

MONITORING ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA NA TERENACH MIEJSKICH Z WYKORZYSTANIEM BEZPRZEWODOWYCH SIECI SENSORYCZNYCH – STAN WIEDZY

PAWEŁ PIOTR CZAPSKI
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Postęp technologiczny jaki dokonał się ostatnio w obszarze sieci sensorycznych umożliwia wytwarzanie węzłów o wymiarach rzędu centymetrów w cenie poniżej kilku USD za sztukę. Niska cena i małe rozmiary w połączeniu z nowoczesnymi technikami bezprzewodowymi i przetwarzania danych (procesory, algorytmy, etc.) pozwalają na objęcie przez węzły sensoryczne jeszcze większego terenu badań w porównaniu z rozwiązaniami przewodowymi. 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. Jednym z zastosowań mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych jest monitoring zanieczyszczeń powietrza. Technika ta jest jeszcze w początkowym stadium rozwoju i stwarza wiele problemów technicznych, jednak zdobywa coraz większą popularność, zarówno w branży akademickiej, jak i komercyjnej. W artykule tym przedstawiono przegląd najnowszych rozwiązań w zakresie monitoringu zanieczyszczeń powietrza wykorzystujących mobilne bezprzewodowe sieci sensoryczne, a także wskazano możliwe drogi rozwoju tych sieci.

I. WSTĘP

Jednym z największych źródeł zanieczyszczeń powietrza w aglomeracjach miejskich jest transport samochodowy, zarówno prywatny, jak i publiczny. Zwiększająca się każdego roku liczba pojazdów, niedostatecznie rozwinięta infrastruktura drogowa, zła organizacja ruchu drogowego, a także krótkowzroczność władz lokalnych na problemy komunikacyjne (brak dostatecznej liczby miejsc parkingowych, niedostateczna promocja transportu publicznego, etc.) przyczyniają się do spadku przepustowości dróg i powstawaniu tzw. korków. Sytuacja ta ma istotny wpływ na zwiększanie się emisji zanieczyszczeń (związki gazowe, pyły, etc.) do atmosfery. O ile średni (dla całej powierzchni rozpatrywanej aglomeracji) poziom gazów i pyłów emitowanych przez transport może spełniać pewne normy, to powstające korki powodują ich nadmierny lokalny wzrost, często wielokrotnie przekraczający dopuszczalne wartości. Czynnikiem potęgującym taką sytuację mogą być również specyficzne warunki atmosferyczne i ukształtowanie terenu. Sytuacja ta istotnie pogarsza standard życia mieszkańców i może przyczyniać się do powstawania wielu chorób cywilizacyjnych.

Zadaniem priorytetowym w państwach rozwijających się jest podnoszenie standardu życia. Jednym z elementów polityki prozdrowotnej jest redukcja emisji zanieczyszczeń w miastach. Polityka ta jest realizowana przede wszystkim poprzez działania na rzecz zmniejszania emisji gazów, pyłów i hałasu przez samochody, a także monitoring skuteczności podejmowanych działań (np. monitoring składowych zanieczyszczeń). Przykładem może być powstająca w Polsce sieć EKOINFONET [1], która będzie gromadziła wszelkie dane dot. stanu środowiska.

Stosowanie inteligentnych systemów transportu służących do zarządzania ruchem drogowym pozwala na zwiększanie przepustowości dróg, a w efekcie przyczynia się do redukcji emitowanych do środowiska zanieczyszczeń i hałasu [2]. Zarządzanie ruchem realizowane jest najczęściej poprzez zastosowanie zespołu sygnalizatorów ulicznych, czujników rejestrujących obecność pojazdu (np. pętle indukcyjne pod powierzchnią drogi) i system komputerowy sterujący sygnalizatorami. Poziom zanieczyszczeń może być monitorowany stacjonarnie w wybranych miejscach na terenie miasta lub poprzez sieć mobilnych czujników zainstalowanych na przemieszczających się pojazdach. Pomiary składowych zanieczyszczeń dokonywane za pomocą stacjonarnych czujników pozwalają jedynie na ogólny obraz sytuacji. Przykładem jest woj. mazowieckie, na terenie którego znajduje się tylko 27 stacji pomiarowych (17 automatycznych i 10 z pomiarem manualnym) [3]. O ile instalacja dodatkowych stacji monitoringu zanieczyszczeń pozwoliłaby na zwiększenie rozdzielczości obrazowania, to nakłady finansowe i obsługa tych stacji wykluczają takie rozwiązanie. Mobilne bezprzewodowe sieci sensoryczne (mBSS, ang. mobile Wireless Sensor Network (mWSN)) zdobywają coraz większą popularność w zastosowaniach do monitoringu zanieczyszczeń powietrza [4]. Pozwalają na istotne zwiększenie rozdzielczości obrazowania przy niskich nakładach finansowych. Istotnym parametrem, obok rozdzielczości obrazowania, są reżimy czasowe nakładane na dane dostarczane do obserwatora. Innymi słowy, wizualizacja danych sensorycznych musi przedstawiać zarówno ilościowe, jak i jakościowe właściwości. Jest to szczególnie istotne w sieciach sensorycznych monitorujących strategiczne z punktu widzenia obserwatora np. parametry zanieczyszczenia powietrza, które mogą zmieniać się w sposób nagły i nieprzewidywalny. Sieci te nazywane są często bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi czasu rzeczywistego (ang. „near” real-time wireless sensor network).

W drugim punkcie przedstawiono aktualny stan wiedzy w zakresie monitoringu zanieczyszczeń powietrza z wykorzystaniem mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych. Trzeci rozdział to krytyka istniejących rozwiązań mBSS a także dyskusja nad możliwymi kierunkami rozwoju mobilnych sieci sensorycznych do monitorowania zanieczyszczeń. Artykuł jest podsumowany w ostatnim czwartym punkcie.

II. MONITOROWANIE ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA PRZEZ MOBILNE BEZPRZEWODOWE SIECI SENSORYCZNE

Monitoring jakości powietrza w miastach może być dokonywany w sposób stacjonarny i mobilny. Pierwszy ze sposobów polega na wykorzystaniu sieci stacjonarnych czujników rozmieszczonych w ściśle wybranych miejscach o strategicznym (z punktu widzenia ilości generowanych zanieczyszczeń i zdrowia mieszkańców) znaczeniu. Zazwyczaj są to skrzyżowania ruchliwych ulic, wybrane miejsca wzdłuż ruchliwych ulic, pobliza zakładów przemysłowych, itp. Na terenie województwa mazowieckiego jest 27 stacji monitoringu jakości powietrza (17 stacji automatycznych i 10 z manualnym odczytem danych sensorycznych) [3]. Dane pomiarowe z tych stacji dostarczane są za pomocą istniejącej infrastruktury komunikacyjnej (przewodowo lub radiowo). Monitoring zanieczyszczeń środowiska (m.in. powietrze i hałas) może być także dokonywany za pomocą sieci czujników (węzłów sensorycznych) zainstalowanych na

przemierzających się pojazdach, które tworzą tzw. mobilną bezprzewodową sieć sensoryczną [5]–[15]. Takie rozwiązanie pozwala na większą rozdzielczość obrazowania w porównaniu z monitoringiem stacjonarnym. Mobilne bezprzewodowe sieci sensoryczne to stosunkowo nowa dziedzina technik bezprzewodowych, lecz zdobywająca coraz większą popularność w branży akademickiej i przemyśle, gdyż pozwala na monitorowanie, obrazowanie i modelowanie zachodzących zjawisk (np. propagacji zanieczyszczeń) w otaczającym nas środowisku na niespotykaną dotąd skalę i przy relatywnie niskich nakładach finansowych (zaawansowany technologicznie węzeł sensoryczny to koszt rzędu paruset USD za sztukę [16]).

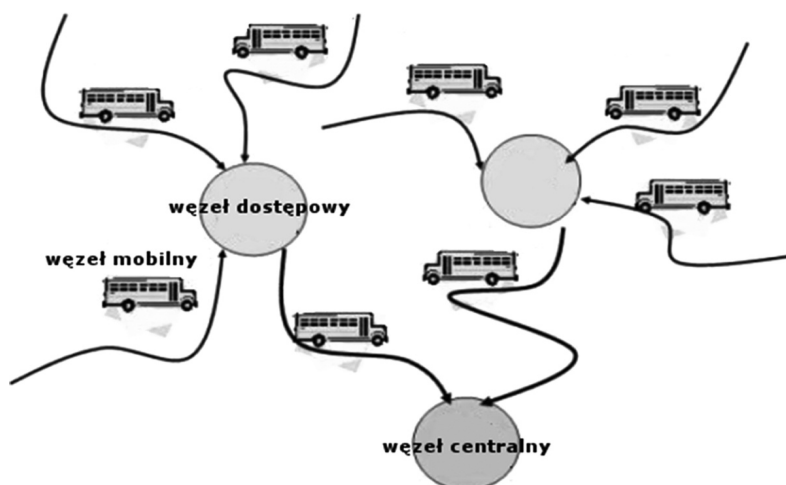
Ze względu na sposób przetwarzania danych (rejestrwanie, przetwarzanie, wysyłanie) różniamy dwa podstawowe typy mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych. W sieciach typu „off-line” rejestrowane dane sensoryczne przekazywane są do obserwatora bez zachowania jakichkolwiek reżimów czasowych [6], [8], [10], [17], [18], [19]. Dane sensoryczne mogą być poddane lokalnemu kondycjonowaniu na poziomie węzła. Zazwyczaj w sieciach typu „off-line” węzły sensoryczne nie komunikują się ze sobą, a zebrane dane są wysyłane (lub pobierane z węzła w sposób manualny) w ściśle określonych miejscach na trasie przemierzającego się pojazdu (np. przystanek autobusowy/tramwajowy) lub tylko w jednym miejscu (np. zajezdnia autobusowa/tramwajowa). Zasadniczą wadą takiego typu podejścia do monitoringu zanieczyszczeń jest brak możliwości wizualizacji zachodzących zjawisk w czasie rzeczywistym. Ogranicza to również inne zastosowania takiej sieci np. inteligentne systemy transportu. Zastosowanie mobilnego monitoringu typu „off-line” ogranicza się jedynie do statystycznej analizy obserwowanego zjawiska lub budowania modelu zachodzących na badanym terenie zjawisk i jego późniejszej weryfikacji. W sieciach typu „on-line” (zwanymi dalej mobilnymi bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi czasu rzeczywistego, ang. „real-time” sensor network, „near real-time” sensor network) zespół operacji związanych z przetwarzaniem danych sensorycznych (rejestrwanie, przetwarzanie, przekazywanie, udzielanie odpowiedzi przez sieć na zapytania obserwatora/użytkownika) realizowany jest w sposób pozwalający na wizualizację w czasie rzeczywistym (np. na ekranie komputera użytkownika w centrum monitoringu jakości powietrza i zarządzania kryzysowego) zjawisk zachodzących na obserwowanym terenie [5], [7], [7]. Obok sieci sensorycznych „off-line” i „on-line” odrębną grupę stanowią systemy mieszane, w których część danych dostarczana jest do obserwatora w czasie rzeczywistym [7], [11], [14]. W sieciach mieszanych wyróżnia się węzły sensoryczne i węzły transportujące dane (ang. data mule), które zajmują się zbieraniem odczytów z innych węzłów i dostarczaniem ich do obserwatora.

Coraz większą popularnością cieszą się tzw. obywatelskie sieci sensoryczne (ang. citizen pollution monitoring, mobile pollution mapping, etc.) dostarczające informacji o otaczającym mieszkańców środowisku, tj. zanieczyszczeniach powietrza i hałasie [9], [20], [21]. Wykorzystywane są do tego celu różnego rodzaju urządzenia przenośne (wyposażone w możliwość ustalania swojej pozycji w czasie i przestrzeni) takie, jak telefony komórkowe, tablety, a nawet urządzenia dedykowane. Dane z odczytów sensorycznych dokonywanych przez te urządzenia mogą być dostarczane do serwera w czasie rzeczywistym lub w sposób „off-line”. Zazwyczaj obywatelskie sieci sensoryczne wykorzystywane są tylko do obrazowania stanu otaczającego środowiska (np. wizualizacja odczytów za pomocą Google Earth) lub stanowią element większej sieci sensorycznej czasu rzeczywistego lub sieci mieszanej („on-line” i „off-line”). Urządzenia przenośne takie jak telefony komórkowe i tablety najczęściej wykorzystywane są do monitorowania poziomu hałasu (za pomocą standardowo wbudowanego mikrofonu). Możliwe też jest monitorowanie chemicznego składu zanieczyszczeń za pomocą zewnętrznego modułu sensorycznego komunikującego się z przenośnym urządzeniem poprzez sieć małego zasięgu (np. BlueTooth). W sytuacji, gdy urządzenie przenośne nie ma możliwości rejestracji odczytów

w czasie rzeczywistym, zarejestrowane dane wysyłane są do obserwatora po wejściu w zasięg radiowy (lub są wysyłane manualnie na serwer przez użytkownika takiego urządzenia). Natomiast, rozwiązania dedykowane (np. w formie breloków) stworzone są z myślą o rejestracji danych sensorycznych i powstają one pod wpływem mody (zwiększanie świadomości ekologicznej społeczeństwa).

A. Mobilne bezprzewodowe sieci sensoryczne typu „off-line”

BusNet ([6], [19]) to typowy przykład sieci sensorycznej „off-line”. Umieszczone na autobusach węzły sensoryczne (Crossbow MICAz) wyposażono w moduły GPS i zestawy czujników rejestrujących różne składowe zanieczyszczenia powietrza, przy czym zasilanie pobierane jest z pojazdu. Na sieć BusNet składają się poruszające się węzły sensoryczne, węzły dostępne zlokalizowane na przystankach autobusowych (ang. Sub Station) i węzeł centralny w zajezdni (ang. Main Station). Architektura sieci pokazana jest na rys. 1.



Rys. 1. Architektura sieci sensorycznej BusNet [17]

Każdy z mobilnych węzłów sensorycznych rejestruje w stałych odstępach czasu takie dane jak temperatura, poziom tlenku węgla i pozycja (wg danych GPS). Dane sensoryczne przekazywane są radiowo pomiędzy mobilnym węzłem a węzłem dostępowym, który pełni funkcję routera. Pobranie lub wysłanie danych następuje tylko wtedy, gdy węzeł sensoryczny znajdzie się w zasięgu takiego punktu dostępowego. Dane sensoryczne dostarczane są do węzła centralnego przez „poruszające się” węzły mobilne. Przetwarzanie danych dokonywane jest tylko przez węzeł centralny. Takie rozwiązanie monitoringu jakości powietrza nie gwarantuje zachowania jakichkolwiek reżimów czasowych. Ponadto nie zastosowano żadnego protokołu routowania danych sensorycznych. Sieci typu „off-line” z powodzeniem znajdują zastosowanie w monitorowaniu dróg. Przykładem jest [17] gdzie autorzy wykorzystali BusNet do monitoringu stanu nawierzchni dróg. „The Pothol Patrol” ([18]) to kolejny przykład sieci wykorzystywanej do monitorowania stanu dróg. Jedyną różnicą w porównaniu z [17] jest sposób, w jaki dostarczane są odczyty sensoryczne. Dane z węzłów przekazywane są do obserwatora w sposób przypadkowy (ang. opportunistic), wykorzystując do tego celu otwarte punkty dostępowe WiFi i mechanizm *dPipe* działający na zasadzie DTN (ang. Delay Tolerant Network), tj. sieci tolerujących opóźnienia i przerwania. Badania nad przedstawionymi w [17] i [18] mobilnymi sieciami sensorycznymi są realizowane na Srilance.

Projektowana w [8] mobilna sieć sensoryczna będzie zbudowana z węzłów rejestrujących pozycję, stężenie O_3 , NO_2 i CO oraz parametry kształtujące pogodę. Dane będą dostarczane do węzła centralnego (gdy węzeł mobilny znajdzie się w zasięgu WiFi) i wizualizowane w aplikacji web. Do budowy węzła wykorzystano mikrokontroler Intel 8051.

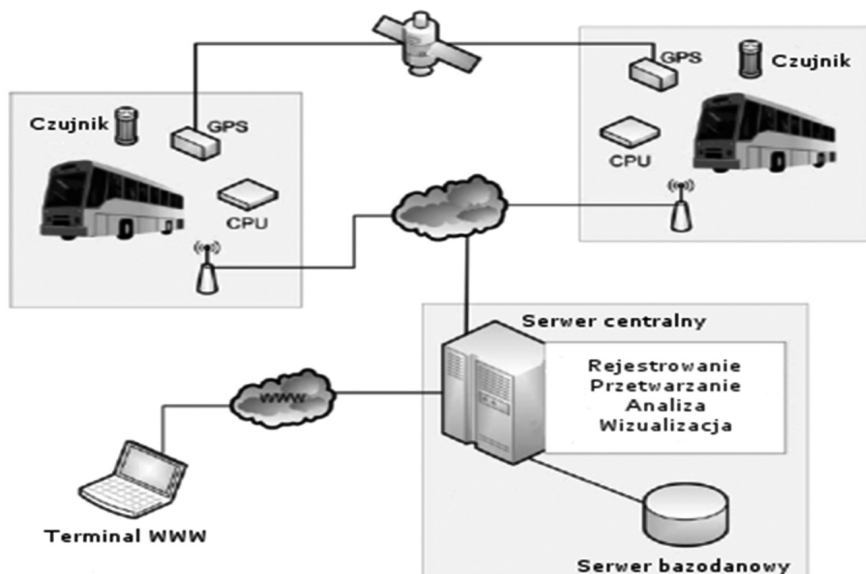
Przedstawiona w [10] sieć sensoryczna do monitorowania jakości powietrza (tlenek węgla) to mały system złożony z paru mobilnych węzłów sensorycznych (zainstalowanych na prywatnych pojazdach) i paru przenośnych węzłów. Dane sensoryczne wraz z pozycją węzła (GPS) zapisywane są w pamięci urządzenia i pobierane manualnie przez obserwatora. Wizualizacja odczytów zrealizowana jest poprzez naniesienie danych na mapę. Przedstawiona w [10] sieć „off-line” została uruchomiona w jednym z dużych miast w Ghanie.

B. Mobilne sieci sensoryczne czasu rzeczywistego – monitoring „on-line”

Obok sieci mieszanych mBSS czasu rzeczywistego są obecnie najliczniejszą grupą bezprzewodowych sieci sensorycznych monitorujących jakość powietrza.

1. W [5], [7] i [13] zaproponowano architekturę mobilnej sieci sensorycznej, która docelowo ma być przeznaczona do monitoringu takich składowych zanieczyszczeń powietrza, jak CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 , a także rejestracji temperatury i wilgotności. Węzły sensoryczne będą zainstalowane na pojazdach transportu publicznego (autobusy) na terenie hiszpańskich aglomeracji. Podobnie jak większość systemów „on-line”, projektowanie przedstawionej mobilnej sieci sensorycznej zostało podzielone przez autorów na trzy tematyczne obszary. Pierwszy z nich obejmuje zaprojektowanie autonomicznego systemu do rejestrowania danych sensorycznych (węzeł sensoryczny), który będzie łączył się bezprzewodowo z innymi elementami sieci, docelowo zainstalowany na pojazdach transportu publicznego. Węzeł sensoryczny rejestruje poziom monitorowanego parametru charakteryzującego stan środowiska, a także własną globalną i lokalną (względem innych węzłów) pozycję. Ponadto budowa węzła pozwala na dodawanie nowych sensorów. Drugi obszar tematyczny w projektowaniu sieci to łączność bezprzewodowa, która skupia się na sposobach przekazywania informacji (odczytów sensorycznych) pomiędzy źródłem (węzłem sensorycznym) a obserwatorem (węzeł centralny przetwarzający dane zebrane z całej sieci). Przeanalizowano różne alternatywy łączności bezprzewodowej, takie jak bezpośrednie przesyłanie odczytów sensorycznych za pośrednictwem sieci telefonii komórkowej lub wykorzystanie innych mediów (uwzględniając możliwości techniczne i aspekty finansowe), wykorzystanie łączności bezprzewodowej o małym zasięgu (np. Bluetooth) na przystankach autobusowych, a także sieci przypadkowe (ang. opportunistic network), w których dane przekazywane są od źródła do obserwatora wieloskokowo (ang. multihop).

Ostatni obszar tematyczny projektowania mBSS obejmuje zagadnienia związane z przetwarzaniem danych sensorycznych rejestrowanych przez węzły. Węzły sensoryczne dostarczają (po wstępnym kondycjonowaniu na poziomie pojedynczego węzła) dużą ilość danych, odczyty sensoryczne muszą być w odpowiedni sposób przetworzone tak, aby możliwa była wizualizacja zachodzących na badanym terenie zjawisk. Ponadto dane sensoryczne archiwalne i aktualne wykorzystywane są do budowy modelu propagacji obserwowanych czynników, co w efekcie pozwala na prognozowanie mogących zajść zjawisk. Architektura omawianej przez autorów sieci sensorycznej przedstawiona jest na rys. 2. Prototypowy węzeł sensoryczny zbudowany jest w oparciu o standard komputera jednopłytkowego PC/104 (Kontron MOPS 1cd6) i wyposażony w kartę WiFi w standardzie IEEE 802/11a/b/g [22]. Węzeł posiada moduł GPS i przetwornik chemiczny CO_2 (Vaisala GMM220), a docelowo będzie wyposażony w pozostałe przetworniki (CO , NO_2 , SO_2 , temperatura, wilgotność).



Rys. 2. Architektura mobilnej bezprzewodowej sieci sensorycznej typu „on-line” w wykonaniu [7]

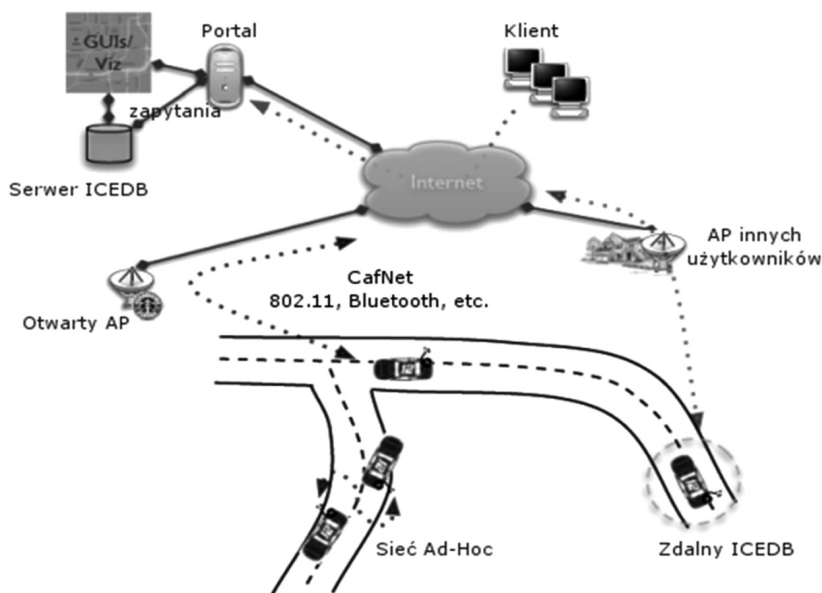
Łączność radiowa w [7] została oparta o standard WiFi, a komunikacja pomiędzy elementami sieci wykorzystuje schemat sieci tolerujących opóźnienia i przerwania (ang. DTN – Delay Tolerant Network). Węzły rejestrują, z określoną częstotliwością, swoją pozycję i parametry powietrza, a następnie wysyłają zebrane dane do węzła centralnego, który przetwarza dane ze wszystkich węzłów. Zastosowanie DTN pozwala na wyeliminowanie problemów z częstym brakiem łączności radiowej (typowe dla mobilnych bezprzewodowych sieci) w sposób niezauważalny dla obserwatora. W omawianej mobilnej sieci sensorycznej nie zastosowano protokołu routowania.

Zastosowane w [7] centralne przetwarzanie danych (serwer centralny) kondycjonuje (ang. preprocessing) zarejestrowane przez sieć odczyty sensoryczne, zanim zostaną one wysłane do serwera bazodanowego (ang. database). Na serwerze centralnym budowane są również mapy zanieczyszczeń i przygotowywane prognozy monitorowanych parametrów środowiska, a także weryfikowane algorytmy do analizowania rejestrowanych odczytów sensorycznych. Wizualizacja zrealizowana jest na bazie aplikacji web i wykorzystuje do tego celu Google Maps API i mechanizm AJAX. Z uwagi na poznawczy charakter projektowanej mobilnej sieci sensorycznej (budowanie modelu zanieczyszczeń, analiza związków pomiędzy składowymi zanieczyszczeń, prognozowanie propagacji zanieczyszczeń) interakcja obserwatora/użytkownika z systemem ogranicza się do obserwacji nadsyłanych przez system odczytów sensorycznych.

2. Przedstawiona w [7] mobilna sieć to przykład mBSS łączącej rozwiązania „on-line” i „off-line”, przy czym głównym zadaniem sieci jest dostarczanie odczytów sensorycznych w czasie rzeczywistym. Mobilna bezprzewodowa sieć sensoryczna CarTel została zaprojektowana do zbierania, dostarczania i wizualizacji parametrów jazdy samochodu. Ponadto CarTel była wykorzystywana do monitoringu pasma radiowego sieci WiFi. Rejestrowane są takie dane jak przyspieszenie, czas podróży i aktualna pozycja, co pośrednio pozwala na określenie poziomu emitowanych przez pojazdy zanieczyszczeń. Dane sensoryczne są poddane lokalnemu wstępnemu przetworzeniu (np. kondycjonowaniu), zanim zostaną wysłane do

centralnego portalu (obserwatora), gdzie zbierane informacje są magazynowane do dalszej analizy i wizualizacji. Sieć CarTel wykorzystuje prosty zapytaniowy interfejs (ang. query-oriented interface), co pozwala na przetwarzanie dużej ilości dostarczanych przez węzły danych. Sieć utrzymuje stałą łączność z portalem wykorzystując do tego celu łączność radiową (sieci przypadkowe np.: WiFi, BlueTooth, otwarte punkty dostępowe WiFi), węzły transportujące (ang. data mules), telefony komórkowe, pamięci Flash, etc. Aplikacja CarTel uruchomiona jest na portalu wykorzystując w tym celu procesor przetwarzania zapytań (ICEDB) tolerujący opóźnienia i przerwania, który określa, w jaki sposób mobilne węzły powinny przetwarzać dane. Komunikacja pomiędzy portalem i elementami sieci oparta jest na autorskim schemacie sieci (stos komunikacyjny) tolerującym opóźnienia i przerwania CafNet. Sieć CarTel została uruchomiona w Stanach Zjednoczonych Ameryki (Boston, Seattle) i dostarczała danych z paru samochodów przez ponad rok.

Schemat funkcjonowania i elementy sieci CarTel przedstawiono na rys. 3. Zainstalowane na samochodach węzły sensoryczne rejestrują parametry jazdy i zapisują zgromadzone dane w swoich lokalnych bazach danych ICEDB. Do budowy mobilnego węzła wykorzystano jednopłytowy komputer Soekris net4801 ze zintegrowaną kartą Wifi 802.11b [23]. Węzeł wyposażono w moduł GPS Rayming TN200.



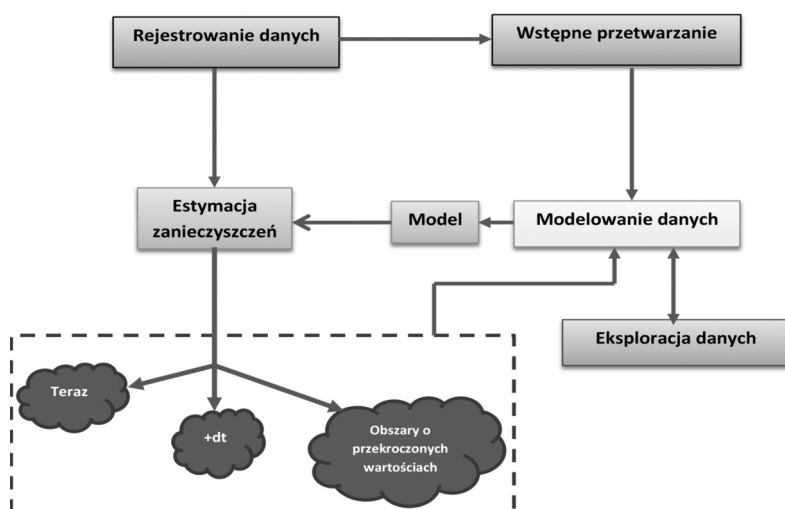
Rys. 3. Funkcjonowanie i elementy sieci CarTel [7]

Po wejściu węzła w zasięg radiowy zgromadzone odczyty sensoryczne wysyłane są na portal, wykorzystując do tego celu schemat CafNet. Odczyty sensoryczne mogą być przeglądane przez użytkownika, który może również wysyłać zapytania do sieci. Do obsługi przeglądania i zapytań wykorzystywany jest interfejs wizualizacji danych i lokalne obrazy zapytań (ang. local snapshot queries). W sieci CarTel wykorzystywane jest statyczne rutowanie (brak protokołu rutowania), nie zastosowano wieloskokowej komunikacji węzeł-węzeł. Adresowanie wszystkich węzłów sieci CarTel jest oparte na jednym globalnym schemacie identyfikatorów, tj. adresowanie nie wykorzystuje topologii i organizacji węzłów. CafNet pozwala na wymianę informacji z interfejsem użytkownika opartą o transmisję zorientowaną na dane (przeciwieństwo TCP – zorientowanych na strumień).

Użytkownicy mają dostęp do danych sensorycznych sieci CarTel poprzez aplikację www za instalowaną na portalu. Aplikacja CarTel wykorzystuje trzy główne bloki portalu: szkielet budowy portalu (ang. portal framework), serwer ICEDB do pobierania danych sensorycznych oraz bibliotekę do wizualizacji danych.

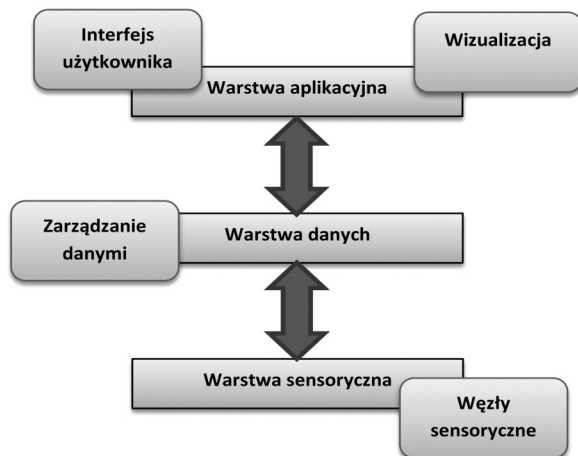
C. Mobilne sieci sensoryczne – techniki mieszane („on-line”/„off-line”)

MESSAGE (Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments) to obecnie najbardziej zaawansowany technologicznie projekt monitoringu środowiska z wykorzystaniem mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych [14]. Do stworzenia MESSAGE powołano konsorcjum kierowane przez Imperial College London, w skład którego weszli międzynarodowi specjaliści z obszaru informatyki, transportu, technologii czujników i łączności z takich uczelni jak Imperial, Cambridge, Leeds, Newcastle i Southampton, a także sektor komercyjny. Ideą przewodnią projektu było skonstruowanie, wdrożenie i pokazanie potencjału niskobudżetowych węzłów sensorycznych jako rozwiązania dostarczającego danych do badania wpływu transportu publicznego na środowisko, budowania modeli propagacji zanieczyszczeń i zarządzania transportem, na skale lokalną i krajową. Projekt MESSAGE zbiera dane z węzłów sensorycznych umieszczonych na pojazdach transportu publicznego, a także z węzłów przemieszczanych przez uczestniczących w projekcie mieszkańców (np. telefony komórkowe). Odczyty sensoryczne dostarczają informacji o zanieczyszczeniu środowiska pochodzącym ze środków komunikacji miejskiej i z innych źródeł. W ramach projektu MESSAGE skonstruowano nowe platformy sensoryczne np. StarDust, wykorzystującą standard Zigbee IEEE 802.15.4, oraz inne wykorzystujące takie standardy komunikacji jak WiFi (802.11g) i WiMax (802.16). Przetwarzanie danych sensorycznych w każdej ze zróżnicowanych pod kątem zastosowanych technologii sieci zrealizowane jest w ten sam sposób, rys. 4. Założenia i funkcjonowanie sieci MESSAGE sprawdzono w praktyce uruchamiając system w Wielkiej Brytanii w Londynie, gdzie dokonywał pomiarów przez okres 6 miesięcy. Węzły sensoryczne zostały rozmieszczone na przydrożnych obiektach (na latarniach – węzły stacjonarne) w odległości 100 m tak, aby stworzyć wieloskokowe łącze radiowe (w promieniu 5 wieloskoków). Pozostałe węzły sensoryczne rozmieszczono na pojazdach komunikacji miejskiej, na prywatnych samochodach, rowerach, były także przemieszczane przez mieszkańców. Sieć sensoryczna rejestrowała poziom CO i NO₂, temperaturę, wilgotność i poziom hałasu.



Rys. 4. Przetwarzanie danych sensorycznych w sieci MESSAGE [14]

1. **Architektura sieci MESSAGE.** Sieć MESSAGE została zorganizowana w trzech warstwach, tj. w warstwie sensorycznej, warstwie danych i warstwie aplikacyjnej [24]. Warstwy te umożliwiają rejestrowanie, przetwarzanie, analizę i wizualizację danych, rys. 5.



Rys. 5. Budowa sieci sensorycznej MESSAGE (budowa warstwowa) [24]

Warstwę sensoryczną tworzą węzły sensoryczne (przemieszczone na pojazdach bądź przenoszone przez mieszkańców) różnorodne pod względem zainstalowanych czujników, wydajności przetwarzania danych i wykorzystywanych protokołów łączności bezprzewodowej. Każdy z węzłów sensorycznych poddaje zarejestrowane dane wstępnej obróbce (której złożoność dopasowana jest do wydajności obliczeniowej węzła). Węzły, które mają istotnie ograniczone zasoby energetyczne (bądź zasoby energetyczne są na wyczerpaniu), przesyłają dane do najbliższego węzła dostępowego (ang. local gateway), który poddaje odebrane dane niezbędnej obróbce przed przekazaniem do węzła centralnego (obserwatora).

Warstwa danych odpowiedzialna jest za zbieranie danych z całej sieci, przygotowywanie i przekazywanie w czasie rzeczywistym nowych danych do obserwatora (wizualizacja). Warstwa danych zajmuje się również zbieraniem wstępnie przetworzonych danych.

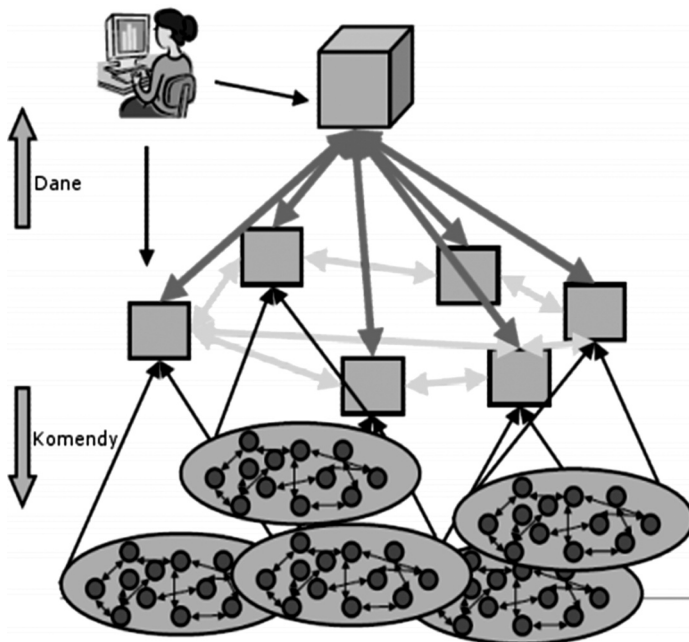
Na **warstwę aplikacyjną** składają się interfejs użytkownika do wizualizacji rejestrowanych przez MESSAGE danych sensorycznych oraz inne aplikacje dostarczające dane sensoryczne z dodatkowych źródeł. Wizualizacja danych sensorycznych oparta jest na interfejsie Google Earth.

2. **Szkielet zarządzania danymi (odczyty sensoryczne, inne informacje) w sieci MESSAGE.** W sieci MESSAGE dane sensoryczne dostarczane są z różnych sieci sensorycznych, takich jak węzły sensoryczne, rozwiązania niskobudżetowe SmartDust, a także stałe stacje monitoringu. W ramach projektu MESSAGE zaprojektowano i wdrożono szkielet zarządzania danymi sensorycznymi i innymi danymi potrzebnymi do funkcjonowania sieci. Pobierane przez sieć dane są rejestrowane, archiwizowane, przetwarzane, analizowane, a także rozsyłane do innych części sieci w sposób pozwalający na wykorzystanie ich w czasie rzeczywistym. Dane aktualne i historyczne są wykorzystywane do monitorowania statusu sieci, miejsc występowania zwiększonej ilości zanieczyszczeń (ang. hotspots) i korków, a także do weryfikowania modeli ruchu i propagacji zanieczyszczeń.

3. Zintegrowany model sieci VANET. Pomimo że sieci VANET (ang. Vehicular Ad-hoc Networks) są podklasą mobilnych sieci Ad-hoc (ang. MANET – Mobile Ad-hoc NETWORKS), to występują między nimi zasadnicze różnice. Zachowanie kierowcy, ograniczenia mobilności pojazdów oraz duża prędkość to parametry, które, w przeciwieństwie do sieci MANET, uwzględniane są przy projektowaniu stosu komunikacyjnego (od warstwy aplikacyjnej po fizyczną) sieci VANET. Zaprojektowanie takiego stosu komunikacyjnego wymaga zrozumienia zależności pomiędzy mobilnością pojazdów a utrzymywaniem łącza radiowego i wymusza potrzebę interakcji pomiędzy warstwami stosu. Rozkłady jazdy transportu publicznego, a także informacje z systemu sterującego sygnalizacją świetlną wykorzystano do przeanalizowania różnych wariantów utrzymywania łącza radiowych (czas nawiązanego łącza radiowego). Natomiast do analizy dynamiki czasowo-przestrzennej przemieszczających się pojazdów wykorzystano stochastyczny model ruchu (dynamiczny model płynu). W oparciu o wiedzę z zakresu dynamiki pojazdów i łącza radiowych możliwe było przeprowadzenie analizy projektowanych protokołów stosu komunikacyjnego.

Jednym z największych problemów dla sieci VANET jest duża ruchliwość węzłów sensorycznych, która powoduje częste fragmentacje transmisji i skraca czas, na który zestawiono łącze. Zazwyczaj zakłada się, że niższe warstwy dostarczają usługi warstwom wyższym w sposób przezroczysty. W przypadku wysokiej niestabilności łącza radiowych protokoły wyższych warstw muszą dopasowywać się do zmiennych warunków pracy, co istotnie wpływa na jakość nawiązanych łącza radiowych. Duża ruchliwość węzłów wymusza do zapewnienia łącza radiowego międzywarstwową współpracę wszystkich warstw stosu komunikacyjnego.

4. Przetwarzanie danych – rozpoznawanie wzorców propagacji zanieczyszczeń. W sieci MESSAGE wykorzystano rozproszony algorytm centroidów (ang. K -means) czasu rzeczywistego do analizy występujących wzorców propagacji zanieczyszczeń (rys. 6).



Rys. 6. Model rozproszonej eksploracji danych [25]

Zastosowany algorytm pozwala na śledzenie zmian propagacji w czasie rzeczywistym. Węzły sensoryczne zostały podzielone na gromady. Funkcjonowanie zastosowanego algorytmu wymaga jedynie lokalnej synchronizacji węzłów, co jest lepszym rozwiązaniem dla monitoringu dynamicznego środowiska. Ponadto węzły potrzebują komunikować się jedynie ze swoimi bezpośrednimi sąsiadami, co istotnie zmniejsza złożoność łączności radiowej. Monitorowane dane sensoryczne są zazwyczaj rozproszone, co sprawia, że dany algorytm może znaleźć szerokie zastosowanie, szczególnie w dużych i złożonych systemach obserwujących różne zjawiska.

W rozproszonym algorytmie *K*-means komunikację i międzywęzłową wymianę danych oparto na schemacie sieci P2P (ang. Peer-to-Peer). Przemieszczające się węzły zazwyczaj nie mogą dostarczyć wszystkich wartości monitorowanych parametrów. Eksploracja danych w sieci (ang. in-networks data mining) wykorzystuje w czasie rzeczywistym zebrane przez każdy sensor dane. Pozwala to na szybką ocenę sytuacji zanieczyszczenia powietrza, co może odzwierciedlać sytuację na monitorowanych drogach (natężenie ruchu, korki). Ponadto algorytm musi zapewniać szybką zbieżność, ponieważ wyniki takiej eksploracji danych są z reguły mniej dokładne w porównaniu z modelem scentralizowanego analizowania danych (ang. centralized *K*-means).

5. **Lokalizowanie węzłów.** Wizualizacja rejestrowanych danych sensorycznych wymaga dostarczania dokładnej pozycji węzłów. Najczęściej, pozycja elementów sieci sensorycznej dostarczana jest z urządzeń GPS, w które wyposażone są same węzły sensoryczne. Niestety moduły GPS nie sprawdzają się w aplikacjach wewnątrz budynków. Ponadto dokładność pozycjonowania, jaka jest wymagana przez poruszające się elementy sieci sensorycznej, jest trudna do osiągnięcia przez urządzenia do nawigacji satelitarnej dostępne na rynku. W ramach projektu MESSAGE stworzono nowatorski system do określania pozycji węzła sensorycznego, który oparty jest o mechanizmy WiFi.
6. **Zastosowania sieci MESSAGE.** Mobilna sieć sensoryczna MESSAGE znajduje zastosowanie w zarządzaniu ruchem (pokazanie w jaki sposób dane środowiskowe mogą być wykorzystane do polepszenia zarządzania ruchem na drogach), modelowaniu zanieczyszczeń (zwiększenie dokładności modeli propagacji zanieczyszczeń poprzez dostarczanie dużej ilości danych sensorycznych) i dostarczaniu informacji przechodniom (poziom zanieczyszczeń w bezpośrednim otoczeniu przechodnia).

III. MOBILNE SIECI SENSORYCZNE DO MONITOROWANIA ŚRODOWISKA – KRYTYKA I MOŻLIWE KIERUNKI ROZWOJU

W budowie sieci sensorycznej można wyróżnić trzy funkcjonalne bloki, tj. blok węzła sensorycznego, blok komunikacji i blok przetwarzania (analizowanie danych, interakcja użytkownika z siecią, wizualizacja danych).

A. Krytyka sieci

1. **Blok sensoryczny.** Węzły sensoryczne to zazwyczaj urządzenia dedykowane takich firm jak Crossbow, Libelium, etc. [26], [27] Są to technologicznie zaawansowane urządzenia sensoryczne o modułowej budowie, wyposażone we wszystkie niezbędne podzespoły (takie jak karty łączności bezprzewodowej, zestawy czujników, pamięć) potrzebne do uruchomienia sieci sensorycznej. Charakteryzują się małym zapotrzebowaniem energetycznym, są wyposażone w wydajne mechanizmy oszczędzania zasobów energetycznych (które często pozwalają na wielomiesięczną pracę bez wymiany baterii) i umieszczone w obudowie

odpornej na czynniki atmosferyczne. Sieci sensoryczne są również budowane z wykorzystaniem jednopłytkowych komputerów przemysłowych, przy czym są to rozwiązania prototypowe. Mimo że dedykowane węzły są urządzeniami o ograniczonych zasobach energetycznych, pozwalają na uruchamianie na nich systemów operacyjnych (TinyOS), co w połączeniu z dzisiejszym rozwojem informatyki daje wręcz nieograniczone możliwości przetwarzania danych i budowania kolejnych warstw abstrakcji. Złożoność wykonywanych przez sieć operacji, a z drugiej strony możliwości tworzenia warstw abstrakcji, umożliwiają przetrzystą interakcję użytkownika z monitorowanym środowiskiem. Coraz częściej stosowane są rozwiązania sieci czasu rzeczywistego integrujące różne techniki akwizycji danych. Sieci rozproszone (ang. distributed) zarówno z punktu widzenia rejestrowania danych, jak i sposobów, w jakie te dane są przetwarzane i dostarczane, zwiększają rozdzielczość obrazowania i redukują opóźnienia w komunikacji. Przykładem takiego mieszanego rozwiązania jest opisywany we wcześniejszym rozdziale artykułu angielski projekt MESSAGE łączący cechy sieci „on-line” i „off-line”, w którym wykorzystywane są zarówno rozwiązania dedykowane do akwizycji danych (typowe węzły sensoryczne) oraz inne rozwiązania „off-line” sieci (telefony komórkowe i inne przenośne urządzenia).

2. Blok komunikacji. Pierwsze aplikacje bezprzewodowych sieci sensorycznych wykorzystywały (a właściwie adaptowały) istniejące standardy łączności radiowej i do dzisiaj najczęściej stosowanym standardem jest IEEE 802.11. Wymagania stawiane przez aplikacje sieciom sensorycznym, a także ograniczenia sprzętowe (wynikające z idei sieci sensorycznych, tj. przetwarzanie rozproszone przez dużą ilość węzłów o ograniczonych zasobach energetycznych) wymusiły modyfikacje warstw stosu komunikacyjnego. Rosnące zapotrzebowanie rynku komercyjnego na mobilny dostęp do internetu wymusiło prace nad nowymi standardami (np. IEEE 802.11p – WAVE, ang. Wireless Access in Vehicular Environments). Wpłynęło to istotnie na technologiczne zaawansowanie stosu komunikacyjnego sieci sensorycznych. Dlatego też najlepiej rozwiniętymi warstwami są warstwa fizyczna oraz warstwa łączy danych (MAC).

Sieci sensoryczne, w których czas dostarczenia informacji jest wyznacznikiem jakości serwisu (szczególnie w przypadku sieci czasu rzeczywistego i mieszanych), charakteryzują się ostrymi reżimami czasowymi. Głównym czynnikiem wpływającym na spełniane reżimy czasowe jest droga, jaką musi przebyć informacja płynąca od źródła do obserwatora (przesyłanie zapytań i odpowiedzi), tj. sposób, w jaki informacja jest trasowana (ang. routing). W przypadku sieci „off-line” praktycznie nie stosuje się protokołów rutowania. Przekazywanie informacji w sieciach „off-line” pomiędzy źródłem a obserwatorem uzależnione jest od drogi, jaką fizycznie musi pokonać pojazd z zainstalowanym węzłem sensorycznym. Jeśli w tych sieciach stosowany jest jakiś rodzaj łączności radiowej, to dostarczanie informacji jest realizowane w sposób niezorganizowany za pomocą prostych protokołów rutowania np.: Flooding, Gossiping. Paradoksalnie w przypadku mobilnych sieci czasu rzeczywistego, w których spełnianie reżimów czasowych jest wyznacznikiem wydajności, konstruktorzy nie poświęcają szczególnej uwagi protokołom rutowania. Znanym mi wyjątkiem jest sieć MESSAGE, w której komunikacja radiowa oparta została o model sieci VANET, a także zastosowano rozproszony model eksploatacji danych sensorycznych.

Głównym zadaniem mBSS monitorujących zanieczyszczenie środowiska jest dostarczanie informacji o poziomach obserwowanych składowych zanieczyszczeń. Dlatego też można przyjąć, że priorytetem jest dostarczanie informacji do obserwatora, a nie odpowiedzi sieci na zapytania płynące od obserwatora. Z uwagi na różnice w adresowaniu elementów sieci sensorycznych i sieci tradycyjnych zrealizowanie w pełni funkcjonalnej warstwy transportowej dla BSS (i mBSS) jest problematyczne. Jednym z rozwiązań jest taka fragmentacja pro-

tokołu, aby łączność pomiędzy obserwatorem a siecią była zrealizowana za pośrednictwem protokołu UDP lub TCP przez tradycyjne łącza internetowe, natomiast komunikacja pomiędzy obserwatorem a węzłami (z uwagi na ich ograniczoną pamięć) bazowała na niemodyfikowanym UDP. Przedstawiona w [7] sieć CarTel realizuje dwustronną łączność pomiędzy obserwatorem a węzłami poprzez lokalne (mobilne) bazy danych przechowujące lokalne obrazy zapytań. Sieć MESSAGE ([14]) wykorzystuje do tego celu specjalnie przygotowany szkielet zarządzania danymi.

- 3. Blok przetwarzania – warstwa aplikacyjna.** Warstwa aplikacyjna, także w przypadku mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych, to wciąż najslabiej rozwinięta warstwa stosu komunikacyjnego. Zastosowanie tej warstwy ogranicza się do wizualizacji rejestrowanych odczytów sensorycznych i prostej interakcji obserwatora z siecią. Nadal brakuje narzędzi do administrowania węzłami i siecią, np.: do zmiany organizacji sieci, sterowania funkcjami węzła, itp.

B. Kierunki rozwoju mobilnych sieci sensorycznych monitorujących środowisko

Różnorodność zastosowań sieci sensorycznych, wymagań stawianych przez te aplikacje, a także ograniczeń sprzętowych powodują, że każde z rozwiązań jest unikalne. Przykładem są sieci do zastosowań cywilnych i militarnych. W tych pierwszych najczęściej dąży się do maksymalizacji czasu pracy. Z kolei aplikacje militarne narzucają niezawodność (która nie zawsze przekłada się na racjonalne gospodarowanie zasobami energetycznymi sieci). Sieci sensoryczne monitorujące zanieczyszczenia powietrza (ze szczególnym uwzględnieniem terenów miejskich) to aplikacja, której głównym celem jest monitorowanie jakości powietrza. Wyniki rejestrowanych danych sensorycznych wykorzystywane są następnie do budowy modelu i prognozowania zanieczyszczeń powietrza, a także do weryfikowania zbudowanego modelu.

Cechą charakterystyczną aplikacji mBSS monitorujących środowisko w miastach jest występowanie dużej ilości źródeł zanieczyszczeń o znacznej dynamice przestrzennej i czasowej, zwanych dalej **cechami fizycznymi aplikacji**. Z uwagi na rolę, jaką pełnią te sieci, istotne jest bezpieczeństwo i wiarygodność rejestrowanych danych. Na architekturę mBSS mają również wpływ cechy wynikające z istniejącej infrastruktury aplikacji (sposób umiejscowienia węzłów i wykorzystania istniejącej komunikacji danych, a więc rutowanie danych), zwane dalej **cechami infrastrukturalnymi aplikacji**. Węzły sensoryczne monitorujące składowe zanieczyszczeń przemieszczane są (transport publiczny) zazwyczaj w sposób ściśle określony (rozkład jazdy komunikacji miejskiej). Ponadto informacje o możliwych odchyłkach czasowych przemieszczających się węzłów można uzyskiwać z systemu sygnalizatorów świetlnych lub innych systemów inteligentnego transportu. Co więcej, wymiana danych w sieci sensorycznej może być zrealizowana w oparciu o istniejącą infrastrukturę łączności lub z częściowym jej wykorzystaniem (infrastruktura przewodowa lub radiowa – internet, sieci komórkowe, wewnętrzne sieci intranetowe transportu publicznego, publiczne otwarte punkty dostępowe do internetu, ang. AP). Mobilne sieci sensoryczne to przede wszystkim przetwarzanie danych (nie tylko odczytów sensorycznych), tj. przetwarzanie danych związanych z lokalizacją węzłów, protokołami stosu komunikacyjnego, a także związane z bezpieczeństwem i wiarygodnością danych, nazywane w tym artykule **cechami przetwarzania aplikacyjnego**. W rozdziale tym przedstawiamy możliwe kierunki rozwoju dzisiejszych mobilnych sieci monitorujących środowisko, gdzie proponowane rozwiązania podzielone zostały na grupy związane ze specyficznymi cechami aplikacji.

1. Zahamowania w ruchu ulicznym (potocznie nazywane korkami) spowodowane przez nagromadzenie się pojazdów to jedna z **cech fizycznych aplikacji** monitorujących poziom zanieczyszczeń w miastach. Korki przekładają się bezpośrednio na lokalny wzrost poziomu zanieczyszczeń, więc nagły wzrost wartości rejestrowanych parametrów powietrza może być pomocny w lokalizowaniu zahamowań w ruchu ulicznym. Korki to również nagromadzenie się dużej ilości węzłów sensorycznych na małej powierzchni, tj. zwiększenie gęstości mocy obliczeniowej. Zakładając, że istnieją mechanizmy do wykrywania zwiększonej ilości węzłów na danym terenie i szybkiego przetwarzania rozproszonego (dystrybucja danych i zadań), takie nagromadzenie się węzłów można wykorzystać do przetworzenia dużej ilości danych w krótkim czasie, co jest efektywne energetycznie. Zwiększona wydajność energetyczna takiego przetwarzania to zredukowana droga (wieloskoki), jaką muszą przebyć dane, i równomierne wykorzystanie zasobów energetycznych fragmentu sieci zlokalizowanego w korku.

Wykrywanie trudnych do zauważenia wzorców propagacji zanieczyszczeń wymaga analizowania dużej ilości danych i zazwyczaj jedynym racjonalnym (obliczeniowo) rozwiązaniem jest zastosowanie sieci neuronowej. Realizacja sieci neuronowej na bazie sieci sensorycznej wiąże się z dużym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową i znaczną ilością danych przekazywanych między węzłami. Należy przypuszczać, że nagromadzenie węzłów w korkach może pozwolić na wydajną energetycznie implementację tymczasowej (na czas trwania korka) sieci neuronowej. Lokalne nagromadzenie węzłów może również pozwolić na efektywną (szybkość, wydajność energetyczna) aktualizację danych dla protokołów rutowania, np. przeliczenie tras (na określonym terenie) z wykorzystaniem algorytmu Dijkstra [28].

Wiarygodność informacji o jakości powietrza dostarczanych przez sieć ma istotny wpływ na poziom bezpieczeństwa mieszkańców. Poruszające się pojazdy, na których zamontowano węzły sensoryczne, pokonują często te same trasy (w tym samym lub przeciwnym kierunku), rejestrując w ten sposób dane redundantne. Dane te gromadzone są lokalnie lub przekazywane do innych węzłów. Zduplowane dane mogą zostać wykorzystane do prostej weryfikacji prawidłowości funkcjonowania węzłów sensorycznych np.: uszkodzenia węzłów, fałszowanie danych.

Z punktu widzenia zastosowania mBSS do monitorowania jakości powietrza modelowanie propagacji zanieczyszczeń jest niezmiernie ważne, gdyż pozwala na prognozowanie i wykrywanie trendów zanieczyszczeń. Model budowany jest na podstawie danych dostarczanych ze wszystkich węzłów sensorycznych. Optymalizowanie wydajności sieci sensorycznej to zazwyczaj minimalizacja zapotrzebowania energetycznego, a więc wydłużanie życia sieci. W przypadku węzłów, które przemieszczane są przez transport publiczny zakłada się, że źródło zasilania jest nieskończone. Optymalizacja może być również realizowana poprzez zwiększenie przepustowości sieci np. dzięki redukcji danych redundantnych. Zakładając, że możliwe jest zbudowanie lokalnego modelu propagacji zanieczyszczeń na trasie przemieszczającego się węzła sensorycznego (wykorzystując lokalne dane sensoryczne, względnie odczyty z węzłów z najbliższego otoczenia pojazdu), gotowy lokalny model byłby przesyłany do obserwatora, który budowałby globalny model propagacji na podstawie modeli lokalnych. Tym samym, przepustowość sieci mogłaby być istotnie zwiększona.

2. Kierunki rozwoju mBSS z wykorzystaniem cech infrastrukturalnych aplikacji. Spełnianie reżimów czasowych przez wymieniane pomiędzy węzłami dane (trzy zasadnicze grupy, tj. odczyty sensoryczne, zapytania i odpowiedzi, dane związane z funkcjonowaniem i zarządzaniem siecią) w sieciach czasu rzeczywistego stanowi o wiarygodności dostarczanych danych.

Jest to szczególnie istotne, gdyż wizualizacja obserwowanych parametrów musi mieć miejsce w czasie rzeczywistym. Przesyłanie zapytań, odpowiedzi i innych informacji realizowane jest zazwyczaj przez rutowanie (protokoły rutowania) drogą (często najkrótszą), która zapewni dostarczenie tych danych zanim stracą one swoją ważność. W sieciach statycznych do wyznaczania najkrótszych tras stosuje się często algorytm Dijkstra [28], przy czym jest to operacja czasochłonna i zmiana parametru jednej ze ścieżek wymaga ponownego przeliczenia całej sieci. Sieci mobilne charakteryzuje większa dynamika parametrów opisujących jakość ścieżek, którymi przekazywane są dane. W odpowiedzi na specyfikę mBSS zaprojektowano liczną grupę protokołów rutowania ([29]-[33]), przy czym wymagają one dalszych usprawnień, szczególnie w obszarach: 1. wiarygodności, czasu opóźnień, retransmisji pakietów danych, 2. uwzględniania charakterystyki przemieszczania się pojazdów, 3. uwzględniania pozycji pojazdów (ang. Geo cast routing). Wyznaczanie i aktualizacja ścieżek wymaga wymiany znacznej ilości danych pomiędzy węzłami. Transport publiczny porusza się po ściśle określonych trasach, a pozycja pojazdu na kolejnych etapach podróży jest znana a priori (rozkłady jazdy). Zakładając istnienie mechanizmów wykorzystujących rozkłady jazdy komunikacji miejskiej oraz systemu inteligentnego transportu (np. sygnalizatory świetlne) do funkcjonowania protokołów rutowania, możliwe byłoby zredukowanie ilości wymienianych danych, zwiększenie dokładności wyznaczania optymalnej ścieżki oraz lepsze lokalizowanie pojazdów, a tym samym sprawniejsze funkcjonowanie protokołów rutowania. Inteligentne systemy transportu (sterowanie sygnalizatorami świetlnymi, informacje dla pasażerów o spodziewanym przyjeździe autobusu/tramwaju) wykorzystują zazwyczaj własne systemy łączności, które umożliwiają komunikację radiową pomiędzy sygnalizatorami, przystankami i transportem publicznym. Istniejąca infrastruktura łączności mogłaby być wykorzystana do przekazywania danych (odczyty sensoryczne, dane dla protokołów rutowania), a tym samym przyczynić się do zwiększenia wiarygodności (redukcja retransmisji) i wydajności (zmniejszenie czasu opóźnień) mobilnej sieci sensorycznej. Nie wszystkie dane z sieci sensorycznej wymagają spełniania reżimów czasowych a przykładem są dane historyczne (często zapisywane lokalnie w pamięci węzłów w postaci zagregowanej). Zakładając, że istnieje mechanizm wartościowania danych (z punktu widzenia czasu dostarczenia), racjonalnym rozwiązaniem byłoby skonstruowanie wielowarstwowego protokołu rutowania dla danych szybkich (które muszą być dostarczone na czas) i pozostałych (powolnych) danych. Do dostarczania powolnych danych można wykorzystać mechanizm węzłów transportujących (podobny do sieci BusNet [17]), tj. dane historyczne byłyby „przewożone” od źródła do obserwatora zamiast wieloskokowej transmisji radiowej.

- 3. Przetwarzanie aplikacyjne.** Najważniejszym zadaniem sieci sensorycznych, z punktu widzenia obserwatora, jest wizualizacja danych sensorycznych i interakcja użytkownika z węzłami sensorycznymi. Protokoły aplikacyjne pozwalają na bezpośrednią interakcję użytkownika z siecią, tj. złożoność zachodzących w sieci operacji jest schowana przed użytkownikiem. Wykonywane przez sieć operacje oparte są zarówno na przetwarzaniu lokalnym (np.: kondycjonowanie odczytów sensorycznych, agregowanie danych, przetwarzanie danych dla innych węzłów, itp.), jak i rozproszonym (koordynowane przez węzeł nadrzędny). Przykładem takiego skoordynowanego przetwarzania są sieci, w których węzły organizowane są w gromady wykonujące wspólnie powierzone im zadanie (rozproszona eksploracja danych w sieci MESSAGE [25]). Przetwarzanie rozproszone pozwala na zwiększenie żywotności (dystrybucja wykorzystywania zasobów energetycznych), a także wydajności (podział zadań na wiele węzłów). Mobilne sieci charakteryzują się o wiele większą dynamiką

topografii w porównaniu do sieci stacjonarnych. Jest to jednym z wielu powodów, dla których odczyty sensoryczne są zazwyczaj przekazywane do obserwatora, a nie przetwarzane w sieci. Rozwój technologii bezprzewodowych i inteligentnych telefonów (ang. *smartphone*), a także zwiększająca się świadomość ekologiczna społeczeństwa, przyczyniają się do uczestniczenia mieszkańców w monitoringu jakości środowiska. Osobiste urządzenia przenośne niejednokrotnie przewyższają swoimi możliwościami obliczeniowymi węzły sensoryczne, a ich zwiększająca się ilość otwiera nowe możliwości dla sieci sensorycznych i przetwarzania rozproszonego. Dlatego też rozwój protokołów stosu komunikacyjnego mBSS uwzględniających przetwarzanie rozproszone powinien wyznaczać trendy rozwoju sieci mobilnych.

IV. PODSUMOWANIE

Poprawa standardu życia jest zadaniem priorytetowym w państwach rozwijających się. Jedną z przyczyn pogarszającej się rokrocznie jakości powietrza w miastach jest nieustannie zwiększająca się ilość samochodów, a problemy komunikacyjne (infrastruktura drogowa, zła organizacja ruchu, itp.) dodatkowo potęgują ten problem (korki – lokalny wzrost emitowanych zanieczyszczeń). Problem ten może być do pewnego stopnia zmniejszony dzięki wykorzystaniu inteligentnych rozwiązań zarządzania ruchem (np. sterowanie sygnalizatorami świetlnymi w zależności od natężenia ruchu). Do prawidłowego funkcjonowania inteligentnych systemów transportu niezbędne są informacje o aktualnej sytuacji na drogach. Realizowane jest to najczęściej przez pętle indukcyjne (instalowane na skrzyżowaniach), a także inne rozwiązania (np. wykorzystujące kamery wideo) zliczające poruszające się samochody. Niestety rozwiązania te nie dostarczają informacji o poziomie stężenia zanieczyszczeń na danym terenie, które jest zależne od stanu technicznego pojazdów, warunków atmosferycznych i topografii terenu. W ruchliwych częściach miasta instalowane są bazowe stacje monitorujące jakość powietrza. Dają one jednak tylko ogólny obraz poziomu zanieczyszczeń na obserwowanym terenie. Zakładając istnienie technik dostarczających dokładniejszych informacji o poziomie zanieczyszczeń i wykorzystując informacje o natężeniu ruchu, byłoby możliwe zarządzanie ruchem pojazdów w taki sposób, aby uzyskać jednoczesną redukcję poziomu zanieczyszczeń i rozdystrybuować natężenie ruchu pojazdów. Mobilne bezprzewodowe sieci sensoryczne są idealnym rozwiązaniem, które mogłyby dostarczać informacji o poziomie emitowanych zanieczyszczeń na potrzeby systemów zarządzających ruchem w mieście. Za wykorzystaniem mBSS przemawia przede wszystkim brak potrzeby poniesienia kosztów na dodatkową infrastrukturę wymiany danych, a także niski jednostkowy koszt węzła sensorycznego.

W artykule przedstawiono najnowsze rozwiązania mobilnych bezprzewodowych sieci sensorycznych wykorzystywanych do monitoringu zanieczyszczenia powietrza. 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. Mimo to zunifikowanie niektórych warstw stosu komunikacyjnego mogłoby ułatwić proces konstruowania mobilnych sieci, a tym samym zachęcić do ich stosowania. 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. Jedynym znanym projektem mBSS monitorującym środowisko i pozwalającym na pewną adaptacyjność aplikacyjną (z uwagi na stosowane źródła dostarczania danych, wykorzystywane techniki przetwarzania i komunikacji danych) jest angielski projekt MESSAGE. Należy mieć nadzieje, że rosnące zapotrzebowanie na monitoring środowiska będzie sprzyjać powstawaniu nowoczesnych rozwiązań mBSS.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dz. U. z 2010 r. nr 239, Ustawa z dnia 25 listopada 2010 r. o zmianie ustawy o Inspekcji Ochrony Środowiska oraz ustawy o działach administracji rządowej.
- [2] <http://www.itspolska.pl?page=11>, ITS Polska – Inteligentne Systemy Transportowe, „Czym jest ITS?”, 2011.
- [3] <http://sojp.wios.warszawa.pl/index.php?page=opis-systemu>, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie, „Opis systemu”, 2011.
- [4] B. Hull, V. Bychkovsky, Y. Zhang, K. Chen, M. Goraczko, et al., „CarTel: A Distributed Mobile Sensor Computing System”, in *Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2006)*, 2006, pp. 125-138.
- [5] F. Gil-Castiñeira, F. J. González-Castaño, R. J. Duro, and F. Lopez-Peña, „Urban Pollution Monitoring through Opportunistic Mobile Sensor Networks Based on Public Transport”, in *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSMA 2008)*, 2008, pp. 70-74.
- [6] K. D. Zoysa and C. Keppitiyagama, „Poster Abstract: Busnet - A Sensor Network Built Over a Public Transport System”, in *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 2007)*, pp. 9-10, 2007.
- [7] G. Varela, A. Paz-Lopez, R. J. Duro, F. Lopez-Peña, and F. J. Gonzalez-Castao, „An integrated system for urban pollution monitoring through a public transportation based opportunistic mobile sensor network”, in *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2009)*, 2009, pp. 148-153.
- [8] W. Hedgecock, P. Völgyesi, A. Ledeczki, X. Koutsoukos, A. Aldroubi, et al., „Mobile air pollution monitoring network”, in *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC '10)*, 2010, pp. 795-796.

- [9] N. Maisonneuve, M. Stevens, M. E. Niessen, P. Hanappe, and L. Steels, „Citizen noise pollution monitoring”, in *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government (dg.o '09)*, 2009, pp. 96-103.
- [10] „Environmental Monitoring with Mobile Phones”, *Wireless Technology for Social Change Trends in Mobile Use by NGOs Environment*, vol. 2005, pp. 52-54, 2006.
- [11] F. Chiti and R. Fantacci, „Urban Microclimate and Traffic Monitoring with Mobile Wireless Sensor Networks”, in *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*, G. V. Merrett and Y. Kheng, Eds. InTech, 2010, pp. 1-14.
- [12] K. Aberer, S. Sathé, D. Chakraborty, A. Martinoli, G. Barrenetxea, et al., „OpenSense: open community driven sensing of environment”, in *Proceedings of the ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming (IWGS '10)*, 2010, pp. 39-42.
- [13] F. Lopez-Peña, G. Varela, A. Paz-Lopez, R. J. Duro, and F. J. González-Castaño, „Public Transportation Based Dynamic Urban Pollution Monitoring System”, *Sensors and Transducers Journal*, vol. 8, pp. 13-25, Feb. 2010.
- [14] <http://bioinf.ncl.ac.uk/message/>, MESSAGE – Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments, „MESSAGE Project flier”, 2011.
- [15] P. M. Aoki, R. J. Honicky, A. Mainwaring, C. Myers, E. Paulos, et al. „A vehicle for research: using street sweepers to explore the landscape of environmental community action”, in *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems (CHI '09)*, 2009, pp. 375-384.
- [16] K. Romer, F. Mattern, „The design space of wireless sensor networks”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 54-61, Dec. 2004.
- [17] K. D. Zoysa, C. Keppitiyagama, G. P. Seneviratne, and W. W. A. T. Shihan, „A public transport system based sensor network for road surface condition monitoring”, in *Proceedings of the 2007 workshop on Networked systems for developing regions (NSDR '07)*, 2007, pp. 1-6.
- [18] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, et al., „The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring”, in *Proceeding of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '08)*, 2008, pp. 29-39.
- [19] P. Völgyesi, A. Nádas, X. Koutsoukos, and Á. Lédeczi, „Air Quality Monitoring with SensorMap”, in *Proceedings of the 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2008)*, 2008, pp. 529-530.
- [20] P. Rudman, S. North, and M. Chalmers, „Mobile Pollution Mapping in the City”, in *Proceedings of the UK-UbiNet workshop on eScience and ubicomp*, p. 5, 2005.
- [21] S. Santini, B. Ostermaier, and B. Adelman, „On the use of sensor nodes and mobile phones for the assessment of noise pollution levels in urban environments”, in *Proceedings of the 6th international conference on Networked sensing systems (INSS'09)*, 2009, pp. 31-38.
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/PC/104>, „PC/104”.
- [23] http://soekris.eu/shop/net4801_en/, „NET4801”.
- [24] <http://bioinf.ncl.ac.uk/message/>, MESSAGE – Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments, „e-Science Architecture and Computing Infrastructure”, 2011.
- [25] <http://bioinf.ncl.ac.uk/message/>, MESSAGE – Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments, „Distributed Clustering for Air Pollution Pattern Recognition”, 2011.
- [26] <http://www.xbow.com/>, „Crossbow Technology”, 2011.
- [27] <http://www.libelium.com/>, „Libelium”, 2011.
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm, „Dijkstra’s algorithm”, 2011.

- [29] S. Kohli, B. Kaur, and S. Bindra, „A comparative study of Routing Protocols in VANET”, *RIMT-Institute of Engineering and Technology*, 2010, p. 4.
- [30] Y.-W. Lin, Y.-S. Chen, and S.-L. Lee, „Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Future Perspectives”, *Journal Of Information Science And Engineering*, vol. 26, pp. 913-932, 2010.
- [31] K. C. Lee, U. Lee, and M. Gerla, „Survey of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks”, in *Advances in Vehicular Ad-Hoc Networks: Developments and Challenges*, M. Watfa, Ed. New York, NY, USA: Hershey, pp. 149-170, 2010.
- [32] M. Zhang and R. S. Wolff, „Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in Rural Areas”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 11, pp. 126-131, Nov. 2008.
- [33] F. Li and Y. Wang, „Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 12-22, Feb. 2008.

PIOTR PAWEŁ CZAPSKI

AIR POLLUTION MONITORING IN URBAN AREAS USING WIRELESS SENSOR NETWORKS – STATE OF THE ART

Abstract

Technological progress in the area of sensor networks allows manufacturing centimetre-scale sensor nodes that may cost less than a few USD per piece. Low price and small size, combined with modern wireless and data processing techniques (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. One of the application of mobile sensor networks is air pollution monitoring. This technique is still in its infancy and poses many technical problems, however, growing popularity is found both in the academics and commercial area. This article provides an overview of recent developments in the field of air pollution monitoring using mobile wireless sensor networks, and indicates possible ways of development of these networks.