

Nowa koncepcja w pełni adaptacyjnego protokołu rutowania dla bezprzewodowych sieci sensorycznych (2)

► Paweł Piotr Czapski

Bezprzewodowe sieci sensoryczne – BSS (ang. *wireless sensor network* – WSN) są coraz częściej stosowane do obserwowania czynników środowiskowych (zastosowania militarne i cywilne). Rozwój technologii pozwala obecnie na wytwarzanie węzłów o wymiarach rzędu centymetrów i w cenie poniżej kilku USD za sztukę, a co za tym idzie, na stosowanie ich w dużych ilościach. Odczyty z sensorów są zazwyczaj agregowane lub przekazywane (w surowej formie lub poddane niezbędnej redukcji objętości) do obserwatora. Mimo to nadal brakuje wydajnych protokołów rutowania, zarówno z punktu widzenia energooszczędności, jak i pełnej adaptacyjności do zmieniających się warunków pracy. W dwuczęściowym artykule przedstawiono nowatorską koncepcję w pełni adaptacyjnego protokołu rutowania, którego funkcjonowanie będzie zależne tylko i wyłącznie od odczytów sensorycznych (tj. od jakości i ilości zdarzeń). W drugiej części artykułu zamieszczono założenia do takiego protokołu oraz do badań proponowanego rozwiązania.

Nowy protokół rutowania

Punktem wyjścia do budowy w pełni adaptacyjnego protokołu rutowania jest połączenie dwóch metod projektowania algorytmów trasowania, tj. projektowania wydajnego protokołu („od aplikacji”), którego funkcjonowanie będzie podyktowane wymaganiami aplikacyjnymi („do aplikacji”).

Z punktu widzenia projektowania „od aplikacji” (i uwzględniając założenia w pełni adaptacyjnego protokołu) docelową aplikacją dla projektowanego protokołu będzie w dużym stopniu aplikacją uniwersalną. Inaczej mówiąc, chcemy stworzyć algorytm trasowania zoptymalizowany z punktu widzenia energochłonności (minimalizowanie energii potrzebnej na lokalne dostarczanie/komunikowanie odczytów sensorycznych, tj. w obrębie sąsiadujących węzłów, a także na dostarczanie odczytów bądź ich charakterystyk do obserwatora), efektywnej komunikacji (lokalna i globalna minimalizacja czasu opóźnień komunikowanych odczytów, maksymalizacja przepustowości BSS itd.), a także uniwersalności (uniezależnienie funkcjonowania protokołu rutowania od wymagań stawianych przez aplikację bądź od zmiany jej parametrów).

W dalszej treści artykułu przedstawiono założenia funkcjonalne modelowanego protokołu, a także opis badań, których wykonanie jest niezbędne do zbudowania nowego algorytmu trasowania.

Założenia funkcjonalne adaptacyjnego protokołu rutowania

Zakłada się, że do funkcjonalnego opisu projektowanego protokołu rutowania niezbędne jest określenie przeznaczenia rozpatrywanego modelu BSS, sprecyzowanie możliwych scenariuszy zdarzeń, które mogą mieć miejsce, a także zdefiniowanie problemu wynikającego z przeznaczenia sieci i możliwych scenariuszy. Takie właśnie podejście wypływa z tego, iż adaptacyjność może zachodzić jedynie przy zmienności funkcjonowania sieci (zarówno w czasie jak i przestrzeni). Przyjmuje się, że wspomniana zmienność nie musi zachodzić lokalnie.

Przeznaczenie sieci i scenariusze zdarzeń

Przyjmuje się, że rozpatrywana sieć sensoryczna będzie wykorzystywana do monitorowania czynników środowiskowych (o stałym i zmiennym charakterze zarówno w czasie jak i przestrzeni), np. poziomu i charakteru zanieczyszczeń powietrza [3, 4, 5, 6]. W zależności od charakterystyki odczytów muszą one być dostarczane w sposób optymalny (energochłonność komunikowania danych i parametry komunikacji) do innych węzłów oraz do obserwatora.

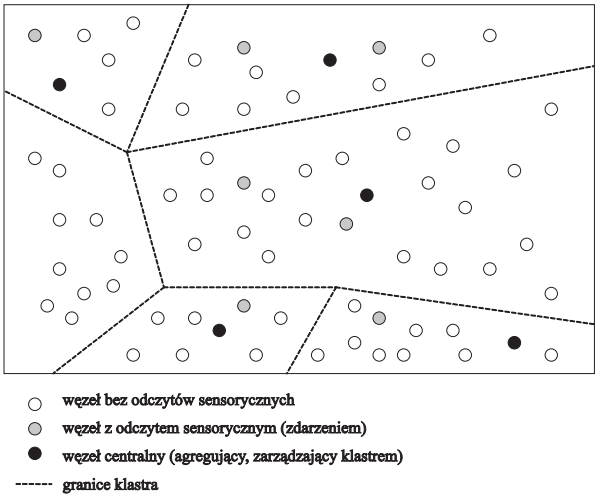
Z uwagi na złożoność badań systemowych zakłada się, że komunikowane odczyty sensoryczne są przetwarzane energooszczędnie w sieci sensorycznej, czyli że energochłonność komunikowania danych jest o kilka rzędów wielkości większa niż podczas przetwarzania lokalnego, a tym samym nie ma wpływu na bilans energetyczny całej sieci ani jej fragmentów, a więc na funkcjonowanie BSS. Charakterystyka energetyczna

mgr inż. Paweł Piotr Czapski – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa

poszczególnych węzłów będzie uwzględniona w przyszłych badaniach.

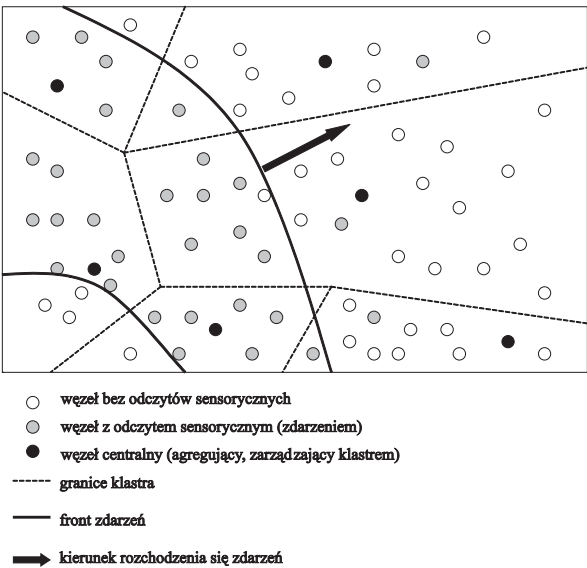
Zakłada się dwa podstawowe scenariusze występowania (akwizycji) danych sensorycznych nazywane dalej *podstawowym* i *zmiennym*.

W scenariuszu *podstawowym* zdarzenia mają charakter stały, bądź zachodzą w sposób okresowy (wolno lub szybkozmiennie) – rys. 6.



Rys. 6. Podstawowy scenariusz zdarzeń

W scenariuszu *zmiennym* zachodzące zdarzenia (odczyty sensoryczne) mają charakter nagły i obejmują znaczną część sieci sensorycznej (pokrywają różne fragmenty sieci). Ponadto zakłada się, że ta zmienność (dynamiczność) charakteryzuje się występowaniem frontu zdarzeń, który przemieszcza się w sposób nagły i szybki (przy czym nie jest to ruch losowy) – rys. 7. Przyjmuje się również, że brak odczytów sensorycznych jest traktowany jako tzw. zdarzenie *puste*.



Rys. 7. Zmienny scenariusz zdarzeń (może występować wyraźny, przemieszczający się front zachodzących zdarzeń tj. generowanych odczytów sensorycznych)

Założenia funkcjonalne do modelu adaptacyjnej sieci sensorycznej

Adaptacyjność projektowanego protokołu rutowania będzie wynikać z heterogeniczności stosowanych protokołów. Innymi słowy, tworzony algorytm trasowania nie będzie nowym algorytmem *sensu stricto*, a jego nowatorstwo wynikać będzie właśnie z wieloprotokołowości i inteligentnego „zonglowania” tymi algorytmami [11].

Hierarchiczność pozwala na skalowalność sieci, co jest szczególnie istotne w sieciach o znacznej liczbie węzłów i pokrywających duży obszar, a także w przypadku możliwości występowania zmiennego scenariusza. Dlatego też przyjmuje się *a priori* hierarchiczną budowę sieci sensorycznej. Sieć będzie podzielona na podsieci (klastry), gdzie każdy klasterek będzie charakterystyczny (odpowiedni protokół rutowania) dla zdarzeń o zbliżonej naturze.

Przyjmuje się, że trasowanie danych w przypadku braku zmienności zdarzeń (wymagana tylko agregacja) będzie wykorzystywało protokoły uwzględniające strukturę sieci (protokoły hierarchiczne np. LEACH) oraz protokoły ukierunkowane na wykonywane przez sieć operacje (protokoły zapytaniowe, np. zapytanie obserwatora o poziom jakiegoś parametru na danym terenie). Uwzględnia się również protokoły oparte na pogłoskach (grupa płaskich protokołów) w przypadku znaczącej liczby zapytań. Natomiast rutowanie zdarzeń o zmiennym charakterze będzie opierało się głównie na rodzinie protokołów uwzględniających wykonywane przez sieć operacje (np. protokoły QoS z nałożonym reżimem czasowym jako poziom usługi, wielościeżkowe protokoły rutowania celem maksymalizacji prawdopodobieństwa dostarczenia wiadomości), a także – w szczególnych sytuacjach – na protokołach bazujących na strukturze sieci (płaskie protokoły rutowania, np. w sytuacji, gdy należy dostarczyć pełny obraz sieci bez względu na związany z tym koszt) – tab. 2. Ponadto przyjmuje się, że trasowanie innych danych (ściśle związanych z funkcjonowaniem sieci, np. z adaptacyjnością) będzie oparte na wielościeżkowych protokołach rutowania.

Tab. 2 Protokoły rutowania proponowane do wykorzystania w nowym algorytmie trasowania

Zdarzenia podstawowe	Zdarzenia zmienne
Hierarchiczne protokoły rutowania (np. LEACH)	Protokoły rutowania QoS
Zapytaniowe protokoły rutowania (np. SPIN)	Wielościeżkowe protokoły rutowania
Protokoły oparte na pogłoskach (np. <i>rumour routing</i>)	Negocjacyjne protokoły rutowania

Propozycja struktury rutowania w rozważanej sieci oparta jest na [9], gdzie zaistniałemu zdarzeniu (charakter zdarzenia) odpowiada pewien algorytm trasowania (tabelaryzacja zdarzeń). Proponowane w artykule rozwiązanie usprawnia ten tabelaryzowany proces selekcji algorytmu o możliwość „uczenia się” zachowania

dających zdarzeń. Przyjmuje się, że to „uczenie się” pozwoli na zmianę protokołu zanim zostanie ona poddyktowana zmianą scenariusza (charakterystyka odczytów sensorycznych).

Dla uproszczenia opisu problemu przyjmuje się, że najmniejszym strukturalnym elementem sieci hierarchicznej będą tylko klastry. Innymi słowy, nie zakłada się wydzielania kolejnych klastrów w danych klastrach (tj. wielopoziomowa struktura klastra).

Definicja problemu rutowania (adaptacyjności)

Przyjmuje się, że podstawowym wymogiem stawianym protokołowi rutowania jest umiejętność dostarczania obserwatorowi informacji o zdarzeniu zanim zostanie ono fizycznie zaobserwowane (zarejestrowane). W przeciwnym razie podstawowe założenie co do funkcjonalności rozpatrywanego modelu sieci sensorycznej (obrazowanie rzeczywistości, szczególnie istotne np. w przypadku monitoringu poziomu zanieczyszczeń lub innych szybkozmiennych zjawisk) nie będzie spełnione.

O ile w scenariuszu podstawowym, przyjęcie pewnych protokołów rutowania (na drodze wstępnej samoorganizacji sieci, np. metoda stabelaryzowanych scenariuszy), dla konkretnych klastrów jest wystarczające, aby spełnić wymagania obrazowania rzeczywistości, o tyle dynamika zdarzeń narzuca pewne wymagania co do nowego algorytmu trasowania.

Definiuje się dwa rodzaje adaptacyjności: jakościową i ilościową. Adaptacyjność jakościowa będzie obejmowała ogół czynności prowadzących do przewidywania scenariuszy i decyzji, które muszą zostać podjęte, aby sprostać nowemu scenariuszowi. Natomiast ilościowe reagowanie będzie miało na celu komunikowanie w obrębie sieci decyzji związanych z jakościową adaptacją.

Przyjmuje się, że w przypadku zaistnienia dynamiczności zdarzeń, jakościową adaptacyjność obejmą takie działania jak:

- podjęcie decyzji o zmianie algorytmu trasowania (w klastrze, w którym nastąpiła zmiana scenariusza) jeszcze przed wydaniem danej decyzji przez węzeł centralny (np. na drodze TDMA) – świadczy to o autonomiczności podejmowania decyzji bez względu na hierarchię/protokół rutowania w danym klastrze
- podejmowanie decyzji o zmianie sposobu akwizycji danych sensorycznych (niezależnie od zmiany protokołu, o ile funkcjonowanie danego protokołu nie narzuca niejako sposobu tej akwizycji)
- sugerowanie zmiany protokołu rutowania w innych klastrach, znajdujących się na drodze rozchodzącego się dynamicznego zdarzenia (frontu) – sugestia powinna dotrzeć przed przemieszczającym się frontem (wymagania niezbędne dla spełnienia reżimu czasowego).

Natomiast na ilościową adaptacyjność złożą się takie czynności jak:

- rutowanie informacji (odczyt sensoryczny, decyzje o zmianie trasowania), które muszą dotrzeć do ob-

serwatora co najwyżej w tym samym czasie, co rzeczywiste zdarzenie (np. skażenie) – reżim czasowy

- autonomiczne modyfikowanie parametrów danego protokołu (jeśli nie jest wymagana jego zmiana na inny) w danym klastrze celem sprostania dynamice zjawiska.

Założenia do realizacji nowego protokołu

Przyjmuje się wielowarstwowy model nowego protokołu rutowania. Warstwa podstawowa (pierwotna) będzie odpowiedzialna za ogólną organizację sieci, tj. za hierarchiczny kształt sieci, podstawową akwizycję danych i trasowanie danych sensorycznych do obserwatora (w podstawowym scenariuszu zdarzeń). Przyjmuje się wielokrokowe (ang. *multi-hop*) trasowanie informacji pomiędzy węzłami centralnymi za pomocą algorytmu mrówkowego optymalizującego ścieżkę do obserwatora (tj. minimalizującego jej energetyczny koszt i optymalizującego wykorzystanie zasobów energetycznych sieci). Ogólne funkcjonowanie warstwy podstawowej będzie bazowało na protokole LEACH [8]. Protokół ten stanowi punkt odniesienia dla wielu badaczy.

Wyróżnia się również warstwę adaptacyjności (jakościowo-ilościowej), odpowiedzialną za wymianę informacji o charakterze występujących zdarzeń i propagującą stosowne decyzje i odczyty sensoryczne (dla dynamicznych zdarzeń). W przypadku zaistnienia zmiennych zdarzeń (np. wykrycia frontu zdarzeń), warstwa adaptacyjności przejmuje trasowanie informacji (wybierając tym razem najszybszą drogę dostarczenia informacji obserwatorowi). Ta „najszybsza” droga jest obliczana (i ciągle optymalizowana) przez cały okres życia sieci sensorycznej. Zakłada się, że „najszybsza” trasa może zawierać każdy rodzaj węzła (także węzły niecentralne).

Informacja o zmianie protokołu rutowania w danym klastrze będzie propagowana przez węzły centralne, tzn. zasięg funkcjonowania warstwy adaptacyjnej (w danym klastrze) będzie zbieżny z danym klastrem. Warstwa adaptacyjna będzie oparta na protokole płaskim. Dobór odpowiedniego rodzaju algorytmu płaskiego (na tym etapie badań) zostanie dobrany empirycznie.

Obydwie warstwy będą w swym działaniu niezależne, przy czym funkcjonowanie warstwy adaptacyjnej będzie wymagać modyfikacji warstwy podstawowej (opartej na istniejącym hierarchicznym algorytmie rutowania), aby pozwalała na swobodny przepływ informacji niezbędnych do funkcjonowania warstwy adaptacyjnej. Niezależnie od wybranego (zmienionego) protokołu rutowania, w danym klastrze istnieć będzie węzeł centralny (koordynujący lub monitorujący funkcjonowanie klastra). Istnienie węzłów centralnych (wybieranych na pewien czas spośród innych węzłów w danym klastrze) jest niezbędne do realizacji wielowarstwowości sieci.

W początkowej fazie badań systemowych, jakościowe decyzje będą podejmowane tylko na poziomie poszczególnych węzłów i okresowo komunikowane

z sąsiadującymi węzłami (a później także z innymi klastrami). Zakłada się, że wyznacznikiem wskazującym na potrzebę przesłania danych sensorycznych do innego sensora będzie nagły wzrost pewnego parametru (wartość rzeczywista, średnia itd.) monitorowanych odczytów sensorycznych.

Zakłada się trzy podstawowe scenariusze zdarzeń: brak zdarzeń, zdarzenia niezmiennie w czasie, zdarzenia szybkozmienne w czasie, których „tabele” będą uzupełniane pewnymi charakterystykami odczytów (także na drodze komunikowania z innymi węzłami i klastrami) i propagowane do innych węzłów oraz klastrów. Ten ciągły „inteligentny” proces tabelaryzowania odczytów sensorycznych pozwoli na szybkie wykrywanie zmiany scenariusza. Ponadto będzie to również skutkowało identyfikowaniem nowych scenariuszy (będących pochodnymi scenariuszy podstawowych).

Założenia do badań nad nowym protokołem

Badania będą realizowane dwuetapowo. Pierwszy etap będzie dotyczyć eksperymentów na gruncie podstawowym, gdzie zostanie przeprowadzona analiza ilościowa i jakościowa. Natomiast drugi etap badań to właściwa implementacja nowego algorytmu rutowania, tj. konkretnych algorytmów rutowania i warstwy adaptacyjnej. Dwuetapowość przeprowadzania badań podyktowana jest tym, że eksperymenty na gruncie podstawowym pozwolą na szybsze przeanalizowanie proponowanych rozwiązań niż identyfikacja problemu na poziomie implementacji algorytmicznej.

Celem badań ilościowych i jakościowych (na gruncie systemowym) jest zdefiniowanie niezbędnych metod potrzebnych do funkcjonalnej analizy proponowanego protokołu rutowania.

Pod pojęciem badań ilościowych rozumie się pewną początkową (empiryczną) konfigurację BSS: liczba węzłów, podział sieci sensorycznej na podsieci (klastry itd.), przypisanie poszczególnym fragmentom sieci konkretnych (istniejących) protokołów rutowania itd.

Badania jakościowe polegać będą na generowaniu – empirycznie bądź z wykorzystaniem rzeczywistych odczytów zaimplementowanych BSS – pewnych scenariuszy odczytów sensorycznych (charakter występowania zdarzeń i charakterystyka poszczególnych odczytów) i zmian w funkcjonowaniu pojedynczych węzłów lub fragmentów BSS.

Scenariusze funkcjonowania proponowanej sieci będą w pewnej mierze inspirowane sieciami do monitorowania poziomu zanieczyszczeń powietrza, gdzie zarówno charakter zdarzeń jak i wymagania aplikacyjne są różne w zależności od zastosowań [3, 4, 5, 6].

Do przeprowadzenia niezbędnych badań zostanie wykorzystany symulator sieci sensorycznych NS-2 [18, 19]. Symulator ten jest obecnie jednym z najchętniej wybieranych narzędzi przez środowisko naukowo-akademickie, a jego modułarna budowa pozwala na dodawanie nowych funkcji (np. nowe protokoły). Mimo paru ograniczeń NS-2 (m.in. skalowalność), jego popularność, a tym samym powszechność i modyfikowa-

ność, umożliwi nie tylko ilościowe, ale i jakościowe porównanie uzyskanych wyników badań z wynikami innych badaczy.

Zakłada się, że przeprowadzenie badań funkcjonowania sieci na gruncie systemowym będzie wystarczające do stworzenia algorytmu (drugi etap badań) w pełni adaptacyjnego protokołu rutowania.

Wnioski i dalsze badania

W artykule został zaproponowany nowatorski, w pełni adaptacyjny protokół rutowania dla bezprzewodowych sieci sensorycznych. Dokonano również przeglądu istniejących protokołów, a także wskazano ich wady, które ograniczają obszar zastosowań. Zaproponowany protokół rutowania uniezależni algorytmy trasowania od wymagań aplikacyjnych. Można spodziewać się, że nowatorska technika rutowania, łącząca dwie drogi projektowania trasowania („od aplikacji” i „do aplikacji”), otworzy nowe możliwości dla sieci sensorycznych i przyczyni się do podobnego zwrotu w projektowaniu pozostałych warstw sieciowych (ang. *networking stack*).

Istotną kwestią w proponowanym nowatorskim protokole rutowania jest brak skalowalności danego klastra (klastrów) ze względu na jego wielkość, a także możliwą różnorodność zdarzeń w rozpatrywanym klastrze i jego sąsiedztwie. Zakłada się, że poprzez dobór wielkości klastra, ukształtowanie klastra, występowanie części wspólnych (zdarzeniowo) sąsiadujących klastrów, a także poprzez zróżnicowanie (do pewnego stopnia) zawartych w klastrze zdarzeń (klastry nie są do końca homogeniczne zdarzeniowo), możliwa jest dalsza poprawa adaptacyjności opracowanego protokołu.

Przyszłe badania

Lokalizacja w sieciach sensorycznych jest jednym z najtrudniejszych zadań [8, 20, 21] z uwagi na zasadniczą różnicę (brak adresowania węzłów, np. numery IP) w porównaniu z tradycyjnymi (*ad-hoc*) sieciami bezprzewodowymi. Do jej realizacji wykorzystywane są często rozwiązania nieoptymalne i nieprzystosowane do stosowania w systemach o małych i ograniczonych zasobach (zarówno energetycznie jak i komunikacyjnie), np. nawigacja satelitarna, położenie względem sąsiadujących węzłów. O ile stosowanie modułów globalnego systemu pozycjonowania (ang. *global positioning system* – GPS) jest sprawdzonym rozwiązaniem (o dużej dokładności), to energochłonność i koszt takiego rozwiązania praktycznie wyklucza je z zastosowania na dużą skalę. Natomiast względna lokalizacja (bazująca na pozycji sąsiadujących węzłów) nie jest dokładna i również komunikacyjnie kosztowna. Proponuje się wykorzystanie charakteru zachodzących zdarzeń do lokalizacji poszczególnych węzłów. Zakłada się, że zadając węzłom początkowe (startowe) położenie, skorelowane ze znaną specyfiką zachodzących zdarzeń (odczytów sensorycznych), możliwa będzie lokalizacja pojedynczych sensorów na drodze tylko i wyłącznie ob-

serwacji zmiany odczytów sensorycznych (charakteru tych zmian) i „inteligentnej” komunikacji tychże danych z innymi węzłami (klastrami). Natomiast proponowane techniki pełnej adaptacyjności pozwolą na utrzymywanie dokładności lokalizacji na wymaganym poziomie.

Architektura sieci hierarchicznych (a właściwie to stosowane w nich algorytmy rutowania) narzucają synchronizację z węzłem centralnym. Synchronizacja może zachodzić zarówno lokalnie (na poziomie pojedynczego klastra), jak i globalnie (synchronizacja międzyklastrowa) i jest niezbędna do minimalizacji kolizji komunikowanych danych (gdzie każdy węzeł ma np. przypisaną szczelinę czasową, tj. TDMA), a tym samym optymalizuje klaster (i sieć) energetycznie. O ile realizacja synchronizacji w obrębie pojedynczego klastra wymaga przestrzegania ścisłych reżimów czasowych, to zakłada się pewną dowolność synchronizacji międzyklastrowej. Proponowana nowa technika synchronizacji poszczególnych klastrów będzie wykorzystywała dane lokalizacyjne (oparte na pomiarze charakteru danych sensorycznych). Poszczególne klastry będą aktywowały komunikację tak, aby nie następowały kolizje transmisji. Innymi słowy aktywowane klastry będą musiały spełniać warunek minimalnej odległości od siebie. Technika ta zakłada, że wyeliminuje to potrzebę synchronizacji międzyklastrowej, a tym samym usprawni wizualizację rzeczywistości (klastry będą komunikowały odczyty sensoryczne w sposób zbliżony do losowego a nie w sposób skoordynowy).

Można sądzić, iż integracja „inteligentnych” rozwiązań podejmowania decyzji z bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi jest obiecująca i przyniesie wymierne efekty nie tylko w postaci sieci samoadaptujących się, ale nawet samoorganizujących się. Z uwagi na obliczeniową złożoność sieci neuronowych, planuje się implementację „inteligencji” na drodze algorytmów ewolucyjnych, natomiast implementacyjność sieci neuronowych zostanie zbadana na poziomie pojedynczych węzłów. Zakłada się, że dobrym kandydatem na zastosowanie „inteligencji” w nowym protokole będą techniki zmierzające do usprawnienia skalowalności sieci, gdzie sieć musi właśnie na drodze ewolucji wybrać odpowiedni kształt i charakter klastrów. Natomiast algorytmy proponowanych nowych technik lokalizacyjnych i synchronizacyjnych zostaną zbadane na tym etapie badań metodami systemowymi (jakościowymi i ilościowymi).

Bibliografia

1. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci: *Wireless Sensor Networks: A Survey*. Comp. Networks, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002.
2. J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal: *Wireless Sensor Network Survey*. Comp. Networks, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008.
3. S. Cotescu, et al.: *Roadside Air Pollution Measurement – The New EU Approach also in Romania*. „Ion Mincu” Univ. of Architect. and Urbanism, Bucharest, Romania.
4. M. Ghanem, Y. Guo, J. Hassard, M. Osmond, M. Richards: *Sensor Grids For Air Pollution Monitoring*. [in:] Proc. of the 3th UK e-Science All Hands Meeting 2004, p. 8+.
5. J. K. Hart, K. Martinez: *Environmental Sensor Networks: A Revolution in the Earth System Science?* Earth-Science Reviews, vol. 78, no. 3–4, pp. 177–191, Oct. 2006.
6. G. Barrenetxea, F. Ingelrest, G. Schaefer, M. Vetterli: *Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring: The SensorScope Experience*. [in:] 2008 IEEE Int. Zurich Seminar on Communications, 2008, pp. 98–101.
7. Crossbow Technology, Inc., Product Catalog, Crossbow Technology: Wireless: Home Page, 2008. [Online]. Available: <http://www.xbow.com>. [Accessed: Sept. 01, 2009].
8. J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal: *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*. IEEE Wireless Communications, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, Dec. 2004.
9. M. S. Al-Fares, Z. Sun, H. Cruickshank: *High Survivable Routing Protocol in Self Organizing Wireless Sensor Network*. Int. J. of Comp. Science, vol. 36, no. 2, p. 10+, May 2009.
10. M. Li, B. Yang: *A Survey on Topology Issues in Wireless Sensor Network*. [in:] Proc. of the 2006 Int. Conf. on Wireless Networks, 2006, pp. 503–509.
11. R. M. Ruairi, M. T. Keane: *The Dynamic Regions Theory: Role Based Partitioning for Sensor Network Optimization*. [presented at:] the Workshop of the 6th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Honolulu, Hawaii, 2007.
12. P. Arabshahi, et al.: *Adaptive Routing in Wireless Communication Networks using Swarm Intelligence*. [in:] Proc. of the 9th AIAA Int. Communications Satellite Systems Conf., 2001, pp. 17–20.
13. J. Barbancho, C. Leon, J. Molina, A. Barbancho: *SIR: A New Wireless Sensor Network Routing Protocol Based on Artificial Intelligence*. [in:] Lecture Notes in Comp. Science, Vol. 3842/2006, Springer Berlin/Heidelberg, 2005, pp. 271–275.
14. J. Barbancho, C. Leon, J. Molina, A. Barbancho: *Using Artificial Intelligence in Wireless Sensor Routing Protocols*. [in:] Lecture Notes in Comp. Science, Vol. 4251/2006, Springer Berlin/Heidelberg, 2006, pp. 475–482.
15. B. Raman, K. Chebrolu: *Sensor Networks: A Critique of „Sensor Networks”*. From a Systems Perspective. ACM SIGCOMM Comp. Communication Rev., vol. 38, no. 3, pp. 75–78, Jul. 2008.
16. WIKIPEDIA: „Sieci sensorowe,” 2009. [Online]. Available: http://pl.wikipedia.org/wiki/Sieci_sensorowe. [Accessed: Sept. 01, 2009].
17. J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal: *Routing Techniques in Wireless Sensor Network: A Survey*. National Tsing Hua Univ., Taiwan, MNet Lab, 2005.
18. C. P. Singh, O. P. Vyas, M. K. Tiwari: *A Survey of Simulation in Sensor Networks*. [in:] Proc. of the 2008 Int. Conf. on Comp. Intelligence for Modeling Control and Automation, 2008, pp. 867–872.
19. „User Information,” User Information – Nsnam, 2009. [Online]. Available: http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/User_Information. [Accessed: Sept. 01, 2009].
20. G. Mao, B. Fidan: *Introduction to Wireless Sensor Network Localization*. [in:] Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks, G. Mao and B. Fidan, Eds. Hershey, PA, USA: Inf. Science Ref. (an imprint of IGI Global), 2009, pp. 1–32.
21. Y. Chen, W. Xu, W. Trappe, Y. Zhang: *Overview of Wireless Localization*. [in:] Securing Emerging Wireless Systems, Springer US, 2009, pp. 1–11.