

Andrzej Sikora
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej,
Politechnika Warszawska
Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa (NASK)

MODELOWANIE, SYMULACJA I PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA MOBILNEJ BEZPRZEWODOWEJ SIECI TYPU AD-HOC

Streszczenie – Praca jest poświęcona zagadnieniom modelowania i symulacji komunikacji pomiędzy mobilnymi węzłami tworzącymi bezprzewodową sieć typu ad-hoc. Omawiane są zagadnienia związane z modelowaniem ruchu węzłów oraz transmisją bezprzewodową. W drugiej części artykułu znajduje się opis symulatora mobilnej sieci ad-hoc oraz przykłady jego wykorzystania w różnych wariantach złożoności symulowanego modelu. Szczególna uwaga położona jest na testowanie spójności i przepustowości sieci w zależności od ruchu poszczególnych jej węzłów.

1 Wprowadzenie

Symulacja komputerowa jest uznawana za skuteczną technikę służącą analizie działania i wydajności sieci komputerowych. Narzędzie to może zostać z powodzeniem wykorzystane do testowania nowych rozwiązań sprzętowych i protokołów zwiększających jakość oraz różnorodność oferowanych zastosowań sieci komputerowych. Jedną z najnowszych technologii stosowanych w telekomunikacji jest obecnie bezprzewodowa mobilna sieć typu ad-hoc.

Bezprzewodowe mobilne sieci ad-hoc (MANET – Mobile Ad-hoc Networks) są zestawem samoorganizujących się mobilnych urządzeń komunikacji bezprzewodowej zdolnych do utworzenia sieci komunikacyjnej bez udziału urządzeń stałych i wyszczególnionych urządzeń centralnych. Przeważnie czas pracy sieci w danej konfiguracji jest krótki i odpowiada zapotrzebowaniom pojawiającym się w danej chwili. Węzeł sieci ad-hoc jest to mobilne urządzenie zdolne do komunikacji bezprzewodowej.

Podstawowe cechy sieci MANET to: rozproszenie węzłów sieci na pewnym obszarze geograficznym (*service area*), wyposażenie węzłów w radiowy nadajnik i odbiornik, węzły mogą pełnić funkcję stacji

pośredniczących w komunikacji pomiędzy pozostałymi węzłami (sieć *multihop*), sieci formowane przeważnie w sytuacji zapotrzebowania na transmisję danych, która z różnych powodów nie może być zrealizowana z wykorzystaniem infrastruktury stałej.

Do zalet sieci ad-hoc można zaliczyć przede wszystkim mobilność, elastyczność i krótki czas tworzenia infrastruktury sieciowej oraz odporność sieci na awarie. Transmisja danych w sieci ad-hoc może być realizowana wieloma ścieżkami z wykorzystaniem różnych węzłów pośredniczących. W przypadku awarii, usunięcia lub przemieszczania się jednego z węzłów odpowiedni algorytm routingu dynamicznie wyznacza nową trasę transmisji danych. Problemem w tej sytuacji jest zachowanie spójności sieci, a więc unikanie izolowania węzłów lub grup węzłów, które zostaną poza zasięgiem komunikacji reszty węzłów sieci.

Inne problemy do rozwiązania podczas tworzenia i zarządzania siecią MANET to określenie odpowiedniej pojemności sieci, która zapewni wymaganą jakość i realizację zapotrzebowań, zakłócenia i interferencje pomiędzy węzłami, lokalizacja węzłów, bezpieczeństwo i ograniczenia energetyczne węzłów.

W pierwszej części artykułu autor rozwinie zagadnienia modelowania i symulacji prezentowanych sieci. Szczególna uwaga zostanie położona na modele komunikacji bezprzewodowej oraz modele poruszania się węzłów sieci. Modele te zostaną zaadaptowane do wymagań symulacji zdarzeniowej.

W drugiej części artykułu autor przedstawi wykonaną przez siebie aplikację praktyczną – symulator. Aplikacja ta posłuży do symulacji mobilnej sieci bezprzewodowej bez wyszczególnionych węzłów centralnych (sieć typu ad-hoc).

W ostatniej części prezentowane są przykłady wykorzystania symulatora mobilnej bezprzewodowej sieci ad-hoc. Wyniki badań symulacyjnych pokazują efekty przemieszczania się węzłów obserwowane w bezprzewodowej sieci ad-hoc.

2 Model mobilności węzłów

Większość dostępnych na rynku symulatorów mobilnych sieci bezprzewodowych traktuje ruch węzłów sieci w sposób bardzo uproszczony. Zastosowane są przeważnie statyczne modele, które wymagają od użytkownika zdefiniowania przed uruchomieniem symulatora wszystkich trajektorii ruchu węzłów [7,8]. Trajektorie te podają położenie węzłów na płaszczyźnie w funkcji czasu. Innym rozwiązaniem jest losowe generowanie trajektorii ruchu węzłów w sieci mobilnej.

W konkretnych zastosowaniach (np. symulacja sieci V2V) symulatory implementujące wyłącznie podstawowy model mobilności węzłów nie

dają możliwości dynamicznego sterowania ruchem węzłów. Ogranicza to znacznie obszar badań, które można przeprowadzić z użyciem symulatora. Rozwiązaniem tego problemu jest wprowadzenie dynamicznego generowania ścieżki ruchu węzła sieci w zależności od stanu węzła i stanu środowiska, w którym porusza się węzeł. Pozwoli to m.in. na symulację sieci mobilnej, w której węzły w sposób autonomiczny unikają fizycznych kolizji z innymi węzłami oraz zmieniającymi się przeszkodami w otoczeniu (np. ruch drogowy). Istotny jest również fakt, że jakość i zasięg transmisji bezprzewodowej uzależniony jest od charakterystyki środowiska, w jakim znajduje się nadajnik lub odbiornik radiowy. Parametry otoczenia węzła wpływające na komunikację bezprzewodową oraz parametry ruchu węzła (np. prędkość, zużycie energii) mogą zmieniać się wraz ze zmianą położenia węzła. Konieczne jest więc wprowadzenie dynamicznych modeli ruchu węzłów sieci MANET na mapach. Mapy tego typu wykorzystywane są do przechowywania współczynników, które w zależności od położenia węzła na płaszczyźnie służą do wyznaczenia wymaganych parametrów.

Prezentowany symulator sieci mobilnej implementuje model mobilności węzłów, który wykorzystuje cztery dodatkowe zmienne stanu węzła o wartościach definiowanych w dyskretnych chwilach czasu symulowanego:

- położenie węzła – punkt referencyjny na płaszczyźnie opisujący położenie węzła,
- obszar węzła – wielokąt składający się dowolnej liczby punktów na płaszczyźnie, wielokąt ten zawiera wewnątrz punkt położenia węzła i opisuje obszar na płaszczyźnie zajmowany przez węzeł,
- orientacja węzła – kąt wyrażony w stopniach pomiędzy osią X, a możliwym aktualnie kierunkiem poruszania się węzła, zmiana kierunku poruszania się węzła wymaga zmiany orientacji węzła oraz przekształcenia wielokąta opisującego obszar węzła (obrót wielokąta dokonywany jest wokół punktu – położenie węzła),
- energia węzła – opcjonalny parametr informujący o ilości zgromadzonej w węźle energii, która może być przeznaczona m.in. na przemieszczanie węzła.

Opisywany model operuje w przestrzeni dwuwymiarowej, istnieje jednak możliwość dostosowania go do obliczeń w przestrzeni trójwymiarowej. Eksperymenty realizowane przez autora nie wymagały uwzględnienia wysokości, na jakiej znajduje się węzeł sieci.

Model ruchu węzłów został przystosowany do wymagań symulacji zdarzeniowej. Typy zdarzeń zdefiniowane przez autora to:

- MS – rozpoczęcie ruchu węzła (parametry: prędkość, punkt docelowy, interwał czasowy pomiędzy kolejnymi rejestracjami zmiany położenia węzła),

- MR – kontynuowanie ruchu węzła (parametry: prędkość, punkt docelowy, interwał czasowy pomiędzy kolejnymi rejestracjami zmiany położenia węzła), zdarzenie jest generowane w wyniku obsługi zdarzenia typu MS,
- ME – zatrzymanie węzła (parametry: prędkość, punkt docelowy), zdarzenie jest generowane w wyniku obsługi zdarzenia typu MS lub MR,
- LC – zarejestrowanie zmiany położenia węzła na mapie (parametry: nazwa węzła, położenie węzła, prędkość węzła, obszar węzła, punkt docelowy), zdarzenie jest generowane w wyniku obsługi zdarzeń typu MS, MR, ME,
- CO – kolizja dwóch węzłów (parametry węzła, z którym nastąpiła kolizja: nazwa węzła, położenie węzła, prędkość węzła, obszar węzła), zdarzenie generowane w sytuacji, gdy obszary przynajmniej dwóch węzłów mają niepustą część wspólną; zdarzenie może być wygenerowane w wyniku obsługi zdarzeń typu LC,
- CC – sygnalizacja kolizyjnego toru ruchu dwóch węzłów (parametry węzła, z którym może nastąpić kolizja: nazwa węzła, położenie węzła, prędkość węzła, obszar węzła, punkt docelowy), zdarzenie generowane w sytuacji, gdy trajektorie ruchu przynajmniej dwóch węzłów przecinają się; zdarzenie może być wygenerowane w wyniku obsługi zdarzeń typu LC,
- PA – sygnalizacja zmiany współczynnika podawanego przez mapę powstająca w wyniku przemieszczania się węzła; zdarzenie może być wygenerowane w wyniku obsługi zdarzeń typu LC,
- Powyższe typy zdarzeń realizowane są przez dwa rodzaje procesów logicznych:
 - Mobile – model mobilnego węzła, który obsługuje zdarzenia typu MS, MR, ME, CO, CC, PA oraz generuje nowe zdarzenia typu LC, MS, MR, ME
 - Broker – model mapy obszaru, który obsługuje zdarzenia typu LC oraz generuje nowe zdarzenia typu CO, CC, PA

Dynamicznie generowana ścieżka (trajektoria) ruchu węzła opisywana jest przez ciąg zdarzeń: jedno zdarzenie MS (rozpoczęcie ruchu), dowolna liczba zdarzeń MR (rejestracja kolejnych punktów położenia węzła na trajektorii) oraz jedno zdarzenie ME (koniec ruchu). W przypadku wystąpienia kolizji dwóch węzłów ich ruch kończony jest zdarzeniem typu CO. Liczba zdarzeń typu MR w ramach jednej ścieżki ruchu zależy do odległości pomiędzy aktualnym położeniem węzła a punktem docelowym ścieżki, prędkości węzła oraz wymaganego interwału czasowego pomiędzy kolejnymi rejestracjami zmiany położenia węzła. Interwał czasowy jest zmienną wprowadzoną sztucznie

ze względu na wymogi symulacji zdarzeniowej oraz wymaganą podczas analizy wyników symulacji jakość animacji ruchu. Modelowana trajektoria ruchu węzła pozwala na zmianę kierunku ruchu węzła np. w celu ominięcia przeszkody zdefiniowane na mapie.

Algorytm generowania trajektorii ruchu węzła sieci operuje na trzech poziomach szczegółowości:

A. Model ruchu na płaszczyźnie z pełnym dostępem do mapy: proces logiczny *Mobile* w wyniku obsługi zdarzenia MS generuje ciąg zdarzeń MR zakończony zdarzeniem ME. Obsługa tych zdarzeń pozwala na stopniową zmianę położenia węzła aż do punktu docelowego. Generowana jest najkrótsza ścieżka, która omija przeszkody zdefiniowane na mapie oraz inne nieruchome węzły sieci. Podczas generowania tej ścieżki brany jest pod uwagę obszar zajmowany na mapie przez węzeł oraz obszar zajmowany na mapie przez przeszkody (wielokąty). W przypadku wystąpienia zdarzenia typu CC (kolizyjny tor ruchu) możliwa jest powtórna generacja ścieżki od punktu, do którego węzeł się aktualnie przemieścił (np. z zastosowaniem pierwszeństwa dla pojazdów nadjeżdżający z prawej strony). W przypadku kolizji lub braku ścieżki prowadzącej do punktu docelowego ruch węzła jest zatrzymywany.

B. Model ruchu na płaszczyźnie z pełnym dostępem do mapy i wyznaczonymi kanałami komunikacyjnymi: model ten jest oparty na modelu A. Generowana jest najkrótsza ścieżka do punktu docelowego, która pokrywa się ze zdefiniowaną na mapie siecią kanałów komunikacyjnych (dróg) oraz omija przeszkody i inne nieruchome węzły sieci.

C. Model ruchu na płaszczyźnie z niepełnym dostępem do mapy: proces logiczny *Mobile* posiada dostęp do mapy przeszkód jedynie we wskazanym obszarze wokół węzła (np. w zasięgu wzroku), w wyniku obsługi zdarzenia MS i na podstawie ograniczonej wiedzy generuje ciąg zdarzeń MR zakończony zdarzeniem ME. W miarę przemieszczania się węzła i „napotykania” kolejnych, nieznanych wcześniej przeszkód ścieżka ruchu (lista zdarzeń MR, ME) jest aktualizowana. Model ten nie gwarantuje, że wygenerowana ścieżka jest najkrótsza i doprowadzi do punktu docelowego.

Powyższe modele mogą współdziałać w ramach jednego symulatora lub jednego procesu logicznego (model ruchu może zmieniać się w zależności od zmiennych stanu procesu logicznego).

3 Model komunikacji bezprzewodowej

Podstawowym zagadnieniem rozważanym podczas modelowania komunikacji bezprzewodowej jest określenie maksymalnego zasięgu komunikacji pomiędzy dwoma węzłami wyposażonymi w nadajnik i

odbiornik radiowy. Zakłada się, że komunikacja pomiędzy węzłem u i węzłem v jest możliwa wtedy, gdy węzeł u jest w stanie odebrać i zdekodować sygnał wysłany przez węzeł v , a węzeł v może odebrać i zdekodować sygnał wysłany przez węzeł u (1).

$$P_r \geq \beta \quad (1)$$

$$P_r(u) \geq \beta(u) \quad (2)$$

$$P_r(v) \geq \beta(v) \quad (3)$$

$$PL(u, v) = \frac{P_t}{P_r} \quad (4)$$

gdzie: u – nadawca sygnału, v – odbiorca sygnału, P_t – moc sygnału nadanego, P_r – moc sygnału odebranego, β – próg wrażliwości odbiornika, PL – współczynnik utraty mocy sygnału.

Jak widać istotne jest znalezienie modelu, który dostarczy wiarygodnych wartości współczynnika utraty mocy PL , który określa jaka część mocy sygnału nadanego dociera do odbiornika. W literaturze dominują trzy modele [16], które wspólnie składają się na kompleksowy model utraty mocy sygnału radiowego. Są to:

A. Model zmian dużej skali – "path loss". Model, w którym utrata mocy przesyłanego sygnału uzależniona jest głównie od dystansu geometrycznego (odległość euklidesowa) pomiędzy nadawcą a odbiorcą sygnału.

$$PL(d) = PL(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (5)$$

$$P_r(d) = \frac{P_t}{PL(d)} = P_r(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-n} = c \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-n} \quad (6)$$

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (7)$$

gdzie: d – odległość od nadajnika, d_0 – odległość referencyjna od nadajnika (np. 1m, 100m), $P_r(d)$ – moc sygnału odebranego w odległości d od nadajnika, $P_r(d_0)$ – moc sygnału odebranego w odległości d_0 od nadajnika, P_t – moc sygnału nadanego, $PL(d)$ – współczynnik utraty mocy sygnału w odległości d od nadajnika, $PL(d_0)$ – stała utrata mocy sygnału w odległości referencyjnej d_0 od nadajnika, n – wykładnik modelu zależny od środowiska (np. 2 w wolnej przestrzeni, 4-6 w

budynkach), c – stała zależna od parametrów anteny nadajnika i odbiornika.

B. Model efektów średniej skali - “*shadowing*”. Model wolnych, losowych zmian mocy nadanego sygnału o logarytmiczny rozkładzie normalnym – model lognormalny. Zmiany te wynikają z ukształtowania terenu, warunków atmosferycznych, niesymetrycznych wzmocnień anteny, itp. Model propagacji radiowej średniej skali zakłada, że logarytmiczna wartość mocy odebranego sygnału na okręgu (sferze) o promieniu r wokół źródła sygnału ma rozkład normalny z odchyleniem standardowym równym σ oraz wartości średniej równej $\mu = 0$.

$$PL(d)[dB] = \overline{PL(d)}[dB] + X_{\sigma} = PL(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma} \quad (8)$$

gdzie: X_{σ} – zmienna losowa o logarytmicznym rozkładzie normalnym [dB], σ – odchylenie standardowe [dB] (wartość stabelizowana dla wybranych środowisk)

C. Model efektów małej skali - “*fading*”. Model szybkich, losowych zmian amplitudy sygnału przy małej zmianie położenia i/lub czasu. Fluktuacje amplitudy sygnału wynikają m.in. z propagacji sygnału wieloma ścieżkami (odbicia, itp.), efektu Dopplera przy węzłach mobilnych.

Większość dostępnych na rynku symulatorów komunikacji radiowej implementuje jedynie model A [7,8]. W niektórych przypadkach model ten uzupełniany jest dodatkowo różnorodnymi modelami anten [7]. Prezentowany symulator mobilnej sieci bezprzewodowej wykorzystuje modele A i B. Zmiany wywołane działaniem modelu C są pomijane w symulacjach ze względu na bardzo krótki czas ich trwania oraz niewielką amplitudę.

Modelowanie komunikacji bezprzewodowej wymaga również uwzględnienia protokołów z grupy MAC (*Medium Access Protocol*). Protokoły te są potrzebne w celu regulowania komunikacji węzłów poprzez współdzielone medium transmisyjne (warstwa łącza danych). Głównym ich zadaniem jest ograniczanie interferencji i kolizji przez co wpływają na przepustowość sieci i opóźnienia transmisji danych.

W ostatnich latach powstało bardzo wiele protokołów MAC, które często realizują zadania i priorytety związane z charakterystyką tworzonej sieci bezprzewodowej (np. oszczędzanie energii w sieciach sensorów). Duża liczba protokołów MAC sprawia, że zadanie ich modelowania do celów symulacji jest bardzo trudne. Z tego powodu znane protokoły MAC podzielono na trzy klasy, które modelują algorytmy dostępu do medium transmisyjnego w sposób uproszczony. Są to:

Klasa 1: Metody dostępu losowego (dopuszczają kolizje, transmisja ponawiana jest po losowym czasie oczekiwania),

Klasa 2: Metody pełnego blokowania dostępu (eliminują kolizje przez blokowanie nadawania przez wszystkie węzły znajdujące się w zasięgu aktualnej transmisji),

Klasa 3: Metody wybiórczego blokowania dostępu (eliminują kolizje przez blokowanie nadawania przez wybrane węzły znajdujące się w zasięgu aktualnej transmisji – wymagany jest dodatkowy kanał sygnalizacyjny).

Kolejnym problem w sieciach MANET jest znalezienie ścieżki transmisji pomiędzy dwoma wybranymi węzłami. Służą do tego szybkie protokoły routingu, które można podzielić na dwie grupy:

- proactive - rozwiązania reagujące na zmiany topologii nawet, gdy nie ma zapotrzebowań ruchowych wymagających nowych ścieżek,
- reactive – metody te znajdują drogę pomiędzy źródłem a węzłem docelowym dopiero w momencie pojawienia się zapotrzebowania na transfer danych pomiędzy węzłami (protokoły na żądanie) (ograniczają narzut protokołu routingu, ścieżki ustanawiane wolniej niż w proactiv)

Model komunikacji bezprzewodowej zaimplementowany w opisywanym symulatorze uwzględnia możliwość wyboru klasy, do której należy protokół MAC uwzględniony w symulacji oraz grupy, do której należy wykorzystany w modelu protokół routingu. Wybór tych parametrów wpływa na przepustowość, opóźnienia oraz wybór trasy transmisji danych w symulowanej sieci ad-hoc. Pełna symulacyjna analiza wybranego protokołu routingu lub MAC wymaga dodatkowo szczegółowego zamodelowania algorytmu stosowanego w tym protokole.

Jak widać analityczne wyznaczenie pojemności sieci MANET jest bardzo trudne. Wpływają na to protokoły routingu o różnym narzucie komunikacyjnym, protokoły MAC o różnej strategii oraz dynamicznie zmieniająca się topologia sieci ad-hoc. Symulacja jest w tym wypadku bardzo dobrym narzędziem służącym do estymacji pojemności sieci MANET oraz weryfikacji topologii i sterowania siecią.

4 Symulator sieci ad-hoc

Symulator sieci ad-hoc jest symulatorem teleinformatycznej sieci zbudowanej na bazie mobilnych węzłów wyposażonych w nadajniki i odbiorniki radiowe zgodne ze standardem WLAN (IEEE 802.11). Symulator został zaimplementowany z wykorzystaniem biblioteki ASim/Java (Asynchronous Simulation Java), która jest pakietem wspomagającym tworzenie rozproszonych symulatorów złożonych systemów.

Pakiet ASim/Java został opisany szczegółowo w pracy **[Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.]**. Podstawowym jego przeznaczeniem jest wspomaganie budowy rozproszonych, asynchronicznych symulatorów zdarzeniowych. W tym celu zaimplementowano szereg mechanizmów komunikacji oraz synchronizacji [4,6] pomiędzy procesami logicznymi składającymi się na model symulowanego systemu złożonego.

Dodatkowo pakiet zawiera moduł interpretujący schemat ASimL – uniwersalny język oparty na XML, który służy modelowaniu systemów sieciowych i hierarchicznych oraz interfejs graficzny, który wspomaga i weryfikuje proces tworzenia zgodnego z ASimL modelu symulowanego systemu (rys. 1).

W strukturze logicznej symulatora zbudowanego za pomocą modułów ASim/Java można wyróżnić następujące elementy: symulator (samodzielna aplikacja będąca zbiorem domen), domena (zbiór procesów logicznych i domen) oraz proces logiczny (podstawowy aktywny element symulacji odpowiadający procesowi fizycznemu).

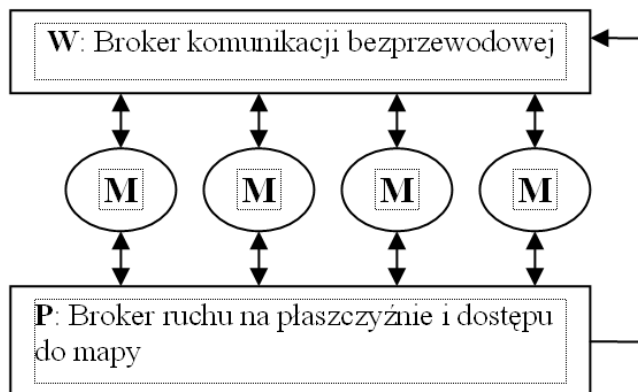
Procesy logiczne, z których można budować model symulowanej sieci MANET podzielone są na trzy grupy. Pierwsza realizuje zadania mobilnego węzła sieci ad-hoc (M), druga pełni rolę medium transmisyjnego (W) pośredniczącego w komunikacji bezprzewodowej i aktualizującego topologię sieci, trzecia (P) odpowiada za symulację ruchu węzłów na płaszczyźnie i ich dostęp do mapy terenu oraz informacji o położeniu innych węzłów. Architektura symulowanego modelu przedstawiona jest na rysunku nr 2.



Rys. 1. Przykładowy ekran interfejsu graficznego środowiska Asim/Java.

W jednym symulatorze sieci ad-hoc występuje jeden proces logiczny odpowiadający za komunikację bezprzewodową (W) i jeden proces logiczny rejestrujący ruch węzłów (P). Pakiet ASim/Java dostarcza

jednak mechanizmów, które pozwalają na łączenie wielu symulatorów w federację [1]. Każdy z symulatorów w federacji może zostać uruchomiony na oddzielnej maszynie w ramach dostępnej sieci komputerowej. Rozwiązanie to pozwala znacznie poprawić wydajność symulacji.



Rys. 2. Przykład architektury zrealizowanej w symulowanym modelu.

Proste modele terenu (mapy) definiowane w prezentowanym symulatorze sieci ad-hoc składają się z wielokątów, którym przypisano wymagane przez model parametry (np. współczynnik n – równanie nr 7). Bardziej złożone modele terenu powinny być przygotowane w sposób uniwersalny, tak aby ich aktualizacja, import lub eksport były zdaniami niewymagającymi wiedzy kartograficznej i ogromnej pracochłonności. Z tego powodu autor zdecydował się na wykorzystanie w symulatorze biblioteki GeoTools [15], do której interfejs znajduje się w pakiecie ASim/Java. Biblioteka GeoTools jest narzędziem pozwalającym m.in. na odczyt i analizę danych zgodnych z powszechnie stosowanymi formatami map cyfrowych GIS (ang. *Geographic Information System*). Dane te mogą być zapisane w bazie danych lub plikach o formatach obsługiwanych przez bibliotekę.

5 Wyniki symulacji

Głównym celem budowy symulatora sieci MANET było przeprowadzenie eksperymentów, które pomogą w opracowaniu algorytmu sterowania położeniem węzłów mobilnych w celu zapewnienia na pewnym obszarze możliwości komunikacji bezprzewodowej o wymaganej jakości. Sterowanie jest realizowane przy zmieniających się dynamicznie wymaganiach. Przykładem zastosowania takiego algorytmu może być wykorzystująca komunikację bezprzewodową akcja ratunkowa przeprowadzana na obszarze objętym katastrofą.

W sytuacji, gdy w wyniku katastrofy naturalnej (np. trzęsienie ziemi) lub katastrofy związanej z działalnością człowieka (np. wybuch w fabryce chemicznej) zniszczeniu ulega istniejąca dotychczas stała infrastruktura sieciowa, konieczne jest szybkie i sprawne ustanowienie nowych kanałów komunikacji, które będą wykorzystywane w czasie koordynacji akcji ratunkowej. Mobilne, bezprzewodowe sieci ad-hoc pozwalają w tym przypadku na szybkie uruchomienie komunikacji o odpowiedniej jakości oraz dynamicznie reagują na zmiany warunków i wymagań na zagrożonym obszarze.

Struktura prezentowanej sieci ad-hoc składa się z elementów należących do trzech grup:

A – węzeł mobilny – przenośny ruter bezprzewodowej sieci ad-hoc, tworzy infrastrukturę komunikacyjną dla węzłów **B** i **C**, może być sterowany przez węzeł **C** (np. robot mobilny),

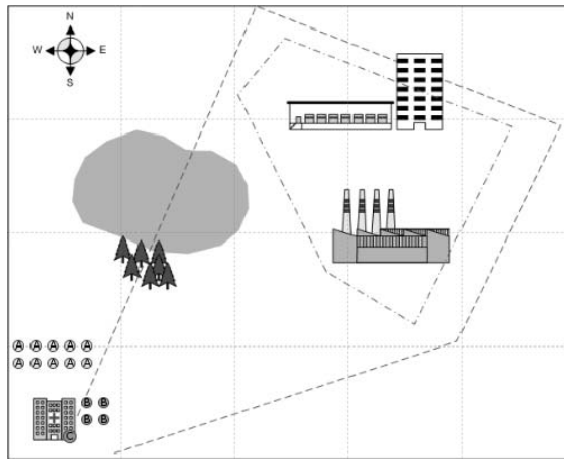
B – węzeł mobilny – jednostka ratunkowa działająca na obszarze katastrofy, realizuje zadania ratunkowe na wyznaczonym obszarze, wymaga komunikacji z pozostałymi węzłami **B** oraz węzłem **C**, może być sterowany przez węzeł **C** (np. robot mobilny),

C – węzeł stacjonarny – centrum zarządzania kryzysowego, zarządza węzłami **A** i **B**, gromadzi informacje przesłane przez węzły **B**.

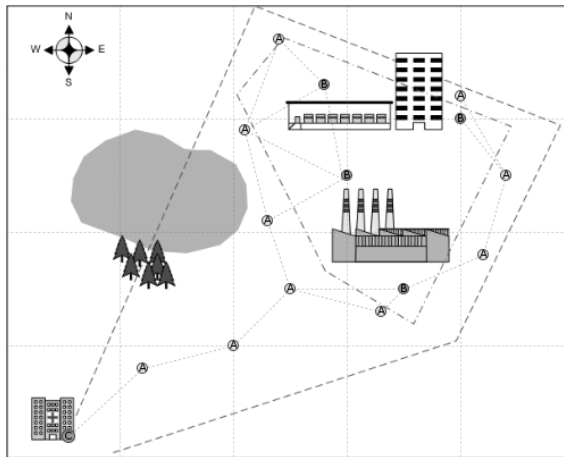
Wybrane parametry symulowanego modelu znajdują się w tabeli nr 1.

Tabela. 1. Parametry symulowanego modelu sieci ad-hoc.

Nazwa węzła	Czas startu	Punkt startowy	Punkt docelowy	Maks. prędkość
Mobile_B_1	0	(85,350)	(280,70)	20
Mobile_B_2	2	(85,365)	(400,100)	20
Mobile_B_3	4	(70,350)	(300,150)	20
Mobile_B_4	6	(70,365)	(350,250)	20
Mobile_A_5	7	(70,300)	(240,30)	20
Mobile_A_6	9	(70,315)	(210,110)	20
Mobile_A_7	11	(55,300)	(230,190)	20
Mobile_A_8	13	(55,315)	(120,320)	20
Mobile_A_9	15	(40,300)	(200,300)	20
Mobile_A_10	17	(40,315)	(250,250)	20
Mobile_A_11	19	(25,300)	(330,270)	20
Mobile_A_12	21	(25,315)	(420,220)	20
Mobile_A_13	23	(10,300)	(440,150)	20
Mobile_A_14	25	(10,315)	(400,80)	20
Station_C_15	-	(55,380)	-	-



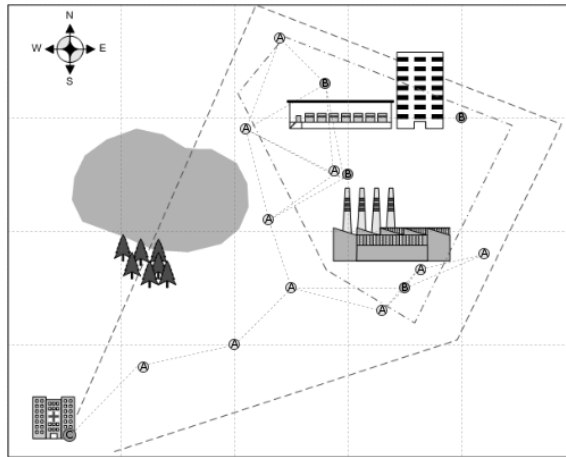
Rys. 3. Zastosowanie sieci ad-hoc w akcjach ratunkowych, czas symulowany = 0.



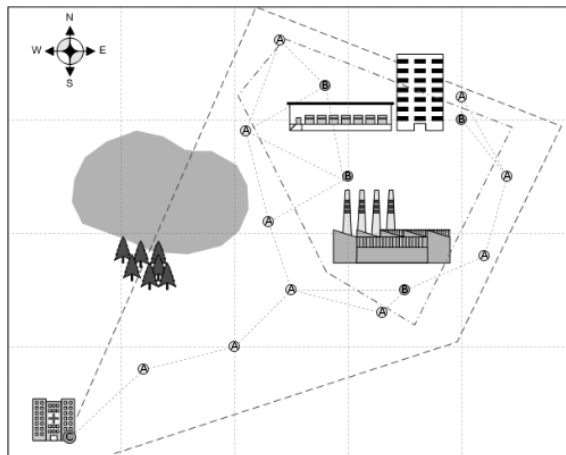
Rys. 4. Pośrednia topologia sieci ad-hoc wyznaczona przez symulator, czas symulowany = 30.

Symulator sieci ad-hoc został w tym przykładzie wykorzystany do dynamicznego wyznaczania topologii sieci tworzonej w danym momencie czasu symulowanego przez węzły mobilne (rys. 4 – czas symulowany = 30, rys.5 – czas symulowany = 40, rys.6 – czas symulowany = 50). Dodatkowo podczas symulacji wyznaczana jest aktywność protokołów MAC (tab. 2), przepustowość poszczególnych łączy oraz parametr wskazujący ścieżki transmisji danych krytyczne dla przepustowości sieci ad-hoc. Zadaniem algorytmu sterującego położeniem węzłów mobilnych typu A jest więc modyfikacja topologii sieci, która pozwoli na znalezienie ścieżek alternatywnych dla ścieżki

krytycznej. Nadzrędnym wymaganiem pozostaje również zachowanie spójności sieci MANET.



Rys. 5. Pośrednia topologia sieci ad-hoc wyznaczona przez symulator, czas symulowany = 40.



Rys. 6. Końcowa topologia sieci ad-hoc wyznaczona przez symulator, czas symulowany = 50.

Protokoły MAC ograniczają liczbę równoczesnych transmisji radiowych na pewnym obszarze działania sieci, co w konsekwencji zmniejsza liczbę węzłów zakłócających się wzajemnie. W tabeli nr 2 można zauważyć, że największa liczba interferujących węzłów sieci występuje podczas działania protokołu MAC klasy 1, najmniejsza dla protokołu klasy 2. Liczba węzłów interferujących spada wraz ze

wzrostem zagęszczenia sieci bezprzewodowej. Niestety sytuacja taka powoduje jednocześnie spadek przepustowości sieci. Dzieje się tak, ponieważ zwiększa się liczba węzłów sieci, których nadawanie blokowane jest przez protokół MAC.

Tabela. 2. Aktywność protokołów MAC zmieniająca się wraz ze zmianami topologii symulowanej sieci ad-hoc.

Czas symulowany	Liczba węzłów sieci	Liczba połączeń w sieci	Liczba węzłów interferujących		
			MAC klasa 1	MAC klasa 2	MAC klasa 3
0	0	0	0	0	0
5	5	8	1	0	1
10	7	8	4	0	2
15	11	15	4	0	3
20	13	23	5	0	3
25	15	24	6	1	5
30	15	27	7	1	3
35	15	26	6	1	1
40	15	21	6	1	2
45	15	19	5	0	2
50	15	19	6	0	3

6 Podsumowanie

Symulator bezprzewodowej sieci mobilnej typu ad-hoc może zostać wykorzystany do badania wybranych aspektów działania tych sieci, w tym stosowanych algorytmów routingu i algorytmów propagowania informacji w sieciach. W większości realizacji praktycznych wymagane jest szybkie i niezawodne rozprzestrzenianie kluczowych informacji w sieci mobilnej. Wydaje się, że liczba zastosowań systemu komunikacji bezprzewodowej pomiędzy obiektami poruszającymi jest duża, wśród wielu można wymienić: bezpieczeństwo w ruchu drogowym – sieci typu V2V (*Vehicle-To-Vehicle*), współpraca robotów, sieci sensorów, sieci typu ad-hoc w zastosowaniach militarnych i ratunkowych, sieci mieszane, itd. Konieczne jest jednak symulacyjne zweryfikowanie wykonalności i przydatności proponowanych rozwiązań. Mogą do tego posłużyć wyniki uzyskane z przedstawianego w artykule symulatora.

Literatura

- [1] Ferenci S.L., Perumalla K.S., Fujimoto R.M.: *An Approach for Federating Parallel Simulators*, Proc. of 14th workshop on *Parallel and Distributed Simulation (PADS 2000)*, Bologna, 2000.
- [2] Małowidzki M.: *Network Simulators: A Developer's Perspective*, Proc. of *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS'04)*, San Jose, USA, 2004.
- [3] Misra J.: *Distributed discrete-event simulation*, *Computing Surveys*, vol. 18, No.1, 1986.
- [4] Nicol D.M., Fujimoto R.: *Parallel simulation today*, *Annals of Operations Research*, vol. 53, pp. 249-285, 1994.
- [5] Nicol D.M.: *Utility Analysis of Network Simulators*, *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 2003.
- [6] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Sikora A.: *ASimJava: A Java-based library for distributed simulation*, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, No. 3, pp. 12-17, 2004.
- [7] Strona internetowa OPNET
<http://www.opnet.com/products/modeler/home.html>.
- [8] Strona internetowa symulatora sieci komputerowej ns-2,
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [9] Zeigler B.P., Praehofer H., Kim T.G.: *Theory of Modeling and Simulation*, Academic Press, 2000.
- [10] McCabe J. D.: *Network Analysis, Architecture, And Design*, Morgan Kaufman Publishers, 2003
- [11] Ammar M., Ferenci S.L., Perumalla K.S., Fujimoto R.M., Riley G., Park A., Hao Wu: *Simulation of Large Scale Communication Networks*, Georgia Institute of Technology
- [12] Forouzan B. A.: *Data Communications and Networking*, McGraw-Hill, 2004
- [13] Basagni S., Conti M., Giordano S., Stojmenovic I.: *Mobile Ad Hoc Networking*, Wiley-Interscience, IEEE Press, 2004
- [14] Hać A.: *Wireless Sensor Network Design*, Wiley, 2003
- [15] GeoTools The Open Source Java GIS Toolkit,
<http://geotools.codehaus.org/>
- [16] Rappaport T.: *Wireless Communications, Principles and Practice*, 2002

MODELING, SIMULATION AND APPLICATION OF WIRELESS, MOBILE AD- HOC NETWORK

Summary – Modeling and simulation are traditional methods used to evaluate wireless network design. This paper addresses issues associated with modeling, simulation and application of wireless, mobile, and ad hoc networks. The basic characteristics and major issues pertaining to MANETs' modeling and simulation are introduced. The focus is on wireless transmission and mobility models. Particular attention is paid to the MobASim system, a Java-based software environment for parallel and distributed simulation of mobile ad hoc networks. We describe the design, performance and possible applications of presented simulation software.

