

## Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach

*Wireless Sensor Networks for Environment Monitoring and Threat Alarming*

Mariusz Słabicki<sup>1</sup>, Maciej Nikodem<sup>1</sup>,  
Bartosz Wojciechowski<sup>1</sup>, Tomasz Surmacz<sup>1</sup>

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje aktualny stan badań realizowanych w ramach projektu badawczego „Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach, zapewniające długi czas działania i dużą niezawodność”. Celem badań jest opracowanie narzędzi wspomagających ocenę parametrów oraz projektowanie takich sieci z uwzględnieniem specyfiki wykorzystywanych urządzeń i zastosowań. Artykuł prezentuje wyniki pomiarów rzeczywistych węzłów sieci i ich wpływ na tworzone modele i symulatory.

**Słowa kluczowe:** bezprzewodowe sieci czujników, modelowanie, pomiary

**Abstract:** This paper reports aims and current status of a research grant „Long time operating and robust wireless sensor networks with application to environment monitoring and threat alarming”. Research focus on simulation and modeling of wireless sensor networks with application to computer aided verification and development of large sensor networks. This article presents results of measurements taken on real-life nodes of such network and how their influence WSN model and simulation.

**Keywords:** wireless sensor networks, modeling, measurements.

### 1. Bezprzewodowe sieci czujników

Bezprzewodowe sieci czujników (ang. *Wireless Sensor Networks – WSN*) to struktury złożone z setek lub tysięcy niewielkich urządzeń elektronicznych. Urządzenia te potrafią realizować proste zadania monitorowania (pomiar i zbieranie informacji o temperaturze, nasłonecznieniu, wilgotności, ciśnieniu, położeniu (GPS), itp.), sterowania (opartego na wspólnym uzgadnianiu decyzji przez grupę węzłów lub podejmowanych przez stację bazową na podstawie pomiarów) i komunikacji (przesyłania informacji o wartościach pomiarów oraz decyzjach sterujących). Architektury sieci bezprzewodowych pozwalają na stworzenie systemów, które mimo ograniczonych możliwości pojedynczego elementu potrafią realizować złożone zadania. Możliwość ta wynika z faktu współpracy węzłów i wykorzystania informacji pochodzących od wielu z nich do wypracowania najlepszej decyzji.

Nie istnieje jednoznaczna definicja czym są sieci WSN, jednak w wielu źródłach pojawiają się opisy tych sieci, które są porównywalne. Przykładowo, w pracy [3] przedstawione zostały następujące cechy tych sieci:

- możliwość samoorganizacji,
- komunikacja rozgłoszeniowa realizowana na małe odległości,
- routing wieloskokowy,

- gęste rozmieszczenie sensorów,
- częste zmiany topologii powodowane awariami lub zanikami sygnału,
- ograniczone zasoby węzłów (energia, moc transmisji, pamięć, moc obliczeniowa).

Sieci WSN znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie dostęp do miejsc, w których rozłożone zostały węzły sieci, jest problematyczny. W literaturze najczęściej mówi się o monitorowaniu środowiska – gdzie dostęp jest utrudniony ze względu na odległość (rozległe obszary rolnicze) lub ze względu na zagrożenie zdrowia (np. w kraterze wulkanu), a także wykorzystaniu w służbie zdrowia (np. monitorowanie stanu pacjentów) lub automatyce domowej. Wspomina się również o zastosowaniach sieci WSN do celów militarnych – monitorowania pola bitwy lub monitorowania czynności życiowych ludzi znajdujących się na danym terenie [7].

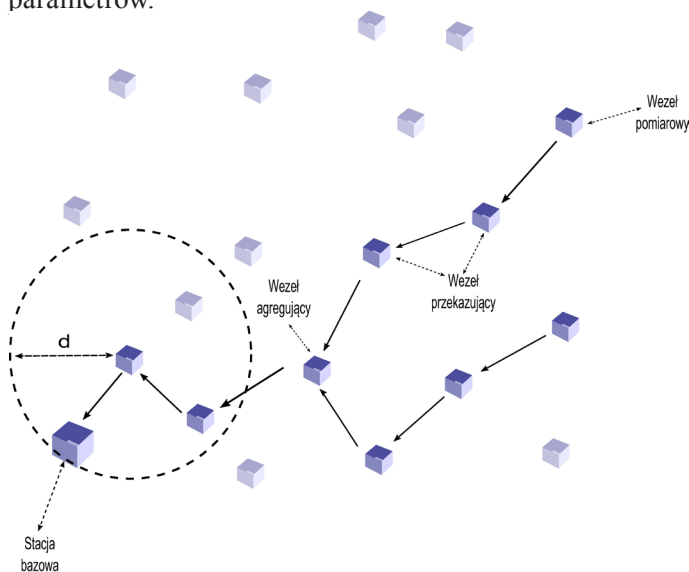
Gros aplikacji sieci WSN wykorzystuje drzewiastą strukturę, w której korzeniem jest węzeł gromadzący wszystkie informacje zbierane przez poszczególne węzły sieci (rys. 1). W literaturze i praktycznych aplikacjach istnieją również rozwiązania, w których używa się więcej węzłów pełniących rolę stacji bazowych, lecz rozwiązania te stanowią zdecydowaną mniejszość. W większości analiz przyjmuje się dodatkowo, że węzeł umieszczony w korzeniu drzewa jest jednocześnie bramą do sieci zewnętrznej.

<sup>1</sup>Institut Informatyki, Automatyki i Robotyki, Politechnika Wroclawska Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław {mariusz.slabicki; maciej.nikodem; bartosz.wojciechowski; tomasz.surmacz}@pwr.wroc.pl

Jest wówczas wyposażony np. w moduł GPRS czy interfejs Ethernet pozwalający komunikować się z użytkownikiem lub systemem zarządzającym. Sieci WSN składają się z homogenicznych węzłów, jednak węzły te są różnicowane funkcjonalnie, a dodatkowo ich funkcje mogą się zmieniać z upływem czasu. Do najważniejszych funkcji, jakie realizują węzły, należą:

- pomiar parametrów środowiska, detekcja zdarzeń,
- routing i zarządzanie strukturą sieci,
- przetwarzanie, agregacja i analiza danych pomiarowych,
- pośredniczenie w komunikacji z innymi systemami i/lub rodzajami sieci.

Pomimo wyróżnienia poszczególnych funkcji, niejednokrotnie kilka z nich jest łączonych w jednym węźle. Zazwyczaj sytuacje takie wynikają ze specyfiki konkretnego zastosowania i są podyktowane dążeniem do maksymalnego uproszczenia reguł działania sieci i poprawienia jej parametrów.



Rysunek 1. Przykładowa sieć WSN

Konstrukcja sieci z wykorzystaniem niewielkich homogenicznych elementów o ograniczonych możliwościach z jednej strony pozwala na stworzenie prostych, niezawodnych i tanich urządzeń, które zasilane bateryjnie będą mogły poprawnie pracować przez wiele tygodni i miesięcy. Z drugiej strony – rodzi szereg zagadnień natury organizacyjnej i aplikacyjnej, które nie występowały w tradycyjnych rozwiązaniach monitorowania czy sterowania.

Jednym z podstawowych ograniczeń występujących w bezprzewodowych sieciach czujników jest niewielki zasięg komunikacji. Typowo zakłada się, że zasięg ten jest wielokrotnie mniejszy od obszaru, na którym sieć WSN została rozmieszczona. Wynika to bezpośrednio z baterijnego zasilania węzłów i dążenia do maksymalizacji czasu ich działania – ponieważ moc potrzebna do komunikacji radiowej rośnie z potęgą odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, to komunikacja na dwukrotnie większą odległość wymaga od 4 do 64 razy wyższych nakładów energetycznych (wartość wykładnika potęgi za-

leży od otoczenia i waha się w przedziale od 2 do 6) [6]. Z tego powodu maksymalny zasięg komunikacji węzłów sieci WSN nie przekracza 400 bądź 100 m.

Drugie ograniczenie stanowi bateryjne zasilanie układów, co do którego dodatkowo zakłada się, że nie jest odnawialne. Założenie to oznacza, że każdy węzeł dysponuje skończoną i niewielką energią, którą musi dysponować umiejętnie i rozważnie, tak aby zapewnić sobie maksymalnie długi czas działania, jednocześnie realizując stawiane mu zadania. Konieczność minimalizacji poboru energii powoduje, że węzły sieci WSN wykorzystują rozwiązania, które mają niskie zapotrzebowanie na moc, a dodatkowo pozwalają na dostosowywanie aktualnie pobieranej mocy do chwilowych warunków i realizowanych zadań. Typowym podejściem w tym zakresie jest wykorzystanie mikrokontrolerów i nadajników radiowych, których chwilowy pobór mocy może być obniżony poprzez wyłączenie niewykorzystywanych układów peryferyjnych (np. przetworników analogowo-cyfrowych, interfejsów komunikacyjnych, timerów). Możliwość dostosowania mocy nadajników radiowych (np. przy komunikacji na małe odległości) pozwala dodatkowo ograniczyć zużycie energii. Kolejnym sposobem na wydłużenie czasu życia sieci jest minimalizacja liczby transmisji radiowych, np. poprzez agregację i odpowiednią organizację struktury komunikacyjnej, czy też usypianie węzłów wtedy, gdy nie muszą realizować żadnych zadań.

Istotnym ograniczeniem są również stosunkowo niewielkie zdolności obliczeniowe i pamięciowe węzłów. Ponieważ elementy sieci wykorzystują proste i uniwersalne układy mikrokontrolerów, to realizacja złożonych algorytmów sterowania czy wykonywanie złożonych operacji arytmetycznych (np. złożonej kompresji, szyfrowania, uwierzytelniania) przez pojedynczy węzeł jest niemożliwa w krótkim czasie i przy jednoczesnym dążeniu do minimalizacji kosztów energetycznych. Podobne ograniczenia dotyczą pamięci, której zasoby są zazwyczaj ograniczone do kilkudziesięciu kilobajtów.

Charakterystyka działania sieci WSN i liczne ograniczenia, którym podlegają, powodują, że najprostsze zadania monitorowania i sterowania wymagają opracowania mechanizmów i procedur dostosowanych do aktualnych warunkowań i bieżącej sytuacji. Z tego powodu w przypadku sieci WSN celowe jest skupienie się na rozwiązaniach adaptacyjnych, które pozwalają węzłom na dostosowanie swojego działania do aktualnie panujących warunków otoczenia i delegowanych zadań. Kluczowym czynnikiem adaptacyjności i realizacji bieżących zadań monitorowania i sterowania jest możliwość skutecznego przesyłania informacji pomiędzy węzłami, a co za tym idzie – dążenie do zagwarantowania poprawności komunikacji radiowej.

## 2. Badania

Celem prowadzonych badań jest opracowanie modelu i symulatora sieci WSN, które będą mogły być wykorzystane do wspomagania procesów projektowania i weryfikacji nu-

merycznej rzeczywistych sieci. Możliwość realizacji tego celu wymaga opracowania dokładnego modelu działania poszczególnych węzłów sieci, który uwzględni możliwie wiele zachodzących zjawisk, parametrów i zależności. Główny nacisk jest kładziony na właściwe odwzorowanie różnych trybów pracy i funkcji realizowanych przez węzły, możliwie dokładne uwzględnienie właściwości radiowego kanału komunikacyjnego oraz maksymalnie szerokiego spektrum funkcji i zadań, do których sieć ma być wykorzystywana. Priorytetem jest poprawa skuteczności komunikacji, zapewnienie niezawodności działania i realizacja stawianych zadań, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie małych kosztów energetycznych i długiego czasu działania.

Znajomość zasad i reguł działania węzłów oraz ich wpływu na właściwości sieci pozwolą na opracowanie symulatora sieci WSN, w którym możliwe będzie zamodelowanie ich działania. Symulator pozwoli na weryfikację różnych rodzajów bezprzewodowych sieci czujników oraz wpływu takich parametrów, jak liczba węzłów, gęstość rozmieszczenia, homogeniczność, wykorzystywane metody oraz algorytmy organizacji i działania, na parametry tworzonych systemów monitoringu i sterowania. Pozwoli odszukać słabe punkty sieci i wspomóc decyzje projektowe w czasie planowania i uruchamiania sieci WSN.

Realizacja powyższych celów wymaga wykonania szeregu badań mających na celu określenie charakterystyk węzłów działających w różnych warunkach środowiskowych, z różnymi parametrami i w różnych aplikacjach. Badania te przeprowadzamy w oparciu o rzeczywiste węzły bezprzewodowej sieci czujników MicaZ i IRIS. Charakterystyki węzłów i sieci WSN posłużą jako dane wejściowe dla wysokopoziomowych symulatorów, których przeznaczeniem jest szybka i możliwie dokładna symulacja działania sieci. Konieczność stosowania takich symulatorów wynika z dążenia do eksploracji wielu różnych sieci o zróżnicowanych parametrach oraz faktu, że rzeczywiste czasy ich funkcjonowania są liczone w miesiącach, a nawet latach. Tak długi czas działania wyklucza możliwość weryfikacji i porównywania własności rzeczywistych sieci i wymusza stosowanie symulatorów, w których cały cykl życia sieci będzie mógł być zaobserwowany w ciągu co najwyżej kilku/kilkunastu minut. Realizowane badania symulacyjne wykonujemy w środowiskach MATLAB i OMNeT++, które są elastyczne i pozwalają na łatwą rozbudowę funkcji symulatora oraz uwzględnianie interesujących nas parametrów.

Zaletą środowiska MATLAB jest możliwość przeprowadzenia szybkiej i dokładnej symulacji rozległych sieci bezprzewodowych z uwzględnieniem wszystkich czynników wpływających na pracę sieci. Opracowywany przez nas symulator pozwala na efektywne modelowanie działania sieci złożonych z kilkuset węzłów uwzględniając przy tym losowość rozmieszczenia węzłów, zróżnicowanie zasobów i kosztów energetycznych, niedeterministyczny charakter komunikacji, losowość zakłóceń i dużą liczbę innych parametrów, które wpływają na działanie sieci i komplikują model symulacyjny. Opracowany symulator

pozwała na wydajną ocenę efektywności działania sieci, szybki przegląd przestrzeni możliwych rozwiązań projektowych oraz wysoką skalowalność. Dodatkowo wykorzystanie środowiska MATLAB zapewnia dużą elastyczność i konfigurowalność opracowanego rozwiązania.

Drugim z wykorzystywanych rozwiązań jest środowisko OMNeT++ przeznaczone do symulacji różnego rodzaju sieci, w tym sieci kablowych, bezprzewodowych, czy systemów network-on-chip. Jego zaletami są m.in.: wysoka elastyczność i możliwość niemal dowolnej konfiguracji, duża liczba dostępnych bibliotek przygotowana do symulacji konkretnych rodzajów sieci, możliwość uwzględnienia szczegółowych modeli opisujących właściwości wykorzystywanych mediów i protokołów komunikacyjnych, oraz obszerny zbiór topologii sieci, jakie mogą być badane [8]. Niewątpliwą zaletą jest również powszechne uznanie tego symulatora jako miarodajnego systemu pozwalającego na ocenę i porównywanie różnych rozwiązań. W naszych badaniach wykorzystujemy bibliotekę MiXiM [4]. Rozszerza ona możliwość symulatora o możliwość analizy fizycznych parametrów i właściwości bezprzewodowego kanału komunikacji z uwzględnieniem specyfiki propagacji fal radiowych (m.in. interferencji), charakterystyki układów nadawczych i protokołów dostępu do medium komunikacyjnego wykorzystywanego w sieciach WSN. Biblioteka ta została dodatkowo przez nas rozbudowana, aby lepiej odwzorowywać rzeczywiste sieci czujników. Jednym z istotnych elementów, który został opracowany, jest możliwość kontroli mocy nadajników radiowych i dostosowywanie ich do konkretnych wymagań (np. oczekiwanego zasięgu transmisji) oraz warunków propagacji fal radiowych.

Dzięki równoległemu rozwojowi obu symulatorów możliwe jest przeprowadzenie szybkiej weryfikacji działania dużych sieci czujników (z wykorzystaniem środowiska MATLAB) jak i szczegółowa, porównawcza ocena wybranych rozwiązań, w nieco wolniejszym, lecz uwzględniającym szerokie spektrum parametrów, symulatorze OMNeT++. Podejście takie pozwala na eksplorację szeregu różnych rozwiązań dotyczących sieci WSN i porównanie ich z innymi rozwiązaniami proponowanymi w literaturze.

### 3. Rezultaty

W czasie dotychczasowych prac badawczych zbadaliśmy charakterystyki pracy węzłów sieci WSN, określając parametry ich działania, właściwości bezprzewodowego kanału komunikacji i wpływu różnych strategii przesyłania danych na właściwości tworzonych sieci. Do oceny parametrów węzłów wykorzystaliśmy opracowane przez nas oprogramowanie, które pozwalało wprowadzić węzeł w różne tryby pracy, zrealizować komunikację pomiędzy kilkoma węzłami i rejestrować interesujące nas parametry. Opracowana aplikacja pozwoliła na pomiar zasięgów komunikacyjnych, pomiar kosztów energetycznych zarówno związanych z działaniem węzła (realizacją obliczeń, dzia-

łaniem układów peryferyjnych) jak i komunikacji radiowej (nadawania i odbierania danych), pomiar pakietowej stopy błędów i jej zależności od otoczenia i warunków propagacyjnych, jak również określenie modeli propagacyjnych dla sygnału radiowego.

### 3.1. Pomiar zużycia energii

Jednym z celów podejmowanych badań jest dostosowanie mechanizmów sterujących siecią tak, aby jak najlepiej wykorzystać zasoby energetyczne każdego węzła. Dokładny pomiar poboru energii, który przeprowadziliśmy, pozwala na określenie ogólnych strategii, jakie mogą być wykorzystywane przez węzły sieci WSN, aby ten cel osiągnąć. Zmierzone wartości są również wykorzystywane w symulatorach, w których dokładne odwzorowanie dostępnych zasobów energetycznych i ponoszonych kosztów jest niezbędne, aby model programowy pozostawał w zgodzie z rzeczywistością.

Pomiarów zużycia energii dokonaliśmy dla węzłów MicaZ w układzie pomiaru spadku napięcia na rezystorze  $1 \Omega$  podłączonym szeregowo z węzłem do stabilizowanego źródła zasilania. Mierzona wartość spadku napięcia wzmacniona 20-krotnie przez wzmacniacz napięciowy MAX4373 była odczytywana z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego.

#### 3.1.1. Koszty energetyczne transmisji radiowej

Pobór energii związany z realizacją komunikacji zależy od wielu parametrów pracy węzła, lecz mimo to bardzo często [2,5,9] przedstawia się go jedynie w funkcji zasięgu transmisji radiowej. Takie podejście argumentowane jest niskim zapotrzebowaniem na energię w okresach pomiędzy transmisją kolejnych danych. Przeprowadzona weryfikacja powyższego modelu pozwoliła zauważyć, że ten uproszczony model kosztów energetycznych nie znajduje potwierdzenia w zachowaniu rzeczywistych węzłów sieci WSN.

Tabela 1. Pobór prądu podczas transmisji oraz nasłuchiwanie i odbioru danych radiowych przez węzeł MicaZ

Nadawanie			
Moc [dBm]	Prąd [mA]	Moc [dBm]	Prąd [mA]
-25	9,7	-15	10,7
-10	11,6	-7	12,5
-5	13,3	-3	13,7
-1	14,3	0	15,4
Nasłuchiwanie i odbiór [mA]			
14,5			

Jednym z kluczowych czynników, który nie jest uwzględniany w tym modelu, są koszty energetyczne związane z nasłuchiowaniem i odbiorem danych przesyłanych kanałem radiowym. Przeprowadzone pomiary rzeczywistych węzłów (tab. 1) pozwoliły zauważyć, że pobór prądu w czasie nasłuchiwania i odbioru danych jest porównywalny z prądem niezbędnym do transmisji danych z mak-

symalną możliwą mocą i niemal o 50% większy niż prąd potrzebny do wysłania z najmniejszą mocą. Oznacza to, że uwzględnienie poboru energii w czasie nasłuchiwania i odbioru danych jest istotne i nie może być pomijane. Wpływ kosztu energetycznego nasłuchiwania jest tym większy, że węzeł pozostaje w trybie nasłuchiwania znacznie dłużej niż trwa wysyłanie danych. Koszt ten można ograniczać poprzez całkowite wyłączenie odbiornika radiowego, jednak należy pamiętać, że w sieciach WSN nie ma zagwarantowanej synchronizacji pomiędzy węzłami. W konsekwencji, przy zbyt krótkich czasach włączenia interfejsu radiowego może się okazać, że sąsiadujące ze sobą węzły nie są w stanie nawiązać komunikacji.

#### 3.1.2. Tryby pracy i ich koszty energetyczne

Oprócz zadań transmisji i odbioru danych węzły sieci WSN realizują zadania gromadzenia, przechowywania i przetwarzania danych. Zadania te wiążą się z wykorzystaniem różnego rodzaju układów i urządzeń peryferyjnych, które wpływają na rzeczywisty pobór mocy. Z tego względu mikrokontrolery wykorzystywane w węzłach sieci pozwalają na działanie w różnych trybach, w których włączane są tylko wybrane układy peryferyjne. Węzły takie mogą być również wprowadzone w stan uśpienia, w którym pobór mocy jest minimalny.

Opracowane przez nas aplikacje i skonstruowany przez nas układ pomiarowy pozwoliły na pomiar poboru prądu w różnych trybach działania (tab. 2). Pomiary zostały przeprowadzone przy wyłączonym nadajniku radiowym, dzięki czemu można zauważyć, że samo wyłączenie nadajnika radiowego (bez usypiania mikrokontrolera sterującego węzłem) pozwala na niemal czterokrotną redukcję poboru prądu. Wykonane pomiary pokazują również, że opłacalne jest usypianie węzła zawsze, gdy nie jest konieczne wykonywanie żadnych pomiarów i obliczeń. Obserwacja ta jest kluczowa dla większości zastosowań sieci WSN, ponieważ większość z nich przeznaczona jest do monitorowania zjawisk wolno zmiennych.

Tabela 2. Pobór prądu w różnych trybach działania mikrokontrolera węzła MicaZ

Tryb	Prąd [mA]	Tryb	Prąd [mA]
Idle	3,75	Power-down	0,40
Noise reduction	1,40	Power-save	0,45
Standby	0,60	Ext. standby	0,55

#### 3.1.3. Inne koszty

Opisane powyżej pomiary zostały dokonane dla wielu węzłów tego samego typu, aby zaobserwować rozrzut ich parametrów. Pomiary te pozwoliły zauważyć, że wartości prądów pobieranych przez poszczególne węzły nie są identyczne i różnią się w granicach nie przekraczających  $\pm 4\%$ . Niewielkie zmiany poboru prądu (nie przekraczające  $\pm 2\%$ ) zaobserwowano również w sytuacji zmian napię-

cia zasilania węzłów. Pomiary przy napięciach zasilania z dopuszczalnego zakresu 2,5-3,3 V pozwalają zaobserwować jak będzie się zmieniał pobór prądu w czasie życia węzłów, gdy ich zasoby energetyczne będą ulegały wyczerpaniu powodując obniżenie napięcia zasilania.

Interesującą obserwacją jest pobór mocy wprowadzany przez diody LED, w które wyposażone są węzły. Okazuje się, że zapalenie pojedynczej diody zwiększa pobór prądu o 2,8 mA. W porównaniu z wartościami prądów pobieranych przez mikrokontroler i nadajnik radiowy, jest to wartość zaskakująco duża, a w przypadku wykorzystania wszystkich trzech diod, koszt energetyczny z tym związany jest porównywalny z kosztem nadawania z mocą -25 dBm.

### 3.2. Pomiary parametrów komunikacji

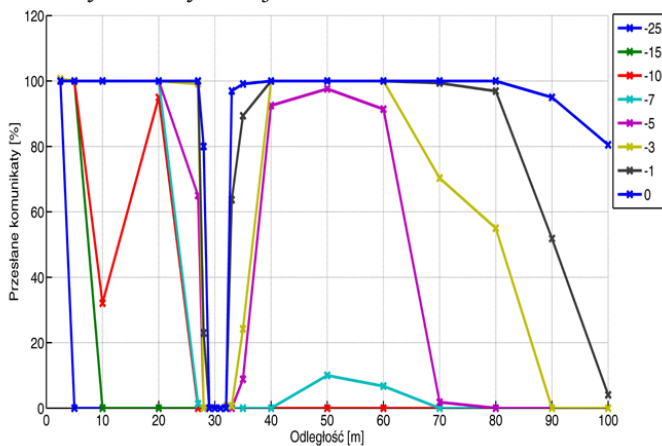
Mając na względzie określone zastosowania sieci WSN w monitorowaniu środowiska, dokonaliśmy szeregu pomiarów parametrów komunikacji radiowej w różnych środowiskach: obszarach leśnych, polach, łąkach oraz w środowisku miejskim.

Badania polegały na przesyłaniu pakietów danych pomiędzy dwoma węzłami. Pakiety były różnej wielkości oraz były wysyłane z różnymi mocami i na różne odległości. Opracowana aplikacja rejestrowała informacje o wysłanych i odebranych pakietach, współczynnikach mocy odebranego sygnału (RSSI) i aktualnej pakietowej stopie błędów w funkcji mocy nadajników, odległości pomiędzy węzłami i ich wysokości nad ziemią.

Zebrane wyniki pozwalają oszacować wspomniane parametry w funkcji następujących czynników:

- otoczenia w którym znajduje się sieć,
- mocy nadajników,
- odległości pomiędzy węzłami i ich wysokości nad powierzchnią gruntu,
- rozmiaru przesyłanych pakietów.

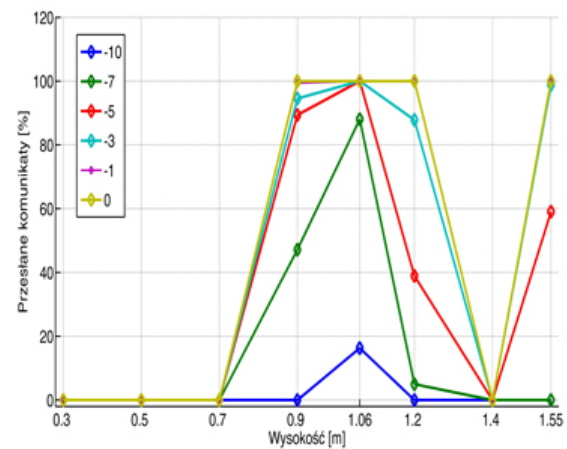
Dodatkowo, na podstawie tych samych pomiarów możliwe jest określenie maksymalnych zasięgów komunikacji dla różnych mocy nadajników.



Rysunek 2. Stopa poprawnie odebranych komunikatów w funkcji odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem i mocy sygnału nadawanego (w dBm). Pomiarów dokonano na płaskiej drodze asfaltowej w obszarze polnym, pozbawionym przeszkód, z węzłami umieszczonymi na wysokości 1,4m.

Wyniki przeprowadzanych pomiarów w dużym stopniu wykazują zgodność z jednym z tradycyjnych modeli komunikacji radiowej – modelem dwupromieniowym. W modelu tym dochodzi do nakładania się bezpośredniego i odbitego sygnału radiowego, co może doprowadzić do jego wzmocnienia lub całkowitego wytłumienia. Wzmacnianie i tłumienie następuje dla różnych odległości pomiędzy węzłami i jest funkcją długości fali i wysokości węzłów nad ziemią. Efekt ten jest tym bardziej widoczny, im bardziej odizolujemy nasz układ od otoczenia, zmniejszając możliwość odbicia fal radiowych od innych przeszkód terenowych. Z tego względu efekt wzmacniania i tłumienia sygnału jest wyraźnie widoczny na otwartych, płaskich obszarach, takich jak pola i łąki.

Opisywaną sytuację można zaobserwować na rys. 2, który przedstawia procentową liczbę odebranych pakietów w funkcji odległości pomiędzy węzłem nadającym i odbierającym, umieszczonymi na wysokości 1,4 m.



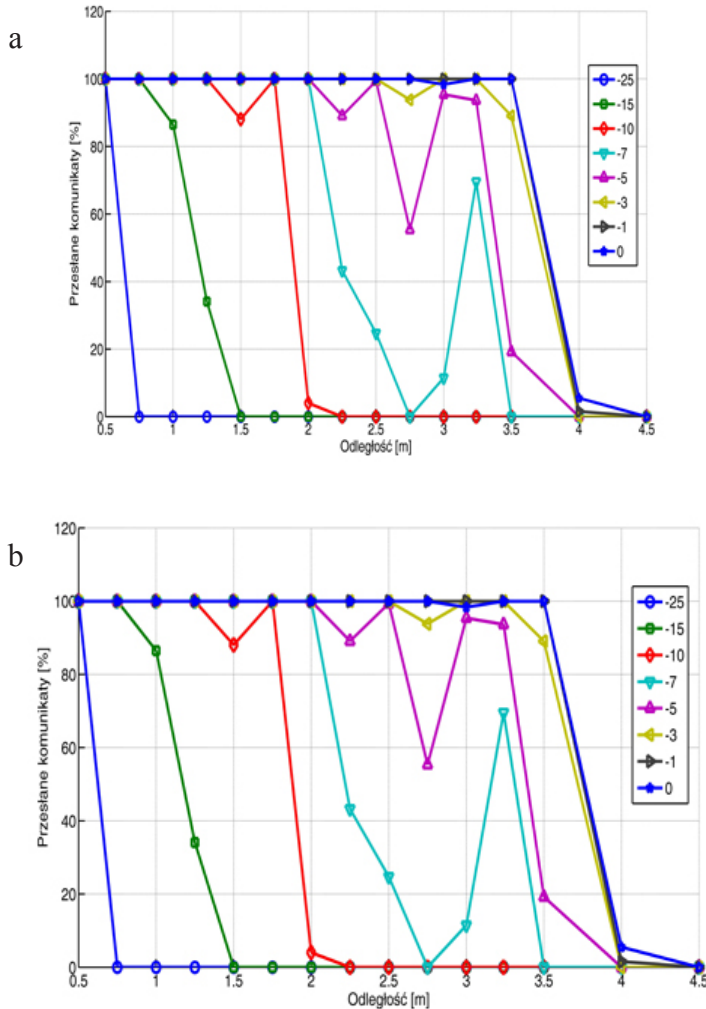
Rysunek 3. Stopa poprawnie odebranych komunikatów w funkcji wysokości węzłów nad ziemią dla odległości 30 m

Maksymalny zasięg komunikacji istotnie zależy również od wysokości anteny (a w konsekwencji całego węzła) nad ziemią. Rysunek 3 prezentuje wyniki pomiarów uzyskane dla różnych wysokości węzłów oddalonych od siebie o 30 metrów i pracujących z różnymi mocami. Jak można zauważyć, przy wysokości poniżej 0,7 m i odległości 30 m komunikacja pomiędzy węzłami jest w ogóle niemożliwa, nawet przy maksymalnej mocy nadajników. Wyraźna poprawa propagacji sygnału następuje przy wysokości około 1 m – dla tej wysokości następuje wzmocnienie sygnału bezpośredniego przez sygnał odbity od podłoża. Zdecydowane pogorszenie następuje w przypadku wysokości 1,4 m, kiedy sygnał bezpośredni jest całkowicie tłumiony przez sygnał odbity.

Analizując maksymalny zasięg komunikacji dla różnych wysokości można zauważyć, że spada on w znaczący sposób, gdy nadajniki znajdują się bezpośrednio na ziemi – szczególnie gdy cała sieć rozmieszczona jest na łące, polu lub w lesie, gdzie sygnał jest dodatkowo tłumiony przez roślinność. Rysunek 4 przedstawia wykresy współczynnika poprawnie przesłanych komunikatów w funkcji odległości i mocy nadajników. Wykres a) przedstawia sytuację, gdy węzły zostały umieszczone na wysokości 1 m. Wykres b) dotyczy sytuacji, w której węzły leżały bezpo-

średnio na ziemi, a bezpośrednia linia komunikacji była zasłonięta przez runo leśne.

Wysoki stopień tłumienia sygnału wynika z tego, że największy wpływ na transmisję mają przeszkody leżące w pierwszej strefie Fresnela [1]. Strefa ta ma kształt cygara rozpiętego pomiędzy antenami i odzwierciedla wpływ efektu dyfrakcji na propagację fal radiowych. Jeżeli przysłoniemy część z tej przestrzeni (np. poprzez obniżenie węzłów lub postawienie przeszkody) duża część promieniowanej energii zostanie pochłonięta przez przeszkodę (grunt) i nie dotrze do anteny odbiorczej. Jest to istotne, ponieważ większość zastosowań WSN,



Rysunek 4. Zasięgi komunikacji w zależności od mocy nadajników (w dBm) dla obszaru leśnego: a) węzły leżące na powierzchni gruntu; b) węzły umieszczone na wysokości 1m

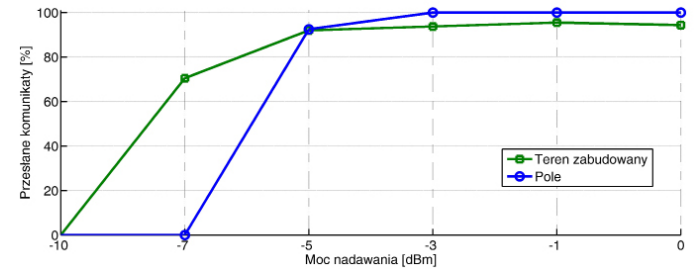
o jakich się mówi, zakłada, że rozmieszczenie węzłów może być w pełni przypadkowe, zazwyczaj na niskich wysokościach lub wręcz bezpośrednio na ziemi.

Wpływ zewnętrznych zakłóceń wynika z wykorzystywanego pasma komunikacji (2,4 GHz), które jest pasmem ogólnego przeznaczenia. Badania przeprowadzone w obszarach, na których działały sieci WiFi wykazały istotny wzrost stopy błędów i spadek efektywnego zasięgu komunikacji. Na rysunku 5 zostały porównane transmisje realizowane dla takich samych wysokości i odległości pomiędzy węzłami, w odmiennych środowiskach – w otwartym polu z dala od terenów zabudowanych i w okolicy kampusu akademickiego, gdzie jest duże natężenie transmisji

bezprzewodowych w paśmie 2.4 GHz.

Wykorzystywany zakres częstotliwości fal radiowych, słaba penetracja przeszkód oraz wąskie strefy Fresnela powodują, że na obszarach płaskich (np. łąki, pola) pojedyncze przeszkody zasłaniające odbiornik/nadajnik uniemożliwiają efektywną komunikację.

Efekt tłumienia sygnału radiowego obserwowany na pustych płaskich obszarach jest niezauważalny w przypadku obszarów o dużej liczbie przeszkód, np. w lesie. Spowodowane to jest odbijaniem sygnału radiowego od wielu przeszkód i docieraniu do odbiornika wielu promieni.



Rysunek 5. Porównanie skuteczności transmisji w różnych środowiskach

O ile więc w obszarach leśnych obserwowane jest skrócenie maksymalnych zasięgów komunikacji, to liczne obiekty w bezpośrednim sąsiedztwie linii komunikacji eliminują tłumienie sygnału radiowego charakterystyczne dla modelu dwupromieniowego. Ponadto, badania wykazały, że brak bezpośredniej widoczności nadajnika i odbiornika nie oznacza braku możliwości bezpośredniego przesyłania

danych. W środowisku leśnym model dwupromieniowy transmisji nie jest właściwy i konieczne jest uwzględnienie większej liczby promieni, które docierają do odbiornika po odbiciu od przeszkód znajdujących się w otoczeniu.

#### 4. Dalsze prace

W toku dalszych prac szczegółowe wyniki pomiarów właściwości komunikacyjnych węzłów sieci oraz zużycia energii zostaną uogólnione na rozległe sieci czujników. Planowane są 2 kierunki badań związane z modelowaniem i symulacją działania sieci WSN oraz wdrożeniem testowej sieci składającej się z kilkudziesięciu węzłów w celu zbierania danych o jej działaniu i weryfikacji skuteczności stosowanych algorytmów w rzeczywistych zastosowaniach.

Planowane są dalsze eksperymenty, mające na celu dokonanie pomiarów i stworzenie realistycznych modeli wykorzystania energii przez węzły sieci WSN. Uwzględniona zostanie energia zużywana podczas komunikacji, czuwania oraz wykonywania obliczeń, a także rozrzut parametrów pomiędzy poszczególnymi urządzeniami. W efekcie pozwoli to dokładnie określić efektywność energetyczną proponowanych i analizowanych algorytmów. Uwzględnienie wpływu na otoczenie oraz niedeterministycznego charakteru transmisji bezprzewodowej w obecności za-

kłóceń pozwoli w realistyczny sposób ocenić niezawodność obecnie stosowanych i analizowanych protokołów zarządzania sieciami WSN.

Ostatecznym celem projektu jest zaproponowanie kompletnego zestawu algorytmów organizacji i monitorowania sieci WSN zapewniających długi czas życia i wysoką niezawodność w zastosowaniach monitorowania środowiska. Najważniejszym założeniem jest rzetelna eksperymentalna analiza skuteczności i niezawodności działania sieci w możliwie realistycznych warunkach.

### Literatura (References)

- [1] A. Dzambaski, D. Trajanov, S. Filiposka, A. Grnarov. Ad hoc networks simulations with real 3d terrains. *15th Telecommunications Forum 2007*, strony 95–98, 2007.
- [2] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *HICSS '00: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8*, strona 8020, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [3] M. Ilyas, I. Mahgoub. *Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems*. CRC, 2005.
- [4] A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm, PT Haneveld, TEV Parker, OW Visser, HS Lichte, S. Valentin. Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision. *Proceedings of the 1st international conference on simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, strona 71. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [5] Bhardwaj Manish, Garnett T., Chandrakasan Anantha, P. Upper bounds on the lifetime of wireless sensor networks. *In Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, wolumen 3, strony 785–790, 2001.
- [6] P. Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 37(2):164–194, 2005.
- [7] K. Sohraby, D. Minoli, T.F. Znati. *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Wiley-Blackwell, 2007.
- [8] A. Varga, i in. The OMNeT++ discrete event simulation system. *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, wolumen 9, 2001.
- [9] O. Younis, S. Fahmy. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, strony 366–379, 2004.