

Bezprzewodowe sieci czujników

Sieci są wszędzie, otaczają nas, są w nas samych. Ludzkość od zarania dziejów tworzyła sieci społeczne. Z czasem stawały się one coraz bardziej złożone i rozległe. To one w ogromnym stopniu zdecydowały o przetrwaniu naszego gatunku. W miarę rozwoju techniki człowiek zaczął budować sieci, które bezpośrednio łączyły nie ludzi, lecz inteligentne urządzenia, a nowoczesne sieci komputerowe objęły swoim zasięgiem cały świat.

Intensywny rozwój sieci komputerowych jest jednym ze znaków współczesnego czasu. Jest to wynik ogromnego postępu w dziedzinie sprzętu obliczeniowego, oprogramowania, technik transmisji danych oraz rosnących potrzeb aplikacyjnych stawianych przez badaczy, inżynierów, ekonomistów, socjologów, twórców kultury i innych.

Niezwykle istotny wpływ na rozwój systemów sieciowych miało upowszechnienie się komunikacji bezprzewodowej i zastosowanie jej do łączenia urządzeń przetwarzających dane. Vi/ ten sposób powstały bezprzewodowe sieci komputerowe, które zrewolucjonizowały świat. Potrzeba było około wieku - komunikacja bezprzewodowa to odkrycie wcześniejsze, ale pierwsze komputery pojawiły się w XX wieku.

Początki prac nad komunikacją bezprzewodową sięgają XIX wieku, kiedy to włoski fizyk i konstruktor Guglielmo Marconi po raz pierwszy przedstawił urządzenia umożliwiające łączność bezprzewodową ze statkami żeglującymi po kanale La Manche. Mimo licznych wątpliwości, czy słusznie zasługi w opracowaniu metody transmisji sygnałów elektrycznych są przypisywane Marconiemu, a nie serbskiemu inżynierowi Nikoli Tesli, odkrycie z 1897 otworzyło drogę do prawdziwej rewolucji w komunikacji pomiędzy ludźmi. Za swoje odkrycie Marconi otrzymał w roku 1909, wraz z Karlem Braunem, Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

To krótkie wspomnienie historyczne jest ukłonem w stronę inżynierów i naukowców z Europy, jako że dalszy rozwój bezprzewodowej komunikacji dokonał się, w głównej mierze, dzięki pracom prowadzonym po drugiej stronie Atlantyku. Pierwszą bezprzewodową siecią komputerową była sieć ALOHANet opracowana w roku 1971 na Uniwersytecie Hawajskim. W ramach tej sieci połączono, bez wykorzystania łączności telefonicznej, siedem komputerów działających na czterech wyspach archipelagu.

Od tego wydarzenia musiało jednak upłynąć kolejnych kilkanaście lat, zanim komputerowe sieci bezprzewodowe zaczęły być powszechnie dostępne. Kolejną kluczową datą jest rok 1997

Untethered micro sensors will go anywhere and measure anything – traffic flow, water level, number of people walking by, temperature. This is developing into something like a nervous system for the earth, a skin for the earth. The world will evolve this way.

— **Horst Störmer**
Nobel Prize, Physics (1999)

i pojawienie się standardu komunikacji bezprzewodowej IEEE 802.11 [23], doskonale dzisiaj znanego ogromnej rzeszy użytkowników komputerów, a ostatnimi czasy również urządzeń komputeropodobnych, jako że pierwsza dekada trzeciego tysiąclecia przyniosła kolejną zmianę kulturową w postaci smartfonów, tabletów i całej gamy innych urządzeń umożliwiających stały dostęp do Internetu, dzięki sieciom komórkowym i sieciom WiFi (IEEE 802.11). W kolejnych latach, w odpowiedzi na potrzeby różnych zastosowań pojawiły się następujące standardy, w tym obecnie powszechnie używane IEEE 802.15.13 (Bluetooth), niskoenergetyczny standard IEEE 802.15.4 oraz ZigBee4. Standardy z grupy IEEE 15.4 są przeznaczone do komunikacji mniejszych urządzeń, w przypadku których mogą wystąpić ograniczenia zasobów energetycznych.

Równocześnie, już pod koniec XX wieku, można było zaobserwować wyraźny wzrost i rozpowszechnienie użycia specjalizowanych systemów komputerowych stanowiących integralną część technicznych urządzeń różnego przeznaczenia, tzw. systemów wbudowanych. Dobrym przykładem są tu samochody, w których komputer pokładowy był w latach dziewięćdziesiątych XX wieku rzadkością, a obecnie jest powszechnie stosowany. Rozwój techniki mikroprocesorowej, w tym znacznie szybsze zwiększanie poziomu niezawodności i mocy obliczeniowej w stosunku do wzrostu cen, umożliwiła rozbudowę funkcji realizowanych przez te systemy. Wzrosły możliwości przetwarzania danych pochodzących z różnych źródeł. Wąskim gardłem stała się sieć przesyłowa. Stosowanie tradycyjnych, kablowych połączeń urządzeń pomiarowych z węzłem odbierającym dane jest niezwykle uciążliwe w sytuacji, gdy liczba tych połączeń istotnie się zwiększa. Obecnie jedynym, narzucającym się rozwiązaniem jest wykorzystanie komunikacji bezprzewodowej.

Wprowadzenie bezprzewodowych połączeń do systemów pomiarowych przyczyniło się do powstania nowych lub znacznego rozszerzenia zakresu już istniejących rozwiązań i ich zastosowań. Na przykład aranżacja współczesnego budynku biurowego jest dość często zmieniana przez użytkowników, zgodnie z trendami mody lub nowymi potrzebami. Sprawne i oszczędne działanie systemu klimatyzacji bardzo istotnie zależy od rozlokowania czujników pomiarowych, które

powinno być dopasowane do konfiguracji barier przepływu powietrza. Trudno jest zbudować skuteczną sieć pomiarową stosując tradycyjną łączność kablową w sytuacji częstych zmian położenia ścian działowych. Zazwyczaj czujniki, pomimo zmian wprowadzonych w budynku, pozostają tam, gdzie zainstalowano je przy początkowej aranżacji budynku, nie spełniają więc swojej roli. Zbierane pomiary stają się bezwartościowe, pracownicy narzekają na złe warunki pracy, przy jednoczesnym wzroście kosztów eksploatacji budynku. Zastosowanie jako medium transportowego fal radiowych rozwiązuje problem.

Przedstawione przykłady zastosowania komunikacji radiowej pokazują szybko rosnące zainteresowanie budową bezprzewodowych systemów, których elementami są urządzenia pomiarowe. Sieci czujników, jak większość wynalazków z zakresu komunikacji radiowej, zawdzięczają oczywiście swoje powstanie aplikacjom wojskowym, w tym przypadku związanym bezpośrednio z obserwacją pola walki. Dzisiaj sieci tego typu znajdują wiele zastosowań cywilnych związanych z monitoringiem procesów przemysłowych, stanu obiektów budowlanych, obserwowaniem środowiska naturalnego, badaniem zachowania się zwierząt itd. Właśnie tego typu bezprzewodowym sieciom komputerowym, które w działaniu wykorzystują głównie standardy komunikacji bezprzewodowej z grupy 802.15, jest poświęcona nasza książka.

Jak już wspomnieliśmy, pierwsze zastosowania tego typu sieci są opisane w literaturze anglojęzycznej, stąd używana powszechnie nazwa sieć WSN (ang. wireless sensor network). W literaturze polskojęzycznej mówimy o bezprzewodowych sieciach sensorowych czy bezprzewodowych sieciach czujników. Jest tu pewien skrót myślowy - pod pojęciami sensor czy czujnik kryją się pełne, komunikujące się drogą radiową urządzenia wyposażone w jeden lub więcej różnych czujników. Stąd w niniejszej książce zazwyczaj mówimy o sieciach tworzonych przez urządzenia pomiarowe, ale tam gdzie nie prowadzi to do nieporozumień, zamiast urządzenia pomiarowe używamy słowa sensor.

Liczne i różnorodne zastosowania bezprzewodowych sieci sensorowych spowodowały powstanie wielu jej odmian. To co je łączy to wspomniany już fakt; iż zawsze jest to zbiór wielu rozproszonych autonomicznych urządzeń mierzących wybrane właściwości fizyczne i środowiskowe, które następnie są gromadzone i przesyłane z wykorzystaniem komunikacji bezprzewodowej. Wracając do genezy sieci czujników, termin wireless sensor network został po raz pierwszy użyty pod koniec poprzedniego wieku w artykule [25] opublikowanym w 1996 roku przez grupę badaczy z Berkeley, USA. Obecnie dekada w dziedzinie komputeryzacji to praktycznie cała epoka. Najszybszym procesorem dla komputerów stacjonarnych był wówczas procesor Pentium taktowany zegarem 150 MHz, a sieci komórkowe w Polsce rozpoczynały dopiero swoją działalność. Dwie pierwsze sieci komórkowe uruchomiono we wrześniu 1996 roku. Jak dużo się zmieniło przez ten okres, widać choćby na przykładzie wspomnianych sieci komórkowych, stosowanych tam urządzeń i technologii.

W tym kontekście intrygujący jest przekaz zawarty w pracy, która w lutym 2003 roku ukazała się na łamach serwisu technologyreview.com, wydawanego przez Massachusetts Institute of Technology (MIT). W artykule na temat nowych technologii, które zmienią świat (ang. 10 Emerging Technologies That Will Change the World) na pierwszym miejscu wśród technologii przyszłości zostały wymienione bezprzewodowe sieci sensorowe. Cytowany w artykule profesor Uniwersytetu w Berkeley David Culler uważał wręcz, że tego typu sieci mogą stać się protoplastami nowej komputeryzacji. (ang. low-power wireless sensor networks are spearheading what the future of computing is going to look like).

Obserwując otaczający nas świat, można uznać, że w ogólności prognoza była słuszna. Ale dopiero rewolucja w postaci upowszechnienia się przeróżnych, współpracujących ze sobą, urządzeń przenośnych z dostępem do Internetu i chmur obliczeniowych stworzyła szanse na szerokie zastosowanie bezprzewodowych sieci sensorowych. Za tą szansą kryje się bardzo modne ostatnimi czasy pojęcie „Internet rzeczy” czy „Internet przedmiotów” (ang. Internet of Things). Towarzyszy mu idea wszechobecnego przetwarzania danych (ang. ubiquitous computing), której celem jest włączenie technik komputerowych w środowisko człowieka i uczynienie ich niewidocznymi. Przyjmuje się, że oferowane usługi wykorzystują na bieżąco informacje o stanie użytkownika oraz jego otoczenia, ale nie wymagają od niego świadomego zaangażowania. Aktualny stan techniki komputerowej pozwala w pełni na budowę Internetu przedmiotów. Obecnie do Internetu podłączone są miliardy urządzeń - laptopów, komputerów stacjonarnych, tabletów, smartfonów itd. Rosną możliwości małych urządzeń pomiarowych, które zaczynają odgrywać coraz istotniejszą rolę w procesie przetwarzania danych (ang. edge computing). Jakże bardzo kontrastuje to ze słowami prezesa firmy IBM Thomasa Watsona wypowiedzianymi w latach czterdziestych ubiegłego stulecia. Przewidywał on światowe zapotrzebowanie na co najwyżej pięć komputerów. Znacznie celniej szacował światowe zapotrzebowanie na urządzenia komputerowe Raja Jurdak z australijskiego instytutu badawczego CSIRO5, który wspominał o zapotrzebowaniu na pięć komputerów, ale na mieszkańca naszej planety rocznie.

Oczywiste jest już, że wchodzimy w nową fazę rozwoju Internetu, który aktualnie rośnie o wiele szybciej niż w ostatnich dziesięcioleciach. Coraz więcej urządzeń codziennego użytku potrafi łączyć się z Internetem i sobą nawzajem. Samochody, roboty fabryczne czy automaty z napojami są „inteligentne” dzięki małym, wbudowanym procesorom komputerowym i czujnikom. Ten inteligentniejszy, połączony świat ma potencjał, aby całkowicie zmienić sposób życia ludzi. Laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki z 1999 roku Horst Störmer prognozował, w wywiadzie dla Business Week z 1999 roku, że przyszłość naszej planety jest nieodłącznie związana z wszechobecnymi czujnikami, które będą stanowić pewnego rodzaju system nerwowy Ziemi.

W tę nieco futurystyczną wizję, która de facto staje się rzeczywistością, doskonale wpisują się bezprzewodowe sieci

sensorowe, za którymi kryje się owa inteligencja. To dzięki sieci czujników możemy mówić o inteligentnych domach (ang. smart houses), inteligentnych miastach (ang. smart cities), czy inteligentnych sieciach przesyłowych (ang. smart metering).

Niniejsza książka jest pierwszą w języku polskim monografią wprowadzającą czytelnika w świat bezprzewodowych sieci stworzonych przez niewielkich rozmiarów urządzenia pomiarowe. Jest ona rezultatem doświadczeń autorów, związanych z prowadzeniem prac badawczych i dydaktyki w obszarze nowoczesnych sieci i systemów komputerowych. Poruszana tematyka, sposób opisu i rozumowania oraz język powodują, że książka jest adresowana głównie do osób z wykształceniem technicznym. Chcąc dotrzeć do szerszego grona odbiorców zainteresowanych zdobyciem wiedzy w zakresie sieci sensorowych, staraliśmy się przygotować materiał w taki sposób, aby do zrozumienia tekstu była potrzebna jedynie elementarna wiedza z zakresu matematyki, telekomunikacji i informatyki. W zamyśle autorów książka ma być przewodnikiem po podstawowych mechanizmach i metodach stosowanych przy projektowaniu bezprzewodowych sieci sensorowych oraz umożliwić czytelnikowi samodzielne zastosowanie tych technik. Nie obejmuje ona oczywiście całego spektrum zagadnień w rozważanej tematyce. Koncentrujemy się na ogólnym przedstawieniu charakterystyki sieci sensorowej tworzonej przez stacjonarne i mobilne urządzenia pomiarowe. Podejmujemy próbę jej modelowania, omawiamy wybrane rozwiązania z zakresu teleinformatyki, w tym protokoły komunikacyjne, algorytmy oszczędnego zarządzania zasobami energetycznymi oraz techniki lokalizacji i grupowania węzłów. W minimalnym stopniu poruszamy wątek sprzętu i oprogramowania. Prezentacja aktualnie dostępnych urządzeń i przykładów ich zastosowania to materiał na oddzielną monografię. Nie poruszamy zagadnień bezpieczeństwa. Problematyka cyberbezpieczeństwa, w tym sieci bezprzewodowych, jest omawiana w licznych pracach poświęconych bezpieczeństwu sieci komputerowych.

Książka składa się z pięciu części. Część pierwsza obejmuje trzy rozdziały. Rozdział 2 to wprowadzenie w obszar pojęć i problemów z dziedziny samoorganizujących się sieci stworzonych w trybie ad hoc. Omawiamy w nim właściwości tego typu systemów oraz problemy związane z tworzeniem i funkcjonowaniem rzeczywistych sieci, które nie wykorzystują stałej infrastruktury komunikacyjnej. Przedstawiamy i definiujemy podstawowe modele sieci ad hoc, tj. bezprzewodową sieć prywatną (WPAN), sieć sensorową (WSN), sieć elementów aktywnych (WSAN) oraz mobilną sieć ad hoc (MANET). W rozdziale 3 omawiamy architekturę sieci sensorowej, zwracając szczególną uwagę na właściwości tworzących ją urządzeń stanowiących węzły sieci oraz ich umiejscowienie w systemach Internetu rzeczy. Rozdział kończy kilka przykładów zastosowania sieci sensorowych, w tym projektów, w których uczestniczyliśmy.

Część druga książki obejmująca kolejne cztery rozdziały jest poświęcona zagadnieniom modelowania i symulacji sieci ad hoc. Prezentujemy modele sieci i węzła pomiarowego. Szczególną uwagę zwracamy na modelowanie transmisji

radiowej. Przedstawiamy również krótki przegląd modeli ruchu stosowanych w badaniach i projektowaniu sieci mobilnych. Na zakończenie tej części prezentujemy krótki przegląd popularnych środowisk oprogramowania do symulacji.

W części trzeciej koncentrujemy się na platformach sprzętowych do tworzenia bezprzewodowych sieci sensorowych oraz oprogramowaniu. Ze względu na licznosc dostępnego oprogramowania oraz urządzeń ograniczyliśmy naszą prezentację do wybranych, powszechnie stosowanych rozwiązań.

Protokołom i algorytmom komunikacyjnym jest poświęcona czwarta część książki. Ze względu na ograniczenia zasobów dostępnych w sieciach sensorowych niezwykle istotna jest energooszczędna transmisja, stąd uwaga koncentruje się na różnych technikach oszczędzania energii. Rozważane są podejścia zakładające grupowanie węzłów, sterowanie ich aktywnością i poziomem mocy nadawanego sygnału. Dwa ostatnie rozdziały tej części są poświęcone protokołom trasowania oraz energooszczędnym realizacjom protokołu MAC.

Książkę kończy prezentacja różnych podejść do lokalizacji węzłów sieci. Rozpoczynamy od opisanie technik optymalnego pokrywania przestrzeni roboczej przez urządzenia pomiarowe. Następnie koncentrujemy się na algorytmach i systemach do lokalizacji rozmieszczanych przypadkowo czujników. Jest to obszerny rozdział, w którym staramy się przedstawić w miarę możliwości pełne spektrum rozwiązań, od najprostszych służących do lokalizacji względnej, po techniki obliczania współrzędnych położenia w środowisku działania sieci.

W książce zamieszczone są przykłady umożliwiające zrozumienie prezentowanego materiału oraz zastosowanie go w praktyce.

2.1 Charakterystyka sieci ad hoc

W rozdziale 1 przedstawiliśmy krótkie wprowadzenie w zagadnienia komunikacji bezprzewodowej oraz nowoczesnych bezprzewodowych sieci komputerowych, zwracając uwagę na aktualny stan technologii, zastosowania i perspektywy rozwoju. W ostatnich dziesięcioleciach obserwujemy lawinowo narastające wykorzystanie komunikacji radiowej do przesyłania informacji. Dotyczy to nie tylko telefonii komórkowej, ale również takich urządzeń jak drukarki, laptopy, tablety, smartfony i inne.

Większość z obecnie używanych rozwiązań stosowanych w komunikacji bezprzewodowej zakłada konieczność wykorzystania zewnętrznej, stałej infrastruktury sieciowej. Urządzenia umożliwiające komunikację bezprzewodową na danym obszarze są drogie, często trudne w instalacji, ponadto stacje znajdujące się poza zasięgiem infrastruktury sieciowej nie są zdolne do przesyłania danych. Zagadnienia zapewnienia łączności bezprzewodowej pomiędzy urządzeniami bez wykorzystania stałej infrastruktury sieciowej cieszą się ogromnym zainteresowaniem naukowców i inżynierów na całym świecie. Efektem są intensywne prace badawcze i nowe wdrożenia.

Dotyczą one tworzenia nowoczesnych systemów sieciowych, jakimi są bezprzewodowe sieci tworzone w trybie ad hoc.

W bezprzewodowej sieci ad hoc wszystkie urządzenia stanowiące węzły sieci są równoprawne i mogą komunikować się wzajemnie, rywalizując o dostęp do kanału radiowego. W ogólnym przypadku są to urządzenia heterogeniczne, różniące się architekturą sprzętową, zainstalowanym oprogramowaniem, zestawem czujników itd.

Niezwykle istotną właściwością odróżniającą sieć typu ad hoc od innych systemów stosujących transmisję bezprzewodową jest zdolność do samoorganizacji - urządzenia same organizują się w sieć. Sieć ad hoc należy więc do grupy systemów samoorganizujących się.

Poświęćmy nieco uwagi zagadnieniu samoorganizacji i systemom mającym taką zdolność. Wiele układów naturalnych potrafi się organizować. Jako pierwsze przychodzą na myśl systemy biologiczne, takie jak roje czy stada organizmów żywych adaptujące się do warunków panujących w środowisku, w którym funkcjonują. Tego typu zdolności obserwujemy również analizując związki chemiczne, galaktyki, planety itd. Sformułujmy definicję samoorganizacji [27].

Samoorganizacja

Samoorganizacja to proces, w którym kształt, struktura przestrzenna lub zachowanie złożonego systemu czy układu wyłaniają się jako rezultat wzajemnych, spontanicznych oddziaływań między tworzącymi go komponentami, a reguły określające te oddziaływania są ustalane lokalnie, bez odwoływania się do globalnego wzorca charakterystycznego dla tego systemu oraz presji i ingerencji spoza systemu.

Istotą samoorganizacji jest więc ewolucja systemu z wytworzeniem jakościowo nowej formy czy zachowania bez udziału wymuszeń zewnętrznych. Podstawowym skutkiem jest powstawanie właściwości i zjawisk emergentnych, czyli takich, jakich nie mają poszczególne elementy składowe, ale które pojawiają się po złożeniu tych elementów w zorganizowany układ. Reprezentują one cechy systemu jako całości, a nie cechy jego poszczególnych elementów składowych. Badacze samoorganizacji poszukują ogólnych reguł dotyczących wzrostu i ewolucji struktur systemowych, kształtów, jakie mogą przyjmować, czy globalnych zachowań złożonych systemów. Wiele prac koncentruje się na rozwijaniu metod przewidywania zmian organizacji układu spowodowanych zmianą komponentów systemu. Autorzy pracy [39] zwracają uwagę na potrzebę rozróżnienia systemów samoorganizujących się (ang. self organized) od systemów, których komponenty, w wyniku wzajemnych interakcji, tworzą struktury uporządkowane (ang. self-ordered). Słowo organizowanie się (ang. organization) oznacza coś znacznie więcej niż tylko doprowadzenie do osiągnięcia struktury systemu optymalnej z punktu widzenia realizowanych celów.

W przypadku systemów dysponujących umiejętnością samoorganizacji rezultatem wzajemnych oddziaływań elementów systemu jest nie tylko uporządkowana struktura. System jako

całość uzyskuje cechy typowe dla organizacji, tj. spójność i możliwość działania jako jeden twór. Należy w tym miejscu wspomnieć, że każdy system działa w pewnym środowisku i nie mamy gwarancji, że zachowa właściwość samoorganizacji w dowolnych warunkach. W przypadku systemów fizycznych problematyczne może być również określenie globalnego celu działania. W zastosowaniach technicznych problem ten zazwyczaj nie występuje. Cel działania systemu jest określony przez projektanta.

Podsumowując, z przedstawionej powyżej definicji samoorganizacji wynikają trzy podstawowe cechy systemów wykazujących tę właściwość.

1. System jest zbudowany z jednostek (komponentów) reagujących na lokalne bodźce.
2. Jednostki działają wspólnie, dzieląc się zadaniami.
3. System jako całość dąży do osiągnięcia celu lub celów w sposób efektywny.

Powyższe właściwości systemu mogą wystąpić, jeśli są spełnione następujące warunki:

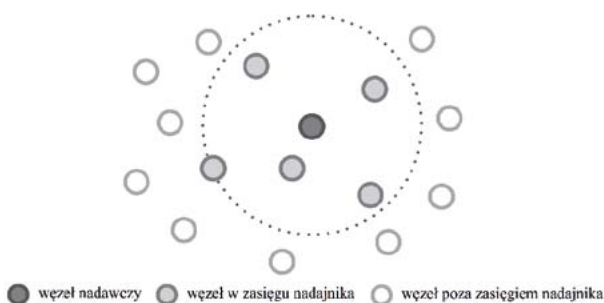
- istnieją wejścia oraz wyjścia systemu,
- system jest obserwowalny (możliwy jest pomiar wielkości wyjściowych),
- został sformułowany cel lub cele działania systemu,
- zmiana wejść danej jednostki oraz stanu innych jednostek powoduje zmianę stanu tej jednostki,
- nie jest możliwe równie efektywne osiągnięcie celu globalnego samodzielnie przez jakąkolwiek jednostkę lub wydzieloną grupę jednostek,
- system jako całość osiąga cel w sposób najefektywniejszy i/lub dokładny w środowisku, w którym działa.

W literaturze opisywanych jest wiele różnych środowisk, w których obiekty występujące w tych środowiskach stosują różne metody samoorganizacji. Naturalne jest wskazanie na wspomniane już liczne systemy biologiczne, dla których w latach sześćdziesiątych XX wieku prowadzono pierwsze obserwacje i badania zachowań reprezentujących je jednostek [27]. Poczynione obserwacje natury starano się wykorzystać i zaadaptować w systemach technicznych [45]. Towarzyszył temu rozwój rozproszonych systemów sterowania opartych na paradygmacie kooperacji autonomicznych jednostek decyzyjnych operujących ograniczoną wiedzą o otoczeniu. Okazało się, że zaproponowane techniki zdecentralizowanego sterowania złożonymi systemami, w tym o strukturze sieci, gdzie realizowana jest komunikacja międzywęzłowa, charakteryzują właściwości typowe dla samoorganizujących się systemów występujących w naturalnym środowisku. Stąd samoorganizacja od dawna była rozważana w sieciach teleinformatycznych. Niemniej jednak pewnym problemem w przypadku klasycznych sieci o stałej strukturze jest częste wykorzystywanie globalnych tablic trasowania (routing tables), co pociąga za sobą problemy ze skalowalnością. Celem prac inżynierów było zaproponowanie takich rozwiązań, które umożliwiałyby podjęcie decyzji realizującej globalny cel, nie dysponując globalną wiedzą o systemie i środowisku pracy. Naturalne było zastosowanie wspomnianych rozwiązań do sieci o dynamicznej strukturze, wykorzystujących komunikację ad hoc.

Umiejętność samoorganizacji jest niezwykle istotną i pożądaną cechą w przypadku, gdy zachodzi potrzeba budowy układu z wielu małych, heterogenicznych urządzeń o ograniczonych zasobach, które spontanicznie reagują na zdarzenia i wymieniają między sobą dane drogą radiową. To właśnie samoorganizacja pozwala na budowę skalowalnych sieci charakteryzujących się znaczną dostępnością oraz odpornością na uszkodzenia [47, 171]. Samoorganizujące się sieci w łatwy, naturalny sposób adaptują się do zmian zachodzących w środowisku pracy, dostosowując swoją strukturę tak, aby było możliwe wykonanie postawionych przed nimi zadań.

Jest to realizowane przez wzajemne oddziaływanie na siebie urządzeń, które w sposób autonomiczny, bez jakiegokolwiek centralnego sterowania organizują się w jeden system. Urządzenia wykorzystują jedynie wiedzę o swoim otoczeniu, adaptują się do środowiska, w którym działają, dokonują w nim zmian, a tym samym oddziałują na pozostałe elementy sieci.

Omówiliśmy jedną z podstawowych właściwości bezprzewodowych sieci tworzonych w trybie ad hoc, jaką jest zdolność do samoorganizacji i adaptacji. Kolejną istotną cechą jest sposób wzajemnego komunikowania się urządzeń, czyli węzłów sieci. Jako medium transportowe stosuje się w tym przypadku promieniowanie elektromagnetyczne, najczęściej fale radiowe. Standardem dla technologii sieciowych wykorzystujących do komunikacji fale radiowe jest rodzina protokołów 802.11 (802.11a, 802.11b, 802.11g), Bluetooth (IEEE 802.15.1) oraz niskoenergetyczny IEEE 802.15.4. W sieciach ad hoc zakłada się, że urządzenia będące w zasięgu radiowym komunikują się ze sobą bezpośrednio (ang. peer-to-peer). Ze względu na ograniczony zasięg komunikacji (rys. 2.1) oraz niską przepustowość łączy i słabą jakość transmisji dominuje schemat komunikacji wieloskokowej (ang. multi-hop). Gromadzone i wstępnie przetworzone dane są więc przesyłane do odbiorcy z wykorzystaniem węzłów pośredniczących. Transmisja multi-hop umożliwia dostarczanie komunikatów nawet do bardzo odległych urządzeń odbiorców oraz pozwala na równoważenie obciążeń węzłów, a tym samym równomierne zużywanie ich zasobów energetycznych. Niepożądanym skutkiem ubocznym jest niestety obniżenie jakości transmisji. Im więcej węzłów pośrednich, tym większa szansa gubienia pakietów.



Rys. 2.1. Ograniczony zasięg transmisji w sieciach ad hoc

Architektura sieci ad hoc jest zawsze dostosowana do wymagań wynikających z jej przeznaczenia oraz przyjętej technologii. W praktycznych zastosowaniach można spotkać różne rozwiązania. Budowane są sieci ad hoc, które mogą wykorzystywać elementy stacjonarne, na przykład stacje dostępowe sieci (ang. access points) lub takie, w których wszystkie funkcje są realizowane bez wsparcia stałej infrastruktury sieciowej. W obu rozwiązaniach nie ma ograniczeń na liczbę podłączanych urządzeń.

Na koniec ostatnia właściwość sieci ad hoc - mobilność. W ogólnym przypadku przyjmuje się, że urządzenia tworzące sieć mogą się przemieszczać w przestrzeni w miarę upływu czasu i nie jest zazwyczaj gwarantowana bezpośrednia łączność pomiędzy każdą parą węzłów. Ruch może być wywołany przez środowisko, w którym działa sieć (np. woda, powietrze, zwierzęta), czyli urządzenia są przenoszone i urządzenie nie decyduje o kierunku i szybkości przemieszczania się. W innych zastosowaniach urządzenia są umieszczane na poruszających się pojazdach i same decydują o sposobie poruszania się (np. wyposażone w czujniki roboty czy pojazdy).

Podsumowując przedstawione powyżej rozważania, postaramy się sformułować, w miarę możliwości zwartą i kompletną, definicję bezprzewodowej sieci ad hoc.

Bezprzewodowa sieć ad hoc

Bezprzewodowa sieć typu ad hoc to sieć o zdecentralizowanej strukturze, zbudowana z heterogenicznych, zazwyczaj mobilnych urządzeń, które autonomicznie organizują się w sieć. Do przekazywania danych nie jest wymagane istnienie zewnętrznej infrastruktury sieciowej, nie występują punkty zarządzające. Urządzenia sieci będące w zasięgu radiowym komunikują się ze sobą bezpośrednio. Mogą one pełnić rolę zarówno terminala końcowego, jak i stacji pośredniczącej w transmisji do innych węzłów sieci.

2.2. Klasyfikacja sieci ad hoc

W poprzednim podrozdziale omówiliśmy właściwości sieci ad hoc, które decydują o jej specyficznym charakterze oraz sformułowaliśmy definicję tego typu sieci. Pojawiające się nowe rozwiązania w tym obszarze to efekt licznych prac prowadzonych przez centra badawczo-rozwojowe korporacji i firm, instytuty badawcze i ośrodki uniwersyteckie. Prace te ewoluują w różnych kierunkach, czego wynikiem są różne aplikacje sieci ad hoc. W niniejszej książce ograniczymy się do krótkiego omówienia kilku wybranych praktycznych realizacji:

- bezprzewodowa sieć prywatna (ang. wireless personal area network - WPAN),
- bezprzewodowa sieć sensorowa (ang. wireless sensor network - WSN),
- bezprzewodowa sieć sensorów i elementów wykonawczych (ang. wireless sensor actuator network - WSAN),
- sieć mobilna ad hoc (ang. mobile ad hoc network - MANET).

2.2.1. Bezprzewodowa sieć prywatna (WPAN)

Bezprzewodowa sieć prywatna WPAN (wireless personal area network) to niewielkich rozmiarów sieć łącząca zazwyczaj przenośne urządzenia różnych typów, takie jak przenośne komputery (laptopy, netbooki) oraz urządzenia komputeropodobne do odbierania i przetwarzania informacji, na przykład tablety, telefony komórkowe i inne. Tego typu sieci są obecne w naszych domach, biurach, na uczelniach, wszędzie tam, gdzie możliwa jest komunikacja drogą radiową. Przykładowe ich zastosowanie to komunikacja między smartfonem a bezprzewodowymi słuchawkami bluetooth, czy wymiana danych z urządzeniami takimi jak inteligentne zegarki (ang. smart watch) czy opaski (ang. smartband). Sieci WPAN są również wykorzystywane do budowy bezprzewodowych systemów alarmowych instalowanych w budynkach, na parkingach itd.

W sieciach WPAN istnieje podział na urządzenia podrzędne i nadrzędne. Znaczna część urządzeń może realizować obie funkcje, czyli pracować zarówno jako urządzenie podrzędne, jak i nadrzędne. Struktura sieci tworzona jest w zależności od potrzeb, w trybie ad hoc i może szybko podlegać zmianom, adaptując się do nowych warunków pracy i aktualnych wymagań. Transmisja w sieciach WPAN jest zazwyczaj realizowana przy wykorzystaniu następujących technologii komunikacyjnych: Bluetooth, ZigBee, IrDA, Ultra Wideband, HomeRF i inne.

Podsumowując, sformułujmy krótką definicję sieci WPAN.

Bezprzewodowa sieć prywatna

Bezprzewodowa sieć prywatna WPAN (wireless personal area network) to rodzaj sieci komputerowej wykorzystującej łącze bezprzewodowe o niewielkim zasięgu do przesyłania danych między heterogenicznymi, najczęściej przenośnymi, urządzeniami do obliczeń oraz odbierania i przetwarzania informacji.

2.2.2. Bezprzewodowa sieć sensorowa (WSN)

W rozdziale 1 przedstawiliśmy krótkie wprowadzenie w tematykę bezprzewodowych sieci sensorowych WSN (wireless sensor network), ich zastosowań, aktualnego stanu technologii i perspektyw rozwoju. Przytoczona tam dość ogólna definicja określa tę sieć jako zbiór wielu rozproszonych autonomicznych czujników mierzących właściwości fizyczne i środowiskowe, takie jak temperatura, wilgotność, ciśnienie czy zanieczyszczenie. Dane pomiarowe są gromadzone i przesyłane drogą radiową do stacji odbiorczej.

Nieco dokładniejszą definicję WSN zaproponowali Kay Romer i Friedemann Mattern w pracy [126]. W myśl tej definicji za bezprzewodową sieć sensorową możemy uznać dużych rozmiarów sieć ad hoc wykorzystującą komunikację typu multi hop, złożoną w większości z homogenicznych, stacjonarnych

urządzeń o niewielkich rozmiarach i ograniczonych zasobach energetycznych i obliczeniowych, które mogą być w sposób losowy rozmieszczone na rozważanym obszarze.

Definicja przedstawiona przez Romera i Matterna podsumowuje pewien etap badań nad bezprzewodowymi sieciami sensorów prowadzonych w pierwszej dekadzie XXI wieku. Mimo iż rozwój sieci WSN na tle rozwoju telefonii komórkowej wygląda mało okazale, nie zmienia to faktu, że w tym obszarze prowadzonych jest bardzo wiele prac, które ewoluują w różnorodnych kierunkach. Nowe realizacje sieci WSN są wynikiem nowych potrzeb i zastosowań. Węzły są wyposażane w dodatkowe urządzenia zwiększające zakres ich działań i możliwości.

Prezentowana książka jest poświęcona sieciom sensorowym, a konkretnie architekturom, algorytmom, technologiom oraz narzędziom i technikom do ich projektowania i realizacji. W następnym podrozdziale przyjrzymy się dokładniej właściwościom tego typu sieci, ich budowie i ewolucji. Na zakończenie tych krótkich rozważań, korzystając z opisów przedstawionych w literaturze [4, 5, 126] sformułujemy definicję klasycznej sieci sensorowej.

Bezprzewodowa sieć sensorowa

Bezprzewodowa sieć sensorowa (ang. wireless sensor network - WSN) jest to rodzaj sieci tworzonej przez autonomiczne, zazwyczaj homogeniczne, stacjonarne lub quasi-stacjonarne urządzenia pomiarowe o niewielkich rozmiarach i ograniczonych zasobach, gęsto pokrywające wskazany obszar. W większości zastosowań sieć jest budowana w trybie ad hoc. Służy ona do realizacji założonego, wspólnego dla wszystkich urządzeń, zadania związanego z pomiarem, gromadzeniem, przetworzeniem wielkości fizycznych oraz ich przekazaniem drogą radiową do operatora, realizując transmisję z wykorzystaniem węzłów pośredniczących.

2.2.3. Bezprzewodowa sieć sensorów i elementów wykonawczych (WSAN)

Sieci WSAN (wireless sensor actuator network) wyewoluowały z klasycznych sieci sensorowych. Obecnie coraz częściej bezprzewodowe sieci czujników nie ograniczają swojego działania tylko do zbierania i gromadzenia danych o środowisku oraz ich wstępnego przetwarzania i przesyłania, ale dopuszczają możliwość aktywnego oddziaływania na to środowisko [6, 89]. Jest to możliwe dzięki wyposażeniu sieci sensorowych w dodatkowe urządzenia wykonawcze, takie jak na przykład proste sterowniki. W ten sposób wyniki pomiarów na bieżąco przekładają się na decyzje sterujące, które są przekazywane i realizowane przez elementy wykonawcze sieci. Wydaje się, że w przyszłości tego typu sieci mogą zdominować obszar

zastosowań sieci czujników. Podobnie jak w przypadku już zaprezentowanych rodzajów sieci postaramy się sformułować definicję sieci WSAAN.

Bezprzewodowa sieć sensorów i elementów wykonawczych

Bezprzewodowa sieć sensorów i elementów wykonawczych (wireless sensor actuator network - WSAAN) to rodzaj bezprzewodowej sieci sensorowej, której węzły oprócz czujników mierzących różne wielkości fizyczne są również wyposażone w elementy wykonawcze umożliwiające realizację decyzji sterujących na podstawie wykonanych pomiarów.

2.2.4. Mobilna sieć ad hoc (MANET)

Sieć bezprzewodowa, której główną cechą wyróżniającą jest założenie, że tworzące ją urządzenia poruszają się, to sieć MANET (mobile ad hoc network). Urządzenia są umieszczone na pojazdach lub przenoszone przez ludzi czy zwierzęta. W sieciach MANET, podobnie jak w dotychczas omówionych, każde urządzenie może wykonywać zlecone zadania oraz uczestniczyć w przekazywaniu danych do odbiorców, którzy znajdują się w jego zasięgu. W ogólnym przypadku nie zakłada się istnienia wyróżnionych węzłów. Każdy węzeł może dostarczać usługę lub być odbiorcą usługi oferowanej przez inne elementy sieci. Do komunikacji nie jest wymagane istnienie żadnej stałej infrastruktury sieciowej, nie ma punktów centralnych zarządzających siecią. Samoorganizacja węzłów oraz wzajemna komunikacja jest realizowana przez relacje każdy z każdym (ang. peer-to-peer). Podsumowując, poniżej krótka definicja sieci MANET.

Mobilna sieć ad hoc

Mobilna sieć ad hoc (ang. mobile ad hoc network - MANET) to sieć bezprzewodowa o zdecentralizowanej strukturze, tworzona przez samoorganizujące się urządzenia komunikacji bezprzewodowej, które pełnią funkcje zarówno terminali, jak i ruterów. Węzły przemieszczają się, ich położenie zmienia się w czasie.

Projektowanie sieci ad hoc - problemy i ograniczenia

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

- położenie geograficzne węzłów sieci,
- aktualnie dopuszczalną moc nadajnika radiowego,
- liczbę aktywnych węzłów w sieci,
- liczbę węzłów, które mogą być stracone do chwili, w której uznaje się, że sieć przestaje funkcjonować,
- funkcje, jakie ma realizować sieć, na przykład maksymalizacja czasu funkcjonowania sieci, maksymalizacja przepływności.

W większości zastosowań kluczowym parametrem oceny bezprzewodowej sieci ad hoc jest czas działania sieci, określany często mianem „czasu życia sieci”. Czas ten jest zazwyczaj determinowany przez sprawność energetyczną urządzeń, intensywność komunikacji oraz użyte protokoły komunikacyjne. Warto zwrócić uwagę, że w sieciach ad hoc, w których tworzące je urządzenia mogą się przemieszczać, czas pracy sieci

w danej konfiguracji jest często krótki i odpowiada zapotrzebowaniom pojawiającym się w danej chwili.

Standardy komunikacyjne wykorzystywane we współczesnych sieciach bezprzewodowych, takie jak IEEE 802.11, Bluetooth (IEEE 802.15.1) czy IEEE 802.15.4 i ZigBee pozwalają na pracę w trybie ad hoc. Protokoły MAC (medium access control) gwarantują wydajny dostęp do medium transmisyjnego uważnie zarządzając dostępnymi zasobami energii. Wyczerpujący przegląd dostępnych protokołów MAC jest prezentowany w pracach [61, 136]. Omawiamy je również w rozdziale 14 niniejszej książki. Wyniki badań symulacyjnych, których celem było porównanie protokołów pod względem ich energooszczędności i efektywności, są opisane w pracy [136].

Pomimo wysokiej wydajności protokołów MAC praktyczne zastosowanie sieci w trybie pracy ad hoc wymaga nadal rozwiązania kilku podstawowych problemów. Najważniejsze z nich to:

- Ograniczone zasoby. Węzły wchodzące w skład sieci to często niewielkie urządzenia zasilane z baterii, dysponują więc ograniczonymi zasobami energii. Ograniczona jest również przepustowość sieci.
- Niska jakość łączy. Jakość bezprzewodowej transmisji zależy od zewnętrznych czynników, takich jak warunki atmosferyczne czy ukształtowanie terenu. Część z tych czynników zmienia się w czasie.
- Zmieniająca się dynamicznie topologia sieci. Każdy węzeł sieci może w dowolnym czasie, z różnych powodów, opuścić sieć. Podobnie, w każdej chwili działania sieci węzeł może dołączyć do sieci.
- Problemy z zapewnieniem bezpieczeństwa sieci. Spontaniczny sposób tworzenia sieci czyni je stosunkowo łatwym obiektem zewnętrznego ataku. Bezprzewodowa transmisja również ułatwia atak. Znacznie łatwiej jest włączyć się do tego typu sieci. Zapewnienie bezpieczeństwa w sieciach ad hoc wymaga zastosowania nowych rozwiązań, które nie występują w sieciach przewodowych o stałej infrastrukturze.

Algorytmom i specjalizowanym protokołom, które pozwalają na rozwiązanie wymienionych powyżej problemów związanych z projektowaniem rzeczywistych sieci ad hoc jest poświęcona znaczna część niniejszej książki. Koncentrujemy się co prawda na sieciach sensorowych, ale niektóre prezentowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie również w sieciach ad hoc innego rodzaju.

Fragment pochodzi z książki: „Bezprzewodowe Sieci Czujników w Internecie Rzeczy” Ewa Niewiadomska – Szyrkiewicz, Michał Marks, Piotr Arabas, Andrzej Sikora. Wydawnictwo Naukowe PWN SA.

