

# Projekt energooszczędnego systemu zbierania danych pomiarowych dla centrum przetwarzania danych

Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz

Grant OPUS Narodowego Centrum Nauki numer 2015/17/B/ST6/01885

Warszawa, Marzec 2018



Politechnika Warszawska  
Instytut Automatyki i  
Informatyki Stosowanej  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa  
[www.ia.pw.edu.pl](http://www.ia.pw.edu.pl)



# Rozdział 1

## Wprowadzenie

Nowe osiągnięcia w zakresie komunikacji bezprzewodowej, rozwój technologii półprzewodnikowych oraz postępująca miniaturyzacja umożliwiają projektowanie niewielkich, tanich i wydajnych urządzeń wyposażonych w nowoczesne czujniki. Inteligentne sensory połączone siecią bezprzewodową stwarzają nowe możliwości gromadzenia i przekazywania danych. Bezprzewodowa sieć sensorów (ang. *Wireless Sensor Network* — WSN) tworzona jest najczęściej w trybie ad hoc, przez niewielkich rozmiarów urządzenia, stanowiące węzły sieci gęsto rozmieszczone na dużym obszarze. Istotną własnością odróżniającą sieć typu ad hoc od innych systemów stosujących transmisję bezprzewodową jest zdolność do samoorganizacji — urządzenia same organizują się w sieć. Wszystkie węzły sieci są równoprawne i mogą komunikować się wzajemnie rywalizując o dostęp do kanału radiowego. W ogólnym przypadku sieci WSN tworzą urządzenia heterogeniczne, różniące się architekturą sprzętową, zainstalowanym oprogramowaniem, producentem itd. Sieć ad hoc należy więc więc do grupy systemów samoorganizujących się.

Na architekturę węzła sieci WSN składają się: nadajnik radiowy, mikroprocesor, pamięć, źródło zasilania oraz odpowiednie czujniki, np. oświetlenia, wilgotności, akcelerometr itd. W przypadku sieci złożonych z kilkuset czy kilku tysięcy węzłów niezbędny jest taki wybór architektury i technologii, które umożliwią względnie tanie wytworzenie poszczególnych urządzeń. W związku z tym możliwości sensorów są mocno ograniczone. Co więcej każde z urządzeń musi mieć zapewnioną energię do działania. Najczęściej stosowane jest zasilanie bateryjne, które ma niewielką pojemność. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie fotoogniw do samoczynnego pozyskiwanie energii. Węzły bezprzewodowych sieci sensorowych charakteryzują się zatem niewielką prędkością przetwarzania, ograniczoną pamięcią i zasięgiem komunikacji. Ze względu na konieczność oszczędnego gospodarowania energią często stosowane są niskoenergetyczne protokoły komunikacyjne charakteryzujące się niską przepływnością i niewielkim zasięgiem co powoduje ograniczenia w komunikacji. Każdy z węzłów komunikuje się tylko z węzłami znajdującymi się w jego najbliższym otoczeniu, tj. swoimi sąsiadami. Stąd konieczność rozmieszczania urządzeń w niewielkich odległościach od siebie. Przesyłanie danych w sieci odbywa się z wykorzystaniem węzłów pośredniczących – stosowany jest schemat komunikacji wiele-dojednego (ang. *multi-hop*).

W ostatnich latach obserwuje się zainteresowanie wykorzystania sieci WSN jako systemów zbierania danych pomiarowych. Ze względu na dużą ilość zbieranych danych coraz

częściej dane zbierane przez poszczególne czujniki są przekazywane do centrów przetwarzania danych lub chmur obliczeniowych, gdzie są przetwarzane, analizowane i na ich podstawie podejmowane są m.in. różnego rodzaju decyzje. Niniejszy raport jest poświęcony zagadnieniom budowania systemów pomiarowych wykorzystujących sieci WSN. Proponowany jest ogólny model matematyczny tego typu sieci, uwzględniający podstawowe ograniczenia, o których była mowa powyżej. Szczególna uwaga jest poświęcona problemom zapewnienia odpowiedniego czasu funkcjonowania sieci i związanego z nim oszczędnego gospodarowania zasobami energetycznym. Problem zużycia energii obejmuje również wspomniany model sieci. Należy zwrócić uwagę, iż prowadzone w ostatnich latach prace badawcze i badawczo-wdrożeniowe w obszarze bezprzewodowych sieci sensorowych koncentrują się m.in. na opracowaniu wydajnych, energooszczędnych protokołów transmisji pozwalających na obniżenie zużycia zasobów energetycznych urządzeń, co skutkuje wydłużeniem czasu pracy sieci. Duży nacisk jest kładziony na opracowanie nowych technologii w celu zmniejszenia rozmiarów i wagi urządzeń tworzących sieć oraz zastąpieniu zasilania z baterii wydajniejszymi i skuteczniejszymi rozwiązaniami. Ponadto wiele prac koncentruje się na rozszerzeniu funkcjonalności klasycznej sieci WSN. Efektem są sieci sensorów i elementów wykonawczych (WSAN) czy też sieci sensorów mobilnych (MWSN). Kierunki rozwoju sieci są głównie podyktowane nowymi potrzebami i zastosowaniami.

Niniejszy raport zawiera m.in. krótki przegląd rozwiązań wykorzystywanych do organizacji energooszczędnej komunikacji. Uzupełnieniem raportu jest referat konferencyjny pt. „Secure Low Energy AODV Protocol for Wireless Sensor Networks”, poświęcony omówieniu energooszczędnego protokołu routingu, który może z powodzeniem znaleźć zastosowanie w sieciach pomiarowych budowanych na bazie sieci WSN. W referacie przedstawiamy wyniki oceny skuteczności algorytmu na podstawie badań w rzeczywistej sieci czujników zbudowanej w laboratorium.

**Załącznik:** E. Niewiadomska-Szynkiewicz, F. Nabrdalik, "Secure Low Energy AODV Protocol for Wireless Sensor Networks", materiały konferencji IEEE ITNAC, Melbourne, 22-24 listopad 2017.

# Rozdział 2

## Model sieci pomiarowej zbudowanej z bezprzewodowych czujników

### 2.1 Model sieci

Rozważmy sieć monitorującą  $S$  składającą się z niepustego i skończonego zbioru  $S_D$  tworzonego przez  $N$  urządzeń pomiarowych  $D_i$ , oraz rodziny  $S_L$  tworzonej przez  $L$  połączeń międzywęzłowych, czyli uporządkowanych par urządzeń  $(D_i, D_j)$ ,  $i \neq j$ , które w danej chwili  $t$  mogą bezpośrednio wymieniać między sobą dane. Oznaczmy przez  $\mathbf{c}_i = [x_i, y_i, z_i]$  położenie  $i$ -tego urządzenia sieci, a konkretnie lokalizację jego modułu radiowego, natomiast przez  $r_{t_i}$  zasięg tego modułu. Oczywiście jest, że dwa urządzenia  $D_i$  i  $D_j$  mogą się komunikować tylko wtedy, gdy znajdują się w swoim zasięgu, a więc gdy spełniona jest zależność  $\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\| \leq r_{t_i}$ . Do opisu naszej sieci wykorzystamy pojęcie grafu nieskierowanego [19] – rozważaną sieć sensorową opisuje graf  $S = (V, E)$ , w którym zbiorem wierzchołków  $V$  jest zbiór urządzeń tworzących sieć,  $V = S_D$ , a zbiorem krawędzi  $E$  rodzina dostępnych w chwili  $t$  bezpośrednich połączeń radiowych,  $E = S_L$ .

$$S = (S_D, S_L), S_D \neq \emptyset, S_L \neq \emptyset, \quad (2.1)$$

gdzie

$$S_D = \{D_i, i = 1, \dots, n\}, \quad (2.2)$$

$$S_L = \{(D_i, D_j) : D_i \in S_D, D_j \in S_D, \|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\| \leq r_{t_i}, i, j = 1, \dots, n, i \neq j\}. \quad (2.3)$$

W ogólnym przypadku zakładamy, że komunikacja w sieci  $S$  jest dwukierunkowa, tj.  $(D_i, D_j) \in S_L$  i  $(D_j, D_i) \in S_L$ , a więc  $S$  jest grafem nieskierowanym. W niektórych zastosowaniach zakłada się, że przepływ danych między urządzeniami jest zorientowany, sieć pomiarowa może być wówczas przedstawiana jako graf skierowany, którego krawędzie spełniają warunek  $(D_i, D_j) \in S_L$  i  $(D_j, D_i) \notin S_L$ .

Jak było wspomniane węzłem sieci jest urządzenie wyposażone w mikroprocesor, moduł zasilający, moduł radiowy i czujniki. Węzeł sieci może być źródłem ruchu sieciowego,

jego odbiorcą lub pośrednikiem w transmisji danych między innymi, węzłami, których wzajemna komunikacja jest niemożliwa ze względu na ograniczony zasięg transmisji radiowej. Stopnie węzłów (liczby incyduentnych z nimi krawędzi) w rozważanej sieci pomiarowej, a tym samym topologia sieci, podlegają dynamicznym zmianom. Determinują je nie tylko rozlokowanie urządzeń w rozważanej przestrzeni roboczej, ale również parametry nadajnika i odbiornika radiowego oraz zmieniające się warunki środowiska wpływające na propagację fali radiowej, a więc na zasięg transmisji. Projektując lub zarządzając sieciami musimy zazwyczaj na bieżąco śledzić sąsiedztwo urządzeń tworzących sieć, a więc wyznaczać stopień każdego węzła. Przyjmujemy, że sąsiedztwem urządzenia  $D_i$  w chwili  $t$  jest zbiór  $N_i$  złożony z urządzeń sieci  $S$ , dla których w chwili  $t$  istnieje bezpośrednie połączenie z węzłem  $D_i$ , t.j.  $N_i = \{D_j : (D_i, D_j) \in S_L, j = 1, \dots, n, i \neq j\}$ . Sąsiadami każdego węzła sieci są więc wszystkie węzły znajdujące się w danej chwili w jego zasięgu, czyli te z którymi może się komunikować. Bazując na liczbie sąsiadów i ich rozlokowaniu można tworzyć sieci o różnych topologiach. Najczęściej są to topologie typu gwiazda (ang. *star*), siatka (ang. *mesh*) lub drzewo (ang. *tree*).

## 2.2 Model węzła sieci

Modelując węzeł sieci ad hoc musimy pamiętać, że zasób energii jakim dysponuje w danej chwili nasze urządzenie jest zazwyczaj ograniczony. Oznaczmy stan tego zasobu za pomocą zmiennej  $\xi_i$ . Wartość ta może odpowiadać np. poziomowi naładowania akumulatora zasilającego urządzenie. Energia jest zużywana przez różne moduły urządzenia, tj. w przypadku sieci stacjonarnych, mikroprocesor, moduł radiowy, detektory itd. W formułowanym modelu energetycznym urządzenia  $D_i$  ograniczymy się więc do uwzględnienia zużycia energii przez tylko dwa układy, tj. pomiarowy i komunikacyjny. Przyjmijmy, że urządzenia tworzące sieć są zazwyczaj zasilane za pomocą baterii. Oznaczmy przez  $\xi_i$  poziom naładowania baterii,  $\xi_i \in [0, \xi_{i_{max}}]$ .

Założmy, że węzły sieci mogą być wyposażone w różnego rodzaju czujniki. Ograniczymy się do uproszczonego modelu opisującego działanie czujnika za pomocą zmiennej binarnej  $s_i^l \in \{0, 1\}$ , gdzie  $l = 1, \dots, L_i$  jest numerem czujnika zainstalowanego w węźle  $D_i$ , a  $L_i$  liczbą tych czujników. Przyjmijmy, że czujnik  $l$  może działać w jednym z dwóch trybów, tj. wyłączony  $s_i^l = 0$  lub włączony  $s_i^l = 1$ . Założmy, że zasięg pomiarów włączonego detektora  $l$  obejmuje powierzchnię koła o promieniu  $r_{s_i}^l$  i środkiem w punkcie lokalizacji tego detektora. Przyjmijmy, że na wykonanie jednorazowego pomiaru detektor  $l$  zużywa  $\varphi_{l_i}$  energii.

Układem zużywającym większość energii węzła jest układ radiowy. W dokumentacjach układów radiowych prezentowane są możliwe tryby pracy tego modułu i odpowiadające im wielkości poboru mocy. Przyjmijmy, że w danej chwili  $t$ , w zależności od wykonywanej operacji, moduł radiowy urządzenia  $D_i$  może pracować w jednym z  $K_i$  trybów,  $e_i \in 0, 1, 2, \dots, K_i$ . Niech  $e_i = 1$  oznacza uśpienie, w którym moduł radiowy nie bierze udziału w komunikacji – jest wyłączony, a  $e_2$  tryb odbierania, podczas którego urządzenie  $D_i$  jest przygotowane do odbioru danych przesyłanych przez inne węzły sieci. Pozostałe wartości  $2 < e_i \leq K_i$  oznaczają sytuacje, w których moduł radiowy  $i$ -tego urządzenia nadaje, przy czym zasięg transmisji jest różny i zależy od poziomu mocy nadawanego sygnału radiowego. Oznaczmy poziom mocy w stanie  $e_i$  przez  $Pt_i(e_i)$ . Przyjmijmy założe-

nie, że większa wartość  $e_i \in \{3, \dots, K_i\}$  oznacza nadawanie na większe odległości, a więc nadawanie z większą mocą, czyli  $Pt_i(3) < \dots < Pt_i(K_i)$ . Z każdym trybem działania modułu radiowego jest związane pewne zużycie energii, oznaczmy je przez  $\phi_i$ . Podsumowując, zmienną stanu określającą stan energetyczny urządzenia  $D_i$  w chwili  $t$  jest poziom naładowania baterii  $x_i = \xi_i$ ,  $\xi_i \in [0, \psi_i^{max}]$ ,  $\psi_i^{max}$  możliwy do uzyskania maksymalny poziom. Zmienne sterujące  $e_i$ ,  $e_i \in \{1, \dots, K_i\}$  i  $s_i^l$ ,  $s_i^l \in \{0, 1\}$  to zadawane tryby pracy modułu radiowego i  $L_i$  detektorów. Możemy sformułować równanie na zmianę poziomu naładowania baterii urządzenia  $D_i$

$$\xi_i(t) = \xi_i(t-1) - \phi_i(t) - \sum_{l=1}^{L_i} (s_i^l \cdot \psi_i^l(t)) - \Theta(\xi_i, t) \quad (2.4)$$

gdzie  $\psi_i^l$  oznacza energię zużyta przez czujnik pomiarowy  $l$ ,  $\Theta(\xi_i, t)$  jest nieliniowym członem opisującym proces rozładowywania się baterii urządzenia  $D_i$ .

Dane pomiarowe zebrane przez czujniki są przechowywane w odpowiednich buforach do czasu ich wstępnego przetworzenia i wysłania do odbiorcy. Załóżmy, że gromadzone dane są podzielone na równej wielkości pakiety i urządzenie  $D_i$  dysponuje buforem, w którym może przechowywać maksymalnie  $B_i$  pakietów danych. Jako zmienną stanu przyjmijmy stan bufora  $i$ -tego urządzenia i oznaczmy przez  $X_i^B$ . Na wektor zmiennych sterujących składają się:  $\gamma_i^c(t)$  – liczba pakietów danych pomiarowych zebranych przez wszystkie aktywne detektory urządzenia chwili  $t$ , oraz  $\gamma_i^d(t)$  – liczba pakietów danych usuniętych z bufora w chwili  $t$ . Tak więc  $U_i^B = (\gamma_i^p, \gamma_i^u)$ . Możemy wyznaczyć stan bufora w chwili  $t$

$$X_i^B(t) = X_i^B(t-1) + \gamma_i^c(t) - \gamma_i^d(t), \quad 0 \leq X_i^B \leq B_i. \quad (2.5)$$

## 2.3 Model komunikacyjny i wyznaczanie zasięgu transmisji

Komunikacja bezprzewodowa między węzłami  $D_i$  i  $D_j$  jest możliwa wtedy, gdy węzeł  $D_i$  jest w stanie odebrać i zdekodować sygnał wysłany przez węzeł  $D_j$ , a węzeł  $D_j$  może odebrać i zdekodować sygnał wysłany przez węzeł  $D_i$ . W bezprzewodowych sieciach ad hoc zazwyczaj do transmisji danych są wykorzystywane łącza radiokomunikacyjne składające się w uproszczeniu z nadajnika i odbiornika radiowego, połączonych bezprzewodowym medium transmisyjnym – ośrodkiem rozchodzenia się fal radiowych. Podstawowym zagadnieniem rozważanym podczas modelowania transmisji bezprzewodowej jest określenie wielkości spadku mocy sygnału przesyłanego przez łącza radiokomunikacyjne. Spadek mocy sygnału radiowego przekazywanego między nadajnikiem węzła  $D_j$  i odbiornikiem radiowym węzła  $D_i$  nazwano *tłumieniem propagacyjnym* (ang. *path loss*) i oznaczono symbolem  $Pl$ . Wartość  $Pl$  wyznacza się z równania bilansu energetycznego łącza radiowego

$$Pl[\text{dB}] = 10 \log \frac{G_j G_i Pt_j [\text{mW}]}{Pr_{ij} [\text{mW}]} \quad (2.6)$$

Po przekształceniu równania i zmianie jednostek otrzymujemy:

$$Pl[\text{dB}] = Pt_j[\text{dBm}] + G_j[\text{dB}] + G_i[\text{dB}] - Pr_{ij}[\text{dBm}]. \quad (2.7)$$

W powyższych wzorach  $G_i$  oznacza zysk energetyczny anteny odbiornika,  $G_j$  zysk energetyczny anteny nadajnika,  $Pt_j$  poziom mocy sygnału nadanego przez węzeł  $D_j$ , a  $Pr_{ij}$  poziom mocy sygnału odebranego przez węzeł  $D_i$ . Współczynnik  $Pl$  informuje o tym jaka część mocy sygnału  $Pt_j$  nadanego przez węzeł  $D_j$  dociera do odbiornika radiowego węzła  $D_i$ .

Wartość tłumienia propagacyjnego  $Pl$  zależy do wielu czynników fizycznych i może być wyznaczona empirycznie na drodze eksperymentalnej lub obliczana z modelu propagacji radiowej. W literaturze [13] przedstawiono dwie grupy modeli propagacji radiowej – dokładne modele, nazywane dalej modelami fizycznymi, wymagające dużej wiedzy o systemie i środowisku rozchodzenia się fal oraz mniej dokładne modele probabilistyczne i statystyczne.

W projektowaniu i symulacji powszechnie stosowane są uniwersalne modele probabilistyczne i statystyczne. Nie odzwierciedlają rzeczywistości tak dokładnie jak modele fizyczne, ale dzięki znacznie mniejszej złożoności mogą być wykorzystane do symulacji złożonych sieci ad hoc. W literaturze dominują trzy rodzaje modeli [13], które są stosowane przy założeniu różnych scenariuszy działania sieci.

**E.** Model zmian dużej skali (ang. *log-distance path loss model*). Nie uwzględnia się losowych zmian amplitudy sygnału, tzn. przyjmuje się, że moc odebranego sygnału mierzona na okręgu (sferze) o promieniu  $r$  wokół źródła sygnału jest taka sama. Poziom mocy odebranego sygnału zależy jedynie od odległości euklidesowej między nadawcą, a odbiorcą sygnału oraz parametru  $n$ . Tłumienie propagacyjne jest wyznaczane z następującego równania:

$$Pl_E(d)[\text{dB}] = Pl_A(d_0)[\text{dB}] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (2.8)$$

gdzie  $d$  oznacza odległość od nadajnika,  $d_0$  odległość referencyjną od nadajnika (np. 1m, 10m),  $Pl_A(d_0)$  stałe tłumienie podstawowe wyznaczone dla odległości referencyjnej  $d = d_0$  od nadajnika,  $n$  wyznaczony eksperymentalnie wykładnik modelu zależny od środowiska propagacji (np. 2 w wolnej przestrzeni, 2-4 w budynkach, 3-4 na terenach wiejskich, 4-5 na terenach miejskich).

**F.** Model efektów średniej skali (ang. *log-normal shadowing model*). Zakłada się, że amplituda sygnału może się zmieniać w sposób losowy, ale zmiany te są stosunkowo wolne. Wynikają one zazwyczaj z ukształtowania terenu, warunków atmosferycznych, niesymetrycznych wzmocnień anteny, itp. Model propagacji radiowej średniej skali zakłada, że moc odebranego sygnału mierzona na okręgu (sferze) o promieniu  $r$  wokół źródła sygnału ma rozkład normalny z odchyleniem standardowym równym  $\sigma$  oraz wartością średnią  $\mu = 0$ .

$$Pl_F(d)[\text{dB}] = Pl_A(d_0)[\text{dB}] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (2.9)$$

gdzie  $X_\sigma$  oznacza zmienną losową o logarytmicznym rozkładzie normalnym w [dB],  $\sigma$  odchylenie standardowe w [dB]. W pracy [13] podane są wartości  $\sigma$  wyznaczone dla wybranych środowisk.

**G.** Model efektów małej skali (ang. *small-scale fading model*). Zakłada się, że amplituda sygnału może się zmienić w sposób losowy, i zmiany następują gwałtownie.

Fluktuacje amplitudy sygnału wynikają m.in. z propagacji sygnału wieloma ścieżkami (odbicia, itp.), efektu Dopplera w przypadku węzłów mobilnych, ruchu innych obiektów na drodze propagacji fali radiowej oraz szerokości pasma transmitowanego sygnału. Zjawiska te najczęściej modelowane są za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa Rayleigh'a i Rice'a oraz modeli statystycznych [13]. Współcześnie stosowane zaawansowane techniki rozpraszania widma sygnału (np. PSSS - *parallel sequence spread spectrum* czy DSSS - *direct sequence spread spectrum*), znacząco zmniejszają wpływ zjawisk małej skali na transmisję bezprzewodową. Z tego powodu modele efektów małej skali są rzadko rozważane w modelowaniu i symulacji bezprzewodowych sieci ad hoc.

Budując bezprzewodowe sieci pomiarowe musimy zagwarantować spójność sieci. Wymaga to zazwyczaj wyznaczenia zasięgu transmisji radiowej osiągalnego w przestrzeni roboczej sieci. Wybieramy model odpowiedni dla rozważanego scenariusza działania sieci, podajemy czułość odbiornika radiowego  $Ps_i$  urządzenia  $D_i$  i obliczamy maksymalną odległość euklidesową między węzłem nadawczym i odbiorczym, dla której zgodnie z przyjętym modelem, nadany sygnał zostanie poprawnie odebrany przez nasz węzeł. Przyjmujemy, że wyznaczona odległość to aktualny zasięg transmisji radiowej  $r_t$ . Wynik, który uzyskamy, tj. wartość  $r_t$  jest oczywiście obarczony pewnym błędem gdyż jest on rezultatem zastosowania modeli, które są tylko przybliżonym opisem rzeczywistości. Wielkość błędu zależy od dokładności wybranego modelu. Często do obliczenia zasięgu transmisji wykorzystuje się prosty model statystyczny zmian dużej skali opisany w rozdziale 2.3. Z równania (2.7) obliczamy wartość  $Pl_E(d)$  przy założeniu wartości progowej poziomu mocy odbieranego sygnału  $Pr_{ij} = Ps_i$  oraz pomijając zyski energetyczne anteny ( $G_i = 0$  i  $G_j = 0$ ). Następnie, podstawiając w równaniu (2.8)  $d = r_t$  i wyznaczoną wartość  $Pl_E(d)$ , po przekształceniach wyznaczamy zasięg transmisji  $r_t$ .

$$r_t = d_0 10^{\frac{Pt_j[\text{dBm}] - Ps_i[\text{dBm}] - Pl_A(d_0)[\text{dB}]}{10n}}. \quad (2.10)$$

Model E (2.8) nie uwzględnia efektów losowych zakłóceń. Wpływ środowiska na zasięg radiowy jest rozważany w modelu F (2.9). Rozwiązując równanie (2.9) dla konkretnej wartości poziomu mocy nadawanego sygnału  $Pt_j$  oraz czułości odbiornika  $Ps_i$  możemy wyznaczyć prawdopodobieństwo z jakim sygnał nadany przez węzeł  $D_j$  dotrze do odbiornika  $D_i$  znajdującego się w odległości  $d$ . Sygnał zostanie odebrany prawidłowo, gdy poziom mocy  $Pr_{ij}$  sygnału radiowego odebranego przez węzeł  $D_i$  przekroczy wartość progową  $Ps_i$ . Prawdopodobieństwo tego zdarzenia można wyznaczyć korzystając ze znanej w statystyce funkcji  $Q(z)$  opisanej m.in. w pracy [13]

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad Q(z) = 1 - Q(-z). \quad (2.11)$$

Prawdopodobieństwo, że poziom mocy sygnału odebranego  $Pr_{ij}$  przekroczy  $Ps_i$  w odległości  $d$  od nadajnika jest wyznaczane w następujący sposób

$$P[Pr_{ij}(d) > Ps_i] = Q\left(\frac{Ps_i - \overline{Pr_{ij}(d)}}{\sigma}\right), \quad (2.12)$$

gdzie  $\sigma$  oznacza odchylenie standardowe w równaniu (2.9),  $\overline{Pr_{ij}(d)} = Pt_j - Pl_E(d)$ .



Po przekształceniu formuł (2.11) i (2.9) otrzymujemy

$$\frac{Ps_i - \overline{Pr_{ij}(d)}}{\sigma} = z, \quad (2.13)$$

$$\frac{Ps_i - Pt_j + Pl_E(d)}{\sigma} = z. \quad (2.14)$$

Po podstawieniu definicji  $Pl_E(d)$  (2.8) do równania (2.14) i wykonaniu odpowiednich przekształceń wyznaczamy odległość  $r_{t_i}$ , dla której z założonym prawdopodobieństwem zdefiniowanym zależnością (2.12) gwarantowana jest transmisja do węzła  $D_i$ .

$$r_{t_i} = d_0 10^{\frac{Pt_j[\text{dBm}] - Ps_i[\text{dBm}] - Pl_A(d_0)[\text{dB}] + z\sigma[\text{dBm}]}{10n}}. \quad (2.15)$$

W pracy [13] podane są stabelaryzowane wartości funkcji Q dla różnych wartości  $z$ . Załóżmy, że poziom mocy sygnału odebranego przekroczy wartość progową  $Ps_i$  z prawdopodobieństwem 99%. Jest to możliwe dla  $z = -2.3$ .

## 2.4 Model sieci złożonej z podsieci

Przedstawiony powyżej prosty model (2.3) definiuje jedynie zbiór podstawowych elementów składowych sieci, czyli jej węzły i ich wzajemne powiązania. Sieci monitorujące, często rozległe przestrzennie, mogą tworzyć sieć podsieci (komponentów), w których zarówno dane pomiarowe, jak i centra sterowania są zlokalizowane w różnych miejscach. Tworzące je urządzenia mają szereg ograniczeń, w tym na dostępne zasoby. W ogólnym przypadku sieci WSN to systemy dyskretno-ciągłe, w których część opisujących je zmiennych stanu to zmienne ciągłe (np. zmiana poziomu naładowania baterii), a część to zmienne dyskretne (np. tryby pracy modułu radiowego). Zmiany stanu urządzeń sieciowych są bardzo często wyzwalane przez zdarzenia występujące w nieregularnych odstępach czasu. Wyobraźmy sobie naszą sieć ad hoc jako system  $S$  złożony z rozlokowanych w przestrzeni  $L$  podsystemów  $Sp_i$ , każdy zbudowany z wielu (w szczególności jednego) wyposażonych w czujniki pomiarowe urządzeń  $D_i$ ,  $i = 1, \dots, L_i$ . Podsystemy posiadają własne wektory stanu, wejść i wyjść, mogą działać samodzielnie lub wykonywać polecenia zlecane przez centrum sterowania siecią. Uwzględniając strukturę i zbiory wielkości występujących w systemie  $S$  możemy sformułować jego ogólny model

$$S = \langle T, U_o, Z_o, Y_o, P_L, \{Sp_i\}_{i \in P_L}, \{I_i\}_{i \in P_L \cup \{o\}}, \{q_i\}_{i \in P_L \cup \{o\}} \rangle, \quad (2.16)$$

gdzie  $T$  oznacza okres czasu, na którym analizujemy rozważany system,  $U_o$  i  $Z_o$  odpowiednio, wektor wejść sterujących oraz wektor zakłóceń oddziałujących na cały system (tzw. wejścia zewnętrzne),  $Y_o$  wektor wyjść opisujący oddziaływanie systemu na otoczenie (tzw. wyjścia zewnętrzne),  $o$  indeks oznaczający otoczenie systemu,  $P_L$  zbiór indeksów podsystemów (zbiór o liczności  $L$ ),  $Sp_i$   $i$ -ty podsystem,  $I_i \subset P_L \cup \{o\}$  zbiór indeksów podsystemów wpływających na  $Sp_i$  (łącznie z otoczeniem),  $q_i$  funkcja opisująca wzajemne powiązania podsystemów,  $q_i : \times Q_{j \in I_i} \rightarrow Q_i$ , gdzie  $Q_j = U_j$  lub  $Q_j = Z_j$  dla  $j = o$  i  $Q_j = Y_j$  dla  $j \neq o$  oraz  $Q_i = Y_i$  dla  $i = o$  i  $Q_i = X_i$  dla  $i \neq o$ . Mówiąc o otoczeniu sieci mamy na myśli jej przestrzeń roboczą, czyli środowisko, w którym działa.

Każdy podsystem można opisać za pomocą następujących zmiennych i funkcji

$$Sp_i = \langle T, U_i, Z_i, Y_i, X_i, \{Y_m\}_{m \in I_i}, f_i, g_i \rangle, \quad (2.17)$$

gdzie  $U_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  i  $X_i$  oznaczają odpowiednio lokalne wektory sterowań, zakłóceń, wyjść i stanu  $i$ -tego podsystemu,  $\{Y_m\}_{m \in I_i}$  wyjścia podsystemów wpływających na  $Sp_i$  (tzw. wejścia interakcyjne  $i$ -tego podsystemu z pozostałymi podsystemami,  $m \neq i$ ), a  $f_i$  i  $g_i$  funkcje przejścia stanu i wyjścia  $i$ -tego podsystemu,  $f_i : \times Y_{m \in I_i} \times U_i \times Z_i \times X_i \rightarrow X_i$ ,  $g_i : \times Y_{m \in I_i} \times U_i \times Z_i \times X_i \rightarrow Y_i$ .

Postać funkcji  $q_i$  opisującej wzajemne oddziaływania podsystemów  $Sp_i$ ,  $i = 1, \dots, L$  zależy od występujących w nich powiązań. Przypadek, gdy wyjścia podsystemów są wejściami innych można łatwo opisać za pomocą układu równań liniowych

$$u_i = \sum_{j=1}^L H_{ij} g_j(x_j, u_j, z_j), \quad i = 1, \dots, L, \quad (2.18)$$

gdzie  $u_i \in U_i$ ,  $u_j \in U_j$ ,  $x_j \in X_j$ ,  $z_j \in Z_j$ , a  $H_{ij}$  jest macierzą złożoną z zer i jedynek, i oznacza lokalny operator interakcji. Powiązania wynikające z ograniczeń fizycznych, np. wspólnych zasobów energetycznych w przypadku wspólnego zasilania podsieci, formułujemy w postaci  $\sum_{i=1}^L a_i(u_i, z_i) \leq A$  lub  $\sum_{i=1}^L b_i(u_i, z_i) = B$ .

## Rozdział 3

# Projektowanie energooszczędnej sieci WSN – problemy

Systemy monitorujące zbudowane na bazie bezprzewodowych sieci czujników mogą być stosowane w różnych środowiskach i sytuacjach oraz wykonywać zadania różnych typów. Zastosowanie warunkuje konstrukcję topologii sieci oraz wybór technologii do jej realizacji. Inne protokoły sieciowe są wykorzystywane w przypadku sieci obejmującej zasięgiem działania pojedynczy budynek, a inne w sytuacjach działań prowadzonych na dużym obszarze (np. wykrywanie pożarów lasu, monitorowanie środowiska naturalnego itd.). Budowa sieci ad hoc zdolnej do wykonania powierzonego jej zadania, wymaga uzyskania informacji dotyczących tworzących ją urządzeń. Znaczna część danych jest oczywiście udostępniana przez producentów sprzętu. Niemniej, w trakcie działania operacyjnego parametry i możliwości urządzeń mogą ulegać dynamicznym zmianom. W miarę upływu czasu zmniejszają się ich zasoby energetyczne węzłów, a tym samym moc obliczeniowa i zakres nadajnika radiowego. Podstawowe informacje, które są wymagane zarówno przy projektowaniu sieci, jak i przy obróbce danych pozyskiwanych przez sieć oraz bieżącym zarządzaniu działaniem sieci, jeśli aplikacja przewiduje jakiegokolwiek zarządzanie, obejmują:

- położenie geograficzne węzłów sieci,
- dopuszczalną (aktualnie) moc nadajnika radiowego,
- liczbę aktywnych węzłów w sieci,
- liczbę węzłów które mogą być stracone do chwili, w której uznaje się, że sieć przestaje funkcjonować,
- założoną funkcjonalność sieci (maksymalizacja czasu funkcjonowania sieci, maksymalizacja przepływności itd.).

Protokoły komunikacyjne wykorzystywane we współczesnych sieciach bezprzewodowych takie jak IEEE 802.11, Bluetooth (IEEE 802.15.1) czy niskoenergetyczny odpowiednik standardu 802.11 ZigBee (IEEE 802.15.4) pozwalają na pracę w trybie ad hoc. Charakteryzują się one bardzo ograniczonym zasięgiem, niską przepustowością łączy i

jakością transmisji. Pełne pokrycie przestrzeni roboczej w przypadku sieci rozległych wymaga zbudowania systemu pomiarowego złożonego z bardzo dużej liczby, gęsto rozlokowanych urządzeń. Protokoły MAC (*Medium Access Control*) gwarantują wydajny dostęp do medium transmisyjnego uważnie zarządzając dostępnymi zasobami energii. Wyczerpujący przegląd dostępnych protokołów MAC jest prezentowany w pracach [8, 16]. Wyniki badań porównawczych protokołów pod względem ich energooszczędności, przeprowadzone w środowiskach symulacyjnych są opisane w pracy [16]. Pomimo wysokiej wydajności protokołów MAC praktyczne zastosowanie sieci w trybie pracy ad hoc wymaga nadal rozwiązania kilku podstawowych problemów. Najważniejsze z nich to wspomniane wcześniej ograniczone zasoby obliczeniowe i energetyczne, niska jakość łączy oraz zmieniająca się dynamicznie topologia sieci. Istotnym problemem jest również zapewnienie bezpieczeństwa sieci. Spontaniczny sposób tworzenia sieci czyni je stosunkowo łatwym obiektem zewnętrznego ataku. Bezprzewodowa transmisja również ułatwia atak – znacznie łatwiej jest włączyć się do tego typu sieci. Zapewnienie bezpieczeństwa w sieciach ad hoc wymaga zastosowania nowych rozwiązań, które nie występują w sieciach przewodowych o stałej infrastrukturze.

Prace badawcze prowadzone w ostatnich latach koncentrują się m.in. na opracowaniu specjalizowanych algorytmów i protokołów, które pozwalają na rozwiązanie wymienionych powyżej problemów związanych z projektowaniem rzeczywistych sieci pomiarowych. Zwięzły przegląd proponowanych w literaturze rozwiązań zawiera następny rozdział pracy.

# Rozdział 4

## Sieci energooszczędne i sterowanie topologią

Rozlokowane w przestrzeni roboczej urządzenia tworzące sieć pomiarową oraz dostępne połączenia między nimi definiują topologię rozważanej sieci. Połączenia wynikają z zakresu transmisji radiowej realizowanej przez zainstalowane w węzłach moduły radiowe. W ostatnich latach, w literaturze poświęconej tematyce bezprzewodowych sieci ad hoc często pojawia się sformułowanie „sterowanie topologią” (ang. *topology control*). W ogólności sterowanie topologią sprowadza się do odpowiedniego rozmieszczenia węzłów sieci oraz zarządzania transmisją w taki sposób aby w efekcie uzyskać system o pożądanych własnościach. W praktycznych realizacjach oczekuje się zagwarantowania spójności sieci, długiego czasu funkcjonowania, pokrycia siecią znacznego obszaru itd., przy jednoczesnym ograniczaniu zużycia zasobów, w szczególności zasobów energetycznych urządzeń tworzących sieć. Różni autorzy prac przez sterowanie topologią rozumieją mniejszy lub większy zakres działań, które wpływają na strukturę, a tym samym parametry i charakterystykę sieci. G. Anastasi i inni w pracy [3] za sterowanie topologią przyjmują takie działania, które prowadzą do zapewnienia utrzymania stałej łączności z wszystkimi węzłami sieci, a więc budowę sieci spójnej. Dla P. Santi, [15] jest to odpowiednie sterowanie poziomem mocy nadawanego sygnału radiowego. Moc z jaka jest nadawany sygnał decyduje o zakresie transmisji, a więc o możliwych połączeniach międzywęzłowych. W niniejszym opracowaniu, podobnie jak I.F. Akyildiz i M.C. Vuran [2], mówiąc o sterowaniu topologią sieci mamy na myśli następujące działania, które w danej chwili decydują o topologii sieci:

1. Rozlokowanie węzłów (ang. *deployment*) – odpowiednie rozmieszczenie węzłów w przestrzeni roboczej.
2. Grupowanie węzłów (ang. *clustering*) – podział węzłów na grupy w celu usprawnienia działania sieci i poprawienia wydajności.
3. Sterowanie aktywnością węzłów (ang. *activity control* - AC) – czasowe usypianie i aktywacja węzłów.
4. Sterowanie poziomem mocy nadawanego sygnału (ang. *power control* - PC) – wyznaczanie zasięgu transmisji przez sterowanie nadajnikiem radiowym.

Bardzo ważnym kryterium przy budowie sieci pomiarowych jest tworzenie energooszczędnych topologii. Służą temu wszystkie wymienione powyżej działania. W literaturze [?] omawiane są strategie, metody i algorytmy, które są używane do budowy sieci o pożądanych właściwościach.

## 4.1 Algorytmy sterowania poziomem mocy sygnału

Algorytmy sterowania poziomem mocy nadawanego sygnału PC wpływają zarówno na protokoły warstwy łącza danych, tj. MAC (Medium Access Control) jak i na protokoły routingu tworzące warstwę sieci w modelu referencyjnym ISO/OSI, [2, 4, 9, 15, 18, 17]. Zadaniem protokołów routingu jest oczywiście wyznaczenie i utrzymanie najlepszej w sensie zadanego kryterium ścieżki między nadawcą a odbiorcą komunikatu. Protokoły PC wyznaczają listę sąsiadów, przez których może być przesłany komunikat. Sugerowany graf połączeń węzła jest przekazywany do warstwy sieci, gdzie jest uwzględniany przez algorytmy routingu przy wyznaczaniu optymalnej ścieżki przekazania danego komunikatu. Wyznaczone trasy są aktualizowane każdorazowo w przypadku wystąpienia zmian w liście najbliższych sąsiadów, np. w wyniku dołączenia bądź odłączenia węzła. Zmiany dotyczą całej sieci, a nie tylko wybranych węzłów. Aktualizacja listy sąsiadów jednego węzła może mieć wpływ na ścieżki przesyłania pakietów nawet do bardzo odległych węzłów. Stąd globalna zmiana ścieżek transmisji przez warstwę PC jest wydajniejsza niż aktualizacja osobno każdej ścieżki przez protokoły warstwy sieci. Zaletą takiego rozwiązania jest zmniejszenie liczby utraconych pakietów. Protokół routingu inicjuje działanie protokołu PC wtedy, kiedy wiele ścieżek zostało utraconych na skutek zmian, które zaszły w sieci od momentu poprzedniej aktualizacji tras stanowiącej wynik działania algorytmu PC. Wybór algorytmu PC determinuje wybór protokołu routingu. Proaktywne protokoły routingu aktualizują ścieżki poprzez globalną wymianę informacji o zmianach w topologii. Protokoły różnią się między sobą liczbą tabel oraz sposobem ich aktualizacji np. protokół DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) wymaga przechowywania w pamięci węzła ścieżek do wszystkich pozostałych węzłów, co w przypadku dużych sieci sensorów nie jest wskazane. Ponadto cykliczna aktualizacja znaczącej liczby ścieżek skutkuje zwiększonym zużyciem zasobów energetycznych węzłów. Reaktywne protokoły, np. AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) aktualizują trasy tylko wtedy, kiedy zachodzi taka potrzeba. Routing reaktywny w porównaniu do proaktywnego nie wymaga tak dużych zasobów pamięci oraz regularnej aktualizacji ścieżek w całej sieci. Istnieją też protokoły routingu nastawione na wydłużenie życia sieci.

Głównym zadaniem warstwy MAC w bezprzewodowych sieciach sensorów jest kontrola dostępu do medium transmisyjnego gwarantująca uzyskanie wymaganej przepustowości sieci. Węzły sieci mają przydzieloną pewną początkową maksymalną moc transmisji. Protokoły PC, znając swoich najbliższych sąsiadów, sterują poprzez warstwę MAC mocą transmisji tak, aby pakiety dotarły do docelowych węzłów. Zmniejszając moc transmisji można bądź wykluczyć interferencję (węzły znajduje się poza zasięgiem innych nadajników), bądź można ją wywoływać, kiedy sygnał z nadajnika o większej mocy nadawania koliduje z sygnałem z nadajnika o mniejszej mocy.

W literaturze proponowanych jest wiele algorytmów sterowania poziomem mocy sygnału. Różnią się one przede wszystkim rodzajem informacji wykorzystywanej przy wy-

znaczeniu energooszczędnej topologii sieci. Oczywiście jest, że istnieje bezpośrednia zależność między jakością informacji a wydajnością proponowanej topologii - dysponując dokładniejszymi danymi w trakcie obliczeń uzyskujemy lepsze rozwiązania pozwalające na większe oszczędności energii.

Ze względu na rodzaj informacji wykorzystywanej podczas wyznaczania węzłów uczestniczących w transmisji wyróżnia się następujące grupy algorytmów, w których obliczenia są prowadzone przy wykorzystaniu następujących danych:

- współrzędne położenia geograficznego węzłów,
- odległości od sąsiednich węzłów,
- kierunki, w których są rozmieszczone i identyfikatory sąsiednich węzłów.

Protokoły wykorzystujące dane o położeniu węzłów (ang. *location-based TC*)

- R&M (autorstwa Rodoplu i Meng) [14],
- LMST (*Local Minimum Spanning Tree*) [11].

Protokoły wykorzystujące węzły sąsiednie (*Neighbor-based TC*)

- KNeight (K-neighbors graph) [15],
- XTC [15].

Protokoły wykorzystujące kierunek położenia sąsiadów (*Direction-based TC*)

- CBTC (Cone-based Topology Control) [15],
- DistRNG [15].

Informacje o lokalizacji węzłów mogą być pozyskiwane z wykorzystaniem systemu GPS lub technik lokalizacji. Stosowanie GPS wymaga oczywiście wyposażenia węzła sieci w ten odbiornik - co w istotnym stopniu podnosi koszty sieci.

Odległości międzywęzłowe mogą być szacowane na różne sposoby, w zależności od wyposażenia węzła sieci. Powszechnie używane są następujące techniki:

- Wskaźnik RSSI: (ang. *Radio Signal Strength Indicator*). Odległość jest szacowana na podstawie wskaźnika mocy odbieranego sygnału oraz odpowiednich współczynników charakterystycznych dla danego środowiska. Przykładowe wartości wskaźnika dla zmierzonych zasięgów transmisji prezentuje tabela 2.
- AoA: (ang. *Angle of Arrival*). Odległość jest wyznaczana na podstawie pomiaru ze skierowanych anten. Wymaga wyposażenia węzła w odpowiednie anteny.

- ToA: (ang. Time of Arrival). Do wyznaczania odległości wykorzystuje się związek odległości między nadajnikiem i odbiornikiem oraz czasu niezbędnego na transmisję sygnału. Porównywane są czasy odebrania różnych typów sygnałów. Technika ToA daje znacznie dokładniejsze wyniki niż podejścia stosujące RSSI.

Najczęściej do wyznaczenia odległości wykorzystuje się wskaźnik RSSI i różne modele propagacji radiowej, np. model (2.10).

## 4.2 Sterowanie aktywnością węzłów

Bezprzewodowe sieci pomiarowe są zazwyczaj tworzone przez dużą liczbę urządzeń stosunkowo gęsto rozmieszczonych w przestrzeni roboczej. Wyniki pomiarów dokonywanych przez czujniki zlokalizowane w węzłach sieci są przesyłane co pewien okres czasu, zgodnie z założonym harmonogramem lub w odpowiedzi na nowe zdarzenie. W większości zastosowań przez dłuższe okresy czasu interfejsy radiowe są bezczynne.

Przeglądając dokumentację techniczną popularnych modułów radiowych, w które są wyposażone urządzenia wykorzystywane do budowy sieci sensorowych możemy przeczytać, że zarówno procesor, jak i nadajnik radiowy mogą pracować w różnych trybach charakteryzujących się różnym zapotrzebowaniem na energię. Oczywiście jest, że bardzo korzystne dla oszczędzania energii jest okresowe wyłączenie całego węzła, a przynajmniej procesora. Niestety niewiele jest takich systemów, w których wyłączenie serca węzła – procesora, nie zakłóci poprawnego funkcjonowania systemu. W większości przypadków detektory powinny wykonywać na bieżąco pomiary, a dane muszą być zapisywane w pamięci urządzenia. Znacznie częściej, jak już wspomnieliśmy, można usypiać lub przełączać w niskoenergetyczne stany moduł radiowy, przy działającym procesorze i urządzeniach pomiarowych. Jest to szczególnie korzystne, gdyż transmisja pochłania dość dużą ilość zasobów energetycznych sieci. Pobór mocy modułu radiowego bardzo silnie zależy od realizowanej w danej chwili operacji. W dostępnych na rynku urządzeniach rozróżnia się pięć trybów działania radia:

**SLEEP VR off** : głębokie uśpienie (ang. *voltage regulator off mode*) – zarówno regulator napięcia jak i oscylator (generator podstawy czasu) są wyłączone. Urządzenie pobiera znikomą ilość energii. Czas wybudzania stosunkowo duży.

**SLEEP VR on** : płytkie uśpienie (ang. *power down mode*) – regulator napięcia jest włączony, ale nadal wyłączony jest oscylator. Urządzenie pobiera niewielką ilość energii, ale istotnie większą niż w stanie uśpienia. Krótszy czas wybudzania.

**IDLE** : bezczynność (ang. *idle mode*) – regulator napięcia oraz oscylator są włączone, ale układ nie wykonuje żadnych operacji. Urządzenie pobiera małą, ale istotnie większą niż w obu stanach uśpienia, ilość energii. W każdej chwili może nastąpić przełączenie w tryb odbioru lub nadawania. Bardzo szybka aktywacja.

**TRANSMIT** : nadawanie (ang. *transmit mode*) – włączone są główne układy, w tym regulator napięcia i oscylator. Urządzenie nadaje z różną mocą. Zasięg transmisji zależy od poziomu mocy nadawanego sygnału radiowego wyrażanego zwykle w dBm<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Jednostka poziomu mocy sygnału w skali logarytmicznej liczona w odniesieniu do 1 mW.



Tryb pracy	Moc sygnału [dBm]	Zużycie mocy		
		Moduł CC1100 [868 MHz]	Moduł CC2420 [2400 MHz]	Moduł CC2500 [2400 MHz]
Głębokie uśpienie [ $\mu$ A]		0,4	0,02	0,4
Płytkie uśpienie [mA]		0,16	0,02	0,16
Bezczynność [mA]		1,6	0,426	1,5
Odbieranie [mA]		16,4	18,8	16,6
Nadawanie [mA]	-25	12,1	8,5	10,1
	-20	12,4	9,0	10,1
	-15	13,0	9,9	10,8
	-10	13,5	11,2	12,2
	-5	14,1	13,9	15,6
	0	16,9	17,4	21,2

Tabela 4.1: Dane techniczne modułów komunikacji radiowej CC1100, CC2420 i CC2500.

Zużycie energii jest znacznie większe niż w trybie beczynności i zależy od poziomu mocy nadawanego sygnału wynikającego z założonego zasięgu transmisji.

**RECEIVE** : odbieranie (ang. *receive mode*) – włączone są główne układy, w tym regulator napięcia i oscylator. Urządzenie jest gotowe do odebrania danych (nasłuch) lub odbiera dane przesyłane przez inne węzły sieci. Największe zużycie energii.

W trzech pierwszych stanach przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe są wyłączone. Nie działają procesory modulatora i demodulatora. Przejście ze stanu głębokiego uśpienia (SLEEP VR off) do stanu aktywnego jest inicjowane przez procesor główny urządzenia. Kolejno włączany jest regulator napięcia, a następnie oscylator. Operacje te nie są natychmiastowe, tak więc proces aktywacji pochłania nieco czasu. Znacznie szybsze jest wybudzenie radia ze stanu płytkiego uśpienia (SLEEP VR on), gdy działa regulator napięcia i aktywacja radia nie wymaga inicjacji sygnałem zewnętrznym. W stanie beczynności IDLE procesory modulatora i demodulatora są w stanie zawieszonym, oczekują na aktywację na instrukcji *IDLE*. Przełączenie radia w stan aktywny skutkuje natychmiastowym uruchomieniem procesorów, co powoduje skokowy wzrost zapotrzebowania na energię. Aktywacja z poziomu beczynności jest bardzo szybka.

W dokumentacjach popularnych modułów komunikacji radiowej stosowanych w urządzeniach zgodnych ze standardem IEEE 802.15.4 podawane jest nominalne zużycie energii dla różnych trybów działania radia oraz odpowiadający temu zużyciu zasięg nadawania. Przykładowe dane serii popularnych modułów radiowych firmy Chipcon (aktualnie Texas Instruments) CC1100, CC2420 oraz CC2500 służące do komunikacji zgodnej ze standardem IEEE802.15.4 w paśmie 868 MHz (CC1100) oraz 2.4 GHz (CC2420 i CC2500) prezentuje tabela 4.1.

Warto zauważyć, że w stanie uśpienia moduł radiowy również pobiera energię, a stan odbierania generuje największe zapotrzebowanie energetyczne.

Zużycie energii może więc być zredukowane poprzez wprowadzanie nadajnika radiowego w stan uśpienia lub beczynności w okresach, gdy nie odbywa się intensywne wymiana danych. Jest to strategia realizowana przez algorytmy sterowania aktywnością modułów

radiowych w urządzeniach stanowiących węzły sieci (ang. *activity control*), które będziemy w dalszej części pracy nazywać algorytmami AC. Celem jest wpływanie na bieżąco na stan węzłów w celu dostosowania ich trybu pracy do aktualnej sytuacji w sieci – w pewnych okresach czasu następuje wyłączenie lub wyciszenie modułów radiowych wskazanych przez algorytm urządzeń. Takie działanie pozwala na ograniczenie zużycia energii, a tym samym wydłużenie czasu funkcjonowania całej sieci. Z usypianiem węzłów wiąże się niestety ograniczenie dostępnego pasma, co może w pewnych sytuacjach zakłócić przepływ danych w sieci. Bardzo ważny jest odpowiedni wybór okresów czasu, w których można wyciszyć lub wyłączyć moduły radiowe. W tym celu konieczne jest wykonanie dodatkowych operacji, co może wprowadzać dodatkowe komplikacje w protokołach sieciowych.

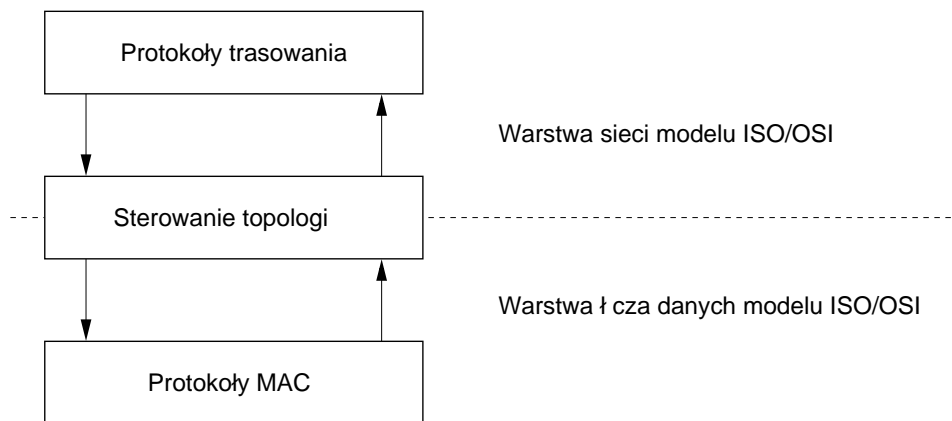
Przyjrzyjmy się jak algorytmy AC, zlokalizowane w warstwie sterowania topologią zmodyfikowanego modelu OSI, oddziałują na protokoły trasowania (warstwa sieci) oraz protokoły MAC (warstwa łącza danych). Interakcje międzywarstwowe prezentuje rysunek 4.1. Protokoły trasowania pobierają od warstwy sterowania topologią informacje o aktywnych węzłach sieci i na tej podstawie wyznaczają nowe ścieżki transmisji. Zmiany aktywności węzłów wywołane działaniem protokołów AC są sygnalizowane warstwie sieci i powodują uruchomienie protokołu routingu. Z drugiej strony protokoły warstwy sieci mogą wymusić uruchomienie protokołu AC w celu zmiany stanów węzłów w przypadku zaobserwowania strat w sieci. Protokoły AC przekazują protokołom MAC informacje o aktualnym stanie węzła. W zależności od tego stanu ustawiany jest poziom mocy nadawanego sygnału. Warstwa łącza danych może wymusić uruchomienie protokołu AC w przypadku pojawienia się nowych węzłów sieci lub ich utraty, np. na skutek wyczerpania zasobów energetycznych lub utraty łączności w wyniku niekorzystnych zmian warunków atmosferycznych.

W literaturze opisanych jest kilka grup integrujących różne techniki stosujące okresowe usypianie interfejsu radiowego, które umożliwiają wydłużanie czasu działania sieci przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnych efektów płynących ze stosowania tych metod. Algorytmy sterowania aktywnością są klasyfikowane na różne sposoby, w zależności od przyjętych kryteriów. Poniżej prezentujemy te klasyfikacje, które najczęściej występują w literaturze poświęconej energooszczędnym sieciom.

Jako pierwsze kryterium przyjmujemy *tryb zmiany stanu węzła*. Możemy rozróżnić trzy takie tryby:

1. przełączanie synchroniczne,
2. przełączanie asynchroniczne,
3. zmiana stanu na żądanie (reakcja na zdarzenie).

*Synchroniczne algorytmy AC* to rozwiązania, w których przyjmuje się, że węzły, co ustalony okres czasu, przełączają się w stan aktywny w celu przesłania zebranych przez siebie danych i odebrania komunikatów od innych węzłów. Cykle snu wszystkich węzłów sieci, są synchronizowane globalnie aby w danym okresie czasu możliwa była wymiana danych. Obniżenie zużycia energii przy jednoczesnym zagwarantowaniu poprawnego działania sieci wymaga dostosowania długości czasu aktywności węzłów do postawionych wymagań, tak aby była możliwa realizacja wszystkich zadań, które wykonuje dana sieć. W *algorytmach*



Rysunek 4.1: Wpływ algorytmów sterowania aktywnością na protokoły trasowania i MAC.

*asynchronicznych* przyjmuje się, że czas snu i aktywności jest ustalany indywidualnie dla każdego węzła. Problemem, w tym przypadku jest brak zabezpieczeń przed sytuacją, w której jednocześnie wszystkie węzły przechodzą w stan uśpienia. Aby do tego nie dopuścić, zazwyczaj ustala się odpowiedni harmonogram aktywności poszczególnych węzłów.

W algorytmach AC reagujących na żądanie przyjmuje się, że węzeł jest budzony tylko w sytuacji, gdy konieczne jest przesłanie do niego danych od sąsiadującego węzła. Tego typu rozwiązanie stosuje się zazwyczaj w sieciach pomiarowych, w których czujniki przez większą część czasu zajmują się zbieraniem danych. W przypadku, gdy dany czujnik wykryje zmianę stanu mierzonej wielkości uruchamia moduł radiowy i rozsyła dane do sąsiednich węzłów. Stosowanie tego typu algorytmu wymaga istnienia dwóch kanałów komunikacyjnych – pierwszego do przesyłania danych pomiarowych oraz drugiego do przesłania komunikatów wybudzających nieaktywne węzły. Wymaga to zazwyczaj stosowania dwóch oddzielnych modułów radiowych, co niestety zwiększa koszt pojedynczego węzła.

Kolejnym kryterium jest zakres wiedzy o sieci niezbędny do podjęcia decyzji o zmianie stanu węzłów. Wyróżnimy trzy przypadki:

1. dostępne są położenia w przestrzeni roboczej wszystkich urządzeń tworzących sieć – algorytmy geograficzne,
2. węzeł dysponuje tylko wiedzą o węzłach znajdujących się w jego zasięgu (zna swoich

sąsiadów) – algorytmy wykorzystujące połączenia,

3. znana jest topologia sieci.

Ostatnim rozważanym kryterium jest przyjęta w algorytmie AC struktura sieci. Rozważane są trzy przypadki:

1. płaska struktura – wszystkie węzły sieci są równoprawne,
2. podział sieci na równoprawne podsieci – grupy węzłów,
3. podział sieci na grupy i wprowadzenie hierarchii grup.

W pierwszym przypadku każdy węzeł jest traktowany w ten sam sposób, nie ma węzłów wyróżnionych. W wariantach drugim i trzecim wykorzystuje się, opisane w pracy [1] techniki grupowania węzłów. Z opisu tych technik wynika, że węzły w obrębie klastra mogą pełnić różne funkcje, w szczególności niektóre z nich odgrywają szczególną rolę w transmisji danych. W przypadku trzecim zakłada się budowanie wielowarstwowej hierarchii klastrów. Przypisane są one do odpowiednich warstw, w zależności od odległości jaka dzieli je od stacji bazowej. Wykorzystywane do tego celu techniki grupowania to m.in. EEHC, HEED, DWEHC. We wszystkich tych algorytmach periodycznie wybierani są liderzy klastrów, z których formowana jest sieć odpowiedzialna za transmisję danych do stacji bazowej. W tej sytuacji wymaga się aby w danych okresach czasu w stanie aktywnym przebywały jedynie te, wybrane węzły, pozostałe mogą być usypiane i przebudzane na krótkie okresy czasu w celu wymiany informacji o stanie sieci, wykorzystywanych podczas kolejnej elekcji nowych liderów klastrów.

W literaturze prezentowanych jest szereg algorytmów sterowania aktywnością węzłów. Poniżej wymienionych jest kilka z nich.

Algorytm ASCENT (*Adaptive self-configuring sensor networks topologies* został opracowany przez A. Cerpa i D. Estrina [5]. Jego celem jest wydłużenie czasu funkcjonowania sieci przez oszczędne gospodarowanie energią urządzeń przy zachowaniu gwarancji łączności ze stacją bazową. ASCENT jest rozwiązaniem dla gęstych sieci, o znacznej liczbie węzłów. Na podstawie lokalnej informacji o sąsiadach formowany jest szkielet sieci złożony z aktywnych węzłów, zajmujących się transmisją danych. Większość węzłów w tym czasie jest w stanie nieaktywnym. Co pewien okres czasu następuje wymiana węzłów zajmujących się komunikacją.

Reprezentantem klasy algorytmów geograficznych zakładających grupowanie węzłów i podział sieci na podsieci jest opracowany przez Y. Xu, J. Heidemann i D. Estrin oraz opisany w pracy [20] algorytm GAF (*Geographic Adaptive Fidelity*). GAF może być stosowany w sieciach zbudowanych z urządzeń wyposażonych w nadajniki radiowe o identycznym zasięgu nadawania. Docelowo był projektowany dla sieci urządzeń mobilnych, ale z powodzeniem można go wykorzystywać w bezprzewodowych sieciach sensorów. Autorzy GAF zaproponowali własny algorytm grupowania. Działanie algorytmu rozpoczyna się od pokrycia obszaru działania sieci wirtualną siatką jednakowych komórek, podzielenia urządzeń na grupy i przydzielenia grup do odpowiednich komórek. Podobnie jak w przypadku algorytmu ASCENT podstawowym zadaniem GAF jest przełączenie interfejsów

radiowych wybranych węzłów w stany niskoenergetyczne. Autorzy przyjmują, że każdy węzeł może w danej chwili działać w jednym z trzech trybów: aktywny (ang. *active*), wykrywanie (ang. *discovery*) i uśpiony (ang. *sleep*). Stan uśpionia, podobnie jak w ASCENT oznacza okresowe wyłączenie modułu radiowego, a więc jest to tryb SLEEP VR on. Stan aktywny obejmuje zarówno nadawanie TRANSMIT, jak i odbieranie RECEIVE). Wykrywanie jest traktowane jako stan przejściowy, w którym węzły nie przekazują między sobą właściwych danych, ale wymieniają się co pewien okres czasu komunikatami (ang. *discovery messages*) informującymi o aktualnym stanie baterii. Działanie algorytmu jest następujące. Węzeł kolejno jest przełączany ze stanu wykrywania w stan aktywny lub uśpionie aby ponownie, po upływie pewnego czasu, przejść w tryb wykrywania. Operacje te są powtarzane, aż do momentu wylądowania baterii węzła. Implementację i testy algorytmu GAF w laboratorium prezentuje praca [12].

W algorytmach ASCENT i GAF kryterium wyboru węzłów formujących szkielet sieci było zagwarantowanie pełnej łączności. W algorytmie Span uwzględnia się dodatkowe kryterium jakim jest konieczność zapewnienie odpowiedniej pojemności łącz. W wyniku usypiania części węzłów ogranicza się liczby ścieżek do stacji bazowej co może skutkować wystąpieniem przeciążeń w sieci. Koncepcja SPAN opracowanego przez B. Chen i in. [6] polega, podobnie jak w ASCENT i GAF na wyodrębnieniu z grupy urządzeń tworzących bezprzewodową sieć sensorową węzłów specjalnych, nazywanych tu koordynatorami, odpowiedzialnych za transmisję w sieci. Lista koordynatorów jest stale aktualizowana na podstawie lokalnych informacji zbieranych na podstawie wymiany komunikatów z otoczeniem (podobnie jak w ASCENT). Przyjmuje się, że węzły pełniące funkcję koordynatorów są w stanie aktywnym, tj. nasłuchują komunikatów, odbierają je lub nadają. Pozostałe węzły są w tym czasie przełączone w stan niskoenergetyczny. Co pewien okres czasu węzeł musi się uaktywnić na krótką chwilę, w której rozgłosi komunikat HELLO0 informujący o topologii sąsiedztwa i odbierze podobne komunikaty od sąsiadów. Taka wiadomość zawiera informację o aktualnym stanie węzła, listę sąsiadów i dostępnych koordynatorów. Następnie węzeł ponownie się dezaktywuje. Koordynatorzy mogą buforować komunikaty przeznaczone dla sąsiednich węzłów, które są w stanie uśpionia. Co pewien okres czasu odbywa się wymiana koordynatorów.

Nieco inną koncepcję oszczędzania energii w sieciach WSN realizuje algorytm SPIN (*Sensor Protocol for Information via Negotiation*), [10]. SPIN to algorytm routingu uwzględniający w swoim działaniu zasoby energetyczne węzłów sieci. Zakłada się, że węzły przed wysłaniem danych sprawdzają rzeczywiste zapotrzebowanie na dane. Przesyłany jest komunikat zawierający informacje o danych, tzw. metadane. Węzeł zainteresowany danymi zgłasza na nie zapotrzebowanie odpowiadając na komunikat z metadanymi. Wysyłanie mniejszych rozmiarem metadanych jest mniej kosztowne niż transmisja redundantnych pakietów, co pozwala zmniejszyć zużycie energii w sieci w stosunku do klasycznych technik zalewania i plotkowania.

LEACH (*Low Energy Clustering Hierarchy*) [7], podobnie jak GAF, bazuje na grupowaniu węzłów. Wykorzystuje siłę odbieranego sygnału do przypisania węzłów do klastrów, zakłada przy tym, że węzły główne mają bezpośrednią łączność z stacją bazową. Procedura grupowania sprowadza się do rozsyłania z określonym prawdopodobieństwem komunikatu świadczącego, że węzeł zdecydował się zostać węzłem głównym. Węzły, które nie rozsyłały takiego komunikatu przystępują do klastra zorganizowanego wokół węzła głównego o największej sile odbieranego sygnału. Dla wyrównania obciążenia okresowo

wykonywana jest rotacja węzłów głównych. Algorytm zakłada, że stacja bazowa znajduje się w zasięgu każdego nadającego węzła pomiarowego. Założenie to ogranicza jego zastosowanie w rozległych sieciach pomiarowych. Powstało szereg modyfikacji tego algorytmu rozszerzających jego zastosowanie. Szczególną uwagę zwrócono na umożliwienie realizacji transmisji do stacji bazowej z uwzględnieniem wielu skoków. Taka autorska modyfikacja jest proponowana w referacie konferencyjnym stanowiącym załącznik do niniejszego raportu. Jest to propozycja energooszczędnego algorytmu rutingu w bezprzewodowych sieciach pomiarowych powstała na bazie połączenia algorytmu AC LEACH i protokołu rutingu AODV.

# Bibliografia

- [1] A.A. Abbasi and M. Younis. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications Archive*, 30(14-15):2826–2841, 2007.
- [2] I.F. Akyildiz and M.C. Vuran. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 2010.
- [3] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 7:537–568, 2009.
- [4] S. A. Borbash and E. H. Jennings. Distributed topology control algorithm for multihop wireless networks. In *Proc. World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2002)*, pages 355–360, 2002.
- [5] A. Cerpa and D. Estrin. Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(3):272–285, 2004.
- [6] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *ACM Wireless Networks*, 8(5):481–494, 2002.
- [7] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. In *Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 1–10, 2000.
- [8] M. Ilyas and I. Mahgoub. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. CRC Press LLC, USA, 2005.
- [9] M. Kubisch, H. Karl, A. Wolisz, L. C. Zhong, and J. M. Rabaey. Algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In *IEEE WCNC*, 2003.
- [10] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 8:169–185, 2002.
- [11] N. Li, J. Hou, and L. Sha. Design and analysis of an mst-based topology control algorithm. In *Proc. of 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003)*, pages 1702–1712, San Francisco, CA, 2003. IEEE Computer Society.
- [12] E. Niewiadomska-Szynkiewicz, F. Nabrdalik, and M. Marks. Testbed implementation of energy aware wireless sensor network. In *Proc. of the Military Communications and Information Systems Conference (MCC 2012)*, pages 1–10, 2012.

- [13] T.S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition, 2001.
- [14] V. Rodoplu and T. Meng. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal Selected Areas on Mobile Computingg*, 17(8):1333–1344, 1999.
- [15] P. Santi. *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 2006.
- [16] M.I. Shukur, L.S. Chyan, and V.V. Yap. Wireless sensor networks: delay guarantee and energy efficient mac protocols. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 50:1061–1065, 2009.
- [17] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y. Wang. Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks. In *Proc. of IEEE Infocom 01*, pages 1388–1397, 2001.
- [18] R. Wattenhofer and A. Zollinger. Xtc: A practical topology control algorithm for ad-hoc networks. In *Proc. of the 4th Inter. Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN)*, 2003.
- [19] J. Wojciechowski and K. Pieńkosz. *Grafy i sieci*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.
- [20] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proc. of the 7th Annual Inter. Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*, pages 70–84, New York, USA, 2001. ACM.