

## BEZPRZEWODOWE I MOBILNE SIECI SENSORYCZNE – STAN WIEDZY

PAWEŁ PIOTR CZAPSKI  
Instytut Lotnictwa

### Streszczenie

*Bezprzewodowe sieci sensoryczne (BSS, ang. WSN) są coraz częściej stosowane do obserwowania czynników środowiskowych (zastosowania militarne i cywilne). Dzięki postępowi technologicznemu możliwe jest obecnie wytwarzanie węzłów o wymiarach rzędu centymetrów i w cenie poniżej kilku USD za sztukę. Pozwala to na stosowanie węzłów sensorycznych na niespotykaną dotąd skalę i otwiera nowe możliwości dla tzw. wszechobecnej komputeryzacji życia (ang. pervasive/ubiquitous computing). Początkowo, sieci sensoryczne były rozwiązaniami przewodowymi. Rozwój technik bezprzewodowych i przetwarzania danych (procesory, algorytmy, etc.) pozwolił na objęcie przez węzły sensoryczne większego terenu badań. Kolejnym krokiem było zmotoryzowanie bezprzewodowych sieci sensorycznych poprzez montaż węzłów na poruszających się pojazdach, co pozwoliło na jeszcze większą rozdzielczość obrazowania przy praktycznie takich samych nakładach finansowych. Artykuł ten jest wprowadzeniem w obszar bezprzewodowych i mobilnych sieci sensorycznych.*

### I. WSTĘP

Urządzenia sensoryczne stosowane są do obserwowania zjawisk zachodzących na interesującym nas terenie badań (zastosowanie militarne np. pole walki, i cywilne np. śledzenie zmiany czynników środowiskowych takich jak poziom zanieczyszczeń, etc.), [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Obserwacja zachodzi nie na pojedynczym węźle a z pomocą sieci węzłów (obserwacja rozproszona), gdzie poszczególne węzły tworzą tzw. sieć ad-hoc, [1], [2]. Obserwacja zachodzi na zasadzie wysyłania zapytania do sieci lub też spontanicznego (okresowego, lub przez wyzolenie zdarzeniem) wysyłania odczytów poszczególnych węzłów do obserwatora (ang. sink).

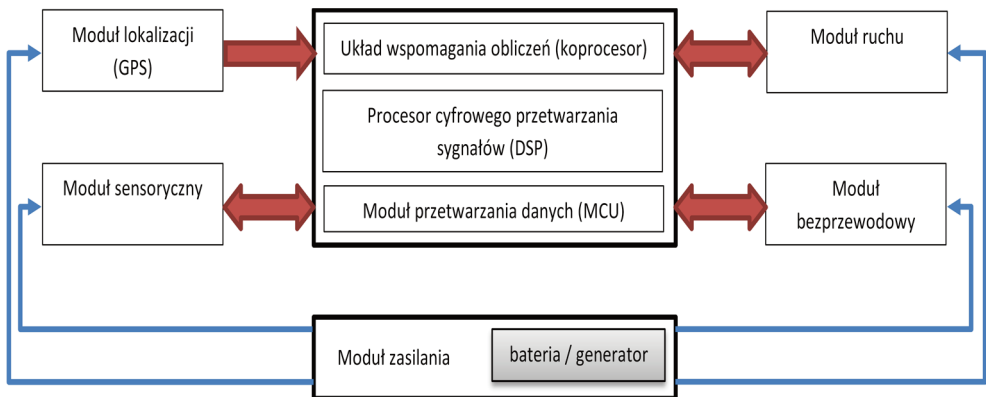
Wraz z rozwojem technologii możliwym jest budowanie urządzeń sensorycznych o małych rozmiarach, w dużych ilościach i przy małych nakładach finansowych, [1], [2]. Ogólnoświatowym trendem jest dążenie do zbudowania urządzenia sensorycznego rzędu milimetrów przy kosztach rzędu poniżej 1USD za sztukę. Umożliwi to stosowanie węzłów sensorycznych na nieporównywalną dotąd skalę, zwiększając precyzję (rozproszonych) odczytów, a tym samym przybliżając zdalną obserwację do rzeczywistości.

W drugim punkcie przedstawiono podstawowe pojęcia związane z bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi (BSS, ang. Wireless Sensor Network (WSN)), tj. budowa węzła i funkcjonowanie sieci, czynniki odgrywające istotną rolę w procesie projektowania bezprzewodowej sieci sensorycznej (budowa węzła i stos komunikacyjny). Przedstawiono również ogólną budowę stosu komunikacyjnego sieci sensorycznych. W kolejnym trzecim rozdziale przedstawiono zasadnicze różnice pomiędzy stacjonarnymi a mobilnymi bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi i omówiono na paru przykładach podstawowe typy mobilnych sieci. Artykuł jest podsumowany w ostatnim czwartym rozdziale.

## II. BEZPRZEWODOWE SIECI SENSORYZCZNE

### A. Budowa węzła i funkcjonowanie sieci sensorycznej

Typowy bezprzewodowy węzeł sensoryczny stosowany w bezprzewodowych sieciach sensorycznych zbudowany jest z: modułu bezprzewodowego (odpowiedzialnego za komunikację z innymi elementami sieci), modułu przetwarzania danych (zazwyczaj jest nim mikrokontroler (ang. MCU)) i procesora cyfrowego przetwarzania sygnałów (ang. DSP), układu wspomaganie obliczeń (np. układ programowalny (ang. FPGA)), modułu zasilania (stabilizatory, układy pozyskiwania energii z otoczenia), modułu sensorycznego (w którego skład wchodzi sensor lub zestaw sensorów, np.: akustyczne, optyczne, magnetometry, akceleratory, chemiczne, itp.) oraz z modułu lokalizacji węzła (np. GPS), a nawet z modułu ruchu (przemieszczanie węzła sensorycznego), rys. 1 [1], [2].

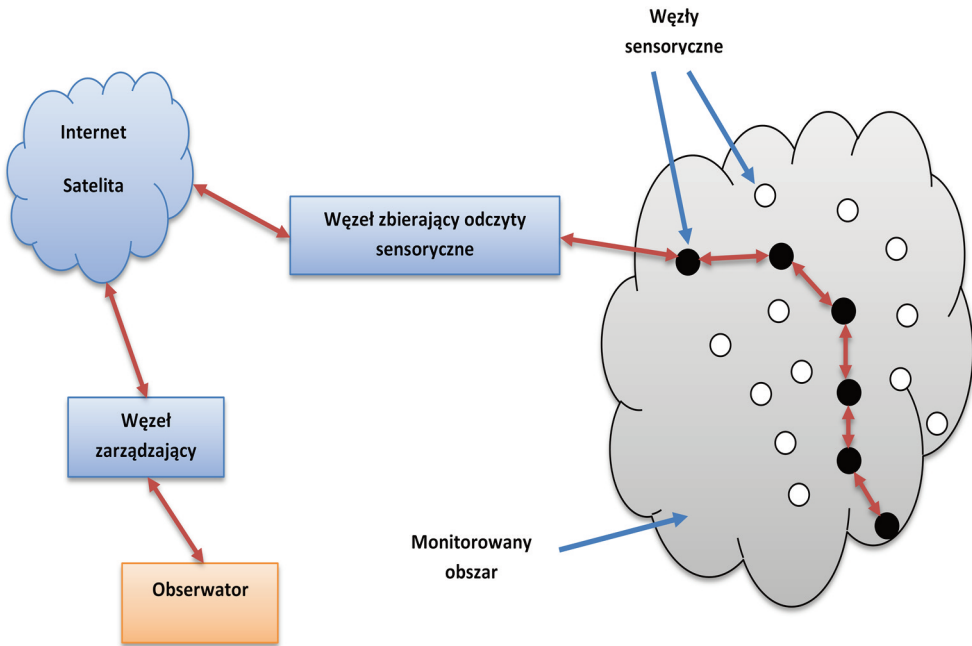


**Rys. 1. Budowa funkcjonalna węzła sensorycznego**

Węzły sensoryczne wykorzystywane są do obserwowania zjawisk zachodzących na terenie badań (pole walki dla zastosowań militarnych, śledzenie zmian czynników środowiskowych np. poziomu składowych zanieczyszczenia powietrza dla cywilnych), [1]-[6]. Obserwacja ma miejsce nie na pojedynczym węźle, ale zachodzi za pomocą sieci węzłów (obserwacja rozproszona), gdzie poszczególne węzły tworzą tzw. sieć ad-hoc [1], [2]. Obserwacja realizowana jest poprzez wysyłanie zapytania do sieci lub też spontaniczne (okresowe lub wyzwalane zdarzeniem) wysyłanie odczytów poszczególnych węzłów do obserwatora (ang. sink).

Węzły sensoryczne są zazwyczaj rozmieszczone na obserwowanym terenie w sposób losowy, rys. 2 [7]. Każdy z bezprzewodowych sensorów posiada możliwość zbierania danych sensorycznych i przekazywania danych do obserwatora. W przypadku dużych sieci, np. podzielonych na podsieci, obserwatorem może być węzeł zarządzający przepływem danych w danym fragmencie sieci. W takich rozległych sieciach węzły zarządzające wymieniają między sobą zebrane

dane i przekazują je do końcowego obserwatora. Obserwator może komunikować się z węzłem zarządzającym całą siecią za pośrednictwem internetu lub łączy satelitarnych.



Rys. 2. Schemat wymiany danych w bezprzewodowej sieci sensorycznej [7]

## B. Czynniki wpływające na proces projektowania sieci sensorycznej

Bezpośrednio na budowę węzła, sieci sensorycznej i komunikowanie się węzłów (stos komunikacyjny) mają wpływ takie czynniki jak: tolerancja sieci na nieprawidłowe funkcjonowanie węzłów, skalowalność sieci, koszt wyprodukowania węzła, ograniczenia sprzętowe, topologia sieci sensorycznej, środowisko pracy, medium łączności i zapotrzebowania energetyczne węzłów [7].

**Tolerancja sieci na nieprawidłowe funkcjonowanie węzłów.** Węzły sensoryczne mogą przestać prawidłowo funkcjonować lub wyłączyć się na skutek wyczerpania baterii, fizycznego uszkodzenia lub zakłóceń radiowych. Nieprawidłowa praca węzła nie powinna mieć wpływu na funkcjonowanie całej sieci sensorycznej.

**Skalowalność.** Ilość węzłów sensorycznych rozmieszczonych na badanym terenie może sięgać tysięcy, a w ekstremalnych przypadkach przekraczać nawet milion. Natomiast gęstość, z jaką rozmieszczone są węzły, jest rzędu paru do paruset sztuk na obszarze o promieniu 10 m lub mniejszym. Zadaniem inżynierów jest takie zaprojektowanie sieci, by mogła sprostać dużej i zmiennej ilości węzłów.

**Koszt wyprodukowania węzła.** Z uwagi na fakt, że sieć sensoryczna zbudowana jest z dużej ilości węzłów, koszt pojedynczego elementu sieci musi być na tyle niski, by monitorowanie badanego terenu z wykorzystaniem bezprzewodowej sieci sensorycznej było finansowo uzasadnione.

**Ograniczenia sprzętowe.** W przypadku większości sieci sensorycznych wszystkie moduły, z których zbudowany jest węzeł sensoryczny, muszą zmieścić się w małej obudowie [8], czasem nawet o rozmiarach mniejszych niż  $1 \text{ cm}^3$  [9]. Ponadto węzeł sensoryczny [10] musi zużywać małą ilość energii, pozwalać na funkcjonowanie w sieciach o dużej ilości węzłów, być tani w produkcji, być autonomicznym urządzeniem i móc adaptować się do zmieniających się warunków pracy.

**Topologia sieci sensorycznej.** Gęstość rozmieszczenia węzłów sensorycznych może osiągać wartości rzędu 20 węzłów na  $\text{m}^3$  [11], węzły mogą być rozmieszczone stacjonarnie lub stanowić mobilną sieć sensoryczną [12]. Dlatego też w zarządzaniu siecią sensoryczną istotna jest wiedza o rozmieszczeniu węzłów. Rozróżnia się trzy etapy zmian topologii sieci, tj. wstępne rozmieszczenie węzłów, topologia po rozmieszczeniu węzłów, ponowna zmiana topologii. Pierwszy etap zmian topologii dotyczy sposobu, w jaki węzły sensoryczne są rozmieszczone. Węzły mogą być rozmieszczane jeden po drugim lub masowo (zrzucone ze statku powietrznego, wystrzelone z działa, umieszczone za pomocą pocisku lub rakiety, etc.). Po rozmieszczeniu zmiany topologii sieci mogą następować na skutek nieprawidłowości w funkcjonowaniu węzłów, zakłóceń komunikacji, wyczerpania baterii lub mogą wynikać z zadań, jakie sieć wykonuje (przemieszczające się węzły). Ostatecznie topologia sieci może zostać zmieniona (przywrócona), poprzez wymianę nieprawidłowo funkcjonujących węzłów lub zadania, jakie węzły wykonują (sieci mobilne).

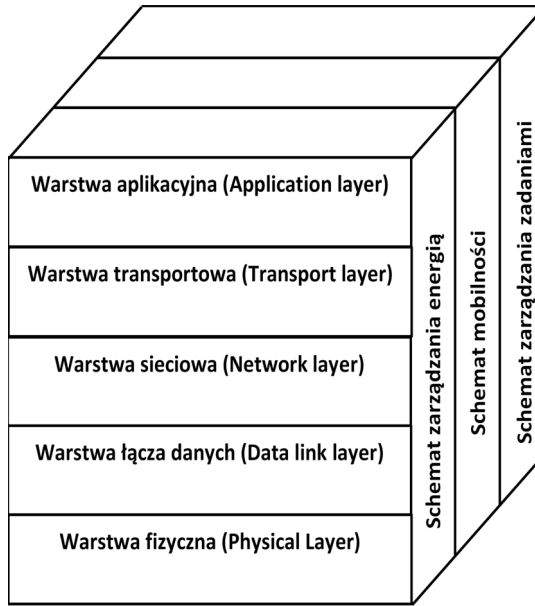
**Środowisko pracy.** Węzły sensoryczne są zazwyczaj gęsto rozmieszczone. Mogą znajdować się blisko obserwowanego zjawiska lub być umiejscowione wewnątrz zachodzącego zjawiska. Sensory mogą monitorować zachodzące zjawiska wewnątrz urządzeń, na dnie oceanów, na skażonym chemicznie lub biologicznie terenie, lub być wykorzystane do obserwowania pola walki.

**Medium łączności.** Węzły sensoryczne komunikują się między sobą w sposób bezprzewodowy. Wykorzystywane są do tego techniki łączności radiowej lub optycznej (np. podczerwień). Istotną wadą wykorzystywanych technik optycznych jest wymóg bezpośredniej widoczności komunikujących się ze sobą węzłów. Wszędzie tam, gdzie najważniejszy jest zasięg, stosowanym standardem łączności bezprzewodowej jest IEEE 802.11 (WiFi). WiFi nie jest stworzony dla sieci sensorycznych i cały czas jest rozwijany, by sprostać m.in. mobilności. Inne popularne standardy [13]-[23], stworzone od podstaw z myślą o zastosowaniach do sieci sensorycznych, to IEEE 802.15.4, ZigBee (oparty na standardzie IEEE 802.15.4), WirelessHART, ISA100.11, IETF 6LoW-PAN, IEEE 802.15.3, Wibree. Dużą popularnością w aplikacjach sieci sensorycznych cieszy się nielicencjonowane pasmo ISM (ang. Industrial, Scientific, Medical), często wykorzystywane przez niektóre z ww. standardów.

**Zapotrzebowanie energetyczne.** Bezprzewodowe węzły sensoryczne, z uwagi na swoje rozmiary, wyposażane są zazwyczaj w baterie o pojemności mniejszej niż 0.5Ah i napięciu 1.2V. W wielu przypadkach wymiana baterii nie jest możliwa. W wieloskokowej (ang. multihop) łączności bezprzewodowej ad-hoc każdy z węzłów pełni podwójną rolę, tj. generuje dane (odczyty sensoryczne) i jest ruterem danych. Nieprawidłowe funkcjonowanie węzła może spowodować istotne zmiany w topologii sieci i potrzebę reorganizacji trasowania danych. Z tego też powodu projektowanie sieci sensorycznych wymaga stosowania technik oszczędzania i zarządzania energią na poziomie węzła i całej sieci, tj. energooszczędne protokoły wymiany danych i energooszczędne algorytmy przetwarzania danych. Dlatego też żywotność węzła, i w efekcie całej sieci sensorycznej, uzależniona jest w dużej mierze od żywotności baterii.

### C. Stos komunikacyjny

Budowa stosu komunikacyjnego wykorzystywanego przez węzły podrzędne i nadrzędne (obserwatora) w bezprzewodowych sieciach sensorycznych przedstawiona jest na rys. 3, [7].



Rys. 3. Ogólna budowa stosu komunikacyjnego [7]

Stos komunikacyjny zbudowany jest z warstwy fizycznej (ang. physical layer), warstwy łączy danych (ang. data link layer), warstwy sieciowej (ang. network layer), warstwy transportowej (ang. transport layer) i warstwy aplikacyjnej (ang. application layer). W skład stosu wchodzi również schematy zarządzania energią, mobilnością oraz zarządzania zadaniami, które wspomagają koordynowanie zadań wydawanych sieci i jej funkcjonowanie w sposób energooszczędny i wydajny.

#### 1. Warstwy stosu komunikacyjnego

Warstwa fizyczna odpowiedzialna jest za odpowiednie techniki modulowania, nadawania i odbierania danych przez medium radiowe. Duża liczba innych węzłów oraz mobilność węzłów przyczyniają się do zakłóceń w medium. Zadaniem warstwy łączy danych (protokoły MAC) jest zarządzanie medium w sposób energooszczędny i zapobieganie kolizjom transmisji danych z węzłów sensorycznych. Warstwa sieciowa zajmuje się trasowaniem danych dostarczanych przez warstwę transportową pomiędzy węzłami. Natomiast warstwa transportowa wspomaga przepływ danych w odpowiedzi na zapytania z aplikacji sieci sensorycznej. W zależności od docelowego zastosowania sieci sensorycznej, różnego rodzaju oprogramowanie jest uruchamiane na warstwie aplikacyjnej.

**Warstwa fizyczna.** Do zadań warstwy fizycznej należy wybór odpowiednich częstotliwości pracy radia, generowanie fali nośnej, detekcja sygnału, modulowanie fali nośnej i kodowanie danych. Najczęściej wykorzystywanym pasmem radiowym w aplikacjach sieci sensorycznych jest pasmo ISM.

Warstwa fizyczna jest jednym ze słabo zbadanych obszarów sieci sensorycznych. Otwartymi tematami nadal pozostają zagadnienia obejmujące energooszczędne odbiorniki/nadajniki (ang. transceiver) po schematy modulacji zaprojektowane specjalnie dla sieci sensorycznych, tj.:

- nowe rodzaje modulacji: proste i energetycznie wydajne,
- sposoby zapobiegania efektom propagacji fal radiowych,
- nowe konstrukcje urządzeń: małe, energooszczędne i tanie transceiver'y oraz czujniki.

**Warstwa łącza danych (protokoły MAC).** Warstwa ta jest odpowiedzialna za multipleksowanie strumieni danych, wykrywanie ramek danych, dostęp do medium i kontrole błędów oraz zapewnianie łączności punkt-punkt (ang. point-to-point) i punkt-wiele punktów (ang. point-to-multipoint).

Jednym z zadań protokołu MAC jest stworzenie infrastruktury sieci sensorycznej. Na terenie objętym monitorowaniem znajdują się tysiące węzłów, a protokół MAC musi umożliwić komunikowanie danych. Pozwala to na stworzenie podstawowej infrastruktury dla wieloskokowej bezprzewodowej łączności i umożliwia sieci samoorganizowanie się. Drugim zadaniem tego protokołu jest ułatwienie racjonalnego wykorzystywania zasobów radiowych pomiędzy węzłami sensorycznymi.

**Tab. 1. Wybrane protokoły MAC dla BSS [7]**

Nazwa protokołu MAC	Tryb dostępu do kanału	Specyfika sieci sensorycznej	Tryb oszczędzania energii
SMACS, EAR	Niezmienna szczelina czasowa na stałej częstotliwości	Nieproporcjonalne wykorzystanie pasma radiowego w stosunku do wymienianych danych	Losowe włączanie radia, wyłączenie radia podczas bezczynności
Hybrydy TDMA/FDMA	Wykorzystanie technik TDMA i FDMA do dostępu do medium	Zoptymalizowana ilość kanałów dla zminimalizowania zużycia energii	Sprzętowa minimalizacja wykorzystywanych zasobów energetycznych
Bazowane na CSMA	Losowy dostęp do medium bazujący na CSMA	Przesunięcie czasowe uruchomionych w sieci aplikacji i wstępna transmisja	Stały czas nasłuchiwania medium w celu racjonalnego wykorzystywania zasobów energetycznych

Pomimo wielu protokołów zaprojektowanych specjalnie z myślą o sieciach sensorycznych (SMACS i EAR, Hybrydy TDMA/FDMA, protokoły MAC bazujące na CSMA) tab. 1 [24]-[26], wciąż otwarte są obszary badań, tj.:

- protokoły MAC dla mobilnych sieci sensorycznych,
- określenie minimalnych wartości zapotrzebowań energetycznych na samoorganizowanie się sieci sensorycznej,
- algorytmy korekcji błędów,
- tryby energooszczędnej pracy węzłów (szczególnie ważne dla żywotności całej sieci).

**Warstwa sieciowa.** W bezprzewodowych sieciach sensorycznych stosowane są wieloskokowe protokoły rutowania do komunikowania danych. Techniki rutowania stosowane w standardowych sieciach bezprzewodowych zazwyczaj nie spełniają wymagań stawianych przez sieci sensoryczne takich, jak:

- energooszczędne rutowanie,
- zorientowanie na dane (rutowanie danowo-scentralizowane),
- atrybutowe adresowanie sieci i zdolności lokalizacyjne,
- agregowanie danych tylko wtedy, gdy nie utrudnia to wykonywania innych operacji.

Energooszczędne rutowanie realizowane jest zazwyczaj poprzez wymianę danych przez węzły o największych zasobach energetycznych lub na podstawie potrzebnej energii do wymiany danych. Wybór odpowiedniej ścieżki rutowania danych odbywa się w oparciu o jeden z czterech podstawowych schematów, tj. ścieżka o największych zasobach mocy (ang. Maximum PA route), ścieżka wykorzystująca minimum energii do przesłania danych (ang. Minimum energy (ME) route), ścieżka o najmniejszej liczbie wieloskoków pomiędzy węzłem a obserwatorem (ang. Minimum hop (MH) route), ścieżka o większych zasobach mocy niż ścieżka z najmniejszymi zasobami mocy (ang. Maximum minimum PA route).

Rutowanie w sieciach oparte jest zazwyczaj na koncepcji danowo-scentralizowanej. Ten sposób rutowania zrealizowany jest dwuetapowo, tj. obserwator wysyła zapytania, węzły wysyłają informacje o posiadanych danych i czekają na ponowne zapytanie o transmisję danych. Rutowanie danowo-scentralizowane wymaga atrybutowego adresowania sieci. Oznacza to, że wysyłane przez obserwatora zapytania kierowane są do węzła lub grupy węzłów posiadających odczyty sensoryczne charakteryzujące się pewnymi wartościami (np. obszar o temperaturze przekraczającej ustaloną wartość).

Agregacja danych pomaga w zapobieganiu implozji i powielaniu się zbieranych, a następnie przekazywanych do obserwatora odczytów sensorycznych.

Pomimo istnienia wielu protokołów rutowania specjalnie zaprojektowanych dla sieci Sensorycznych (tab. 2), nadal brakuje wydajnych algorytmów, zarówno z punktu widzenia energooszczędności, jak i pełnej adaptacyjności do zmieniających się warunków pracy [7], [27].

**Tab. 2. Wybrane protokoły rutowania zaprojektowane dla BSS [7]**

Nazwa protokołu rutowania	Opis działania
SMECN	Tworzy grafy ścieżek o najmniejszym zapotrzebowaniu energetycznym na przekazanie danych
Flooding	Wysyła dane do wszystkich węzłów bez względu na to, czy sąsiadujące węzły odebrały dane wcześniej
Gossiping	Wysyła dane do losowo wybranego sąsiedniego węzła
SPIN	Wysyła dane tylko do tych węzłów, które są zainteresowane konkretną daną. Protokół ustanawiają trzy rodzaje wiadomości (tzn. ADV – reklama, REQ – rządanie i DATA – dane)
SAR	Tworzy wiele drzew-ścieżek, w których podstawa drzewa jest jeden skok od obserwatora. Dane drzewo, do przesłania danych z węzła do obserwatora wybierane jest na podstawie takich wyznaczników jak zasoby energetyczne węzłów na ścieżce i addytywne QoS
LEACH	Tworzy gromady węzłów (ang. cluster) w celu zrównoważonego wykorzystywania energii przez węzły danej gromady
Directed diffusion	Przy rozsyłaniu zapytania tworzy gradienty, dla przepływu danych ze źródła do obserwatora

**Warstwa transportowa.** Istnienie warstwy transportowej jest szczególnie istotne w przypadku gdy sieć sensoryczna ma być dostępna z internetu lub innej sieci zewnętrznej. Z uwagi na specyfikę sieci sensorycznych, a właściwie węzłów sensorycznych (ograniczone zasoby energetyczne, mała pamięć, niewielkie możliwości przetwarzania danych), stosowane w tradycyjnych sieciach bezprzewodowych protokoły TCP/UDP nie nadają się do bezpośredniego wykorzystania. Ponadto, komunikacja punkt-punkt w sieciach sensorycznych nie jest oparta na globalnym adresowaniu. Jednym z proponowanych rozwiązań jest fragmentacja protokołu TCP. Protokół ten obsługiwałby łączność pomiędzy siecią zewnętrzną a obserwatorem, natomiast wymiana danych na drodze obserwator – sieć sensoryczna miałaby miejsce za pomocą specjalnie zaprojektowanego do tego celu protokołu. W ten sposób łączność pomiędzy



użytkownikiem a obserwatorem mogłaby być zrealizowana za pośrednictwem protokołu UDP lub TCP przez łącza internetowe lub satelitarne, natomiast komunikacja pomiędzy obserwatorem a węzłami (z uwagi na ich ograniczoną pamięć) bazowałaby na niezmodyfikowanym UDP.

Ograniczone zasoby węzłów sensorycznych, adresowanie atrybutowe, racjonalne gospodarowanie zasobami energetycznymi, skalowalność i czynniki takie, jak rutowanie danowocentralizowane to nadal otwarte obszary badań nad zoptymalizowanymi protokołami dla warstwy transportowej.

**Warstwa aplikacyjna.** Z uwagi na złożoność procesów decyzyjnych podejmowanych przez sieć sensoryczną w trakcie monitorowania obszaru badań, a także z uwagi na różnorodność sprzętową stosowanych urządzeń, warstwa aplikacyjna pozwala na przezroczystość niższych warstw dla aplikacji zarządzającej siecią. Do znanych protokołów funkcjonujących na tej warstwie stosu komunikacyjnego należą SMP (Sensor Management Protocol), TADAP (Task Assignment and Data Advertisement Protocol), a także SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination Protocol).

SMP pozwala na interakcję użytkownika z poszczególnymi elementami sieci sensorycznej, wykorzystując m.in. mechanizm atrybutowego adresowania węzłów sensorycznych. Mechanizm ten, w sposób przezroczysty dla użytkownika, umożliwia:

- wprowadzanie reguł agregowania danych i zarządzania gromadami,
- wymianę danych dot. lokalizacji poszczególnych węzłów,
- synchronizację węzłów,
- przemieszczanie węzłów,
- zdalne wyłączenie i włączenie radia,
- pobieranie aktualnej konfiguracji węzła i zdalną rekonfigurację,
- podejmowanie działań związanych z bezpieczeństwem danych (autentyfikacja, dystrybucja kluczy).

Protokół TADAP wspiera propagację zapytań w sieciach sensorycznych. Użytkownik z poziomu aplikacji wysyła zapytania do sieci lub jej części o konkretne atrybuty (np. poziom składowej zanieczyszczenia powietrza) obserwowanego zjawiska, lub zgłasza zadanie wyzwalające podjęcie akcji przez sieć lub jej część. W odpowiedzi użytkownik dostaje informacje o węzłach, które znajdują się w zasięgu konkretnego atrybutu obserwowanego zjawiska, a następnie wysyła żądanie dostarczenia odczytów sensorycznych z tych węzłów. Konstrukcja protokołu TADAP pozwala na dostarczanie informacji o obserwowanym zjawisku charakteryzującym się konkretnymi wartościami odczytów sensorycznych w sposób przezroczysty dla użytkownika. Protokół ten wykorzystuje do wymiany danych niższe warstwy stosu komunikacyjnego, m.in. do trasowania informacji.

Protokół warstwy aplikacyjnej SQDDP pozwala na obsługę zapytań i odpowiedzi w sieci sensorycznej bazując na atrybutowym i regionowym (ang. location-based) adresowaniu. SQDDP w porównaniu z TADAP oferuje większy zestaw (bazujący na Sensor Query and Tasking Language – SQTL) obsługiwanych rodzajów zapytań, tj. receive (zdarzenia zarejestrowane przez węzeł w momencie otrzymania zapytania), every (zdarzenia rejestrowane w określonych odstępach czasowych), expire (wszystkie zdarzenia rejestrowane po upływie określonego czasu). Ponadto w momencie, gdy węzeł otrzyma zapytanie, a wraz z nim skrypt, to jest on wykonywany. Cechą wyróżniającą ten protokół jest możliwość przystosowania go do sieci sensorycznych o zupełnie odmiennych zastosowaniach.

Pomimo rosnącej popularności bezprzewodowych sieci sensorycznych, warstwa aplikacyjna jest jedną z najmniej rozwiniętych. Protokół SQTL oferuje szerokie spektrum możliwości,

przy czym przyszłe badania powinny skupić się na zwiększeniu obsługiwanych przez niego serwisów. SMP pozwala na administrowanie węzłami sensorycznymi (przemieszczanie i synchronizacja węzłów). Otwartym obszarem badań są również protokoły TADAP i SQDDP, które również powinny zostać wzbogacone o obsługę nowych serwisów.

## 2. Schematy zarządzania zasobami sieci

Istnienie tych schematów jest niezbędne do efektywności energetycznej całej sieci, transporta danych w sieciach o zmieniającej się topologii (także sieci mobilne) i współdzielenia zasobów (energetycznych i przetwarzania) potrzebnych do wykonywania powierzonych im zadań. Funkcjonowanie schematów polega na podejmowaniu pewnych działań na każdej z warstw stosu komunikacyjnego.

**Schemat zarządzania energią.** Do zadań tego schematu należy zarządzanie energią wykorzystywaną przez węzeł sensoryczny. Przykładem może być wyłączenie przez węzeł radia po odebraniu danych z innego węzła. Zapobiega to m.in. odbieraniu tych samych danych z różnych węzłów. Schemat zarządzania energią pozwala również na informowanie innych węzłów, że zasoby energetyczne danego węzła są na wyczerpaniu i nie będzie brał udziału w przekazywaniu danych (rutowaniu), a jedynie w zbieraniu danych sensorycznych.

**Schemat mobilności.** Schemat ten wykrywa i rejestruje zmianę pozycji węzłów. Dzięki funkcjonowaniu schematu mobilności znana jest zawsze trasa od węzła do obserwatora. Pozwala to na racjonalne wykorzystywanie zasobów energetycznych innych węzłów, a także zachowywanie reżimów czasowych nakładanych na przekazywane dane.

**Schemat zarządzania zadaniami.** Głównym przeznaczeniem tego schematu jest zarządzanie zadaniami powierzonymi poszczególnym węzłom. Nie wszystkie węzły na danym obszarze muszą podejmować zadania rejestrowania danych sensorycznych w tym samym czasie. Schemat ten pozwala na racjonalne wykorzystywanie zasobów energetycznych i mocy obliczeniowej węzłów na danym obszarze poprzez przydzielanie większej ilości zadań tym węzłom, które dysponują większymi rezerwami energetycznymi.

## III. MOBILNE BEZPRZEWODOWE SIECI SENSORYCZNE

Główną różnicą pomiędzy mobilnymi a stacjonarnymi bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi (mBSS) jest mobilność (niektórych bądź wszystkich) węzłów i obserwatora [28]. W porównaniu do standardowych sieci sensorycznych mobilność przede wszystkim wydłuża czas życia całej sieci i pozwala na lepsze spełnianie reżimów czasowych nakładanych na wykonywane przez nią operacje. Budowa sieci mobilnych niewiele odbiega od stacjonarnych, a zasadnicze różnice to:

- Z uwagi na mobilność elementów sieci (węzły, obserwatorzy, etc.) mBSS charakteryzuje się większą dynamiką topologii. Zazwyczaj zakłada się mobilność obserwatora (ang. sink) zachodzącą w sposób losowy. Ruchliwość sieci ma istotny wpływ na wybór parametrów pracy protokołów MAC i warstwy sprzętowej (warstwa fizyczna).
- Przyjmuje się, że obserwatorzy dostępowi (ang. gateway sink) wyposażeni są w niewyczerpywalne źródło zasilania oraz w nieograniczone zasoby przetwarzania i magazynowania danych. Wyczerpane baterie węzłów mobilnych mogą być naładowane lub wymienione na nowe. Natomiast mobilni obserwatorzy mają dostęp do infrastruktury przetwarzającej i magazynującej dane.

- Mobilność elementów sieci nakłada istotne ograniczenia na funkcjonowanie protokołów rutowania i MAC. Dlatego też większość rozwiązań stosowanych w statycznych sieciach sensorycznych nie nadaje się do bezpośredniego zastosowania z uwagi na niską wydajność w przypadku dynamicznych zmian topologii, która ma miejsce w sieciach mobilnych.
- Duża dynamika mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych przyczynia się do niskiej niezawodności radiowych łączy pomiędzy elementami sieci. Najczęściej sytuacja ta ma miejsce w przypadku obserwacji odległych terenów, gdzie ustanowienie łączności przy wymaganym minimalnym QoS (ang. Quality of Service – jakość dostarczanej usługi) jest problematyczne.
- Z uwagi na dużą dynamikę topologii sieci wiedza o pozycji elementów sieci ma istotne znaczenie w mBSS.

Ponadto mobilne sieci sensoryczne pozwalają na bardziej efektywne wykorzystanie zasobów energetycznych. Węzły sensoryczne, które są bliżej obserwatorów dostępowych, z racji swojej odległości i zadań, jakie wykonują (m.in. wymiana odczytów sensorycznych z innymi węzłami), jako pierwsze wyczerpują swoje zasoby energetyczne. Przyczynia się to szybkiej utracie funkcjonalności sieci. Natomiast, mobilne elementy sieci mBSS pozwalają na bardziej efektywne wykorzystywanie zasobów energetycznych z uwagi na zmienną pozycję tego samego węzła w sieci. Mobilne bezprzewodowe sieci sensoryczne charakteryzują się o wiele większą pojemnością kanałów radiowych w porównaniu do rozwiązań stacjonarnych, 3–5 razy według [28] (zakładając liniową zależność pomiędzy ilością węzłów a obserwatorów). Od sieci stacjonarnych wymaga się, aby węzły sensoryczne umieszczane były blisko lub w bezpośrednim sąsiedztwie obserwowanego zjawiska. W przypadku, gdy obserwowane zjawisko przemieszcza się, warunek bliskości węzłów i obserwacji może nie być spełniony. Natomiast mBSS, w których mobilność węzłów pozwala na większą bliskość w stosunku do monitorowanego obiektu, nie mają tego typu ograniczenia. Przemieszczanie węzłów w sieci mobilnej usprawnia również wymianę danych. Jest to szczególnie istotne w sieciach rozproszonych, w których poszczególne fragmenty nie komunikują się między sobą z uwagi na odległość. Mobilność węzłów pozwala w takich sieciach na utrzymanie przepływu danych pomiędzy takimi odizolowanymi fragmentami sieci. Kolejną zaletą mBSS jest jakość dostarczanych przez sieć danych. Wiadomo, że prawdopodobieństwo błędu zwiększa się wraz ze wzrostem ilości wieloskoków (ang. multi-hop), przez które to przesyłana dana musi zostać przekazana. Dzięki przemieszczającym się węzłom ilość tych przejść może zostać zredukowana, co jednocześnie zmniejsza prawdopodobieństwo powstawania błędów, a także redukuje zapotrzebowanie na energię (zmniejszona ilość retransmisji).

### **A. Typy mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych**

Z uwagi na sposób, w jaki zrealizowana jest wymiana danych, rozróżnia się dwa typy mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych. Pierwszym typem jest sieć infrastrukturalna, w której mobilny węzeł łączy się radiowo z najbliższą stacją bazową (stacjonarnym obserwatorem). Jest to rozwiązanie podobne do stosowanego w przypadku telefonii komórkowej. Drugim typem mBSS jest sieć bez infrastruktury potocznie nazywana siecią ad-hoc. Ten typ sieci nie wymaga dedykowanego węzła do rutowania danych, wszystkie węzły (elementy sieci) mogą dowolnie się przemieszczać i jednocześnie posiadać możliwość samoorganizowania się i ustanawiania w sposób arbitralny łączności radiowej.

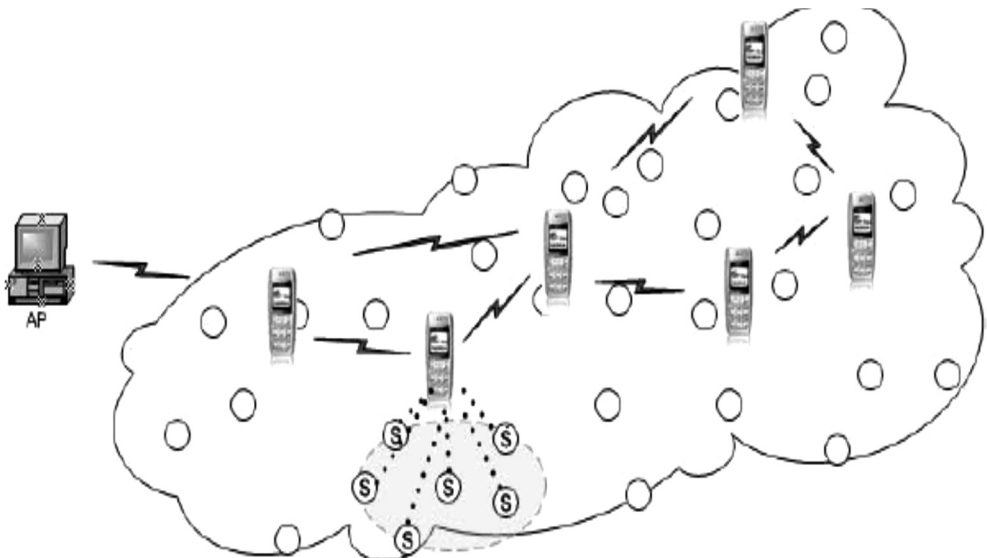
Stacjonarne sieci sensoryczne, rys. 2, wykorzystują płaski model architektury sieci [28]. Odczyty sensoryczne są przekazywane (rutowane) od węzła generującego dane (rejestrującego odczyty sensoryczne) do obserwatora/użytkownika poprzez sieć ad-hoc wieloskokowo, a każdy

z węzłów charakteryzuje się podobnymi schematami wykorzystywania zasobów energetycznych, przekazywania i archiwizowania danych. W przypadku takiej architektury sieci jej przepustowość zmniejsza się asymptotycznie, zgodnie z  $\Theta(1/\sqrt{n})$ , wraz z rosnącą ilością węzłów, a także wzrasta zapotrzebowanie energetyczne. Wiąże się to ze wzrostem wraz z wielkością sieci prawdopodobieństwa utraty przekazywanej danej podczas wieloskokowej komunikacji. Zagubiona lub nieprawidłowo przesłana dana musi być ponownie wysłana. W rezultacie wraz z rozrastaniem się sieci sensorycznej spada jej wydajność. Dynamika zmian topologii mobilnych sieci sensorycznych wymaga lepszego przystosowywania się architektury sieci do zachodzących w niej zmian. Z tego też powodu stosowanie rozwiązań ze stacjonarnych sieci sensorycznych nie pozwala na osiągnięcie w sieciach mobilnych podobnej wydajności energetycznej i reżimów czasowych nałożonych na wymianę danych. Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie hierarchicznej architektury sieci, która polepsza sprawność energetyczną wykonywanych przez sieć operacji i zmniejsza opóźnienia w przesyłaniu danych (szczególnie istotne w przypadku sieci sensorycznych bliskich czasu rzeczywistego) [29].

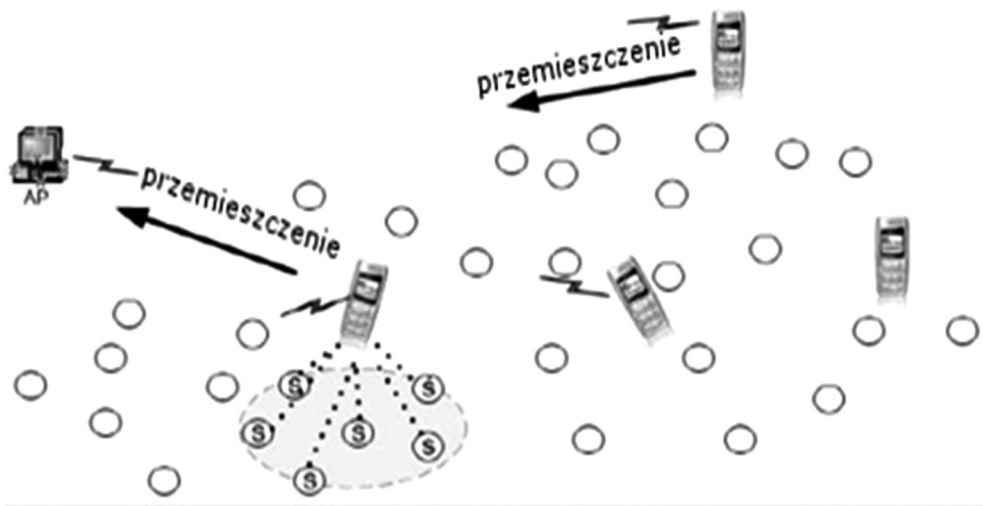
## B. Hierarchiczna architektura mobilnych sieci sensorycznych

1. W [28] przedstawiono dwie koncepcje hierarchicznej architektury dla mobilnych sieci sensorycznych, tj. dwu- i trzypoziomą (ang. two-tiered, three-tiered).

**Sieć dwupoziomowa.** W dwupoziomowej architekturze sieci wyższa warstwa (zwana dalej powłoką lub nakładką dla BSS – ang. overlay) realizowana jest przez węzły mobilne (np.: mobilne węzły sensoryczne lub inne bezprzewodowe przenośne urządzenia o znacznych zasobach energetycznych i możliwościach przetwarzania danych), rys. 4 i 5.



Rys. 4. Dwupoziomowa architektura sieci w konfiguracji ad-hoc [28]



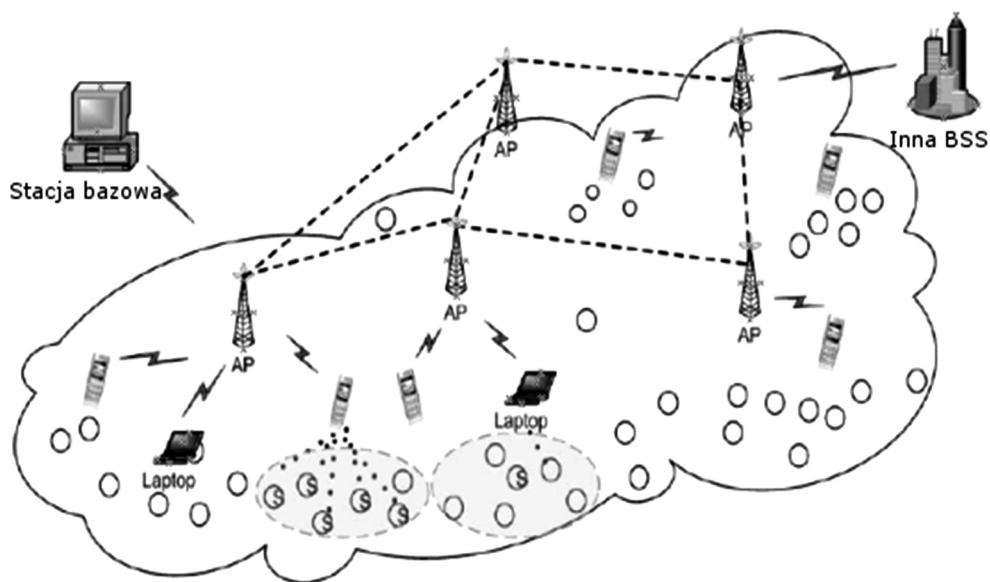
Rys. 5. Dwupoziomowa architektura sieci bez nakładki ad-hoc [28]

Na rysunku 4 przedstawiono dwupoziomową architekturę sieci w przypadku gdy wszystkie elementy mobilne (zwane dalej mobilnymi agentami) sieci mogą samoorganizować się w sieć ad-hoc. Topologia mobilnej nakładki, która jest losowa i tymczasowa, jest zależna od względnej pozycji mobilnych elementów sieci, a do jej istnienia potrzebna jest znaczna liczba węzłów. W sytuacji, gdy nie ma wystarczającej liczby mobilnych węzłów lub są one rozproszone na dużej powierzchni, stosowane jest alternatywne rozwiązanie przedstawione na rysunku 5. Każdy mobilny element sieci rejestruje dane sensoryczne lub pobiera odczyty od najbliższych sąsiadów. Zebrane dane są przekazywane do obserwatora/użytkownika dopiero, gdy ten znajdzie się w ich zasięgu radiowym. Ważność danej, która ma być przekazana użytkownikowi, wpływa na czas potrzebny mobilnemu węzłowi na jej dostarczenie (tj. maksymalne dopuszczalne opóźnienie, które stanowi o ważności danej).

**Sieć trzydziemowa.** Trzydziemowa architektura sieci wykorzystuje właściwości stacjonarnych (bramy dostępne) i mobilnych (mobilni agenci) elementów sieci oraz oparta jest na funkcjonowaniu nakładki ad-hoc i sieci z infrastrukturą. W takiej sieci przepustowość jest opisana zależnością  $\sqrt{r}$ , gdzie  $r < n$  jest liczbą agentów (mobilnych elementów sieci). O ile liczba mobilnych agentów nie zmienia zależności opisującej przepustowość, o tyle pozwala zmniejszyć zapotrzebowanie na bramy dostępne, a tym samym zredukować zużycie energii przez elementy sieci.

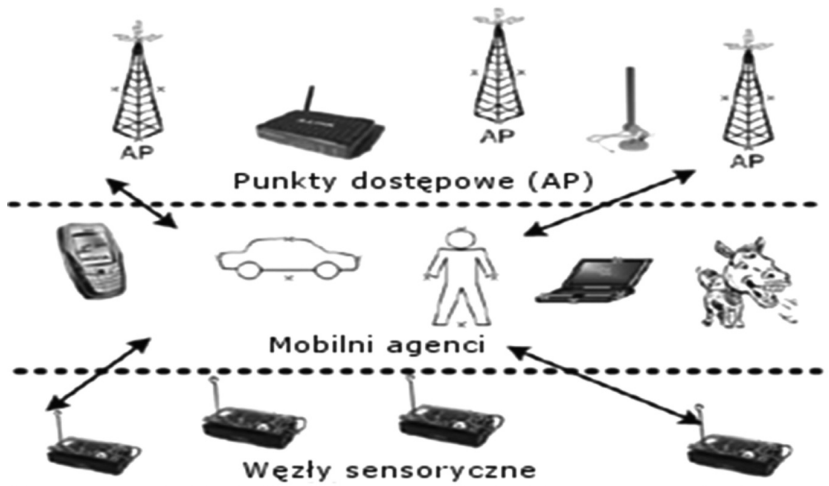
Trzydziemowa architektura sieci pozwala na lepszą energooszczędność w porównaniu z sieciami o płaskiej (ang. flat) architekturze. Mobilni agenci umożliwiają oszczędność ograniczonych zasobów energetycznych węzłów, eliminując ciągłą potrzebę monitorowania łączy radiowych przez sąsiadujące węzły. Jeśli chodzi o rejestrowanie odczytów sensorycznych, to warstwa środkowa takiego trzydziemowego rozwiązania posiada możliwość buforowania (ang. caching) i przekazywania skompresowanych danych do obserwatora/użytkownika (ang. destination). Dlatego też rozwiązanie architektury sieci mBSS z relatywnie małą liczbą elementów sieci wyższego poziomu, ale charakteryzujących się dużymi zasobami energetycznymi i możliwościami przetwarzania danych, a także szybkim dostępem radiowym, w wielu przypadkach może istotnie zwiększyć wydajność całej sieci (tj. przepustowość, niezawodność, żywotność i uniwersalność).

Najniższą warstwę architektury trzypoziomowej stanowią losowo rozmieszczone węzły sensoryczne (zazwyczaj nieruchome – stacjonarne), rys. 6.



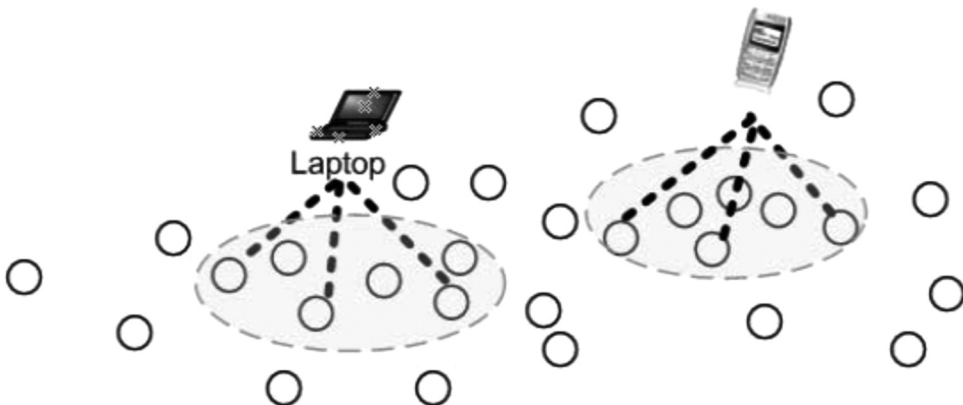
**Rys. 6. Architektura przykładowej trzypoziomowej mobilnej BSS [28]**

Węzły te komunikują się z elementami sieci wyższego poziomu (agenci) znajdującymi się w ich bezpośrednim sąsiedztwie i mogą organizować się w sieć ad-hoc. Charakterystyczną cechą omawianego trzypoziomowego rozwiązania jest mobilność warstwy pośredniej (ang. medium layer). Agenci mogą przemieszczać się dowolnie (losowo), a ich zadaniem jest zbieranie danych (np. odczytów sensorycznych) z niższej warstwy i dostarczanie ich do warstwy najwyższej (ang. upper layer). Najwyższą warstwę stanowi sieć o ustalonej infrastrukturze, zbudowana zazwyczaj z przewodowych lub bezprzewodowych elementów dostępowych (ang. access point) i oparta na strukturze ad-hoc lub Mesh. Węzły dostępne mogą realizować komunikację na bazie IEEE 802.11, telefonii komórkowej lub wykorzystywać inne rozwiązania bezprzewodowe. Najwyższa warstwa może być również wykorzystywana do łączenia wielu lokalnych mobilnych BSS. Mobilnymi agentami mogą być nie tylko węzły sensoryczne, ale również inne bezprzewodowe urządzenia o różnym właściwościach energetycznych i przetwarzania danych przenoszone bądź zainstalowane na pojazdach (np.: telefony komórkowe, węzły sensoryczne na pojazdach prywatnych i komunikacji miejskiej, laptopy, a nawet zwierzęta), rys. 7.



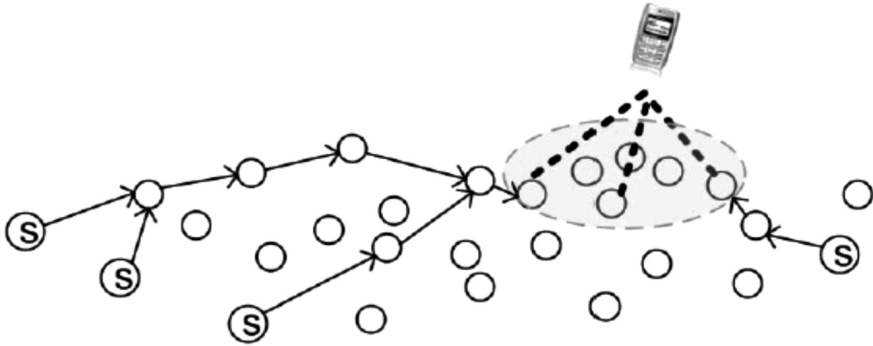
Rys. 7. Schemat funkcjonalny mBSS opartej o trzy poziomowy schemat wymiany danych [28]

**Sposoby zbierania danych sensorycznych.** W przytoczonych wyżej hierarchicznych modelach sieci sensorycznej rozróżniamy dwa sposoby zbierania (archiwizowania) odczytów sensorycznych, rys. 8 i 9 [28]. W pierwszym przypadku przyjmuje się, że każdy z węzłów jest odłączony od sieci (odizolowany). Oznacza to, że nie komunikuje się ze swoimi sąsiadami i wysyła zarchiwizowane dane sensoryczne, gdy znajdzie się w zasięgu mobilnego agenta. Ten sposób zbierania odczytów sensorycznych jest niezależny od topologii sieci i wykorzystuje niewielką ilość energii. Jednak taki sposób archiwizowania danych nie pozwala na spełnianie ścisłych reżimów czasowych (małe opóźnienia w przekazywaniu danych), rys. 8.



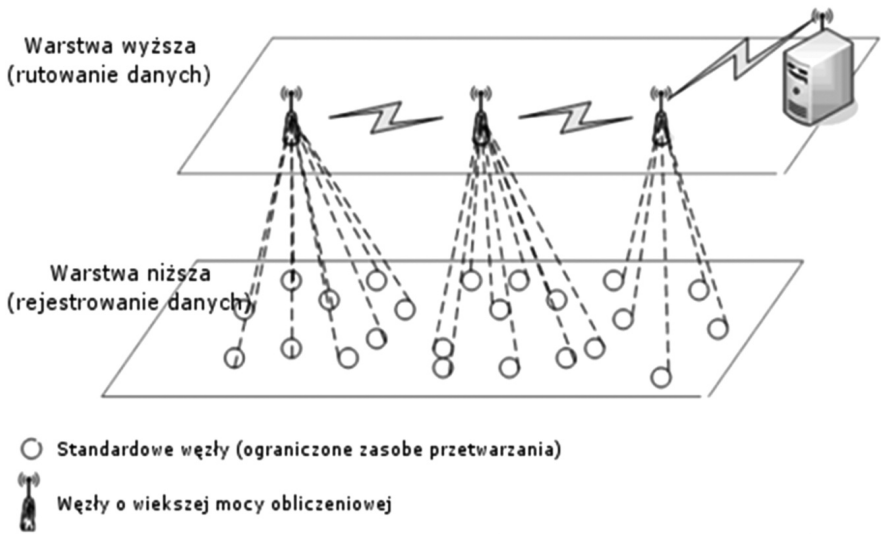
Rys. 8. Schemat zbierania danych sensorycznych w sieci z odizolowanymi węzłami [28]

Węzły sensoryczne mogą organizować się w sieci ad-hoc, w których zbieranie i dostarczanie danych może odbywać się cały czas. W takiej sytuacji, wydajność całej sieci jest uzależniona od topologii sieci, którą tworzą wszystkie jej elementy. Rozwiązanie to pozwala co prawda na spełnianie ścisłych reżimów czasowych nakładanych na przesyłanie danych, ale jest o wiele mniej wydajne energetycznie (koszt utrzymywania sieci – łączność radiowa), rys. 9.



**Rys. 9. Zbieranie danych sensorycznych i dostarczanie ich w komunikującej się sieci ad-hoc [28]**

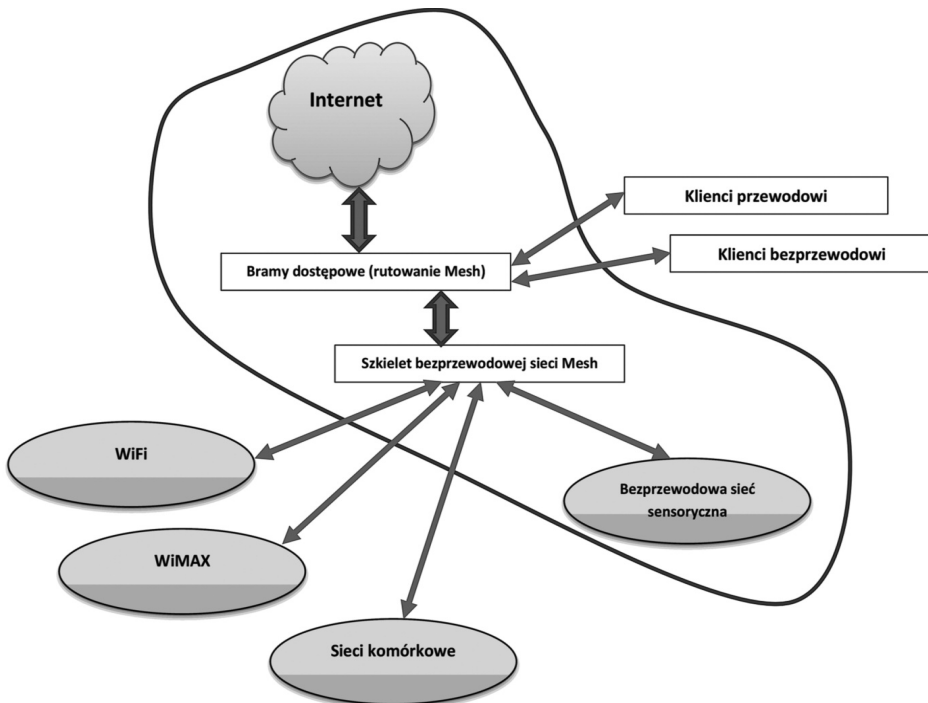
2. W [29] przedstawiono dwupoziomową architekturę sieci, przy czym rozwiązanie to różni się od modelu z [28], rys. 10. Niższa warstwa zbudowana jest z węzłów o małych zasobach (bateria, przetwarzanie danych) rozmieszczonych w sposób losowy na badanym terenie. W przeciwieństwie do [28] węzły tej warstwy mogą się przemieszczać. Natomiast węzły wyższej warstwy nie są mobilnymi agentami, jak miało to miejsce w [28], a ich zadaniem jest rutowanie danych z węzłów niższej warstwy do obserwatora/użytkownika. Niższa warstwa odpowiedzialna jest za zbieranie danych sensorycznych i przekazywanie odczytów do statycznych węzłów wyższej warstwy, które są w odległości jednego skoku. Wyższa warstwa zajmuje się rutowaniem danych od wszystkich obserwatorów do użytkownika (np. centralna baza danych). Warstwa ta zbudowana jest z mniejszej (niż warstwa niższa) ilości węzłów, o większych możliwościach przetwarzania i magazynowania danych, komunikowania się z innymi obserwatorami/użytkownikami i często podłączonych do stałego źródła zasilania. Komunikacja na tej najwyższej warstwie odbywa się wieloskokowo i opiera się o rozwiązania Mesh.



**Rys. 10. Hierarchiczna architektura sieci z mobilnymi węzłami sensorycznymi i statycznymi węzłami warstwy rutowania [29]**

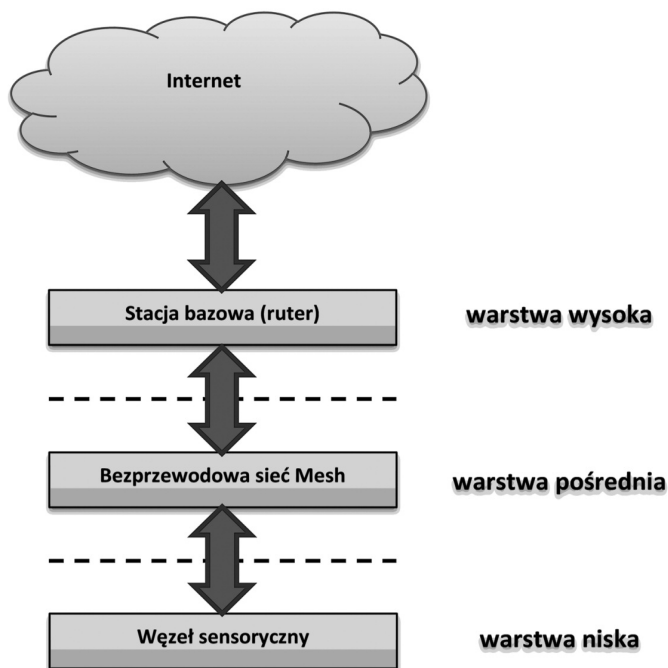


3. Jednym z rodzajów sieci bezprzewodowych, zdobywających coraz większą popularność, są bezprzewodowe sieci typu Mesh (ang. Wireless Mesh Network – WMN) [30]. WMN to sieci posiadające zdolność samoorganizowania, samokonfigurowania, a przede wszystkim będące sieciami zdecentralizowanymi – rozproszonymi (ang. decentralized wireless network). W sieci WMN występują dwa rodzaje węzłów, tj. ruter struktury mesh (ang. mesh router) oraz węzeł mobilny (ang. mobile client). Ruter mesh to węzeł, zazwyczaj stacjonarny, o dużych zasobach energetycznych i przetwarzania danych. Węzły te odpowiedzialne są za stworzenie infrastruktury komunikacyjnej dla całej sieci i kontrolę jej funkcjonowania. Umożliwiają węzłom niższej warstwy komunikowanie się, wykrywają zmiany topologii sieci i adaptują schemat rutowania tak, aby zagwarantować efektywne przekazywanie danych. W [30] została przedstawiona rozproszona mobilna bezprzewodowa sieć sensoryczna (ang. DWMSN – Distributed Wireless Mobile Sensor Network), której funkcjonowanie oparte jest o sieć typu Mesh, rys. 11. Architektura DWMSN integruje sieci komórkowe (ang. cellular network), sieci bezprzewodowe i bezprzewodowe sieci sensoryczne w sieć typu Mesh, a dane sensoryczne dostępne są z zewnętrznej sieci (np. z internetu). Rozwiązanie to pozwala na łączenie odległych (odizolowanych) sieci sensorycznych, polepsza skalowalność całej sieci, podnosi niezawodność, a także umożliwia przystosowywanie sieci do zmieniającej się topologii (mobilność węzłów). DWMSN wykorzystuje do komunikowania się z innymi odizolowanymi sieciami sensorycznymi mocniejsze węzły dostępne (bramy dostępne – ang. wireless gateway node). Każda z podsieci sensorycznych posiada co najmniej jeden ruter mesh i bramę dostępową. W ten sposób tworzy się sieć mesh i zagwarantowana jest łączność każdej podsieci z internetem.



**Rys. 11. Schemat integracji sieci sensorycznych, sieci bezprzewodowych i sieci komórkowych w sieć typu Mesh [30]**

Na architekturę komunikacji w sieci DWMSN składają się trzy warstwy, rys. 12. Warstwę najniższą (ang. lower layer) stanowią węzły sensoryczne. Warstwa pośrednia (ang. middle layer) zajmuje się przesyłaniem, za pośrednictwem sieci mesh, danych sensorycznych na duże odległości. Natomiast najwyższa warstwa (ang. upper layer) umożliwia użytkownikowi dostęp do sieci sensorycznych za pośrednictwem internetu.



Rys. 12. Model architektury komunikacji w sieci DWMSN [30]

#### IV. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono podstawowe pojęcia związane z bezprzewodowymi i mobilnymi sieciami sensorycznymi. Zastosowanie znacznej ilości prostych urządzeń sensorycznych rozmieszczonych na dużej powierzchni pozwala na kompleksową wizualizację obserwowanego zjawiska (przemieszczanie się zanieczyszczeń, modelowanie propagacji zanieczyszczeń i wykrywanie wzorców propagacji zanieczyszczeń). Umiejscawiając węzły sensoryczne na poruszających się pojazdach, a tym samym tworząc mobilną sieć sensoryczną, zwiększamy możliwości obrazowania sieci (zwiększona rozdzielczość) przy zachowaniu praktycznie takiej samej ilości węzłów.

Dzięki wykorzystaniu odpowiednio dobranych technik przetwarzania danych sieciowych i łączności, wizualizacja może być realizowana w czasie rzeczywistym. Stosowane węzły sensoryczne to najczęściej zaawansowane technologicznie urządzenia dedykowane lub jednopłytkowe komputery przemysłowe (prototypowanie). Dane sensoryczne wizualizowane są najczęściej z wykorzystaniem popularnych rozwiązań web (np. Google Earth) lub aplikacji zewnętrznych (ang. Third-party software). Wydawać by się mogło, że różnorodność zastosowań i istniejących rozwiązań powinna sprzyjać rozwojowi mobilnych sieci sensorycznych. Jednak

ograniczenia sprzętowe (ograniczone zasoby energetyczne węzłów), fizyczne (propagacja fal radiowych), a w końcu te wynikające z topografii sieci (natura obserwowanego zjawiska), nie pozwalają na skonstruowanie uniwersalnej mBSS, a więc każda z sieci musi być „szyta na miarę” dla konkretnego zastosowania. Największym problemem mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych jest zapewnianie reżimów czasowych (poprzez dobieranie najkrótszych ścieżek dla danych) transportowanych danych, a także interakcja użytkownika z elementami sieci (warstwa aplikacyjna). Każda z sieci musi pozwalać na wydajną (pod względem szybkości, energooszczędności) wymianę danych, a także na bezpośrednią (ang. transparent) (z punktu widzenia końcowego użytkownika) interakcję z węzłami sensorycznymi. Dlatego też dalszy rozwój mBSS powinien skupić się przede wszystkim na rozwoju nowoczesnych i uniwersalnych (adaptacyjnych) protokołów rutowania i protokołów aplikacyjnych.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, „Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, „Wireless Sensor Network Survey”, *Computer 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”, University of Architecture and Urbanism, Bucharest, Romania.
- [4] M. Ghanem, Y. Guo, J. Hassard, M. Osmond, and M. Richards, „Sensor Grids For Air Pollution Monitoring”, in *Proceedings of the 3rd UK e-Science All Hands Meeting 2004*, 2004, p. 8.
- [5] J. K. Hart and 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, and M. Vetterli, „Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring: The SensorScope Experience”, in *Proceedings of the 2008 IEEE International Zurich Seminar on Communications*, 2008, pp. 98-101.
- [7] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, „A Survey on Sensor Network”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [8] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, „Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks”, in *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, 2000, pp. 56-67.
- [9] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, „Wireless Integrated Network Sensors”, *Communications of the ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 551-58, May 2000.
- [10] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, „Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust”, in *Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, 1999, pp. 271-278.
- [11] E. Shih, et al., „Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks”, in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, 2001, pp. 272-286.
- [12] S. A. Munir, R. Biao, J. Weiwei, W. Bin, X. Dongliang, et al., „Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing”, in *Proceedings of the Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW 2007)*, 2007, pp. 113-120.
- [13] I. Howitt and J. A. Gutierrez, „IEEE802.15.4 low rate-wireless personal area network co-existence issues”, in *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003)*, 2003, pp. 1481-1486.

- [14] <http://www.zigbee.org/>, "ZigBee Alliance", 2011.
- [15] [http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=ZIGBEE\\_OVERVIEW\\_CATEGORY](http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=ZIGBEE_OVERVIEW_CATEGORY), "ZigBee Standards Overview", 2011.
- [16] <http://www.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol.html>, "About the HART Protocol", 2011.
- [17] <http://www.controleng.com/search/search-single-display/draft-standard-whats-in-the-april-07-wirelesshart-specification/ac25a00404.html>, "Draft standard: What's in the April '07 WirelessHART specification", 2011.
- [18] <http://www.isa.org/MSTemplate.cfm?MicrositeID=1134&CommitteeID=6891>, "ISA100, Wireless Systems for Automation", 2011.
- [19] <http://6lowpan.net/>, "6LoWPAN", 2011.
- [20] G. Mulligan and L.W. Group, "The 6LoWPAN architecture", in *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2007)*, 2007, pp.78-82.
- [21] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler, "Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks", *RFC 4944*, 2007.
- [22] <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.3-2003.html>, "802.15.3-2003 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN)", 2011.
- [23] <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/wibree>, "Wibree (Baby Bluetooth)", 2011.
- [24] K. Sahrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network", *IEEE Personal Communication*, vol. 7, no. 5, pp. 16-27, Oct. 2000.
- [25] E. Shih, Seong-Hwan Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, et al., "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, 2001, pp. 272-287.
- [26] A. Woo and D. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks", in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, 2001, pp. 221-235.
- [27] Paweł P. Czapski, "Nowa koncepcja w pełni adaptacyjnego protokołu rutowania dla bezprzewodowych sieci sensorycznych", *Pomiary i Automatyka*, vol. 12/2009, pp. 35-41, Gru. 2009, vol. 1/2010, pp. 5-9, Sty. 2010.
- [28] C. Canfeng and M. Jian, "MEMOSEN: multi-radio enabled mobile wireless sensor network", in *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2006)*, 2006, pp. 291-295.
- [29] C. Xuhui and Y. Peiqiang, "Research on Hierarchical Mobile Wireless Sensor Network Architecture with Mobile Sensor Nodes", in *Proceedings of the 3rd Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI 2010)*, 2010, pp. 2863-2867.
- [30] P. Kalyani and C. Chellappan, "Distributed Wireless Mobile Sensor Network Model and Efficient Routing Adopted to Dynamic Change of Topology", *Ubiquitous Computing and Communication Journal*, vol. 5, no. 2, p. 7, Jun. 2010.

PAWEŁ PIOTR CZAPSKI

## WIRELESS SENSOR NETWORKS – STATE OF THE ART

*Abstract*

*Wireless sensor networks (WSN) are used to monitor strategic (from the public safety point of view) parameters of air pollutions. Technological progress in the area of sensor networks allows manufacturing centimetre-scale sensor nodes that may cost less than a few USD per piece. This enables using sensor nodes at such a scale allowing for ubiquitous computing. Initially, the sensor networks were wired solutions. Development of wireless data processing technologies (processors, algorithms, etc.) enables to monitor much larger area compared to wired solutions. The next natural step of sensor network development was to enable mobile monitoring by mounting sensor nodes on moving vehicles, i.e. allowing for much better sensor data resolution at virtually the same cost. This article is an introduction to issues of wireless and mobile sensor networks.*