

Analiza symulacyjna sieci IEEE 802.11e o topologii gwiazdy w przypadku występowania stacji ukrytych¹

Katarzyna Kosek, Marek Natkaniec, Andrzej R. Pach (e-mail: {kosek, natkaniec, pach}@kt.agh.edu.pl)
Katedra Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej – Kraków

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej sieci IEEE 802.11e ze stacjami ukrytymi. W celu oceny wpływu stacji ukrytych na pracę i wydajność sieci bez infrastruktury, badania przeprowadzono dla dwóch sieci. Jednej o topologii trójwęzłowej i drugiej o topologii czterowęzłowej gwiazdy. Dodatkowo wykazano niezdolność trybu EDCA dostępu do kanału radiowego do zapewnienia wymaganej jakości usług, w tym przede wszystkim głosowych i wideo. Ponadto zweryfikowano użyteczność mechanizmu RTS/CTS w zmniejszaniu wpływu stacji ukrytych na wydajność badanych sieci.

ABSTRACT

A Simulation Analysis of Star Topology IEEE 802.11e Networks in the Presence of Hidden Nodes

The article presents results derived from a simulation analysis of IEEE 802.11e networks in the presence of hidden nodes. In order to show how meaningful the degrading impact of hidden nodes on ad-hoc networks performance is, two different star topologies were analyzed. There were three- and four-node ones. Additionally, in the presence of hidden nodes, the inability of the EDCA mechanism to assure a desired quality of service for different services (most of all video and voice) was shown. Furthermore, the usefulness of the RTS/CTS mechanism was also verified.

1. Wstęp

Sieci bezprzewodowe bez infrastruktury (ad-hoc) są obecnie jednymi z najbardziej dynamicznie rozwijających się sieci telekomunikacyjnych. Są popularne przede wszystkim łatwej i szybkiej konfiguracji, która nie wymaga skomplikowanego zarządzania.¹ Łatwość tworzenia się tych sieci czyni je przydatnymi nie tylko dla przeciętnego użytkownika czy dostawcy usług internetowych, ale również w przypadku sytuacji wyjątkowych, np. związanych z awarią sieci przewodowych na skutek klęsk żywiołowych. Jednakże same sieci ad-hoc nie są w stanie zapewnić określonej jakości QoS (*Quality of Service*) poszczególnym usługom, takim jak: *Voice over IP* (VoIP) czy *Video on Demand* (VoD). Dlatego też, dla zapewnienia usługom telekomunikacyjnym w sieciach ad-hoc odpowiedniej jakości QoS, opracowano standard IEEE 802.11e [1]. W przypadku sieci bez infrastruktury, standard ten pozwala na świadczenie usług o zadanej jakości QoS dzięki zastosowaniu trybu EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*). Powszechnie wiadomo, że ten tryb dostępu do kanału dobrze sobie radzi w przypadku sieci, w których nie występuje problem stacji ukrytych. W niniejszej pracy przedstawiono niezadowolające działanie trybu EDCA w przypadku występowania w sieci ad-hoc stacji ukrytych. Zagadnienie to nie było dotychczas badane przez

innych naukowców. Wstępne rezultaty badań zaprezentowano jedynie w [8] i [9].

W artykule skoncentrowano się na analizie pracy dwóch sieci IEEE 802.11e o topologii trójwęzłowej i czterowęzłowej gwiazdy. Uzyskane wyniki badań dowiodły niezdolności trybu EDCA do poprawnego nadawania priorytetów usługom w przypadku występowania stacji ukrytych. W badaniach główny nacisk położono na przepustowość osiąganą przez usługi głosowe i wideo, oraz na niesprawiedliwy dostęp poszczególnych stacji do kanału radiowego. Dodatkowo, zbadano przydatność mechanizmu RTS/CTS do poprawy przepustowości ruchu telekomunikacyjnego o wysokich priorytetach (tj. głos i wideo).

Redakcja i układ treści w artykule wyglądają następująco. Rozdział 2 zawiera podstawowe informacje na temat standardu IEEE 802.11e. Problem stacji ukrytych przedstawiono w rozdziale 3. W rozdziale 4 podano najważniejsze parametry symulacji komputerowych badanych sieci. Rozdział 4 zawiera również szczegółowy opis wyników. Wnioski i uwagi końcowe zaprezentowano w rozdziale 5.

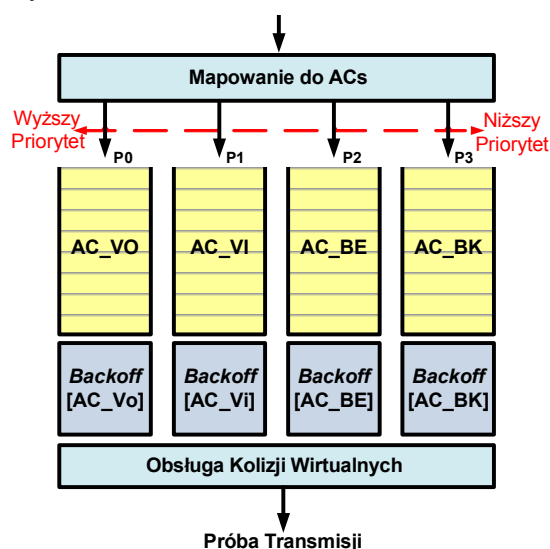
2. Standard IEEE 802.11e

Standard 802.11e definiuje dwa tryby dostępu do kanału radiowego: EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) oraz HCCA (*Hybrid Coordination function*

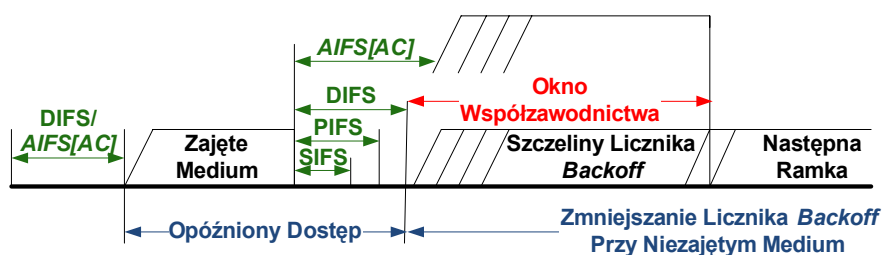
¹⁾ Praca wykonana w ramach grantu MNiSW nr N N517 4391 33.

Channel Access). Ponieważ tryb EDCA jest stosowany w sieciach ad-hoc, zatem zostanie on opisany bardziej szczegółowo. Informacje dotyczące trybu HCCA, który jest przeznaczony dla sieci z infrastrukturą, można odnaleźć w [1].

Tryb EDCA definiuje szereg rozszerzeń tradycyjnej procedury CSMA/CA rywalizacyjnego dostępu do kanału radiowego. Głównym zadaniem EDCA jest zapewnienie poszczególnym usługom w sieci wymaganej wartości wskaźnika QoS. W tym celu tryb EDCA wprowadza cztery kategorie dostępu AC (Access Categories), charakteryzowane przez kilka parametrów (access parameters). Każdej kategorii AC, a więc głosowej VO (voice), wideo VI (video), BE (best effort) oraz BK (background), nadaje się jeden z czterech priorytetów (rys. 1). Najwyższy priorytet to P0, najniższy to P3.



Rys. 1. Procedura wirtualnego mechanizmu backoff



Rys. 2. Realizacja o dostęp do kanału radiowego w trybie EDCA

Ze względu na to, że usługi głosowe Vo i wideo Vi są bardziej wrażliwe na wahania opóźnień (*jitter*) oraz utratę pakietów, standard 802.11e przypisuje im wyższe priorytety niż usługom BE i BK.

Rysunki 1 i 2 przedstawiają proces nadawania w trybie EDCA priorytetów poszczególnym usługom. Definicje wielkości AIFS, SIFS, DIFS i PIFS (rys. 2) oraz ich szczegółowy opis podano w [1] i [2].

Sam proces nadawania priorytetów przebiega w następujący sposób. Każdej ramce należącej do konkretnego strumienia danych jest przypisywana wewnątrz bezprzewodowego węzła QoS odpowiednia kategoria AC. Następnie, ramka ta jest przechowywana w odpowiedniej kolejce sprzętowej (*hardware queue*). Od tego momentu, prawdopodobieństwo przyznania prawa do transmisji jest ściśle zależne od parametrów dostępu ramki do kanału. Do parametrów dostępu zalicza się: $AIFSN[AC]$ (*Arbitrary Interframe Space Number*), wartość minimalną $CW_{min}[AC]$ i maksymalną $CW_{max}[AC]$ okna współzawodnictwa, oraz opcjonalnie $TXOP_{limit}$ (*Transmission Opportunity Limit*). Na ich podstawie są obliczane wartości licznika *Backoff* oraz parametru $AIFS[AC]$ (*Arbitrary Interframe Space*). Wartość licznika *Backoff* jest losowana z przedziału $[0, CW]$, przy czym CW wynosi początkowo $CW_{min}[AC]$, a następnie za każdym razem, gdy ramka danej kategorii AC uczestniczy w kolizji, jest zwiększana, aż do osiągnięcia wartości $CW_{max}[AC]$. Natomiast wartość $AIFS[AC]$ jest obliczana zgodnie z formułą:

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \times SlotTime,$$

gdzie *SlotTime* jest długością szczeliny czasowej, a *SIFS* (*Short Interframe Space*) – minimalnym możliwym odstępem między dwoma ramkami.

Węzłowi QoS jest przyznawane prawo do transmisji za każdym razem, gdy kanał nie był zajęty przez czas $AIFS[AC]$ oraz gdy licznik *Backoff* dla danej kategorii AC osiągnął wartość zero. Dlatego im mniejsze są wartości parametrów $AIFSN[AC]$ i CW , tym większe jest prawdopodobieństwo wcześniejszego przyznania prawa do transmisji.

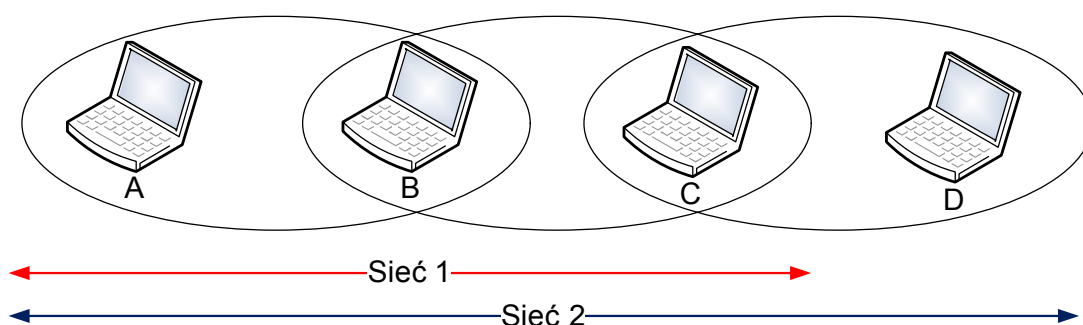
W trakcie trwania wyżej opisanego procesu dostępu do kanału mogą wystąpić dwa typy kolizji: kolizje wirtualne i kolizje w kanale. Z kolizjami wirtualnymi mamy do czynienia wówczas, gdy więcej niż jedna kategoria AC wygrywa współzawodnictwo

o dostęp do kanału wewnątrz bezprzewodowego węzła QoS, na przykład, gdy licznik *Backoff* osiągnie wartość zerową dla więcej niż jednej kategorii AC. Natomiast kolizje w kanale mają miejsce wówczas, gdy więcej niż jeden węzeł QoS próbuje transmitować dane przez kanał radiowy. Oba te typy kolizji są nierozdzielnie związane z występowaniem stacji ukrytych (rozdz. 3).

3. Problem stacji ukrytych

W sieciach bezprzewodowych poważną niedogodnością jest to, że w danej chwili pozwalają one na wymianę danych między urządzeniami tylko w jednym kierunku (*half-duplex*). Innymi słowy, nie pozwalają one na jednoczesny odbiór i nadawanie wiadomości. W rezultacie, przekłada się to na nieuniknione kolizje ramek w wyniku symultanicznych transmisji realizowanych przez dwie lub więcej stacji. W przypadku gdy dana stacja znajduje się w zasięgu stacji odbierającej, ale jest poza zasięgiem innej stacji transmitującej dane do tej samej stacji odbierającej, nazywamy ją stacją ukrytą.

W celu ograniczenia problemów generowanych przez stacje ukryte zaproponowany został mechanizm *four-way-handshake*, w którym wymiana czterech typów ramek: danych DATA, potwierdzeń ACK, rezerwacji kanału *Request To Send* (RTS), potwierdzenia rezerwacji *Clear To Send* (CTS), pozwala uniknąć niektórych kolizji. Oprócz tego mechanizmu w literaturze zaproponowano jeszcze kilka innych rozwiązań [4]. Niemniej jednak, żadne z nich nie jest tak powszechnie stosowane, jak metoda *four-way-handshake*. Główne wady i zalety stosowania w sieciach standardu IEEE 802.11 wymiany ramek RTS i CTS przedstawiono w [5], [6], [7]. Ponieważ żaden z wymienianych, lub też innych znanych autorom artykułów,



Rys. 3. Sieć z węzłami ukrytymi

Dla lepszej ilustracji problemu węzłów ukrytych, na rysunku 3 przedstawiono sieć 1 składającą się z trzech węzłów. Węzły A i C leżą w obszarze wykrywania nośnej węzła B, lecz nie słyszą się wzajemnie, a więc są ukryte względem siebie. Z tego powodu w sieci 1 pojawia się, dla symultanicznych transmisji od węzłów A i C do węzła B, zagrożenie licznymi kolizjami. Po rozszerzeniu sieci 1 o węzeł D, w sieci 2, oprócz nadal ukrytych węzłów A i C, pojawią się dwa nowe ukryte względem siebie węzły B i D. Natomiast nie są ukrytymi względem siebie węzły A i D, a to dlatego, że nie wpływają one w sposób bezpośredni na prowadzone przez nie transmisje.

nie weryfikuje poprawności działania mechanizmu *four-way-handshake* w sieciach standardu IEEE 802.11e, dlatego też w niniejszym artykule zostały przedstawione badania tego mechanizmu.

4. Wyniki badań symulacyjnych

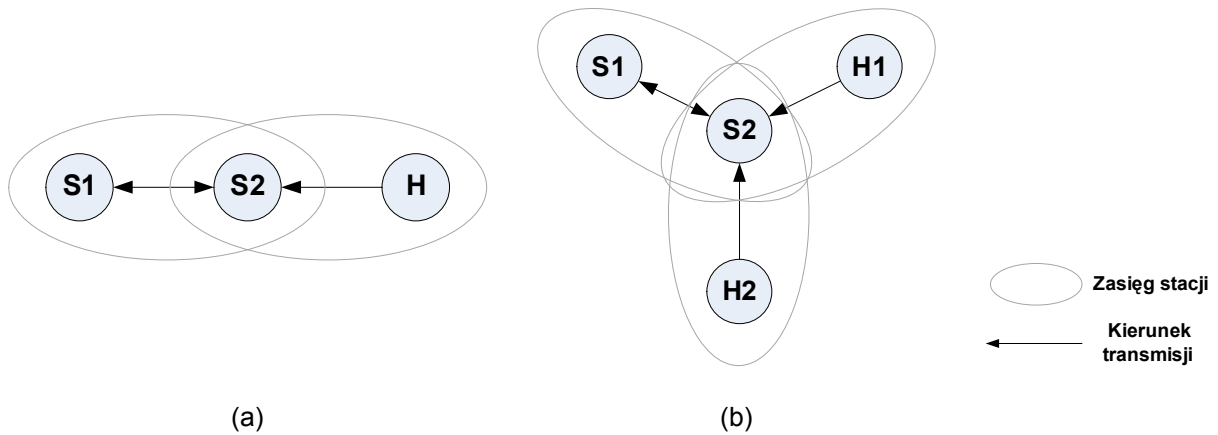
Prezentowane w artykule wyniki badań symulacyjnych sieci *ad-hoc* ze stacjami ukrytymi uzyskano za pomocą symulatora ns2 z poprawionym trybem EDCA opartym na rozszerzeniu opracowanym przez grupę TKN [3]. Zmiany wprowadzone przez autorów dotyczą głównie mechanizmu *four-way handshake*.

Tabela 1
Podstawowe parametry symulacji

SIFS	10 μ s	DIFS	50 μ s
PIFS	30 μ s	Szczelina czasowa	20 μ s
Zasięg transmisji	250 m	Moc nadajnika	0.282 W
Wielkość ramki	1000 B	Rodzaj ruchu	CBR/UDP
Zasięg wykrywania nośnej (<i>Carrier Sensing</i> , CS)	263 m (sieć ze stacjami ukrytymi) 550 m (sieć bez stacji ukrytych)		
Odległość między węzłami	200 m		
Standard	IEEE 802.11b z rozszerzeniem 802.11e		

Tabela 2
Parametry trybu EDCA dostępu do kanału

Priorytet	AC	$CW_{min}[AC]$	$CW_{max}[AC]$	$AIFSN[AC]$	$TXOP_{limit}$
P0	Vo	7	15	2	0
P1	Vi	15	31	2	0
P2	BE	31	1023	3	0
P3	BK	31	1023	7	0



Rys. 4. Sieć (a) trójwęzłowa, (b) czterowęzłowa

Tabela 3
Badane konfiguracje priorytetów

Transmisja	Priorytet			
	Konfiguracja 1	Konfiguracja 2	Konfiguracja 3	Konfiguracja 4
$S1 \leftrightarrow S2$	P0	P3	P0	P3
$H \rightarrow S1$	P3	P0	P0	P3

W tabeli 1 zamieszczono wartości parametrów przyjętych podczas badań. Natomiast tabela 2 zawiera wartości parametrów dostępu do kanału dla poszczególnych kategorii AC.

Analizowane sieci składały się odpowiednio z trzech oraz czterech węzłów (rys. 4). W trakcie symulacji, każdy z węzłów przysyłał dane tego samego typu (CBR/UDP) ze zmienną szybkością.

4.1. Przypadek 1: sieć trójwęzłowa

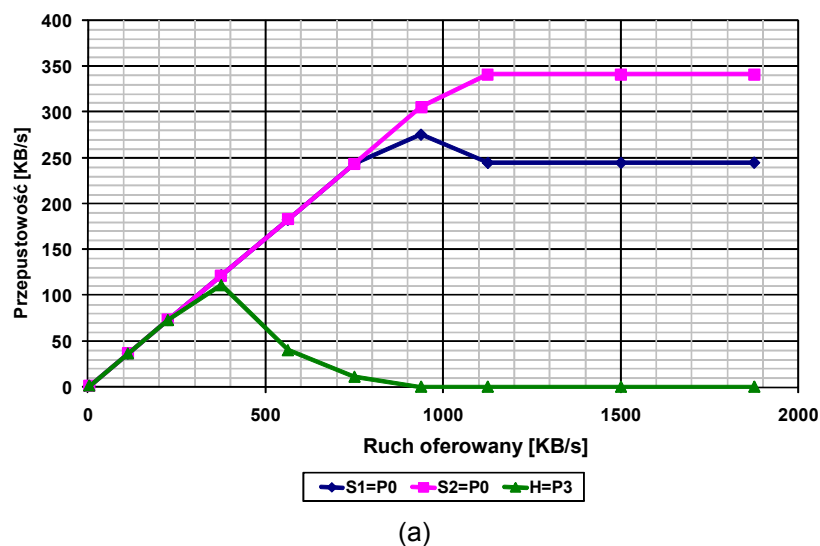
W sieci trójwęzłowej zbadano wpływ stacji ukrytej (H) na jakość transmisji między stacjami S1 i S2 (rys. 4a). W tabeli 3 przedstawiono sposób przyznawania priorytetów dla czterech różnych konfiguracji. Każda konfiguracja była analizowana z wyłączonym i włączonym mechanizmem *four-way handshake*.

Na rysunkach 5 – 8 przedstawiono wartości przepustowości osiągane w sieci trójwęzłowej (rys. 4a)

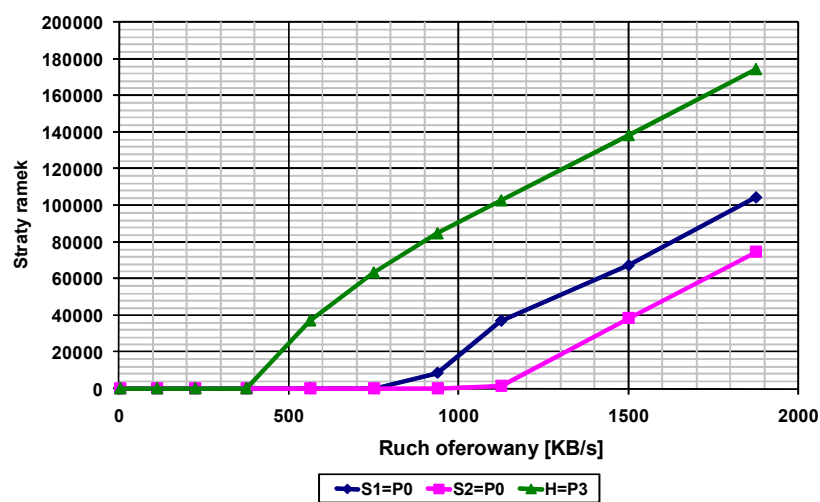
z wyłączonym mechanizmem *four-way handshake*. Natomiast na rysunku 5b, dodatkowo, zaprezentowano liczbę straconych ramek.

Dla konfiguracji 1 wartość przepustowości osiągana przez stację S2 jest nieznacznie większa od przepustowości S1. Wynika to z faktu, że ukryta względem stacji S2 stacja H transmituje ruch z niskim priorytetem (P3) i nie powoduje dużej liczby kolizji. Dlatego też stacja H nie wpływa znacząco na jakość transmisji między stacjami S1 i S2. Straty ramek (rys. 5b) są proporcjonalne do osiąganych wartości przepustowości. Ponieważ podobne zależności, dotyczące strat ramek, zaobserwowano dla pozostałych konfiguracji priorytetów, dlatego zdecydowano się nie zamieszczać dalszych wykresów strat ramek w artykule.

Dla drugiej konfiguracji priorytetów przepustowość stacji S2 jest większa od S1, zwłaszcza w przypadku

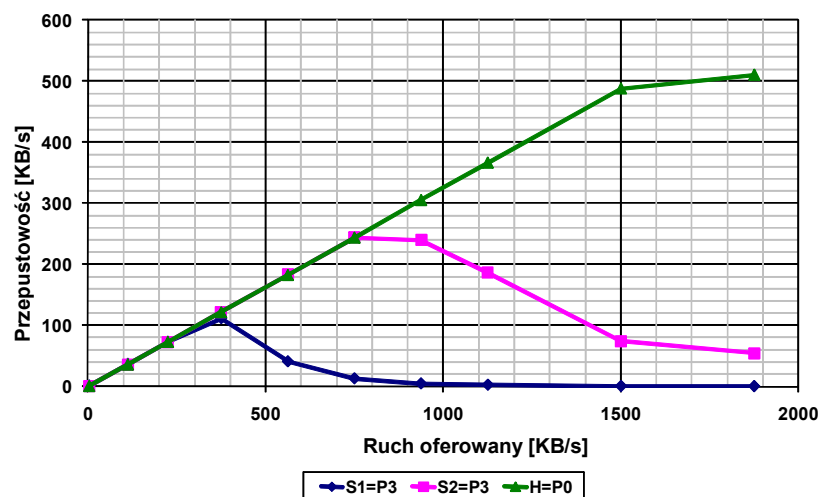


(a)



(b)

Rys. 5. Konfiguracja 1: (a) przepustowość (b) straty ramek



Rys. 6. Konfiguracja 2: przepustowość

średniej wartości obciążenia sieci ruchem oferowanym. Ponieważ stacja H transmituje ruch o wysokim priorytecie (P0), zatem zgodnie z założeniami trybu

EDCA wygrywa ona z pozostałymi stacjami, które nadają z niskim priorytetem (P3). Powoduje to znaczne zmniejszenie się przepustowości stacji S1 i S2.

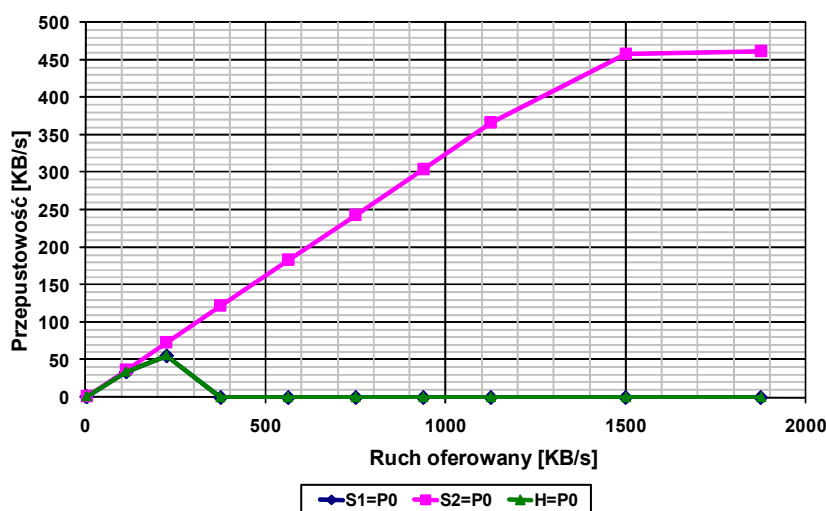
Dla konfiguracji 3 stacja S2 praktycznie przejmuje całkowitą kontrolę nad kanałem radiowym. Przepustowości stacji S1 i H są znikomo małe, co jest wynikiem bardzo dużej liczby kolizji między ramkami stacji S1 i H. Wynika to z faktu, że ramkom z wysokim priorytetem nadaje się niskie wartości parametrów dostępu do kanału radiowego (i.e., CW_{min} , CW_{max} , $AIFS$). Prowadzi to do częstych prób wysyłania ramek, które w tym przypadku skutkują kolizjami. Ramki nadawane przez stację S2 nie ulegają kolizjom, ponieważ stacja S2, jako jedyna nieukryta względem każdej innej stacji, jest w stanie wykryć wolny kanał radiowy i wysłać swoje dane, gdy inne stacje nie nadają. Po rozpoczęciu transmisji przez stację S2, stacje S1 i H nie wysyłają ramek, ponieważ wykrywają w kanale radiowym obecność ramek pochodzących od stacji S2.

Dla konfiguracji 4, w której wszystkie stacje transmitują ramki z niskim priorytetem (P3), stacja S2,

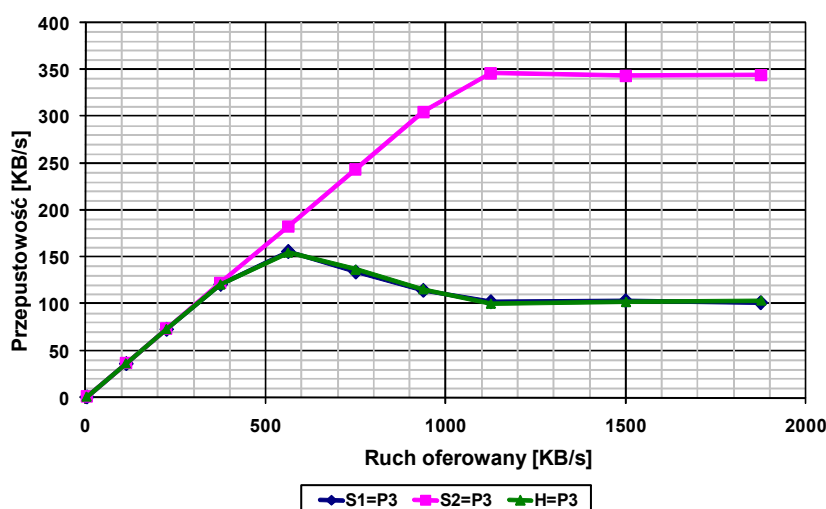
podobnie jak dla konfiguracji 3, dominuje zarówno nad stacją H, jak i stacją S1. Jednak w porównaniu z konfiguracją 3, całkowita przepustowość sieci jest większa. Jest to związane z mniejszą liczbą kolizji między ramkami stacji S1 i H, wynikającą z użycia niższych priorytetów transmitowanych danych.

Na rysunkach 9-12 zamieszczono wykresy przepustowości stacji H, S1 i S2 dla włączonego mechanizmu *four-way handshake*. Nie uwzględniono na nich liczby straconych ramek, ponieważ, podobnie jak w przypadku wyłączonego mechanizmu *four-way handshake*, istnieje prosta zależność między osiąganą przepustowością a liczbą straconych ramek.

Włączenie mechanizmu *four-way handshake* (rys. 9-12) nie wpływa znacząco na zachowanie sieci w porównaniu z wcześniej omówionymi przypadkami, w których był on wyłączony (rys. 5-8). Aczkolwiek, w wyniku zwiększenia narzutu sygnalizacyjnego, wynikającego z pojawienia się ramek RTS i CTS, całkowite wyko-



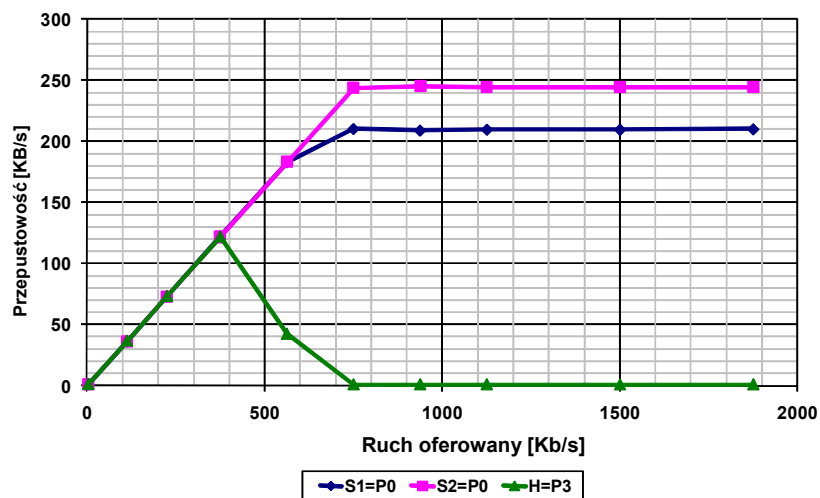
Rys. 7. Konfiguracja 3: przepustowość



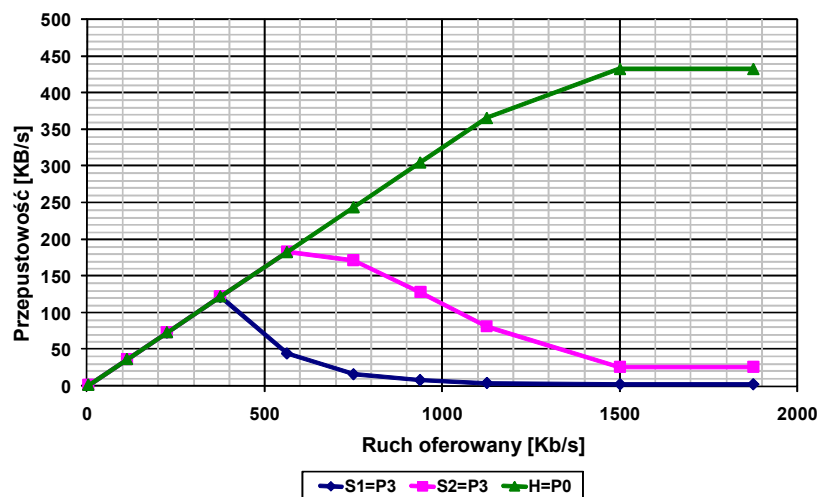
Rys. 8. Konfiguracja 4: przepustowość

rzystanie przepustowości sieci spada. W przypadku dużych wartości ruchu oferowanego, dla konfiguracji pierwszej spada ono o ok. 200 KB/s, dla drugiej o ok. 100 KB/s, dla trzeciej o ok. 50 KB/s oraz dla czwar-

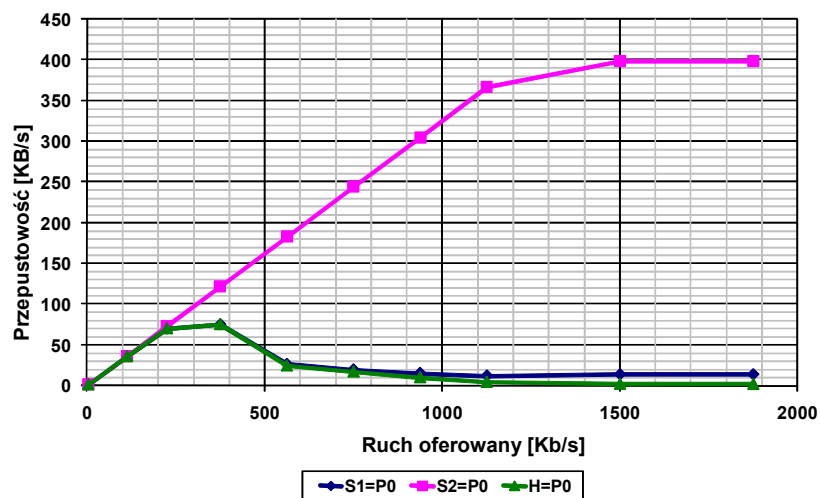
tej o ok. 100 KB/s. Co ważne, użycie mechanizmu *four-way handshake* nie eliminuje negatywnego wpływu stacji H na wartości przepustowości osiągnane przez stacje S1 i S2.



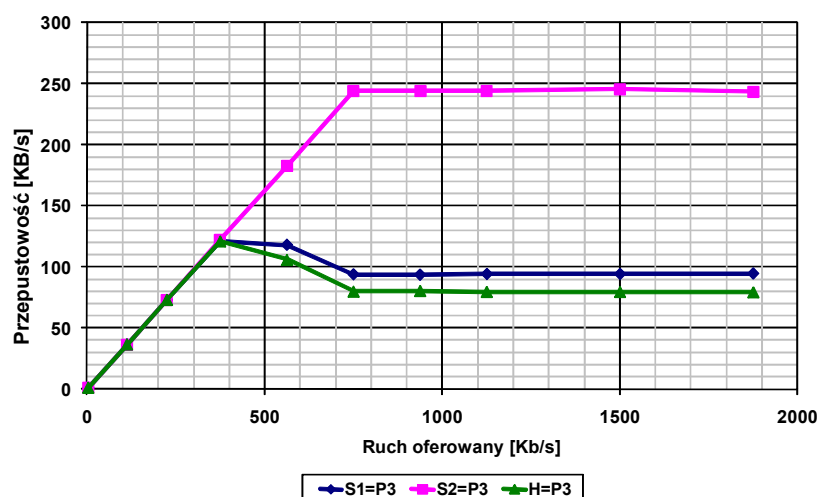
Rys. 9. Konfiguracja 1: przepustowość



Rys. 10. Konfiguracja 2: przepustowość



Rys. 11. Konfiguracja 3: przepustowość



Rys. 12. Konfiguracja 4: przepustowość

4.2. Przypadek 2: sieć czterowęzłowa

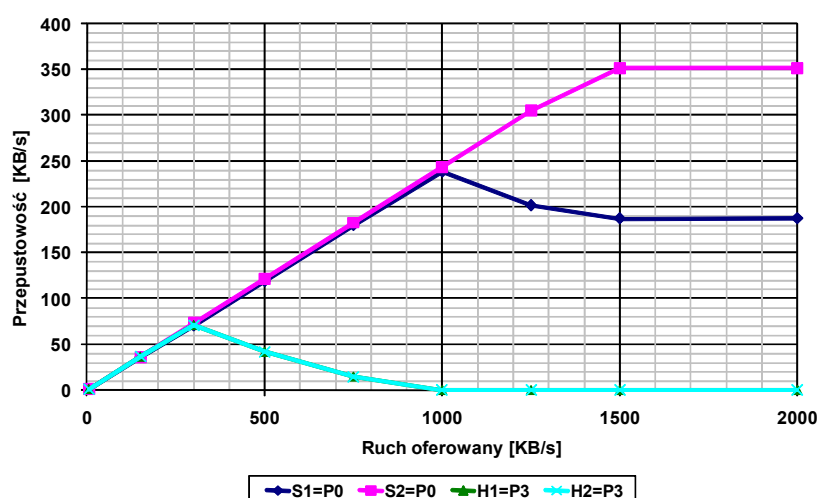
Dla sieci czterowęzłowej zbadano wpływ obecności stacji ukrytych H1 i H2 na jakość transmisji między stacjami S1 i S2 (rys 1b). W tabeli 4 przedstawiono sposób przyznawania priorytetów w każdej z trzech przebadanych konfiguracji.

Na rysunkach 13-15 przedstawiono wyniki symulacji dla wyłączzonego mechanizmu *four-way handshake*.

Zamieszczono jedynie wykresy przepustowości poszczególnych stacji, ponieważ liczba straconych ramek, podobnie jak dla pozostałych konfiguracji, jest proporcjonalna do uzyskiwanych wartości przepustowości. Dla konfiguracji pierwszej, w porównaniu z siecią trójwęzłową (rys. 5), rośnie przewaga stacji S2 nad stacją S1 ze 100 KB/s do ok. 160 KB/s. Oznacza to, że stacja S2 jest w stanie przesłać praktycznie dwa razy więcej danych do stacji S1 niż stacja S1 do stacji S2.

Tabela 4
Badane konfiguracje

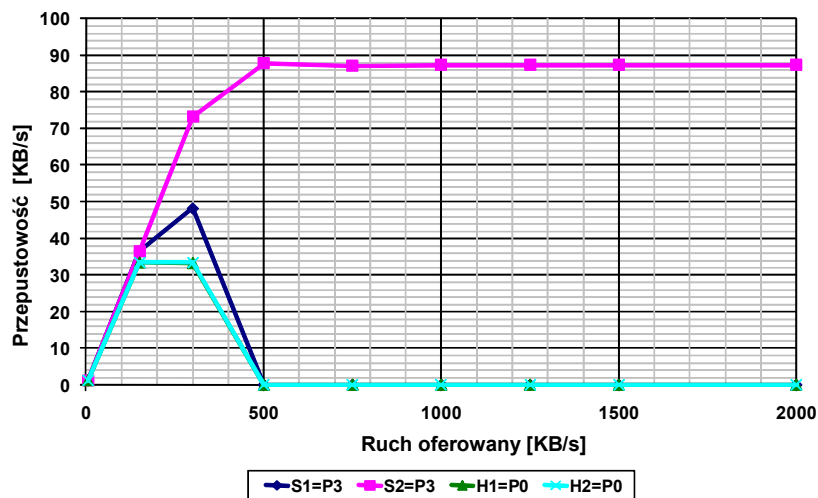
Transmisja	Priorytet		
	Konfiguracja 1	Konfiguracja 2	Konfiguracja 2
S1 ↔ S2	P0	P3	P0
H1 → S1	P3	P0	P0
H2 → S1	P3	P0	P3



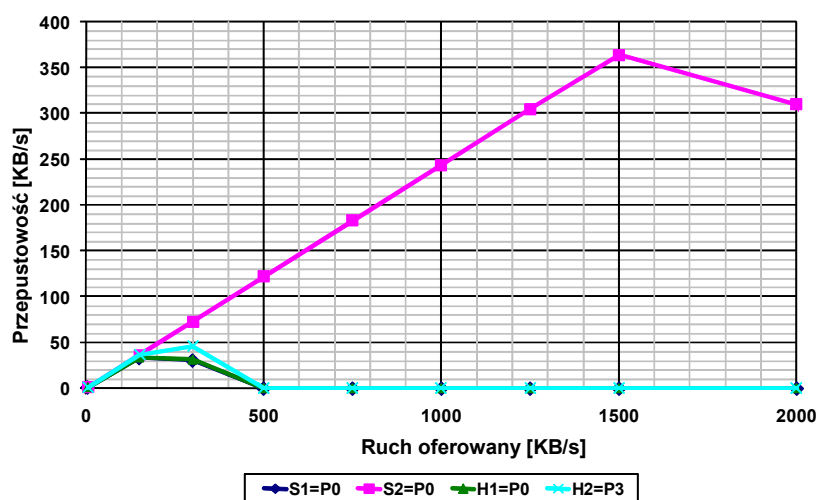
Rys. 13. Konfiguracja 1: przepustowość

Dla konfiguracji drugiej, stacja S2, pomimo że transmituje dane o niskim priorytecie (P3), przejmuje cały kanał radiowy. Przepustowość pozostałych stacji

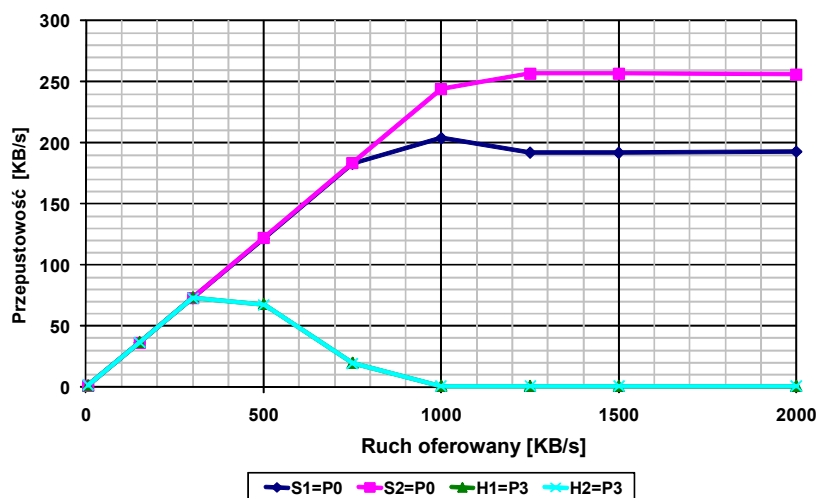
(w tym S1) dla ruchu oferowanego większego od 500 KB/s maleje praktycznie do zera. Jest to sytuacja gorsza niż w przypadku sieci trójwęzłowej, dla



Rys. 14. Konfiguracja 2: przepustowość



Rys. 15. Konfiguracja 3: (a) przepustowość (b) straty ramek.



Rys. 16. Konfiguracja 1: przepustowość

której przepustowość stacji S1 nie spadała do zera. Przyczyną takiego zachowania sieci jest to, że stacje H1 i H2 wysyłają ruch z wysokimi priorytetami. Podobnie jak w przypadku z rysunku 7, powoduje to, że między ramkami stacji H1, H2 i S1, które są ukryte względem siebie, dochodzi do nieustannych kolizji. Na skutek tego, w przypadku nasycenia sieci, stacja S1 nie jest w stanie wysłać żadnych danych do stacji S2.

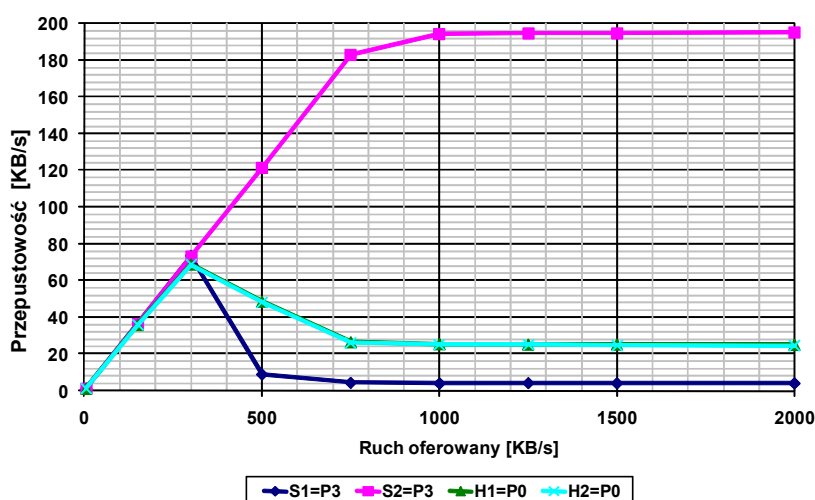
Dla konfiguracji 3, podobnie jak dla 2 (rys. 14), stacja S2 przejmuje cały kanał radiowy. Przepustowości stacji S1, H1 i H2 spadają do zera. Zachowanie to wynika z faktu, że ukryte względem siebie stacje S1 i H1 transmitują dane z najwyższym priorytetem.

Na rysunkach 16-18 przedstawiono zmiany przepustowości stacji w sieci czterowzłowej w funkcji ruchu oferowanego dla włączonego mechanizmu *four-way handshake*.

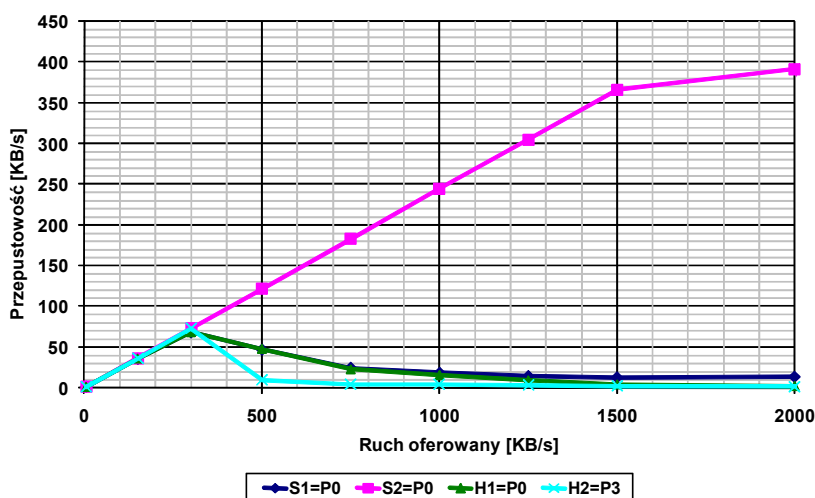
Dla konfiguracji 1 przepustowość stacji S2 jest w dalszym ciągu większa niż S1, jednak w porównaniu z siecią z wyłączonym mechanizmem *four-way handshake* nie jest aż tak znaczna. Włączenie mechanizmu *four-way handshake* powoduje spadek całkowitej przepustowości sieci o ok. 100 KB/s.

W przypadku konfiguracji 2 i włączonego mechanizmu *four-way handshake* zauważalna jest niewielka poprawa przepustowości. Niezmiennie jednak widoczna jest znaczna przewaga przepustowości stacji S2 nad S1. Ponadto, co wydaje się być ważne, stacje H1 i H2, pomimo wysokiego priorytetu transmitowanych przez nie danych, uzyskują niższą przepustowość niż stacja S2, która wysła ramki z priorytetem P3. Można zatem mówić o odwróceniu priorytetów zaproponowanych w standardzie IEEE 802.11e. Przepustowość stacji S1 nie zmienia się w sposób istotny, jakkolwiek całkowita przepustowość sieci jest większa o ok. 130 KB/s niż dla konfiguracji 2 z wyłączonym mechanizmem *four-way handshake*.

Dla konfiguracji 3, podobnie jak przy wyłączonym mechanizmie *four-way handshake*, stacja S2 przejmuje praktycznie wszystkie zasoby radiowe. Przepustowości stacji S1, H1 i H2 redukują się do zera, a całkowita przepustowość sieci jest nieznacznie większa (o ok. 50 KB/s) niż w przypadku wyłączonego mechanizmu *four-way handshake*.



Rys. 17. Konfiguracja 2: przepustowość



Rys. 18. Konfiguracja 3: przepustowość

5. Wnioski

Artykuł przedstawia wyniki analizy symulacyjnej sieci ad-hoc standardu IEEE 802.11e w aspekcie występowania w nich stacji ukrytych. Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań są następujące. Po pierwsze, w każdej z badanych konfiguracji priorytetów (tab. 3 i 4) liczba straconych ramek jest proporcjonalna do osiąganych wartości przepustowości. Dodatkowo, standard IEEE 802.11e nie jest w stanie zagwarantować pożądanej jakości obsługi (QoS), w przypadku gdy w sieci pojawiają się stacje ukryte. W każdej z badanych konfiguracji występują dysproporcje między przepustowościami stacji S1 i S2, niezależnie od przyznanego im priorytetu. W przypadku, gdy choć jedna stacja ukryta względem S1 wysyła dane z wysokim priorytetem (P0), to dochodzi do znaczącego spadku, a niekiedy nawet wyzerowania przepustowości stacji S1. Największe dysproporcje w poziomie przepustowości osiąganych przez stacje S1 i S2 pojawiają się, gdy nadają one dane z priorytetem P0 i przynajmniej jedna stacja ukryta H wysyła dane z priorytetem P0. Ponadto, w większości przebadanych w artykule przypadków, włączenie mechanizmu *four-way handshake* obniżało wartość całkowitej przepustowości sieci. Jedynie w sytuacji, gdy stacje S1 i S2 transmitowały dane z priorytetem P3, a H1 i H2 z priorytetem P0, włączenie mechanizmu *four-way handshake* spowodowało nieznaczłą poprawę działania sieci.

Literatura

- [1] IEEE 802.11e: *Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*. Nowy Jork, IEEE Inc., listopad 2005
- [2] IEEE 802.11b: *Higher-speed PHY extension in the 2.4 GHz band*. 1999
- [3] TKN EDCA 802.11e: http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2
- [4] Zhai H., Wang J., Chen X., Fang Y.: *Medium Access Control in Mobile Ad Hoc Networks: Challenges and Solutions*. Wireless Communications and Mobile Computing, str. 151-170, marzec 2006
- [5] Sobrinho J.L. i inni: *Why RTS-CTS is not your ideal wireless LAN multiple access protocol*. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2005, str. 81-87, marzec 2005
- [6] Tinnirello I. i inni: *Revisit of RTS/CTS Exchange in High-Speed IEEE 802.11 Networks*. Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2005, str. 240-248, czerwiec 2005
- [7] Natkaniec M., Pach A.R.: *Performance Analysis of IEEE 802.11 Networks in the Presence of Hidden Stations*. IFIP PWC'2000 Personal Wireless Communications 2000, str. 157-168, sierpień 2000
- [8] Kosek K., Natkaniec M., Pach A.R., Vollero L.: *An Analysis of Star Topology IEEE 802.11e Networks in the Presence of Hidden Nodes*. ICOIN 2008, styczeń 2008

- [9] Kosek K., Natkaniec M., Pach A.R., Vollero L.: *Performance Analysis of 802.11e Networks with Hidden Nodes in a Star Topology*. CCNC 2008, styczeń 2008



Katarzyna Kosek-Szott ukończyła studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w roku 2006. Obecnie jest w trakcie studiów doktoranckich w Katedrze Telekomunikacji AGH. Jej zainteresowania koncentrują się przede wszystkim na problemach dotyczących sieci bezprzewodowych. W szczególności obejmują zagadnienia związane z bezprzewodowymi sieciami lokalnymi (w tym sieciami ad-hoc)

oraz z zapewnieniem odpowiedniej jakości usług w tych sieciach. Realizuje bądź realizowała następujące projekty europejskie: DAIDALOS II, CONTENT, CARMEN, MEDUSA, jak również granty Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Jest autorką lub współautorką ponad 20 artykułów naukowych oraz rozdziału książki.



Marek Natkaniec otrzymał tytuł magistra inżyniera oraz doktora telekomunikacji na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w latach 1997 i 2002. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej. Jego zainteresowania obejmują: lokalne sieci bezprzewodowe, projektowanie protokołów komunikacyjnych, zagadnienia QoS, usługi multimedialne, modelowanie oraz analiza wydajności pracy sieci

teleinformatycznych. Pracuje aktywnie w projektach europejskich. Uczestniczy również w realizacji projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Marek Natkaniec jest współautorem czterech książek oraz ponad sześćdziesięciu publikacji.



Andrzej Ryszard Pach ukończył Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH w roku 1975, w r. 1977 doktoryzował się na AGH, a w roku 1990 uzyskał stopień doktora habilitowanego na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Zatrudniony jest obecnie na stanowisku profesora zwyczajnego w Katedrze Telekomunikacji AGH, w której pełni funkcję kierownika. Wcześniej był prodziekanem Wydziału EAiE.

Główne zainteresowania naukowe związane są z sieciami telekomunikacyjnymi oraz systemami informacyjnymi. Autor ponad stu publikacji naukowych z zakresu protokołów komunikacyjnych, modelowania i analizy sieci komputerowych, sieci szerokopasmowych z integracją usług. Aktywnie uczestniczy w projektach europejskich IST, ACTS, COST i COPERNICUS. Członek komitetów programowych konferencji międzynarodowych. Konsultant firm państwowych i prywatnych w zakresie nowoczesnej telekomunikacji.

Współzałożyciel i wiceprezydent Fundacji Postępu Telekomunikacji, przewodniczący IEEE Communications Society Chapter.