

Raport z badań symulacyjnych protokołów trasowania w sieciach ad-hoc

Tomasz MALINOWSKI^{a)}, Kamil PIERSA^{b)}

Institut Teleinformatyki i Automatyki WAT,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

^{a)}tomasz.malinowski@wat.edu.pl, ^{b)}geniek69@gmail.com

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki symulacyjnych badań porównawczych protokołów trasowania, stosowanych w sieciach ad-hoc. Uzyskane wyniki ilustrują wpływ protokołów trasowania na funkcjonowanie sieci i pozwalają wskazać preferowany protokół dla sieci o określonej wielkości i szybkości przemieszczania się bezprzewodowych węzłów.

SŁOWA KLUCZOWE: badania symulacyjne, sieci ad-hoc, protokoły routingu dynamicznego dla sieci ad-hoc

Wprowadzenie

Niniejszy raport stanowi kontynuację rozważań nad przydatnością i zasadnością stosowania w określonych warunkach funkcjonowania sieci ad-hoc, wybranych protokołów routingu dynamicznego. Teoretyczne podstawy rutowania pakietów w sieci mobilnych węzłów przedstawione zostały w [10], natomiast metodyka, zgodnie z którą przeprowadzone zostały badania protokołów routingu, omówiona jest w artykule [5].

Sieci mobilne stawiają przed projektantami technicznych środków komunikacji wymaganie zapewnienia wysokiej dostępności przemieszczających się węzłów i niezawodności transmisji. Ważnym elementem systemu transmisji jest podsystem trasowania pakietów, umożliwiający efektywne przekazywanie pakietów z mobilnego węzła źródłowego, poprzez szereg węzłów pośredniczących w transmisji, do mobilnego węzła docelowego. Ponieważ opracowane dla sieci przewodowych protokoły routingu nie sprawdzają się

w sieciach o szybko zmieniającej się (często w sposób nieprzewidywalny) topologii, poszukuje się rozwiązań, które w specyficznych warunkach funkcjonowania sieci ad-hoc umożliwią szybkie osiągnięcie stanu konwergencji (stanu ustalonego tablic trasowania węzłów). Ponadto, protokół powinien charakteryzować się jak najmniejszym zapotrzebowaniem na pasmo transmisyjne i zasoby sprzętowe węzła sieciowego [6], [8], [10].

Porównywane były proaktywne i reaktywne protokoły trasowania, dostępne przy modelowaniu sieci ad-hoc w środowisku do prowadzenia badań symulacyjnych, jakim jest OPNET. Badania prowadzone były w szczególnych warunkach (różna liczba i szybkość poruszania się węzłów), ustalonych na etapie opracowywania scenariuszy symulacyjnych [5],[10]. Badanie natury i zachowania protokołu routingu dynamicznego w określonych warunkach funkcjonowania sieci ad-hoc, z wykorzystaniem pakietu OPNET przedstawiane są w szeregu publikacji, np. [3], [4], [11], [12]. Co istotne, badania symulacyjne pozwalają rewidować zachowanie protokołu i identyfikować odstępstwa od reguł (teoretycznych podstaw) w szczególnych warunkach, łatwo określanych w trakcie modelowania sieci.

Mechanizmy stosowane w protokołach routingu dla sieci ad-hoc są szeroko opisywane w literaturze i nie będą tutaj omawiane [1], [2], [6], [7], [9].

1. Hipotezy badawcze

Przedmiotem badań były najczęściej stosowane w sieciach ad-hoc implementacje protokołów routingu dynamicznego: proaktywny protokół OLSR i dwa protokoły z grupy protokołów reaktywnych – AODV i DSR. Wybór protokołów podyktowany został bezpośrednią dostępnością w pakiecie OPNET modeli węzłów z tymi protokołami i tym, że stosowane w nich różne algorytmy rozgłaszania dostępności węzłów sieci ad-hoc stanowią po modyfikacji podstawę nowych, eksperymentalnych rozwiązań [3], [4], [12].

Celem badań było porównanie wpływu wymienionych protokołów na funkcjonowanie sieci ad-hoc, w zależności od liczby oraz szybkości przemieszczania się węzłów sieciowych. Pierwsza grupa scenariuszy symulacyjnych (nazwana „Liczba węzłów”) zakładała stacjonarność, natomiast druga (o nazwie „Mobilność”), mobilność węzłów sieciowych. W scenariuszach z ruchomymi węzłami, wszystkie węzły, za wyjątkiem serwera, z którym węzły komunikowały się, podlegały losowemu przemieszczaniu (sposób przemieszczania był zgodny z modelem *Random Mobility Model*¹).

¹ *Random Mobility Model* – dostępny w OPNET model losowego przemieszczania się węzłów, opracowany przez Davida Johnsona i Davida Maltz'a.

Ocenię podlegały [5], [10]:

- prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu do odbiorcy (ang. *packet delivery fraction* – PDF), mierzone stosunkiem liczby odebranych pakietów przez wszystkie węzły sieciowe do liczby wysłanych pakietów przez wszystkie węzły źródłowe;
- obciążenie sieci wprowadzane przez proces routingu (ang. *normalized routing load* – NRL), wyrażane stosunkiem średniej liczby wysłanych pakietów przez proces routingu do średniej liczby odebranych pakietów danych przez węzły sieci ad-hoc;
- liczba odrzuconych przez węzły sieciowe pakietów (ang. *packets dropped*), nie wliczając pakietów kontrolnych (generowanych przez proces routingu);
- średni czas transmisji pakietów (ang. *end-to-end delay*);
- średnia szybkości przesyłania danych w sieci (szybkość transmisji).

Wyniki badań porównawczych miały potwierdzić lub obalić ogólne, wynikające bezpośrednio z założeń teoretycznych dotyczące funkcjonowania węzłów z danym protokołem routingu, hipotezy [5], [10]:

- wraz ze wzrostem liczby węzłów, niezależnie od wybranego protokołu routingu w sieciach ad-hoc:
 - zmniejsza się prawdopodobieństwo dostarczenia pakietów,
 - zwiększa się obciążenie sieci przez proces routingu oraz opóźnienie w dostarczaniu pakietów;
- wraz z przyrostem szybkości poruszania się węzłów w sieci ad-hoc, niezależnie od wybranego protokołu routingu:
 - zmniejsza się prawdopodobieństwo dostarczenia pakietów oraz szybkość przesyłania danych,
 - zwiększa się obciążenie sieci przez proces routingu, liczba odrzucanych pakietów oraz opóźnienie w dostarczaniu pakietów;
- w sieciach z protokołami reaktywnymi, w porównaniu z sieciami z protokołem proaktywnym, występują większe opóźnienia ze względu na wymianę wiadomości kontrolnych przed wysłaniem pakietów;
- obciążenie sieci wprowadzane przez protokół proaktywny jest większe w porównaniu z obciążeniem sieci pakietami kontrolnymi generowanymi przez protokoły reaktywne (w związku z okresową aktualizacją informacji o topologii sieci);
- w sieciach z protokołem proaktywnym szybkość przesyłania danych jest większa ze względu na zastosowanie charakterystycznego dla protokołów stanu-łączy mechanizmu utrzymywania tablic routingu.

Obalenie którejkolwiek z hipotez oznaczałoby, że istnieje granica (związana np. z szybkością przemieszczania się węzła sieciowego), po przekroczeniu której należy rozważyć zmianę protokołu routingu, lub też tyle, że

popelniono zasadniczy błąd przy opracowywaniu modelu symulacyjnego. Założenia eksperymentu symulacyjnego i wszystkie scenariusze symulacyjne zostały szczegółowo omówione w [5].

2. Wyniki badań symulacyjnych

Kolejne podpunkty przedstawiają wyniki uzyskane po przeprowadzeniu badań protokołów routingu: OLSR, DSR i AODV pod kątem liczby odrzucanych pakietów, prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu, obciążenia sieci przez proces routingu, opóźnień w dostarczeniu pakietów oraz szybkości przesyłania danych w sieci ad-hoc. Zakładając wcześniejsze zaznajomienie się Czytelnika z podstawami teoretycznymi funkcjonowania węzłów z danym protokołem, po każdym badaniu uzyskane wyniki są krótko komentowane.

2.1. Wyniki uzyskane dla scenariuszy „Liczba węzłów”

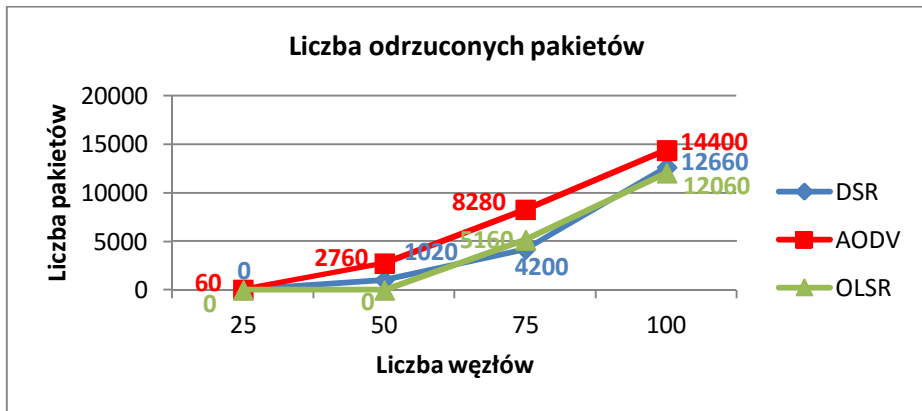
W trakcie badań symulacyjnych opartych o scenariusze o nazwie „Liczba węzłów” [5], [10] testowano efektywność działania wybranych protokołów routingu w sieci ad-hoc o zwiększającej się liczbie węzłów o charakterze stacjonarnym.

2.1.1. Liczba odrzuconych pakietów

Rysunek 1 ilustruje średnią liczbę odrzuconych pakietów w sieciach ad-hoc w zależności od liczby węzłów. W sieciach o małej liczbie węzłów (od 25 do 50), korzystających z protokołu OLSR nie odnotowano utraty pakietów. W sieciach większych (liczba węzłów od 75 do 100) z zaimplementowanymi protokołami OLSR i DSR liczba odrzucanych pakietów jest zbliżona. Największa utrata pakietów występuje w sieciach wykorzystujących protokół AODV, prawdopodobnie ze względu na przekraczanie limitu nieudanych prób transmisji.

2.1.2. Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu

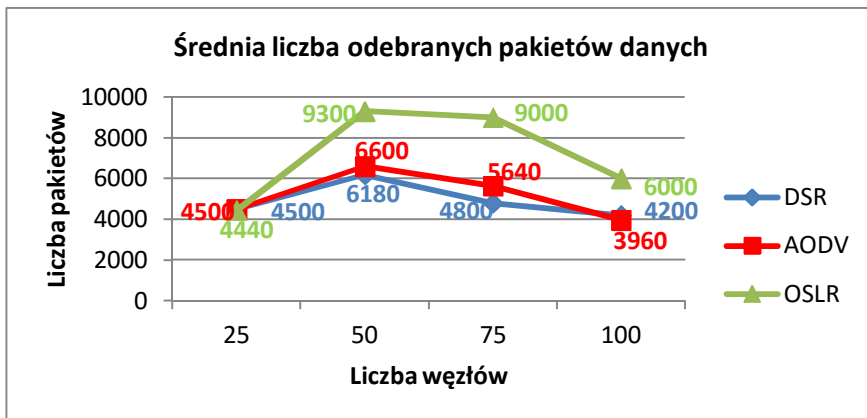
Prawdopodobieństwo PDF dostarczenia pakietu związane jest bezpośrednio z liczbą traconych (odrzuconych) przez węzły pakietów i wyznaczane było zgodnie ze wzorem:



Rys. 1. Średnia liczba odrzuconych pakietów w sieci ad-hoc w zależności od liczby węzłów

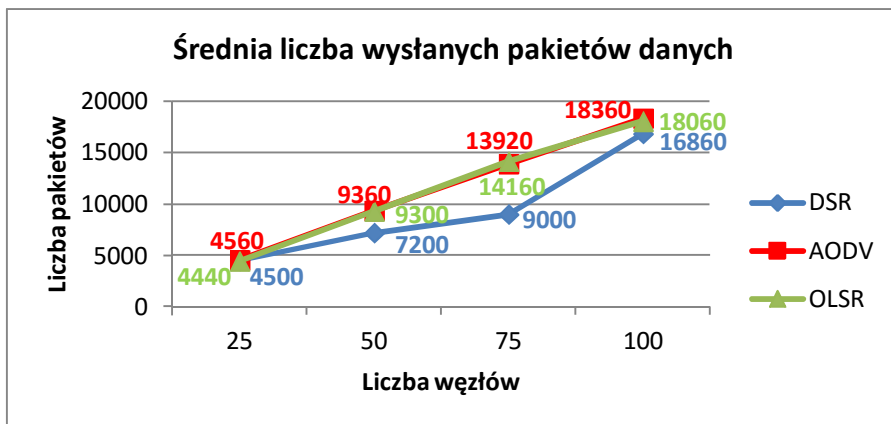
$$PDF = \frac{\text{liczba odebranych pakietów przez wszystkie węzły docelowe}}{\text{liczba wysłanych pakietów ze wszystkich węzłów źródłowych}}$$

Rysunek 2 ilustruje średnią liczbę odebranych, natomiast rysunek 3 średnią liczbę pakietów wysłanych w sieciach o różnej wielkości (25, 50, 75 i 100 węzłów).



Rys. 2. Średnia liczba odebranych pakietów danych w sieci ad-hoc w zależności od liczby węzłów

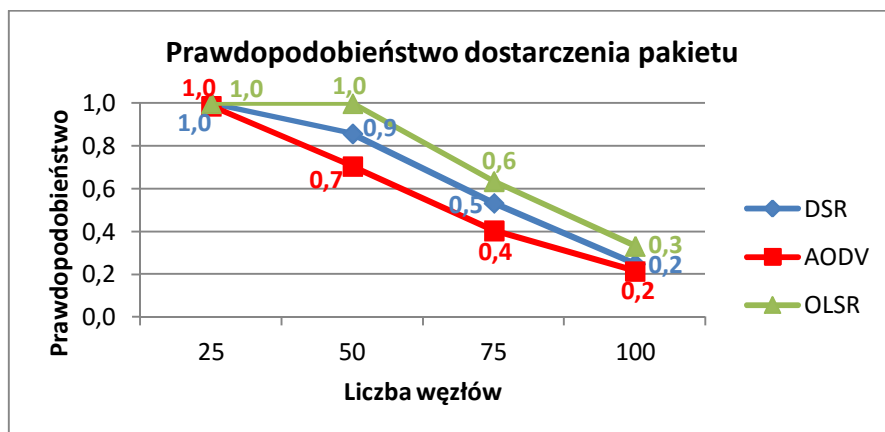
Jak widać, w małych sieciach (25 węzłów), niezależnie od zaimplementowanego protokołu routingu, liczba odebranych pakietów danych jest równa liczbie pakietów wysłanych. Sytuacja ulega zmianie, gdy w sieci pojawia się więcej węzłów, obciążających sieć wysyłanymi aktualizacjami tras.



Rys. 3. Średnia liczba wysłanych pakietów danych w zależności od liczby węzłów

Najwięcej pakietów danych w sieciach dużych (więcej niż 50 węzłów) odbieranych jest podczas stosowania protokołu OLSR.

Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu dla sieci o różnych wielkościach i z różnymi protokołami routingu przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w zależności od liczby węzłów

Widoczne jest, że niezależnie od zastosowanego protokołu routingu, prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu maleje wraz ze wzrostem liczby węzłów. Jest to naturalne, gdyż przy większej liczbie węzłów częściej zdarza się przepełnienie bufora warstwy MAC węzłów (ustalona w planie eksperymentu wielkość tego bufora to 64000 bity) i bufora serwera (1024000 bity), co skutkuje częstszym odrzucaniem pakietów.

Widać jednak, że prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w sieciach z proaktywnym protokołem OLSR jest średnio 10-20 % wyższe niż w sieciach z protokołami reaktywnymi AODV i DSR. Można tutaj wnioskować, że otrzymane dobre wyniki dla protokołu OLSR są skutkiem utrzymywania (przechowywania bez zbędnego cyklicznego wymazywania) aktualnej tablicy routingu.

2.1.3. Obciążenie sieci ad-hoc powodowane przez proces routingu

Obciążenie sieci ad-hoc powodowane wysyłaniem przez węzły pakietów aktualizacyjnych i sygnalizacyjnych protokołów routingu (zwanymi dalej pakietami routingu) wyznaczane było zgodnie ze wzorem:

$$NRL = \frac{\text{liczba wszystkich wysłanych pakietów routingu}}{\text{liczba wszystkich odebranych pakietów danych}}$$

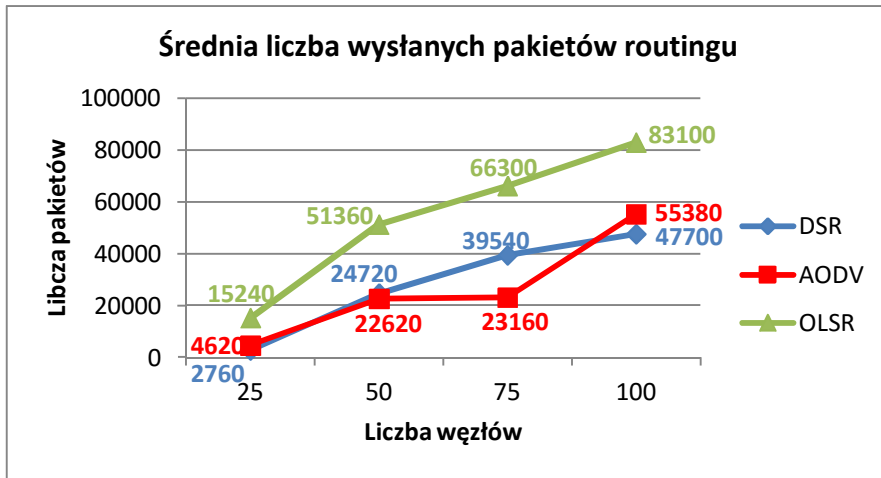
Wykres przedstawiony na rysunku 5 ilustruje uśrednioną liczbę wysyłanych pakietów routingu.

Wraz ze wzrostem liczby węzłów w sieci ad-hoc, niezależnie od zastosowanego protokołu, zwiększa się liczba przesyłanych pakietów routingu, a mianowicie:

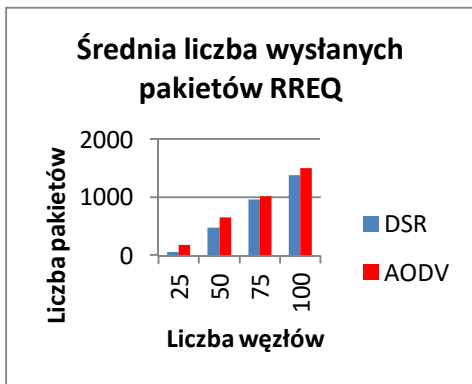
- w przypadku protokołu proaktywnego OLSR zwiększa się liczba okresowych aktualizacji tablic i liczba przekazywanych pakietów kontrolnych *Hello* i *Topology Control*,
- w przypadku protokołów reaktywnych AODV i DSR większa liczba węzłów z mechanizmami odkrywania i utrzymania ścieżek generuje większą ilość pakietów kontrolnych *RREQ* i *RREP* (co zostało zilustrowane na rysunkach 6 i 7).

Wartość wskaźnika NRL, zilustrowana została na rysunku 8 (procentowe obciążenie sieci przez proces routingu).

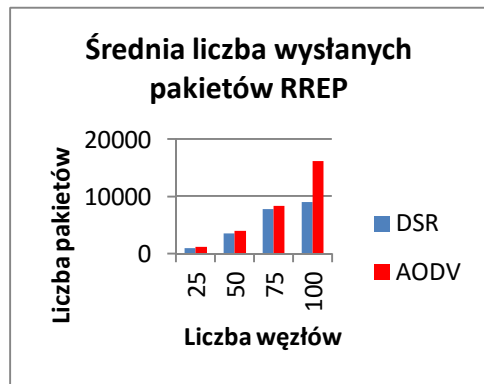
Warto zauważyć, że obciążenie sieci przez proces routingu w przypadku protokołów reaktywnych jest do pewnego momentu (25-50 węzłów sieciowych) zbliżone. To proaktywny protokół OLSR generuje więcej pakietów routingu o charakterze sygnalizacyjnym i informacyjnym niż protokoły AODV i DSR.



Rys. 5. Średnia liczba wysłanych pakietów routingu w zależności od liczby węzłów

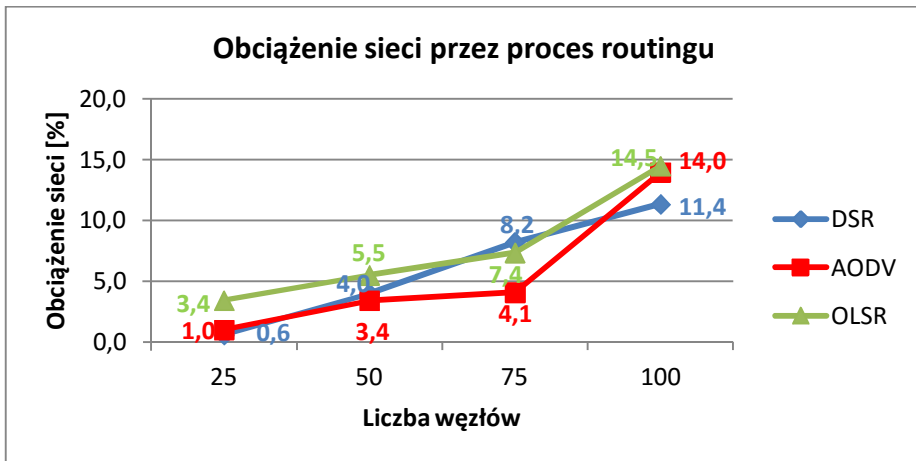


Rys. 6. Średnia liczba wysłanych pakietów RREQ w zależności od liczby węzłów



Rys. 7. Średnia liczba wysłanych pakietów RREP w zależności od liczby węzłów

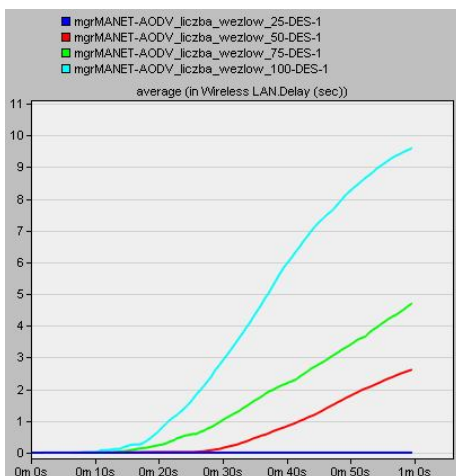
Wyniki uzyskane dla poszczególnych protokołów routingu dynamicznego w sieciach ad-hoc potwierdziły, że wraz z przyrostem liczby węzłów w sieci, bez względu na wykorzystany protokół, zwiększa się obciążenie sieci przez proces routingu. W badanych warunkach OLSR z mechanizmem *multipoint relays* wykazuje najmniej efektywne działanie. Okazuje się tutaj, że okresowa aktualizacja tablic routingu, wysyłanie wiadomości kontrolnych *Topology Control* (TC) oraz komunikacja między węzłami MPRs skutkuje większym obciążeniem sieci niż przy wysyłaniu pakietów kontrolnych *RREQ* i *RREP* protokołów DSR i AODV.



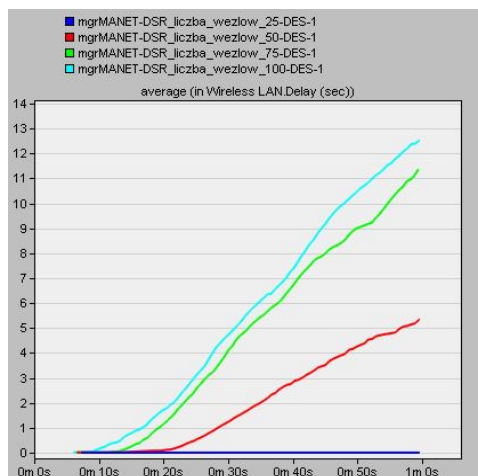
Rys.8. Obciążenie sieci przez proces routingu w sieci ad-hoc w zależności od liczby węzłów

2.1.4. Opóźnienia w dostarczaniu pakietów

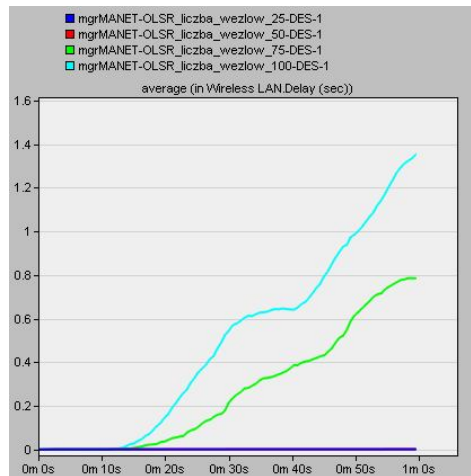
Rysunki 9 – 11 obrazują średnie opóźnienia w dostarczaniu pakietów w sieciach ad-hoc z badanymi protokołami w każdej sekundzie trwania symulacji. Kolorem niebieskim oznaczono średnie opóźnienie w dostarczaniu pakietów w każdej sekundzie trwania symulacji w sieci liczącej 25 węzłów, czerwonym w sieci z 50 węzłami, niebieskim w sieci 75 węzłów, a błękitnym w sieci 100 węzłów.



Rys. 9. Średnie opóźnienia w dostarczaniu pakietów przy zastosowaniu protokołu AODV

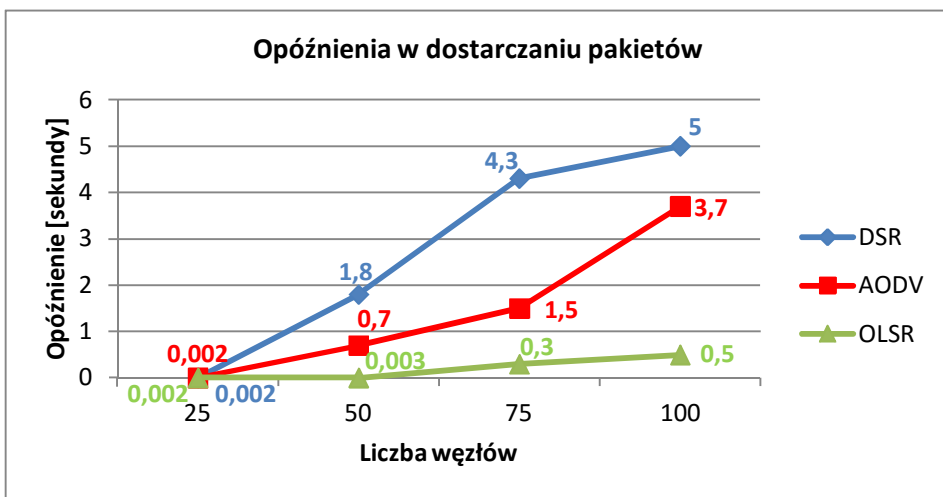


Rys. 10. Średnie opóźnienia przy zastosowaniu protokołu DSR



Rys. 11. Średnie opóźnienia w dostarczaniu pakietów w czasie trwania symulacji z protokołem OLSR

Wraz z postępem symulacji opóźnienia w sieci rosły niezależnie od liczby węzłów oraz wybranego protokołu. Wartości opóźnień z rysunków 9-11 posłużyły obliczeniu średniego opóźnienia w dostarczaniu pakietów w zależności od liczby węzłów (rysunek 12).



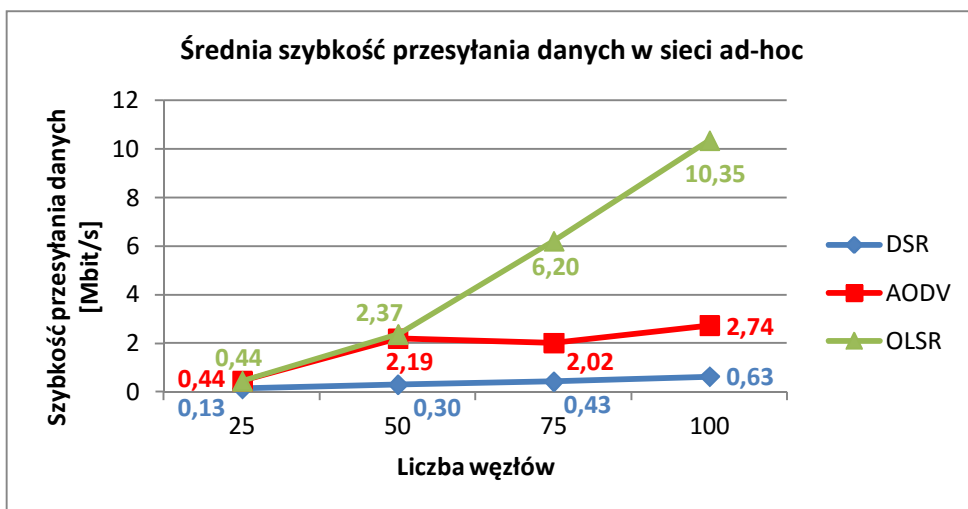
Rys. 12. Średnie opóźnienie w dostarczaniu pakietów w obecności różnych protokołów routingu dynamicznego w zależności od liczby węzłów

Jak widać, w sieciach z małą liczbą węzłów średnie opóźnienia w dostarczaniu pakietów są znikome – na poziomie 0,002 sekundy dla każdego

protokołu. Największe opóźnienia, przy zwiększającej się liczbie węzłów w sieci, występują przy wykorzystaniu protokołu DSR. W większych sieciach, z liczbą węzłów 50, 75 i 100, średnie opóźnienia w przekazywaniu pakietów w obecności protokołu DSR są wysokie i wynoszą odpowiednio 1.8, 4.3 oraz 5 sekund. Nieco niższe opóźnienia uzyskuje się w sieciach z zaimplementowanym protokołem AODV. Najlepsze wyniki odnotowano dla sieci z protokołem OLSR, co wynika z tego, że węzły korzystające z protokołu OLSR dzięki okresowemu wysyłaniu wiadomości kontrolnych posiadają zawsze aktualną informację o topologii sieci, w której funkcjonują. Skutkuje to oczywiście szybkim odnalezieniem węzła następnego skoku na drodze do węzła docelowego. W przypadku protokołów DSR i AODV, przed wysłaniem pakietu do węzła docelowego konieczna jest wymiana wiadomości *RREQ* i *RREP*, co znacznie wydłuża czas dostarczenia pakietu. Największe opóźnienia przy wykorzystaniu protokołu DSR są prawdopodobnie spowodowane retransmisjami danych. Retransmisje te wynikają z przekazywania pakietów zgodnie z wpisami w tablicy *route cache*, w której mogą znajdować się wpisy chwilowo nieaktualne (ang. *stale routes*).

2.1.5. Szybkość przesyłania danych w sieci ad-hoc

Rysunek 13 obrazuje średnią szybkość przesyłania danych przy zastosowaniu badanych protokołów w zależności od liczby węzłów.



Rys. 13. Uśredniona szybkość przesyłania danych w sieci ad-hoc w zależności od liczby węzłów

W sieciach małych (liczących 25 węzłów), bez względu na wykorzystany protokół routingu, szybkość przesyłania danych jest zbliżona i dla protokołów DSR oraz OLSR równa 0,44 Mbit/s i 0,13 Mbit/s. Szybkość przesyłania danych wraz ze wzrostem liczby węzłów w sieciach z protokołem DSR i AODV nieznacznie się zwiększa i wynosi odpowiednio od 0,13 do 0,63 Mbit/s oraz 0,44 do 2,74 Mbit/s. Największe szybkości w przekazywaniu danych w dużych sieciach otrzymano dzięki zastosowaniu protokołu OLSR: dla sieci o liczbie węzłów 75 – 6,2 Mbit/s, dla sieci o liczbie węzłów 100 – 10,35 Mbit/s.

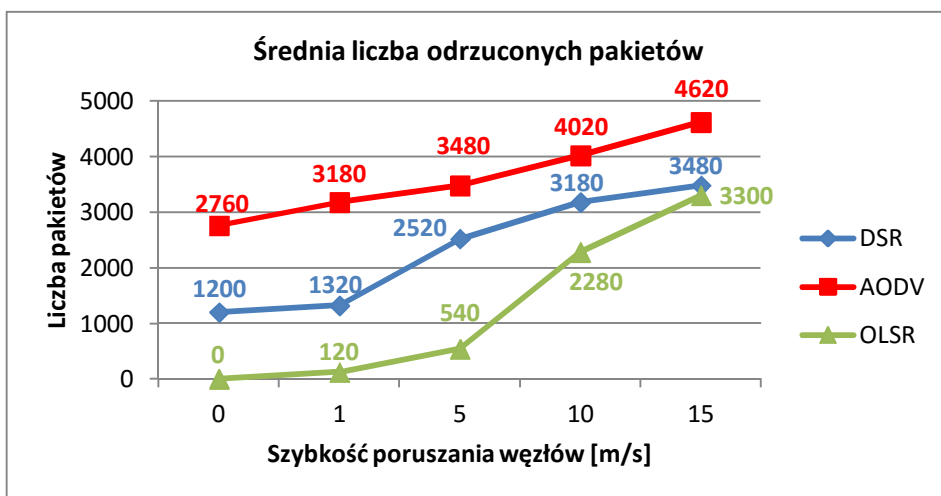
Uzyskane wyniki potwierdzają założenie, że w sieciach z proaktywnym protokołem OLSR szybkość przesyłania danych będzie największa ze względu na wysoki stopień aktualności tablic routingu węzłów i tym samym mniejszą liczbę retransmisji pakietów danych.

2.2. Wyniki uzyskane dla scenariuszy „Mobilność”

W trakcie badań symulacyjnych opartych o scenariusze „Mobilność” testowano efektywność działania wybranych protokołów routingu w sieci ad-hoc z 50-ciomą węzłami, w zależności od szybkości przemieszczania się węzłów.

2.2.1. Liczba odrzuconych pakietów

Rysunek 14 przedstawia średnią liczbę odrzuconych pakietów dla badanych protokołów w zależności od szybkości poruszania się węzłów.



Rys. 14. Średnia liczba odrzuconych pakietów w sieci w zależności od szybkości przemieszczania się węzłów

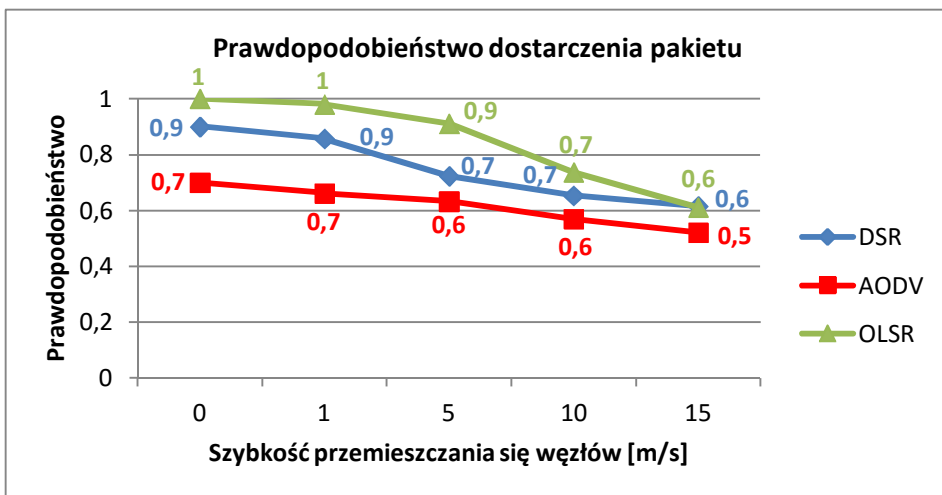
Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze wzrostem szybkości przemieszczania się węzłów w sieci, niezależnie o stosowanego protokołu, zwiększa się liczba odrzucanych pakietów. Na taką sytuację ma wpływ duża liczba nieudanych transmisji, przekraczanie maksymalnej wielkości bufora danych warstwy WLAN MAC i prawdopodobnie również fluktuacje mocy sygnału docierającego do odbiorników węzłów docelowych przy stałej czułości odbiornika.

Również w przypadku tego badania należy podkreślić dużą skuteczność mechanizmu wyznaczania i utrzymywania tras, stosowanego przez proaktywny protokół OLSR.

2.2.2. Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu

Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu wyznaczono w sposób identyczny jak w punkcie 2.1.2. Rysunek 15 przedstawia prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w sieci ad-hoc w zależności od szybkości poruszania się węzłów.

Najwyższe prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu, niezależnie od szybkości poruszania się węzłów, odnotowano dla sieci ad-hoc z zaimplementowanym proaktywnym protokołem OLSR. W sieci, w której węzły nie ulegały przemieszczeniu dostarczanie pakietów jest na poziomie 100%. Ruch węzłów z szybkością 1 m/s nie spowodował spadku prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu.



Rys. 15. Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w zależności od szybkości przemieszczania się węzłów

Najgorsze wyniki w dostarczaniu pakietów odnotowano w sieci wykorzystującej protokół AODV. Gdy węzły nie przemieszczały się, dostarczonych zostało 70% pakietów.

Ruch węzłów z szybkością 15 m/s spowodował największą utratę pakietów, bez względu na wykorzystany protokół routingu. Przy takiej szybkości, prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu dla protokołów DSR, OLSR i AODV wyniosło odpowiednio 0.6, 0.6 oraz 0.5.

Wyniki uzyskane dla poszczególnych protokołów potwierdziły założenie, że wraz ze wzrostem szybkości poruszania się węzłów w sieci, bez względu na wykorzystany protokół routingu, prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu będzie malało. Najbardziej niezawodnym protokołem okazał się protokół OLSR. Należy domniemywać, że zgodnie z teorią, najwyższe prawdopodobieństwo dostarczania pakietów w sieci wykorzystującej ten protokół otrzymano na skutek:

- wysokiego stopnia aktualności tras do węzłów docelowych,
- transportowania pakietów do węzłów docelowych z wykorzystaniem metody *hop by hop*,
- wykorzystania węzłów MPR, zmniejszających liczbę retransmisji pakietów.

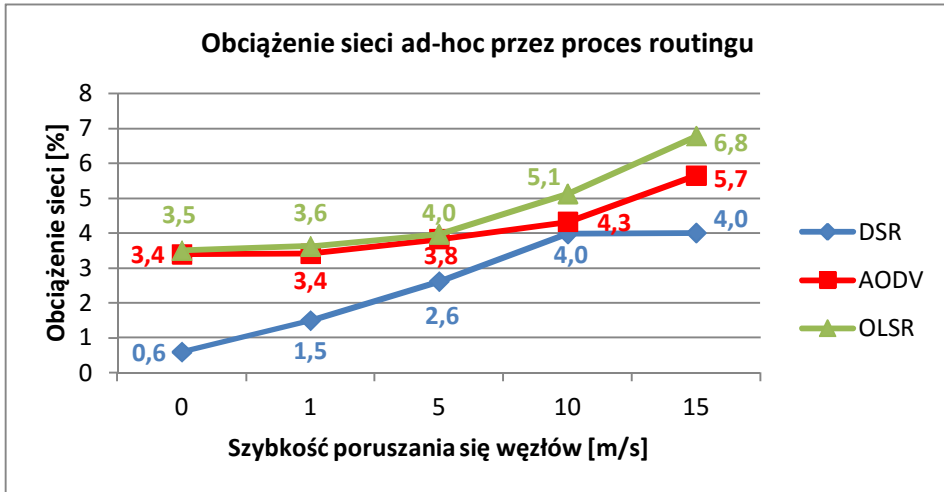
Najgorsze wyniki pod względem dostarczenia pakietu odnotowano w sieci wykorzystującej protokół AODV i pozwala to wnioskować o niższej (w badanych warunkach) efektywności działania mechanizmu wykrywania ścieżek, stosowanego w tym protokole.

2.2.3. Obciążenie sieci ad-hoc przez proces routingu węzłów mobilnych

Obciążenie sieci ad-hoc przez procesu routingu mobilnych węzłów wyznaczono w sposób analogiczny jak w punkcie 2.1.3. Rysunek 16 ilustruje średnie obciążenie sieci ad-hoc przez proces routingu w zależności szybkości poruszania się węzłów.

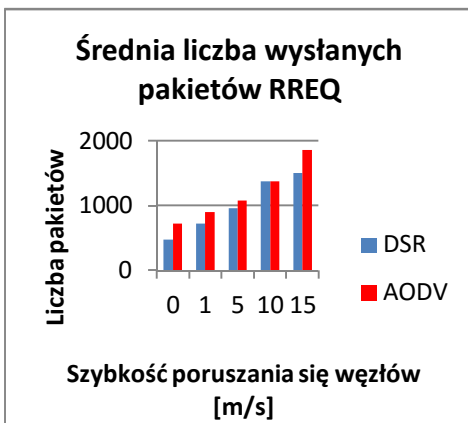
Obciążenie sieci przez proces routingu zwiększa się wraz ze wzrostem szybkości węzłów niezależnie od zaimplementowanego protokołu routingu. Najmniejsze obciążenie sieci otrzymuje się przy wykorzystaniu protokołu reaktywnego DSR (od 0,6% gdy węzły nie ulegały przemieszczeniu do 4% gdy poruszały się z szybkością 15 m/s). Największe obciążenia sieci przez proces routingu odnotowano przy wykorzystaniu protokołu AODV i OLSR. Obciążenie sieci przy wykorzystaniu tych protokołów, w której szybkość przemieszczania węzłów zwiększała się od 0 m/s do 15 m/s wzrosły odpowiednio z 3,4% do

5,7% i 3,5% do 6,8%. Oznacza to, że protokoły te przesłały znacznie więcej pakietów kontrolnych niż protokół DSR.

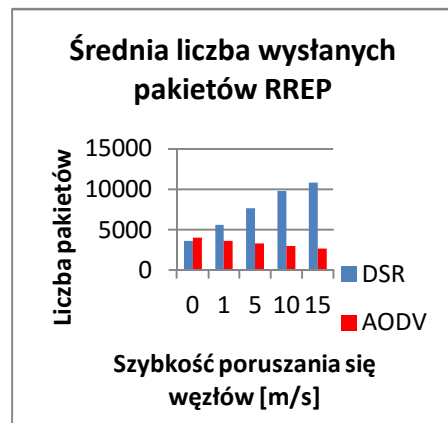


Rys. 16. Średnie obciążenie sieci ad-hoc przez proces routingu przy wzroście szybkości przemieszczania się węzłów

W celu porównania liczby wysłanych pakietów kontrolnych RREQ i RREP protokołów reaktywnych opracowano wykresy przedstawione na rysunkach 17 i 18.



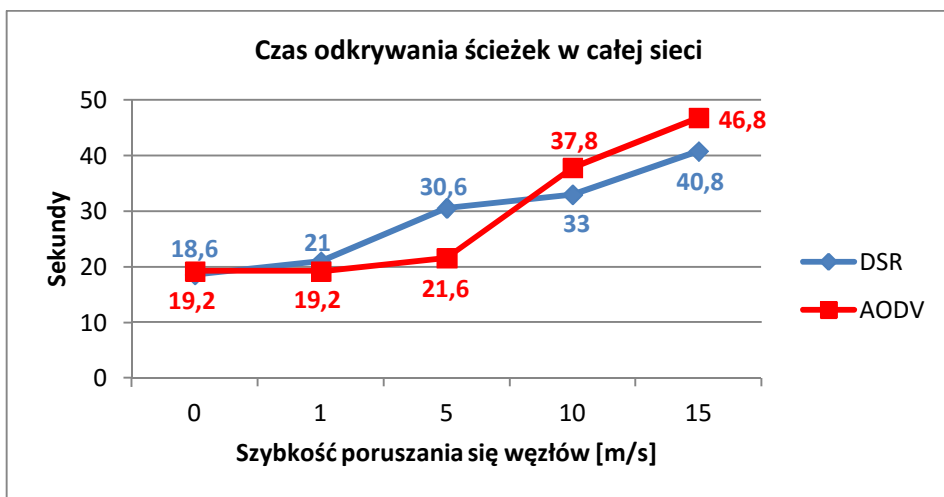
Rys. 17. Średnia liczba wysłanych pakietów RREQ w zależności od liczby węzłów



Rys. 18. Średnia liczba wysłanych pakietów RREP w zależności od liczby węzłów

Protokół AODV wysyła więcej żądań RREQ niż DSR przy wzroście szybkości węzłów. Odwrotna sytuacja występuje przy wysyłaniu odpowiedzi RREP. Im szybciej węzły się przemieszczają, tym mniej przesyłanych jest wiadomości RREP, co będzie skutkowało wydłużaniem czasu wyznaczania prawidłowych ścieżek do węzłów docelowych i wzrostem liczby odrzuconych pakietów.

Na rysunku 19 zilustrowano średni czas wyznaczania przez węzeł mobilny ścieżek do węzłów docelowych. Czas odkrywania ścieżek w sieciach o małej ruchliwości węzłów jest mniejszy z protokołem AODV. Sytuacja ulega zmianie, gdy węzły poruszają się szybciej. W sieciach, gdzie szybkość przemieszczania się węzłów wynosi 10 m/s i 15 m/s protokół DSR wykrywa ścieżki o odpowiednio 4,8 i 6 sekund szybciej.

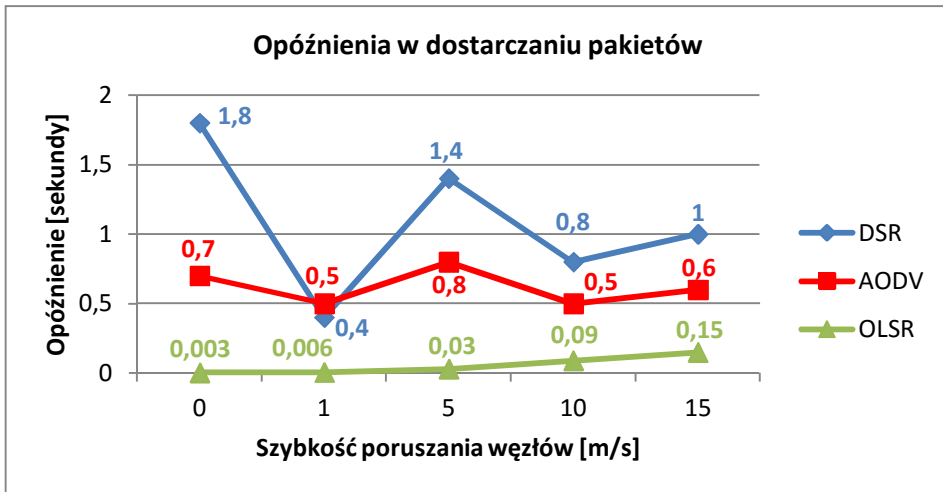


Rys. 19. Szybkość odkrywania ścieżek w całej sieci ad-hoc w zależności od szybkości poruszania się węzłów

Podsumowując uzyskane wyniki, stwierdzono, że wraz ze wzrostem szybkości poruszania się węzłów w sieci, bez względu na wykorzystany protokół, zwiększa się obciążenie sieci przez proces routingu. Mechanizmy ustanawiania i utrzymywania ścieżek protokołu DSR powodują mniejsze od wprowadzanych przez AODV i OLSR obciążenie. Dodatkowo, potwierdzono przypuszczenie, że w sieciach o dużej ruchliwości węzłów mechanizm wykrywania ścieżek protokołu DSR jest efektywniejszy od stosowanego w AODV.

2.2.4. Opóźnienia w dostarczaniu pakietów w sieci węzłów mobilnych

Diagram z rysunku 20 ilustruje średnie opóźnienia w dostarczaniu pakietu w sieci ad-hoc w zależności od szybkości poruszania się węzłów.



Rys. 20. Średnie opóźnienia w dostarczaniu pakietów w sieci ad-hoc w zależności od szybkości przemieszczania się węzłów

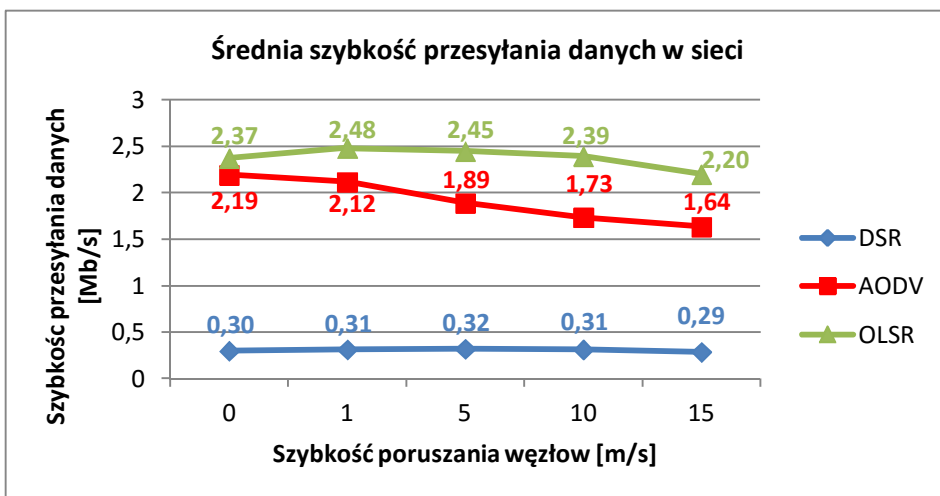
Najmniejsze opóźnienia w dostarczaniu pakietów, bez względu na szybkość przemieszczania się węzłów odnotowano w sieci z zaimplementowanym protokołem OLSR. Opóźnienia te nieznacznie rosną wraz z szybkością poruszania się węzłów i wynoszą 0,003 sekundy, gdy węzły nie przemieszczały się oraz 0,15 sekundy podczas ruchu o szybkości 15 m/s. W przypadku sieci implementujących protokoły reaktywne DSR i AODV wartości opóźnień nie ulegają stałemu przyrostowi podczas zwiększającej się szybkości poruszania się węzłów.

Wyniki uzyskane dla poszczególnych protokołów routingu dynamicznego w sieciach ad-hoc mobilnych węzłów potwierdziły hipotezy badawcze. W wybranych warunkach funkcjonowania sieci, wraz ze wzrostem szybkości poruszania się węzłów w sieci z zaimplementowanym protokołem OLSR zwiększa się obciążenie sieci przez proces routingu. Niemniej jednak, w sieci implementującej ten protokół otrzymano najmniejsze opóźnienia. Jak wspomniano wcześniej, tablice routingu węzłów z protokołem OLSR charakteryzuje wysoki stopień aktualności, osiągnięty przez okresowe wysyłanie wiadomości kontrolnych. W przypadku DSR i AODV wysłanie pakietu do celu poprzedzone jest wymianą wiadomości *RREQ* i *RREP*, co znacznie wydłuża

czas dostarczenia pakietu. Opóźnienia przy wykorzystaniu protokołu DSR są dodatkowo powodowane licznymi retransmisjami, wynikającymi z prób przekazywania pakietów przez często zdezaktualizowane trasy (ang. *stale routes*) z tablicy *route cache*.

2.2.5. Szybkość przesyłania danych w sieci ad-hoc

Średnia szybkość przesyłania danych w sieciach ad-hoc w zależności od szybkości przemieszczania się węzłów zilustrowana została na rysunku 21.



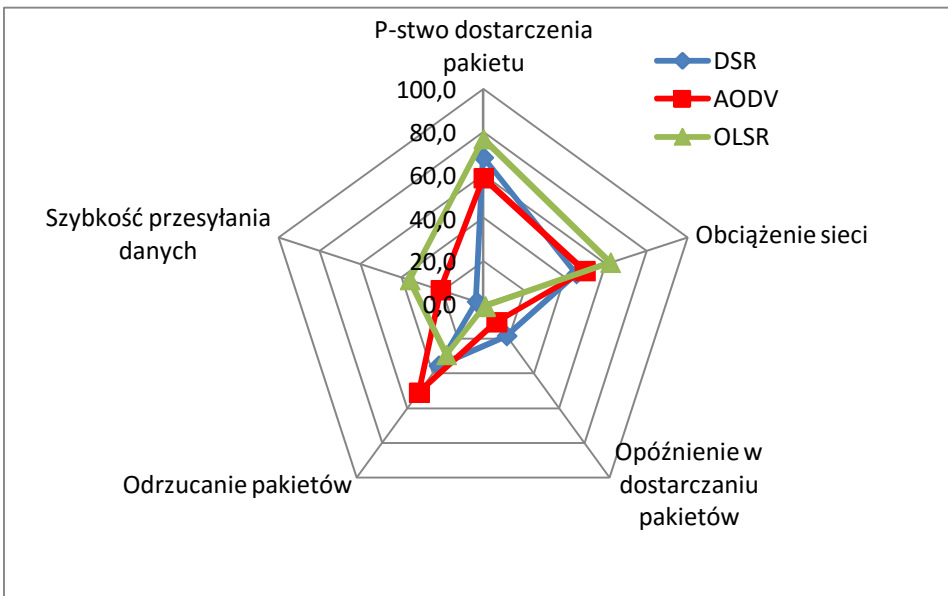
Rys. 21. Uśredniona szybkość przesyłania danych w sieci ad-hoc w zależności szybkości poruszania się węzłów

Największą szybkość przesyłania danych, bez względu na szybkość poruszania się węzłów otrzymuje się w sieciach implementujących protokół OLSR, najmniejszą – dla protokołu DSR. Największy spadek w szybkości przesyłania danych w zależności od szybkości węzłów zanotowano dla protokołu AODV. Średnia szybkość przesyłania danych protokołu DSR jest bardzo niska w porównaniu do protokołu AODV i OLSR. Pomimo stosunkowo dużego obciążenia sieci przez proaktywny protokół routingu (punkt 2.2.3), najniższe opóźnienia w przekazywaniu pakietów (punkt 2.2.4) i tym samym najwyższą szybkość przesyłania danych uzyskuje się stosując proaktywny protokół OLSR.

Podsumowanie

Celem eksperymentu symulacyjnego była ocena wpływu zastosowanego protokołu routingu dynamicznego na działanie sieci ad-hoc w określonych warunkach. Biorąc pod uwagę znaczenie problemu skutecznego integrowania usług sieciowych przy zachowaniu pożądanej jakości usług (QoS), również w sieciach mobilnych węzłów, problematyka doboru odpowiedniego protokołu trasowania wydaje się ważna i nadal aktualna.

Wyniki cząstkowe poszczególnych symulacji zilustrowano na rysunku 22.



Rys. 22. Porównanie wydajności protokołów DSR, AODV i OLSR

Potwierdzają one hipotezy badawcze, dotyczące wpływu zastosowanego protokołu routingu na efektywność przekazywania pakietów. Wartości najważniejszych wskaźników, a więc prawdopodobieństwa dostarczenia pakietów i średniej szybkości transmisji uzyskiwanej przez węzły sieciowe wskazują, że w badanych warunkach zasadne jest stosowanie proaktywnego protokołu OLSR. W sieciach z protokołem OLSR odnotowano również najmniejsze opóźnienia w dostarczaniu danych. Oznacza to, że stosowanie protokołów proaktywnych może być rozważane w przypadku wykorzystywania aplikacji wymagających odpowiedniego poziomu jakości usług.

Przeprowadzone badania wykazały również, że zasadnicze znaczenie dla wydajności sieci ad-hoc ma jej wielkość. Przy zwiększającej się liczbie węzłów, niezależnie od stosowanego protokołu routingu, prawdopodobieństwo

dostarczenia pakietu drastycznie maleje, być może do nieakceptowanego poziomu. Na podstawie uzyskanych wyników nie daje się wskazać granicy stosowalności danego protokołu.

Literatura

- [1] BASAGNI S., CONTI M., GIORDANO S., STOJMENOVIC I., *Mobile Ad Hoc Networking*, IEEE Press, New Jersey, 2004, pp. 275-300.
- [2] BOUKERCHE A., *Handbook of Algorithms for Wireless Networking and Mobile Computing*, Chapman & Hall, 2006.
- [3] GUPTA S. K., SADAWARTI H., VERMA A. K., *Performance Analysis of AODV, DSR & TORA Routing Protocols*, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, No. 2, April, 2010, pp. 226-231.
- [4] MAKKAR A., BHUSHAN B., TANEJA S., *Behavioral Study of MANET Routing Protocols*, International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol. 2, No. 3, June, 2011, pp. 210-216.
- [5] MALINOWSKI T., *Metodyka badań protokołów trasowania dla sieci ad-hoc*, Biuletyn Instytutu Automatyki i Robotyki, Nr 33, 2012, str. 71-90.
- [6] MISRA S., MISRA S. C., WOUNGANG I., *Guide to Wireless Ad Hoc Networks*, Springer-Verlag, London, 2009.
- [7] MOHAPATRA P., KRISHNAMURTHY S. V., *Ad Hoc networks (Technologies and Protocols)*, Springer, 2005.
- [8] *Awareness of Emerging Wireless Technologies: Ad-hoc and Personal Area Networks Standards and Emerging Technologies*, NATO RTO Technical Report - RTO-TR-IST-035, 2007, <https://www.cso.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-TR-IST-035> (dostęp 17.10.2013).
- [9] PIERRE S., BARBEAU M., KRANAKIS E., *Ad Hoc, Mobile and Wireless Networks*, Springer, Montreal, 2003.
- [10] PIERSA K., *Badania symulacyjne protokołów routingu dynamicznego w sieciach ad hoc*. Praca magisterska, Wydział Cybernetyki, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012.
- [11] SAJJAD A., ASAD A., *Performance Analysis of AODV, DSR and OLSR in MANET*, Department of Electrical Engineering with emphasis on Telecommunication Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2009.
- [12] SRIKANTH T., NARSIMHA V. B., *Simulation-based approach to performance study of routing protocols in MANETs and ad-hoc Networks*, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL. 11 No. 9, September, 2011, pp. 111-115.

Report of simulation studies of routing protocols in ad-hoc networks

ABSTRACT: The paper presents results of comparative studies for dynamic routing protocols used in ad-hoc networks. The impact of routing protocols on networks functionality is shown. Obtained results allow to indicate a preferred mode of updating routes in routing tables in a network of a certain size and speeds of moving nodes, what is specified in simulation scenarios.

KEYWORDS: simulation studies, ad-hoc networks, dynamic routing protocols for ad-hoc networks

Praca wpłynęła do redakcji: 20.07.2015 r.

