STUDIA INFORMATICA 2000
Volume 21 Number 1 (39)

Bartłomiej ZIELIŃSKI
Politechnika Śląska, Instytut Informatyki

EFEKTYWNOŚĆ PROTOKOŁÓW DOSTĘPU DO ŁĄCZA W SIECIACH BEZPRZEWODOWYCH

Streszczenie. Porównano efektywność rywalizacyjnych protokołów dostępu do łącza dla sieci bezprzewodowych. Dla każdego protokołu przedstawiono sposób wyznaczenia efektywności oraz wykresy ilustrujące zmiany przepustowości w zależności od obciążenia i parametrów sieci.

EFFICIENCY OF MEDIUM ACCESS PROTOCOLS IN WIRELESS NETWORKS

Summary. Efficiency of random medium access protocols for wireless networks has been compared. For every protocol a method of efficiency calculation as well as graphs which show network throughput depending on offered load and network parameters have been shown.

1. Wprowadzenie

Protokoły dostępu do łącza są jednym z najistotniejszych zagadnień projektowania sieci lokalnych. Jeżeli bowiem protokół jest źle dobrany do środowiska pracy sieci oraz stosowanego łącza transmisyjnego, efektywność wykorzystania kanału jest niewielka. Problem ten uwidacznia się np. podczas stosowania rywalizacyjnych protokołów z wykrywaniem nośnej w sieciach bezprzewodowych [1, 2].

Niniejszy artykuł zawiera porównanie efektywności niektórych rywalizacyjnych protokołów dostępu do łącza, których opis działania można znaleźć m. in. w [2]. Prezentowane wyniki oparte są na teoretycznych analizach statystycznych, dostępnych w literaturze [3, 5, 6, 7, 8, 9].

2. Efektywność protokołów dostępu do łącza

Istnieje wiele miar efektywności protokołów dostępu do łącza [3, 4]. Jedną z nich jest stopień wykorzystania łącza w zależności od całkowitego ruchu, wprowadzanego do kanału. Ruch ten określany jest jako liczba ramek, przeznaczonych do nadania w czasie równym czasowi transmisji jednej ramki. Z funkcji tej można wyznaczyć maksymalną efektywność wykorzystania łącza z uwzględnieniem kolizji i narzutu protokołu transmisyjnego.

Podczas wyprowadzania zależności przyjęto następujące założenia:

- proces generowania ramek jest procesem Poissona z intensywnością g ramek/s,
- czas transmisji wszystkich ramek jest jednakowy i równy T.

2.1. Efektywność protokołów rodziny Aloha

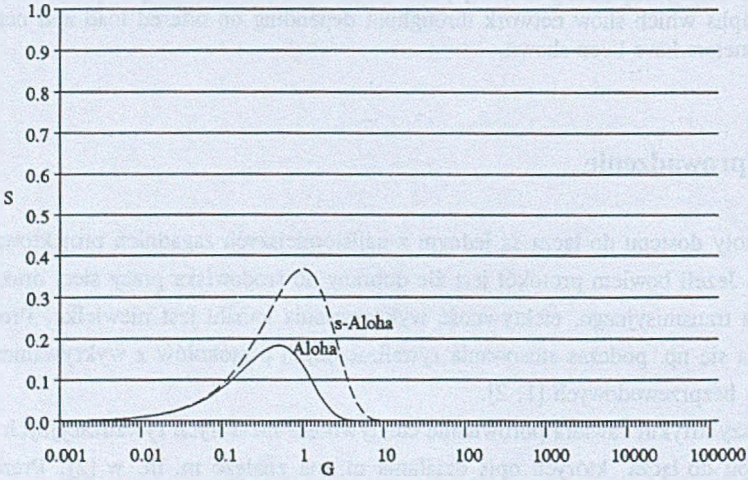
Efektywność protokołów Aloha i s-Aloha (Aloha szczelinowa, ang. *slotted Aloha*) wynosi odpowiednio [3]:

$$S_{\text{Aloha}} = Ge^{-2G} \tag{1}$$

oraz

$$S_{\text{s-Aloha}} = Ge^{-G}, \tag{2}$$

przy czym $G=gT$. Maksymalny stopień wykorzystania kanału transmisyjnego wynosi odpowiednio około 18.5% i 37%. Zależności powyższe ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Efektywność protokołów rodziny Aloha
Fig. 1. Efficiency of Aloha-family protocols

2.2. Efektywność protokołów rodziny CSMA

Efektywność protokołów rodziny CSMA (ang. *Carrier Sense Multiple Access*) zależy nie tylko od obciążenia łącza, lecz również od pewnych parametrów transmisji, jak długość ramki danych oraz prędkość i zasięg transmisji. Zależność między tymi parametrami dana jest wzorem:

$$a = \frac{\tau}{\delta} = \frac{D_{\max}/c}{l_d/v} = \frac{v \cdot D_{\max}}{c \cdot l_d}, \tag{3}$$

gdzie δ oznacza czas transmisji ramki, τ – opóźnienie propagacyjne w kanale, v – prędkość transmisji, $D_{\max}$ – zasięg transmisji, l_d – długość ramki danych, a c – prędkość propagacji sygnału. Wyliczona wartość a może być interpretowana jako zależność między czasem transmisji ramki a czasem niezbędnym na wykrycie nośnej przez inne stacje – określa ona, jaka część ramki zostanie nadana, zanim wszystkie stacje wykryją zajętość kanału. W szczególności jeżeli niektóre stacje nie mogą wykryć nośnej (przypadek stacji ukrytej), przyjmuje się $a=1$.

Dla nietrwałego protokołu CSMA (ang. *nonpersistent CSMA*) efektywność określona jest zależnością [5, 6]:

$$S_{\text{CSMA}} = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a)+e^{-aG}}, \tag{4}$$

a w wersji szczelinowej

$$S_{\text{s-CSMA}} = \frac{aGe^{-aG}}{1+a-e^{-aG}}. \tag{5}$$

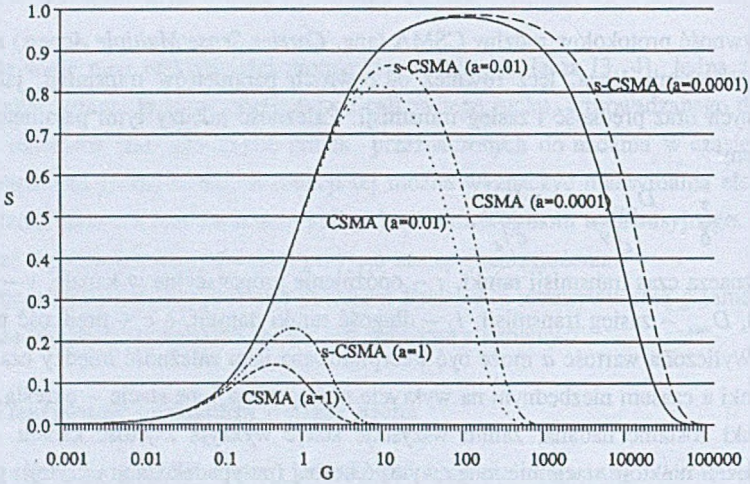
Efektywność protokołów CSMA i s-CSMA w zależności od wartości parametru a ilustruje rys. 2. Na wykresach widać, że dla małych wartości a protokoły pracują znacznie wydajniej niż dla wartości większych. W obecności stacji ukrytych maksymalne wykorzystanie kanału spada do około 15 ÷ 25% (zależnie od wersji protokołu), jest więc porównywalne z osiągami protokołów Aloha. Jest to zrozumiałe, gdyż obecność stacji ukrytych uniemożliwia efektywne wykrywanie nośnej, tak więc protokół CSMA ulega wówczas degeneracji do protokołu Aloha.

Efektywność protokołów CSMA trwałych z prawdopodobieństwem $p=1$ (ang. *1-persistent CSMA*) wynosi [3]:

$$S_{1\text{-}p\ \text{CSMA}} = \frac{Ge^{-(2a+1)G}\left[1+G+\frac{aG}{2}\right]}{G(1+2a)-(1-e^{-aG})+(1+aG)e^{-aG}}, \tag{6}$$

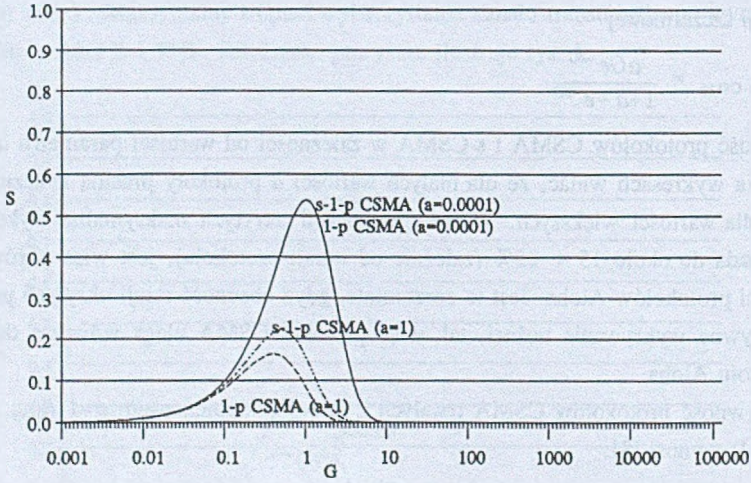
a w wersji szczelinowej

$$S_{\text{s-}1\text{-}p\ \text{CSMA}} = \frac{Ge^{-(1+a)G}(1+a-e^{-aG})}{(1+a)(1-e^{-aG})+ae^{-(1+a)G}}. \tag{7}$$



Rys. 2. Efektywność nietrwałych protokołów CSMA
Fig. 2. Efficiency of nonpersistent CSMA protocols

Efektywność protokołów 1-p CSMA i s-1-p CSMA w zależności od wartości parametru a ilustruje rys. 3. Jest ona w znacznie mniejszym stopniu uzależniona od wartości a; już



Rys. 3. Efektywność p-trwałych protokołów CSMA (p=1)
Fig. 3. Efficiency of p-persistent CSMA protocols (p=1)

dla a=0.1 jest bliska wydajności maksymalnej. Tym niemniej, podobnie jak dla protokołów nietrwałych, w obecności stacji ukrytych stopień wykorzystania kanału jest również niski.

Efektywność protokołów CSMA trwałych z prawdopodobieństwem $p<1$ (ang. *p-persistent CSMA*) określa się, korzystając z następującej zależności [3]:

$$S_{p\text{-CSMA}} = \frac{(1-e^{-aG})\cdot\left[P'\pi_0 + P(1-\pi_0)\right]}{(1-e^{-aG})\cdot\left[a\bar{t}'\pi_0 + a\bar{t}(1-\pi_0)+1+a\right]+a\pi_0}. \tag{8}$$

Wartości P, P' określone są następująco:

$$\begin{aligned} P &= \sum_{n=1}^{\infty} P(n)\frac{\pi_n}{1-\pi_0}, \\ P' &= \sum_{n=1}^{\infty} P(n)\pi'_n, \end{aligned} \tag{9}$$

przy czym

$$P(n) = \sum_{l=n}^{\infty}\frac{lpq^{l-1}}{1-q^l}\left[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(kaG)^{l-n}}{(l-n)!}q^{kn}\left[1-q^n e^{-aG(1-q^n)}\right]\cdot e^{\left(\frac{q(1-q^{k+1})}{p}-2k+1\right)aG}+(1-q^n)\delta_{l,n}\right] \tag{10}$$

oraz

$$\begin{aligned} \pi_n &= \frac{\left[(1+a)G\right]^n}{n!}\cdot e^{-(1+a)G} \quad (n\geq 0), \\ \pi'_n &= \frac{(aG)^n e^{-aG}}{(1-e^{-aG})n!} \quad (n\geq 1). \end{aligned} \tag{11}$$

Wartości $\bar{t}$, $\bar{t}'$ można obliczyć następująco:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \sum_{n=1}^{\infty}\bar{t}_n\frac{\pi_n}{1-\pi_0}, \\ \bar{t}' &= \sum_{n=1}^{\infty}\bar{t}_n\pi'_n, \end{aligned} \tag{12}$$

przy czym

$$\bar{t}_n = \sum_{k=0}^{\infty} q^{(k+1)n}\cdot e^{\left(\frac{q(1-q^n)}{p}-k\right)aG}. \tag{13}$$

W powyższych wzorach przyjmuje się, że $q = 1-p$, natomiast $\delta_{l,n}$ – delta Kroneckera.

Dla $p\leq 0.1$ niezbędne wartości można obliczyć w przybliżeniu [3]. Równanie (9) przyjmuje wówczas postać

$$P = \frac{\pi_0^p-\pi_0}{q(1-\pi_0)} - \frac{(1-e^{-Gap})(\pi_0^{1-p^2}-\pi_0)}{q(1-\pi_0)-qe^{-2Gap}(\pi_0^p-\pi_0)}, \tag{14}$$

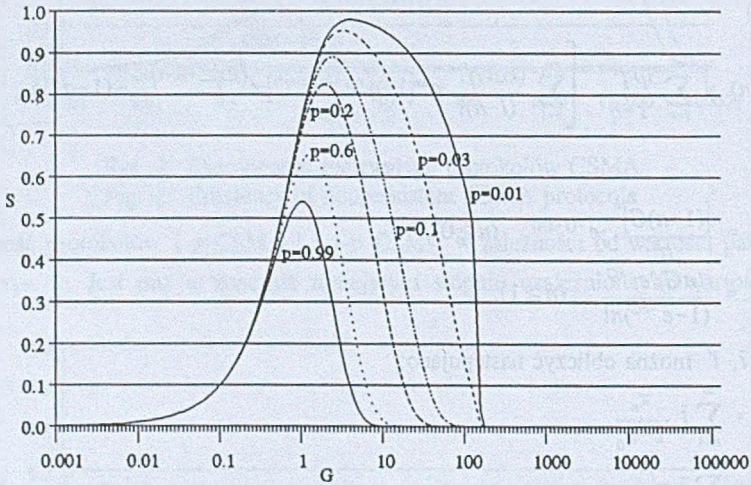
natomiast równanie (12)

$$\bar{t} = \frac{\pi_0^p-\pi_0}{1-\pi_0-(\pi_0^p-\pi_0)e^{-Gap}}. \tag{15}$$

Wartości parametrów P', $\bar{t}'$ można obliczyć również ze wzorów (14) i (15), podstawiając $\pi_0 = e^{-aG}$. Równanie (8) upraszcza się znacznie dla $a=0$; przyjmuje ono wówczas następującą postać [3, 7]:

$$S_{p\text{-CSMA}(a=0)} = \frac{Ge^{-G}\left[1+pG\sum_{k=0}^{\infty}\frac{((1-p)G)^k}{(1-(1-p)^{k+1})k!}\right]}{G+e^{-G}}. \tag{16}$$

Efektywność protokołu p-CSMA dla różnych wartości prawdopodobieństwa p oraz opóźnienia a przedstawiono na rys. 4 ÷ 7. Z wykresów wynika, że protokół pracuje wydajniej dla



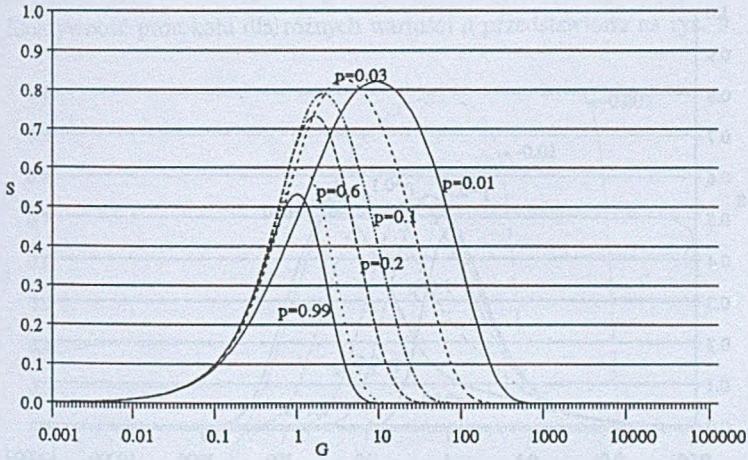
Rys. 4. Efektywność p-trwałych protokołów CSMA ($p<1$, $a=0$)
Fig. 4. Efficiency of p-persistent CSMA ($p<1$, $a=0$)

niskich wartości p, ponieważ mniejsze jest prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji w poszczególnych szczelinach czasowych. W tym przypadku jednak znacznie wydłuża się czas uzyskiwania przez stację dostępu do łącza.

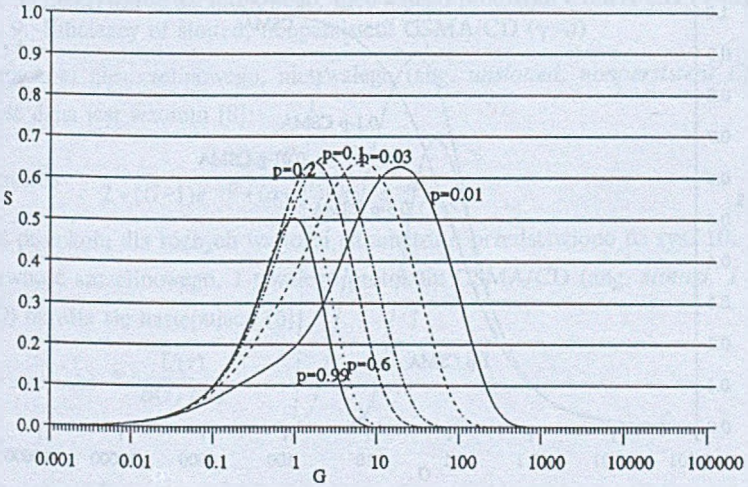
Porównanie efektywności wybranych wariantów protokołu CSMA (przy założeniu zerowego opóźnienia propagacyjnego) przedstawiono na rys. 8.

2.3. Efektywność protokołów CSMA/CD

Co prawda, protokoły CSMA/CD nie mogą być stosowane w wielu implementacjach bezprzewodowych sieci komputerowych ze względu na niemożność wykrywania kolizji, jednak warto przytoczyć zależności określające ich wydajności w celu porównania ich



Rys. 5. Efektywność p-trwałych protokołów CSMA ($p<1$, a=0.01)
Fig. 5. Efficiency of p-persistent CSMA ($p<1$, a=0.01)

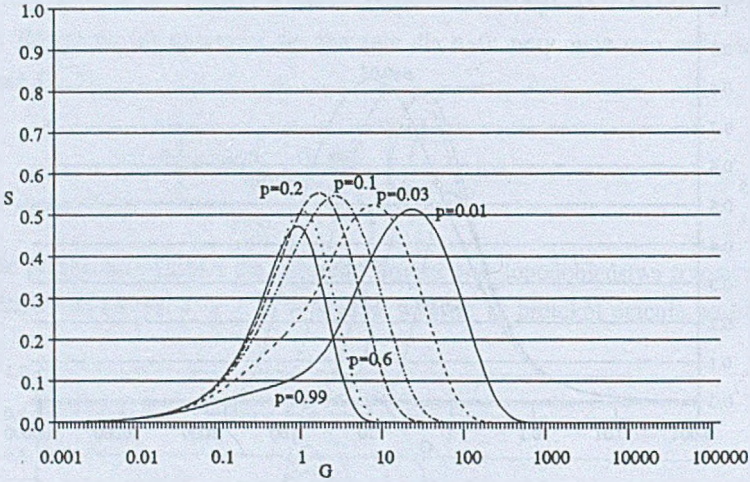


Rys. 6. Efektywność p-trwałych protokołów CSMA ($p<1$, a=0.05)
Fig. 6. Efficiency of p-persistent CSMA ($p<1$, a=0.05)

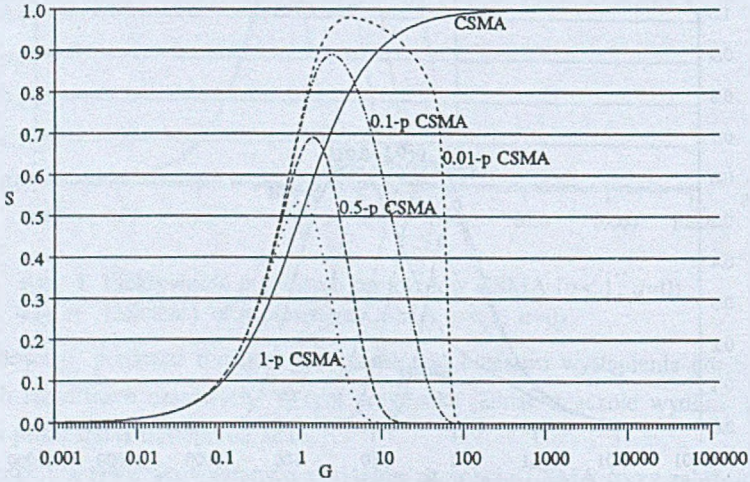
z osiągami protokołów, możliwych do stosowania w tych sieciach.

Efektywność szczelinowego, nietrwałego protokołu CSMA/CD (ang. *slotted, nonpersistent CSMA/CD*) określa następująca zależność [6]:

$$S_{s\text{-CSMA/CD}} = \frac{aGe^{-aG}}{aGe^{-aG} + (1-e^{-aG} - aGe^{-aG})\gamma' + a}, \tag{17}$$



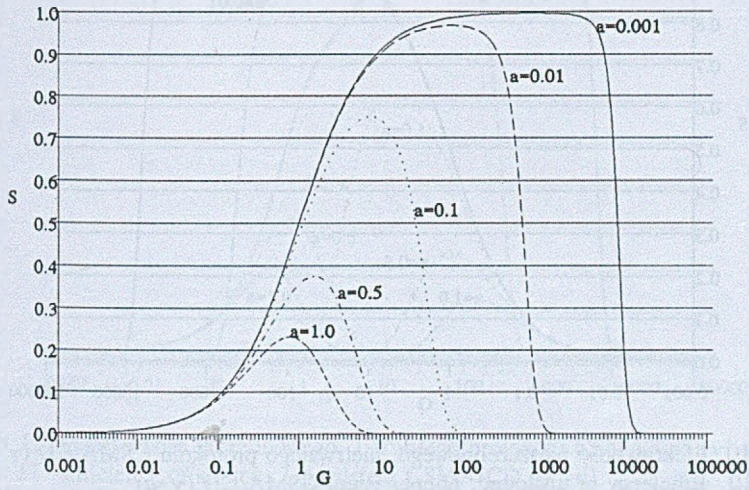
Rys. 7. Efektywność p-trwałych protokołów CSMA ($p<1$, $a=0.1$)
Fig. 7. Efficiency of p-persistent CSMA ($p<1$, $a=0.1$)



Rys. 8. Porównanie efektywności protokołów CSMA ($a=0$)
Fig. 8. A comparison of CSMA protocols efficiency ($a=0$)

gdzie parametr γ' określa zależność między czasem γ a czasem transmisji ramki ($\gamma'=\gamma/T$), przy czym $a \le \gamma' \le 1$. Parametr γ określa czas zajętości kanału w przypadku kolizji i jest równy $\gamma = 2aT + t_{CD} + t_Z$ [6], gdzie t_{CD} – czas niezbędny na wykrycie kolizji, a t_Z – czas za-

głuszania łącza po stwierdzeniu wystąpienia kolizji. Wydajność protokołu jest największa dla $a=\gamma'$. Efektywność protokołu dla różnych wartości a przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Efektywność szczelinowego, nietrwałego protokołu CSMA/CD ($\gamma=a$)
Fig. 9. Efficiency of slotted, nonpersistent CSMA/CD ($\gamma=a$)

Dla protokołu nieszczelinowego, nietrwałego (ang. *unslotted, nonpersistent CSMA/CD*) efektywność dana jest wzorem [8]:

$$S_{\mathrm{CSMA/CD}} = \frac{Ge^{-aG}}{2+(G-1)e^{-aG}+(a+\gamma')G(1-e^{-aG})}. \tag{18}$$

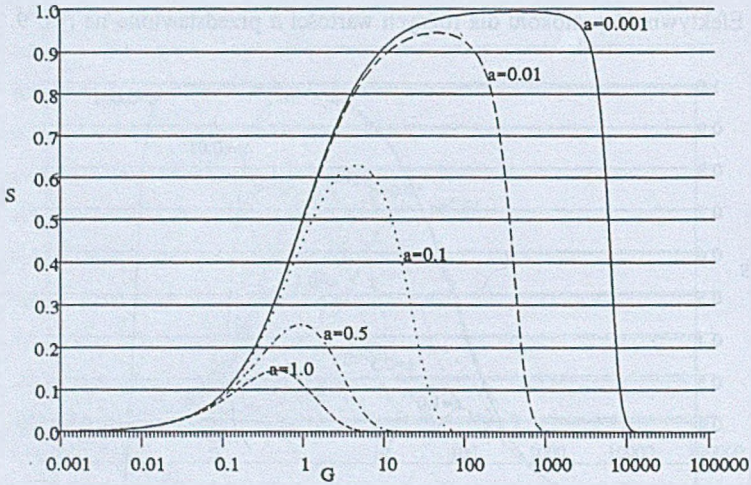
Wydajność protokołu dla różnych wartości parametru a przedstawiono na rys. 10.

Efektywność szczelinowego, 1-trwałego protokołu CSMA/CD (ang. *slotted, 1-persistent CSMA/CD*) określa się następująco [6]:

$$S_{s\text{-}1p\text{-}\mathrm{CSMA/CD}} = \frac{U(\tau)}{B(\tau)\cdot I(\tau)}, \tag{19}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} I(x) &= \frac{t}{1-a_0(x)}, \\ B(x) &= \frac{a_1(x)}{1-a_0(x)}\left[\tau_T+(1-a_0(\tau_T))B(\tau_T)\right] + \left[1-\frac{a_1(x)}{1-a_0(x)}\right]\left[\tau_\gamma+(1-a_0(\tau_\gamma))B(\tau_\gamma)\right], \\ U(x) &= \frac{a_1(x)}{1-a_0(x)}\left[T+(1-a_0(\tau_T))U(\tau_T)\right] + \left[1-\frac{a_1(x)}{1-a_0(x)}\right]\left[(1-a_0(\tau_\gamma))U(\tau_\gamma)\right], \end{aligned} \tag{20}$$



Rys. 10. Efektywność nieszczelinowego, nietrwałego protokołu CSMA/CD ($\gamma'=a$)
Fig. 10. Efficiency of unslotted, nonpersistent CSMA/CD ($\gamma=a$)

przy czym:

$$B(\tau_T) = \frac{(1-a_0(\tau_T)-a_1(\tau_T))(2-a_0(\tau_\gamma)-a_1(\tau_\gamma))\tau_\gamma + \left[a_1(\tau_T)+a_1(\tau_\gamma)(1-a_0(\tau_T)-a_1(\tau_T))\right]\tau_T}{(1-a_0(\tau_T))\left[a_0(\tau_\gamma)(1-a_1(\tau_T))+a_0(\tau_T)a_1(\tau_\gamma)\right]},$$

$$B(\tau_\gamma) = \frac{(a_1(\tau_T)+1)a_1(\tau_\gamma)\tau_T + (1-a_0(\tau_T)-a_1(\tau_T))(a_1(\tau_\gamma)+1)\tau_\gamma}{(1-a_0(\tau_\gamma))\left[a_0(\tau_\gamma)(1-a_1(\tau_T))+a_0(\tau_T)a_1(\tau_\gamma)\right]} \tag{21}$$

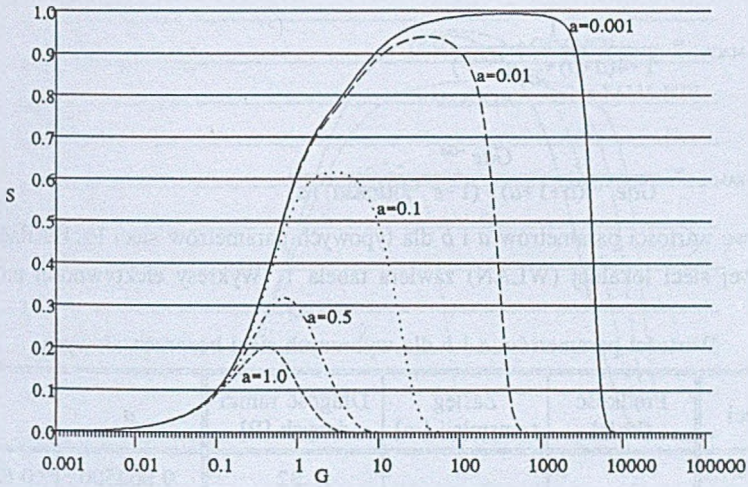
oraz

$$U(\tau_T) = \frac{\left[a_1(\tau_\gamma)(1-a_0(\tau_T))+a_1(\tau_T)a_0(\tau_\gamma)\right]T}{(1-a_0(\tau_T))\left[a_0(\tau_\gamma)(1-a_1(\tau_T))+a_0(\tau_T)a_1(\tau_\gamma)\right]},$$

$$U(\tau_\gamma) = \frac{a_1(\tau_\gamma)T}{(1-a_0(\tau_\gamma))\left[a_0(\tau_\gamma)(1-a_1(\tau_T))+a_0(\tau_T)a_1(\tau_\gamma)\right]}. \tag{22}$$

gdzie: $a_i(x)=\frac{(Gx/T)^i e^{(-Gx/T)}}{i!}$, $\tau=aT$, $\tau_T=\tau+T=(a+1)T$, $\tau_\gamma=\tau+\gamma=(a+\gamma')T$ (T – czas transmisji ramki).

Wydajność szczelinowego, 1-trwałego protokołu CSMA/CD dla różnych wartości parametru a przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Efektywność szczelinowego, 1-trwałego protokołu CSMA/CD ($\gamma'=a$)
Fig. 11. Efficiency of slotted, 1-persistent CSMA/CD ($\gamma'=a$)

2.4. Efektywność protokołów rodziny FAMA

Jednym z czynników, wpływających na wydajność protokołów rodziny FAMA (ang. *Floor Acquisition Multiple Access*), są parametry transmisji (prędkość i zasięg transmisji, długość ramek danych), podobnie jak w przypadku protokołów CSMA. Ponieważ jednak protokoły FAMA wykorzystują mechanizm wymiany komunikatów sterujących, poprzedzający właściwą transmisję danych, efektywność tych protokołów zależy także od relacji między długością ramek sterujących i ramek danych. Zależność ta określona jest wzorem:

$$b = \frac{\gamma}{\delta} = \frac{l_s}{l_d}, \tag{23}$$

gdzie γ i δ oznaczają odpowiednio czasy transmisji ramek sterujących i danych, natomiast l_s i l_d – ich długości.

Efektywność protokołów MACA i FAMA-NTR wynosi odpowiednio [9]:

$$S_{\mathrm{MACA}} = \frac{1}{e^{G(2b+a)}(b+a+\frac{1}{G}+F)+e^{Gb}(b+\frac{a}{2}+P(a-F))+1+\frac{3a}{2}+F+P(a-F)}, \tag{24}$$

gdzie:

$$F = \frac{e^{Gb}-1-Gb}{Gb(1-e^{-Gb})}, \quad P = \frac{e^{-Gb}-e^{-G(b+a)}}{1-e^{-G(b+a)}} \tag{25}$$

oraz

$$S_{\mathrm{FAMA}} = \frac{1}{b+1+\frac{1}{G}(2-e^{-aG})+e^{aG}(b+4a)}, \tag{26}$$

a dla wersji szczelinowych

$$S_{s\text{-MACA}} = \frac{1}{1+4(a+b)+\frac{1}{G}(e^{G(a+b)})} \tag{27}$$

oraz

$$S_{s\text{-FAMA}} = \frac{Gae^{-Ga}}{Gae^{-Ga}(b+1+a)+(1-e^{-Ga})(b+3a)+a}. \tag{28}$$

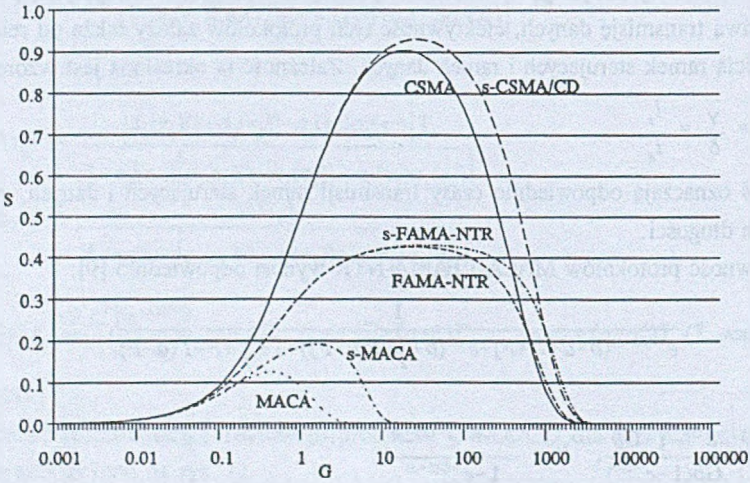
Przykładowe wartości parametrów a i b dla typowych parametrów sieci Packet Radio i bezprzewodowej sieci lokalnej (WLAN) zawiera tabela 1. Wykresy efektywności protokołów

Tabela 1

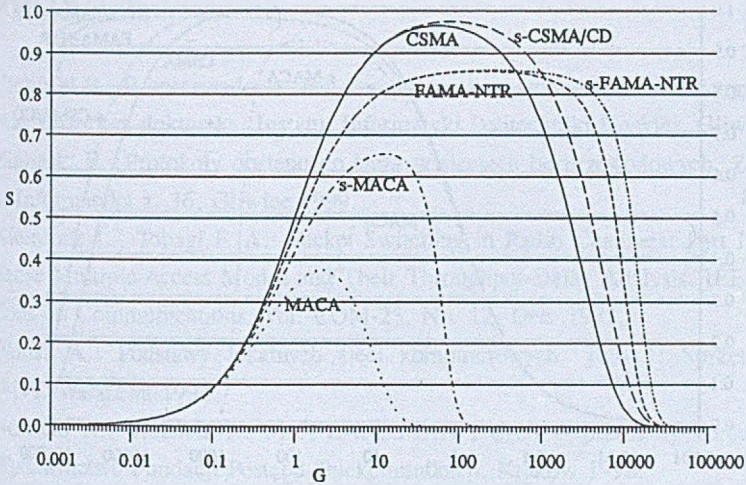
Wartości parametrów a i b dla wybranych sieci bezprzewodowych

Typ sieci	Prędkość [kb/s]	Zasięg transmisji [m]	Długość ramki danych [B]	a	b
Packet Radio	9.6	20000	32	0.002500	0.625000
			256	0.000313	0.078125
WLAN	2000	50	256	0.000163	0.078125
			1500	0.000028	0.013333

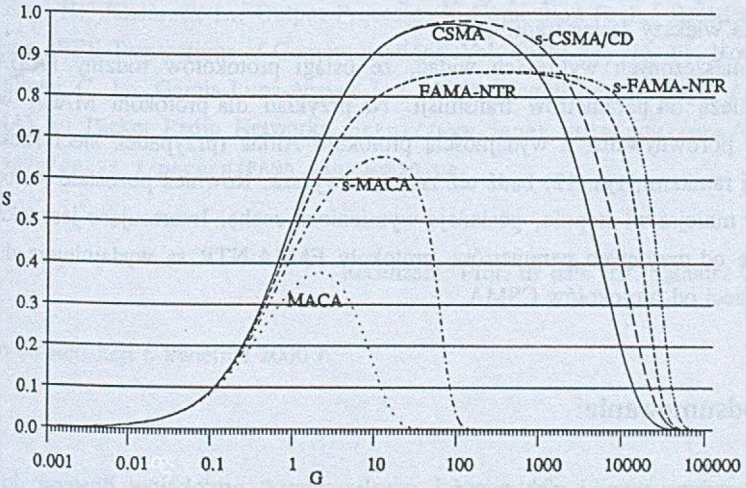
MACA i FAMA-NTR w porównaniu z protokołami CSMA i CSMA/CD dla poszczególnych wartości parametrów a i b znajdują się na rys. 12 ÷ 15. Z wykresów tych wynika, że



Rys. 12. Efektywność protokołów w sieci Packet Radio (ramki krótkie)
Fig. 12. Protocols efficiency in Packet Radio network (short frames)

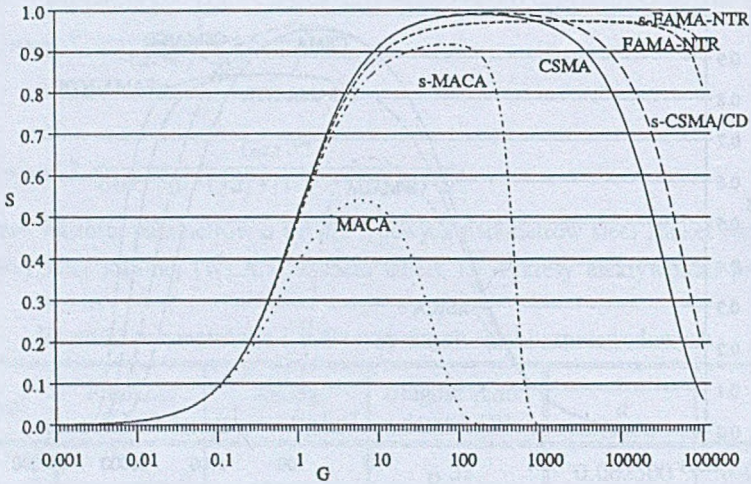


Rys. 13. Efektywność protokołów w sieci Packet Radio (ramki długie)
Fig. 13. Protocols efficiency in Packet Radio network (long frames)



Rys. 14. Efektywność protokołów w sieci lokalnej (ramki krótkie)
Fig. 14. Protocols efficiency in local network (short frames)

protokoły działają bardziej efektywnie dla dłuższych ramek danych; jest to zrozumiałe, ponieważ w przypadku ramek krótkich rośnie wpływ wymiany informacji sterujących (parametr b), które poprzedzają właściwą transmisję danych. Z kolei wpływ opóźnienia propagacyjnego (a) jest większy dla większej prędkości transmisji. Jednak dla przyjętych parame-



Rys. 15. Efektywność protokołów w sieci lokalnej (ramki długie)
Fig. 15. Protocols efficiency in local network (long frames)

trów transmisji opóźnienie propagacyjne jest większe w sieci Packet Radio ze względu na znacznie większy zasięg transmisji.

Na zamieszczonych wykresach widać, że osiągi protokołów rodziny FAMA bardzo istotnie zależą od parametrów transmisji. Na przykład dla protokołu MACA wydajność może być porównywalna z wydajnością protokołu Aloha (przypadek sieci Packet Radio z krótkimi ramkami, rys. 12) bądź też znacznie wyższa. Również pozostałe metody dostępu, acz w mniejszym stopniu, posiadają wymienioną cechę. Interesujące jest także to, że, niezależnie od przyjętych parametrów, protokoły FAMA-NTR są wydajniejsze dla dużych obciążeń sieci od protokołów CSMA.

3. Podsumowanie

Przedstawione wyniki efektywności rywalizacyjnych protokołów dostępu do łącza są wynikiem analiz statystycznych. Podobne analizy można przeprowadzić także stosując mechanizmy modelowania. Można również zbudować doświadczalną sieć bezprzewodową, w której możliwe będzie przeprowadzenie stosownych pomiarów. Porównanie wyników uzyskanych tymi trzema sposobami byłoby z pewnością interesujące.

LITERATURA

1. Zieliński B.: Bezprzewodowe sieci komputerowe wykorzystujące konwersję protokołów. Rozprawa doktorska, Instytut Informatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
2. Zieliński B.: Protokoły dostępu do łącza w sieciach bezprzewodowych. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 36, Gliwice 1999.
3. Kleinrock L., Tobagi F. A.: Packet Switching in Radio Channels: Part I – Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Analysis. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-23, No. 12, Dec. 1975.
4. Wolisz A.: Podstawy lokalnych sieci komputerowych. Tom 1: Sprzęt sieciowy. WNT, Warszawa 1992.
5. Nowicki K., Woźniak J.: Sieci LAN, MAN i WAN – protokoły komunikacyjne. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1998.
6. Rom R., Sidi M.: Multiple Access Protocols. Performance and Analysis. Springer Verlag, New York 1990.
7. Tannenbaum A. S.: Sieci komputerowe. WNT, Warszawa 1988.
8. Takagi H., Kleinrock L.: Output Processes in Contention Packet Broadcasting Systems. IEEE Transactions of Communications, Vol. COM-33, No. 11, Nov. 1985.
9. Fullmer C. L., Garcia-Luna-Aceves J. J.: Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for Packet Radio Networks. `http://www.janet.ucla.edu/~mbs/courses/-1997s/ee298-7/papers/FAMA_sigcomm95.ps`.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Czachórski

Wpłynęło do Redakcji 6 kwietnia 2000 r.

Abstract

There are several measures of MAC protocol efficiency. One of them is link usage in function of offered channel load. Such a function may be determined by statistical analysis of the protocol mechanisms.

Efficiency of the Aloha and slotted Aloha protocols are given by Equations (1) and (2). As shown on Fig. 1, the maximal channel utilization is about 18 % and 37 % which is rather low.

Better results are obtained for CSMA family protocols. The efficiency for nonpersistent, 1-persistent and p-persistent CSMA in unslotted and slotted versions are given by Equations (4) to (8) and shown on Figures 2 to 7. The comparison of all the CSMA family protocols is shown on Fig. 8.

CSMA/CD is very hard to implement in wireless networks, however, it is worth comparing it with other protocols. The efficiency for slotted and unslotted nonpersistent CSMA/CD is given by Equations (17) and (18), while Eq. (19) gives the function for slotted, 1-persistent protocol. It is also shown on Figures 9 to 11.

The efficiency of MACA and FAMA protocols in slotted and unslotted versions are given by Equations (24) to (28). For various network operating parameters, these protocols are compared with CSMA and CSMA/CD on Figures 12 to 15. It is worth to mention that for very high network load FAMA is more efficient than both CSMA and CSMA/CD.