

WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

KATEDRA TELEKOMUNIKACJI

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Optymalizacja okna rywalizacji w sieciach standardu IEEE 802.11

Contention Window Optimization in IEEE 802.11 Networks

Autor: Klaudia Gądek

Kierunek studiów: *Teleinformatyka*

Opiekun pracy: dr hab. inż. Katarzyna Kosek-Szott

Kraków, 2017

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631   
z późn. zm.): „ Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Klaudia Gądek

# Wstęp

## Cel pracy

Celem pracy jest zbadanie i porównanie istniejących mechanizmów optymalizacji okna rywalizacji zaproponowanych dla sieci standardu IEEE 802.11.

W pracy zostanie udowodnione, że jest możliwa poprawa doboru okna rywalizacji w stosunku do mechanizmu *backoff*, poprawiając znacznie wydajność sieci gęstych. Przedstawione zostanie porównanie przepustowości, opóźnień oraz liczby utraconych pakietów na podstawie symulacji przy użyciu symulatora ns-3.

## Układ pracy

Praca składa się z 5 rozdziałów. W drugim rozdziale przedstawiono powód napisania pracy oraz obecny stan wiedzy na temat możliwości poprawy wydajności sieci bezprzewodowych.

W trzecim rozdziale omówiono część teoretyczną pracy dotyczącą standardu 802.11, jej protokoły warstwy MAC i fizycznej oraz przybliżono informacje na temat testowanych standardów.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono wyniki pomiarów oraz propozycje zmiany standardu. Porównano też wyniki badań z wynikami teoretycznymi i symulacyjnymi profesora Giuseppe Bianchego.

# Powiązane prace

Problem wydajności sieci bezprzewodowych jest istotny ze względu na coraz bardziej wymagające aplikacje. Pomimo kilku propozycji zmian, nowe pomysły nie zostają wdrażane, a okno rywalizacji dalej ma wartość stałą w zależności od standardu.

Jednym z przykładów optymalizacji jest wykorzystanie powolnego okna optymalizacji. Zakłada ona, że po poprawnej transmisji poziom rywalizacji zaczyna spadać. Wtedy wartość *Contention Window* jest zmniejszana do minimum. Jeśli transmisje są poprawne wartość jest podtrzymywana. Niestety jest to tylko model analityczny, nie przetestowany nawet symulacyjnie[3].

Ciekawym rozwiązaniem jest też mechanizm Adaptive Contention Window Backoff (ACWB), który dostosowuje rozmiar okna optymalizacji w zależności od długości czasu bezczynności punktu dostępowego. Szacuje on liczbę stacji i na odstawie dostępności medium ustala CW. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że może to być bardziej efektywny sposób wyznaczania tego parametru[2].

## Rozdzielona funkcja koordynacji profesora Giuseppe Bianchi’ego

Kolejnym przykładem optymalizacji jest wykorzystanie rozdzielonej funkcji koordynacji opisanej przez Giuseppe Bianchi’ego[1]. Pozwala ona efektywnie wyznaczać wartość szerokości okna optymalizacji w zależności od liczby stacji i czasu trwania kolizji.

Wopt – wartość okna optymalizacji

N – liczba stacji

Tc\*- czas trwania kolizji w jednym slocie czasowym

Równanie zostało obliczone na postawie modelu łańcuchów Markowa. Bianchi oblicza prawdopodobieństwa transmisji w podanych slocie czasowym oraz pozwiązuje to prawdopodobieństwo z wielkością okna optymalizacyjnego.

τ(prop) – prawdopodobieństwo, że stacja transmituje

W - wartość okna optymalizacji

Niestety model został przetestowany tylko dla skończonej liczby stacji, niskich przepustowości, idealnych warunków i założeniu, że nie istnieją w sieci ukryte terminale. Obecnie coraz więcej prac jest tworzonych na podstawie funkcji wyprowadzonych przez profesora i udoskonalających jego mechanizm.

# Przegląd wybranych standardów 802.11

W odróżnieniu od sieci przewodowych, które zakładają, że adres jest równoznaczny z jego fizyczną lokalizacją, rodzina standardów 802.11 uznaje stacje jako jednostkę adresową. Stacja oznacza tutaj miejsce docelowe wiadomości, czyli klientów[4]. Klienci są podpięci do węzłów agregujących i przekierowujących, nazywanych punktami dostępowymi (*access point*). Grupę klientów bezprzewodowych podłączonych do jednego punktu dostępowego nazywamy podstawowym zestawem usługowym (*basic service set*).

*IEEE 802.11 Working Group* stworzyła grupę standardów dla sieci WLAN. Pierwszy standard został utworzony w 1997 roku i nosił nazwę 802.11. Głównym powodem wycofania go z produkcji było zbyt wolne pasmo (1 i 2 Mb/s). Określa on protokoły dla podwarstwy MAC (medium access control) oraz dla warstwy fizycznej[7].

## Warstwy fizyczne w standardu 802.11

Warstwa fizyczna jest podzielona na dwie podwarstwy PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) i PMD (Physical Medium Dependent). PMD jest zależna od medium jej główne zadania to: nadawanie i odbiór danych. PLCP odwzorowuje jednostki danych MPDU warstwy MAC do warstwy PMD bez względu na warstwę fizyczną.

Główne zadania warstwy fizycznej:

* zapewnia bezprzewodowy mechanizm transmisji
* ocenia stan medium i raportuje go do warstwy MAC
* zapewnia niezależność warstwy MAC i fizycznej

Początkowo standard zdefiniował trzy protokoły warstwy fizycznej:

* DSSS  (Direct Sequence Spread Spectrum),
* FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum),
* IR (Infra Red)[10]

Standard 802.11a wprowadził dodatkowo modulację OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

### Direct Sequence Spread Spectrum

Energia w pojedynczym nośniku jest rozdzielana pomiędzy szersze widmo przez mnożenie bitów ze specjalnym 11-bitowym wzorem (kluczem Barkleya). Słowo Barkera ma dwufazowe wartości +1 i -1[9].

Zadania warstwy fizycznej systemu DSSS:

* Mapowanie MPDU na format ramki odpowiedni do odbierania i wysyłania danych użytkownika i zarządzania informacjami pomiędzy stacjami
* Definiuje charakterystykę i metodę transmisji i odbioru danych przez bezprzewodowe medium pomiędzy stacjami korzystającymi z systemu DSSS[11]

### Orthogonal Frequency Division Modulation

OFDM (ortogonalne zwielokrotnienie w dziedzinie częstotliwości) używa wielu nośników, na każde 312,5kHz przypada ich 52. Są modulowany przy użyciu binarnego, kwadraturowego modulowania fazy lub kwadraturowej modulacji amplitudowo-fazowej (16-QAM lub 64-QAM). Dane są wysyłana na 48 nośnikach jednocześnie, a pozostałe są używane jako sygnały referencyjne. Czas transmisji każdego bitu wzrasta wraz z liczbą nośników, dzięki czemu system jest mniej narażony na interferencje. Interferencje międzysymbolowe są eliminowane przez wprowadzenie „*guard time*”, czyli odstępu pomiędzy każdym symbolem OFDM[9].

Zadania warstwy fizycznej systemu QFDM:

* Mapowanie PSDU na format ramki odpowiedni do odbierania i wysyłania danych użytkownika i zarządzania informacjami pomiędzy stacjami
* Definiuje charakterystykę i metodę transmisji i odbioru danych przez bezprzewodowe medium pomiędzy stacjami korzystającymi z systemu OFDM[11]

## Podstawowe protokoły IEEE 802.11 MAC

Protokoły MAC definiują między innymi:

* kiedy nadawać i odbierać ramki
* zapewniają kontrolę błędów
* określają format ramek

Podstawę IEEE 802.11 MAC są funkcje logiczne nazywane funkcjami koordynacyjnymi, które określają kiedy stacja znajdująca się w strukturze BSS może transmitować i kiedy jest w stanie odbierać dane przez kanał radiowy[7].

Odnosząc się do podstawowego standardu sieci bezprzewodowe transmitują dane w dwóch trybach:

* PCF (Point Coordination Function)
* DCF (Distributed Coordination Function)

Tryb PCF jest stosowany najczęściej do transmisji danych które zależą od opóźnienia i utraty pakietów oraz gdy mamy jednoznacznie określony komputer kliencki.

### Distributed Coordination Function

Bezprzewodowe sieci lokalne wykorzystują tryb DCF oraz protokół CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). Został zaprojektowany by realizować usługi typu *best-effort*. Transmisja używa kolejkowania FIFO.

Przed transmisją sprawdzamy dostępność medium. Zawsze przed transmisją stacja nasłuchuje czy medium jest dostępne, jeśli tak to transmisja może być wykonana. Dodatkowo stacja musi się upewnić, że meduium jest uśpione na pewien określony czas. Jeśli medium jest zajęte, warstwa MAC czeka, aż kanał przejdzie do stanu uśpienia. Następnie wyłącza się na dodatkowy przedział czasowy DIFS (*DCF interframe space*). Jeśli kanał pozostanie nadal w stanie bezczynności to MAC rozpocznie procedurę *back-off*[7].Procedura *back-off*  jest też wykonywana po transmisji.

#### Procedura back-off

Procedura back-off polega na wybieraniu losowej liczbę z przedziału określonego przez licznik *back-off*. Dla każdego slotu czasowego sprawdzany jest stan medium, jeśli przez cały slot pozostanie wolny licznik jest zmniejszany o jeden. Kiedy licznik osiągnie wartość zerową ramka jest transmitowana. Jeśli okaże się, że ramka nie jest jedyną w kolejce to zamiast natychmiastowej transmisji ponawiana jest procedura *back-off*. Jeśli kanał jest pozostaje zajęty podczas wykonywania procedury back-off to zostaje ona zawieszona, aż zostanie zwolniony. Wtedy czeka dodatkowy przedział DIFS i ponawia procedurę od ostatniego stanu licznika[7].

#### Okno optymalizacji

Protokół DCF jest protokołem CSMA, ponieważ nośnik jest zawsze sprawdzany przed transmisją. Jest też protokołem CA (Colision Avoidance), ponieważ ramka jest transmitowana po upływie dowolnego czasu (procedura *back-off*). Jednak nigdy nie możemy być całkowicie pewni, że kolizja nie nastąpi. W dużej mierze zależy ona od wybranej wartości CW oraz liczby stacji podłączonych do punktu dostępowego[7].

Każda stacja posiada okno rywalizacji (Contension Window size; CW), które jest potrzebne do wybrania licznika *back-off*. Jest to pseudolosowa liczba z zakresu od 0 do CW.

Okno rywalizacji przyjmuje wartości z zakresu od CWMIN do CWMAX. Wartość CWMAX jest stała dla wszystkich standardów i wynosi 1023 natomiast CWMIN dla standardu 802.11b wynosi 31, natomiast dla reszty standardów 15.

Początkowo CW przyjmuje wartość CWMIN i zwiększana jeśli transmisja jest nieudana. Wartość okna optymalizacji jest zwiększana zgodnie ze wzorem (z górnym ograniczeniem CWMAX):

Wartości te są resetowane do minimum po każdej poprawnej transmisji.

### Point Coordination Function

Mechanizm PCF jest mechanizmem przestarzałym. Jest to opcjonalna metoda dostępowa w standardach 802.11. Wymaga koordynatora, który przydzieli prawo do transmisji. Koordynator musi cyklicznie odpytywać punkt dostępowy i stacje. Może też wymagać dodatkowej funkcji koordynującej do tego.

## Standard 802.11b

Jest rozwinięciem pierwszej wersji standardu, która przyjęła się dużo lepiej na rynku i do dzisiaj wiele sieci funkcjonuje w tym standardzie. Aby uzyskać większe przepustowości zastosowano kodowanie CCK (kluczowanie kodem komplementarnym). Standard stosuje, także kodowanie BPSK oraz QPSK .

Ten standard wprowadził, także podział pakietu na trzy segmenty: preambułę (do detekcji sygnału i synchronizacji), nagłówek (zawierający szybkość transmisji i długość pakietu) oraz payload.

Sieci w tym standardzie wykorzystują pasmo 2,4GHz. Posiadają też dwie nowe prędkości 5,5Mb/s i 11Mb/s[6]. W praktyce standard ten oferuje przepustowości rzędu 6Mb/s –jest to związane z działaniem protokołu. Pierwsze urządzenia wspierające standard 802.11b powstały w 1999 roku.

## Standard 802.11a

Został ratyfikowany wtedy gdy na rynku wprowadzano pierwsze urządzenia standardu 802.11b. Niestety z powodu ograniczeń technologicznych związanych z produkcją urządzeń działających w paśmie 5GHz nie był on zbyt popularny[6]. Pomimo dużego poboru mocy był wykorzystywany przez dostawców i firmy korporacyjne.

Oferuje przepustowości od 6 do 54Mb/s (realnie rzędu 20Mb/s). Zastosowano w nim modulację OFDM.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tryb** | **Modulacja i sprawność kodowania** | **Szybkość danych [Mbps]** |
|
|
| **1** | BPSK 1/2 | 6 |
| **2** | BPSK 3/4 | 9 |
| **3** | QPSK | 12 |
| **4** | QPSK | 18 |
| **5** | 16-QAM 1/2 | 24 |
| **6** | 16-QAM 3/4 | 36 |
| **7** | 64-QAM 2/3 | 48 |
| **8** | 64-QAM 3/4 | 54 |

Tabela . Tabela modulacji i kodowania dla jednego strumienia danych standard 802.11a

## Standard 802.11n

W standardzie 802.11n wprowadzono technikę MIMO (Multiple Input Multiple Output), która zapewnia lepszą wydajność, dostępność i przewidywalność sieci. Dzięki temu istnieje możliwość uzyskania transmisji 600Mb/s. Dodatkowo można tak skonfigurować kanał radiowy aby posiadał szerokość 40MHz. Sieci w tym standardzie mogą pracować w paśmie 5GHz oraz 2,4GHz[6].

Wprowadzono także nowe pole o nazwie *HT control* widocznej na rysunku 3.1.Może zawierać informacje o modulacji i kodowaniu (MCS) żądane przez nadajnik.

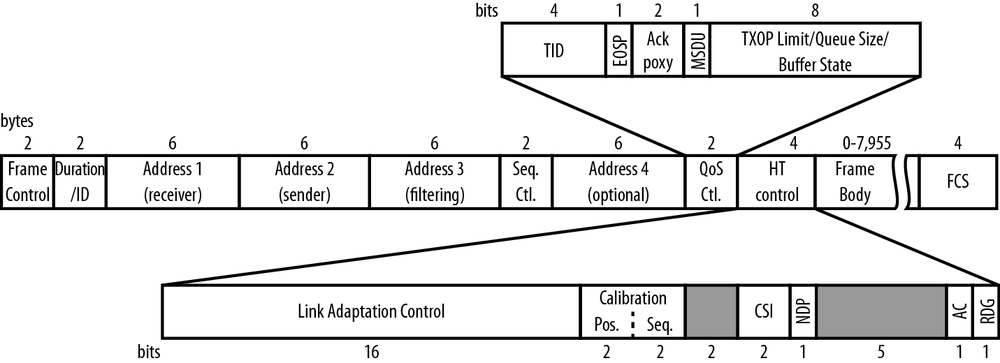


Tabela . Nowy format ramki MAC[8]

W tabelce 3.3.1 przedstawiono tabelę modulacji i kodowania dla jednego strumienia danych.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Indeks MCS** | **Modulacja i sprawność kodowania** | **Szybkość danych warstwy fizycznej [Mb/s] Kanał 20 MHz** | | **Szybkość danych warstwy fizycznej [Mb/s]** **Kanał 40 MHz** | |
|
| **GI = 800 ns** | **GI = 400 ns** | **GI = 800 ns** | **GI = 400 ns** |
| **0** | BPSK 1/2 | 6,5 | 7,2 | 13,5 | 15 |
| **1** | QPSK 1/2 | 13 | 14,4 | 27 | 30 |
| **2** | QPSK 3/4 | 19,5 | 21,7 | 40,5 | 45 |
| **3** | 16-QAM 1/2 | 26 | 28,9 | 54 | 60 |
| **4** | 16-QAM 3/4 | 39 | 43,3 | 81 | 90 |
| **5** | 64-QAM 2/3 | 52 | 57,8 | 108 | 120 |
| **6** | 64-QAM 3/4 | 58,5 | 65 | 121,5 | 135 |
| **7** | 64-QAM 5/6 | 65 | 72,2 | 135 | 150 |

Tabela 3.5.2 Tabela modulacji i kodowania dla jednego strumienia danych standard 802.11n

Dodano także dwa schematy agregacji wyższy i niższy MAC. Niższy zajmuje się interakcją z warstwą fizyczną a wyższy integracją warstwy LLC.

## Standard 802.11ac

Standard 802.11ac pozwala osiągnąć bardzo wysoki przepustowości (VHT) nawet do 6,933Gb/s. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu kwadraturowej modulacji amplitudy 256-QAM, dokładnemu sterowaniu wiązki, rozszerzonemu MIMO (multi-user MIMO) i szerokiemu pasmu. Pracuje na paśmie 5GHz. Dla pojedynczej transmisji zapewnia przepustowość co najmniej 600Mb/s, natomiast dla wielu stacji przepustowości do 1Gb/s.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Indeks MCS** | **Modulacja i sprawność kodowania** | **Szybkość danych warstwy fizycznej [Mb/s] Kanał 20 MHz** | | **Szybkość danych warstwy fizycznej [Mb/s] Kanał 40 MHz** | | **Szybkość danych warstwy fizycznej [Mb/s] Kanał 80 MHz** | | **Szybkość danych warstwy fizycznej [Mb/s] Kanał 160 MHz** | |
|
| **GI = 800 ns** | **GI = 400 ns** | **GI = 800 ns** | **GI = 400 ns** | **GI = 800 ns** | **GI = 400 ns** | **GI = 800 ns** | **GI = 400 ns** |
| 0 | BPSK 1/2 | 6,5 | 7,2 | 13,5 | 15 | 29,3 | 32,5 | 58,5 | 65 |
| 1 | QPSK 1/2 | 13 | 14,4 | 27 | 30 | 58,5 | 65 | 117 | 130 |
| 2 | QPSK 3/4 | 19,5 | 21,7 | 40,5 | 45 | 87,8 | 97,5 | 175,5 | 195 |
| 3 | 16-QAM 1/2 | 26 | 28,9 | 54 | 60 | 117 | 130 | 234 | 260 |
| 4 | 16-QAM 3/4 | 39 | 43,3 | 81 | 90 | 175,5 | 195 | 351 | 390 |
| 5 | 64-QAM 2/3 | 52 | 57,8 | 108 | 120 | 234 | 260 | 468 | 520 |
| 6 | 64-QAM 3/4 | 58,5 | 65 | 121,5 | 135 | 263,3 | 292,5 | 526,5 | 585 |
| 7 | 64-QAM 5/6 | 65 | 72,2 | 135 | 150 | 292,5 | 325 | 585 | 650 |
| 8 | 256-QAM 3/4 | 78 | 86,7 | 162 | 180 | 351 | 390 | 702 | 780 |
| 9 | 256-QAM 5/6 | N/A | N/A | 180 | 200 | 390 | 433,3 | 780 | 866,7 |

Tabela .Tabela modulacji i kodowania dla jednego strumienia danych standard 802.11ac

# Analiza uzyskanych wyników

Pomiary zostały wykonane przy pomocy symulatora ns-3 (wersja 3.26), natomiast do obliczeń wykorzystano klaster obliczeniowy Zeus. Podczas pomiarów zbierano statystyki na temat przepustowości, opóźnień i liczby utraconych pakietów. Najpierw przeprowadzono pomiary dla ustawień standardowych, a następnie wartości maksymalne i minimalne okna optymalizacji zmieniano tak aby były równe i przybierały wartości od 1 do 1000. Przetestowano sieci składające się z 10 i 50 stacjami, rozrzuconych w odległości 3 metrów od punktów dostępowych.

## **Porównanie wyników dla standardu 802.11b**

Pierwsze pomiary wykonałam dla standardu 802.11b. Dla prędkości 1Mb/s wyniki są dość niejednoznaczne. Dla sieci z 10 punktami dostępowymi większą przepustowość gwarantuje podejście zgodne ze standardem. Natomiast dla większej liczby stacji statyczne ustawienie wartości CW gwarantuje większą przepustowość. Wyniki są widoczne na wykresie 4.1.1. Wstawienie okna optymalizacji na wartość 7 dla 50 stacji zwiększa przepustowość o około 0,051Mb/s, przy zapewnieniu mniejszej straty pakietów i zmniejszeniu opóźnienia.

Wykres . Wykres wydajności sieci 802.11b 1Mb/s

Dla dwa razy większej przepustowości wyniki wyglądają podobnie. Tylko dla 50 węzłów można uzyskać większą przepustowość kosztem opóźnienia i większej liczby utraconych pakietów. W porównaniu do poprzedniej przepustowości wyniki dla sieci z 50 potrafią się różnić nawet o 0,2Mb jak widać na wykresie 4.1.2.

Wykres . Wykres wydajności sieci 802.11b 2Mb/s

Ustawienie stałego parametru CW bez względu na liczbę stacji zapewniło poprawę przepustowości dla wyższych przepustowości. Dla 10 punktów dostępowych najefektywniej jest ustawić wartość CW na 79, a dla 50 węzłów 283. Na wykresie 4.1.3 przepustowości nie zmieniają się tak skokowo. Wartość opóźnienia pakietów wzrosła, tak samo jak procentowa liczba utraconych pakietów.

Wykres . Wykres wydajności sieci 802.11b 5,5Mb/s

Dla najwyższej przepustowości dostępnej w tym standardzie wyniki wyglądają podobnie co widać porównując wykresy 4.1.3 i 4.1.4. Ustawienie parametru okna optymalizacji może zapewnić poprawę przepustowości nawet o 0,5Mb/s.

Wykres . Wykres wydajności sieci 802.11b 11Mb/s

Podsumowując wyniki dla standardu 802.11b ustawienie stałej wartości CW powoduje zwiększenie opóźnienia i liczby utraconych pakietów. Jeśli chodzi o przepustowość to dla niewielkiej liczby stacji i małych przepustowości nie ma sensu zmieniać standardu. Natomiast dla większej liczby punktów dostępowych nowe podejście pozwala efektywnie zwiększyć sumaryczną przepustowość.

## **Porównanie wyników dla standardu 802.11a**

## **Porównanie wyników dla standardu 802.11n**

## **Porównanie wyników dla standardu 802.11ac**

# **Porównanie wyników badań z wynikami profesora** Bianchiego

# Podsumowanie

# Bibliografia

[1] Giuseppe Bianchi, Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 18, NO. 3, MARCH 2000

[2] Adaptive Contention Window Tuning for IEEE 802.11; Xin Zhou, Changwen Zheng, Xiaoxin He; 22nd International Conference on Telecommunications (ICT 2015)

[3] Qiang Ni, lmad Aad, Chadi Barakat and Thierry Turletti, Modeling and Analysis of Slow CW Decrease for IEEE 802.1 1 WLAN, The 14th IEEE 2003 International Symposium on Persona1, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings

[4] IEEE Std 802.11™-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007), 3 Park Avenue

New York, NY 10016-5997 USA, 29 March 2012

[5] Minj Purevdagva, Dashdorj Yamkhint,Transport Layer Evaluation over 802.11 b Wireless Network, Ulaanbaatar, Mongolia

[6] Kuczyński K., Suszyński W.: „Bezprzewodowe sieci lokalne”. Lublin, 2012. ISBN 978-83-62773-37-4

[7] Byeong Gi Lee, Sunghyun Choi, [Broadband Wireless Access and Local Networks—Mobile WiMAX and WiFi](http://viewer.books24x7.com/assetviewer.aspx?bookid=27205&chunkid=1), BOSTON, 2008 ARTECH HOUSE

[8] https://www.safaribooksonline.com/library/view/80211n-a-survival/9781449335472/ch05.html, Ostatni odwiedzano 2017.04.13

[9] Anand R. Prasad, Neeli R. Prasad, [802.11 WLANs and IP Networking—Security, QoS, and Mobility](http://viewer.books24x7.com/assetviewer.aspx?bookid=14801&chunkid=1), 2005, ARTECH HOUSE

[10] www.dipol.com.pl/warstwy\_fizyczne\_w\_standardzie\_ieee\_802\_11\_\_bib511.htm , Ostatni odwiedzano 2017.04.13

[11] IEEE, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; IEEE Std 802.11™-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)