PUMA-TCS – nowy protokół warstwy MAC ze wsparciem jakości świadczonych usług

Marek Natkaniec, Katarzyna Kosek-Szott, Szymon Szott
(e-mail: {natkaniec, kosek, szott}@kt.agh.edu.pl)
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

STRESZCZENIE

W ostatnich latach obserwujemy rosnącą potrzebę zapewnienia odpowiedniej jakości świadczonych usług w lokalnych sieciach bezprzewodowych. W tym celu opracowany został standard IEEE 802.11e. Niestety, jak pokazują badania naukowe, nie jest on pozbawiony wad. W prezentowanej pracy zaproponowano nowy protokół o nazwie PUMA-TCS (Priority Unavoidable Multiple Access with Traffic Category Support) pozwalający na lepsze różnicowanie ruchu oraz większe gwarancje świadczenia usług z określoną jakością. W pracy zawarto również wyniki badań oraz analizę porównawczą obu protokołów, przeprowadzonych przy użyciu wybranych symulatorów sieci bezprzewodowych, co pozwoliło wskazać zalety oraz wady badanych metod dostępu.

Słowa kluczowe: *protokół PUMA, funkcja EDCA, jakość obsługi QoS, różnicowanie ruchu, mechanizm priorytetów, analiza symulacyjna*

ABSTRACT

PUMA-TCS – a New MAC Layer Protocol with QoS Support

There is a growing interest in QoS provisioning for wireless local area networks in recent years. Because of this, the IEEE 802.11e standard was introduced. Unfortunately, a few research papers show, that it has a number of serious flaws. The presented work describes a new protocol called PUMA-TCS (Priority Unavoidable Multiple Access with Traffic Category Support), that allows for better than IEEE 802.11e traffic differentiation and QoS guarantees. Research results and comparative analysis of protocols using selected simulators are also included in the paper. This allows to reveal a pros and cons of both channel access schemes.

Key words: *PUMA protocol, EDCA function, quality of service QoS, traffic differentiation, priorities mechanism, simulation analysis*

1. Wstęp

Lokalne sieci bezprzewodowe WLANs (*Wireless Local Area Networks*) pozwalają na szybkie i tanie łączenie komputerów będących w sieci teleinformatycznej. Ich łatwa instalacja oraz duża funkcjonalność mają ogromne znaczenie w wielu dziedzinach życia. Sieci te są idealnym rozwiązaniem dla posiadaczy urządzeń przenośnych, takich jak laptopy, netbooki, nowoczesne telefony komórkowe lub PDA (*Personal Digital Assistant*). Większość obecnych zastosowań lokalnych sieci bezprzewodowych stanowi asynchroniczny transfer danych, jednak oczekuje się wzrostu zainteresowania usługami multimedialnymi. W kanale bezprzewodowym stosunkowo trudno jest zapewnić odpowiednie parametry strumienia danych. Złożony proces sterowania dostępem do kanału radiowego oraz zmienne warunki propagacji sygnałów (charakterystyczne dla łączy radiowych) są poważnym utrudnieniem dla zapewniania odpowiedniej jakości usług różnego typu. Wszystkie liczące się organizacje standaryzacyjne podjęły odpowiednie kroki w celu opracowania mechanizmów gwarantowania wymaganej jakości świadczonych usług. Jakość świadczonych usług (ang. *Quality of Service*, QoS) jest jednym z głównych parametrów charakteryzujących każdego usługodawcę oraz kluczowym elementem branym pod uwagę przez usługobiorców. Przekłada się ona przede wszystkim na stopień zaspokojenia potrzeb klienta. Niestety w rzeczywistości okazuje się, że świadczenie jednej usługi z odpowiednią jakością często wiąże się z koniecznością pogorszenia jakości świadczenia innej usługi.

Obecnie najbardziej rozpowszechnionym standardem dla sieci WLAN jest standard IEEE 802.11 [1]. Pierwsza wersja tego standardu została zatwierdzona w 1997 roku przez organizację IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) i posiada zaimplementowane mechanizmy rywalizacyjnego dostępu do kanału (funkcja DCF – *Distributed Coordination Function*) oraz podstawowe wsparcie dla realizacji ruchu izochronicznego (funkcja PCF – *Point Coordination Function*). Standard ten nie był tworzony z myślą o gwarantowaniu wszystkich parametrów QoS, niezbędnych dla świadczenia usług z określoną jakością. Dopiero standard IEEE 802.11e [2], zatwierdzony w 2005 roku, wprowadził nowe mechanizmy w sposobie dostępu do kanału radiowego. To właśnie na poziomie dostępu do medium transmisyjnego należy rozstrzygnąć roszczenia stacji do uzyskania praw do transmisji. Sprawiedliwy, biorący pod uwagę priorytet przesyłanego ruchu, mechanizm kontroli dostępu do kanału radiowego powinien pozwalać na zapewnienie odpowiedniego poziomu QoS. W standardzie IEEE 802.11e zdefiniowane zostały

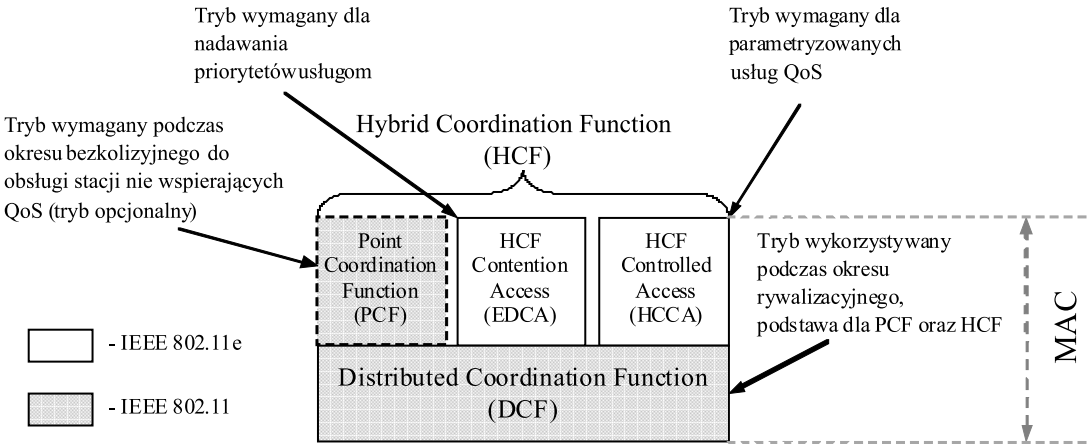
funkcje HCCA (*HCF Controlled Channel Access*), przeznaczona do pracy z użyciem centralnego koordynatora i EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), przeznaczona dla sieci ad-hoc, które gwarantują określony poziom QoS. W obecnej wersji standardu IEEE 802.11, z roku 2007 [1], dokonano integracji części rozszerzeń standardu, w tym również rozszerzenia IEEE 802.11e.

Analizę wydajności pracy standardu IEEE 802.11e można odnaleźć w wielu pozycjach literaturowych. W pracy [3] przedstawiono badania funkcji EDCA i HCCA z wykorzystaniem symulacji komputerowych. W innej pracy badana była sprawiedliwość dostępu dla przypadku, gdy kilka sieci BSS (*Basic Service Set*) współdzieli pewien obszar geograficzny używając do pracy tego samego kanału radiowego [4]. Publikacja [5] również przedstawia badanie wydajności funkcji EDCA rozszerzone o możliwość wielokrotnej transmisji w ramach okresu TXOP (*Transmission Opportunity*). Opracowano i opublikowano również wiele modeli matematycznych funkcji EDCA [6–9]. Niestety z przeprowadzonych badań wynika, że tryb EDCA standardu IEEE 802.11e nie jest pozbawiony wad. Odpowiedni poziom QoS może być bowiem zapewniony tylko w sposób statystyczny, poprzez zmniejszenie prawdopodobieństwa dostępu do kanału radiowego ramkom należącym do niższej kategorii ruchowej. Taki sposób rywalizacji nie daje gwarancji, że ramki o wyższym priorytecie będą zawsze nadane przed ramkami o niższym priorytecie. Proces ten przyczynia się do wzrostu wariancji opóźnienia dla ramek o wysokim priorytecie w warunkach nadawania ramek przez stacje o niskim priorytecie. Kolejny problem występujący w standardzie IEEE 802.11e jest związany z występowaniem długich okresów oczekiwania na dostęp do kanału radiowego (*backoff*) dla stacji nadających ruch o niskim priorytecie. Okresy spowodowane działaniem licznika *backoff* są wtedy dużo dłuższe niż w przypadku standardowej funkcji DCF, co powoduje degradację wydajności pracy sieci.

Wady istniejących protokołów i standardów przyczyniają się do powstawania rozwiązań alternatywnych. Takim przykładem jest protokół PUMA-TCS (*Priority Unavoidable Multiple Access with Traffic Category Support*) opracowany w Katedrze Telekomunikacji AGH, który zostanie szczegółowo przedstawiony w niniejszej pracy. Protokół PUMA-TCS wykorzystuje rywalizacyjny dostęp do kanału radiowego z użyciem tzw. twardych priorytetów i nie posiada głównych wad protokołu EDCA. Przyjęto następujący układ pracy. W rozdziale drugim opisano protokół EDCA. Rozdział trzeci zawiera opis działania protokołu PUMA-TCS. W rozdziale czwartym zawarto wyniki badań symulacyjnych protokołu PUMA-TCS, które zostały porównane z wynikami uzyskanymi dla protokołu EDCA. Ostatni rozdział zawiera najciekawsze wnioski uzyskane z analizy przeprowadzonych badań.

2. Funkcja EDCA standardu IEEE 802.11

Architektura warstwy MAC sieci standardu IEEE 802.11e została zaprojektowana tak, aby zapewnić maksymalną możliwą kompatybilność ze starszymi sieciami standardu IEEE 802.11. Podczas standaryzacji zadbano o to, aby już istniejące na całym świecie sieci standardu IEEE 802.11 łatwo migrowały w kierunku standardu IEEE 802.11e. Zasadnicza zmiana w architekturze MAC polega na implementacji funkcji koordynującej HCF (*Hybryd Coordination Function*) z dwoma różnymi mechanizmami dostępu do kanału radiowego. Pierwszy z nich to EDCA, będący ulepszoną wersją podstawowego trybu DCF. Natomiast drugi to odpowiednik dawnego PCF, określany mianem HCCA. Funkcja EDCA jest obowiązkowa zarówno dla trybu pracy z infrastrukturą, jak i dla sieci ad-hoc, podobnie jak funkcja DCF zdefiniowana w podstawowym standardzie IEEE 802.11. Architekturę warstwy MAC standardu IEEE 802.11e przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Architektura warstwy MAC standardu IEEE 802.11e

Z punktu widzenia modeli QoS działanie trybu EDCA jest analogiczne do architektury usług zróżnicowanych DiffServ – ruch generowany jest agregowany w strumienie zbiorcze (tzw. klasy ruchu) o różnym priorytecie i przekazywany zgodnie z parametrami obowiązującymi dla danej klasy ruchu. EDCA może realizować jedynie „miękkie" gwarancje jakości (ang., *soft QoS*). W przypadku trybu HCCA mamy do czynienia z rozwiązaniem zbliżonym do modelu usług zintegrowanych IntServ – zapewnienie jakości przekazu ramek odbywa się na poziomie pojedynczych strumieni z wykorzystaniem deskryptorów ruchu TC (*Traffic Category*). Mechanizm HCCA reprezentuje podejście ilościowe, dzięki czemu zapewnia on ściślejsze gwarancje jakościowe w porównaniu z trybem EDCA.
Mechanizm EDCA umożliwia odwzorowanie ruchu wychodzącego ze stacji obsługującej QoS na maksymalnie cztery zdefiniowane klasy ruchu, określane również jako kategorie dostępu AC (*Access Categories*):

- Głos – AC_VO (*Voice*)
- Wideo – AC_VI (*Video*)
- Ruch bez wymagań – AC_BE (*Best Effort*)
- Ruch tła – AC_BK (*Background*)

Każda klasa ruchu posiada niezależną kolejkę sprzętową, w której są buforowane ramki warstwy MAC przed wysłaniem ich do kanału radiowego. We wstępnej fazie różnicowania ruchu, jednostkom danych pochodzącym z warstw wyższych modelu ISO/OSI przypisywany jest jeden z ośmiu dostępnych priorytetów użytkownika UP (*User Priority*). Informacja o UP jest przenoszona przez pole TID (*Traffic IDentifier*) nagłówka ramki danych. Dopiero po tej klasyfikacji następuje przypisanie priorytetu użytkownika do kategorii dostępu, według schematu przedstawionego w tabeli 1.

Tabela 1

Rekomendowany schemat przypisywania priorytetów użytkownika do klasy ruchu, zgodnie ze standardem IEEE 802.1D oraz kategoriami dostępu IEEE 802.11e [1]

Priorytet	Priorytet użytkownika	Odpowiednik priorytetu zgodny z	Kategoria dostępu 802.11e	Oznaczenie 802.11e
Najniższy	1	BK	AC_BK	Background
↓	2	–	AC_BK	Background
	0	BE	AC_BE	Best Effort
	3	EE	AC_BE	Best Effort
	4	CL	AC_VI	Video
	5	VI	AC_VI	Video
	6	VO	AC_VO	Voice
Najwyższy	7	NC	AC_VO	Voice

Zróżnicowanie parametrów dostępu do kanału radiowego dla poszczególnych klas ruchu umożliwiło nadawanie im priorytetów. Prawdopodobieństwo rozpoczęcia transmisji przez daną klasę ruchu jest uzależnione od indywidualnego zestawu czterech parametrów:

- CW_{MIN}[AC]/CW_{MAX}[AC] – określa minimalną/maksymalną długość przedziału, z którego losowane jest okno rywalizacji CW[AC] dla danej kategorii dostępu, wykorzystywanego przez algorytm *backoff* do losowego opóźnienia rozpoczęcia transmisji. Mniejsze wartości parametrów CW_{MIN} i CW_{MAX} zapewniają statystycznie krótszy czas oczekiwania na dostęp do kanału radiowego, dlatego są one charakterystyczne dla klas ruchu o wyższych priorytetach,
- AIFSN[AC] – parametr przyjmujący wartości całkowite z przedziału [2,?), na podstawie którego wyznaczany jest arbitrażowy odstęp międzyramkowy AIFS[AC] (*Arbitration InterFrame Space*), będący odpowiednikiem okresu DIFS w trybie podstawowym DCF:

  $$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \times SlotTime \quad (1)$$

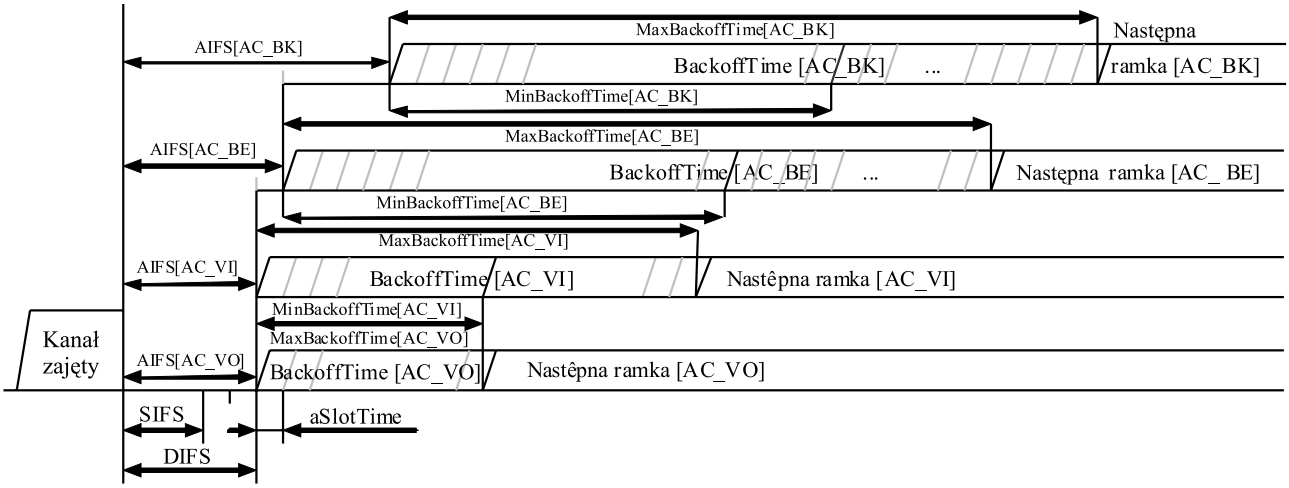
  gdzie AIFS[AC] ≥ DIFS. Zazwyczaj kategorii dostępu o najwyższym priorytecie przypisuje się najmniejszą z możliwych wartości parametru AIFS równą DIFS. W przypadku współistnienia na danym obszarze stacji korzystających zarówno z funkcji DCF, jak i EDCA, występuje brak różnicowania ramek o wyższym priorytecie w stosunku do ramek wysyłanych przez stacje wykorzystujące DCF.
- $TXOP_{Limit}$[AC] – określa przedział czasu, w którym stacja ma prawo do rozpoczęcia transmisji jednej lub większej liczby ramek należących do danej klasy ruchu, bez konieczności wykonywania każdorazowo procedury *backoff*, pod warunkiem, że sumaryczny czas zajętości kanału radiowego nie przekroczy okresu $TXOP_{Limit}$[AC]. W przypadku, gdy wartość tego parametru jest zerowa, klasa ruchu może wysłać tylko jedną ramkę, po czym jest zobowiązana do natychmiastowego zwolnienia kanału radiowego.

Standard IEEE 802.11 nie narzuca jednego zestawu wartości, jakie powinny przyjmować powyższe parametry dostępu do kanału radiowego. Zamiast tego dostarcza formuły opisujące zależności pomiędzy parametrami oraz innymi czynnikami, takimi jak np. rodzaj wykorzystywanej warstwy fizycznej (tab. 2).
Zaproponowany schemat nadawania priorytetów dostępu do kanału radiowego w obrębie pojedynczej stacji najlepiej obrazują zależności czasowe pomiędzy poszczególnymi klasami ruchu, przedstawione na rysunku 2. Z uwagi na dużo większe wartości parametrów CW_{MIN}, CW_{MAX} oraz AIFSN, dla kategorii dostępu o niższym priorytecie (BE i BK), w sytuacji pełnego na-

Tabela 2

Zalecane wartości parametrów dostępu do kanału radiowego dla trybu EDCA [1]

Klasa ruchu	CW_{MIN}	CW_{MAX}	AIFSN	TXOP		
				DSSS	OFDM	Inne
AC_BK	aCW_{MIN}	aCW_{MAX}	7	0	0	0
AC_BE	aCW_{MIN}	aCW_{MAX}	3	0	0	0
AC_VI	$(aCW_{MIN}+1)/2 - 1$	aCW_{MIN}	2	6,016 ms	3,008 ms	0
AC_VO	$(aCW_{MIN}+1)/4 - 1$	$(aCW_{MIN}+1)/2 - 1$	2	3,264 ms	1,504 ms	0



Rys. 2. Zależności czasowe pomiędzy kategoriami dostępu w trybie EDCA

sycenia kanału radiowego, w przypadku jednoczesnego występowania ruchu o wyższym priorytecie, przepustowość znacznie się zmniejsza. Efekt ten jest potęgowany przez niezerowe wartości parametru $TXOP_{Limit}$ dla kategorii dostępu VI oraz VO.

Dla funkcji EDCA możliwe są kolizje fizyczne i wirtualne. Kolizja fizyczna występuje wtedy, kiedy dwie lub więcej stacji próbuje jednocześnie rozpocząć nadawanie w tym samym kanale radiowym, a kolizja wirtualna jest to kolizja występująca w obrębie jednej stacji, podczas rywalizacji ramek pochodzących z różnych klas ruchu (kolejek sprzętowych). Za rozwiązywanie problemu kolizji wirtualnych jest odpowiedzialny specjalny moduł, tzw. *Virtual Collision Handler*, który decyduje o przyznaniu prawa do transmisji klasie ruchu o wyższym priorytecie. Natomiast kolejka skojarzona z kategorią dostępu o niższym priorytecie zachowuje się tak, jakby wystąpiła kolizja fizyczna, czyli wykonuje standardową procedurę *backoff*. Wszystkie zdefiniowane reguły oznaczają, że transmisja jednostki danych warstwy MAC przynależnej do określonej klasy ruchu może się rozpocząć tylko i wyłącznie wtedy, gdy spełnione są wszystkie poniższe warunki:

- Kanał radiowy był w stanie bezczynności przez okres czasu nie krótszy niż wartość parametru AIFS dla danej klasy.
- Licznik *backoff timer* związany z określoną klasą ruchu osiągnął wartość zerową.
- Nie została stwierdzona kolizja fizyczna ani wirtualna lub też miała miejsce wyłącznie kolizja wirtualna, przy czym klasa, dla której wystąpiła kolizja, posiadała najwyższy priorytet ze wszystkich klas rywalizujących o dostęp do kanału radiowego.

3. Zasada działania protokołu PUMA-TCS

Alternatywą dla funkcji DCF standardu IEEE 802.11 było opracowanie protokołu PUMA, będącego rozszerzeniem funkcji DCF [10]. Dostępne badania naukowe pokazują, że funkcja DCF posiada m.in. następujące wady: możliwość transmisji tylko ruchu asynchronicznego, małą wydajność pracy w przypadku dużej liczby stacji nadających duże wielkości ruchu, oraz niesprawiedliwy dostęp do kanału radiowego. Autorzy protokołu PUMA starali się usunąć te problemy, jednocześnie pozwalając na łatwe wprowadzenie zmian w kartach bezprzewodowych poprzez zmianę oprogramowania (*firmware*). Protokół PUMA, dedykowany do pracy w sieciach ad-hoc, może wykorzystywać wszystkie rodzaje technik warstwy fizycznej. Główną wadą protokołu PUMA jest wsparcie tylko jednej dodatkowej klasy ruchu.

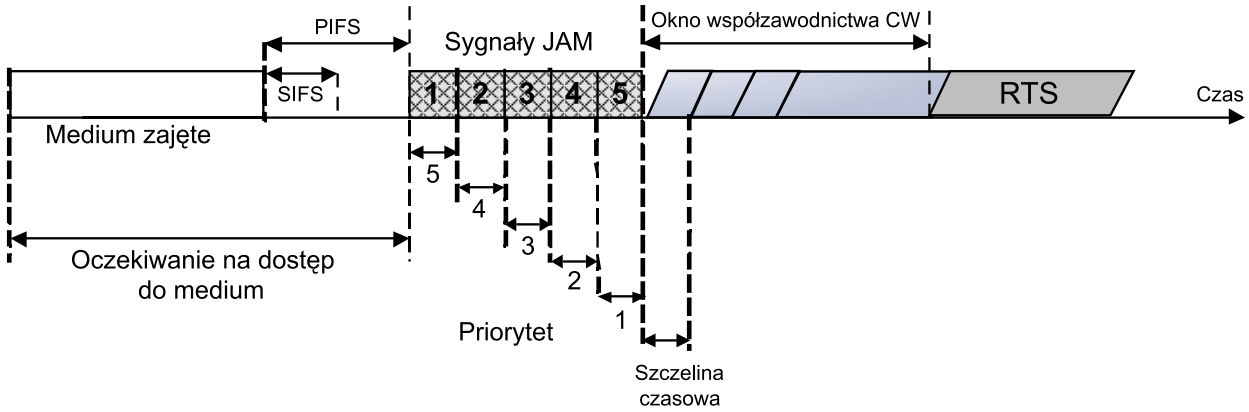
Rozszerzeniem protokołu PUMA, pozwalającym na zdefiniowanie wielu rodzajów kategorii przesyłanego ruchu, jest protokół PUMA-TCS. Zmiany wprowadzone w protokole PUMA-TCS w stosunku do pierwotnego PUMA pozwalają na łatwą implementację tego protokołu poprzez dalsze zaktualizowanie oprogramowania *firmware* kart bezprzewodowych. Protokół PUMA-TCS definiuje pięć różnych priorytetów oraz klasę ruchu typu *best effort* – priorytet 1 jest najwyższym, a 5 najniższym z możliwych. Ramki służące do zarządzania siecią, jako najistotniejsze, posiadają priorytet 1. Z kolei ramki przenoszące ruch głosowy posiadają priorytet 2. Priorytet 3 jest przeznaczony dla ramek wideo. Aplikacje istotne dla użytkownika (np. transakcje bankowe) generują dane traktowane z priorytetem 4. Priorytet 5 został zdefiniowany dla ruchu typu *excellent effort*. Tabela 3 przedstawia proponowany przydział priorytetów.

Tabela 3

Przydział priorytetów zdefiniowany w protokole PUMA-TCS

Priorytet	Typ ruchu	Opis
1	Zarządzanie siecią	Dane służące do utrzymania sieci
2	Głos	Opóźnienie nie większe niż 50 ms, bardzo mały *jitter*
3	Wideo	Opóźnienie nie większe niż 150 ms
4	Kontrolowane obciążenie	Aplikacje transakcyjne
5	*Excellent effort*	Usługi świadczone ważnym klientom
–	*Best effort*	Ruch asynchroniczny

Podobnie jak w przypadku protokołu PUMA, jego następca również wykorzystuje trzy przedziały czasowe: SIFS, PIFS, oraz DIFS (DIFS>PIFS>SIFS). Nadawanie priorytetów ramkom realizowane jest za pomocą dodatkowych sygnałów JAM, których odpowiednia liczba przypisana jest do poszczególnych priorytetów. Wszystkie stacje, które chcą wysłać ramki, muszą zaczekać, aż kanał radiowy będzie wolny przez czas PIFS. Następnie stacje posiadające ramki o określonym priorytecie zaczynają wysyłać sygnały JAM, których liczba zależy od priorytetu ramki oczekującej na wysłanie. Im wyższy priorytet, tym liczba wysyłanych sygnałów JAM jest większa. Dla priorytetu 1 jest to 5 sygnałów, dla priorytetu 2 są to 4 sygnały, itd. Wysyłanie sygnałów JAM służy do poinformowania innych stacji o priorytecie ramki, która ma być wysłana. Jeżeli po wysłaniu sygnałów JAM kanał radiowy jest wolny (tzn. żadna inna stacja nie wysyła sygnałów JAM) oznacza to, że w danym momencie żadna inna stacja nie posiada ramki o wyższym priorytecie, zatem stacja o najwyższym priorytecie może zacząć procedurę *backoff*. Pozostałe stacje powinny wstrzymywać swoje transmisje do momentu otrzymania ramki RTS lub CTS, dzięki którym będą mogły uaktualnić swój wektor zajętości łącza NAV i czekać na zakończenie bieżącej transmisji, żeby ponownie wziąć udział w rywalizacji o dostęp do kanału radiowego. Rysunek 3 przedstawia proces dostępu do kanału radiowego z użyciem sygnałów JAM. Należy zwrócić uwagę, że stacji, które wysłały taką samą liczbę sygnałów JAM, a więc posiadały ramki o tym samym priorytecie, może być więcej niż jedna. Rywalizacja między nimi o dostęp do kanału radiowego realizowana jest podczas standardowego mechanizmu odczekiwania *backoff*, czyli losowania odpowiedniej liczby szczelin czasowych, które stacja musi odczekać, zanim będzie mogła nadać ramkę RTS. Odbiorca tej ramki, po czasie SIFS, przesyła potwierdzenie w postaci ramki CTS. Następnie pomiędzy nadawcą i odbiorcą wymieniane są ramki danych. Równocześnie realizowana jest aktualizacja wektora NAV przez wszystkie stacje będące w stanie poprawnie odebrać wymienione ramki. Kolejną zmianą w porównaniu z protokołem PUMA jest wprowadzenie liczników dla każdej ze zdefiniowanych klas ruchu. Liczniki te, podobnie jak licznik T2 wykorzystywany w protokole PUMA [6], służą do skalowania ru-

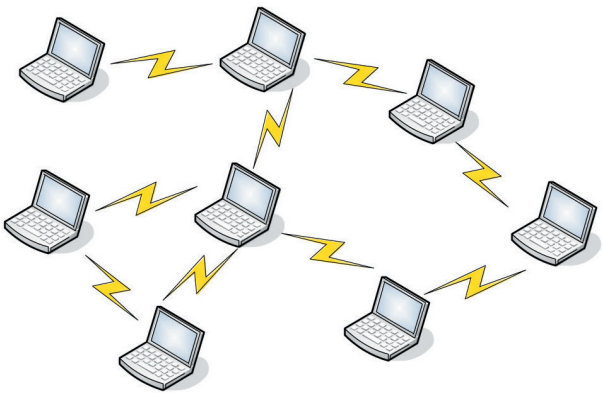


Rys. 3. Dostęp do kanału radiowego realizowany w przypadku nadawania ramek z priorytetem, stosowany w protokole PUMA-TCS

chu dla różnych priorytetów. Przypisana ramce wartość licznika jest stopniowo zmniejszana. Jeżeli wartość ta osiągnie zero, ramce zostanie podniesiony priorytet (o jeden), co zwiększa jej szanse na wysłanie podczas kolejnego okresu rywalizacji. Oznacza to, że niezależnie od obciążenia sieci, ramka po pewnym czasie zostanie dopuszczona do rywalizacji z ramkami o wyższych priorytetach. Protokół PUMA-TCS zabrania jednak przekształcania w ten sposób ramek priorytetu nr 2 w ramki priorytetu nr 1. Ma to na celu zapewnienie poprawnej pracy sieci i uzyskanie minimalnych wartości opóźnień w przypadku przesyłania ruchu zarządzającego siecią. Podobnie jak w przypadku protokołu PUMA, zastosowano zmodyfikowany algorytm wyboru szczeliny z okna współzawodnictwa DIDD (*Double Increment Double Decrement*) [11]. W celu dalszego zwiększenia wydajności transmisji, szczególnie podczas nadawania ramek o małej długości, w protokole PUMA-TCS, podobnie jak w protokole PUMA, wykorzystano mechanizm *packet-train* [6]. Jego działanie przypomina realizację mechanizmu TXOP stosowanego w trybie EDCA. Asynchroniczny tryb transmisji użyty po czasie DIFS pozostał bez zmian i jest zgodny z funkcją DCF standardu IEEE 802.11.

4. Analiza symulacyjna protokołu PUMA-TCS

Do przeprowadzenia analizy symulacyjnej protokołu PUMA-TCS posłużono się specjalnie do tego celu napisanym symulatorem w języku Java. Symulator skonstruowany został w oparciu o główną kolejkę zdarzeń. W kolejce tej przechowywane są działania, jakie będą wykonywane w kolejności ustalonej według pola czasu, które posiada każde ze zdarzeń. Przeprowadzone symulacje zostały podzielone w taki sposób, aby jak najlepiej ukazać podobieństwa i różnice dwóch badanych funkcji dostępu do medium: EDCA i PUMA-TCS. Badania przeprowadzone zostały dla sieci ad-hoc, pokazanej na rysunku 4. Rodzaj przesyłanego ruchu oraz liczba stacji uczestniczących w transmisji zostały szczegółowo opisane na początku każdego scenariusza. Wszystkie stacje były w swoim zasięgu radiowym, co oznacza, że w sieci nie występował przypadek stacji ukrytych.



Rys. 4. Sieć ad-hoc standardu IEEE 802.11

Parametry protokołów zostały ustalone tak, aby odpowiadały założeniom przyjętym dla warstwy fizycznej standardu IEEE 802.11b. Niektóre z przyjętych parametrów ulegały zmianie w trakcie przeprowadzanych symulacji. Najważniejsze przyjęte parametry zostały przedstawione w tabeli 4. Pozostałe wartości parametrów były zgodne ze standardem IEEE 802.11[1].

Tabela 4

Wartości parametrów protokołów PUMA-TCS i EDCA przyjęte podczas symulacji

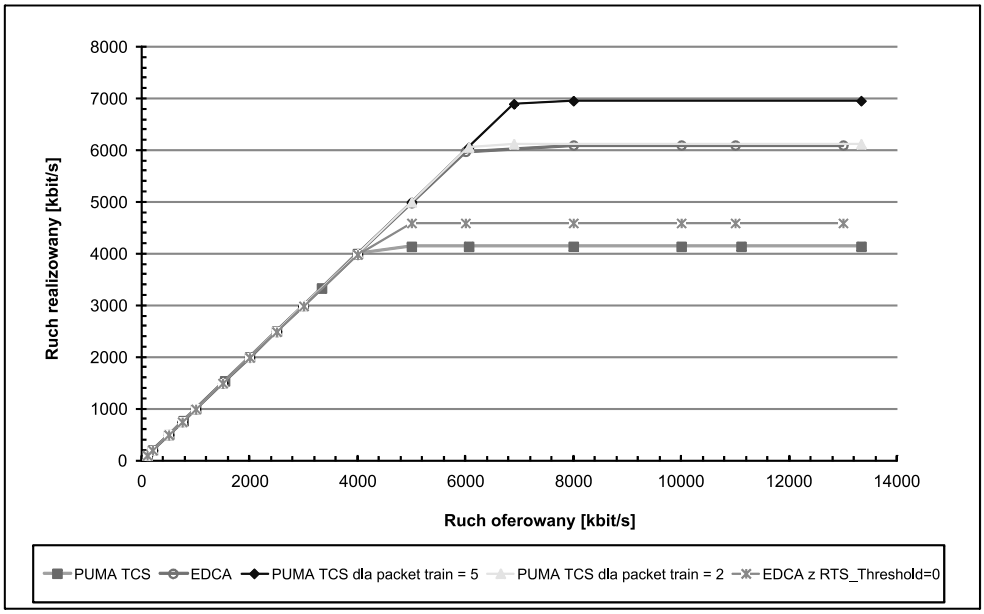
Parametr	PUMA-TCS	EDCA
Czas trwania szczeliny czasowej – *Time Slot* [μs]	20	20
Czas trwania odstępu SIFS [μs]	10	10
Czas trwania odstępu PIFS [μs]	30	30
Czas trwania odstępu DIFS [μs]	50	50
Czas trwania sygnału JAM [μs]	20	–
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MIN} dla P1	7	7
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MAX} dla P1	15	15
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MIN} dla P2	7	15
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MAX} dla P2	15	31
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MIN} dla P3	15	31
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MAX} dla P3	31	1023
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MIN} dla P4	31	31
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MAX} dla P4	1023	1023
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MIN} dla P5	31	–
Wielkość okna współzawodnictwa CW_{MAX} dla P5	1023	–

Przeprowadzone symulacje prowadziły do określenia charakterystyk dla stanu ustalonego. Badania realizowano w taki sposób, aby warunki początkowe nie obciążały błędem wyników otrzymanych dla stanu ustalonego. Do określenia charakterystyk stanu ustalonego wykorzystano wartość średnią, wariancję oraz przedziały ufności dla wartości średniej. Zastosowano metodę niezależnych podprzebiegów. Stan ustalony został określony na podstawie porównania wartości średnich z kolejnych podprzebiegów, tzn. jeżeli wartości średnie z dwóch kolejnych podprzebiegów różniły się o mniej niż 5%, to przyjmowano, że osiągnięty został stan ustalony systemu. Każdy z podprzebiegów odpowiadał

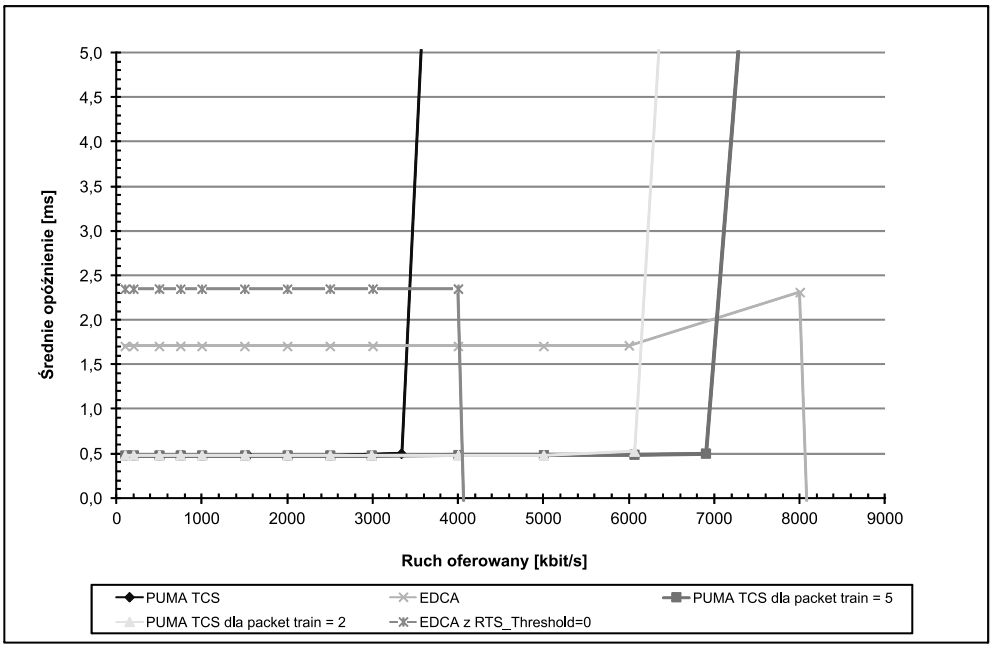
przesłaniu 10 000 ramek przez każdą ze stacji, tzn. stacja, która jako pierwsza przesłała 10 000 ramek, kończyła okres podprzebiegu. Po osiągnięciu stanu ustalonego przeprowadzano dziesięć podprzebiegów symulacyjnych, z których wyliczano wartości średnie, wariancje oraz przedziały ufności na poziomie 95%. Na wykresach przedstawiono krzywe, dla których dla zadanego przedziału ufności na poziomie 95% poziom błędu nie przekracza 1% (wartości błędów są zbyt małe, aby mogły być widoczne na wykresach). Jako podprzebieg przyjęto realizację stałego ciągu zdarzeń przez każdą ze stacji, co pozwoliło uniezależnić wyniki symulacji od wielkości ruchu oferowanego i liczby stacji.

4.1. Scenariusz 1 – Badanie wydajności protokołów z użyciem jednego priorytetu

W scenariuszu 1 w sieci pracowały dwie stacje wysyłające ramki – wzajemnie do siebie. Stacja 1 wysyłała strumień CBR (*Constant Bit Rate*) o najwyższym priorytecie. Przyjęta wielkość ramki wynosiła 250 bajtów. Dodatkowo dla protokołu PUMA-TCS zmieniany był parametr *packet-train* i wynosił on odpowiednio 2 i 5 ramek. Protokół PUMA-TCS zakłada stałe użycie mechanizmu RTS/CTS, jednakże funkcję EDCA przebadano dla dwóch przypadków: z włączonym (parametr



Rys. 5. Wykres ruchu realizowanego w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 1



Rys. 6. Wykres średniego opóźnienia w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 1

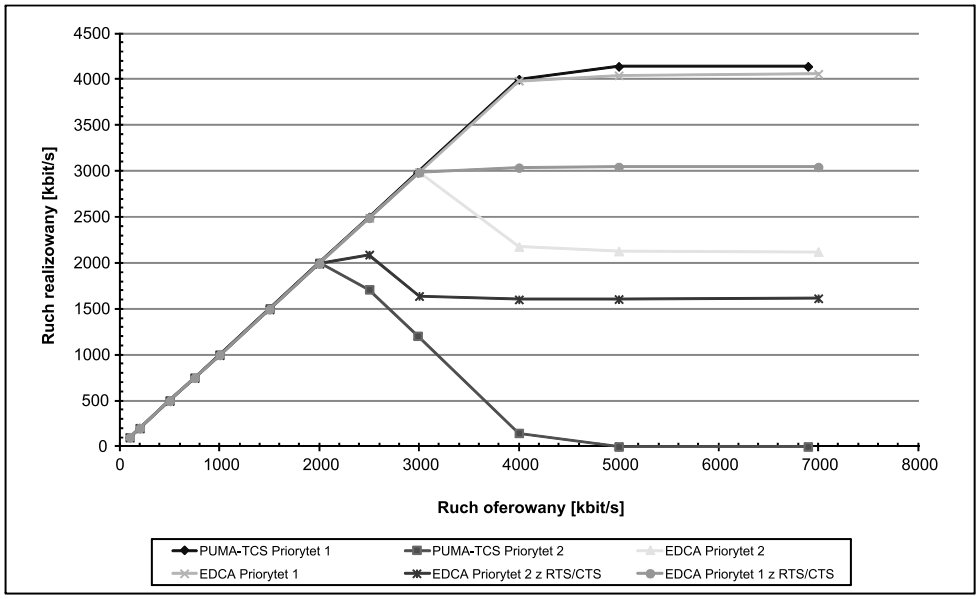
RTS_Threshold=0) oraz wyłączonym mechanizmem RTS/CTS. Wykresy zmian ruchu realizowanego oraz średniego opóźnienia transmisji w funkcji ruchu oferowanego przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Obserwacja uzyskanych wyników pozwala na wyciągnięcie kilku wniosków. Pierwszym zjawiskiem, które można zaobserwować na rysunku 5, jest brak zwiększania przepływności strumienia od pewnej granicy ruchu oferowanego. Jest to spowodowane nasyceniem sieci związanym z przepełnieniem kolejki ramek oczekujących na wysłanie do danej stacji. Najniższą wartość ruchu realizowanego w stanie nasycenia osiąga strumień nadawany z wykorzystaniem PUMA-TCS, który wynosi ok. 4140 kbit/s. Jest to spowodowane działaniem mechanizmu RTS/CTS, który obniża wartość ruchu realizowanego poprzez wymianę ramek RTS i CTS przed wysłaniem ramek DATA. W tym przypadku, kiedy nie mamy do czynienia z problemem stacji ukrytych, mechanizm RTS/CTS okazuje się być całkowicie zbędny. Ruch realizowany z wykorzystaniem PUMA-TCS przyjmuje niższe wartości niż realizowany z wykorzystaniem funkcji dostępu EDCA z włączonym mechanizmem RTS/CTS. Dzieje się tak dlatego, że w pierwszym przypadku czas oczekiwania na wysłanie ramki jest wydłużony w stosunku do EDCA. Czas potrzebny na wysłanie sygnałów JAM, z użyciem protokołu PUMA-TCS, jest dłuższy od czasu AIFS, jaki oczekuje ramka nadawana z użyciem funkcji EDCA. Zdecydowanie wyższe wartości ruchu realizowanego w stanie nasycenia osiąga funkcja EDCA bez włączonego mechanizmu RTS/CTS (ok. 6100 kbit/s). Najwyższą wartość ruchu realizowanego osiąga protokół PUMA-TCS z ustawionym parametrem *packet-train* na wartość 5 (ok. 6960 kbit/s). Gdy *packet-train* ustawiony został na wartość 2, osiągnięte wartości ruchu realizowanego dla protokołu PUMA-TCS były zbliżone do osiąganych przez funkcję EDCA z wyłączonym mechanizmem RTS/CTS. PUMA-TCS zdecydowanie lepiej radzi sobie ze średnim opóźnieniem transmisji, co dobrze obrazuje rys. 6. Średnie opóźnienia ramek osiągane dla PUMA-TCS są niższe od osiąganych dla EDCA. W przypadku EDCA widoczny jest też niekorzystny wpływ stosowania mechanizmu RTS/CTS. Dla EDCA wykorzystującej RTS/CTS opóźnienia transmisji wzrastają gwałtownie przy znacznie mniejszych wartościach ruchu oferowanego niż dla EDCA bez RTS/CTS.

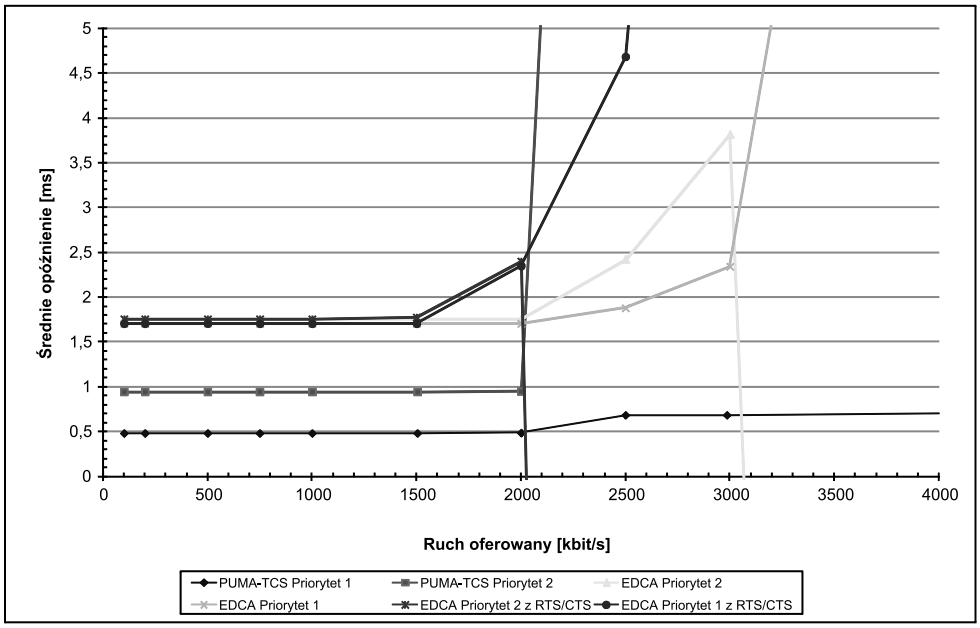
4.2. Scenariusz 2 – Badanie wydajności protokołów z użyciem dwóch priorytetów

W scenariuszu 2 badana sieć składała się z trzech stacji. Stacje o numerach 2 i 3 generują strumienie ruchu CBR i wysyłają je do stacji 1. Strumieniowi nadawanemu ze stacji 2 przydzielony został priorytet 1 (najwyższy), strumieniowi nadawanemu ze stacji 3 przydzielono priorytet 2. Pozostałe parametry symulacji były takie, jak zdefiniowano w tabeli 4 oraz w scenariuszu 1. Mechanizm *packet-train* został wyłączony. Funkcję EDCA przebadano dla dwóch przypadków: z włączonym oraz wyłączonym mechanizmem RTS/CTS. Wykresy zmian ruchu realizowanego oraz średniego opóźnienia transmisji w funkcji ruchu oferowanego przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Na rysunku 7 można zaobserwować działanie mechanizmu nadawania priorytetów dla obu funkcji dostępu do medium. Gdy sumaryczna wartość ruchu oferowanego dla strumieni z priorytetami 1 i 2 przekroczy wartość nasycenia się sieci, wartość ruchu realizowanego przez priorytet 2 musi zmniejszyć się tak, aby strumień z priorytetem wyższym (priorytet 1) mógł przenosić całość ruchu oferowanego. Dzieje się to oczywiście kosztem ruchu z priorytetem niższym (priorytet 2). Ciekawym zjawiskiem jest to, że dla PUMA-TCS, po uzyskaniu stanu nasycenia (sumarycznie dla obu strumieni ok. 4000 kbit/s), następuje gwałtowny spadek ruchu realizowanego dla strumienia o niższym priorytecie. Dzieje się tak, ponieważ podczas rywalizacji o dostęp do medium wygrywa zawsze strumień z priorytetem 1, co prowadzi do „zagłodzenia" ruchu o priorytecie 2 przy wzroście ruchu oferowanego dla strumienia z priorytetem 1. Jest to działanie zgodne z założeniami PUMA-TCS, które zakładają nadawanie dla ruchu o priorytecie najwyższym tzw. *strict priority*, czyli bezwzględnego pierwszeństwa w dostępie do medium transmisyjnego. Inaczej została zaprojektowana funkcja EDCA. W momencie, kiedy sumaryczny ruch obu priorytetów osiągnął stan nasycenia (ok. 6000 kbit/s), wartość ruch realizowanego z priorytetem 2 spadła, podobnie jak dla PUMA-TCS. Nie jest to jednak spadek tak gwałtowny i nie prowadzi do zagłodzenia ruchu z priorytetem 2. Maksymalna wartość ruchu, który może być obsługiwany przez sieć za pośrednictwem funkcji EDCA, została podzielona pomiędzy dwa strumienie ruchu z zachowaniem priorytetów. Po osiągnięciu stanu nasycenia przy wykorzystaniu funkcji EDCA bez włączonego mechanizmu RTS/CTS, strumienie ruchu osiągają odpowiednio: ok. 4050 kbit/s dla strumienia 1 i ok. 2100 kbit/s dla strumienia 2. Po włączeniu mechanizmu RTS/CTS, maksymalne osiągane wartości ruchu realizowanego maleją dla obu strumieni, ponieważ wysyłanie danych poprzedzane jest wymianą ramek RTS/CTS. Wszystkie opisywane wcześniej własności funkcji EDCA (bez włączonego mechanizmu RTS/CTS) zachodzą i w tym przypadku. Na rysunku 8, przedstawiającym średnie wartości opóźnienia transmisji ramek w funkcji ruchu oferowanego, można zaobserwować następujące prawidłowości w działaniu poszczególnych priorytetów. Niezależnie od rodzaju funkcji dostępu do kanału radiowego, strumień o niższym priorytecie uzyskuje wyższe wartości średniego opóźnienia. Opóźnienia strumieni



Rys. 7. Wykres ruchu realizowanego w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 2



Rys. 8. Wykres średniego opóźnienia w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 2

wykorzystujących PUMA-TCS są o ponad połowę mniejsze od średnich opóźnień osiąganych przez strumienie wykorzystujące funkcję EDCA. Charakterystyczne jest również to, opóźnienie dla ruchu z najwyższym priorytetem nie rośnie skokowo.

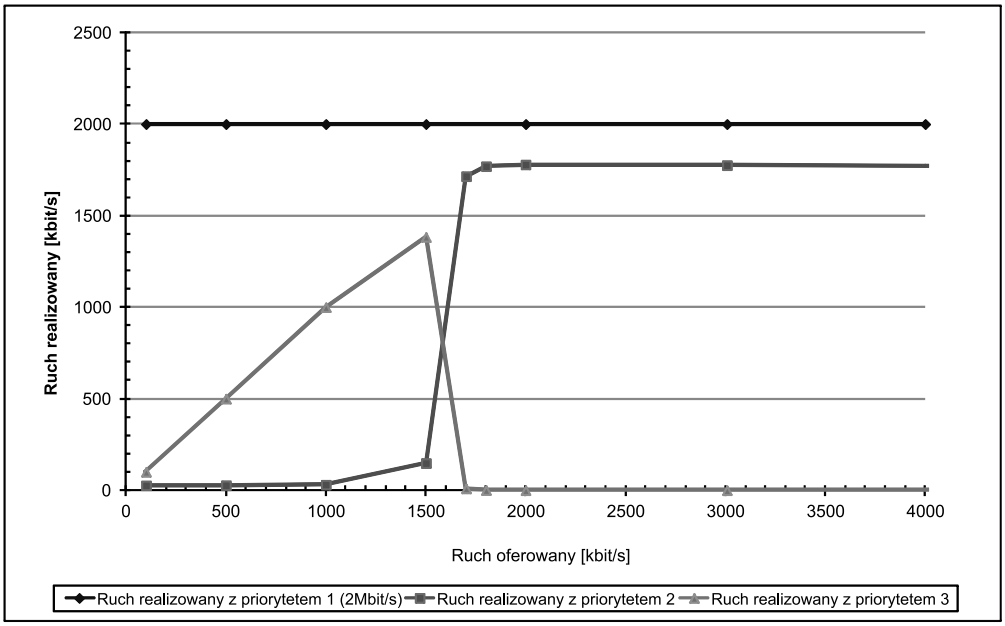
4.3. Scenariusz 3 – Skalowanie ruchu w protokole PUMA-TCS

Celem badań przeprowadzonych dla scenariusza 3 było pokazanie działania licznika odpowiadającego za przejście ramek z priorytetu niższego na wyższy. Licznik T1 (umożliwiający przejście ramek z priorytetu 3 na priorytet 2) został ustawiony na wartość 10, co spowodowało, że każdej ramce o priorytecie 3, która czekała na wysłanie w buforze przez 10 milisekund, był nadawany wyższy priorytet (drugi). Sieć składała się z dwóch stacji, z których jedna wysyła ramki do drugiej stacji wykorzystując trzy różne priorytety. Scenariusz ten miał odzwierciedlać sytuację, w której użytkownik sieci bezprzewodowej korzystał z usługi multimedialnej, np. złożonej z trzech strumieni o różnych priorytetach (dla lepszego zobrazowania działania protokołu PUMA-TCS celowo dokonano zmian w przypisaniu różnych rodzajów ruchu do zdefiniowanych wcześniej klas priorytetów protokołu PUMA-TCS):

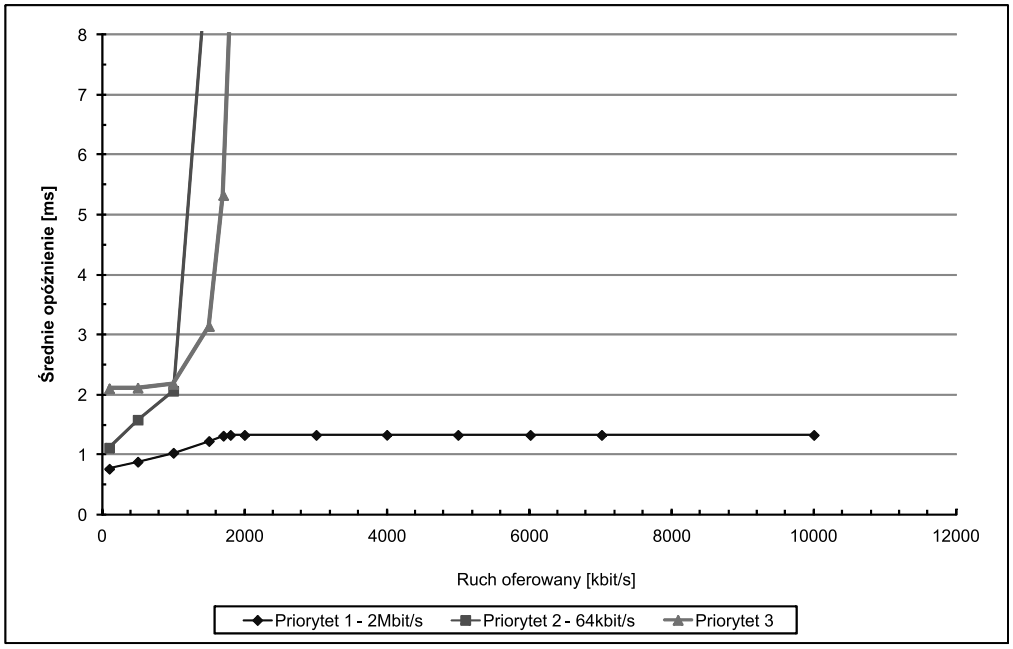
- strumienia wideo o stałej przepływności 2 Mbit/s, przesyłanego w tym scenariuszu jako ruch zarządzający na priorytecie najwyższym, symulowanego jako źródło ruchu typu CBR, generującego ramki o wielkości 250 bajtów,
- strumienia głosowego o przepływności 64 kbit/s, symulowanego jako źródło ruchu typu ON-OFF, generującego ramki o priorytecie drugim,
- strumienia danych transakcyjnych, generowanych w tym scenariuszu z priorytetem 3, symulowanego jako źródło ruchu CBR, generującego ramki o wielkości 1000 bajtów, którego przepływność ulegała zmianom w kolejnych seriach symulacji.

Dostęp do medium transmisyjnego odbywał się wyłącznie z użyciem protokołu PUMA-TCS (EDCA nie pozwala bowiem na realizację strategii skalowania ruchu). Wykresy zmian ruchu realizowanego oraz średniego opóźnienia transmisji w funkcji ruchu oferowanego przedstawiono na rysunkach 9 i 10.

Na podstawie wyników uzyskanych w scenariuszu 3 można zauważyć, że licznik T1 zadziałał prawidłowo. W sytuacji, gdy ruch oferowany dla priorytetu 3 osiągnął wartość ok. 1500 kbit/s (rys. 9), liczba ramek dostarczonych w jednostce czasu przez źródło do bufora jest tak duża, że większość ramek jest w nim przetrzymywana dłużej niż czas określony przez licznik T1



Rys. 9. Wykres ruchu realizowanego w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 3



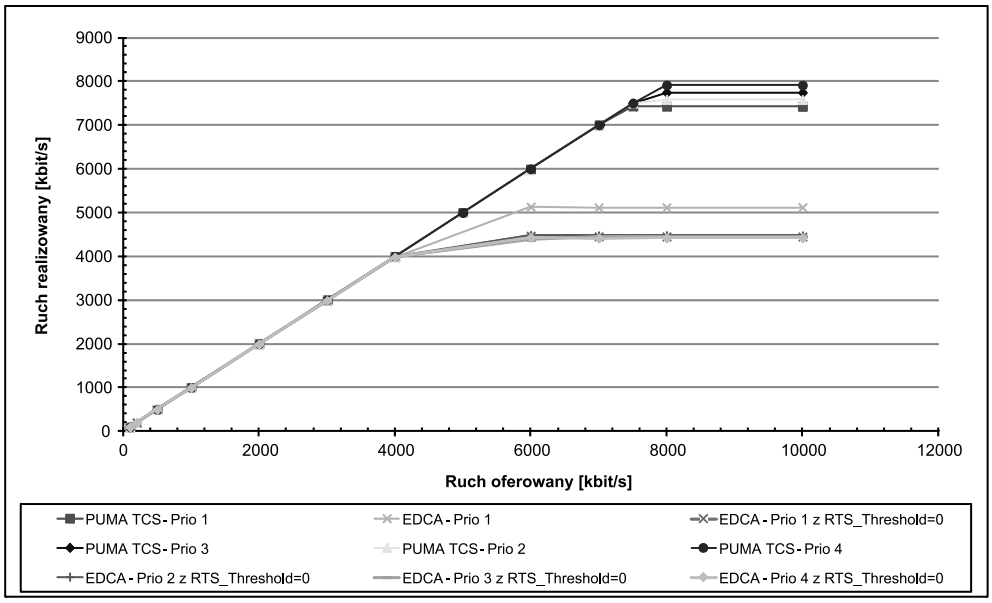
Rys. 10. Wykres średniego opóźnienia w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 3

(ustawiony na bardzo niską wartość 10 milisekund). W efekcie ramkom oczekującym w buforze nadawany był wyższy priorytet (priorytet 2), co zwiększyło ich szansę uzyskania dostępu do kanału radiowego. Proces ten miał degradujący wpływ na QoS strumienia nadawanego pierwotnie z priorytetem 2. Ramki przenoszące usługę głosową musiały zacząć rywalizować o dostęp do medium z ramkami przeniesionymi z niższego priorytetu, co spowodowało znaczny wzrost ich opóźnień. W efekcie prowadzona rozmowa głosowa nie mogła być zrealizowana. Oczywiście, wartość licznika T1 przyjęta w scenariuszu byłaby zbyt mała w warunkach rzeczywistych. Scenariusz ten pokazuje więc, jak ostrożnym trzeba być w dobieraniu prawidłowych wartości tego parametru. Jakość transmisji realizowanej z priorytetem 1 nie uległa zmianie z uwagi na sposób działania protokołu PUMA-TCS, który ramkom o niższych priorytetach nie pozwala przechodzić na najwyższy priorytet.

4.4. Scenariusz 4 – Badanie wydajności protokołów dla różnej liczby stacji

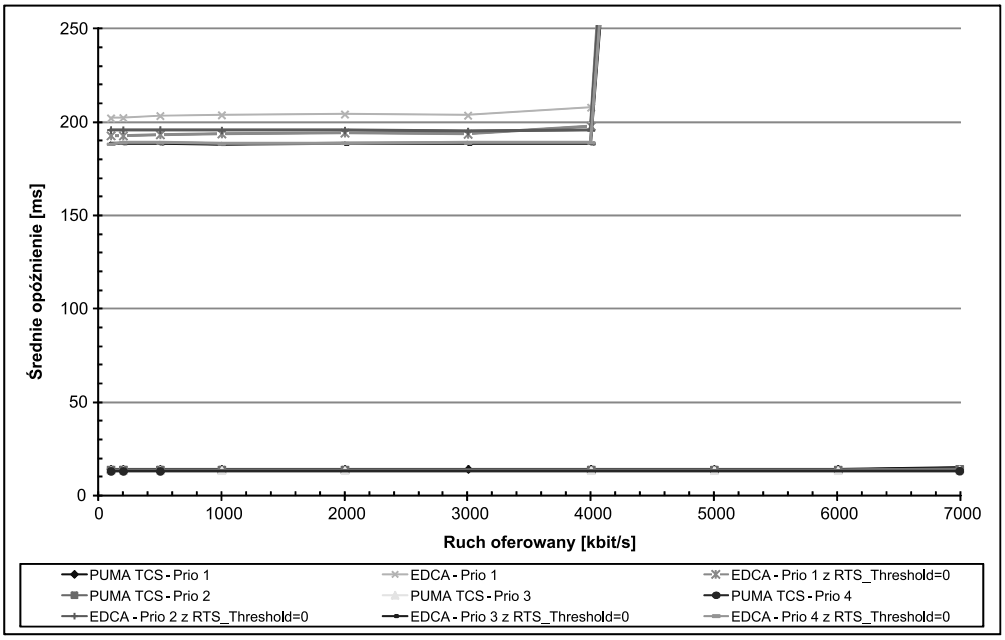
Scenariusz 4 prezentuje pozytywny wpływ mechanizmów stosowanych w protokole PUMA-TCS, takich jak *backoff* typu DIDD oraz stałe użycie mechanizmu RTS/CTS (zwłaszcza podczas transmisji stosunkowo długich ramek) w sieciach o małej (5), średniej (25) i dużej (100) liczbie stacji. Stacje wysyłały ruch typu CBR, wielkość ramek była ustawiona na 1000 bajtów. Wykresy zmian ruchu realizowanego oraz średniego opóźnienia transmisji w funkcji ruchu oferowanego przedstawiono na rysunkach 11–16.

Przeprowadzone symulacje pokazują, że sieć wykorzystująca protokół PUMA-TCS osiąga znacznie większą wydajność pracy niż dla EDCA. Jak można zaobserwować na rysunku 11, punkt świadczący o nasyceniu sieci został osiągnięty dla funkcji EDCA już przy wartości ok. 5 Mbit/s ruchu oferowanego, podczas gdy dla PUMA-TCS punkt ten został osiągnięty dopiero dla wartości ok. 8 Mbit/s. Takie różnice związane są ze zmianami, jakie wprowadza protokół PUMA-TCS do mechanizmu *backoff*. PUMA-TCS wykorzystuje algorytm DIDD, którego działanie przekłada się na mniejszą liczbę kolizji, co z kolei pozwala uzyskać wyższe wartości ruchu realizowanego. Rysunek 11 pokazuje jeszcze jedną istotną cechę – zróżnicowanie efektywności pracy sieci w zależności od priorytetu nadawanego ruchu. Ponieważ w każdej z przeprowadzonych serii symulacji przesyłany był ruch tylko o jednym priorytecie, można zauważyć różnice w efektywności wykorzystania kanału radiowego zarówno w protokole PUMA-TCS jak i funkcji EDCA. Dla PUMA-TCS, najlepsze rezultaty osiągnął ruch o najniższym z symulowanych priorytetów, osiągając przepustowość ok. 7,9 Mbit/s. Ruch realizowany z priorytetem trzecim osiągnął ok. 7,7 Mbit/s, z priorytetem drugim ok. 7,6 Mbit/s, a z priorytetem pierwszym ok. 7,4 Mbit/s. Jest to spowodowane wykorzystywaniem różnej liczby sygnałów JAM, w zależności od priorytetu, w trakcie rywalizacji o dostęp do medium. Stacje mające do wysłania ramkę o priorytecie czwartym muszą zasygnalizować to wysłaniem dwóch sygnałów JAM (rys. 3). W porównaniu do stacji mających do wysłania ramki o priorytecie pierwszym, które muszą wysłać pięć sygnałów JAM, zyskują okres trzech szczelin czasowych. Przekłada się to bezpośrednio na różnice w osiąganych maksymalnych wartościach ruchu realizowanego. Różnice w osiąganych wartościach maksymalnego ruchu realizowanego są widoczne również dla funkcji EDCA. Różnice w tym przypadku wyni-

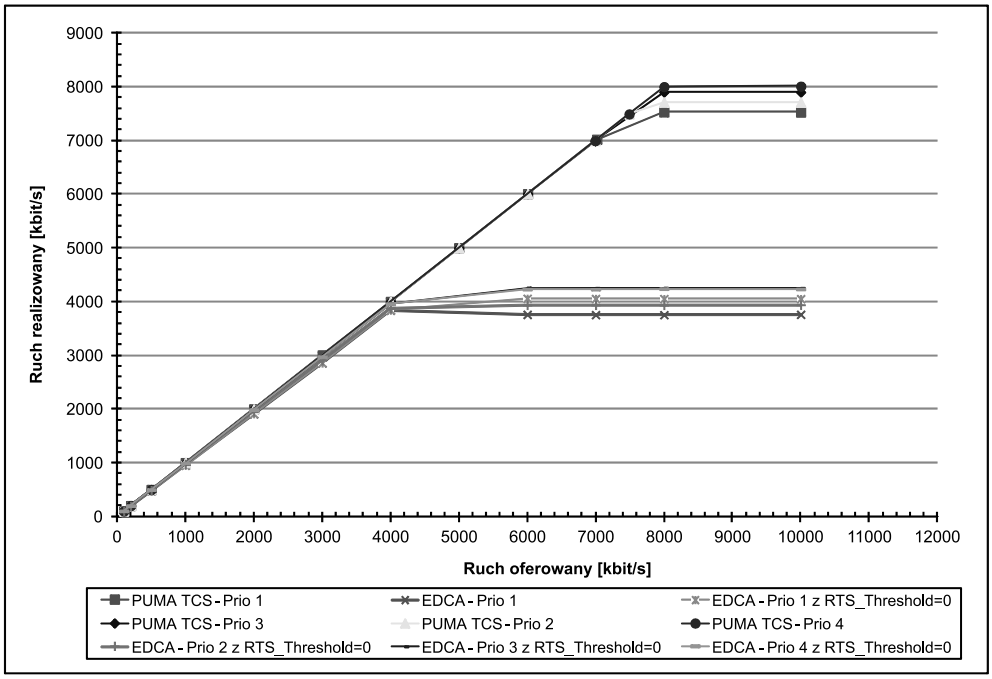


Rys. 11. Wykres ruchu realizowanego w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 4 (5 stacji)

kają z różnych długości czasów AIFS przypisanych różnym priorytetom. Takie zasady działania przekładają się na lepszą efektywność wykorzystania kanału radiowego przez ruch realizowany z wyższym priorytetem. W przypadku wykorzystania mechanizmu RTS/CTS w funkcji EDCA w sieci o małej liczbie stacji, opóźnienia średnie wzrastają, a maksymalny ruch realizowany spada. Powodowane jest to nadmiarowością informacji kontrolnych. W przypadku sieci, w której pracowało 25 stacji, różnice między protokołami są jeszcze większe. Protokół PUMA-TCS ponownie uzyskał znacznie większe wartości ruchu realizowanego. Jest to spowodowane działaniem mechanizmów *backoff* typu DIDD i RTS/CTS. Jak można zauważyć na rysunku 13, włączenie mechanizmu RTS/CTS dla funkcji EDCA wpływa na poprawę osiąganych maksymalnych wartości ruchu realizowanego. Ruch realizowany z priorytetem pierwszym, bez włączonego mechanizmu RTS/CTS, osiągnął maksymalną wartość ok. 3,7 Mbit/s, natomiast z włączonym mechanizmem RTS/CTS osiągnął wartość 3,9 Mbit/s.

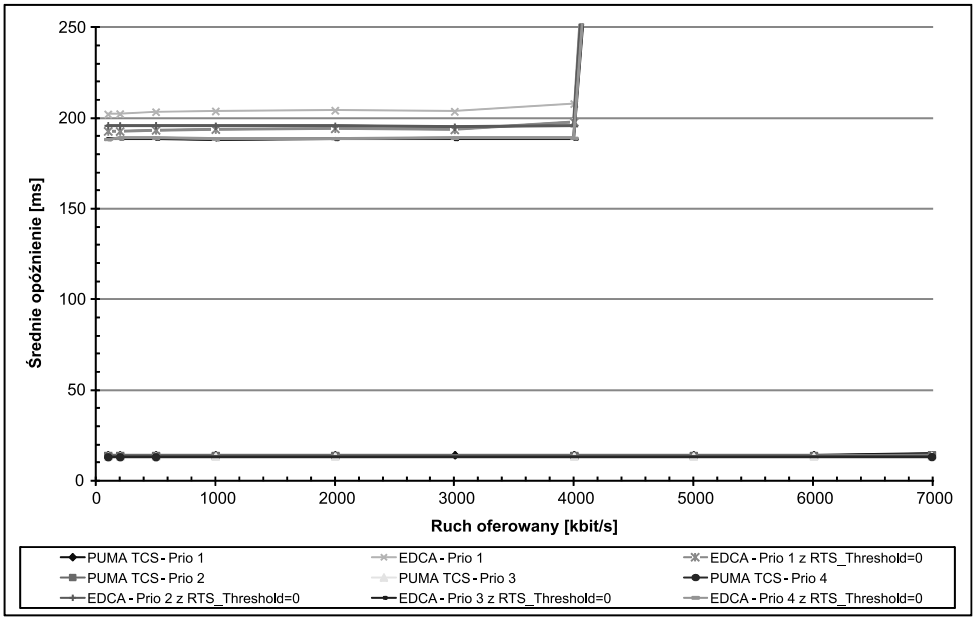


Rys. 12. Wykres średniego opóźnienia w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 4 (5 stacji)

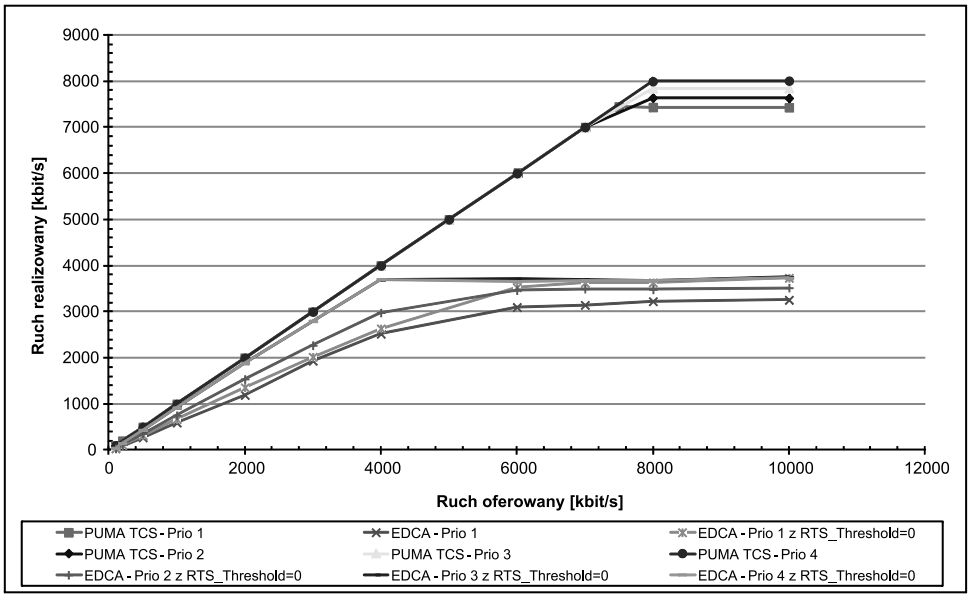


Rys. 13. Wykres ruchu realizowanego w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 4 (25 stacji)

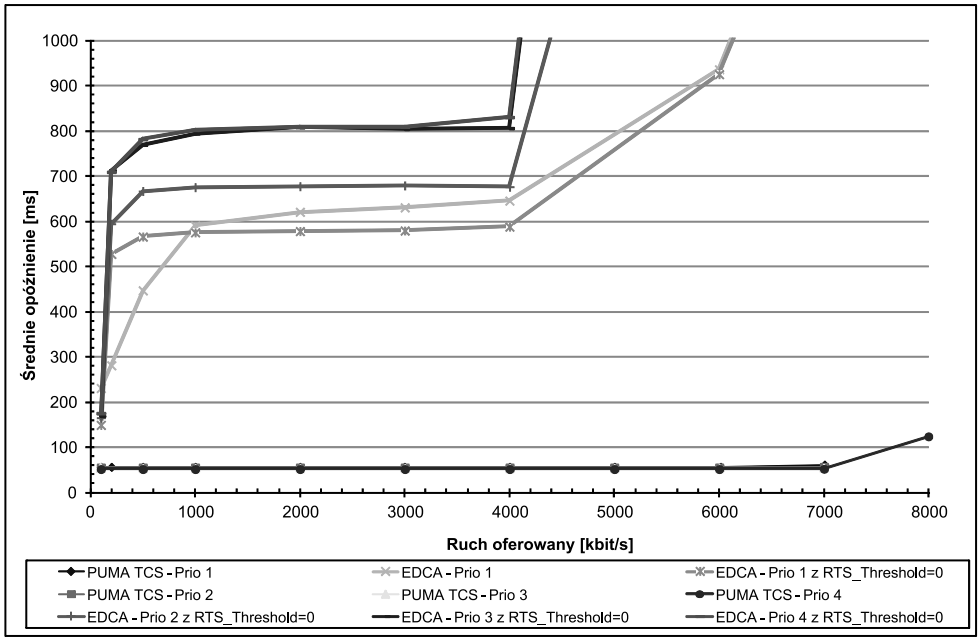
Było to spowodowane większą liczbą kolizji niż w przypadku 5 stacji oraz znacznie szybszym ich wykryciem w przypadku stosowania mechanizmu RTS/CTS. Kolejnym ciekawym zjawiskiem, które można zaobserwować w sieci ze średnią liczbą stacji, jest wpływ rozmiaru okna CW na wartości ruchu realizowanego. Na rysunku 12 obrazującym średnie opóźnienia ramek przesyłanych w sieci złożonej z 5 stacji zaobserwowano, że im wyższy priorytet transmitowanych ramek, tym ich opóźnienia były mniejsze, co tłumaczy mniejszy czas AIFS dla tych priorytetów. Natomiast rysunek 14, przedstawiający opóźnienia w sieci z 25 stacjami, pokazuje, że im wyższy priorytet przesyłanych ramek, tym opóźnienia są większe. Jest to wynikiem zróżnicowanej wielkości okien CW przypisanych różnym priorytetom. Zgodnie z założeniami standardu IEEE 802.11e, im wyższy priorytet, tym mniejsze okno rywalizacji, zatem przy większej liczbie stacji i dużym ruchu oferowanym częściej pojawia się sytuacja, w której kilka stacji wylosuje taką samą wartość licznika *backoff*, co skutkuje częstszymi kolizjami w medium transmisyjnym. Większe okna rywalizacji, przypisane z definicji do niższych priorytetów, sprawiają, że kolizji jest mniej, opóźnienia ramek w związku z tym są mniejsze, a maksymalny ruch realizowany z niższymi priorytetami jest wyższy.



Rys. 14. Wykres średniego opóźnienia w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 4 (25 stacji)



Rys. 15. Wykres ruchu realizowanego w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 4 (100 stacji)



Rys. 16. Wykres średniego opóźnienia w funkcji ruchu oferowanego dla scenariusza 4 (100 stacji)

Największe różnice w pracy obu protokołów można zaobserwować w sieci, składającej się ze 100 stacji (rys. 15 i 16). Analizując działanie protokołu PUMA-TCS, w porównaniu do sieci małych i średnich, nie ma istotnych zmian w wielkościach ruchu realizowanego. Opóźnienia, jakim podlegają ramki, zwiększają się wraz ze zwiększeniem się liczby stacji transmisji nadających jednocześnie. Na rysunku 16 można zaobserwować, że w sieci złożonej ze 100 stacji opóźnienie średnie kształtuje się na poziomie 51 milisekund. Znacznie bardziej istotne zmiany zachodzą dla funkcji EDCA (w przypadku dużej sieci). Na rysunku 15 można zauważyć, że wzrost ruchu realizowanego nie jest liniowy nawet dla niewielkich wartości ruchu oferowanego. Takie zjawisko nie miało miejsca w sieciach o małej i średniej liczbie stacji. Również opóźnienia, jakim podlegają ramki w tej sieci (rzędu kilkuset milisekund), są niedopuszczalne przy realizacji usług głosowych i wideo. Równocześnie można zauważyć spadek maksymalnych wartości ruchu realizowanego dla tej sieci, w porównaniu z sieciami o mniejszej liczbie stacji.

5. Wnioski

Praca przedstawia analizę symulacyjną protokołu PUMA-TCS opracowanego w Katedrze Telekomunikacji AGH. Po teoretycznym przedstawieniu protokołów PUMA-TCS oraz funkcji EDCA zaprezentowano ich porównanie. Badania przeprowadzono dla czterech różnych scenariuszy. W działaniu protokołu PUMA-TCS można było zaobserwować funkcjonowanie mechanizmu *strict priority*. W sytuacji, kiedy liczniki przejść pomiędzy priorytetami są wyłączone i wartość ruchu oferowanego jest duża, następuje degradacja ruchu o niższym priorytecie na rzecz ruchu o priorytecie wyższym. Rygorystyczne działanie mechanizmu *strict priority* można zmniejszać poprzez umiejętne stosowanie liczników przejść pomiędzy poszczególnymi priorytetami. Należy jednak pamiętać, że stosowane liczników przejść zawsze pociąga za sobą degradacje ruchu o wyższym priorytecie. Niedopuszczalne jest przeniesienie większości lub całości ruchu oferowanego z priorytetu niższego na wyższy, ponieważ może to doprowadzić do sytuacji, w której o dostęp do medium będą rywalizowały równorzędnie na przykład: rozmowa głosowa (priorytet 2) i ruch wideo (priorytet 3). W takiej sytuacji ruch oferowany zostanie wprawdzie przeniesiony, ale opóźnienia mogą wzrosnąć powyżej akceptowalnego dla danej klasy ruchu poziomu. Kolejnym pomysłem na usprawnienie funkcji dostępu do medium PUMA-TCS jest stałe stosowanie mechanizmu RTS/CTS. Jest to podejście odwrotne niż prezentowane w standardzie IEEE 802.11e, gdzie włączenie tego mechanizmu uzależnia się od przekroczenia przez rozmiar ramki danych pewnej wartości granicznej. Jak pokazują badania, mechanizm RTS/CTS nie sprawdza się przy niewielkiej liczbie stacji znajdujących się w sieci ad-hoc, gdyż jego działanie zajmuje dodatkowo pasmo i wprowadza dodatkowe opóźnienia. Mechanizm ten sprawdza się doskonale w przypadku, kiedy w sieci znajduje się średnia lub duża liczba stacji lub stacje ukryte. Funkcjonalnością, która bardzo pozytywnie wyróżnia protokół PUMA-TCS, w przypadku sieci z dużą liczbą stacji w warunkach silnego obciążenia, jest algorytm DIDD. Mechanizm ten pozwala na znaczne

zwiększenie wartości ruchu realizowanego dzięki redukcji liczby kolizji. Dla sieci złożonej ze 100 stacji skutkowało to nawet dwukrotnie większym ruchem realizowanym, w porównaniu do sieci wykorzystującej z funkcji EDCA i nie wykorzystującej mechanizmu DIDD. Zwiększenie efektywności wysyłania danych przy zastosowaniu funkcji PUMA-TCS można także uzyskać poprzez stosowanie mechanizmu *packet-train*. Uzyskano w ten sposób zwiększenie wartości ruchu realizowanego o ponad 50% w stosunku do wartości osiąganych przez protokół PUMA-TCS, dla którego mechanizm *packet-train* był wyłączony. Kolejne prace będą się koncentrowały na dalszej optymalizacji parametrów protokołu PUMA-TCS, umożliwiającej zwiększenie maksymalnej wartości ruchu realizowanego oraz zmniejszenie średniego opóźnienia transmisji. Badaniami zostaną objęte także sieci, w których występują stacje ukryte.

Literatura

[1] IEEE Std 802.11 *Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE 802.11–2007

[2] IEEE Std 802.11e *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*, 2005

[3] Mangold S., Choi S., May P., Klein O., Hiertz G., Stibor L.: *IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service*. Proc. European Wireless, vol. 1, s. 32–39, Florence, Italy, February 2002

[4] Mangold S., Choi S., May P., Hiertz G.: *IEEE 802.11e – Fair Resource Sharing between Overlapping Basic Service Sets*. [w:] Proceedings of the PIMRC 2002, s. 166–171, Lisbon, Portugal, September 2002

[5] Choi S. , del Prado J., S. Shankar N, Mangold S.: *IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation*. IEEE International Conference on Communications, 2003

[6] Wu H., Wang X., Zhang Q., Shen X.: *IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) Throughput Analysis*. [w:] Proc. of IEEE International Conference on Communications, June 2006

[7] Hwang I.-S., Chang H.-H.: *Performance Assessment of IEEE 802.11e EDCF Using Three-dimension Markov Chain Model*. Applied Mathematical Sciences, vol. 2, No. 3, s. 139–151, 2008

[8] Gas M., Kosek-Szott K., Natkaniec M., Pach A.R.: *3D Markov chain-based saturation throughput model of IEEE 802.11 EDCA*. Electronics Letters, vol. 47, No. 14, 2011

[9] Kosek-Szott K., Natkaniec M., Pach A.R.: *A simple but accurate throughput model for IEEE 802.11 EDCA in saturation and non-saturation conditions*. Computer Networks, Elsevier, vol. 55 issue 3, 21 Feb. 2011

[10] Natkaniec M., Pach A.R.: *PUMA A New Channel Access Protocol for Wireless LANs*. WPMC 2002 Wireless Personal Multimedia Communications, Honolulu, Hawaii, U.S.A, 27–30 October 2002

[11] Natkaniec M., Pach A.R.: *An Analysis of Modified Backoff Mechanism in IEEE 802.11 Networks.* Polish–German Teletraffic Symposium 2000, Dresden, Germany, 24–26 September 2000