

Rozdział 13

Analiza zachowania metod unikania kolizji w bezprzewodowej sieci *ad-hoc* zawierającej stacje ruchome

Bartłomiej ZIELIŃSKI
Politechnika Śląska, Instytut Informatyki
Bartlomiej.Zielinski@polsl.pl

Streszczenie

Opisano wybrane metody unikania kolizji, zaprojektowane pod kątem zastosowania w sieciach bezprzewodowych: wykrywanie tonu zajętości oraz wymianę ramek sterujących. Dokonano porównania skuteczności ich działania w sieci ad-hoc, zawierającej stacje ruchome. Zaproponowano kryterium pozwalające ocenić skuteczność drugiej z wymienionych metod.

1. Wprowadzenie

Protokoły dostępu do łącza są jednym z najważniejszych aspektów projektowania sieci komputerowych. Jeżeli bowiem protokół taki jest źle dobrany do aplikacji, może nie zapewniać wymaganych parametrów sieci [1].

W sieciach bezprzewodowych występuje szereg zjawisk, nieznanych w sieciach przewodowych, a mających kluczowe znaczenie dla wydajności i stabilności protokołów dostępu do łącza. Ich wpływ jest szczególnie widoczny w sieciach ad-hoc. Sieci te charakteryzują się szybko zmieniającą się i nieregularną strukturą, a także brakiem nadrzędnej stacji sterującej, koordynującej pracę pozostałych stacji¹ [2]. W tej sytuacji stacje sieci ad-hoc mogą posługiwać się niemal jedynie rywalizacyjnymi protokołami dostępu do łącza.

¹ W niniejszym rozdziale przez sieć ad-hoc rozumie się zbiór stacji o identycznych możliwościach i uprawnieniach.

2. Metody unikania kolizji dla sieci bezprzewodowych

Klasyczne metody dostępu rywalizacyjnego, opartego na wykrywaniu nośnej, nie zawsze sprawdzają się w sieciach bezprzewodowych, a szczególnie w sieciach ad-hoc. Wynika to z występowania zjawiska stacji ukrytej i odkrytej. Dodatkowo, efekt przechwytywania w większości przypadków uniemożliwia wykrywanie kolizji w sposób znany np. z przewodowej sieci Ethernet. Stąd też potrzeba stworzenia bardziej wydajnych metod unikania kolizji, które nie utracą stabilności w środowisku sieci ad-hoc, szczególnie zawierającej stacje ruchome [3, 4].

2.1. Wykrywanie tonu zajętości

Wykrywanie tonu zajętości może zastąpić wykrywanie nośnej. Pasma jest podzielone na dwa kanały [5]:

- kanał komunikatów, używany dla transmisji danych i zajmujący większość pasma,
- kanał zajętości, używany dla sygnalizacji stanu łącza, relatywnie wąski.

Jeżeli stacja ma ramkę gotową do wysłania, przed rozpoczęciem transmisji musi sprawdzić stan kanału. Obecność tonu zajętości świadczy o zajętości łącza, transmisję należy zatem wstrzymać. W przeciwnym przypadku ramkę można natychmiast wysłać.

Sygnał zajętości jest zazwyczaj falą sinusoidalną, którą można wytworzyć na kilka sposobów:

- przez każdą stację, odbierającą dane z kanału komunikatów,
- wyłącznie przez adresata informacji,
- początkowo przez każdą stację wykrywającą transmisję, po rozpoznaniu adresów zaś – wyłącznie przez adresata.

Pierwsza z metod [5] jest najprostsza i bardzo efektywna w zakresie zmniejszania liczby stacji ukrytych. Niestety, słabością jej jest znaczny i niepotrzebny wzrost liczby stacji odkrytych. Można powiedzieć, że obszar zajęty przez określoną transmisję jest znacznie większy, niż potrzeba.

Aby uniknąć zwiększania liczby stacji odkrytych, wytwarzanie tonu zajętości można ograniczyć do adresata przesyłanej informacji [6]. W ten sposób ramka chroniona jest przed kolizją w pobliżu odbiornika, a więc w jedynym miejscu, w którym naprawdę powinna być chroniona (nie ma potrzeby ochrony w pobliżu nadajnika lub stacji, do których ramka nie jest adresowana). Ta metoda także jest prosta, jednak nie chroni ramki do chwili rozpoznania jej adresu przeznaczenia. Tak więc na początku transmisji ramka jest narażona na kolizje, wynikające z braku sygnału ochronnego.

Trzecia metoda jest kombinacją opisanych powyżej metod. Charakteryzuje się ona występowaniem dwóch różnych tonów zajętości [7]. Pierwszy z nich jest wytwarzany przez wszystkie stacje znajdujące się w zasięgu nadajnika, gdy tylko zostanie wykryta transmisja w kanale danych. Stan ten trwa do chwili rozpoznania adresu przeznaczenia. Wówczas adresat informacji rozpoczyna wysyłanie drugiego tonu zajętości, któ-

rego obecność świadczy o braku kolizji. Pozostałe stacje wyłączają generowanie tonu zajętości, gdy tylko okaże się, że nie są one adresatami przesyłanej informacji.

Warto zauważyć, że ostatnia metoda ma pewne cechy wykrywania kolizji [7]. Jeżeli ramkę podzieli się na preambułę (zawierającą adres docelowy) i rdzeń (zawierający dane), można wykryć kolizję przed rozpoczęciem wysyłania danych. Po wysłaniu preambuły nadajnik czeka na otrzymanie tonu zajętości od adresata. Brak takiego tonu oznacza kolizję lub jakikolwiek inny błąd podczas transmisji preambuły, nie ma zatem sensu wysyłania pozostałej części ramki. Z tego punktu widzenia ten sposób jest podobny do wymiany ramek sterujących.

Pewną wadą każdej odmiany wykrywania tonu zajętości jest możliwość łatwego zablokowania sieci przez zagłuszanie kanału zajętości. Ponadto, metody te nie są łatwe do zaimplementowania w praktyce, ponieważ wymagają dwu- lub trójkanałowych układów nadawczo-odbiorczych.

2.2. Wymiana ramek sterujących

Jako że wykrywanie nośnej nie jest wydajną metodą unikania kolizji w obecności stacji ukrytych lub odkrytych, a wykrywanie tonu zajętości jest kosztowne w implementacji, można poprzedzić transmisję danych wymianą informacji sterującej [8]. Można uznać takie podejście za pewną formę jednokanałowej implementacji wykrywania tonu zajętości, przy czym ton zajętości jest tu zastąpiony przez ramki sterujące, przesyłane w tym samym kanale, co dane.

Gdy stacja ma ramkę do wysłania, wysyła najpierw ramkę sterującą, zwaną RTS (ang. *Request To Send*), adresowaną do odbiornika informacji. Ramka powinna zawierać informację dotyczącą długości ramki danych. Jeżeli adresat odbierze tę ramkę poprawnie, odpowiada nadawcy ramką CTS (ang. *Clear To Send*). Ramka ta również powinna zawierać informację o długości ramki danych. Gdy nadajnik poprawnie odbierze ramkę CTS, można przyjąć, że łącze jest zarezerwowane na potrzeby transmisji między tymi dwiema stacjami przez czas wynikający z zawartości ramek RTS i CTS.

Oczywiście, ramki RTS i CTS mogą być odbierane także przez inne stacje znajdujące się w otoczeniu nadajnika i odbiornika. Stacje te można podzielić na następujące grupy:

- stacje odbierające tylko ramkę RTS,
- stacje odbierające tylko ramkę CTS,
- stacje odbierające obie ramki.

Jeżeli stacja odbiera tylko ramkę RTS, znajduje się w zasięgu nadajnika, ale poza zasięgiem odbiornika; można więc przyjąć, iż jest to stacja odkryta. Z drugiej strony, jeśli stacja odbiera tylko ramkę CTS, znajduje się w zasięgu odbiornika, ale poza zasięgiem nadajnika, jest więc stacją ukrytą. Stacja, odbierająca zarówno RTS, jak i CTS, nie jest ani odkryta, ani ukryta i mogłaby poprawnie rozpoznać stan kanału używając wyłącznie wykrywania nośnej.

Można wykazać [9], że, aby poprawnie chronić ramki danych przed kolizjami spowodowanymi przez stacje ukryte lub odkryte, długość ramki CTS powinna być większa niż RTS.

W niektórych przypadkach celowe jest użycie dodatkowych ramek sterujących. Na przykład, po poprawnej negocjacji RTS-CTS, nadajnik może wysłać ramkę DS (ang. *Data Sending*) [10]. Jest to szczególnie użyteczne, gdy z pewnych powodów odbiorca informacji nie może przyjąć ramki o długości zaproponowanej przez nadawcę. W takim przypadku odsyła w ramce CTS inną długość, jednak informacja ta może nie dotrzeć do wszystkich stacji sąsiadujących z nadawcą (np. stacji odkrytych). Ramka DS pozwala zatem przekazać im nowe ustalenia dotyczące czasu rezerwacji łącza.

Inną techniką godną uwagi jest wytwarzanie potwierdzeń na poziomie podwarstwy dostępu do łącza [10]. Oczywiście wyższe warstwy również mogą wykryć nieprawidłowości transmisji, jednak warstwa dostępu może uczynić to szybciej, zmniejszając czas potrzebny na wykrycie kolizji lub innego błędu oraz zażądanie retransmisji.

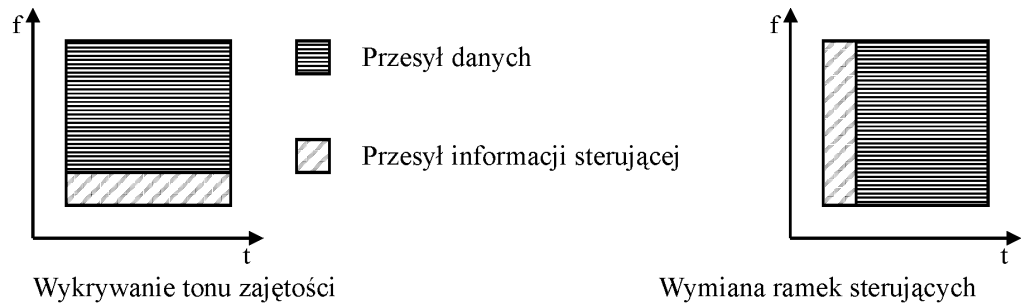
Wymiana ramek sterujących jest względnie prostą i wydajną metodą unikania kolizji w obecności stacji ukrytych lub odkrytych. Tym niemniej zastosowana w pojedynkę nie zapewnia wystarczającej skuteczności ze względu na ryzyko kolizji między ramkami sterującymi [11]. Kolizje mogą także wystąpić w środowiskach mobilnych, np., gdy nowa stacja zbliża się do stacji zaangażowanych w transmisję. Stacja taka mogła być poza zasięgiem sieci podczas negocjacji RTS-CTS, ale podczas przesyłu danych znajduje się już w zasięgu. Nie posiadając zatem wiedzy o rezerwacji łącza, może zakłócić przebiegającą transmisję danych. Zjawisko takie można wyeliminować, wspierając wymianę ramek sterujących albo wykrywaniem nośnej [11], albo wykrywaniem tonu zajętości [12].

3. Analiza zachowania w sieci zawierającej stacje ruchome

Przedstawione powyżej metody unikania kolizji, jakkolwiek wydają się całkowicie odmienne, są w istocie zbliżone do siebie. W obu metodach część pasma transmisyjnego poświęcona jest bowiem na przesłanie dodatkowej informacji sterującej, określającej stan łącza. Różnica tkwi jednak w sposobie przesyłania tej informacji. Metoda polegająca na wykrywaniu tonu zajętości informuje o stanie łącza w sposób ciągły przez cały czas transmisji danych, podczas gdy wymiana ramek sterujących, na podstawie których można określić stan łącza, jedynie poprzedza przesył informacji (rys. 1). Jakkolwiek nie stanowi to zagrożenia w przypadku sieci stacjonarnych lub zawierających niewielką liczbę stacji o ograniczonej mobilności, w przypadku złożonej sieci ad-hoc z dużą liczbą ruchliwych stacji może spowodować spadek wydajności sieci.

Rozważmy bezprzewodową sieć ad-hoc pokazaną na rys. 2. Stacja N (nadawca) prowadzi transmisję danych do stacji O (odbiorca). W stronę tych stacji, od strony odbiorcy, zbliża się stacja ruchoma R. Jest ona zatem poza zasięgiem nadawcy. Jeżeli odbiorca chroni transmisję danych tonem zajętości, to stacja R może uzyskać prawidłową informację o stanie łącza niezależnie od chwili, w której znajdzie się ona w zasięgu odbiorcy. Gdy natomiast nadawca i odbiorca stosują wymianę ramek steru-

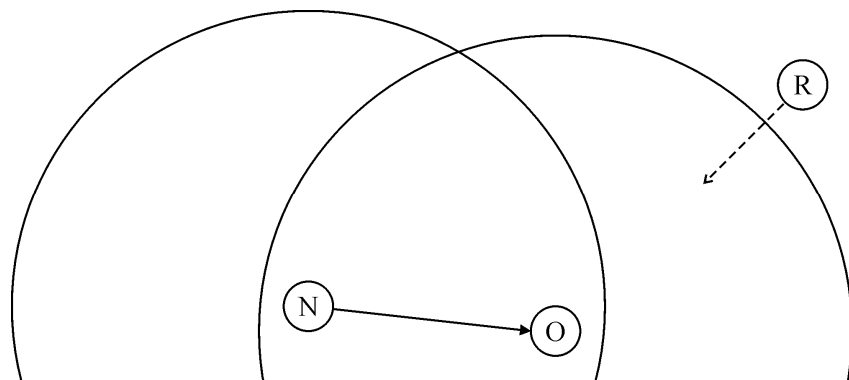
jących, ochrona nie jest już tak skuteczna. Mianowicie, stacja R powinna znajdować się w zasięgu odbiorcy już w chwili, gdy rozpoczyna on transmisję ramki CTS. Jakikolwiek opóźnienie spowoduje brak (całkowitego) odbioru tej ramki, co pociąga za sobą utratę skuteczności tej metody w opisywanym przypadku.



Wykrywanie tonu zajętości

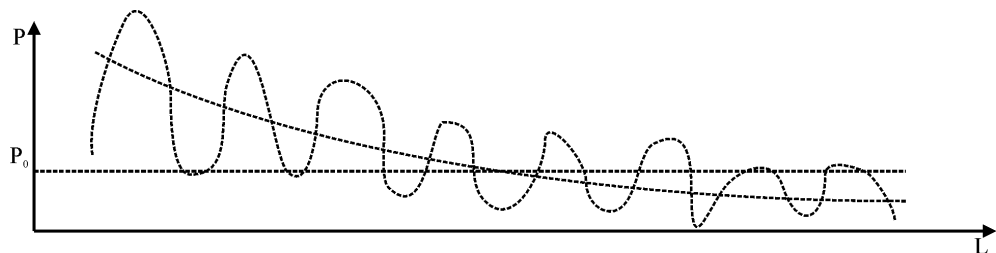
Wymiana ramek sterujących

Rys. 1. Zasada przesyłu informacji sterującej w omawianych metodach unikania kolizji



Rys. 2. Przykładowa sieć ad-hoc

Dla rzeczywistej sieci ad-hoc opisany przypadek jest zbyt uproszczony. W sieciach bezprzewodowych, szczególnie radiowych, występują bowiem zaniki Rayleigh'a lub Rice'a, co powoduje, że spadek mocy sygnału wraz z odległością jest nie monotoniczny, lecz w dużym stopniu nieregularny. Przykładową zależność mocy sygnału od odległości pokazano na rys. 3. Lokalne minima mocy sygnału odległe są o około połowę długości fali ($\lambda/2$) [13, 14]. Jeśli takie minimum wypada poniżej czułości odbiornika, występuje zanik. W takiej sytuacji zasięgi stacji powinny być pokazane nie jako okręgi, lecz w sposób bardziej nieregularny, np. jak na rys. 4.

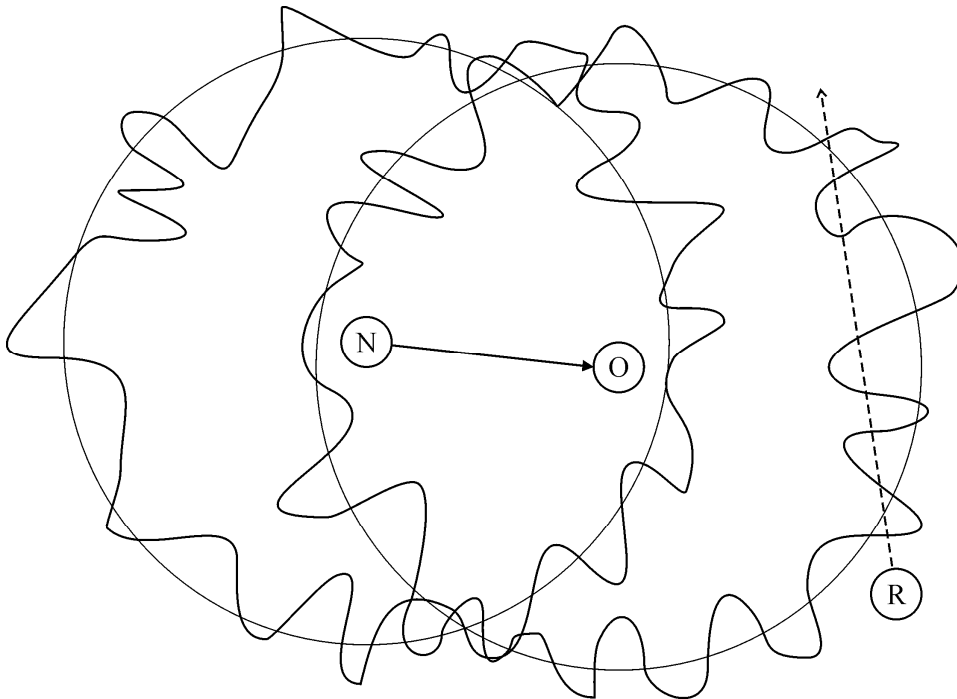


Rys. 3. Zależność mocy sygnału radiowego od odległości

Podobnie jak poprzednio, stacja N przesyła dane do stacji O. W pobliżu granicy zasięgu drugiej z wymienionych porusza się stacja R. Ze względu na nieregularny przebieg tej granicy stacja ta na przemian pojawia się i znika z zasięgu odbiorcy. Wraz ze zmianą położenia zmienia się także słyszalność tonu zajętości, można więc założyć, że metoda ta zapewnia wystarczającą skuteczność unikania kolizji. Inaczej jest jednak w przypadku wymiany ramek sterujących. Aby była ona skuteczna, cała taka ramka musi „zmieścić się” między dwoma sąsiednimi zanikami.

Przyjmijmy następujące założenia:

- zasięg kanału tonu zajętości i kanału danych są identyczne,
- czas wykrycia nośnej i tonu zajętości jest pomijalny,
- długość fali radiowej wynosi λ , a częstotliwość – f ,
- stacja R porusza się z prędkością v .



Rys. 4. Przykładowa sieć ad-hoc z zaznaczonym rzeczywistym zasięgiem stacji

Czas, jaki stacja R potrzebuje na przebycie odległości $\lambda/2$ wynosi:

$$t_{fad} = \frac{\lambda}{2v}. \quad (1)$$

Aby ramka CTS została prawidłowo odebrana, czas jej transmisji (wraz z elementami warstwy fizycznej, jak np. preambuła czy czas przełączania odbiór-nadawanie) nie może być większy niż czas pomiędzy dwoma kolejnymi zanikami, tj. średnio¹

$$t_{CTS} \leq \frac{t_{fad}}{2}. \quad (2)$$

W praktyce może okazać się, że czas ten powinien być jeszcze krótszy.

Biorąc powyższe pod uwagę, aby zachować skuteczność unikania kolizji metodą wymiany ramek sterujących, prędkość poruszania się stacji R jest ograniczona i nie może przekraczać

$$v \leq \frac{\lambda}{4 \cdot t_{CTS}} = \frac{c}{4f \cdot t_{CTS}}. \quad (3)$$

Przykładowo, w standardzie IEEE 802.11, przy prędkości transmisji 1 Mb/s i rozpraszaniu widma metodą kluczkowania bezpośredniego, czas transmisji ramki CTS wynosi około 320 μ s, z czego 192 μ s stanowi preambuła i nagłówek warstwy fizycznej. Przy częstotliwości 2.4 GHz otrzymujemy

$$v \leq \frac{c}{4f \cdot t_{CTS}} = \frac{3 \cdot 10^8 [\text{m/s}]}{4 \cdot 2.4 \cdot 10^9 [\text{Hz}] \cdot 320 \cdot 10^{-6} [\text{s}]} = 97,7 [\text{m/s}]. \quad (4)$$

Warto zauważyć, że inne wersje standardu (802.11b, 802.11g) charakteryzują się krótszymi preambułami oraz większymi prędkościami transmisji, co pozwala na jeszcze większą mobilność stacji². Wynika z tego, że w wielu zastosowaniach ograniczenie prędkości transmisji nie jest istotne.

Przedstawione kryterium ma jedynie charakter orientacyjny. Na rys. 3 widać bowiem, że, wraz ze wzrostem poziomu sygnału, wydłuża się odległość między zanikami, co umożliwia poprawną pracę sieci przy większych prędkościach poruszania się stacji. Analogicznie, przy słabszym sygnale, dopuszczalna prędkość jest znacznie mniejsza.

Warto zauważyć, że – w zakresie przyjętych założeń – powyższe ograniczenie nie dotyczy metody z wykrywaniem tonu zajętości.

4. Podsumowanie

Z przedstawionych rozważań wynika, że obecne technologie niższych warstw sieci bezprzewodowych wspierają mobilność stacji w sieciach ad-hoc w wystarczającym stopniu. Można jednakże zauważyć tendencję do przenoszenia komunikacji radiowej

¹ Jeśli odległość między zanikami wynosi $\lambda/2$, to, jak widać na rys. 3, poziom sygnału odbieranego przekracza czułość odbiornika średnio w dwukrotnie mniejszych odległościach.

² Należy jednak mieć na uwadze, że obsługa krótkiej preambuły jest opcjonalna, zaś ramki sterujące mogą nie być przesyłane z maksymalną prędkością. W takich warunkach mobilność stacji będzie ograniczona.

w stronę coraz wyższych częstotliwości, skutkiem czego odległości między miejscami występowania zaników zmniejszają się; zjawisko to, w pewnym zakresie, ogranicza mobilność stacji. Z drugiej jednak strony, efekt ten równoważony jest przez znaczny wzrost prędkości transmisji.

Przedstawiony sposób oceny skuteczności metody unikania kolizji przez wymianę ramek sterujących można stosować do analizy dowolnego typu sieci.

literatura

1. Tannenbaum A. S.: *Computer Networks (Fourth Edition)*. Prentice Hall, 2003.
2. Nowicki K., Woźniak J.: *Przewodowe i bezprzewodowe sieci LAN*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
3. Zieliński B.: Metody unikania i wykrywania kolizji dla sieci ad-hoc. W: *Współczesne problemy sieci komputerowych. Zastosowanie i bezpieczeństwo*. WNT, 2004, s. 169÷176.
4. Zieliński B.: Physical properties and medium access control for wireless ad-hoc networks. *PhysCon 2005 International Conference Physics and Control Proceedings*, Sankt Petersburg 2005, s. 106÷111.
5. Tobagi F. A., Kleinrock L.: Packet Switching in Radio Channels: Part II – The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution. *IEEE Transactions of Communications*, Vol. COM-23, No. 12, Dec. 1975, s. 1417÷1433.
6. Wu C., Li. V.: Receiver-Initiated Busy Tone Multiple Access in Packet Radio Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 17, No. 5, Oct/Nov 1987, s. 336÷342.
7. Gummalla A., Limb J.: Wireless Collision Detect (WCD): Multiple Access with Receiver Initiated Feedback and Carrier Detect Signal. *Proc. IEEE ICC'00*, vol. 1, 2000, s. 397÷401.
8. Karn P.: MACA – A New Channel Access Method for Packet Radio. *Proceedings of ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference*, 1990, s. 134÷140.
9. Fullmer C. L., Garcia-Luna-Aceves J. J.: Complete single-channel solutions to hidden terminal problems in wireless LANs. *Proceedings of IEEE ICC'97*, June 1997, s. 575÷579.
10. Bhargavan V., Demers A., Shenker S., Zhang L.: MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's. *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications SIGCOM '94*, London, 1994, s. 212÷225.
11. Fullmer C. L., Garcia-Luna-Aceves J. J.: Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for Packet Radio Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 25, No. 4, Oct. 1995, s. 262÷273.
12. Deng J., Haas Z. J.: Dual busy tone multiple access (DBTMA) – A multiple access control scheme for ad hoc networks, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, No. 6, Jun 2002, s. 975÷985.
13. Wesołowski K.: *Systemy radiokomunikacji ruchomej*. WKŁ, Warszawa 2003.
14. Hołubowicz W., Płóciennik P., Różański A.: *Systemy łączności bezprzewodowej*. Wyd. EFP, Poznań 1996.