

**Mirosław BONIEWICZ, Marek ZIELIŃSKI**

INSTYTUT FIZYKI, UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA,  
Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

## Metoda zrównoważonego zużycia energii w bezprzewodowej sieci pomiarowej

Mgr inż. Mirosław BONIEWICZ

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.



e-mail: marziel@fizyka.umk.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę zrównoważenia zużycia energii w bezprzewodowej sieci pomiarowej. W przypadku rozwiązań bezprzewodowych istotnymi aspektami są zużycie energii oraz zrównoważenie zużycia energii. Opisano metody i wyniki symulacji pracy sieci przy klasycznym rozwiązaniu oraz przy zastosowaniu opracowanej metody. Wykazano czterokrotne zmniejszenie rozrzutu energii w sieci przy niewielkim wzroście łącznego zużycia energii. Opracowane rozwiązanie jest testowane na prototypowej sieci pomiarowej.

**Słowa kluczowe:** Bezprzewodowa sieć pomiarowa, równomierne zużycie energii, algorytm trasowania.

### Energy balanced method in wireless sensor network

#### Abstract

In this paper there is described the routing algorithm for wireless sensor networks. Energy consumption is very important for self-powered radio nodes. But in some applications energy balancing is more important. Wireless sensor networks used in large areas like farmlands or warehouses consist of hundreds of nodes. In classic methods routing is directed to short time of transmission or low energy consumption. But unbalanced energy consumption can often cause unpredictable failures because of lack of energy in frequently used nodes. Energy balancing prevents this behavior by dynamic bypassing the used nodes. The paper presents five methods for reducing energy consumption and a new method for energy balanced routing. The advantages and disadvantages of the methods are described. Fig. 1 shows the algorithm diagram. The performed simulations show almost four times smaller energy consumption deviation than the deviation in classic routing method. The energy balancing can be improved by changing the sequence of transmission.

**Keywords:** wireless sensor network, balanced energy consumption, routing algorithm.

### 1. Wstęp

Bezprzewodowe sieci pomiarowe (ang. *Wireless Sensor Networks*) wykorzystywane są w wielu dziedzinach techniki. Znajdują zastosowanie w sytuacjach, gdzie montaż sieci przewodowej jest utrudniony lub zbyt kosztowny. Sieci bezprzewodowe stosuje się na rozległych obszarach takich jak pola uprawne czy hale magazynowe. Instalacja takich systemów jest tańsza niż sieci przewodowej, a jej serwisowanie znacznie łatwiejsze.

Ze względu na specyfikę zastosowań sieci czujnikowych, ich węzły muszą być zasilane z wewnętrznych źródeł. Czas pracy sieci wynosi przeciętnie kilka lat, a liczba węzłów pomiarowych często przekracza kilkadziesiąt. Serwisowanie sieci i wymiana źródeł zasilania jest kosztowna i czasochłonna. Z tego powodu istotnym problemem jest ograniczenie zużycia energii. Czas pracy zależy także od stopnia równomierności obciążenia sieci, co wymaga zastosowania specjalnych algorytmów trasowania.

Autor zaprojektował i wykonał bezprzewodową sieć pomiarową pracującą w paśmie ISM 433 MHz. System jest wykorzystywany do badań algorytmów trasowania oraz metod redukcji zużycia energii. Przedstawione rozwiązania zostały zaimplementowane w opracowanym systemie.

### 2. Metody ograniczenia zużycia energii w układach radiowych

Zużycie energii w sieciach bezprzewodowych można zredukować stosując następujące metody:

- obniżenie napięcia zasilania,
- zwiększenie szybkości transmisji danych,
- zastosowanie kompresji danych,
- wykorzystanie metod cyklicznego usypiania układu,
- opracowanie energooszczędnych algorytmów trasowania.

Testowane przez autora układy radiowe można zasilac napięciem od 1,8 V do 3,6 V. Ze względu na niski prąd samorozładowania do zasilania układów radiowych najczęściej stosowane są ogniwa litowe. Napięcie ogniwa litowego wynosi 3V. Obniżenie napięcia zasilania wymusza stosowanie w układach przetwornicy, co wiąże się ze wzrostem kosztów produkcji.

Zwiększenie szybkości transmisji powoduje skrócenie czasu potrzebnego do przesłania informacji, co pośrednio zmniejsza zużycie energii. Jednak takie działanie wymaga zwiększenia szerokości pasma radiowego, a związane z tym zmniejszenie czułości odbiornika ogranicza zasięg transmisji. Dostępne częstotliwości, moc sygnału oraz szerokość pasma radiowego w Polsce są ustalone przez Ministerstwo Infrastruktury [1]. Parametry pracy należy dostosować do wymogów prawa. W sieciach czujnikowych najczęściej stosowane są pasma ISM (ang. *Industrial, Scientific and Medical*) 433 MHz, 868 MHz oraz pasmo 2,4 GHz.

Zastosowanie kompresji zmniejsza ilość transmitowanych danych, lecz wiąże się z dłuższym czasem obliczeń wykonywanych przez sterownik węzła radiowego i może w konsekwencji spowodować większe zużycie energii.

Najefektywniejszą metodą ograniczenia zużycia energii jest cykliczne wybudzanie układu WOR (ang. *Wake on Radio*). Polega ona na cyklicznym przełączaniu układu radiowego pomiędzy trybami odbioru i uśpienia. W przypadku odebrania danych układ radiowy wybudza mikrokontroler sterujący. Po przetworzeniu danych, wysyłana jest informacja zwrotna, a układ radiowy i mikrokontroler ponownie są usypiane. Gdy po wybudzeniu układ radiowy nie odbierze danych, po upływie określonego czasu jest usypiany. Ta metoda jest stosowana powszechnie, między innymi w sieciach ZigBee [2]. Zużycie energii zależy od stosunku czasu aktywności do czasu uśpienia. Maksymalna moc chwilowa pobierana przez badany układ podczas pracy wynosi 150 mW. Aby układ mógł pracować 2 lata należy zredukować pobór mocy do około 0,5 mW. Zatem stosunek czasu aktywnego do czasu

uśpienia powinien wynosić około 1:300. Wadą metody jest konieczność przesyłania wielokrotnie ramki danych, aby zwiększyć prawdopodobieństwo jednoczesnej pracy nadajnika i odbiornika. Jest to spowodowane dużym rozrzutem pomiaru czasu uśpienia przez układy radiowe (do pomiaru czasu w trybie uśpienia wykorzystywany jest wbudowany generator RC).

Metody podane powyżej służą ograniczeniu zużycia energii pojedynczych węzłów sieci. Aby sieć pracowała bezawaryjnie należy zoptymalizować proces trasowania pod kątem zużycia energii przez całą sieć. W przypadku sieci, w których zużycie energii jest nieistotne, wybiera się trasy najkrótsze, aby zminimalizować czas transmisji danych. Dla sieci czujnikowych z zasilaniem wewnętrznym taki sposób nie jest optymalny. Trasy najkrótsze byłyby wykorzystywane najczęściej. Zużycie energii tych węzłów będzie znacznie wyższe niż pozostałych elementów sieci, co doprowadzi do utraty spójności struktury i uniemożliwi dalszą pracę.

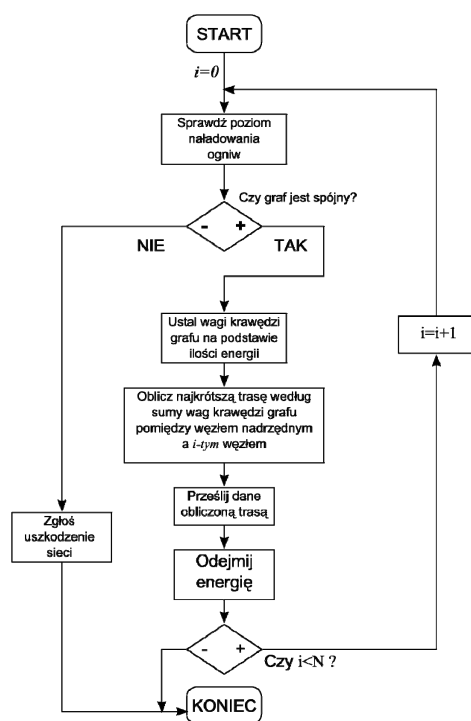
Opracowana metoda zrównoważenia zużycia energii pozwala na znaczne zwiększenie czasu pracy sieci poprzez zmniejszenie obciążenia najkrótszych tras i dynamiczne przydzielenie ich tak, aby zminimalizować rozrzut zużycia energii w poszczególnych węzłach.

### 3. Metoda zrównoważenia zużycia energii

Celem opracowanej metody jest wydłużenie czasu pracy sieci poprzez taki dobór tras transmisji danych, aby zminimalizować rozrzut energii węzłów sieci.

W metodzie zrównoważonego zużycia energii sieć radiowa jest reprezentowana jako graf ważony, nieskierowany z jednym węzłem nadrzędnym. Wierzchołki grafu odpowiadają węzłom sieci, a krawędzie połączeniem radiowym pomiędzy węzłami. Warunkiem koniecznym jest spójność grafu. Każdy węzeł sieci musi mieć możliwość komunikacji poprzez retransmisję z innymi węzłami. Wagi grafu opisującego sieć ustalane są na podstawie ilości pozostałej energii w węzłach połączonych daną krawędzią. Ze względu na zastosowany algorytm Dijkstry wagi grafu muszą być nieujemne [3].

Algorytm trasowania przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 1. Algorytm zrównoważenia energii  
Fig. 1. The energy balancing algorithm

Początkowo układ nadrzędny określa ilość energii w węzłach sieci i na tej podstawie przypisuje wagi wszystkim krawędziom grafu.

W kolejnym kroku nawiązywana jest transmisja z pierwszym układem. Trasa łącząca węzły obliczana jest z wykorzystaniem algorytmu Dijkstry. Następnie dokonywana jest aktualizacja bazy energii we wszystkich węzłach, a także aktualizacja wag krawędzi grafu. Proces ten jest powtarzany dla wszystkich węzłów sieci.

W algorytmie nie uwzględniono wskaźnika mocy sygnału odbieranego RSSI (*ang. Received Signal Strength Indicator*). Planowane jest wykorzystanie tego parametru przy określaniu wagi krawędzi i dostosowywaniu mocy sygnału nadawanego.

Dzięki ustalaniu wag krawędzi w każdym kroku i uzależnieniu ich od poziomu naładowania ogniw możliwe jest stosowanie ogniw o różnej pojemności. W przypadku uszkodzenia ogniw i znaczącego zmniejszenia ich pojemności, węzły są automatycznie pomijane podczas trasowania. Metoda umożliwia także uwzględnienie pozyskiwania energii przez węzły na przykład dzięki zastosowaniu fotoogniw.

## 4. Symulacja pracy sieci

### 4.1. Założenia

Opracowano oprogramowanie symulacyjne w języku Python. Oprogramowanie umożliwia przeprowadzenie symulacji pracy sieci z uwzględnieniem metody zrównoważenia zużycia energii. W symulacji przyjęto następujące założenia:

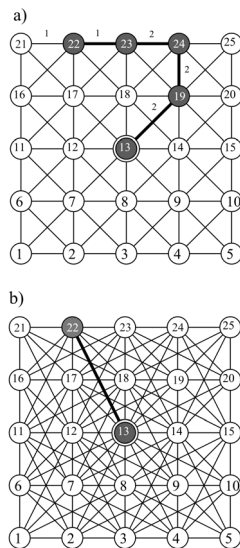
- Sieć może posiadać dowolną topologię oraz liczbę węzłów.
- W sieci znajduje się jeden główny moduł nadrzędny. Jego położenie ustalane jest z użyciem algorytmu sprawdzającego sumę oraz rozrzut energii w sieci. Dla badanego przypadku optymalnym punktem jest węzeł w środku sieci.
- Możliwe jest ustalenie parametrów transmisji danych takich jak zasięg, długość ramki danych, stopa błędów (*ang. bit error ratio*), szybkość transmisji.
- Dla każdej fazy działania określana jest chwilowa moc pobierana przez węzły radiowe.
- Początkowa pojemność wewnętrznego źródła zasilania może być podana dowolnie dla każdego układu.
- Ustalany jest współczynnik wypełnienia dla metody Wake on Radio oraz związane z tym prawdopodobieństwo nawiązania połączenia przez moduły.
- W trakcie symulacji na bieżąco aktualizowane są dane o stanie sieci, sumie i rozrzucie energii, a także wskazywane są trasy do każdego z węzłów.
- Dane o każdej transmisji są zapisywane w pliku. Możliwa jest późniejsza analiza danych.
- Symulacja umożliwia badanie rozrzutu energii w zależności od kolejności odczytu danych w sieci.

Dla zwiększenia czytelności wyników symulacji wprowadzono uproszczenia. Niektóre parametry transmisji wyznaczono eksperymentalnie (zbadano pracę rzeczywistej, prototypowej sieci czujników), a następnie w symulacji potraktowano je, jako wartości stałe. Dla sieci zastosowano topologię kraty. Wybrano doświadczalnie trzy różne zasięgi transmisji. Założono identyczne zużycie energii przy nadawaniu i odbiorze oraz pominięto różnice zużycia energii przy włączonym i wyłączonym mikrokontrolerze sterującym (w rzeczywistym układzie na czas odbioru i nadawania danych mikrokontroler jest usypiany). Dodatkowo założono brak zużycia energii przez moduły, które nie biorą udziału w transmisji. Ustalono doświadczalnie średnią liczbę prób połączenia (30 prób) przy zadanym współczynniku wypełnienia dla metody Wake on Radio. Pominięto kwestię symulacji zakłóceń transmisji. W wykresach przyjęto umowną jednostkę energii równą energii potrzebnej do transmisji danych pomiędzy dwoma sąsiadującymi węzłami. Takie założenie podyktowane jest zwiększeniem czytelności wyników symulacji, a także ogólnym charakterem metody. Dla różnych konstrukcji węzłów radiowych inna będzie wartość zużytej energii, jednak stosunek zużycia energii dla różnych metod trasowania będzie zbliżony.

Dla zastosowanej topologii ustalono optymalne położenie układu nadrzędnego (w symulacji węzeł nadrzędny znajduje się dokładnie w środku sieci). Grafy reprezentujące badaną sieć przedstawiono na poniższych rysunkach (rys. 2a, b).

Przykład a) ilustruje działanie algorytmu przy krótkim zasięgu transmisji. Ciemnym kolorem zaznaczono obliczoną trasę. Ze względu na niższy poziom energii w węzłach o numerach 17 oraz 18 zostały one pominięte. Cyfry obok krawędzi oznaczają wagi obliczone na podstawie zużycia energii węzłów.

W przykładzie b) zwiększono zasięg transmisji. Transmisja pomiędzy węzłem nadrzędnym o numerze 13 oraz węzłem numer 22 została nawiązana bezpośrednio pomijając układy pośredniczące.



Rys. 2. Grafy reprezentujące modelowane sieci radiowe o małym (a) oraz dużym (b) zasięgu transmisji

Fig. 2. Graphs representing the simulated wireless networks of short (a) and long (b) transmission range

## 4.2. Wyniki symulacji

Przeprowadzono symulację pracy sieci złożonej z 25 węzłów w topologii kraty. Sprawdzono wyniki zużycia energii oraz rozrzutu energii dla następujących przypadków:

- metoda klasyczna, bez zrównoważenia zużycia energii, krótki zasięg transmisji (połączenie może zostać nawiązane tylko z sąsiadującymi bezpośrednio węzłami),
- metoda klasyczna, długi zasięg transmisji (połączenie może zostać nawiązane w odległości dwukrotnie większej),
- metoda ze zróżnicowanym zużyciem energii, krótki zasięg,
- metoda ze zróżnicowanym zużyciem energii, długi zasięg.

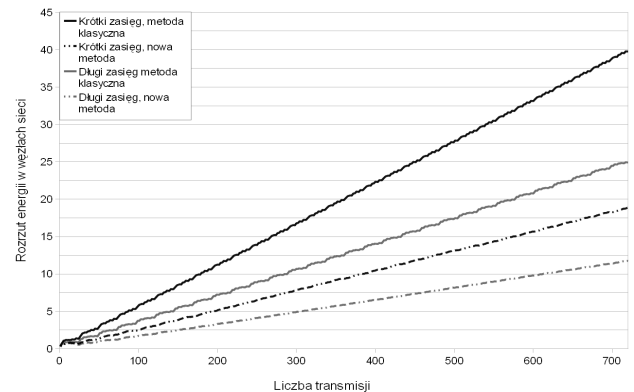
Wszystkie symulacje przeprowadzono dla trzydziestokrotnego odczytu całej sieci (symulacja 30 dni pracy), czyli dla 720 transmisji. Na wykresie poniżej przedstawiono wzrost rozrzutu zużycia energii dla czterech przypadków. Poniższy rysunek przedstawia zmianę rozrzutu energii w sieci dla czterech metod trasowania.

Wyniki symulacji wykazują znaczne zmniejszenie rozrzutu energii. W metodzie klasycznej rozrzut wynosi 39,76 jednostek energii w przypadku krótszego zasięgu oraz 24,92 jednostek energii. Zastosowanie opracowanej metody zredukowało rozrzut do odpowiednio 18,84 oraz 11,74 jednostek energii.

Wykazano także nieznaczny wzrost zużycia energii przy zastosowaniu nowej metody. Zużycie energii dla metody klasycznej wyniosło 1167 jednostek przy krótkim zasięgu i 928 jednostek przy długim zasięgu. W metodzie zrównoważonego zużycia energii wartości te wynosiły 1178 oraz 929 jednostek energii.

Wyniki potwierdzają zasadność stosowania większego zasięgu transmisji (mocy sygnału) lub gęstszej rozlokowania węzłów radiowych. Wynika to z faktu bezpośredniego połączenia węzła nadrzędnego z większą liczbą węzłów pośredniczących. W takiej

sytuacji ruch w sieci może zostać rozprowadzony bardziej równomiernie. Granicznym przypadkiem byłaby topologia gwiazdy, w której każdy z węzłów ma bezpośredni kontakt z węzłem nadrzędnym. Wtedy zużycie energii przez sieć byłoby równomierne.



Rys. 3. Zmiana rozrzutu energii w sieci radiowej w funkcji liczby transmisji  
Fig. 3. Change of energy dispersion in a wireless network as a function of the number of transmissions

## 4.3. Zmiana kolejności transmisji

Podczas przeprowadzonych badań wykryto różnice w rozrzucie zużycia energii, gdy zmianie ulega kolejność odpytywania węzłów. Sprawdzono symulację kilku wariantów odpytań, lecz dotychczas nie znaleziono konkretnej zależności. Ze względu na dużą złożoność obliczeniową  $O(n!)$  nie jest możliwe sprawdzenie wszystkich kombinacji dla sieci złożonej z zaledwie 16 modułów (20 bilionów kombinacji). Z tego powodu problem zostanie zbadany przy pomocy algorytmów genetycznych.

## 5. Podsumowanie

Opracowana metoda zrównoważenia zużycia energii pozwala znacząco wydłużyć czas pracy sieci radiowej. Przy pomocy symulacji wykazano zmniejszenie rozrzutu energii przy zastosowaniu opracowanej metody. Wykazano także zależność pomiędzy rozrzutem energii, a zasięgiem transmisji. W dalszych pracach zostanie zaimplementowana regulacja mocy sygnału w oparciu o wskaźnik RSSI oraz zostaną rozpoczęte prace nad algorytmem doboru kolejności transmisji.

Artykuł powstał w wyniku realizacji grantu 1133-F na rozwój młodych naukowców i uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

## 6. Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu z dnia 3 lipca 2007 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego, Dz. U. z 2007r., nr 138. poz. 972.
- [2] Edgar H. Callaway, Jr.: Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [3] Stańczyk Piotr, Algorytmika praktyczna, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2009.
- [4] Bogdan M. Wilamowski, J. David Irwin: The industrial electronics handbook [4], Industrial communication systems, CRC Press, Boca Raton, Florida 2011.
- [5] Quinghua Wang: Traffic Analysis, Modeling and Their Applications in Energy-Constrained Wireless Sensor Networks – on Network Optimization and Anomaly Detection, Mittuniversitetet, Sundsvall, 2010.