

Określanie pokrycia bezprzewodowej sieci sensorowej metodą obliczania ścieżki najmniejszej ekspozycji

Tadeusz Goszczyński

W bezprzewodowych sieciach sensorowych przeznaczonych do monitorowania dużych obszarów ziemi konieczne jest wyznaczenie pokrycia monitorowanej przestrzeni przez rozmieszczone w niej czujniki. W artykule przedstawiono metodę określania pokrycia przez obliczenie ścieżki najmniejszej ekspozycji i opisano algorytm umożliwiający wyznaczanie jej lokalnie, bez konieczności przesyłania danych o lokalizacji wszystkich węzłów sieci do centralnego komputera systemu.

W ostatnich latach, w związku z rozwojem techniki transmisji bezprzewodowej, coraz większe zainteresowanie budzą sieci komputerowe złożone z rozmieszczanych w różny sposób w terenie elementów monitorujących zachodzące tam zjawiska [1].

Bezprzewodowa sieć sensorowa [2] to sieć złożona z wielu małych urządzeń rozlokowanych na pewnym obszarze w celu realizacji pewnego – wspólnego dla wszystkich – zadania. Podstawowym elementem sieci jest czujnik monitorujący zmienność pewnych wielkości, takich jak temperatura, wilgotność, obecność (nieobecność) obiektu, dźwięk, ciśnienie, ruch, stopień zanieczyszczenia powietrza itp. w różnych lokalizacjach. Sieć taka tworzona jest przez wiele sensorów, czyli bezprzewodowych czujników mających zdolność do utrzymywania bezprzewodowej komunikacji pomiędzy sobą, które jednak mają ograniczone możliwości obliczeniowe i powinny oszczędnie używać zasobów energii ze swoich baterii.

Podstawowymi cechami, które powinna mieć każda sieć WSN (*Wireless Sensor Network*) stanowiącymi jednocześnie kryteria do jej oceny, są:

- łączność – zdolność do komunikacji pomiędzy wszystkimi czujnikami (ang. *connectivity*)
- pokrycie – zdolność do monitorowania wyznaczonej przestrzeni ich otoczenia (ang. *coverage*).

W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy do opisanego parametrów sieci sensorowej oraz różne metody wyznaczania pokrycia wykorzystujące obliczanie ścieżki najmniejszej ekspozycji. Kolejne rozdziały przedstawiają najważniejsze zagadnienia: podstawy teoretyczne do obliczania ekspozycji sieci monitorującej; metodę obliczenia ekspozycji w komputerze centralnym systemu monitorowania przy upraszczającym założeniu, że w każdym punkcie

przestrzeni monitorowanej uwzględnia się tylko działanie najbliższego mu czujnika; metodę stosującą obliczenia heurystyczne, dzięki czemu można uwzględnić w obliczeniach ścieżki najmniejszej ekspozycji wpływ wszystkich czujników sieci; algorytm lokalny obliczenia ścieżki minimalnej ekspozycji, który umożliwia znaczne ograniczenie komunikacji między węzłami sieci wymaganej do przesyłania danych o lokalizacji wszystkich jej węzłów. Na końcu przedstawiono konkluzję i sugestie dotyczące kierunku dalszych prac w tej dziedzinie.

Pokrycie i ekspozycja

Projektowanie sensorowych sieci bezprzewodowych wymaga rozwiązania kilku problemów, jak: rozlokowanie czujników, uzyskanie informacji o ich położeniu i śledzenie pracy systemu a także stosowania różnych nowych algorytmów do ich oceny [3].

Miarą jakości pokrycia terenu czujnikami jest ekspozycja. Ekspozycja to wielkość służąca do oceny zdolności monitorowania, czyli do określenia skuteczności obserwacji obiektu przemieszczającego się po dowolnej drodze w czasie jego przejścia pomiędzy dwoma punktami przez pole monitorowane.

Prace badawcze nad bezprzewodowymi sieciami sensorowymi, poza problemami dotyczącymi zmniejszenia kosztu utrzymania takiej sieci przy jednoczesnym zwiększeniu niezawodności i czasu pracy bez wymiany baterii, koncentrują się na sposobach oceny jakości monitorowania otoczenia.

Jednym ze sposobów oceny jakości jest wyznaczanie ścieżki najmniejszej ekspozycji dla obiektów przemieszczających się poprzez monitorowaną przestrzeń. Ścieżka najmniejszej ekspozycji daje informację dotyczącą najgorszego przypadku pokrycia przestrzeni przez system monitorujący. Rozwiązanie zadania [4] polega na wyznaczeniu drogi pomiędzy dwoma danymi punktami, na której suma informacji zarejestrowanej przez czujniki systemu w czasie przejścia obiektu będzie najmniejsza.

mgr inż. Tadeusz Goszczyński – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa

W modelu czujnika według [5] przyjęto, że czułość czujnika zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości przedmiotu od czujnika:

$$S(s, p) = \frac{\lambda}{[d(s, p)]^k} \quad (1)$$

gdzie: S – czułość, s – czujnik, p – punkt, $d(s, p)$ – odległość punktu od czujnika, λ i k – parametry czujnika.

Matematycznie ścieżka ekspozycji w [2] jest przedstawiana jako całka po czasie przejścia obiektu z punktu startowego $p(t_1)$ do punktu przeznaczenia $p(t_2)$ z funkcji realizowanej przez czujniki.

$$E(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} I(F, p(t)) \left| \frac{dp(t)}{dt} \right| dt \quad (2)$$

dla:

$$\left| \frac{dp(t)}{dt} \right| = \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2} \quad (3)$$

gdzie: E – ekspozycja, t_1, t_2 – czas rozpoczęcia i zakończenia trasy obiektu, I – natężenie pola czujnikowego (ang. *sensor field intensity*), F – pole czujnikowe, x, y – współrzędne prostokątne.

Rozwiązanie z uwzględnieniem tylko najbliższego czujnika

Przy założeniu, że przy poszukiwaniu ścieżki w każdym punkcie uwzględniane jest działanie tylko najbliższego czujnika oraz że monitorowany obiekt porusza się stale z maksymalną prędkością, można zastosować w obliczeniach metodę obliczeń różniczkowych Eulera-Lagrange'a.

Dla ogólnie sformułowanej funkcji [6]:

$$J[y] = \int_a^b F(x, y, y') dx \quad (4)$$

warunkiem koniecznym, aby funkcja ta miała ekstremum jest spełnienie równości:

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y'} = 0 \quad (5)$$

Jeżeli czułość czujnika S , określona w (1), w punkcie p wynosi:

$$S(s_i, p) = \frac{1}{d(s_i, p)} \quad (6)$$

to ścieżka najmniejszej ekspozycji pomiędzy dowolnymi punktami A i B może być wyrażona we współrzędnych biegunowych jako:

$$\rho(\theta) = ae^{\frac{\ln(b/a)\theta}{\alpha}} \quad (7)$$

gdzie: stałe a i b reprezentują odległości pomiędzy czujnikiem i odpowiednio punktami A i B, α – kąt wyznaczony przez: A – czujnik – B.

Dla czujnika o funkcji czułości (1) dla $\lambda = 1$ oraz dla $k \geq 0$ i $k \neq 1$, ścieżka najmniejszej ekspozycji pomiędzy dowolnymi punktami A i B jest określona wzorem:

$$\rho(\theta) = a \left\{ \cos((k-1)\theta) + \sin((k-1)\theta) \frac{\left(\frac{b}{a} \right)^{k-1} - \cos((k-1)\alpha)}{\sin((k-1)\alpha)} \right\}^{\frac{1}{k-1}} \quad (8)$$

Wyznaczenie ścieżki najmniejszej ekspozycji nie tylko umożliwi ocenę systemu monitorowania, lecz ponadto daje możliwość rekonfigurowania systemu przez dodanie czujników lub zmianę ich położenia w celu zwiększenia ekspozycji.

Przy korzystaniu z metod, w których obliczenia są wykonywane przez centralny komputer systemu, wymagane jest, by dane o lokalizacji przemieszczanego (lub dodanego) czujnika były dostarczone do komputera lub do wszystkich pozostałych węzłów sieci czujników.

Wiążą się z tym problemy wynikające z przypadkowych uszkodzeń dowolnego węzła oraz zużycia energii koniecznej do rozpropagowania wyników obliczeń do wszystkich węzłów sieci. Znany jest też z literatury [7] algorytm lokalnej ścieżki najmniejszej ekspozycji, którego zastosowanie minimalizuje powyższe problemy. W obliczeniach muszą być uaktualniane tylko dane sąsiednich węzłów, a dane dotyczące ścieżki najmniejszej ekspozycji mogą być wyliczone łatwiej i w ekonomiczny energetycznie sposób w trakcie pracy systemu.

Obliczanie ścieżki najmniejszej ekspozycji w komputerze centralnym

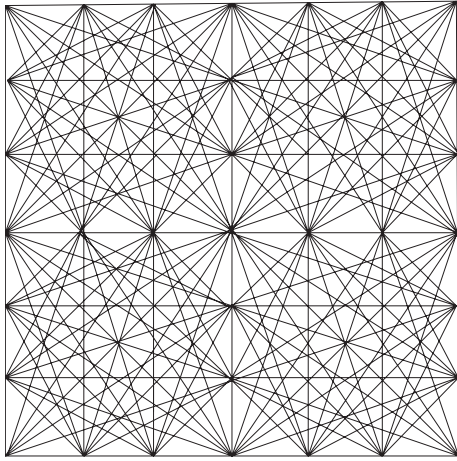
W sieci monitorującej przestrzeń o wyznaczonych granicach zawierającej wiele czujników, wyznaczenie ścieżki najmniejszej ekspozycji prostymi metodami analitycznymi jest niemożliwe.

W literaturze [5] zaproponowano sposób rozwiązania problemu w 3 etapach:

- transformacja problemu analogowego do formy dyskretnej (cyfrowej)
- zastosowanie teorii grafów
- obliczanie ścieżki najmniejszej ekspozycji z zastosowaniem algorytmu Dijkstry.

Algorytm Dijkstry znajduje w grafie wszystkie najkrótsze ścieżki pomiędzy wybranym wierzchołkiem a wszystkimi pozostałymi. Wylicza również koszt przejścia każdej z tych ścieżek, w tym wypadku jej ekspozycję. Ścieżką nazywamy uporządkowany zbiór wierzchołków, które należy kolejno przejść, aby dotrzeć w grafie od jednego wybranego wierzchołka do innego wybranego wierzchołka.

Autorzy podzielili przestrzeń monitorowaną na siatkę F_D zawierającą $n \times n$ kwadratów. W najprostszej wersji dla siatki pierwszego rzędu ścieżka najmniejszej ekspozycji ma wymuszony przebieg, tak by przebiegała tylko po krawędziach i przekątnych siat-



Rys. 1. Przestrzeń monitorowana podzielona na $n \times n$ kwadratów z siatką rzędu m dla wartości: $n = 2$ i $m = 3$

ki. W celu zwiększenia dokładności przebiegu ścieżki najmniejszej ekspozycji autorzy zastosowali także struktury siatki drugiego i trzeciego rzędu. Jak przedstawiono na rys. 1, aby zbudować siatkę rzędu m , należy umieścić $m + 1$ wierzchołków wzdłuż każdej krawędzi kwadratu siatki. Ścieżka najmniejszej ekspozycji jest wtedy ograniczona do segmentów linii prostej łączących dowolne dwa wierzchołki każdego kwadratu. Można łatwo sprawdzić, że jeśli $n \rightarrow \infty$ i $m \rightarrow \infty$, to rozwiązanie algorytmu osiąga optimum kosztem czasu rozwiązywania oraz kosztem koniecznej wielkości pamięci.

Po wytworzeniu siatki, następnym krokiem algorytmu jest przetworzenie jej na graf G z krawędziami o dodatnich wagach. Uzyskuje się to przez dodanie w G wierzchołka odpowiedniego do każdego wierzchołka w F_D i krawędzi odpowiedniej dla każdego segmentu F_D . Każda krawędź ma przyznaną wagę równą wartości ekspozycji wzdłuż jej odpowiedniej krawędzi F_D , obliczonej lub aproksymowanej przez funkcję $Exposure()$. Funkcja ta oblicza ekspozycję wzdłuż segmentu linii stosując technikę całkowania numerycznego i może być implementowana w różny sposób.

Jeżeli znane są położenia punktów startowego i końcowego, to można zastosować algorytm Dijkstry; komputer zużywa wtedy czas przede wszystkim na generowanie siatki, który jest proporcjonalny do $|F_D|$, czyli całkowitej liczby wierzchołków siatki. Jeżeli istnieje konieczność obliczenia najmniejszej ekspozycji między dowolnymi parami wierzchołków to stosuje się algorytm Floyd-Warshalla, a czas wykonywania obliczeń jest zależny od czasu obliczeń najkrótszej ścieżki i jest proporcjonalny do $|F_D|^3$.

Rozwiązanie uwzględniające wiele czujników

Przy uwzględnieniu w obliczeniach ścieżki najmniejszej ekspozycji natężenia pola jako sumy ze wszystkich czujników, należy założyć że jest n aktywnych czujników: s_1, s_2, \dots, s_n i każdy z nich wnosi funkcję S zależną od odległości.

Wtedy natężenie pola będzie wyrażone przez:

$$I_A(F, p) = \sum_1^n S(s_i, p) \quad (9)$$

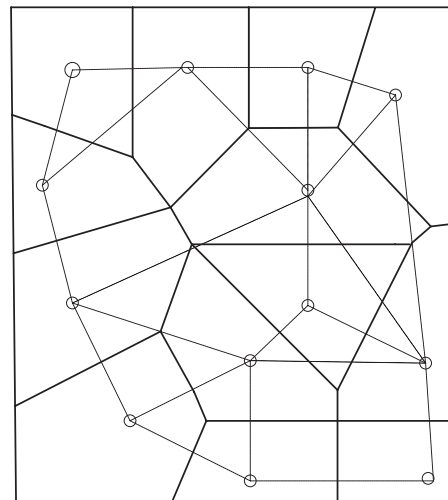
Autorzy [7] zastosowali metodę aproksymacji także opartą na siatce nałożonej na monitorowaną przestrzeń. Ich algorytm również określa ścieżkę z dokładnością zależną od rozmiarów oczka siatki. Nowością jest to, że opracowany algorytm pozwala lokalnie wyznaczyć ścieżki najmniejszej ekspozycji bez konieczności znajomości topografii całej sieci. Autorzy stosują obliczenia heurystyczne. Heurystyka to metoda znajdowania rozwiązań, dla której nie ma gwarancji znalezienia rozwiązania optymalnego. Rozwiązań tych używa się np. wtedy, gdy pełny algorytm jest nieznan. Metodę stosuje się często do znajdowania rozwiązań przybliżonych, na podstawie których później wylicza się ostateczny rezultat. To ostatnie zastosowanie szczególnie dotyczy przypadków, gdy heurystyka jest wykorzystywana do nakierowywania pełnego algorytmu ku optymalnemu rozwiązaniu, aby zmniejszyć czas działania programu (w typowym przypadku bez poświęcania jakości rozwiązania).

W takim lokalnym algorytmie, liczba przesyłek wysyłanych przez sieć oraz obliczenia wykonywane w każdym węźle mogą być ograniczone do minimum.

Przyjęto następujące założenia:

- 1) węzły sieci nie mają niezbędnej wiedzy potrzebnej do obliczenia lokalnie najkrótszej ścieżki i dlatego przesyłają otrzymywane przesyłki do swoich sąsiadów wyznaczając położenie najkrótszej ścieżki metodą heurystyczną
- 2) węzeł sieci przechowuje otrzymaną informację o topologii i przesyła ją dalej
- 3) w celu zmniejszenia liczby obliczeń ekspozycji w każdym węźle stosowany jest algorytm aproksymacyjny oparty na wielobokach Voronoia.

W dalszej części artykułu węzły sieci sensorowej wyposażone w czujniki będą dla uproszczenia nazywane sensorami.



Rys. 2. Diagram wieloboków Voronoia dla 13 przypadkowo rozmieszczonych węzłów sensorów

Na rys. 2 przedstawiono sposób budowania wieloboku Voronoia. W tym celu łączy się najpierw wybrany sensor z sąsiednimi sensorami tworząc kilka odcinków. Następnie tworzy się wielobok Voronoia z prostych będących symetralnymi tych odcinków.

Punkty siatki są umieszczane wzdłuż krawędzi wieloboku Voronoia – punkty siatki w tym samym wieloboku są w pełni połączone. Waga krawędzi pomiędzy dwoma punktami siatki jest taka jak waga dla sensora w tym wieloboku liczona według (przedstawionego wyżej) optymalnego rozwiązania z jednym czujnikiem. Jednak taką wagę stosuje się tylko wtedy, gdy najkrótsza ścieżka jest całkowicie wewnątrz wieloboku. Jeżeli nie, to do wyznaczenia wagi krawędzi stosuje się linię prostą. Ponadto optymalne rozwiązanie z jednym czujnikiem jest stosowane w celu połączenia różnych obszarów poszukiwań. Natomiast jeżeli wyznaczona wartość pomiędzy dwoma punktami jest większa niż wcześniej wyznaczona, to te dwa punkty nie są już rozpatrywane w trakcie kolejnych iteracji lokalnego algorytmu.

Algorytm lokalny obliczenia ścieżki minimalnej ekspozycji

Lokalny algorytm wyznaczania ścieżki minimalnej ekspozycji rozwiązuje następujący problem: dla danej sieci sensorowej S o modelu E , oraz mając współrzędne początku i końca na siatce nałożonej na monitorowaną przestrzeń, znaleźć ścieżkę najmniejszej ekspozycji. Stosuje on dwa typy przesyłek. pomiędzy sensorami przesyłane są przesyłki typu *Search* i przesyłki typu *Forward*. Przesyłki te zawierają tę samą treść, natomiast węzeł-odbiornik po przyjęciu przesyłki dla każdej z nich podejmuje inną akcję: albo szukanie lokalnie ścieżki, albo przesłanie do sąsiedniego sensora (odpowiednio do typu przesyłki).

Węzeł sieci wybiera spośród swoich sąsiadów jako odbiorcę przesyłki tego, który ma heurystycznie wyznaczoną największą wartość przydatności. Wartość ta, z jednej strony, rośnie dla węzła, który ma potencjalnie dużą liczbę sąsiadów i w ten sposób można szybko poznać topografię sieci. Przydatność będzie w sposób naturalny wyznaczona poprzez odległość pomiędzy nadawcą i odbiorcą. Z drugiej strony wartość ta jest większa, gdy odbiorca jest bliżej punktu docelowego. Autorzy połączyli te dwa czynniki i zastosowali następującą formułę do obliczeń wartości przydatności dla węzła j w odniesieniu do węzła nadajnika i :

$$\left(\frac{1}{h^k}\right)\frac{D(i,j)}{R} + \left(1 - \frac{1}{h^k}\right)\left(1 - \frac{D(j,Finish)}{D(i,Finish)^k}\right) \quad (10)$$

gdzie: $D(i,j)$ – odległość pomiędzy nadajnikiem i a sąsiadem j , R – maksymalny zasięg komunikacji, h – liczba wykonanych transmisji tej przesyłki, k – dodatnia stała.

Formuła ta równoważy dwa obliczenia niepowiązanych ze sobą wartości: pierwszy składnik nagradza węzły, które są daleko od nadawcy, drugi karze

sąsiada j , jeżeli jest on dalej od celu niż nadawca węzeł i (i wartość drugiego członu będzie ujemna). Stała k odzwierciedla jak szybko waga zmienia się pomiędzy wybraniem sąsiada dalekiego od sensora a wybraniem sąsiada blisko celu przeznaczenia. Tendencja we wzorze jest taka, żeby wybierać sąsiada bliżej celu gdy h (liczba transmisji) wzrasta – aby zapobiegać zjawisku, w którym przesyłka krąży w koło i bez końca w sieci.

Algorytm lokalnej aproksymacji dla ścieżki najmniejszej ekspozycji zawiera następujące etapy:

- 1) Sensor, który jest położony najbliżej położenia startowego wysyła przesyłkę *Search* do węzła, który jest wyznaczony na podstawie wzoru (10).
- 2) Kiedy przesyłka ta dociera do węzła jej przeznaczenia (węzła najbliższego do końcowych współrzędnych), węzeł ten oblicza ścieżkę najmniejszej ekspozycji stosując algorytm aproksymacji oraz otrzymane dane topograficzne (algorytm aproksymacji daje w wyniku bliską optymalnej ścieżkę najmniejszej ekspozycji w wieloboku Voronoia bez stosowania kosztownej obliczeniowo metody z siatką i dlatego zmniejsza wymagania obliczeniowe).
- 3) Następnie algorytm wybiera węzeł o lokalizacji, która jest najbardziej obiecująca (że zawiera ścieżkę najmniejszej ekspozycji) i wysyła tam przesyłkę *Forward*. Gdy odpowiedni sensor odbierze tę przesyłkę, to sam wysyła przesyłkę *Search* z powrotem do sensora przeznaczenia, aby zebrać więcej informacji o topografii sieci (które są wymagane przez algorytm aproksymacji Voronoia).
- 4) Proces ten powtarzany jest aż do momentu, gdy już żaden węzeł/sensor nie wymaga dalszych informacji o topologii, albo dotąd gdy żadne lokalizacje już nie są obiecujące w porównaniu z aktualnie wyznaczoną ścieżką najmniejszej ekspozycji.

Do realizacji algorytmu potrzebne jest tylko wytworzenie procesu odnajdującego sensor, który będzie odbiorcą przesyłki *Forward*. Do jego wyznaczenia należy:

- Nałożyć punkty siatki na znane krawędzie Voronoia. Punkty siatki, które są częścią tego samego wieloboku Voronoia są połączone krawędzią, której waga jest wyznaczona przez obliczoną (z uwzględnieniem tylko najbliższego sensora) wagę ścieżki najmniejszej ekspozycji pomiędzy tymi dwoma punktami.
- Wykonać poszukiwanie *najkrótszej ścieżki* od punktu startowego do współrzędnych końcowych z użyciem krawędzi i wag wyznaczonych przez nałożone punkty siatki. Jeżeli algorytm najkrótszej ścieżki próbuje wybrać taki punkt siatki na krawędzi Voronoia, że tylko jeden z dwu wyznaczających ją węzłów został odwiedzony, to ten węzeł jest oznaczany jako *potencjalny* i nie będzie już więcej wyszukiwany (bo nie ma już więcej wieloboków Voronoia w tym kierunku).
- Wyznaczać i zapamiętywać ścieżki o najlepszej wadze z tego punktu do punktu przeznaczenia.

W celu wyznaczenia ścieżki o najlepszej wadze dla punktu siatki, należy wyznaczyć ekspozycję danej ścieżki do tego punktu siatki oraz ekspozycję do punktu przeznaczenia. Aby wyznaczyć ekspozycję do

punktu przeznaczenia, należy wybrać sensor, który ma ścieżkę od punktu siatki do punktu przeznaczenia o największej wadze (obliczoną z uwzględnieniem tylko najbliższego sensora). Przez dodanie tych dwóch wartości uzyskuje się aproksymację ścieżki najmniejszej ekspozycji o najlepszej wadze i jeżeli ta aproksymowana ścieżka ma większą ekspozycję niż aktualnie znana ścieżka najmniejszej ekspozycji, to odpowiadający jej punkt siatki jest ignorowany.

Obliczana jest następnie dla każdego *potencjalnego* punktu siatki ścieżka o najlepszej wadze i jeżeli najlepszy *potencjalny* punkt siatki ma wagę mniejszą niż obecnie znana ścieżka najmniejszej ekspozycji (która leży całkowicie wewnątrz wyznaczonego wieloboku Voronia), to przesyłka *Forward* wysyłana jest do sensora najbliższego do tego punktu siatki, który z kolei będzie szukał innych wieloboków Voronia blisko tego punktu siatki.

W momencie kiedy wszystkie *potencjalne* punkty siatki mają ścieżki o najlepszej wadze o większej ekspozycji niż aktualna ścieżka najmniejszej ekspozycji, to poszukiwania są zakończone i obecna ścieżka najmniejszej ekspozycji jest traktowana jako końcowy wynik.

Podsumowanie

Obliczenie ekspozycji to jedno z podstawowych zagadnień w bezprzewodowych sieciach tworzonych ad hoc. Przedstawiono model sieci ze zdolnością do monitorowania wyznaczonej przestrzeni otoczenia ocenianą przez jej pokrycie i zbadano kilka jej właściwości. Stosując algorytmy Dijkstry i Floyda-Warshalla do obliczeń najkrótszej ścieżki, przedstawiono dwa różne algorytmy dla wyznaczenia ścieżki najmniejszej ekspozycji. Działają one dla dowolnych modeli sensorów i zapewniają nieograniczony poziom dokładności w zależności od czasu obliczeń. Przedstawiona metoda obliczeń w komputerze centralnym wydaje się mieć zastosowanie wyłącznie do sieci o niewielkiej liczbie węzłów, ze względu na konieczność ograniczenia mocy pobieranej przez węzły sieci przy nawiązywaniu komunikacji z centralnym komputerem za pośrednictwem innych węzłów. Metoda korzystająca z algorytmu lokalnej aproksymacji stosuje obliczenia heurystyczne i nie zapewnia dokładności obliczenia ścieżki najmniejszej ekspozycji takiej, jak komputer centralny. Ponieważ jednak obliczenia takie służą przede wszystkim do ewentualnego ulepszenia sieci monitorującej przez dodanie kolejnych sensorów, dokładność obliczeń nie jest wielkością krytyczną. Natomiast wielkimi zaletami metody z algorytmem lokalnej aproksymacji są: możliwość oceny ekspozycji nawet w sytuacjach, gdy kilka węzłów sieci zostanie uszkodzonych, oraz znacznie mniejszy pobór mocy z baterii węzłów. Dalsze badania w tej dziedzinie, uwzględniające sieci mieszane z węzłami stacjonarnymi oraz węzłami mobilnymi, np. wykorzystującymi mobilne roboty, będą koncentrować się na algorytmach znajdujących – bliskie optymalnym – minimalne liczby węzłów do zapewnienia łączności między nimi i jednocześnie pokrycia dla całej przestrzeni monitorowanej.

Bibliografia

1. Mainwaring A., Polastre J., Szewczyk R., Culler D., Anderson J.: *Wireless sensor networks for habitat monitoring*, Proc. 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta USA, 2002, s. 88–97.
2. Estrin D., Govindan R., Heidemann J.: *Embedding the Internet*, Communications of the ACM 2000.
3. Li X., Wan P., Frieder O.: Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks, IEEE Transactions for Computers 2002.
4. Pottie G. J., Kaiser W. J.: *Wireless Integrated Network Sensors*. Communications of the ACM, vol. 43, (no. 5), Maj 2000, s. 51–58.
5. Meguerdichian S., Koushanfar F., Qu G., Potkonjak M.: *Exposure in wireless ad-hoc sensor networks*, Proc. 7. Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), Rzym, Włochy, 2001, s. 139–150.
6. Fomin S. V., Gelfand I. M.: *Calculus of Variations*, Dover Publications, październik 2000.
7. Veltri G., Huang Q., Qu G., Potkonjak M.: *Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks*, Proc. 1. Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03), Los Angeles, USA, 2003, s. 40–50. ■