,
- trasa ustalana za każdym razem w oparciu o zużycie energii poszczególnych modułów

3. Zastosowane rozwiązanie

W celu przeprowadzenia symulacji opracowano program służący do badania pracy sieci pomiarowej. Oprogramowanie napisano w środowisku Scilab z dołączonym pakietem Metanet. Pakiet ten zawiera funkcje umożliwiające wykonywanie obliczeń na grafach wraz z ich wizualizacją.

W celu sprawdzenia metod trasowania w praktyce, zaprojektowano i zbudowano serię modułów radiowych. Wykonano je w oparciu o ośmiobitowy mikrokontroler ATmega 32 oraz układ radiowy CC1100. Układ radiowy został wybrany ze względu na dużą czułość oraz konstrukcję dostosowaną do rozwiązań energooszczędnych. Mikrokontroler wybrano ze względu na duże możliwości regulacji zużycia energii dostępność oprogramowania jak również cenę układu. W najbliższym czasie planowana jest zmiana mikrokontrolera sterującego na układ z rodziny MSP430 firmy Texas Instruments, ze względu na niższe zużycie energii przy porównywalnych pozostałych parametrach pracy.

4. Trasowanie

Trasowanie (*ang. routing*) to wytyczanie trasy w sieci pomiędzy węzłami służące przesłaniu danych. W projektowanym rozwiązaniu najkrótsze trasy pomiędzy układem nadrzędnym i modułami pomiarowymi obliczane są według algorytmu Dijkstry. Sieć reprezentowana jest, jako graf ważony, skierowany. Metoda polega na szukaniu najkrótszej trasy nie według skoków, lecz łącznej długości połączenia. Każde połączenie pomiędzy węzłami opisano przy pomocy krawędzi grafu, której przypisano pewną wagę. Suma wag w trasie odpowiada łącznej odległości pomiędzy węzłami. Wielkość wag jest ustalana na podstawie pomiaru mocy sygnału odebranego (*Received Signal Strength indicator*), poziomu naładowania ogniw zasilających moduły oraz liczby przeprowadzonych transmisji poprzez dane połączenie. Trasa zawsze przebiega od układu nadrzędnego do modułu pomiarowego. Po każdej transmisji wagi połączeń zmieniane są tak, aby nie przesyłać danych za każdym razem tą samą trasą. Dzięki takiemu rozwiązaniu transmisje w sieci spowodują równomierne obciążenie wszystkich modułów. Rozwiązanie wymaga ustalenia metody doboru wag. Algorytm opisujący zmianę wartości wag grafu będzie zależał od konstrukcji modułu. Wynika to z różnego wpływu danych czynników na zużycie energii przez węzły.

Znając pojemność ogniw zasilających i energię potrzebną do dokonania pojedynczej transmisji można oszacować maksymalną liczbę transmisji. W symulacji założono jednakową pojemność wszystkich ogniw. Czas pracy sieci zależy od liczby modułów w sieci, częstotliwości dokonywanych pomiarów oraz zakłóceń występujących podczas transmisji. Badane rozwiązanie przy

założeniu braku błędów transmisji powinno umożliwić pracę przez około 10 lat.

Przeprowadzono dodatkowo symulację innego sposobu pobrania danych z całej sieci. Dla grafu obliczono trasę łączącą wszystkie moduły w sieci – zastosowano algorytm rozwiązujący problem komiwojażera. W tej metodzie każdy moduł zostaje odczytany tylko raz i wysyła swoje dane kolejnemu węzłowi sieci zgodnie z obliczoną wcześniej trasą. Ostatni moduł przekazuje pomiary zebrane z całej sieci. Zaletą jest najmniejsza liczba skoków wymagana do odczytania całej sieci. Jednak wadą takiego rozwiązania jest przesyłanie z każdym krokiem coraz większej liczby danych, co wiąże się z większym zużyciem energii przez dalsze moduły oraz zwiększa prawdopodobieństwo błędnej transmisji. Rozwiązanie takie pozwala na szybsze odczytanie danych, lecz nadaje się do aplikacji niewymagających oszczędności energii. Do dalszych badań przyjęto pierwszą metodę.

5. Symulacje

W celu symulacji działania sieci napisano program w pakiecie Scilab. Program umożliwia generowanie sieci na podstawie podanych przez użytkownika parametrów oraz wprowadzanie późniejszych modyfikacji. Planowane jest dodanie funkcji odczytu danych z rzeczywistej, istniejącej sieci, co pozwoli na sprawdzanie opracowanych rozwiązań w praktyce i porównanie symulacji z działającym systemem. Program pozwala na znalezienie najkrótszych tras do danych urządzeń, sprawdzenie sieci pod kątem spójności oraz wyszukiwanie mostów w opisującym grafie. Mosty to krawędzie grafu, których usunięcie w spójnym grafie spowoduje jego rozspójnienie. Mosty w grafie są reprezentacją połączeń w sieci pomiędzy modułami o największym zużyciu energii, a więc najbardziej podatnych na wyłączenie. Uszkodzenie modułu w takim miejscu uniemożliwi poprawne funkcjonowanie systemu pomiarowego.

W programie, dla porównania, zaimplementowano dwie, wcześniej opisane metody trasowania. Program umożliwia obserwację zmian czasu symulowanej pracy, liczby skoków podczas odczytu oraz łącznego zużycia energii. Możliwa jest również symulacja awarii konkretnych modułów w sieci, co pozwala na sprawdzenie odporności całego systemu na uszkodzenia.

6. Budowa modułu radiowego

W konstrukcji modułu radiowego użyto transceivera CC1100 firmy Texas Instruments. Układ jest przystosowany do pracy w pasmach ISM z zakresu 300 – 1000 MHz. Charakteryzuje się dużą czułością na poziomie -111dBm i szybkości transmisji do 500 kbit/s. Układ posiada szereg funkcji niezbędnych do realizacji projektu takich jak buforowanie danych, sprzętowa identyfikacja adresu, korekcja błędów, tryb *wake-on radio* oraz możliwość wybudzenia układu sterującego z trybu uśpienia.

Układ jest sterowany poprzez magistralę SPI. Charakteryzuje się dużym zasięgiem transmisji. Przy emisji sygnału o mocy 10 miliwatów zasięg teoretyczny w terenie otwartym wynosi 2 km. Praktyczny zasięg na poziomie ziemi wynosi około 200 metrów. Wewnątrz pomieszczeń zasięg wynosi do 70 metrów.

7. Tryb wake-on radio

Wake-on radio to technika oszczędzania energii stosowana w układach radiowych polegająca na cyklicznym włączaniu układu i oczekiwaniu na sygnał radiowy. W przypadku odnalezienia kodu synchronizacyjnego układ zaczyna pobierać dane wybudzając jednocześnie mikrokontroler sterujący. Technika ta pozwala zaoszczędzić energię, ponieważ mikrokontroler może przebywać przez większość czasu w stanie głębokiego uśpienia, a wbudowany w układ odbiornik przez większość czasu pozostaje nieaktywny. Aby możliwa była synchronizacja odbiornika i nadajnika należy tak dobrać czas oczekiwania, aby możliwe było odczytanie w tym czasie bajtów preambuły oraz bajtów

synchronizacyjnych. Przy stosowaniu mechanizmu *wake-on radio* dane są wysyłane kilka razy, aby zwiększyć prawdopodobieństwo odebrania danych. Czas uśpienia odbiornika dobiera się w ten sposób, aby średni pobór mocy podczas cyklu nadawania pakietów danych był zbliżony do średniego poboru mocy odbiornika. Wartość ta zależy od długości ramki danych oraz szybkości transmisji. Do ustalenia tych czasów stosuje się odpowiednie rejestry układu. Wbudowany generator odpowiadający za taktowanie systemu *wake-on radio* charakteryzuje się niską stabilnością. Jego częstotliwość silnie zależy od napięcia zasilania i temperatury. Przy dłuższych okresach oczekiwania należy dokonywać kompensacji częstotliwości generatora.

8. Stanowisko pomiarowe

Badania modułów radiowych są prowadzone na zaprojektowanym stanowisku, które, oprócz pomiarów, pozwala sterować całą siecią. Stanowisko zbudowano w oparciu o oscyloskop, dwa multimetry oraz zasilacz programowalny. Urządzenia są sterowane przy pomocy komputera w środowisku LabVIEW. Komunikacja z przyrządami pomiarowymi odbywa się poprzez interfejs USB, a w przypadku zasilacza, poprzez interfejs RS-232. Oprogramowanie komputera umożliwia pomiar zużytej energii, zmianę napięcia zasilania, zmianę trybu pracy badanego modułu oraz wysyłanie i odbieranie danych. Dodatkowo zaimplementowano funkcję automatycznego wyznaczania charakterystyki rozładowania ogniw zasilających. Pozwala to na oszacowanie czasu pracy systemu przy zastosowaniu konkretnego typu zasilania.

Podczas badań ważny jest czas wykonywanych operacji przez moduł radiowy oraz chwilowa moc, jaką pobiera. Czas mierzony jest za pomocą oscyloskopu (generowane impulsy na jednym z wyprowadzeń testowych układu) lub poprzez złącza JTAG procesora (niektóre funkcje mikrokontrolera sterującego).

Minimalne napięcie zasilania układu wynosi obecnie 2,6 V, jednak po wymianie procesora będzie możliwe obniżenie napięcia zasilania do 1,8 volta. Badania zużycia energii przeprowadzono dla dwóch najważniejszych trybów pracy procesora - aktywny (*active*) oraz głębokie uśpienie (*power down mode*). W przypadku układu radiowego zmierzono wszystkie tryby pracy - tryb gotowości (*idle*), odbioru (*receive*), nadawania (*transmit*), głębokiego uśpienia (*power down*) oraz tryb cyklicznego wybudzania (*Wake-on Radio*). Pobór mocy w trybie *Wake-on Radio* zależy od ustawień czasu oczekiwania i aktywności, a także od wykorzystania kanału radiowego przez inne urządzenia. Poziom poboru mocy w trakcie odbioru danych zależy od wzmocnienia wejściowego wzmacniacza. Różnice nie są wielkie i wynoszą kilka miliamperów. Bardzo dużą różnicę zaobserwowano w trakcie nadawania. Pobór energii w tym trybie silnie zależy od mocy sygnału nadawanego. Zmniejszając odległość między węzłami sieci można zwiększyć czas pracy urządzeń kilkakrotnie.

W badaniach zmierzono czasy poszczególnych sekwencji programu oraz ilość energii potrzebnej na wykonanie danej sekwencji. Mikrokontroler pracuje przy częstotliwości 8 MHz. Komunikacja między modułem radiowym a mikrokontrolerem przebiega synchronicznie z szybkością 2 Mbit/s. Zużycie energii zbadano dla układów pracujących z napięciem od 2,6 V do 3,6 V. Przyjęto wyniki pomiarów dla napięcia zasilania 2,6 V.

9. Pomiary

Przeprowadzono pomiary zużycia energii oraz czasu trwania różnych faz pracy. Przyjęto następujące założenia:

- taktowanie procesora 8 MHz,
- współczynnik wypełnienia dla trybu Wake-on radio 1%,
- napięcie zasilania 2,6V,

- szybkość transmisji 2,4 kbit/s,
- transmisja nie wymaga potwierdzenia,
- ramka danych składa się z 30 bajtów danych i 10 bajtów dodatkowych (adres, długość ramki, CRC, poziom naładowania, synchronizacji),
- podczas transmisji radiowej mikrokontroler jest usypiany i pracuje wyłącznie podczas inicjalizacji, sterowania modułem radiowym oraz przy przetwarzaniu danych,
- układ pracuje bez żadnych urządzeń zewnętrznych.

Tabela 1. zawiera wyniki pomiarów czasu trwania oraz ilość energii zużytej w konkretnych fazach pracy. Dla porównania ogniwo R6 o pojemności 2000 mAh magazynuje energię o wartości około 9 kJ.

Tab. 1. Zużycie energii w różnych fazach pracy
Tab. 1. Energy consumption during different modes of operation

faza działania	czas	zużyta energia
inicjalizacja	102 ms	1,5 μ J
nadanie ramki danych	20 ms	1,8 μ J
odebranie ramki danych	20 ms	0,95 μ J
Praca w trybie Wake-on radio	1 rok	1500 mJ
przełączenie w tryb nadawania	89 μ s	1,35 nJ
przełączenie w tryb odbioru	89 μ s	1,35 nJ

10. Podsumowanie

Projektowana sieć radiowa docelowo ma służyć akwizycji danych z mierników zużycia mediów, między innymi wodomierzy. Algorytm trasowania zastosowany w projekcie pozwala na zrównoważenie poboru energii przez całą sieć, co przyczyni się do zmniejszenia kosztów serwisowania i wydłużenia czasu pracy. Obecne wyniki pozwalają oszacować działanie sieci na około 10 lat. Dalsze prace będą skupiać się na zapewnieniu bezpieczeństwa przesyłanych danych oraz szyfrowaniu transmisji. Zostanie także zmieniona konstrukcja modułu pod kątem zastosowania nowego mikrokontrolera. Wyniki pomiarów wyraźnie wskazują na zasadność stosowania techniki *wake-on radio* oraz na potrzebę dynamicznego dopasowywania mocy sygnału nadawanego. Należy również zbadać metody doboru wag połączeń w sieci oraz ich wpływ na jej funkcjonowanie.

11. Literatura

- [1] Kurytnik I., Karpiński M.: Bezprzewodowa transmisja informacji. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2008.
- [2] Lachowicz C.: Matlab Scilab Maxima. Opis i przykłady zastosowań. Oficyna Wydawnicza, Opole 2005.
- [3] Baranowski R.: Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce, BTC, Warszawa 2005.
- [4] SWRS038D - Dokumentacja techniczna układu CC1100, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1100.pdf>
- [5] He Y, Flikkema P.: System-Level Characterization of Single Chip Radios for Wireless Sensor Network Applications, IEEE.
- [6] Wilamowski B. M., David I.J.: The Industrial Electronics Handbook. CRC Press, Boca Raton FL, 2011.