



## Metoda wyznaczania współrzędnych położenia węzłów bezprzewodowej sieci sensorycznej zbudowanej w oparciu o standard IEEE 802.15.4

MARCIN WAWRYSZCZUK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia zaproponowany przez autora sposób identyfikacji współrzędnych położenia węzłów sieci sensorycznej. Zakłada się, że sieć zbudowana będzie w oparciu o nieskomplikowane urządzenia Chipcon CC2420, posiadające wbudowany stos protokołów IEEE 802.15.4. Węzły sieci nie znają swoich współrzędnych położenia, a do ich określenia wykorzystuje się węzły referencyjne, znające swoje współrzędne. W referacie przyjęto pomiar poziomu mocy odebranego sygnału (*Received Signal Strength* — RSS) jako parametr służący do wyznaczania odległości od danego węzła do węzła referencyjnego. Następnie współrzędne szacowane są w oparciu o rozszerzoną metodę największego spadku (*Enhanced Steepest Descent* — ESD). W artykule wykazano również, że parametr RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) jest dobrą metryką wyznaczania odległości w propagacji przyziemnej na niezabudowanym, płaskim terenie.

**Słowa kluczowe:** sieci sensoryczne, wyznaczanie współrzędnych, RSSI, ESD

**Symbolne UKD:** 621.39

### 1. Wprowadzenie

Połączenie dużej ilości niewielkich urządzeń może w rezultacie stworzyć rozległy, w pełni autonomiczny, funkcjonalny i rozproszony system. Dobrze znanym przykładem takich systemów są bezprzewodowe sieci sensoryczne (*Wireless Sensor Network* — WSN). Sieci takie składają się z setek, a nawet tysięcy niewielkich, w miarę tanich i nieskomplikowanych urządzeń czujnikowych, zdolnych do wykonywania pomiarów, wstępnego przetwarzania wyników tych pomiarów oraz przesyłania ich, jeśli zajdzie taka potrzeba. W celu precyzyjnego pomiaru pewnego zjawiska istnieje potrzeba określenia współrzędnych geograficznych każdego z węzłów budujących

sięć. Dokładne wyznaczenie odległości pomiędzy urządzeniami nadawczo-odbiorczymi, a co za tym idzie możliwość określenia ich współrzędnych geograficznych, jest jednym z kluczowych problemów w dziedzinie budowy i implementacji sieci sensorycznych, zwłaszcza gdy węzły nie są wyposażone w odbiorniki GPS, a jednym z podstawowych kryteriów budowy sieci jest koszt urządzenia.

Artykuł przedstawia również wyniki eksperymentu symulacyjnego potwierdzające poprawność zaproponowanego rozwiązania.

## 2. Wyznaczenie odległości pomiędzy węzłami sieci

Istniejące metody wyznaczania współrzędnych bazują na pewnej formie komunikacji węzła nieznającego swojego położenia oraz węzłów znających swoje położenie, będących dla niego punktami odniesienia. Metody te można sklasyfikować w dwóch kategoriach, bazując na ziarnistości informacji wymienianej podczas komunikacji. Metody drobnoziarniste (*fine-grained localization methods*) wyznaczają odległość od węzła będącego punktem odniesienia, bazując na poziomie mocy odebranego sygnału lub pomiarze czasu jego przesyłania. Metody gruboziarniste (*coarse grained localization methods*) bazują na informacji o obecności pewnych elementów w zasięgu danego węzła.

Z punktu widzenia rozpatrywanego problemu, jakim jest wyznaczenie odległości pomiędzy węzłami, oraz dokładności, jaką chcę uzyskać, interesujące wydają się jedynie metody cienkoziarniste. Do metod cienkoziarnistych należą m.in.:

- ToF (*Time of Flight*), która oznacza czas, w jakim fala radiowa przebywa od pojedynczego nadajnika do pojedynczego odbiornika. Metoda ta wymaga stosowania bardzo dokładnego wzorca znacznika czasu oraz synchronizacji pomiędzy węzłami, co czyni ją mało praktyczną w zastosowaniu w sieciach zbudowanych w oparciu o proste urządzenia czujnikowe.
- TDoA (*Time Difference of Arrival*), wykorzystująca różnicę czasów przybycia sygnałów od kilku źródeł emisji o znanych współrzędnych. W przeciwieństwie do metod opartych na pomiarze mocy odebranego sygnału, konieczne są w układzie dodatkowe, zazwyczaj kosztowne elementy. Przy niewielkich odległościach (do około 15 m), można wykorzystać ultradźwięki oraz sygnał radiowy służący do synchronizacji.
- RRS (*Received Signal Strength*), opierająca się na istotnym fakcie dotyczącym propagacji fali radiowej, który mówi, że tłumienie fali rośnie wraz z oddalaniem się od nadajnika.

W artykule do określenia odległości zaproponowana została metoda RSS. Zakłada się, że system będzie bazował na standardzie IEEE 802.15.4 oraz węzły zbudowane zostaną w oparciu o urządzenia CC2420 firmy Chipcon, dysponujące układem wyznaczającym parametr, jakim jest wskaźnik poziomu mocy odebra-

nego sygnału RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Wartość poziomu mocy odebranego sygnału w odbiorniku przedstawia równanie (1):

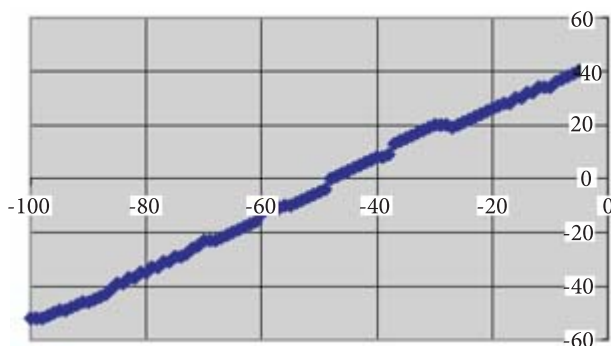
$$P_r = \text{RSSI\_VAL} + \text{RSSI\_OFFSET} \quad [\text{dBm}], \quad (1)$$

gdzie RSSI\_VAL jest wyznaczaną sprzętowo, uśrednioną z 8 symboli (128  $\mu\text{s}$ ) wartością, RSSI\_OFFSET jest wartością korygującą i w przybliżeniu wynosi  $-45$  dBm [1]. Tabela 1 przedstawia podstawowe parametry urządzenia Chipcon CC2420. Na rysunku 2 pokazano zależność RSSI od mocy na wejściu odbiornika.

TABELA 1

Podstawowe parametry transceiwera Chipcon CC2420

Przepustowość	250 Kbps	Moc sygnału na wyjściu nadajnika	0-25 dBm
Pobór mocy przy nadawaniu	17,4 mA przy 0 dBm 8,5 mA przy $-25$ dBm	Czułość odbiornika	$-95$ dBm
Pobór mocy przy odbieraniu	18,8 mA	Częstotliwość nadawanego sygnału	2,4-2,4835 GHz



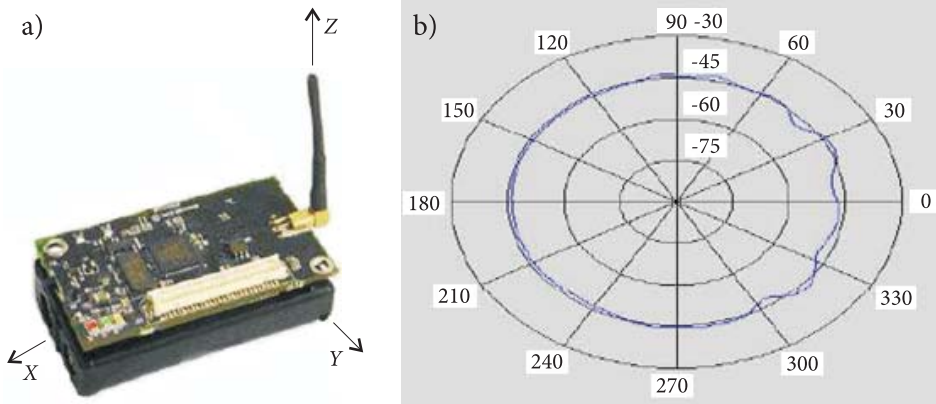
Rys. 1. Zależność RSSI od mocy na wejściu odbiornika [1]

Powiązanie pomiędzy poziomem mocy odebranego sygnału a odległością nadajnika od odbiornika przedstawia zależność:

$$P_r(d) = P_t - L(d) \quad [\text{dBm}], \quad (2)$$

gdzie:  $P_r$  — poziom mocy sygnału na wejściu odbiornika;  $P_t$  — poziom mocy sygnału na wyjściu nadajnika;  $d$  — odległość odbiornika od nadajnika;  $L$  — tłumienność.

Na rysunku 2b) przedstawiono charakterystykę dookólną promieniowania dla urządzenia Chipcon CC2420 w płaszczyźnie  $xy$ . Zakłócenia po prawej stronie



Rys. 2. a) Ułożenie anteny nadajnika/odbiornika; b) charakterystyka promieniowania urządzenia MicaZ z zainstalowanym transceiverem CC2420 [2]

charakterystyki spowodowane są metalową płytką urządzenia oraz zlokalizowaną w tym miejscu krawędzią anteny [2].

Jak zostało pokazane w [3], tłumienność  $L(d)$  w pewnej odległości  $d$  może zostać opisana rozkładem logonormalnym, z wartością średnią daną wzorem :

$$L(d) = \begin{cases} L_0 + 10n_1 \log_{10}(d) + \varepsilon & \text{dla } d \leq d_0 \\ L_0 + 10n_2 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + \varepsilon & \text{dla } d > d_0, \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:  $L_0$  — tłumienność w odległości 1 m;  $n$  — współczynnik tłumienia;  $d$  — odległość pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem;  $d_0$  — odległość, na której zmienia się współczynnik tłumienia;  $\varepsilon$  — odchylenie od modelu teoretycznego.

Tłumienność w odległości 1 m wyznaczana jest ze wzoru [4]:

$$L_0 = 10n_1 \log_{10}\left(\frac{4\pi f}{C}\right), \quad (4)$$

gdzie:  $f$  — częstotliwość fali w Hz;  $C$  — prędkość światła.

Na niezróżnicowanym terenie niezabudowanym bez przeszkód, dla  $f = 2445$  MHz,  $C = 299972458$ , przyjmując  $n_1 = 3$ ,  $n_2 = 3,4$ ,  $d_0 = 1$  m, tłumienność przedstawia się następująco:

$$L = \begin{cases} 60,31 + 30 \log_{10}(d) + \varepsilon & \text{dla } d \leq 1 \text{ m} \\ 60,31 + 34 \log_{10}(d) + \varepsilon & \text{dla } d > 1 \text{ m.} \end{cases} \quad (5)$$

Odpowiednio dobrane współczynniki tłumienia  $n_1$  i  $n_2$  zapewniają zbliżoną zgodność pomiędzy wartościami otrzymanymi drogą doświadczalną oraz wartościami obliczonymi ze wzoru.

Otrzymane wyniki pomiarów pochodzą z urządzeń Chipcon, pracujących na częstotliwości 2445 MHz, dysponujących nominalną mocą nadawania 0 dBm, położonych 7 cm nad powierzchnią ziemi, na jednorodnym terenie, nieodróżnionym pod względem wysokości względnej [4]. Wyniki teoretyczne są bardzo zbliżone do wyników otrzymanych drogą doświadczalną, przy czym największe różnice występują na niewielkich odległościach od węzłów referencyjnych, do odległości ok. 4 m, co przedstawia rysunek 3. Czułość odbiornika wynosi około -95 dBm, co ogranicza zasięg nadajnika do około 10,5 m.

Znając poziom mocy odebranego sygnału w odbiorniku (wykorzystując wartość RSSI\_VAL), moc transmitera (zakładając, że urządzenia zbudowane są w oparciu o moduł transcyvera CC2420, w którym nominalna moc wyjściowa nadajnika wynosi 0 dBm) oraz zależności (2) i (5), odległość  $d$  pomiędzy odbiorcą i nadawcą określa wzór:

$$d = \begin{cases} 10^A & \text{dla } P_r \geq -60,31 \text{ dBm} \\ 10^B & \text{dla } P_r < -60,31 \text{ dBm}, \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:  $A = (P_t - P_r - 60,31)/30$ ;  $B = (P_t - P_r - 60,31)/34$  ( $P_t, P_r$  wyrażone są w dBm), 60,31 dBm — moc sygnału w odległości 1 m od nadajnika.

Jak wykazano w [4], odchylenie od modelu teoretycznego  $\varepsilon$  w pomiarze mocy odebranego sygnału  $P_r$  w odbiorniku zmienia się dla różnych odległości anteny odbiorczej od nadawczej, dla  $d \leq 4$  m wynosi około 6 dBm, natomiast dla  $d > 4$  m wynosi około 0,87 dBm. Generalnie można określić dwa obszary błędów:

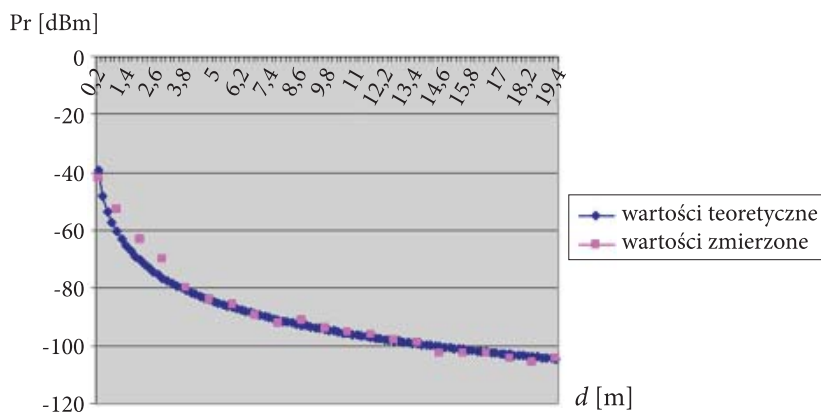
$$d < 4 \text{ m} \rightarrow \Delta d_1 = \Delta d_{1\text{RSSI}} + \Delta d_{1\text{O}} \approx 1 \text{ m},$$

$$d \geq 4 \text{ m} \rightarrow \Delta d_2 = \Delta d_{2\text{RSSI}} + \Delta d_{2\text{O}} \approx 0,7 \text{ m}.$$

Błąd pomiaru może wynikać z niedokładności pomiaru RSSI w urządzeniu CC2420, która może wahać się pomiędzy  $\pm 6$  dBm, niestałości mocy wyjściowej nadajnika oraz niedokładności teoretycznego modelu propagacyjnego.

Podobne rezultaty pod względem dokładności określonych odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, dla porównywalnych warunków terenowych i urządzeń Chipcon CC242 uzyskano w [19].

Dotychczas przeprowadzone badania pokazują, że poprawa dokładności określania odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem wymaga poznania modelu środowiska implementacji węzłów sieci [16]. Co więcej metoda bazująca na RSSI wykazuje dużą zmienność mocy sygnału odebranego dla przestrzeni zamkniętych



Rys. 3. Porównanie poziomu mocy na różnych odległościach odbiornika od nadajnika dla wyników otrzymanych drogą doświadczalną i w wyniku obliczeń teoretycznych

[17-19], ze względu na występowanie odbić fali radiowej od powierzchni pomieszczenia, co może nawet uniemożliwić oszacowanie tej odległości [20]. Dla przestrzeni otwartych metoda spisuje się znacznie lepiej, gdzie zmienność sygnału odbieranego jest znacznie mniejsza [4, 21]. Związane jest to z występowaniem odbicia jedynie od powierzchni ziemi. Dla przestrzeni otwartych zmienność mocy odebranego sygnału w odbiorniku jest tym większa, im większa jest względna różnica wysokości, na jakiej znajdują się nadajnik i odbiornik. Dla urządzeń położonych tuż przy powierzchni ziemi odbicie można praktycznie pominąć, za to tłumienność fali znacząco wzrasta, co skutkuje ograniczeniem zasięgu urządzeń [4, 22].

### 3. Określenie współrzędnych położenia węzłów sieci

Do jednoznacznego określenia (z pewnym przybliżeniem) tylko jednego punktu potrzebne są co najmniej 3 węzły referencyjne, znajdujące się w bezpośrednim zasięgu komunikacyjnym (poziom odebranego sygnału musi być większy niż -95 dBm, co wynika z czułości odbiornika CC2420).

Tabela 2 przedstawia wyniki wyznaczania współrzędnych położenia, bazując na różnych sposobach ich obliczania. Są to kolejno: metoda gradientów sprzężonych CG (*Conjunctive Gradient*), metoda największego spadku SD (*Steepest Descent*), rozszerzona metoda największego spadku ESD (*Enhanced Steepest Descent*), nieliniowa metoda największych kwadratów NLS (*Non-Linear Least Square*) oraz triangularyzacja [13].

W oparciu o przeprowadzone badania [13] oraz tabelę 2, aby określić współrzędne położenia węzłów sieci najbardziej odpowiednie wydają się metoda gradientów sprzężonych (CG) oraz rozszerzona metoda największego spadku (ESD).

TABELA 2

Porównanie algorytmów oszacowania współrzędnych węzła [13]

Algorytm	Czas oblicz. [s]	Błąd średni [m]
CG	0,0060 ( $\hat{u}_1$ )	1,21 ( $\hat{u}_1$ )
	0,0090 ( $\hat{u}_2$ )	1,93 ( $\hat{u}_2$ )
SD	0,0115 ( $\hat{u}_1$ )	1,26 ( $\hat{u}_1$ )
	0,0264 ( $\hat{u}_2$ )	1,93 ( $\hat{u}_2$ )
ESD	0,0058 ( $\hat{u}_1$ )	1,23 ( $\hat{u}_1$ )
	0,0096 ( $\hat{u}_2$ )	1,93 ( $\hat{u}_2$ )
NLS	0,0202 ( $\hat{u}_1$ )	1,23 ( $\hat{u}_1$ )
	0,0363 ( $\hat{u}_2$ )	1,92 ( $\hat{u}_2$ )
Triangularyzacja	0,0001 ( $\hat{u}_1$ )	2,26 ( $\hat{u}_1$ )
	0,0001 ( $\hat{u}_2$ )	3,50 ( $\hat{u}_2$ )

Reszta z analizowanych w [13] metod wymaga implementacji skomplikowanych działań matematycznych (NLS) albo daje znacznie gorsze wyniki pod względem dokładności lub czasu obliczeń. Metoda ESD jest prostsza w implementacji i w celu uzyskania rozwiązania wymaga mniej skomplikowanych działań matematycznych niż CG, dlatego została ona wybrana jako sposób oszacowania współrzędnych położenia. Odpowiednio ją też zmodyfikowano do założeń i uwarunkowań procesu przekazywania współrzędnych.

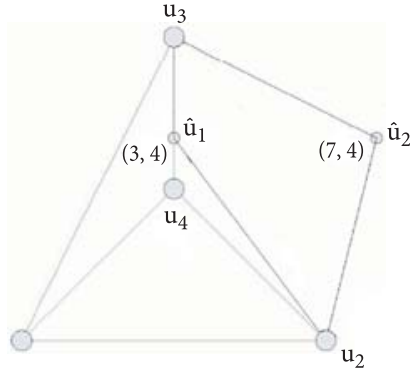
Rozszerzona metoda największego spadku należy do grupy metod multilateracyjnych, gdzie pozycja węzła  $u$  obliczana jest przez minimalizację funkcji celu  $F(u)$  [15]:

$$F(u) = \sum_{i=1}^n (\hat{d}_i - \|\hat{u} - u_i\|)^2, \quad (7)$$

gdzie:  $\hat{u}$  — oszacowane współrzędne węzła;  $u$  — współrzędne węzła referencyjnego;  $\hat{d}$  — zmierzona odległość pomiędzy węzłem obliczającym swoją pozycję a węzłem referencyjnym. Jest to iteracyjna liniowa metoda przeszukiwania, która pozwala na znalezienie minimum lokalnego funkcji celu w kroku  $k + 1$  [15]:

$$\hat{u}(k+1) = \hat{u}(k) + \alpha_k p(k), \quad (8)$$

gdzie:  $\alpha_k$  — długość kroku;  $p(k) = -\nabla F(u(k))$  (gradient funkcji celu w kroku  $k$ ) — kierunek poszukiwania w kroku  $k$ .



Rys. 4. Położenie węzłów nieznanąych współrzędnych ( $\hat{u}_1, \hat{u}_2$ ) oraz węzłów referencyjnych  $u_{1-4}$

W metodzie ESD nie przyjmuje się kroku  $\alpha_k$  jako stałej wartości podczas całego procesu obliczeniowego, ale szacuje się go w każdym kroku jako funkcję poprzedniego i aktualnego kierunku poszukiwań  $(p(k-1), p(k))$ , oddzielnie dla współrzędnej  $x$  i  $y$ :

$$\alpha_k(x) = \frac{F(k) - F(k-1)}{x(k) - x(k-1)}, \quad \alpha_k(y) = \frac{F(k) - F(k-1)}{y(k) - y(k-1)}. \quad (9)$$

gdzie  $F(k)$  — wartość funkcji celu w kroku  $k$ ,  $F(k-1)$  — wartość funkcji celu w kroku  $k-1$ ,  $x(k)$  — współrzędna  $x$  obliczona w kroku  $k$ ,  $x(k-1)$  — współrzędna  $x$  obliczona w kroku  $(k-1)$ ,  $y(k)$  — współrzędna  $y$  obliczona w kroku  $k$ ,  $y(k-1)$  — współrzędna  $y$  obliczona w kroku  $k-1$ .

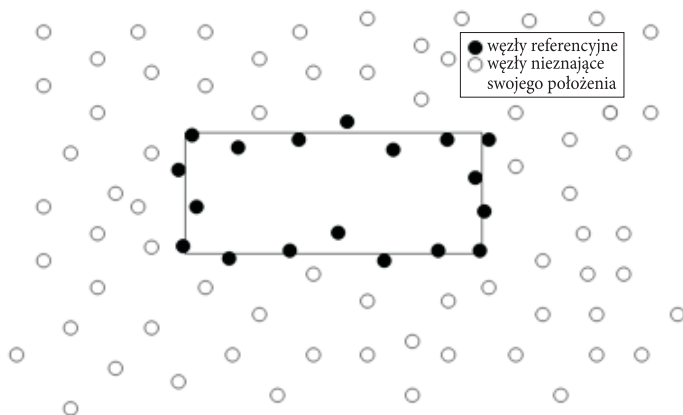
Poprzez rekalkulację wartości kroku  $\alpha_k$  uzyskuje się szybszą zbieżność algorytmu, a tym samym skraca się czas konfiguracji węzła.

#### 4. Opis przeprowadzonej symulacji komputerowej

W celu oszacowania dokładności wyznaczania współrzędnych położenia przeprowadzone zostały eksperymenty symulacyjne dla zadanego rozmieszczenia węzłów. Węzły rozlokowane zostały na obszarze ograniczonym obszarem prostokąta o wymiarach  $xy$  z obszarem chronionym, występującym wewnątrz obszaru implementacji, na którym nie znajdują się żadne sensory (obszar, na którym rozmieszczone są sensory, to obszar pracy sieci).

Na granicy obszaru chronionego rozmieszczone zostały węzły znające swoje współrzędne, przez co na podstawie informacji od tych węzłów, reszta węzłów może z pewną dokładnością określić swoje współrzędne.





Rys. 5. Graficzna interpretacja obszaru chronionego i obszaru pracy sieci

W eksperymencie współrzędne sensorów znajdujących się w obszarze pracy sieci wybrane zostały w sposób losowy, przy pomocy generatora liczb pseudolosowych zaimplementowanego w środowisku matematycznym Maple10. Współrzędne sensorów warstwy pierwszej (na obszarze granicznym) wybrane zostały za pomocą generatora liczb pseudolosowych o rozkładzie równomiernym, z odchyleniem standardowym 1,5 m.

Do odkrywania współrzędnych przez kolejne węzły wykorzystana została rekursywna metoda określania pozycji (RPM — *Recursive Positioning Method*) [13]:

- 1) węzeł nieznający swojego położenia, znajdujący się w zasięgu komunikacyjnym co najmniej trzech węzłów referencyjnych, określa swoje współrzędne,
- 2) po obliczeniu swoich współrzędnych, węzeł staje się tzw. skonwertowanym węzłem referencyjnym (o numerze warstwy o jeden większym od najwyższego numeru warstwy spośród swoich sąsiadów), a następnie rozpoczyna rozgłaszanie własnych współrzędnych położenia,
- 3) proces jest powtarzany do momentu, aż każdy węzeł w sieci pozna swoje współrzędne lub gdy po określonym czasie  $t_w$  węzeł nie otrzyma informacji od co najmniej trzech węzłów referencyjnych, a tym samym pozostanie węzłem nieznającym swoich współrzędnych położenia.

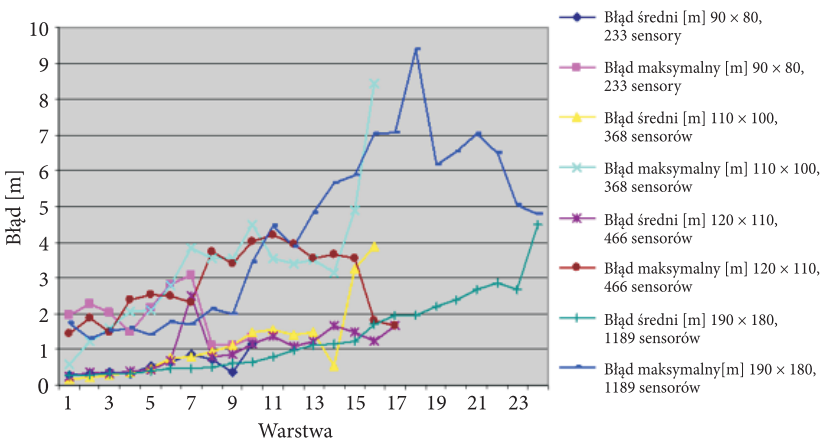
Algorytm określania współrzędnych jest w pełni rozproszony i nieskomplikowany w implementacji na prostym urządzeniu, jakim jest Chipcon CC2420.

## 5. Wyniki

Eksperyment symulacyjny przeprowadzono w środowisku Maple10, wykorzystując metodę RSS w celu wyznaczenia odległości do węzłów referencyjnych oraz ESD jako metodę optymalizacyjną wyznaczania współrzędnych na podstawie odległości do węzłów referencyjnych. Wyniki opierają się na badaniach tłumien-

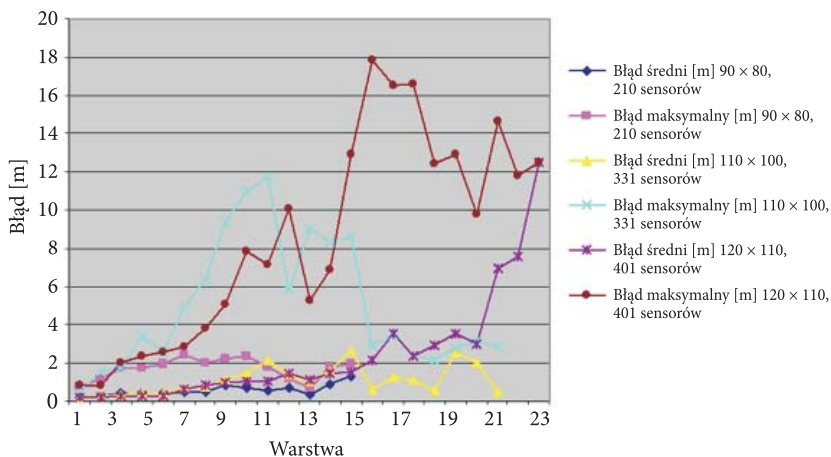
ności fali radiowej przeprowadzonych przez firmę TI na transceiverach Chipcon (CC2420, CC2500), pracujących z częstotliwością 2,4 GHz.

Na rysunku 6a przedstawiono wyniki doświadczenia, w którym liczba rozrzuconych losowo sensorów wynosi  $3,5 \cdot \text{TLD}$  ( $\text{TLD} = P/r_c^2$ , gdzie  $P$  — pole obszaru pracy sieci,  $r_c$  — promień komunikacyjny sensora [14]), gdzie zmiana ulega pole powierzchni pracy sieci, a tym samym rośnie liczba użytych sensorów oraz liczba kolejnych warstw. Zgodnie z przewidywaniami, średni jak i maksymalny błąd rośnie wraz ze wzrostem numeru warstwy. W końcowych warstwach może wystąpić tendencja do zmniejszania się błędu maksymalnego. Wiąże się to ze zmniejszającą się liczbą sensorów w tych warstwach, przez co statystycznie pojawienie się dużego, pojedynczego błędu jest mniejsze. W każdym z powyższych przypadków wszystkie sensory zdołały określić swoje współrzędne położenia, a co za tym idzie nie powstały obszary wewnątrz obszaru pracy sieci, które pozostają niemonitorowane.

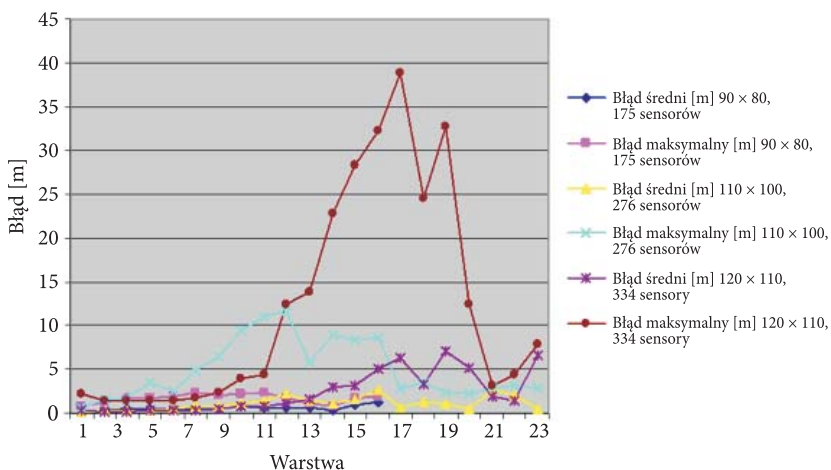


Rys. 6a. Błąd maksymalny i błąd średni określania współrzędnych w symulacji dla różnych obszarów pracy sieci  $a \times b$ , z obszarem chronionym  $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  w części centralnej

Na rysunkach 6b, c przedstawiono wyniki doświadczenia, w którym liczba użytych sensorów wynosi odpowiednio  $3 \cdot \text{TLD}$  oraz  $2,5 \cdot \text{TLD}$ . Tak jak poprzednio, badanie zostało przeprowadzone dla różnych obszarów pracy sieci, ze stałym, umieszczonym w części centralnej obszarem chronionym, ograniczonym prostokątem o wymiarach  $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ . Dla obszaru  $90 \text{ m} \times 80 \text{ m}$  błąd średni i maksymalny jest akceptowalny i nie przekracza  $2,5 \text{ m}$ . Dla obszarów  $110 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  oraz  $120 \text{ m} \times 110 \text{ m}$  błąd powstały w warstwach początkowych propaguje się w kolejnych, aż do momentu gdy sensory pewnej warstwy  $m$  przestają być węzłami referencyjnymi, na bazie których kolejne węzły będą określały własne współrzędne położenia. Błąd propagacji nie jest kompensowany jak w przypadku użycia sensorów w ilości  $3,5 \cdot \text{TLD}$ , ponieważ średnia ilość węzłów referencyjnych dla każdego z sensorów niezających



Rys. 6b. Błąd maksymalny i błąd średni określania współrzędnych w symulacji dla różnych obszarów pracy sieci  $a \times b$ , z obszarem chronionym  $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  w części centralnej



Rys. 6c. Błąd maksymalny i błąd średni określania współrzędnych w symulacji dla różnych obszarów pracy sieci  $a \times b$ , z obszarem chronionym  $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  w części centralnej

swojego położenia jest niewystarczająca na korektę dużego błędu określenia współrzędnych położenia jednego ze skonwertowanych węzłów referencyjnych.

W przypadku użycia  $3 \cdot \text{TLD}$  ilości użytych sensorów, średnio 4-9 sensorów nie określiło własnych współrzędnych położenia. Dla  $2,5 \cdot \text{TLD}$  ilości użytych sensorów średnio 9-17 węzłów nie określiło swoich współrzędnych położenia. W obu przypadkach akceptowalne rezultaty otrzymuje się dla obszarów implementacji sieci  $90 \times 80 \text{ m}$  oraz  $110 \times 100 \text{ m}$ . Dla obszaru implementacji sieci  $120 \times 110 \text{ m}$  pojawiają się pojedyncze błędy określenia współrzędnych położenia rzędu 10 m, które można uznać za poważnie przekłamujące rzeczywiste położenia węzła.

Wyżej opisane przypadki doświadczeń (rys. 6) przedstawiają uśrednione wartości otrzymanych wyników, pochodzące z 10 symulacji dla każdego z trzech przypadków ilości użytych sensorów.

## 6. Podsumowanie

W oparciu o przeprowadzone symulacje komputerowe działania rzeczywistej sieci sensorycznej wykazano, że dla scenariusza implementacji węzłów sieci jak w rozdziale 2, w oparciu o metodę RSS oraz dodatkowo sterując odpowiednio gęstością sensorów rozlokowanych na obszarze pracy sieci, można uzyskać bardzo dobre parametry dokładnościowe wyznaczania współrzędnych położenia. Dodatkowo badanie wykazało, że dla opisanych przypadków, na niewielkich obszarach implementacji sieci, 25-procentowa różnica w ilości użytych sensorów nie przekłada się znacząco na dokładności określenia współrzędnych. Artykuł pokazuje również, że dokładność takiego systemu, dla odpowiednio dobranej ilości sensorów w stosunku do obszaru implementacji, wynosi średnio do kilku metrów (0,1 m do 5-7 m). Dla porównania, odbiorniki GPS montowane w niedrogich sensorach charakteryzują się dokładnością rzędu od 4 nawet do 12 m. Co za tym idzie, przedstawiony sposób określania współrzędnych położenia pozwala zredukować koszt pojedynczego użytego sensora jak i dokładność określenia współrzędnych.

Wyniki eksperymentów symulacyjnych pokazały również, że dla poprawy dokładności wyznaczania współrzędnych, węzły leżące na granicy obszaru chronionego nie powinny być ułożone współosiowo, na granicy tego obszaru. Ułożenie takie może spowodować, że sensory warstwy kolejnej nie są w stanie jednoznacznie określić współrzędnych swojego położenia, co może skutkować powstaniem błędu z przedziału  $(0,2 r_c)$ .

Artykuł wpłynął do redakcji 1.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2010 r.

### LITERATURA

- [1] *Chipcon CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF Transceiver*, TI document.
- [2] W. SU, M. ALZAGHAL, *Channel Propagation Measurement and Simulation of MICAz mote*, WSEAS Transactions on Computer, Issue 4, 7, April 2007.
- [3] J. M. MOLINDA-GARCIA-PADRO, A. MARTINEZ-SALA, M. V. BUENO DELGADO, E. EGEA-LOPEZ, L. JUAN-LLACER, J. GARCIA-HARO, *Channel Model at 868 MHz for Wireless Sensor Networks in Outdoor Scenarios*, Spain, Cartagena, 2005.
- [4] K. TOR-INGE, *Range Measurements in an Open Field Environment*, Texas instruments Design Note DNO18 SWRA169A.
- [5] D. LYMBEROPOULUS, Q. LINDSEY, A. SAAVIDES, *An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas*, Yale University, New Haven, CT 06520, USA.

- [6] P. BAHL, V. N. PADMANABHAN, *RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System*, In Proc. IEEE Infocom, Tel-Aviv, Israel, April 2000, 775-784.
- [7] M. BERNA, B. LISIEN, B. SELLNER, G. GORDON, F. PFENNING, S. THRUN, *A Learning Algorithm for Localizing People Based on Wireless Signal Strength that Uses Labeled and Unlabeled Data*, In Proceedings of IJCAI 03, 2003, 1427-1428.
- [8] P. CASTRO, P. CHIU, T. KREMENEK, R. MUNTZ, *A Probabilistic Location Service for Wireless Network Environments*, Ubiquitous Computing 2001, September 2001.
- [9] <http://www.chipcon.com>.
- [10] D. NICULESCU, B. NATH, *Vor Base Stations for Indoor 802.11 Positioning*, In Proceedings of Mobicom, 2004.
- [11] E. ELNAHRAWY, X. LI, R. M. MARTIN, *The Limits of Localization Using Signal Strength: A Comparative Study*, In Proceedings of Sensor and Ad-Hoc Communications and Networks Conference (SECON), Santa Clara California, October 2004.
- [12] R. WANT, A. HOPPER, V. FALCO, J. GIBBONS, *The active badge location system*, ACM Transaction on Information Systems, 10, 1, Jan 1992, 91-102.
- [13] S. TENNINA, M. DI RENZO, F. SANTUCCI, F. GRAZISCO, *On the Distribution of Positioning Errors in Wireless Sensor Networks: A Simulative Comparison of Optimization Algorithms*, IEEE WCNC, 2008, 2075-2080.
- [14] M. WAWRYSZCZUK, *The Concept of Building Dense K-Covering Wireless Sensor Networks*, SECON 2009, Military University of Warsaw.
- [15] S. OSOWSKI, *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006, 56-57.
- [16] M. LOWTON, J. BROWN, J. FINNEY, *Finding NEMO: On the Accuracy of Inferring Location in IEEE 802.15.4 Network*, REALWSN'06, 2006, Uppsala, Sweden.
- [17] A. AWARD, T. FRUNZKE, F. DRESSLER, *Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measurement*, DSD2007, August 2007, 471-478.
- [18] K. BENKIC, M. MALAJNER, P. PLANINSIC, Z. CUCEJ, *Using RSSI Value for Distance Estimation in Wireless Sensor Networks Based on ZigBee*, Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP, 15th International Conference on. 25/07/2008.
- [19] S. HARA, D. ZHAO, K. YANAGIHARA, J. TAKETSUGU, *Propagation Characteristics of IEEE 802.15.4 Radio Signal and Their Application for Location Estimation*, IEEE Xplore, 2005.
- [20] D. LYMBERPOLUS, Q. LINDSEY, A. SAVVIDES, *An Empirical Characterization of Radio Signal Strangth Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Network Using Monopole Antennas*, EWSN 2006, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, 326-341.
- [21] M. SRBINOVSKA, C. GAVROVSKI, V. DIMCEV, *Localization Estimation System Using Measurement of RSSI Based on ZigBee Standard*, ELECTRONICS, Sozopol, Bulgaria, 2008.
- [22] A. CHARYTONIUK, *Anteny i Propagacja Fal Radiowych*, WAT, Warszawa, 1993.

M. WAWRYSZCZUK

### **A method of assigning coordinates of IEEE 802.15.4 wireless sensor network**

**Abstract.** This paper presents a concept of building wireless sensor network, using simple devices Chipcon CC2420, with built-in IEEE 802.15.4 protocols stack. It is assumed that the nodes do not know their coordinates and they can calculate them using referential nodes (which know their position).

Nodes measure the distance to the referential nodes using Received Signal Strength Indicator (RSSI) parameter and after that acquire their coordinates involving Enhanced Steepest Descent optimization method. In the article, it is shown that RSSI parameter can be a good estimator of the distance measurement in uniform area, in ground-level propagation model.

**Keywords:** sensor networks, coordinates assignment, RSSI, ESD

**Universal Decimal Classification:** 621.39