

Wpływ architektury i protokołów komunikacyjnych na przepustowość i czas nieprzerwanej pracy bezprzewodowych sieci sensorowych

Tadeusz Goszczyński

Zespół Badań Podstawowych, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Streszczenie: Sieci sensorowe, przeznaczone do zbierania danych dotyczących środowiska oraz do lokalizacji i śledzenia obiektów poruszających się w przestrzeni, powinny być optymalizowane ze względu na wymagany jak najdłuższy czas nieprzerwanej pracy jej węzłów oraz jak największą skuteczność przesyłania zbieranych danych. W artykule przedstawiono matematyczne odwzorowanie i analizę systemu sieci przedstawioną w formie programu liniowego, określającego czas nieprzerwanej pracy sieci oraz analizę przepustowości dla dwóch modeli sieci, jak również dla różnych algorytmów śledzenia ruchomych obiektów. Przedstawiono także przykład symulacji pracy sieci.

Słowa kluczowe: sieci bezprzewodowe, sieci sensorowe, czas nieprzerwanej pracy, przepustowość sieci, symulacja

DOI: 10.14313/PAR_213/102

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem bezprzewodowych sieci informatycznych oraz miniaturyzacją czujników powstają liczne koncepcje sieci czujnikowych przeznaczonych do zbierania różnych danych w przestrzeni badanej. Sieci te mogą być stosowane do monitorowania środowiska, w tym także do wykrywania i śledzenia ruchomych obiektów. Postęp w technice pozwala obecnie na budowanie wyspecjalizowanych zminiaturyzowanych węzłów (tzw. *sensor nodes*) z czujnikami oraz wbudowanymi własnymi źródłami zasilania. Są one coraz tańsze, a ich liczba w sieci może być o kilka rzędów wielkości większa od liczby węzłów stosowanych w tradycyjnych sieciach bezprzewodowych. Wynika stąd możliwość i potrzeba opracowania nowych rozwiązań organizacyjnych i obliczeniowych.

Ze względu na konieczność rozmieszczenia w przestrzeni węzłów sieci pracujących bez możliwości dostarczenia energii z zewnątrz, powinny one pobierać jak najmniejszą ilość energii a jednocześnie dostarczać odpowiednio dużą ilość informacji do centrali systemu. Te cechy systemu można

sprecyzować jako: *czas nieprzerwanej pracy* systemu oraz *przepustowość* systemu. Wartość tej pierwszej zależy od konstrukcji węzłów, wpływającej na ich wydajność energetyczną, a wartość drugiego parametru zależy od efektywności komunikacji samych węzłów oraz zastosowanej strategii i rozwiązań sieciowych całego systemu.

W artykule przedstawiono przegląd znanych z literatury rozwiązań oraz ich ocenę i propozycje przyszłych prac w tej dziedzinie. Plan artykułu jest następujący. W rozdziale 2 przedstawiono podstawowe problemy zbierania danych w przestrzeni. W rozdziale 3 – matematyczne odwzorowanie problemu – w postaci programu liniowego. W rozdziale 4 zawarto analizę przepustowości systemu w zależności od wybranego typu komunikacji. W rozdziale 5 omówiono algorytmy stosowane w sieci do lokalizacji i śledzenia ruchomych obiektów, zaś w rozdziale 6 przedstawiono wnioski i plan dalszych prac.

2. Zbieranie danych w przestrzeni

Bardzo rozpowszechnionym obszarem zastosowań bezprzewodowych sieci sensorowych jest analiza pola przestrzeni. Celem takiej analizy jest uzyskanie, w czasie pracy systemu, danych dotyczących wybranych parametrów fizycznych w określonej przestrzeni: jedno-, dwu- lub trójwymiarowej. Wynikiem pomiarów zrealizowanych w takiej sieci jest przedstawienie obrazu wartości, np. wilgotności powietrza w określonej chwili czasu w całej przestrzeni badanej. W tym celu wyniki pomiarów ze wszystkich węzłów sensorowych są przesyłane bezprzewodowo do jednego węzła „kolektora”, a czynniki pomiarów i transmisji są powtarzane co określony odstęp czasu. Podstawowe kryteria oceny działania tego typu sieci to: czas nieprzerwanej pracy systemu (wynikający z ograniczonej ilości energii magazynowanej w węzłach) mierzony w godzinach, oraz całkowita wielkość danych dostarczonych (w czasie nieprzerwanej pracy) mierzona w ilości danych dostarczanych przy poborze jednej jednostki energii. Wartości tych parametrów, charakteryzujące jakość sieci, zależą od

następujących czynników: ilości zmagazynowanej energii początkowej, liczby węzłów sieci sensorowej i sposobu ich rozmieszczenia, położenia w przestrzeni centrali systemu, odstępów czasu między kolejnymi pomiarami, szybkości przesyłania danych, zakresu transmisji i wymaganej mocy, a także od zastosowanej strategii routingu.

3. Matematyczne odwzorowanie – program liniowy

Do analizy jakości pracy sieci sensorowych stosowane są różne metody matematyczne. Przy pewnych założeniach upraszczających możliwe jest utworzenie matematycznego modelu biorącego pod uwagę takie cechy jak: ilość energii dostępna w węźle, ilość energii potrzebna do działania czujnika i transmisji danych oraz rozmieszczenie węzłów w terenie. Model ten może być następnie wykorzystany do optymalizacji systemu w celu zwiększenia do maksimum czasu pracy systemu lub ilości zebranych danych do czasu zużycia dostępnej energii.

Autorzy w [1] przedstawiają analizę systemu w formie programu liniowego sformułowanego dla sieci z gęsto instalowanymi węzłami sensorowymi. Ich rozmieszczenie dość dokładnie oddaje wzór wykorzystujący ciągłą funkcję gęstości $\rho(\sigma)$, gdzie $\sigma(x, y)$ oznacza dowolny punkt w przestrzeni badanej. Z kolei gęstość energii $e(\sigma)$ przedstawia ilość energii w polu (w dżulach na jednostkę przestrzeni), a funkcja gęstość informacji $i(\sigma)$, wyrażona w bitach na jednostkę czasu na jednostkę powierzchni, reprezentuje ilość energii wytwarzanej przez źródło informacji. A reprezentuje przestrzeń, w której węzły sensorowe są rozmieszczone, a C to przestrzeń, w której ulokowane są węzły zbierające dane typu *sink*. Przepływ $f(\sigma, \sigma')$ oznacza sumę danych przesyłanych z punktu σ do punktu σ' (w bitach na jednostkę powierzchni).

Przy założeniu, że wartość gęstości informacji $i(\sigma)$ jest znana, maksymalne zwiększenie czasu t jest równoznaczne z maksymalnym zwiększeniem całkowitej sumy danych dostarczonych w tym czasie.

$$\max_f t \int_{\sigma \in A} i(\sigma) d\sigma \sim \max t \quad (1)$$

gdzie:

$$\int_{\sigma' \in A} f(\sigma, \sigma') d\sigma' + \int_{\sigma' \in C} f(\sigma, \sigma') d\sigma' = \int_{\sigma' \in A} f(\sigma, \sigma') d\sigma' \cdot t, \quad \forall \sigma \in A \quad (2)$$

$$\int_{\sigma' \in A} f(\sigma, \sigma') p_{rx}(\sigma, \sigma') d\sigma' + \int_{\sigma' \in C} f(\sigma, \sigma') p_{rx}(\sigma, \sigma') d\sigma' + \int_{\sigma' \in A} f(\sigma, \sigma') p_{tx} d\sigma' + t \cdot \epsilon_S(\sigma, i(\sigma)) \leq e(\sigma), \quad \forall \sigma \in A \quad (3)$$

przy ograniczeniach:

$$f(\sigma, \sigma') \geq 0, \quad \forall \sigma, \sigma' \in A \cup C \quad (4)$$

$$f(\sigma, \sigma') = 0, \quad \forall \sigma = \sigma' \quad (5)$$

$$f(\sigma, \sigma') = 0, \quad \forall \sigma \in C, \forall \sigma' \in A \quad (6)$$

4. Przepustowość systemu

Przepustowość systemu zależy między innymi od przyjętego modelu uwzględniającego rozchodzenie się fal radiowych w jego przestrzeni. W przedstawionych [2] modelach propagacji A1 i A2 moc odebrana jest różna. W modelu A1, w którym węzły położone są daleko od siebie wynosi $P/x_{i,j}^\alpha$, a w modelu gęsto rozmieszczonych węzłów A2 jest określona przez $P/(1+x_{i,j})^\alpha$, gdzie: $x_{i,j}$ – odległość między węzłami i oraz j ; α – stała strat; P – moc nadawania.

Model A1 jest stosowany przy transmisji na duże odległości. Nie sprawdza się w przypadku bardzo małych odległości, ponieważ wykazuje wzmocnienie mocy odbieranej dla $x_{i,j} < 1$. W tym modelu transmisja od węzła i do węzła j będzie możliwa, gdy:

$$\frac{P/x_{i,j}^\alpha}{N + (1/G) \sum_{k=1, k \neq i}^{k=n} P/x_{k,j}} \geq \beta \quad (7)$$

gdzie: N – poziom szumu otoczenia, G – wzmocnienie przetwarzania, β – stosunek poziomu sygnału do szumu.

Natomiast w modelu A2 transmisja będzie możliwa, gdy:

$$\frac{P/(1+x_{k,i})^\alpha}{N + (1/G) \sum_{k=1, k \neq i}^{k=n} P/(1+x_{k,i})^\alpha} \geq \beta \quad (8)$$

Model A2 jest uniwersalny – nie wykazuje wzmocnienia mocy odbieranej (jak w A1), a przy dużych odległościach daje wyniki bardzo podobne do modelu A1.

4.1. Model transmisji typu jeden do jednego

Wykres przepustowości dla scenariusza: *wiele przysyłających w trybie jeden do jednego* dąży asymptotycznie do maksimum dla liczby węzłów dążącej do nieskończoności. Przy dodatkowym założeniu, że każdy węzeł ma maksymalną szybkość transmisji W (bit/s) wykazano, że zdolność przesyłowa węzła wynosi:

$$\Theta\left(1/\sqrt{n \cdot \log n}\right) \text{ bit-m/s} \quad (9)$$

i jest uzyskana wtedy, gdy moc transmisji P jest minimalna, konieczna do nawiązania połączeń. Warunkiem do uzyskania górnej granicy przepustowości jest wyznaczenie dopuszczalnego poziomu transmisji jednoczesnych. W obu modelach istnieje graniczna liczba jednoczesnych skutecznych transmisji. Liczba ta rośnie ze wzrostem liczby węzłów n , gdyż moc jest zmniejszona do minimum koniecznego do nawiązania połączeń, a moc odebrana jest równa P/x_i^α .

W pracy [3] rozważono ten problem dla modelu A2 z dodatkowym założeniem, że węzły mogą odbierać wiele przesyłek w tym samym czasie. Jest to bardziej realistyczne dla małych odległości, gdy odbiornik nie musi wzmacniać sygnału. W tym modelu liczba jednoczesnych transmisji jest zwiększona o wartość stałą niezależną od wartości n (a nie rosnącą wraz z n , jak dla modelu A1).

Dla modelu A1, gdy węzły znajdują się dowolnie blisko siebie, moc P może być mniejsza, gdy liczba jednoczesnych transmisji rośnie wraz ze wzrostem n . Z drugiej strony dla modelu A2 nie może ona spaść poniżej pewnej wartości nawet wtedy, gdy węzły bardzo zblizają się do siebie.

Dlatego przepustowość w tym modelu wynosi $\Theta(1/n)$, podczas gdy dla modelu A1 to $\Theta(1/\sqrt{n \cdot \log n})$. Jak widać, model A1 ma tendencję do prezentowania bardziej optymistycznych wyników, zakłada bowiem możliwy wzrost liczby jednoczesnych transmisji wraz ze wzrostem n .

4.2. Model transmisji wiele do jednego

Model ruchu w sieci typu wiele do jednego jest realizowany wtedy, gdy dane z wielu węzłów czujników są przetwarzane w jednym węźle typu kolektor. W [4] wykazano, że przy większym zakresie transmisji przepustowość węzła sieci, określona jako $\Theta(1/n \cdot f(r, \Delta))$, osiąga większe wartości, gdzie: r – zakres transmisji, $f(r, \Delta)$ jest funkcją malejącą r .

Występuje tu sytuacja odwrotna niż w systemie realizującym wielu transmisji typu jeden do jednego, w którym większa przepustowość jest uzyskiwana dla przypadku najmniejszego zakresu transmisji. Autorzy wykazali też, że przy stosowaniu transmisji w sieci typu wiele do jednego z klastrów (jeśli węzły prowadzące klastrów są w zasięgu jednego przeskoku od kolektora), przy braku interferencji między tymi dwoma warstwami można uzyskać przepustowość równą W/n . W [5] wykazano, że korzystne jest stosowanie dwustopniowej transmisji, w której najpierw węzeł-źródło przesyła sygnał do kilku najbliższych położonych węzłów-sąsiadów, a następnie wszystkie te węzły przesyłają dane do węzła-kolektora w trybie współpracy. Podczas wykonywania takiej operacji kolejno przez wszystkie węzły-źródła w sieci o modelu A1, przepustowość każdego węzła może być zwiększona do $\Theta(\log n/n)$.

5. Algorytmy lokalizacji i śledzenia ruchomych obiektów

Węzły sieci sensorowej przeznaczonej do śledzenia w przestrzeni obserwowanej poruszających się obiektów mogą współpracować ze sobą w tym celu, stosując różne algorytmy pracy. W literaturze opisano wiele takich rozwiązań. Na przykład algorytm przedstawiony w [6] wybiera różne węzły do współpracy, optymalizując w dynamiczny sposób przydatność uzyskanych danych w odniesieniu do ilości energii zużytej na komunikację między węzłami i obliczenia w tych węzłach. Wymaga to skutecznego wyboru tylko tych węzłów, które posiadają najbardziej przydatne informacje. W tym celu zaproponowano następujące kryteria oceny: jakość wykrywania obiektów, jakość śledzenia

wykrytych obiektów, możliwość jednoczesnej pracy nad wieloma obiektami, niezawodność oraz wydajność energetyczna. Podczas pracy takiego systemu ważniejsza jest faza śledzenia obiektów niż ich wykrywanie. W tej fazie musi być zawsze aktywny jeden węzeł prowadzący i wybierający następnego węzła prowadzącego oraz przesyłającego do niego informacje dotyczące śledzenia. Przy tworzeniu takiego systemu przyjęto założenie, że jeżeli aktualne położenie obiektu oznaczymy jako x , to każdy kolejny pomiar położenia z_j zostanie wykorzystany do określenia nowego przypuszczalnego położenia obiektu $p(x|z_1, \dots, z_{j-1}, z_j)$ przez wykorzystanie w nim bieżącej oceny (estymaty) położenia $p(x|z_1, \dots, z_{j-1})$.

Sposób wyboru takiego węzła j , aby dawał on maksymalną korzyść w zwiększeniu jakości oceny przy jak najmniejszym zużyciu energii, stanowi problem optymalizacyjny określany przez parametry: zysk informacji i zużycie energii w systemie. Określa to poniższe równanie:

$$M \left[p(x | z_1, \dots, z_j) \right] = \alpha \cdot \Phi_{\text{info}} \left[p(x | z_1, \dots, z_j) \right] - (1 - \alpha) \cdot \Phi_{\text{energ}}(z_j) \quad (10)$$

gdzie: Φ_{info} – zysk informacji, Φ_{energ} – zużycie energii, α – względna waga tych parametrów.

Protokół śledzenia w zaproponowanym algorytmie określa następujące po sobie czynności/zadania. Użytkownik wysyła zapytanie do sieci węzłów śledzących. Wiedza zgromadzona wcześniej w czasie pracy systemu (lub nauki systemu) pozwala skierować to zapytanie do obszaru sieci, w którym jest największe prawdopodobieństwo pobytu obiektu. Węzeł prowadzący tworzy estymatę położenia obiektu oraz wyznacza – jako następnego prowadzącego – węzeł, który ma aktualnie najlepszą charakterystykę w zakresie swojego położenia, cech czujnika i przewidywanego wkładu danych. Następnie przekazuje mu zestaw obecnie posiadanych informacji o położeniu obiektu. Wyznaczony nowy węzeł prowadzący przez połączenie własnej bieżącej oceny z oceną otrzymaną, oblicza nowe położenie obiektu i na jego podstawie wybiera i wyznacza kolejny węzeł prowadzący. Proces ten jest kontynuowany w przedstawiony sposób aż do zakończenia zadania, przy czym co pewien określony czas aktualny węzeł prowadzący, wykorzystując algorytm najkrótszej ścieżki routingu, przesyła informacje o bieżącym położeniu obiektu z powrotem do węzła generującego zapytanie.

Inny algorytm śledzenia, wykorzystujący rozproszone przetwarzanie danych do śledzenia obiektów, przedstawiono w [7]. Charakteryzuje się on tym, że wszystkie czujniki najpierw określają, czy obiekt znajduje się w ich zakresie wykrywania, a następnie współdziałają z sąsiednimi węzłami i na podstawie zebranych danych opracowują statystyczną interpretację aproksymacyjną w celu wyznaczenia trajektorii ruchu obiektu. Zakłada się tu, że węzły sensorowe są równomiernie rozmieszczone w przestrzeni nadzorowanej oraz, że jeżeli ich zakres pomiarowy

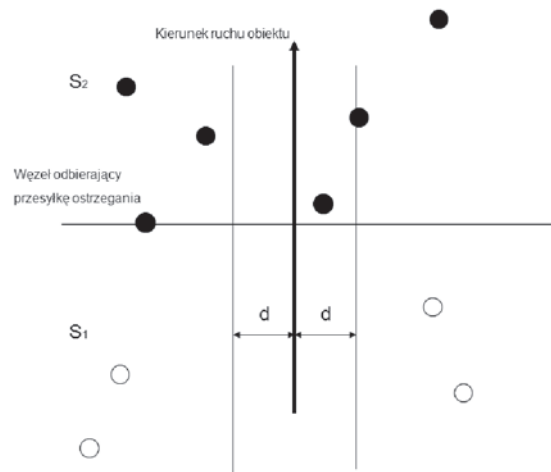
wynosi R , to zawsze wykryją one obiekt położony w odległości od czujnika mniejszej niż $(R-e)$, a czasami także obiekt w odległości z zakresu od $(R-e)$ do $(R+e)$, ale nie wykryją nigdy obiektu z odległości większej niż $(R+e)$, gdzie $e = 0,1R$. Trajektoria obiektu jest aproksymowana za pomocą odcinków linii prostej i przy założeniu stałej prędkości obiektu. Każdy węzeł rejestruje czas, w jakim obiekt znajduje się w jego zakresie pomiarowym, a następnie węzły wymieniają między sobą dane: czas obserwowania obiektu w ich zakresie pomiarowym, dane identyfikacyjne oraz lokalizację węzła. Pozycja obiektu jest w określonych odstępach czasu wyznaczana jako średnia ważona wszystkich pomiarów. Wagi są wyznaczane jako wielkości proporcjonalne do czasu przebywania obiektu w zakresie pomiarowym każdego z węzłów. Algorytm wyznaczania trajektorii obiektu stosuje regresję nieliniową metodą najmniejszych kwadratów. Ekstrapolacja pozwala na wyznaczenie dalszej trajektorii obiektu w celu asynchronicznego budzenia do pracy kolejnych węzłów sensorowych. W tym systemie przyjmuje się założenie, że węzły znają swoje położenie w przestrzeni oraz że ich zegary są zsynchronizowane. Gęstość rozmieszczenia węzłów musi być odpowiednio duża, aby ich zakresy pomiarowe nakładały się częściowo na siebie, a węzły muszą odróżniać wykrywany obiekt od reszty ich otoczenia. Można stosować różne techniki ważenia: wagi równe dla wszystkich, metodą heurystyczną:

$$w_i = \ln(1 + t_i) \quad (11)$$

gdzie: t_i – czas obserwowania obiektu przez czujnik, lub wyznaczając wagi odwrotnie proporcjonalne do odległości węzła od trasy obiektu. Korzystniejszy jest ten drugi sposób. Obliczanie trasy wymaga tu zebrania w jednym centralnym węźle wszystkich wykrytych pozycji. W celu minimalizacji opóźnienia oraz obciążenia pasma transmisji, niektóre węzły są stosowane w systemie jako bramy do zewnętrznych sieci mających większe możliwości obliczeniowe. Sieć taka jest zorganizowana w logiczne drzewa wychodzące z każdej bramy. Każdy węzeł-wierzchołek zbiera dane od swoich węzłów-dzieci, a następnie wysyła je do najbliższej, wyżej położonej bramy lub do bramy najmniej obciążonej.

Protokół działa bardzo dobrze w systemach o dużym obciążeniu i o dużych wymaganiach czasowych. Może on w ciągły sposób usprawniać system i doskonalić obliczenia ścieżki ruchu obiektu, łącząc dawniej zebrane dane z danymi uzyskiwanymi na bieżąco. Taki protokół ma też tę zaletę, że przy większej liczbie i większej gęstości położenia węzłów uzyskuje się bardziej dokładny wynik położenia ścieżki obiektu, jeżeli wszystkie węzły w pobliżu obiektu są wybudzone ze stanu uśpienia. Protokół może zmieniać te parametry w zależności od potrzeby dokładności wyznaczania trasy obiektu. Wadą tego protokołu jest brak możliwości wykrywania wielu obiektów równocześnie i brak odporności na fałszywe odczyty czujników.

Inną metodę opisują autorzy w [8], przedstawiając rozwiązanie problemu w systemie opartym na czujnikach



Rys. 1. Wyznaczanie trajektorii ruchu obiektu
Fig. 1. Trajectory estimation for moving object

i węzłach o dużych możliwościach obliczeniowych i zdolności rozróżniania. Takie węzły mogą mieć zdolność do samo-konfiguracji i tworzyć system odporny na zakłócenia dzięki zapewnieniu współpracy kilku czujników przy określaniu położenia obiektu. Przy zastosowaniu trybu oszczędzającego energię węzły analizują trasę ruchu obiektu, przewidując jego dalsze położenie i wybudzają tylko te czujniki, które znajdują się w pobliżu trasy obiektu, a komunikacja jest wtedy ograniczana do węzłów położonych w pobliżu (aktualnej i przewidywanej) trasy obiektu. Węzły w tym systemie są rozmieszczane w przestrzeni w sposób przypadkowy, lecz znają swoje położenie i mają czujniki pozwalające na określenie odległości obiektu od węzła. Co określony czas następuje odczyt z czujnika i jeżeli obiekt jest obecny, to dane o jego odległości od węzła oraz o lokalizacji węzła są wysyłane do całej sieci. Ponieważ węzeł nie określa pozycji obiektu, a jedynie odległość do obiektu, to do wyznaczenia jego pozycji w przestrzeni wykorzystuje się metodę triangulacji. Każdy węzeł, który skompletuje trzy przesyłki (lub dwie i pomiar własny), oblicza położenie obiektu w przestrzeni. Jeśli odebrane zostaną dwie różne w czasie przesyłki z informacją o położeniu tego obiektu, to możliwe będzie wyznaczenie kierunku ruchu obiektu linią prostą przez te dwa punkty lub w bardziej zaawansowany sposób krzywą ruchu.

Gdy zostanie już wyznaczona trajektoria ruchu obiektu, węzły o określonej odległości d od tej trajektorii wysyłają przesyłkę *ostrzeżenie* podającą lokalizację nadawcy oraz parametry aproksymujące trajektorię linią prostą. Węzły znajdujące się w określonej odległości retransmitują tę przesyłkę. Aby zoptymalizować transmisję owych przesyłek ostrzegawczych, ich przesyłanie jest ograniczone tylko do kierunku ruchu obiektu. W tym celu węzeł odbierający ostrzeżenie wyznacza linię prostą do trajektorii ruchu i przechodzącą przez niego (rys. 1). Linia ta oddziela dwa obszary S1 i S2, przy czym ruch obiektu odbywa się

Tab. 1. Wyniki badań symulacyjnych

Tab. 1. Results of simulations

	DRP	FAD	DT	Epidemic
skuteczność dostarczenia przesyłek [%]	90,7	87,5	46,4	76,1
liczba dostarczonych kopii [szt.]	6,1	6,2	1,0	9,3
opóźnienie [s]	525	623,1	993,4	405,2
czas pracy sieci [min]	10,71	10,28	7,48	65,6

w kierunku S2. Węzeł przesyła komunikat ostrzegawczy dalej tylko wtedy, gdy znajduje się on w zdefiniowanej wcześniej odległości i jeżeli odebrał przesyłkę od węzła leżącego w obszarze S1. Przedstawiona na rysunku grubsza linia pionowa określa trajektorię ruchu obiektu. Protokół ten zapewnia skalowalność systemu i oszczędność energii, lecz podobnie jak poprzednio przedstawiony, nie umożliwia jednoczesnej obserwacji wielu obiektów.

6. Symulacja pracy sieci

W celu oceny pracy sieci dla różnych protokołów transmisji stosuje się różnego typu symulatory pracy sieci, np. utworzone w środowisku obliczeniowym MATLAB/Simulink. Przykładem może być praca [9], w której m.in. przedstawiono porównanie wykonane przy wykorzystaniu bazy MIT Reality za pomocą nowego protokołu DRP (ang. *delay-based routing protocol*) ze znanymi już protokołami FAD [10], Direct Transmission (DT) oraz Epidemic [11].

W przedstawionym protokole DRP węzeł typu *sink* wysyła okresowo przesyłkę typu *hello*. Każdy węzeł oblicza wyznaczone szacunkowo opóźnienie dostarczenia danych, określone na podstawie odebranej przesyłki typu *hello* i przyjmuje tę wartość jako podstawę do obliczeń zdolności dostarczania przesyłek. Gdy spotykają się dwa węzły, to przesyłka jest przekazywana dalej (ang. *forward*) do węzła, który ma mniejszą szacunkową wartość opóźnienia. Aby ograniczyć przepięnienie w transmisji opracowano schemat zarządzania kolejką przesyłek, który na podstawie rankingu przesyłek i rankingu czasu życia wyznacza decyzję o transmisji przesyłki lub jej odrzuceniu.

W pozycji [12] wykazano, że istnieje regularność i powtarzalność w życiu każdego człowieka i wysnuto wniosek, że ludzka mobilność jest przewidywalna w 93 %. Autor przedstawił wyniki badań mobilności użytkowników telefonów w ciągu 3 miesięcy i przedstawił je na wykresie, na którym widać, że jednorazowe dłuższe badanie może być podstawą do wyciągania wniosków na przyszłość.

W pracy [9] przedstawiono problem czujników noszonych przez ludzi, które działają w sieci typu DTMSN (ang. *Delay Tolerant Mobile Sensor Network*). W systemie tym każdy węzeł zawierający czujnik wylicza szacunkowy czas

opóźnienia dostarczenia danych i określa tę wartość jako wskaźnik zdolności dostarczania przesyłek, przy czym im mniejsze jest opóźnienie, tym większa zdolność dostarczania węzła czujnikowego. Gdy spotykają się dwa takie węzły, to przesyłki z danymi są przesyłane dalej (przesyłką *forward*) do węzła o mniejszym opóźnieniu.

Do badań jakości wykorzystano przy symulacji następujące dane: poziom skuteczności dostarczenia danych, opóźnienie dostarczenia danych oraz liczbę dostarczonych kopii każdej z przesyłek (*overhead*). W wyniku symulacji czterech różnych protokołów określono, że protokół typu DRP dał najlepsze wyniki (tab. 1).

Jak wynika z symulacji, protokół DRP zapewnia wyższą skuteczność dostarczania przesyłek przy relatywnie mniejszym czasie opóźnienia (dostarczania) przy zbliżonej do protokołu FAD liczbie nadmiarowych kopii. Transmisja bezpośrednia DT zapewnia mały nadmiar kopii, lecz ma bardzo mały współczynnik skuteczności dostarczania. Protokół typu Epidemic ma najwyższy wskaźnik kopii przy małej wartości wskaźnika skuteczności dostarczania przesyłek.

7. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych analiz zostaną wykorzystane w dalszych pracach dotyczących zastosowania robotów mobilnych do poprawy jakości sieci sensorowych [13], a także sieci przemysłowych. Dlatego pożądane jest tworzenie nowych metod analizy wpływu różnych sposobów oceny jakości na wyniki oceny. Pożądane jest także opracowanie praktycznych algorytmów umożliwiających dokładniejszą ocenę systemów sieci sensorowych, także dla przesyłu. Pomocne mogą tu być nowe wydajne algorytmy dla warstw sieci MAC i network.

Większość opisanych w literaturze charakterystyk jakości sieci dotyczy architektury płaskiej, a architektura hierarchiczna nie została jeszcze dostatecznie szeroko zanalizowana. W analizach systemów coraz trudniejsze staje się modelowanie tych elementów i ich jakości. Potrzebne jest uzyskiwanie coraz lepszych uogólnionych przedstawień systemów (*abstraction*) i dokładniejszych modeli ich elementów. Powstają w związku z tym nowe koncepcje, w któ-

rych system określa kierunek, z jakiego pojawia się obiekt. Kierunek jest obliczany na podstawie próbek uzyskanych z pomiarów, realizowanych za pomocą sieci wykorzystujących czujniki kalibrowane, określających jedynie wielkość obiektu. W tym systemie najpierw określana jest różnica kierunków uzyskanych z tej sieci. Następnie z odczytów uzyskuje się kierunek odniesienia dokładnie wykalibrowanej podsieci i wynik ten jest odporny na płynięcie w czasie charakterystyk kanałów pomiarowych. W systemach rozproszonego przetwarzania danych stosowane są różne protokoły zarządzania siecią, typy architektury i struktury sieci oraz algorytmy pracy.

W kolejnych publikacjach dotyczących przeglądu rozwiązań systemów do śledzenia ruchomych obiektów przedstawione zostaną m.in. protokoły umożliwiające formowanie grupy spośród węzłów sieci sensorowej i tworzenie jednocześnie kilku grup, gdy potrzebne jest śledzenie kilku obiektów jednocześnie. Omówione zostaną strategie rozmieszczania czujników w badanej przestrzeni i architektury sieci wykorzystujące hierarchiczne oraz heterogeniczne szerokopasmowe sieci sensorowe [13]. Przedstawione zostaną także kierunki prac badawczych, w których zostaną poddane analizie nowe modele i wyniki działania różnych scenariuszy dla dokładniejszych modeli w celu określenia nierozpoznanych wcześniej ich wad i/lub zalet. Na przykład, wpływ czasu pracy systemu na przepustowość może wynikać z wybierania tras zwiększających czas pracy systemu, może to jednak w efekcie powodować powstawanie wąskich gardeł na tych trasach i zmniejszenie przepustowości całości sieci.

Bibliografia

1. Duarte-Melo E.J., Liu M., Misra A., *An efficient and robust computational framework for studying lifetime and information capacity in sensor networks*, „ACM Kluwer MONET“ (special issue), 2004.
2. Gupta P., Kumar P.R., *The capacity of wireless network*, „IEEE Trans. Inform Theory”, Vol. 46, No. 2, March 2000. DOI: 10.1109/18.825799.
3. Arpacioğlu O., Hass Z., *On the scalability and capacity of wireless networks with omnidirectional antennas*, [w:] *Proc. Int. Workshop on Information Processing in Sensor Networks – IPSN'04*, Berkeley, CA, April 2004. DOI: 10.1145/984622.984648.
4. Duarte-Melo E.J., Liu M., Misra A., *Data gathering wireless sensor networks: Organization and capacity*, „Wireless Sensor Networks”, Vol. 43, No. 4, 2003. DOI: 10.1016/S1389-1286(03)00357-8.
5. El Gamal H., *On the scaling laws of dense wireless sensor networks*, „IEEE Trans. Inform Theory”, March 2005.
6. Zhao F., Shin J., Reich J., *Information-driven dynamic sensor collaboration for tracking applications*, „IEEE Signal Proces. Mag.”, March 2002.
7. Mechtov K., Sundresh S., Kwon Y., Agha G., *Cooperative tracing with Binary-Detection Sensor Networks*,

Computer Science Dept University Illinois at Urbana – Champaign, 2003.

8. Gupta P., Das S. R., *Tracking Moving Targets in a smart sensor network*, [w:] *Proc VTC Symp.*, 2003. DOI: 10.1109/VETECE.2003.1286181.
9. Hui Z., Ming L., *A Delay-Based Routing Protocol for Human-Oriented Delay Tolerant Mobile Sensor Network (DTMSN)*, [w:] *32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2012.
10. Wang Y., Wu H., *Delay/fault-tolerant mobile sensor network (dft-msn): a new paradigm for pervasive information gathering*, „IEEE Transactions on Mobile Computing”, Vol. 6, No. 8, 2005.
11. Vahadat A., Becker D., *Epidemic Routing for Partially Connected ad hoc Networks*, Technical Report Vol. CS-200006, Durham, 2006.
12. Song C., Qu Z., Blumm N., Barabasi A., *Limits of Predictability in Human Mobility*, „Science”, Vol. 327, Issue 5968, 2010. DOI: 10.1126/science.1177170.
13. Goszczyński T., Pilat Z., *Considerations on Methods for Best Position Evaluation for Mobile Robot Node to Improve Coverage of Wireless Sensor Network*. [w:] ROBTEP 7–9.06.2010, Bardejov, Słowacja. ■

The impact of architecture and algorithms used in sensor networks on its throughput and lifetime

Abstract: Wireless sensor networks can be used for localization and tracking of moving targets. The article presents mathematical analysis of lifetime and throughput for two types of network structures and different algorithms used. Valuation of results obtained is presented.

Keywords: wireless networks, sensor networks, network lifetime, network throughput

Artykuł recenzowany, nadesłany 11.01.2014 r., przyjęty do druku 08.09.2014 r.

mgr inż. Tadeusz Goszczyński

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Od 1971 r. pracuje w PIAP. Autor ponad 30 publikacji w czasopiśmie technicznych i jednego podręcznika. Główny Wykonawca 3 Projektów Celowych dotyczących zautomatyzowanych stanowisk pomiarowych. Autor 15 patentów. Laureat Zespołowej Nagrody Państwowej II st. oraz Mistrza Techniki – Warszawa 2002, NOT.

e-mail: tgoszczyński@piap.pl

