



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromagnetického pole**

**Bezdrôtové siete pre veľmi hustú prevádzku**

**High-density wireless networks**

Diplomová práca

Studijní program: Komunikace, multimédiá a elektronika  
Studijní obor: Bezdrátové komunikace  
Vedoucí práce: Ing. Pavel Bezpalec, Ph.D.

**Bc. Veronika Marasová**

---

Praha 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Marasová** Jméno: **Veronika** Osobní číslo: **434531**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Bezdrátové komunikace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Bezdrátové síťe pro velmi hustý provoz**

Název diplomové práce anglicky:

**High Density Wireless Network**

Pokyny pro vypracování:

Podrobně analyzujte mechanismy pokrytí uzavřených prostor vysokorychlostní bezdrátovou technologií s přihlédnutím k velmi vysokému počtu komunikujících uživatelů jako jsou konference či přednášky. Zhodnoťte stávající metodiky návrhu a možnosti realizace. V simulačním systému NS-3 simulujte stávající postupy. Zaměřte se zejména na limitní stavy jednotlivých postupů s ohledem na např. dosahované přenosové rychlosti, množství komunikujících entit, objem pokrytého prostoru atp. Své zjištění diskutujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] 802.11-2012 IEEE Standard for Information technology -- 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 SA, 2012.  
[2] IEEE 802.11ac-2013 IEEE Standard for Information technology -- 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--Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. IEEE SA, 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Pavel Bezpalec Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

,

Datum zadání diplomové práce: **23.02.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2017**

~~Platnost zadání diplomové práce: 08.01.2018~~

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

19.12.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

## **ABSTRAKT**

Názov práce: *Bezdrôtové siete pre veľmi hustú prevádzku*

Kľúčové slová: *IEEE 802.11ac, WLAN, NS-3, priepustnosť, lokálna bezdrôtová sieť*

Predmetom tejto diplomovej práce je analýza mechanizmov pokrytia vnútorných priestorov bezdrôtovou technológiou postavenou na štandarde IEEE 802.11ac s prihliadnutím na veľmi vysoké počty komunikujúcich zariadení. Cieľom práce je na základe súčasných používaných návrhových metód simulovať vysokohustotnú bezdrôtovú sieť a zamerať sa na limitné stavy bezdrôtovej siete, čo sa týka počtu súčasne aktívnych klientov a dosahovaných priepustností. Model bezdrôtovej siete pre veľmi hustú prevádzku je implementovaný v simulátore NS-3.26. Simulované sú tri scenáre a ich výsledky sú následne spracovávané programom Matlab. Výsledky ukázali, že so zvyšujúcim sa počtom komunikujúcich zariadení dochádza k znižovaniu priepustnosti, ktorú sú schopní jednotlivé klientské stanice dosiahnuť.

## **ABSTRACT**

Title: *High-Density Wireless Networks*

Keywords: *IEEE 802.11ac, WLAN, NS-3, throughput, wireless local network*

The main topic of this diploma thesis is to analyze the mechanisms of indoor spaces coverage using wireless technology based on the IEEE 802.11ac standard with regard to high numbers of communicating devices. The goal of the thesis is to simulate the high-density wireless network based on the current design methods and to focus on the limits of the wireless network as far as the number of concurrent active client devices and achieved throughput are concerned. The model of the high-density wireless network is implemented in NS-3.26 simulator. There are three scenarios simulated in NS-3 and their results processed using Matlab. The results revealed that the more client devices communicate within the wireless network, the lower average throughput they can achieve.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracovala samostatne s použitím informačných zdrojov a literatúry uvedených v zozname zdrojov a v súlade s Metodickým pokynom o dodržovaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

Praha, 9.1. 2017

.....

Veronika Marasová

## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som sa chcela poďakovať vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Pavlovi Bezpalcovi, Ph.D. za prejavenu trpezlivosť pri vedení práce. Ďalej moje poďakovanie patrí priateľom, kolegom a rodine za veľkú podporu a za to, že to so mnou počas písania práce vydržali.

## OBSAH

Zoznam obrázkov .....	2
Zoznam tabuliek .....	2
Zoznam použitých skratiek .....	3
ÚVOD .....	5
1 LOKÁLNE BEZDRÔTOVÉ SIETE .....	6
1.1 Topológia.....	6
2 ŠTANDARD IEEE 802.11ac .....	8
2.1 Fyzická vrstva.....	8
2.1.1 Štruktúra kanálov 802.11ac.....	9
2.1.2 Ochranný interval.....	10
2.1.3 Beamforming .....	11
2.1.4 MIMO .....	11
2.1.4.1 MU-MIMO.....	12
2.1.5 Modulačné a kódové schémy štandardu 802.11ac.....	12
2.1.6 Rámce fyzickej vrstvy .....	13
2.2 Linková vrstva .....	14
2.2.1 Riadiace rámce.....	15
2.2.2 Kontrolné rámce .....	15
2.2.3 Dátové rámce .....	16
2.2.4 Agregovanie rámcov A-MPDU .....	16
2.3 Prístup k médiu .....	16
2.3.1 Distribuovaná koordinačná funkcia DCF .....	17
2.3.2 Dynamické alokovanie šírky pásma .....	18
3 BEZDRÔTOVÉ SIETE S VEĽMI HUSTOU PREVÁDZKOU.....	20
3.1 Priepustnosť bezdrôtových sietí.....	20
3.2 Plánovanie kanálového rozloženia .....	22
3.3 Počet a rozmiestnenie prístupových bodov .....	23
3.4 Efektívne využívanie vysielacieho času .....	24
3.5 Ukážkový príklad.....	25
4 SIMULÁTOR NS-3 .....	26
4.1 Štruktúra NS-3.....	26
4.2 Implementácia štandardu IEEE 802.11 v NS-3 .....	27
4.2.1 Model podvrstvy MAC .....	27
4.2.2 Model fyzickej vrstvy.....	28

5 SIMULAČNÉ SCENÁRE.....	30
6 VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ .....	33
6.1 Sila signálu v okolí prístupového bodu.....	33
6.2 Simulácia pre rôzne MCS .....	33
6.3 Simulácia pre rôzny počet aktívnych klientov .....	37
6.3 Simulácia dátovej prevádzky v rôznych smeroch.....	38
7 ZHRNUTIE.....	40
ZÁVER.....	42
Zoznam zdrojov .....	43
Zoznam príloh.....	45

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Komponenty lokálnej bezdrôtovej siete WLAN .....	6
Obr. 2 Základný súbor služieb BSS .....	7
Obr. 3 Rozšírený súbor služieb ESS.....	7
Obr. 4 Vzťah medzi modelom OSI a špecifikáciami 802.11.....	8
Obr. 5 Kanály pásiem U-NII-1 a U-NII- 2.....	9
Obr. 6 Kanály pásma U-NII-3 .....	9
Obr. 7 Štruktúra kanálov štandardov využívajúcich OFDM .....	10
Obr. 8 Formát PPDU 802.11ac .....	13
Obr. 9 MAC hlavička 802.11.....	15
Obr. 10 Agregácia rámca A-MPDU .....	16
Obr. 11 Proces prístupu k médiu pomocou DCF .....	17
Obr. 12 Prístup k médiu pomocou RTS/CTS .....	18
Obr. 13 Primárne a sekundárne kanály 802.11ac.....	19
Obr. 14 Príklad kanálového rozloženia v pásme 5 GHz .....	23
Obr. 15 Základný model siete v simulátore NS-3.....	26
Obr. 16 Architektúra modulu wifi v simulátore NS-3.....	27
Obr. 17 Topológia bezdrôtovej siete v programe NetAnim .....	30
Obr. 18 Úroveň prijatého signálu pre kanál 38.....	33
Obr. 19 Asociačné žiadosti a odpovede v programe Wireshark.....	34
Obr. 20 Priemerná priepustnosť na klienta pre MCS 3, 5 a 8 .....	34
Obr. 21 Agregovaná priepustnosť kanála pre MCS 3, 5 a 8 .....	35
Obr. 22 Počet klientov s daným percentom priepustnosti pre MCS 3, 5 a 8 .....	36
Obr. 23 Priemerná priepustnosť na klienta pre 50, 70 a 100% aktívnych klientov .....	37
Obr. 25 Priemerná priepustnosť na klienta pri rôznom smere dátovej prevádzky .....	38
Obr. 26 Agregovaná priepustnosť pri rôznom smere dátovej prevádzky.....	39

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Prehľad subnosných štandardu 802.11ac pre rôzne šírky kanála.....	10
Tab. 2 Modulačné a kódové schémy MCS 0 – MCS 9 štandardu 802.11ac.....	13
Tab. 3 Kategórie prístupu EDCA.....	18
Tab. 4 Možné zastúpenie aplikácií v bezdrôtovej sieti a požadovaná priepustnosť .....	20
Tab. 5 Výpočty pre ukážkový príklad.....	25
Tab. 6 Kanály použité v simuláciách .....	31
Tab. 7 Parametre simulácií.....	32
Tab. 8 Maximálne prenosové rýchlosti dané schémami MCS 3, 5 a 8.....	35



## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

A-MPDU	<i>Aggregate - MAC Protocol Data Unit</i>
AID	<i>Association ID</i>
ACI	<i>Adjacent Channel Interference</i>
AP	<i>Access Point</i>
BSA	<i>Basic Service Area</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BSSID	<i>Basic Service Set Identifier</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCI	<i>Co-Channel Interference</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
CW	<i>Contention Window</i>
DA	<i>Destination Address</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DS	<i>Distribution System</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i>
EDT	<i>Energy Detection Threshold</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
HT	<i>High Throughput</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFS	<i>Interframe Space</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MMPDU	<i>Management MAC Protocol Data Unit</i>
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i>

MU-MIMO	<i>Multi User - Multiple-Input Multiple-Output</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
NDP	<i>Null Data Packet</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PLCP	<i>Physical Layer Convergence Procedure</i>
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i>
PPDU	<i>PLCP Protocol Data Unit</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RA	<i>Receiver Address</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
SA	<i>Source Address</i>
SISO	<i>Single-Input Single-Output</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
STA	<i>Station</i>
TA	<i>Transmitter Address</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TxOP	<i>Transmit Opportunity</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
U-NII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
VHT	<i>Very High Throughput</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

## ÚVOD

Bezdrôtové siete a zariadenia, ktoré používame na prístup k nim sa stali súčasťou nášho každodenného života. Stále narastá počet užívateľov a rôznych aplikácií, ktoré existencia bezdrôtových sietí ponúka – od sociálnych sietí, cez rôzne aplikácie pre komunikáciu, až po streamovanie televízie. Naša moderná spoločnosť sa stáva stále závislejšou na všadeprítomných Wi-Fi technológiách a aplikáciách, ktoré podporujú.

V súčasnosti môžeme vidieť masívny prienik týchto technológií do podnikov (ako náhrada alebo rozšírenie pevných sietí), domácností, škôl a verejných priestorov (námestia, nákupné centrá, letiská a železničné stanice a i.). Bezdrôtové siete už nie sú len vymoženosť, ale čím ďalej tým viac sa stávajú bežným očakávaním koncových užívateľov.

Mohlo by sa zdať, že svet sa stal bezdrôtovým prakticky cez noc. Opak je však pravdou. Pôvod dátových bezdrôtových sietí možno hľadať na začiatku sedemdesiatych rokov. Odvtedy bolo definovaných viacero štandardov, aktuálnym v praxi nasadzovaným štandardom je 802.11ac.

Základné topológie bezdrôtových sietí sú uvedené v kapitole 1. Kapitola 2 sa zaoberá princípmi, na ktorých je postavený štandard 802.11ac.

Ako už bolo spomínané, počet užívateľov bezdrôtových sietí neustále narastá. Preto je potrebné zaoberať sa takými nasadeniami bezdrôtových sietí, ktoré budú schopné obstáť v prostrediach s vysokou hustotou užívateľov. Každé prostredie je niečím charakteristické a pre optimálne nasadenie vyžaduje splnenie špecifických požiadaviek.

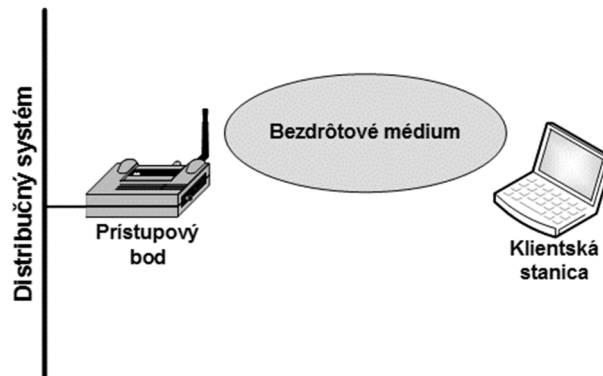
V kapitole 3 sa pozrieme na faktory, ktoré môžu vplývať na bezdrôtové siete v takomto prostredí a metódami ich návrhu.

V kapitole 4 je predstavený simulačný nástroj NS-3, jeho štruktúra a implementácia štandardov z rodiny IEEE 802.11 v rámci tohto simulátora. Simulované scenáre, ich predpoklady a parametre sú detailne popísané v kapitole 5.

Kapitola 6 je zameraná na analýzu dosiahnutých výsledkov a výstupov simulovanej siete.

# 1 LOKÁLNE BEZDRÔTOVÉ SIETE

Lokálne bezdrôtové siete WLAN (*Wireless Local Area Network*) pozostávajú zo štyroch základných komponentov, ktoré sú zobrazené na Obr. 1.



Obr. 1 Komponenty lokálnej bezdrôtovej siete WLAN [4]

Siete slúžia na prenos dát medzi rádiovými rozhraniami, ktoré štandard definuje ako stanice STA (*Stations*). Môžu byť súčasťou prístupového bodu AP (*Access Point*) alebo klientských staníc, ako sú napríklad laptopy, tablety, smartfóny, scannery a i.

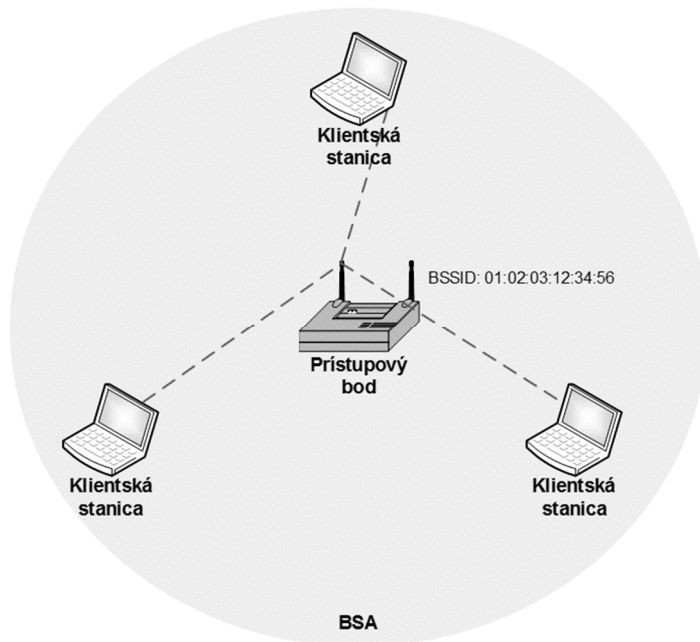
Úlohou prístupových bodov AP je konvertovať rámce 802.11 siete na iné typy rámcov v závislosti na type distribučného systému za účelom ich doručenia ďalej do siete [2], [4].

Na prenos rámcov medzi stanicami je použité bezdrôtové médium. V štandarde je definovaných niekoľko fyzických vrstiev. Úplne prvý štandard definoval dve fyzické vrstvy rádiových frekvencií RF (*Radio Frequency*) a jednu infračervenú fyzickú vrstvu. Najnovšou definovanou fyzickou vrstvou je 802.11ac.

Distribučný systém DS (*Distribution System*) je logickým komponentom sietí WLAN na preposielanie rámcov k ich cieľu. Slúži taktiež na komunikáciu medzi AP v prípade, že je na pokrytie rozsiahlejšej oblasti použitých viacero prístupových bodov. V štandarde 802.11 nie je špecifikovaný konkrétny typ distribučného systému, avšak v takmer všetkých komerčne dostupných produktoch je na tento účel použitý Ethernet [4].

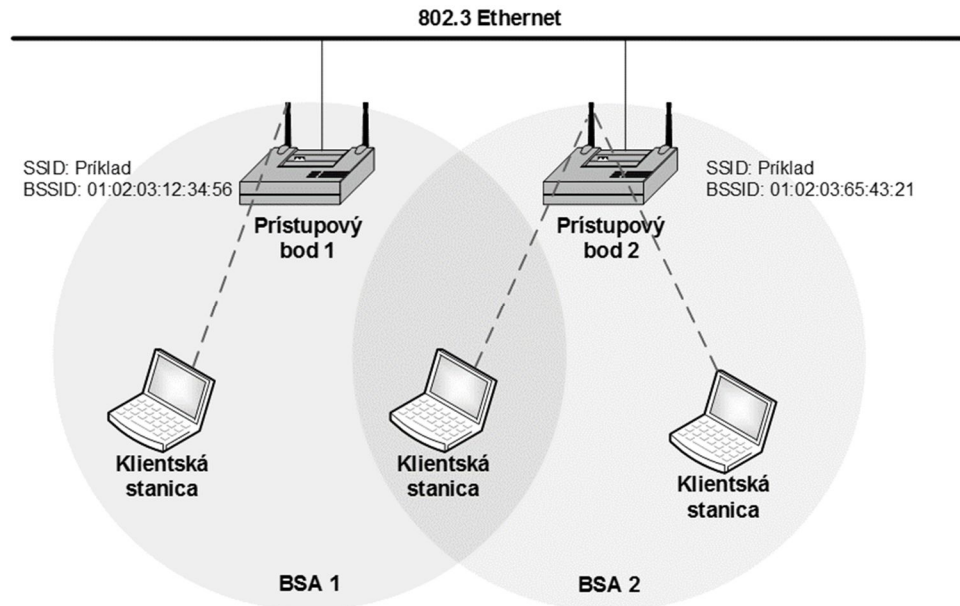
## 1.1 Topológie

Stavebným kameňom každej 802.11 siete je základný súbor služieb BSS (*Basic Service Set*), teda skupina staníc, ktoré medzi sebou komunikujú. Táto komunikácia sa odohráva v oblasti nazývanej základná oblasť služieb BSA (*Basic Service Area*), ktorá je definovaná vysielačím výkonom AP, ziskom antény a prostredím, v ktorom sa signál šíri. Každý BSS je definovaný identifikátorom základného súboru služieb BSSID (*Basic Service Set Identifier*). BSSID je MAC adresa rádiového sieťového rozhrania AP. Ak sa stanica nachádza v BSA, môže komunikovať s ostatnými členmi BSS. Stanica, ktorá má s ostatnými členmi BSS spojenie na úrovni L2 sa nazýva *asociovaná* [2], [4]. WLAN, ktorých súčasťou je AP sa nazývajú infraštruktúrne bezdrôtové siete. Na Obr. 2 je zobrazený BSS.



Obr. 2 Základný súbor služieb BSS

Základný súbor služieb BSS je určený na pokrytie domácností a malých kancelárií, nie však na pokrytie veľkých oblastí. Spojením viacerých BSS chrbticovou sieťou vznikne topológia označovaná ako rozšírený súbor služieb ESS (*Extended Service Set*) zobrazený na Obr. 3. Všetky prístupové body v rámci ESS majú spoločný identifikátor súboru služieb SSID (*Service Set Identifier*) – názov na identifikovanie bezdrôtovej siete [2], [4].



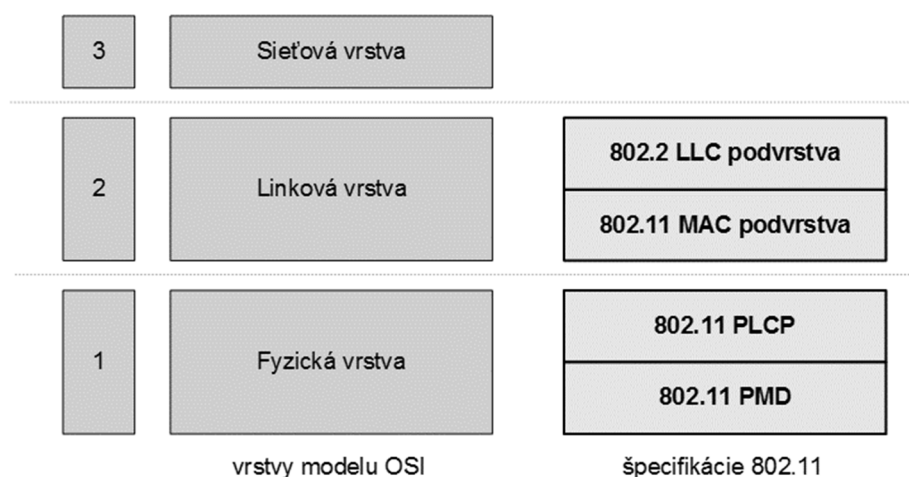
Obr. 3 Rozšírený súbor služieb ESS [2]

## 2 ŠTANDARD IEEE 802.11AC

Inštitút inžinierov elektrotechniky a elektroniky, známy ako IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) je celosvetová organizácia zodpovedná za výskum a vytváranie štandardov v oblasti leectva, počítačov, biomedicínskeho inžinierstva, spotrebiteľskej elektroniky, telekomunikácií a mnohých iných. Poslaním IEEE je „podporovať technologické novinky v prospech ľudstva“, čo v praxi sieťových špecialistov znamená vytvárať štandardy používané ku komunikácii. Pravdepodobne najznámejšie štandardy od IEEE sú tie pre lokálne siete LAN (*Local Area Network*), nazývané taktiež projekt IEEE 802. Projekty IEEE sú rozdelené do jednotlivých pracovných skupín, ktoré sa zaoberajú vývojom štandardov pre špecifické potreby [1], [2]. Štandardmi pre lokálne bezdrôtové siete sa zaoberá pracovná skupina 802.11 - *Wireless LAN Working Group*.

Dodatok 802.11ac bol ratifikovaný koncom roka 2013 a nesie oficiálny názov „*Dodatok 4: Vylepšenia pre veľmi vysokú priepustnosť pre prevádzku v pásmach pod 6 GHz.*“ 802.11ac je akousi evolúciou predchádzajúceho štandardu 802.11n a operuje v pásmach 5 GHz, ktoré poskytujú väčšiu šírku spektra v porovnaní s pásmom 2,4 GHz. Zatiaľ čo predchádzajúci štandard predstavil kanály so šírkou 40 MHz, 802.11ac prináša kanály o šírke 80 MHz a 160 MHz. Taktiež zmieňuje použitie modulácie 256-QAM, dvojnásobný počet priestorových tokov v porovnaní s 802.11n a prináša podporu novej technológie MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) pre viac užívateľov MU-MIMO (*Multi-user MIMO*), ktorá umožňuje prístupovému bodu AP komunikovať s viacerými klientskymi stanicami súčasne na rovnakom kanáli. Vďaka týmto vylepšeniam je maximálna teoretická prenosová rýchlosť na fyzickej vrstve až 6,933 Gbit/s [6].

Štandardy 802.11 sú zamerané na dve najnižšie vrstvy OSI modelu. Na Obr. 4 sú zobrazené jednotlivé štandardy a ich umiestnenie na prvých dvoch vrstvách OSI modelu.



Obr. 4 Vzťah medzi modelom OSI a špecifikáciami 802.11 [6]

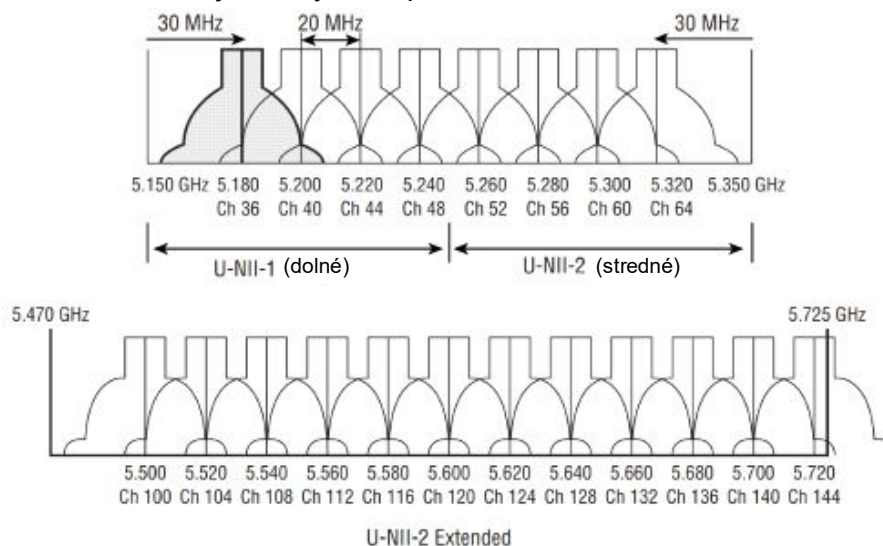
### 2.1 Fyzická vrstva

Štandardy IEEE 802.11 a ich dodatky definujú komunikáciu v nelicencovaných frekvenčných pásmach rádiového spektra. 802.11ac definuje bezdrôtové prenosy v 5 GHz frekvenčných pásmach. Tieto frekvenčné rozsahy sú známe ako nelicencované pásma

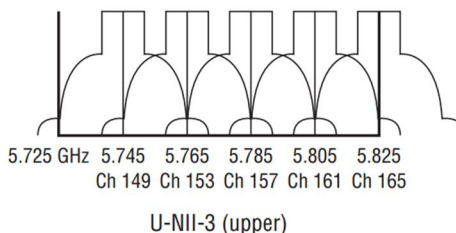
pre národnú informačnú infraštruktúru U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) [2] a delia sa na:

- dolné pásmo U-NII-1 – **5,15 GHz – 5,25 GHz** (šírka pásma 100 MHz - 4 kanály),
- stredné pásmo U-NII-2 – **5,25 GHz – 5,35 GHz** (šírka pásma 100 MHz – 4 kanály),
- U-NII-2 Extended - **5,47 GHz – 5,725 GHz** (šírka pásma 255 MHz – 12 kanálov),
- horné pásmo U-NII-3 - **5,725 GHz – 5,85 GHz** (šírka pásma 75 MHz – 5 kanálov).

Obr. 5 a Obr. 6 zobrazujú kanály U-NII pásiem.



Obr. 5 Kanály pásiem U-NII-1 a U-NII- 2 [2]



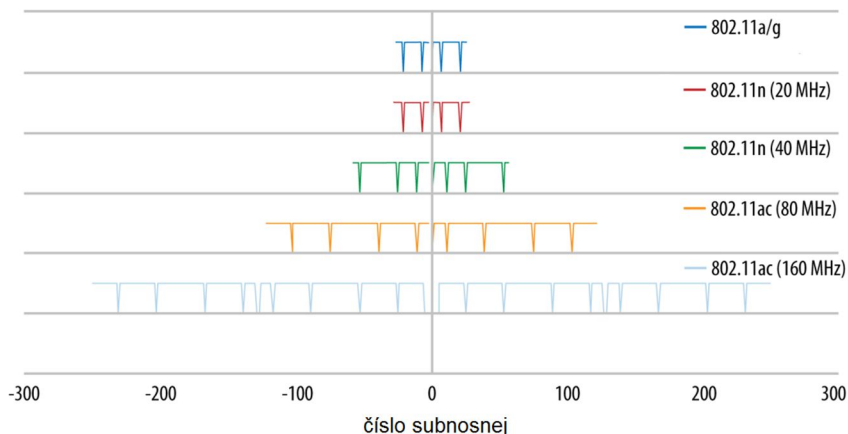
Obr. 6 Kanály pásma U-NII-3 [2]

V týchto pásmach sú definované podmienky na prevádzkovanie rádiových staníc regulačným úradom. V Českej republike tieto podmienky definuje Český telekomunikačný úrad. Maximálny vyžiarený výkon v pásmach U-NII-1 a U-NII-2 je  $EIRP = 200 \text{ mW}$ . V pásme U-NII-2 Extended je okrem maximálneho vyžiareného výkonu  $EIRP = 1 \text{ W}$  požadovaná automatická regulácia výkonu (ak nie je zapnutá znižuje sa maximálny vyžiarený výkon na  $EIRP = 500 \text{ mW}$ ) a taktiež je povinné automatické preladenie kanála v prípade detekcie radaru. V pásme U-NII-3 je prevádzka zariadení možná s malým výkonom  $EIRP = 25 \text{ mW}$  [3].

### 2.1.1 Štruktúra kanálov 802.11ac

Štruktúra 20 a 40 MHz kanálov u 802.11ac je rovnaká ako u predchádzajúcich štandardov založených na OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*). Rádiový kanál je rozdelený na 64 ortogonálnych subnosných a ktoré sú od seba vzdialené 312,5 kHz. V kanále o šírke 20 MHz je 52 subnosných využitých na prenos dát a 4 sú pilotné subnosné. Pilotné subnosné

sú v OFDM formou nadbytočnosti. Neprenášajú dáta vyšších vrstiev, ale dôležité informácie potrebné na kalibráciu kanála. V MIMO systémoch každý rádiový reťazec využíva na prenos všetky subnosné a preto je možné dosiahnuť dvoj- až štvornásobné prenosové rýchlosti v závislosti na počte priestorových dátových tokov. U štandardu 802.11ac boli za účelom zvýšenia rýchlosti definované dve nové šírky kanála 80 MHz a 160 MHz. Za 160 MHz kanál môže byť okrem dvoch susedných 80 MHz blokov, považovaný aj kanál združený z dvoch 80 MHz blokov, ktoré spolu priamo nesusedia. Na Obr. 7 je zobrazené porovnanie kanálov naprieč štandardami, ktoré využívajú OFDM [5].



Obr. 7 Štruktúra kanálov štandardov využívajúcich OFDM [5]

Na Obr. 7 sú pilotné subnosné zobrazené ako poklesy v grafe. 80 MHz OFDM kanál je rozdelený na 242 subnosných, z ktorých 234 využíva na prenos dát a 8 na kalibráciu kanála. 160 MHz OFDM kanál pozostáva z 484 subnosných, z toho 468 prenáša dáta a 16 zabezpečuje réžiu kanála [5]. V Tab. 1 je zobrazený prehľad subnosných pre rôzne šírky kanála štandardu 802.11ac.

Tab. 1 Prehľad subnosných štandardu 802.11ac pre rôzne šírky kanála [5]

Štandard, kanál	Rozsah subnosných	Pilotné subnosné	Subnosné (všetky/na prenos dát)	Kapacita kanála vzhľadom k 802.11ac 20 MHz
802.11ac, 20 MHz	-28 až -1, +1 až +28	$\pm 7, \pm 21$	56/52	x1,0
802.11ac, 40 MHz	-58 až -2, +2 až +58	$\pm 11, \pm 25, \pm 53$	114/108	x2,1
802.11ac, 80 MHz	-122 až -2, +2 až +122	$\pm 11, \pm 39, \pm 75, \pm 103$	242/234	x4,5
802.11ac, 160 MHz	-250 až -130, -126 až -6, +6 až +126, +130 až +250	$\pm 25, \pm 53, \pm 89, \pm 117, \pm 139, \pm 167, \pm 203, \pm 231$	484/468	x9,0

## 2.1.2 Ochranný interval

Jedným z vylepšení zameriavajúcim sa na zvýšenie prenosovej rýchlosti u 802.11ac bolo skrátenie ochranného intervalu. Ochranný interval GI (Guard Interval) medzi OFDM symbolmi by mal byť štyrikrát vyšší ako najväčšie oneskorenie spôsobené viaccestným šírením signálu a slúži na zabránenie interferencii medzi subnosnými. Pri návrhu štandardu 802.11a bola zvolená referenčná hodnota 200 ns ako oneskorenie spôsobené viaccestným šírením. Podľa [10] však hodnoty tohto oneskorenia v nasadeniach WLAN vo vnútri budov neprekračujú 100 ns a často sa pohybujú v rozmedzí 50-75 ns. Z pôvodných 800 ns bol preto



ochranný interval skrátený na 400 ns v prípade, že túto dĺžku intervalu podporujú obe komunikujúce strany. Toto spôsobí skrátenie trvania OFDM symbolu z 4  $\mu$ s na 3,6  $\mu$ s a vedie k zvýšeniu prenosovej rýchlosti približne o 10% [5], [10].

### 2.1.3 Beamforming

Smerovanie signálu alebo *beamforming* je metóda koncentrovania rádiovkej energie pomocou viacerých antén takým spôsobom, aby došlo k zvýšeniu úrovne prijatého signálu a SNR na prijímači a teda k celkovému zlepšeniu prenosu.

Na smerovanie signálu sa používajú viaceré rádiové reťazce prístupového bodu, ktoré vysielajú rovnakú informáciu cez viaceré antény. Tieto prenosy prístupový bod časuje tak, aby signály od všetkých antén cez ktoré informáciu vysiela, dorazili na prijímač klientského zariadenia v rovnakom čase a vo fáze, čím dôjde k zvýšeniu úrovne signálu približne o 3 dB. Toto navýšenie úrovne signálu môže zabezpečiť zvýšenie odstupu signálu od šumu a teda vyššie prenosové rýchlosti medzi komunikujúcimi uzlami. Štandard 802.11ac nazýva vysielateľ pojmom *beamformer* a prijímač označuje názvom *beamformee* [2], [5]. Toto smerovanie je nastavované na základe prenosu jednotlivých rámcov medzi komunikujúcimi stranami, takže pre jeden dátový prenos môže byť *beamformer* prístupový bod a pre prenos v opačnom smere môže byť *beamformer* klientská stanica. Prístupový bod môže smerovať dátový prenos ku klientskej stanici a v prípade, že klientská stanica disponuje viacerými rádiovými reťazcami, môže taktiež nasmerovať prenos k AP [5].

Štandard 802.11ac definuje *beamforming*, ktorý na určenie najvhodnejšieho použitia viacerých rádiových reťazcov na prenos signálu používa interaktívny kalibračný proces nazývaný sondovanie kanála. Proces začína vysielacia strana vyslaním oznamovacieho rámca NDP (*announcement null data packet*), ktorý prijímaciu stranu upozorní, že má očakávať smerovaný prenos. Následne vyšle samotný NDP rámec. Prijímacia strana (*beamformee*) tento rámec spracuje a vytvorí spätnú informáciu, obsahujúcu amplitúdový a fázový posun medzi každým párom vysielacích a prijímacích antén, ktorú zašle vysielacej strane. Na základe tejto informácie si vysielacia strana vytvorí takzvanú smerovaciu maticu, podľa ktorej smeruje prenosy k prijímacej strane [5].

### 2.1.4 MIMO

Zariadenia, ktoré sa vyskytovali pred zavedením štandardu 802.11n, využívali na prenos iba jeden dátový tok a vysielateľ aj prijímač prenášali dáta iba jednou anténou (SISO – *Single-Input, Single-Output*) aj v prípade, že antén bolo dostupných viac.

V MIMO systémoch sú všetky antény aktívne súčasne. Každý vysielateľ - transmitter má svoju vlastnú anténu a vysiela svoj vlastný dátový tok, rovnako ako každý prijímač - receiver prijíma svoj vlastný dátový tok. Dátové toky sú označované aj pojmom priestorové dátové toky, pretože každý z nich prechádza samostatne v priestore medzi komunikujúcimi koncovými bodmi. Vysielateľ a prijímač bývajú súčasťou jedného zariadenia nazývaného *transciever*, prípadne aj rádiový reťazec (*radio chain*). Na to, aby bolo možné prenášať nezávislé dátové toky, každý musí byť spracovávaný vlastným rádiovým reťazcom. Viaceré rádiové reťazce na jednej strane zvyšujú rýchlosť prenášaných dát, avšak majú aj

oveľa vyššiu spotrebu energie v dôsledku viacerých súčiastok na spracovanie signálu Fourierovou transformáciou a taktiež viacerých zosilňovačov. Taktiež platí, že čím väčšie je implementované anténne pole, tým vzrastá veľkosť či už prístupového bodu alebo klientského zariadenia [4].

U zariadení s podporou MIMO technológie sa stretávame s označeniami ako napríklad 2x2:2, 3x3:3. Prvé číslo označuje počet vysielacích rádiových reťazcov, druhé číslo počet prijímacích rádiových reťazcov a tretie počet podporovaných priestorových dátových tokov.

#### **2.1.4.1 MU-MIMO**

Štandard 802.11ac predstavil technológiu MIMO pre viac užívateľov (MU-MIMO). V systémoch podľa 802.11 a/b/g/n mohol prístupový bod AP komunikovať v jednom časovom okamihu iba s jedným klientským zariadením. Použitím MU-MIMO je možné v jednom časovom okamihu komunikovať s jedným až štyrmi zariadeniami. Už 802.11n zariadenia sú schopné vysielat' viac nezávislých dátových tokov. Avšak väčšina klientských zariadení z dôvodu šetrenia batérie podporuje prenos iba jedného prípadne dvoch dátových tokov. To v prípade komunikácie AP s prenosným zariadením ako je mobil alebo tablet znamená, že potenciál viacerých vysielaných dátových tokov nie je využitý. Preto štandard 802.11ac prišiel s technológiou MU-MIMO, ktorá umožňuje napríklad v prípade AP podporujúceho štyri dátové toky komunikovať v jednom časovom okamihu buď s jedným klientom, ktorý taktiež podporuje štyri dátové toky, alebo so štyrmi klientmi, z ktorých každý podporuje jeden dátový tok. MU-MIMO si vyžaduje pokročilé signálové spracovanie a preto je definované iba v smere od AP ku klientským zariadeniam [5].

Dôležitou súčasťou technológie MU-MIMO je *beamforming*. Predchádzajúca podkapitola zmieňovala princíp smerovania signálu v prípade jedného klientského zariadenia. Pri použití MU-MIMO musí byť prístupový bod schopný smerovať signál súčasne až štyrom klientom. Rovnako ako pri procese sondovania kanála v prípade jedného užívateľa, si vysielacia strana, v tomto prípade prístupový bod, vytvára na základe informácií od jednotlivých prijímacích strán smerovaciu maticu, ktorá obsahuje parametre prenosu medzi anténami AP a anténami jednotlivých klientov [2].

#### **2.1.5 Modulačné a kódové schémy štandardu 802.11ac**

Prenosové rýchlosti štandardu sú definované modulačnými a kódovými schémami MCS (*Modulation and Coding Scheme*), ktoré závisia na modulácii, metóde kódovania, počte priestorových tokov, šírke kanála a na dĺžke ochranného intervalu GI.

802.11ac definuje 10 modulačných a kódových schém. Prvých osem MCS je zhodných s MCS 0 – MCS 7 ako u 802.11n a sú povinné pre spätnú kompatibilitu s predchádzajúcimi štandardmi. MCS 8 a MCS 9 sú schémy ktoré priniesla podpora modulácie 256-QAM. Modulácia 256-QAM má potenciál dramaticky vylepšiť prenosovú rýchlosť. Avšak ako to už vo svete technológii chodí, aj tu funguje staré známe „niečo za niečo“. Na to aby mohla byť použitá modulácia 256-QAM je potrebné aby bol rádiový spoj takmer perfektný, čo znamená minimum chýb v prenose a je požadované veľký odstup signálu od šumu SNR (*Signal to Noise Ratio*).

Prehľad prenosových rýchlostí podporovaných štandardom 802.11ac je zobrazený v tabuľke Tab. 2.

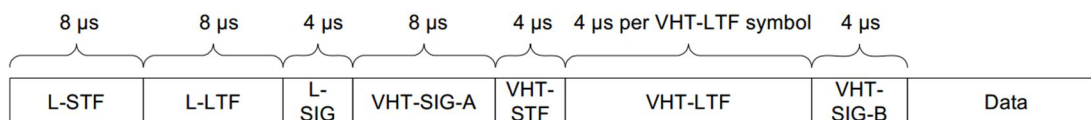
Tab. 2 Modulačné a kódové schémy MCS 0 – MCS 9 štandardu 802.11ac [9]

MCS index	Počet priestorových tokov	Modulácia a kódovanie	Ochranný interval GI		multiplikačný faktor priest. toku	multiplikačný faktor šírky kanála	Maximum (8 priest. tokov, GI = 400 ns)		
			800 ns	400 ns			šírka kanála		
			šírka kanála				40 MHz	80 MHz	160 MHz
			20 MHz	20 MHz			Prenosová rýchlosť [Mbit/s]		
			Prenosová rýchlosť [Mbit/s]						
0	1	BPSK, 1/2	6,5	7,2	x2 pre 2 toky	x1 pre 20 MHz	120,0	260,0	520,0
1		QPSK, 1/2	13	14,2	x3 pre 3 toky	x2,1 pre 40 MHz	240,0	520,0	1040,0
2		QPSK, 3/4	19,5	24,7	x4 pre 4 toky	x4,5 pre 80 MHz	360,0	780,0	1560,0
3		16-QAM, 1/2	26	28,9	x5 pre 5 tokov	x9,0 pre 160 MHz	480,0	1040,0	2080,0
4		16-QAM, 3/4	39	43,3	x6 pre 6 tokov		720,0	1560,0	3120,0
5		64-QAM, 2/3	52	57,8	x7 pre 7 tokov		960,0	2080,0	4160,0
6		64-QAM, 3/4	58,5	65	x8 pre 8 tokov		1080,0	2340,0	4680,0
7		64-QAM, 5/6	65	72,2			1200,0	2600,0	5200,0
8		256-QAM, 3/4	78	86,7			1440,0	3120,0	6240,0
9		256-QAM, 5/6	n/a	n/a			1600,0	3466,7	6933,3

### 2.1.6 Rámce fyzickej vrstvy

Fyzická vrstva je rozdelená na dve podvrstvy: podvrstvu PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) a podvrstvu PMD (*Physical Medium Dependent*). PLCP podvrstva pripravuje rámec prebratý z MAC podvrstvy na vyslanie a vytvára dátovú jednotku PLCP protokolu PPDU (*PLCP Protocol Data Unit*) pridaním preamble. PMD podvrstva následne moduluje a vysiela dáta ako bity [2].

Pri rámcovaní na fyzickej vrstve je dôležité aby bola zaručená spätná kompatibilita s predošlými štandardami založenými na OFDM. Jednoducho povedané keď vysiela zariadenie s podporou 802.11ac, zariadenia 802.11a/n musia byť schopné tento prenos zachytiť a vyhnúť sa vysielať počas doby obsadenosti média [4], [5].



Obr. 8 Formát PPDU 802.11ac [9]

Na Obr. 8 je zobrazený rámec fyzickej vrstvy 802.11ac. Funkcionalita jednotlivých polí je nasledovná:

- Polia **L-STF** a **L-LTF** sú identické ako polia u štandardu 802.11a a pozostávajú so sekvencie 12 OFDM symbolov ktoré indikujú prijímaču začiatok vysielania rámca, synchronizujú časovače. Každé 802.11 zariadenie fungujúce na báze OFDM je schopné tieto polia dekodovať.
- Pole **L-SIG** je signalizačné pole, používané na popis prenosovej rýchlosti a dĺžky rámca uvedenej v bajtoch, aby si prijímač mohol vypočítať ako dlho bude prenos rámca trvať. Zariadenia s podporou 802.11ac nastavujú hodnotou prenosovej rýchlosti týchto rámcov na 6 Mbit/s a podvrhujú dĺžku rámca tak, aby zodpovedala času trvania prenosu 802.11ac rámca.
- Polia **VHT-SIG-A** a **VHT-SIG-B** opisujú atribúty rámca ako sú šírka kanála, modulácia a kódovanie, dĺžka ochranného intervalu a i. [5].
- Pole **VHT-STF** slúži podobne ako prvé dve polia - pomáha naladiť prijímač pomocou opakujúceho sa vzorca bitov.
- Pole **VHT-LTF** pozostáva zo sekvencie symbolov na nastavenie demodulácie zvyšku rámca, ktorá začína poľom VHT-SIG-B. V závislosti na počte prenášaných dátových tokov pozostáva z 1, 2, 4, 6 alebo 8 symbolov [5], [9].
- **Dátové pole** obsahuje dáta protokolov vyšších vrstiev, prípadne doplňujúce bity na zaistenie dostatočného počtu bitov na OFDM symbol.

## 2.2 Linková vrstva

Linková vrstva 802.11 pozostáva z dvoch podvrstiev: podvrstva riadenia logického spoja LLC (*Logical Link Control*) a podvrstva riadenia prístupu k médiu MAC (*Media Access Control*). LLC je definovaná štandardom IEEE 802.2. Štandard 802.11 definuje dianie na MAC podvrstve druhej vrstvy modelu OSI.

Rámec 802.11 sa nazýva dátová jednotka MAC protokolu MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) a pozostáva z troch základných komponentov:

- **MAC hlavička** – obsahuje kontrolné informácie rámca, trvanie rámca MAC adresovanie
- **Telo rámca** – obsahuje enkapsulované dáta z vyšších vrstiev nazývané dátová jednotka MAC služby MSDU (*MAC Service Data Unit*).
- **Sekvencia na kontrolu rámca FCS** (*Frame Check Sequence*) – 32 bitový kód na cyklickú redundantnú kontrolu CRC (*Cyclic-Redundancy Check*), pre overenie chybovosti.

Rovnako ako rámce 802.3, aj rámce 802.11 používajú na adresovanie MAC adresy. Hlavička 802.11 rámca je však oproti ethernetovej zložitejšia a obsahuje štyri adresné polia. Preto je v prípade infraštruktúrnej bezdrôtovej siete úlohou prístupového bodu prekladať rámce typu 802.11 na rámce typu 802.3.

V štandardoch 802.11 je definovaných päť typov MAC adries, ktoré sa môžu vyskytovať v adresnom poli podľa toho, či sa jedná o dátový tok smerom ku klientskej stanici alebo od nej:

- **zdrojová adresa SA** (*Source Address*) – MAC adresa pôvodnej zdrojovej stanice,
- **cieľová adresa DA** (*Destination Address*) – MAC adresa finálnej cieľovej stanice,

- **adresa vysieláča TA** (*Transmitter Address*) – MAC adresa bezdrôtového rozhrania, ktoré vyslalo rámeč na médium,
- **adresa prijímača RA** (*Receiver Address*) – MAC adresa bezdrôtového rozhrania, ktoré má za úlohu prijať prichádzajúci prenos z vysielacej stanice.
- **BSSID** (*Basic Service Set Identifier*) – MAC adresa bezdrôtového rozhrania prístupového bodu AP [4].

MAC hlavička 802.11 má veľkosť 32 B a je zobrazená na Obr. 9.

2 B	2 B	6 B	6 B	6 B	2 B	6 B	2 B
kontrola rámca	trvanie/ ID	Adresa 1	Adresa 2	Adresa 3	kontrola sekvencie	Adresa 4	kontrola QoS

Obr. 9 MAC hlavička 802.11

Štandard IEEE 802.11 definuje tri hlavné typy rámcov: riadiace, kontrolné a dátové.

### 2.2.1 Riadiace rámce

802.11 riadiace rámce tvoria väčšinu rámcov vo WLAN sieti. Riadiaci rámeč 802.11 sa nazýva MMPDU (*Management MAC Protocol Data Unit*) a neprenáša žiadne dáta vyšších vrstiev. 802.11 definuje 14 podtypov riadiacich rámcov. Používajú ich bezdrôtové stanice na pripojenie alebo odpojenie od BSS. Keďže bezdrôtové siete pracujú s neohrančeným prenosovým médium, aby mohla bezdrôtová stanica získať prístup k distribučnému systému, musí najskôr nájsť kompatibilnú bezdrôtovú sieť, overiť sa a asociovať. Najdôležitejším z riadiacich rámcov je navádzací rámeč (*Beacon Frame*). Prístupový bod, ktorý je súčasťou BSS vysiela beacon rámce, zatiaľ čo klientské stanice tieto rámce počúvajú. Beacon rámeč obsahuje všetky dôležité informácie a parametre bezdrôtovej siete, ktoré musí klientská stanica vedieť predtým, ako sa asociuje k BSS. Interval vysielania týchto rámcov je približne 100 ms a na väčšine prístupových bodov je možné ho konfigurovať, nie však vypnúť. Na nájdenie prístupových bodov používajú klientské zariadenia riadiace rámce nazývané *probe* žiadosti. Na tieto rámce musí každé AP, ktoré žiadosť zachytí poslať odpoveď – *Probe Response*. V prípade, že sa zariadenie rozhodne pripojiť k BSS, vysiela prístupovému bodu žiadosť o asociovanie (*Association Request*) a dostáva odpoveď s udelením alebo zamietnutím prístupu k BSS – *Association Response*, ktorá obsahuje unikátny identifikátor AID (*Association ID*) udeľovaný každému asociovanému klientovi v rámci BSS [4].

### 2.2.2 Kontrolné rámce

Úlohou kontrolných rámcov v sieti WLAN je pomáhať s doručovaním dátových rámcov. Tieto rámce sú vysielané základnými prenosovými rýchlosťami a obsahujú iba informácie v hlavičke. Štandard definuje nasledovné podtypy kontrolných rámcov:

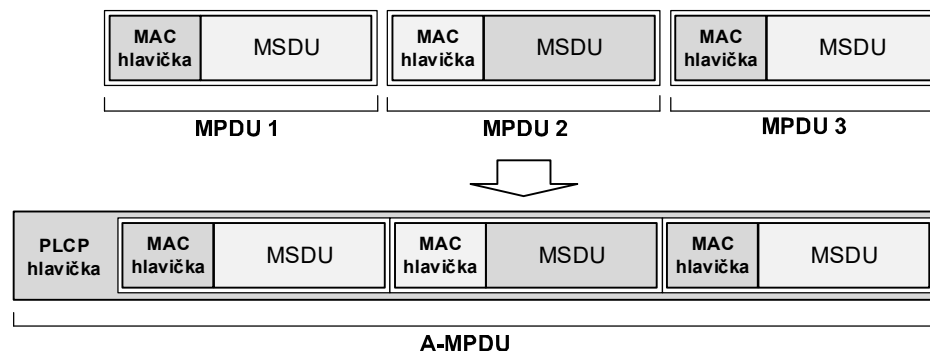
- žiadosť o vyslanie RTS (*Request to Send*),
- povolenie vyslania CTS (*Clear to Send*) – odpoveď na rámeč RTS,
- potvrdenie ACK (*Acknowledgement*) [9].

### 2.2.3 Dátové rámce

Dátové rámce prenášajú v tele rámca dáta, ktoré sú prijímané od protokolov vyšších vrstiev (MSDU Payload). Existuje 15 podtypov dátových rámcov. Základným podtypmi sú jednoduchý dátový rámec (*Simple Data Frame*) a rámec, ktorý neprenáša žiadne dáta (*Null Function Frame*), ktorý je používaný na informovanie AP o zmene statusu úsporného režimu u klientskej stanice [9].

### 2.2.4 Agregovanie rámcov A-MPDU

Už v predchádzajúcom štandarde bolo na zefektívnenie WLAN sietí a zníženie nadbytočnosti vnášanej súťažou o prístup k médiu predstavené agregovanie rámcov. Vytvorením agregovaného rámca A-MPDU (*Aggregate MAC Protocol Data Unit*) môže bezdrôtové zariadenie po získaní prístupu k médiu vysielat' dlhší čas a tak preniesť viac paketov vyšších vrstiev. Všetky rámce 802.11ac sú agregované pomocou A-MPDU formátu. Viacero podrámcov MPDU môže byť agregovaných do jedného rámcového prenosu ako znázorňuje Obr. 10. Maximálna dĺžka A-MPDU je 1 MB. Jednotlivé MPDU vnútri A-MPDU musia mať všetky rovnakú adresu prijímača RA (*Receiver Address*) [2], [10].



Obr. 10 Agregácia rámca A-MPDU [2]

## 2.3 Prístup k médiu

Hlavnou úlohou MAC vrstvy je zabezpečiť prístup k médiu. V dnešných sieťach sú navyše používané tieto dve metódy CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) a CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). CSMA/CD je využívaná najmä v Ethernetových sieťach, CSMA/CA v bezdrôtových. Rozdiel medzi CSMA/CD a CSMA/CA je v momente, keď chce klient vysielat' a žiadna ďalšia klientská stanica nevysiela. V prípade CSMA/CD začne klient vysielat' okamžite, a ak príde ku kolízii dočasne pozastaví vysielanie. Bezdrôtové zariadenia však nie sú schopné súčasne vysielat' aj prijímať rámce, je teda nemožné počas vysielania dát detekovať kolíziu. Preto WLAN siete na zabránenie kolíziám používajú CSMA/CA. Pri CSMA/CA je vysielací čas rozdelený na úseky kedy je médium obsadené nazývané príležitosti na vysielanie TxOP (*Transmit opportunity*) a prázdnych časových úsekoch kedy je médium voľné. Stanice medzi sebou v prázdnych časových úsekoch súťažajú o získanie kontroly nad TxOP, počas ktorých majú výhradný prístup k médiu až do uplynutia maximálneho trvania TxOP. Keď chce stanica

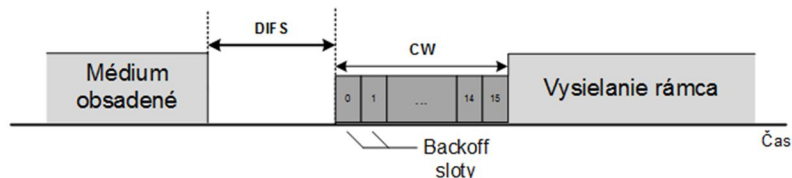
vysielat' a zistí, že nikto iný v danom momente nevysiela, náhodne zvolí si čas tzv. *Backoff timer*, ktorý počká predtým ako začne vysielat'. Počas tohto času pokračuje v monitorovaní média, aby sa uistila, že žiadna ďalšia stanica nezačala vysielat'. Ani táto metóda však nie je dokonalá a stále dochádza ku kolíziám ak sa o vysielanie v rovnakom čase pokúšajú dve a viac staníc. Preto bola štandardom definovaná distribuovaná koordinačná funkcia DCF (*Distributed Coordination Function*) ako prístupová metóda, ktorá sa snaží minimalizovať kolízie pri vysielaní dát viacerými stanicami [2].

### 2.3.1 Distribuovaná koordinačná funkcia DCF

DCF je základnou prístupovou metódou 802.11 komunikácie a v štandarde je povinná. Na zabezpečenie minimálneho počtu kolízií používa štyri základné komponenty:

- medzirámcovú medzeru IFS (*Interframe Space*) – časový úsek medzi vysielaním 802.11 rámcov. Existuje 6 typov IFS, ktoré sa zoradujú podľa dĺžky a priority. Najpoužívanejšími sú krátka medzirámcová medzera SIFS (*Short Interframe Space*) a DIFS (*DCF Interframe Space*).
- pole trvanie/ID – pole v MAC hlavičke – obsahuje hodnotu času v mikrosekundách, počas ktorej bude RF médium obsadené. Na základe tejto hodnoty funguje mechanizmus NAV (*Network Allocation Vector*), ktorý predikuje, kedy bude médium voľné [2].
- počúvanie nosnej CCA (*Clear Channel Assesment*) je schopnosť detekovať a dekódovať prichádzajúcu preambulu Wi-Fi rámca. V prípade, že je detekovaná preambula, médium je označené ako obsadené na dobu trvania prenášaného rámca uvedenú v poli *L-SIG*, z ktorého je dopočítaný čas potrebný na prenos celého rámca. Súčasťou CCA je aj detekcia energie ED, ktorá udáva schopnosť prijímača detekovať energiu od iných rušivých zdrojov prítomných na prenosovom kanáli a označiť médium ako obsadené. Na rozdiel od predošlého prípadu u rušivých signálov nie je známa doba trvania z preambuly, preto stanica v každom Backoff slote kontroluje, či je médium stále obsadené [9].
- Náhodný časovač RB (*Random Backoff timer*) – posledný časovač predtým ako stanica začne vysielat'. Je náhodne zvolený z rozsahu 0-15 nazývaného CW (*Contention Window*) [2].

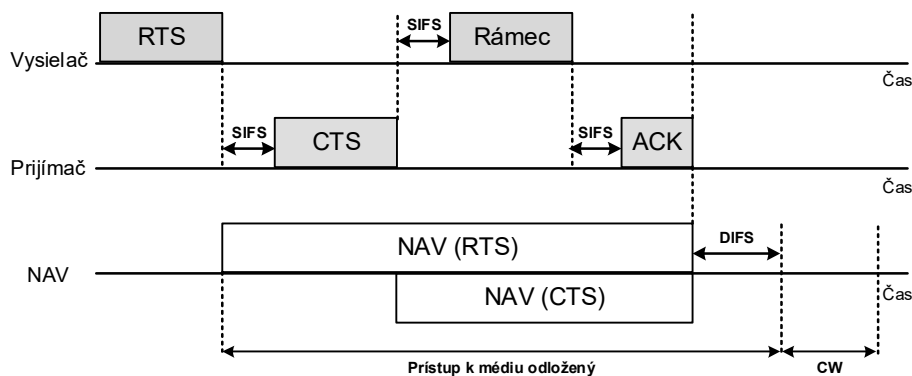
Na Obr. 11 je zobrazený proces prístupu k médiu pomocou DCF.



Obr. 11 Proces prístupu k médiu pomocou DCF [16]

Kontrolné rámce RTS/CTS boli pôvodne používané na vysporiadanie sa s problémom skrytého uzlu, kedy prístupový bod zachytáva prenosy klientskej stanice, ale ostatné stanice v BSS nie sú schopné tieto prenosy zachytiť a tak dochádza ku kolíziám. Rámec RTS je vyslaný po odpočítaní časovača RB a na potvrdenie, že môže vysielat' a prijímacia strana

je pripravená prijímať dáta, dostane odpoveď vo forme CTS. Nasleduje krátka medzirámcová medzera SIFS a vyslanie samotného rámcu. Pomocou rámcov RTS a CTS dochádza k znovu nastaveniu NAV ostatných staníc a tak k zníženiu kolízií a retransmisií. Ak ostatné stanice v BSS nie sú schopné zachytiť rámec RTS od stanice, ktorá je skrytým uzlom, zachytia rámec CTS od prístupového bodu a prenasťavia si svoj NAV. Prístup k médiu využitím rámcov RTS a CTS ilustruje Obr. 12.



Obr. 12 Prístup k médiu pomocou RTS/CTS [4]

Na zabezpečenie kvality služby QoS (*Quality of Service*) bol pre lokálne bezdrôtové siete zadefinovaný dodatok 802.11e. Ako rozšírenie funkcie DCF je v tomto dodatku definovaná metóda prístupu k médiu EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), ktorá zabezpečuje rozlišovanie QoS paketov podľa ôsmich užívateľských priorít a následné zaradenie do štyroch prístupových kategórií. Každá z kategórií má definovaný rozsah CW, z ktorého je pri súťažení o prístup k médiu volený *Backoff timer*. Tab. 3 zobrazuje jednotlivé prístupové kategórie prístupu metódy EDCA.

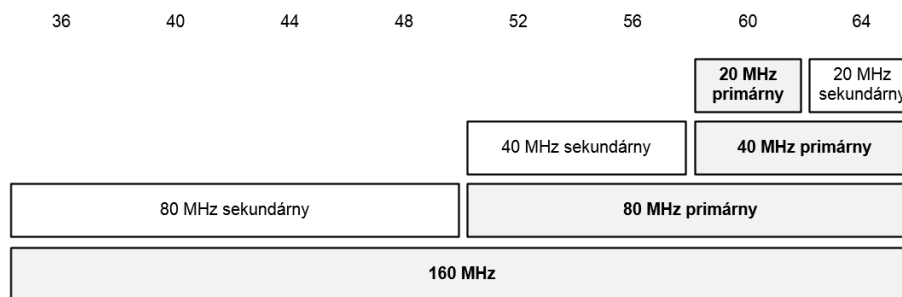
Tab. 3 Kategórie prístupu EDCA [16]

priorita	Užívateľská priorita UP	kategória prístupu AC	určenie	CW	
najnižšia	1, 2	AC_BK	Background	aCWmin	aCWmax
	0, 3	AC_BE	Best Effort	aCWmin	aCWmax
	4, 5	AC_VI	Video prevádzka	$((aCWmin+1)/2)-1$	aCWmin
najvyššia	6, 7	AC_VO	Hlasová prevádzka	$((aCWmin+1)/4)-1$	$((aCWmin+1)/2)-1$

### 2.3.2 Dynamické alokovanie šírky pásma

Dôležitou súčasťou štandardu 802.11ac je spôsob dynamickej voľby šírky kanála. Šírka kanála môže byť rovnako ako prenosová rýchlosť volená počas prenosu, každý rámec tak možno preniesť kanálom s inou šírkou pásma. Pre každú šírku kanála podporovanú bezdrôtovým systémom, je vždy jeden kanál primárny a druhý sekundárny. Obr. 13 ilustruje možné rozloženie primárnych a sekundárnych kanálov. Aby bolo možné vyslať rámec na 40 MHz kanál, oba 20 MHz kanály primárny aj sekundárny musia byť pomocou CCA označené ako voľné. Rovnako ako na prenos kanálom o šírke 160 MHz, musí byť voľných všetkých osem kanálov [5].





Obr. 13 Primárne a sekundárne kanály 802.11ac [5]

Zariadenia podľa štandardu 802.11ac disponujú schopnosťou detekovať dátové prenosy nie len na svojich primárnych kanáloch, ale aj na sekundárnych kanáloch, čo umožňuje aby dve siete zdieľali rovnaký 160 MHz kanál. Obe z týchto sietí môžu vysielat' súčasne každá na svojom primárnom 80 MHz kanáli, pretože tie sa líšia.

Kontrolné rámce RTS/CTS sú u štandardu 802.11ac používané ako signalizácia šírky pásma. Rámec RTS je vyslaný najskôr na primárnom kanáli a následne duplikovaný na sekundárne kanály. Napríklad klientská stanica chce vyslať rámec na kanál o šírke 80 MHz. Pri uvažovaní primárnych a sekundárnych kanálov ako je zobrazené na Obr. 13, vyšle rámec RTS najskôr na svoj primárny 20 MHz kanál číslo 60 a následne je tento rámec duplikovaný na kanály 52, 56 a 64. Aby mohla stanica začať vysielat' na 80 MHz kanál, musí prijať rámce CTS na všetkých štyroch združených kanáloch 52, 56, 60 a 64 [5].

### 3 BEZDRÔTOVÉ SIETE S VEĽMI HUSTOU PREVÁDZKOU

Trh sa čím ďalej, tým viac plní zariadeniami podporujúcimi štandardy 802.11, čo zvyšuje nároky na dnešné dátové siete. Vysoká koncentrácia užívateľov v akomkoľvek vysokohustotnom prostredí je výzvou pre dizajn a nasadenie bezdrôtovej siete, pretože každý z užívateľov môže disponovať dvoma a viacerými zariadeniami. Zároveň je maximálna kapacita WLAN siete obmedzená počtom dostupných rádiových kanálov v danej krajine. Už pri návrhu je preto treba prihliadnuť na špecifické faktory, ktoré môžu ovplyvniť výkon siete v prostredí, kde sa vyskytuje veľké množstvo komunikujúcich zariadení.

V tejto časti sa budeme zaoberať problematikou nasadenia WLAN v prostrediach s vysokou hustotou užívateľov ako sú napríklad konferencie a prednášky.

#### 3.1 Priepustnosť bezdrôtových sietí

Najčastejšou otázkou ohľadom vysokohustotných bezdrôtových sietí je: *Akú garantovanú priepustnosť vie sieť poskytnúť?* Zodpovedať túto otázku je náročné, vzhľadom k zdieľanej povahe bezdrôtového média a veľkému množstvu klientov, ktorí k nemu môžu potenciálne pristupovať. Niekedy sú pred návrhom na dimenzovanie bezdrôtovej siete zadané minimálne požadované priepustnosti pre jednotlivých klientov. Ukážky priepustností niektorých aplikácií sú uvedené v Tab. 4. V prípade využívania bezdrôtovej siete pre konkrétnu aplikáciu je v [17] odporúčané danú aplikáciu pred dimenzovaním návrhu otestovať a overiť jej skutočné požiadavky na priepustnosť.

Tab. 4 Možné zastúpenie aplikácií v bezdrôtovej sieti a požadovaná priepustnosť [17]

Aplikácia	Minimálna priepustnosť [Mbit/s]
prehliadanie Webu	1
prístup k emailu	< 1
Audio prenos	1
Video prenos	2 - 10
Zdieľanie súborov	2 - 8
Testovanie/kvíz online	2

Celková priepustnosť bezdrôtového systému je súčtom kapacít jednotlivých prenosových kanálov. Predpokladá sa, že pokiaľ vo frekvenčnom rozsahu kanála neexistuje zdroj rušenia má každý kanál rovnakú priepustnosť. Celková priepustnosť systému je potom daná vzťahom:

$$CPS = N_k * P_{k,AV} \quad [\text{Mbit/s}] \quad (1)$$

kde  $CPS$  je celková priepustnosť systému [Mbit/s],

$N_k$  je počet použitých prenosových kanálov,

$P_{k,AV}$  je priemerná priepustnosť kanála [Mbit/s].

Každý Wi-Fi kanál má limit priepustnosti daný jeho šírkou a počtom priestorových dátových tokov podporovaných klientským zariadením. Hoci štandard 802.11ac definuje maximum až štyroch priestorových dátových tokov na klienta, reálne sa v bezdrôtových sieťach stretávame so stanicami, ktoré podporujú MIMO vo verzii 1x1:1 prípadne 2x2:2, kvôli

nízkej kapacite batérii mobilných zariadení. Priemerná priepustnosť na zariadenie je daná podielom celkovej priepustnosti bezdrôtového systému a počtu zariadení aktívnych súčasne v jednom časovom okamihu a je možné ju vypočítať nasledovne:

$$P_{Sta,AV} = \frac{CPS}{N_{akt} * OC} \quad [\text{Mbit/s}] \quad (2)$$

kde  $P_{Sta,AV}$  je priemerná priepustnosť na zariadenie [Mbit/s],

$N_{akt}$  je počet súčasne aktívnych zariadení v jednom časovom okamihu,

$OC$  je operačný cyklus aplikácie.

Počet súčasne aktívnych zariadení je vo všeobecnosti výrazne nižší ako počet asociovaných klientských staníc a primárne závisí na operačnom cykle aplikácie spustenej na klientskom zariadení. Napríklad streamovanie videa je aplikácia, ktorá má operačný cyklus takmer 100%, pre aplikácie ako prehliadanie webových stránok, prípadne online testovanie je v [18] uvádzaný operačný cyklus 25%.

Pri návrhoch je dôležité si stanoviť vhodné očakávania ohľadom priepustnosti kanála a nevyhnutné si uvedomiť, že prenosové rýchlosti uvedené v štandarde 802.11ac sú maximálne teoretické hodnoty na fyzickej vrstve. Od týchto rýchlostí je pri úvahách o priemernej priepustnosti kanála potrebné odpočítať nadbytočnosť pridanú hlavičkami protokolov vyšších vrstiev. Ako percento protokolovej nadbytočnosti [18] uvádza 25% pri uvažovaní MAC+IP+TCP, alebo 20% pre MAC+IP+UDP. Ak by sme uvažovali bezdrôtovú sieť pozostávajúcu z jedného prístupového bodu a jednej klientskej stanice podporujúcej štandard 802.11ac a MIMO vo verzii 2x2:2, a použitie UDP ako transportného protokolu, priepustnosť by bolo možné odhadnúť z maximálnej prenosovej rýchlosti udávanej štandardom podľa vzťahu:

$$P_{Sta,1} = R_{max} * \left(1 - \frac{PN \%}{100}\right) \quad [\text{Mbit/s}] \quad (3)$$

kde  $P_{Sta,1}$  je priepustnosť dát daného zariadenia [Mbit/s],

$R_{max}$  je maximálna prenosová rýchlosť na fyzickej vrstve [Mbit/s],

$PN$  je protokolová nadbytočnosť [%].

Pre vyššie uvažovaný prípad je teda možné za predpokladu použitia MCS 8 pre kanál o šírke 20 MHz odhadnúť priepustnosť klientskej stanice na  $P_{Sta,1} = 173,3 \left(1 - \frac{20 \%}{100}\right) = 138,6$  Mbit/s.

Hoci priepustnosť dát jednej klientskej stanice môže byť približne určená z prenosovej rýchlosti, pri využívaní siete viacerými zariadeniami je nutné priepustnosť simulovať alebo testovať v reálnych podmienkach. Agregovaná priepustnosť dát klesá so zvyšujúcim sa počtom klientských staníc, ktoré súťažia o vysielací čas v dôsledku väčšieho počtu kontrolných rámcov zabezpečujúcich prístup k médiu.

Medzi ďalšie faktory nepriaznivo ovplyvňujúce priepustnosť patrí interferencia od zariadení využívajúcich rovnaký kanál CCI (*Co-Channel Interference*), interferencia susedným kanálom ACI (*Adjacent Channel Interference*) a iné rušenia vo frekvenčných rozsahoch Wi-Fi kanálov. Úrovne rušenia môžu byť merané pomocou spektrálneho analyzátoru a u kanálov, ktoré vykazujú vyššiu mieru rušenia by mal byť pri výpočtoch zohľadnený jeho vplyv na priepustnosť kanála a tak na celkovú priepustnosť bezdrôtového

systemu. Zníženie priepustnosti spôsobené vplyvom týchto interferencií a väčšieho počtu klientských zariadení je možné odhadnúť pomocou faktora zhoršenia, ktorý je v [18] pre prípad prednáškových a konferenčných miestností uvedený ako približne 10% zníženie odhadovanej priepustnosti.

### 3.2 Plánovanie kanálového rozloženia

Aj keď štandard 802.11ac teoreticky ponúka závažné rýchlosti blížiacie sa k jednotkám Gbit/s, pri návrhoch WLAN sietí s veľkou koncentráciou užívateľov tieto rýchlosti neprichádzajú do úvahy. Vyššie teoretické prenosové rýchlosti priamo súvisia so šírkou kanála. Kanály o šírke 40, 80 a 160 MHz vznikajú združením 20 MHz kanálov, a preto čím širší kanál je v návrhu uvažovaný, tým menej kanálov je použiteľných v plánovanom kanálovom rozložení. To znamená, že so zvyšujúcou sa šírkou kanála sa znižuje vzdialenosť medzi prístupovými bodmi operujúcimi na rovnakom kanáli. V [18] a [17] je preto odporúčané používať na účely vysokohustotných bezdrôtových sietí kanály o šírke 20 MHz, čo pri vhodnom plánovaní zabezpečí zníženie interferencie susedným kanálom ACI, interferencie rovnakým kanálom CCI a taktiež zvýšenie celkového výkonu systému.

Tradičné nasadenia WLAN sietí používajú bunkovú štruktúru, kde každú bunku obsluhuje jeden prístupový bod. Prístupové body sú od seba vzdialené aspoň 15 m a často sú oddelené stenami, poschodiami, prípadne inými stavebnými materiálmi. Takéto oddelenie zabezpečuje dostatočný útlm signálu na ceste medzi jednotlivými prístupovými bodmi a je teda možné použiť automatizované systémy implementované v bezdrôtových kontroléroch, ktoré kanály jednotlivým prístupovým bodom alokujú dynamicky.

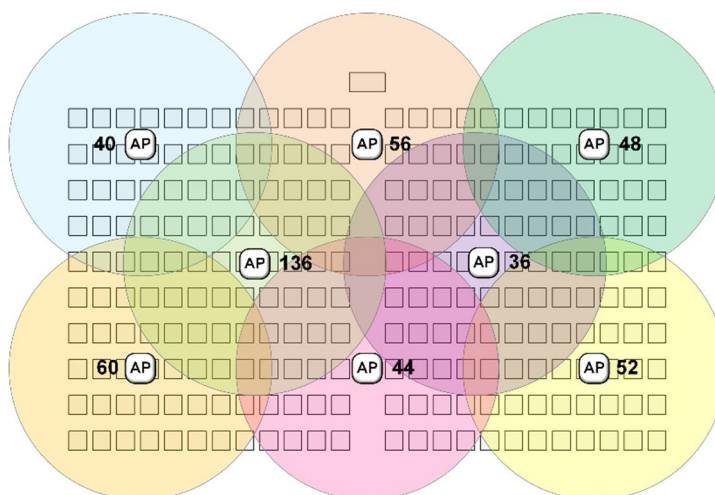
Vysokohustotné bezdrôtové siete sú charakterizované veľkým počtom AP, ktoré sú často umiestnené v relatívne malom spoločnom priestore. Rozostupy medzi prístupovými bodmi môžu v takýchto inštaláciách začínať na vzdialenosti 5 m a v prípade pokrytia otvorených miestností bude s veľkou pravdepodobnosťou medzi prístupovými bodmi priama viditeľnosť. Prístupový bod teda prijíma signál od susedného na veľmi vysokej úrovni, čo takmer znemožňuje použitie automatizovaných systémov na vhodné rozloženie kanálov medzi AP. Automatizované systémy taktiež nedisponujú informáciami o štruktúre a počte miestností napríklad v konferenčnom centre a teda nie je možné zaručiť, že nedôjde k alokovaniu rovnakého kanála dvom prístupovým bodom v rámci jednej miestnosti. Preto je pri vysokohustotných bezdrôtových sieťach takmer vždy potrebné navrhnuť statické rozloženie kanálov.

V Českej republike je v pásme 5 GHz dostupných 18 kanálov o šírke 20 MHz. Kanály 36 – 64 určené na použitie vo vnútorných a kanály 100 – 136 na použitie vo vonkajších priestoroch. Keďže v pásme 5 GHz pracujú aj radary, na všetkých dostupných kanáloch okrem 36 – 48 je povinné dynamické preladenie kanála DFS (*Dynamic Frequency Selection*). V prípade, že prístupový bod na danej frekvencii zachytí prítomnosť radaru musí kanál označiť za obsadený na dobu minimálne 30 minút a preladiť na iný kanál. Na účely bezdrôtových sietí sa vo všeobecnosti odporúča používať aj DFS kanály, pretože čím viac kanálov môžeme pri návrhu použiť, tým vyššiu kapacitu systému sme schopní dosiahnuť.

Plánovanie kanálového rozloženia by malo byť prevedené s prihliadnutím na nasledovné:

- použiť čo najviac kanálov ako je možné vrátane DSF kanálov,
- nepridelovať susedné kanály susedným prístupovým bodom,
- v prípade nutnosti opätovného použitia kanálov sa snažiť o čo najväčšie rozostupy medzi prístupovými bodmi operujúcimi na rovnakom kanáli.

Príklad vhodného plánovania kanálov v priestoroch prednáškovej miestnosti je zobrazený na Obr. 14.



Obr. 14 Príklad kanálového rozloženia v pásme 5 GHz

Pred finalizovaním návrhu kanálového rozloženia bezdrôtovej siete je potrebné overiť rádiové podmienky v pokrývanej oblasti pomocou spektrálneho analyzátora. Spektrálny analyzátor zobrazuje úrovne energie od všetkých prípadných zdrojov rušenia vo frekvenčnom pásme, či od Wi-Fi zariadení alebo iných zdrojov. V prípade, že je niektorý z navrhovaných kanálov ovplyvňovaný zdrojom rušenia, ktorý nie je možné eliminovať je potrebné rušený kanál z navrhovaného kanálového rozloženia odstrániť.

### 3.3 Počet a rozmiestnenie prístupových bodov

Každý prístupový bod má maximálny limit klientských staníc, ktoré môžu byť asociované v jednom časovom okamihu. Tento limit sa môže u jednotlivých výrobcov HW líšiť na základe typu prístupového bodu a jeho hardvérových a softvérových schopnostiach a udáva minimálny počet prístupových bodov požadovaných v bezdrôtovom systéme. Na účely plánovania je v [18] odporúčaný limit 150 asociovaných klientských zariadení na jeden prístupový bod, napriek tomu, že technická špecifikácia môže uvádzať vyššie číslo. Minimálny počet prístupových bodov tak bude daný vzťahom:

$$N_{AP} = \frac{N_{asoc}}{N_{AP\_asoc\_limit}} \quad (4)$$

kde  $N_{AP}$  je počet prístupových bodov,

$N_{asoc}$  je odhadovaný počet asociovaných a súčasne aktívnych zariadení,

$N_{AP\_asoc\_limit}$  je maximálny počet klientských staníc asociovaných k prístupovému bodu v jednom momente.

V konferenčných centrách alebo prednáškových miestnostiach sú na dosiahnutie vysokej obsadenosti miesta na sedenie často zoskupené veľmi blízko seba. Prístupové body sú najčastejšie umiestňované na strop, aby bola vo väčšine prípadov zabezpečená priama viditeľnosť medzi AP a klientským zariadením. Návrh umiestnenia prístupových bodov často závisí na možnostiach reálneho umiestnenia v rámci pokrývaných oblastí. Pred samotným spracovaním návrhu je preto vhodné overiť si možnosti umiestnenia obhliadkou na mieste.

V prípade, že sa prístupové body rozmiestnia rovnomerne naprieč stropom miestnosti je možné obmedziť interferenciu spôsobenú susedným kanálom a poskytnúť klientským zariadeniam uniformné rozloženie signálu. Čím bližšie k prístupovému bodu sa zariadenia nachádzajú, tým vyššia je úroveň prijatého signálu a tiež odstup signálu od šumu SNR. Na základe SNR je v bezdrôtových sieťach volená modulačná a kódová schéma MCS, od ktorej závisí množstvo dát odoslaných vo vysielacom čase. Čím rýchlejšie vie stanica vyselať, tým skôr sa na rad dostanú ostatní klienti. Aby bolo v 802.11ac sieti možné použiť moduláciu 256-QAM a tým zabezpečiť maximálne prenosové rýchlosti je požadovaný minimálny odstup signálu a šumu 30 dB [19]. Pri návrhu je teda tiež snahou zabezpečiť odstup signálu od šumu minimálne 25 dB aby bolo možné v celej bunke použiť čo najvyššiu modulačnú schému a tak maximalizovať množstvo prenesených dát za čas.

### 3.4 Efektívne využívanie vysielacieho času

Pri konfigurácii Wi-Fi siete je dôležité zohľadniť také nastavenia systému, ktoré zabezpečia využitie vysielacieho času na maximum. Ako už bolo spomínané, jedným z nich je zabezpečenie dostatočného odstupe signálu od šumu, ktoré je možné dosiahnuť vhodnou úpravou vysielacieho výkonu prístupového bodu. Tieto nastavenia je dobré optimalizovať po nasadení bezdrôtovej siete na základe meraní sily signálu. Od hodnoty SNR nezávisí len voľba MCS, ale aj rozhodnutie klienta re-asociovať sa k inému prístupovému bodu v rámci roamingu. Ak klientske zariadenie detekuje nízke hodnoty SNR, začne generovať viac rámcov *Probe Request* na vyhľadanie prístupového bodu s lepším signálom. Tieto riadiace rámce sú formou nadbytočnosti, ktorá znižuje priepustnosť bezdrôtovej siete.

Rovnako sú formou nadbytočnosti riadiace *beacon* rámce. V prípade, že je v bezdrôtovom systéme nakonfigurovaný väčší počet SSID, zvyšuje sa počet týchto rámcov, pretože sú v pravidelných intervaloch vysielané pre každé SSID. Je preto odporúčané minimalizovať počet SSID na prístupový bod. Taktiež ak je v bezdrôtovom systéme možná konfigurácia intervalu medzi *beacon* rámcami je vhodné tento interval predĺžiť. Riadiace rámce zaberajú výraznú časť vysielacieho času aj z toho dôvodu, že sú prenášané základnými prenosovými rýchlosťami. Vo väčšine bezdrôtových systémov určených pre podnikový segment je možné konfigurovať aj prenosovú rýchlosť riadiacich rámcov. Je preto odporúčané zvážiť zvýšenie rýchlosti týchto rámcov.

### 3.5 Ukázkový príklad

Predpokladajme, že je požadované navrhnuť bezdrôtovú sieť pre konferenčné centrum s kapacitou 600 účastníkov a každý z účastníkov disponuje dvoma klientskými zariadeniami, ktoré bude chcieť pripojiť k bezdrôtovej sieti. Maximálny počet asociovaných zariadení je teda  $N_{asoc} = 1200$ . Ďalej budeme predpokladať, že nie viac ako 70% klientov bude aktívnych súčasne. Podľa vzťahu (4) za predpokladu maximálneho počtu 150 asociovaných klientov na AP dostaneme odhadovaný počet prístupových bodov  $N_{AP} = 6$ . V prípade plánovaného kanálového rozloženia pozostávajúceho z kanálov o šírke 20 MHz, je možné použiť 6 rôznych neprekrývajúcich sa kanálov. Bezdrôtovú sieť budeme plánovať tak, aby sme zabezpečili SNR aspoň 25 dB a bolo možné použiť maximálne prenosové rýchlosti, podľa [19] tomu odpovedá MCS 7.

Zloženie klientských staníc účastníkov konferencie môže byť rôzne a odhadneme, že zariadenia budú v priemere podporovať technológiu MIMO typu 2x2:2. Na základe typu zariadení, šírky kanálu a modulačnej schémy možno odhadnúť priepustnosť kanála podľa vzťahu (3). Pre 20 MHz kanál, MIMO 2x2:2, MCS 7 a po započítaní faktora zhoršenia 10% je priemerná priepustnosť kanála  $P_{k,AV} = 87,8$  Mbit/s.

Celková priepustnosť bezdrôtového systému je tak podľa vzťahu (1)  $CPS = 526,5$  Mbit/s. Pre konferenčné centrum je predpokladaný typ aplikácií prehliadanie webových stránok, prípadne iných aplikácie s maximálnym operačným cyklom 25%.

Priemerná priepustnosť na klientskú stanicu bude podľa vzťahu (2)  $P_{Sta,AV} = 2,5$  Mbit/s. V Tab. 5 sú uvedené výpočty pre uvažovaný príklad bezdrôtovej siete.

Tab. 5 Výpočty pre ukázkový príklad

maximálny počet účastníkov	600	
počet zariadení na účastníka	2	
počet asociovaných zariadení	$N_{asoc}$	1200
počet súčasne aktívnych zariadení	$N_{akt}$	70%
		840
počet asociovaných zariadení na AP	$N_{AP,asoc,limit}$	150
počet prístupových bodov	$N_{AP}$	6
faktor zhoršenia	10%	
odhadovaná priepustnosť kanála	$P_{k,AV}$	87,8 Mbit/s
celková priepustnosť systému	CPS	526,5 Mbit/s
operačný cyklus aplikácií	OC	25%
priepustnosť na zariadenie	$P_{Sta,AV}$	2,5 Mbit/s

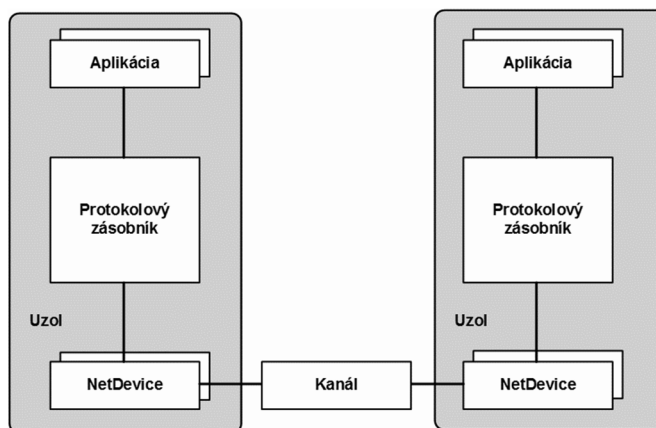
## 4 SIMULÁTOR NS-3

NS-3 je simulačný nástroj určený primárne k výuke a výskumu v oblasti networkingu. Tento simulátor je vyvíjaný v rámci projektu NS-3 od roku 2006 a je voľne dostupný pod licenciou GNU GPLv2. Primárne je vyvíjaný pre Linuxové platformy. NS-3 softvér je knižnicou, obsahujúcou moduly na simuláciu siete implementované ako objekty C++. Umožňuje simulovať siete založené na IP, množstvo statických aj dynamických smerovacích protokolov a taktiež rôzne bezdrôtové siete a zahŕňa moduly pre vrstvy L1 a L2 na simulovanie bezdrôtových sietí ako je Wi-Fi, WiMAX alebo LTE. Vnútoraná štruktúra týchto modelov je blízka reálnym komunikačným systémom. Simulácie je možné vytvoriť jednoducho napísaním simulačných skriptov v jazyku C++ alebo Python [11]. Simulátor nemá žiadne grafické rozhranie a je ovládaný z príkazového riadku. Jednotlivé simulácie môžu byť vizualizované v programe NetAnim, ktorý vytvára animácie na základe XML súborov zachytených počas simulácie [13]. NS-3 je aktuálne jediný voľne dostupný simulačný softvér, ktorý podporuje štandard 802.11ac. V tejto diplomovej práci sme pracovali s verziou NS-3.26 v operačnom systéme Linux na distribúcii Ubuntu 16.04.1 LTS.

### 4.1 Štruktúra NS-3

Kľúčovými prvkami simulátora sú uzly. Uzol *Node* reprezentuje sieťový prvok (napr. počítač, prístupový bod, router a i.), ku ktorému je možné priradiť aplikácie – procesy prebiehajúce na aplikačnej vrstve používané ako generátor alebo príjemca paketov. Aby uzol mohol komunikovať s ostatnými uzlami v sieti, musí mať sieťové rozhranie *NetDevice*. Uzly komunikujú pomocou definovaných kanálov, ktoré predstavujú prenosové médium a podobne ako skutočné zariadenia, môžu mať viacero sieťových rozhraní, cez ktoré môžu byť pripojené k danému médiu [11]. Základný model siete v NS-3 je zobrazený na Obr. 15.

Aby bola medzi uzlami možná výmena dát protokolov vyšších vrstiev, každý uzol musí mať nainštalovaný protokolový zásobník. Primárne je využívaný TCP/IP protokolový zásobník a protokoly ako napríklad IPv4, IPv6, TCP a UDP. Jednotlivým uzlom je taktiež možné určiť model mobility na simulovanie pohybu, prípadne statickej pozície daného uzlu [11].



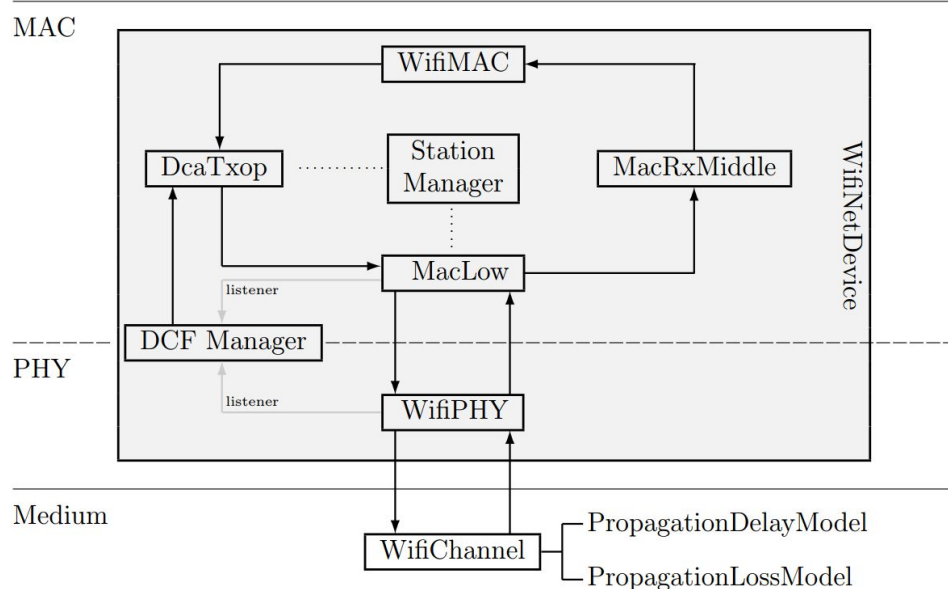
Obr. 15 Základný model siete v simulátore NS-3



Simulátor umožňuje konfiguráciu najnižších vrstiev jednotlivých modulov, čo je však veľmi komplexné. Z toho dôvodu sú k dispozícii niektoré pomocné triedy *Helper*, ktoré umožňujú konfiguráciu uzlov, kanálov a sieťových rozhraní s východzími nastaveniami. Tieto triedy disponujú rozhraním API, aby bolo možné atribútmi upraviť východzie nastavenia. Popis východzieho nastavení jednotlivých tried a taktiež konfigurovateľných atribútov je uvedený v dokumentácii k simulátoru NS-3 [12].

## 4.2 Implementácia štandardu IEEE 802.11 v NS-3

V tejto časti predstavíme základné moduly, ktoré implementuje NS-3 na modelovanie štandardu 802.11. Trieda *WifiNetDevice* predstavuje bezdrôtovú sieťovú kartu zariadenia a obsahuje objekty na vytvorenie kanála *WifiChannel*, fyzickej vrstvy *WifiPhy*, linkovej podvrstvy MAC *WifiMac* a *WifiRemoteStationManager* [12]. Architektúra wifi modulu v NS-3 je zobrazená na Obr. 16.



Obr. 16 Architektúra modulu wifi v simulátore NS-3 [14]

### 4.2.1 Model podvrstvy MAC

Funkcionalita MAC podvrstvy je v NS-3 rozdelená medzi nasledovné triedy [12]:

- *MacLow* – zabezpečuje transakcie kontrolných rámcov RTS/CTS a ACK a dátových rámcov.
- *DcfManager* – spolu s *DcaTxop* implementujú funkcionality DCF. Tieto triedy spracovávajú informácie o stave kanála od triedy *WifiPhy*, na základe ktorých udeľujú prístup k médiu.
- *DcaTxop* prípadne *EdcaTxopN* – zabezpečujú obsluhu front. *DcaTxop* si udržiava aktuálny rámec, až kým nepríde informácia o jeho správnom doručení. Ďalšie rámce od vyšších vrstiev sú zatiaľ zoradované vo fronte *WifiMacQueue*. Trieda *EdcaTxopN* je určená pre stanice s podporou QoS.

- *MacTxMiddle* a *MacRxMiddle* – zabezpečujú fragmentáciu/defragmentáciu rámcov. *MacTxMiddle* prideluje rámcu číslo sekvencie a *MacRxMiddle* na základe tohto čísla sekvencie zahadzuje prípadné duplicitné rámce.
- *WifiRemoteStationManager* – udržiava zoznam stavov a parametre prenosu ako prenosovú rýchlosť, údaje o SNR z prijatých paketov, počítadlá retransmisíí a i..
- *WifiMac* – úlohou tejto triedy je generovanie *beacon* rámcov, asociačných rámcov a *probe* žiadostí a odpovedí. Trieda *WifiMac* rozlišuje:
  - klientské stanica STA,
  - prístupové body AP,
  - stanice, ktoré sú súčasťou IBSS.

#### 4.2.2 Model fyzickej vrstvy

Bezdrôtový kanál je daný modelom propagačného oneskorenia *PropagationDelayModel* a modelom strát vznikajúcich šírením signálu *PropagationLossModel*. Podľa konfigurácie propagačného oneskorenia trieda *WifiChannel* pozdrží prichádzajúce pakety o vypočítané oneskorenie. V súčasnosti NS-3 podporuje dva modely propagačného oneskorenia: *RandomPropagationDelayModel* a *ConstantSpeedPropagationDelayModel*. Prvý z nich pridáva náhodnú hodnotu oneskorenia každému rámcu a druhý pridáva konštantnú hodnotu oneskorenia všetkým rámcu rovnako.

*PropagationLossModel* v NS-3 simuluje straty šírením cez prenosové médium. Na vypočítanie prijímaného výkonu sú modelované straty aplikované na vysielač výkon a následne je táto informácia odovzdaná triede *WifiPhy*. Na výpočet strát je možné použiť dva modely logaritmický model daný vzťahom (5), ktorý uvažuje vzdialenosť  $d$  medzi vysielačom a prijímačom a exponent  $n$  udávajúci straty,

$$L = 10 n \log d \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

a model odvodený z Friisovej prenosovej rovnice daný vzťahom (6), kde  $d$  je vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom stranou a  $\lambda$  je vlnová dĺžka prenášaného signálu.

$$L = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

Vzdialenosť  $d$  uvažovaná v týchto výpočtoch je daná pozíciou uzlov a modelom mobility zadanom v simulácii. Okrem toho trieda *WifiPhy* rozhoduje o tom, či je možné prijatý rámec správne dekódovať na základe prijatého výkonu a modelu chybovosti. Preddefinovaným modelom chybovosti pre štandardy 802.11 využívajúce OFDM je *NistErrorRateModel* [11].

Fyzická vrstva sa môže nachádzať v jednom zo šiestich stavov:

- **TX** – fyzická vrstva vysiela signál na pokyn MAC vrstvy, ktorá je nad ňou,
- **RX** – fyzická vrstva je synchronizovaná na príjem signálu a čaká na prijatie posledného bitu, aby ho mohla predať MAC vrstve,
- **IDLE** – fyzická vrstva nie je v žiadnom zo stavov TX, RX alebo CCA BUSY,

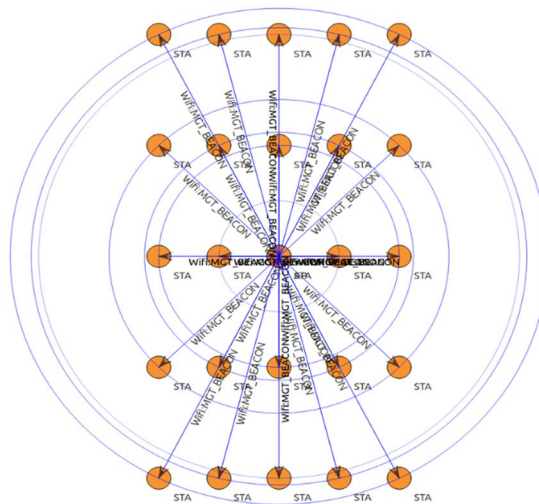
- **CCA BUSY** – fyzická vrstva nie je v stavoch TX, RX, ale nameraná úroveň signálu na nosnej frekvencii je vyššia ako definovaný prah detekcie,
- **SWITCHING** – fyzická vrstva je v stave prepínania kanálov,
- **SLEEP** – fyzická vrstva je v úspornom režime a nie je schopná prijímať rámce [14].

## 5 SIMULAČNÉ SCENÁRE

V tejto kapitole budú predstavené scenáre simulácií, ktorými sa zaoberá diplomová práca. Parametre simulačných scenárov boli zvolené s ohľadom na návrhové odporúčania a metódy pri nasadzovaní zmieňovaných sietí, a taktiež s prihliadnutím na limitácie simulačného nástroja NS-3. Štandard IEEE 802.11 je rozsiahla špecifikácia a nie všetky jej aspekty sú v simulačnom programe NS-3 zahrnuté. Podpora pre štandard 802.11ac v rámci NS-3 je stále vo vývoji, preto budú v tejto kapitole zhrnuté všetky predpoklady, na ktorých sú simulácie postavené a taktiež limitácie, ktoré použitie daného simulátora prináša.

V simuláciách je uvažované pokrytie priestoru v okolí AP takým spôsobom, aby odstup SNR dosahoval hodnoty, pri ktorých je možné použitie najvyšších modulačných a kódových schém. Ďalším predpokladom je minimalizácia interferencie susedným kanálom ACI, ktorá môže byť dosiahnutá vhodným kanálovým rozložením v rámci bezdrôtovej siete. Prístupovému bodu bol pridelený kanál podľa Tab. 6.

Na zníženie komplexnosti simulácií je uvažovaná infraštruktúrna bezdrôtová sieť pozostávajúca z jedného prístupového bodu, ku ktorému je asociovaných 25, 50, 75, 100, 125 alebo 150 staníc. Uvažovaná topológia siete je zobrazená na Obr. 17, kde AP je umiestnené uprostred sektora klientských staníc vo výške  $h_a = 3,5$  m. Veľkosť sektora je daná počtom zariadení a vzdialenosť medzi jednotlivými stanicami je  $\Delta x = 0,5$  m a  $\Delta y = 1$  m. Stanice sú umiestnené vo výške  $h_s = 1$  m. Rozmiestnenie je volené s prihliadnutím na možné umiestnenie staníc v konferenčnej či prednáškovej miestnosti. Obr. 17 zobrazuje bezdrôtovú sieť, v ktorej sa nachádza 1 AP a 25 staníc vizualizovanú programom NetAnim, zachytenú v momente, keď AP vysiela *beacon* rámec. V simuláciách je interval *beacon* rámcov nastavený na 100 ms.



Obr. 17 Topológia bezdrôtovej siete v programe NetAnim

Hoci v metódach návrhov vysokohustotných sietí nie je odporúčané používať väčšie šírky kanálov ako 20 MHz, pre porovnanie prebiehali simulácie cez všetky šírky kanálov definované štandardom 802.11ac a kanály boli pridelené podľa Tab. 6. V tabuľke sa tiež nachádza úroveň detekcie Wi-Fi signálov CCA a úroveň detekcie iných rušivých signálov EDT podľa [9], ktorá je nastavená pre jednotlivé šírky kanálov v simulačnom skripte.

Tab. 6 Kanály použité v simuláciách

kanál	číslo	$f_c$ [MHz]	EDT [dBm]	CCA [dBm]
20 MHz	36	5180	-62	-82
40 MHz	38	5190	-59	-79
80 MHz	42	5210	-56	-76
160 MHz	50	5250	n/a	-73

Každý prístupový bod v simulácii je typu 4x4:4, stanica typu 2x2:2 a sú vybavené bezdrôtovou sieťovou kartou s podporou štandardu 802.11ac. Technológia MU-MIMO ani beamforming v simulátore zatiaľ nie sú podporované a v každom AP a klientskom zariadení sú simulované všesmerové antény. Hodnoty vysielacích výkonov a ziskov antén na konfiguráciu AP a klientských staníc boli prevzaté z [15].

Ako model fyzickej vrstvy bol zvolený *SpectrumWifiPhy* a na modelovanie chybovosti *NistErrorRateModel*. V prípade sietí vyskytujúcich sa v priestoroch prednáškových miestností prípadne konferenčných centier býva väčšina klientských staníc nepohyblivá, takže bol ako model mobility pre všetky uzly v simulácii nastavený *ConstantPositionMobilityModel* a žiaden z uzlov nie je pohyblivý.

Ako bolo spomínané v kapitole 2.1.2, v štandarde 802.11ac je možné zvoliť dĺžku ochranného intervalu GI. Simulácie prebiehali s nastavenou hodnotou GI = 400 ns.

NS-3 implementuje pre štandardy 802.11a/b/g niekoľko algoritmov na riadenie prenosovej rýchlosti, ktorá sa mení dynamicky v závislosti od SNR a úrovne prijatého signálu. Niektoré sú modelované podľa algoritmov, vyskytujúcich sa v reálnych zariadeniach. Pre štandardy 802.11n/ac je však vo verzii NS-3.26 podporovaný iba algoritmus *ConstantRateWifiManager*, ktorý používa rovnakú prenosovú rýchlosť pre každý vyslaný rámec počas celej simulácie. Atribútmi je možné nastaviť prenosové rýchlosti pre dátové a kontrolné rámce. Pre kontrolné a dátové rámce boli zvolené prenosové rýchlosti dané schémami MCS 3, 5 a 8.

V štandarde 802.11ac sú kontrolné rámce RTS/CTS využívané na dynamické alokovanie šírky pásma ako bolo uvedené v kapitole 2.3.2. V simulačných scenároch je však šírka kanála pevne daná počas celej simulácie. Navyše podľa [14] nie je vo verzii NS-3.26 podporované prenášanie RTS/CTS pomocou HT a VHT formátov, preto sú tieto kontrolné rámce v simuláciách vypnuté.

Sieťové adresy IP verzie 4 sú uzlom pridelované z rozsahu 10.0.0.0/24, čo je na simulovanie siete obsahujúcej maximálne 151 uzlov dostatočný počet. Takto definovaná sieť bola podrobená testom priepustnosti. Dátové prenosy boli modelované pomocou konštantného toku UDP datagramov pomocou aplikácie NS-3 *On/OffHelper*. Táto aplikácia je generátor dátovej prevádzky na základe zadaných parametrov, v tomto prípade generujúci IP pakety o veľkosti 1500 B rýchlosťou 2 Mbit/s. Táto rýchlosť je rýchlosť dát na aplikačnej vrstve a bola zvolená podľa Tab. 4. V simuláciách v smere od klientov k AP (uplink) bola na prístupový bod nainštalovaná aplikácia *PacketSink* za účelom príjmu UDP datagramov. V simuláciách v opačnom smere (downlink) bol zdrojom generovania dátovej prevádzky prístupový bod, a aplikácia *PacketSink* bola nainštalovaná na každé z klientských zariadení. Všetka dátová prevádzka má rovnakú prioritu a je zatriedená do prístupovej kategórie AC\_BE.

Na určenie priepustnosti bol v simuláciách použitý modul *FlowMonitor*, ktorý v NS-3 poskytuje flexibilný systém na meranie výkonu sieťových protokolov. Modul používa sondy inštalované na uzloch v sieti k sledovaniu paketov, ktoré si medzi sebou vymieňajú, a zachytáva rôzne parametre ako napríklad počet prijatých/vyslaných paketov, počet prijatých/vyslaných bajtov, oneskorenie, počet stratených paketov. Tieto informácie sú ukladané do .xml súboru a môžu byť vizualizované programom NetAnim. Pakety sú zoradené podľa dátového toku, ku ktorému patria na základe zdrojovej a cieľovej IP adresy a portu transportného protokolu. Počet dátových tokov určuje počet aktívnych klientských zariadení a v simulácii je zadávaný parametrom v príkazovom riadku v percentách z celkového počtu asociovaných zariadení. Priepustnosť dátového toku  $P_k$  je definovaná ako počet korektne prijatých bitov za sekundu a v simulácii je vypočítaná pomocou vzťahu:

$$P_k = \frac{N_{Rx,Bytes} * 8}{(t_{gen,end} - t_{gen,start}) * 1024 * 1024} \quad [\text{Mbit/s}] \quad (7)$$

kde  $N_{Rx,Bytes}$  je počet korektne prijatých bajtov,  
 $t_{gen,start}$  je čas začiatku generovania dátovej prenosu [s],  
 $t_{gen,end}$  je čas ukončenia generovania dátovej prenosu [s].

Priemerná priepustnosť na klienta  $P_{AV}$  je následne vypočítaná takto:

$$P_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{k,i}}{n} \quad [\text{Mbit/s}] \quad (8)$$

kde  $n$  je počet dátových tokov.

Dáta získané počas simulácie sú zapisované do súboru a následne spracovávané programom Matlab. NS-3 pomocou funkcie *EnablePcap* umožňuje zachytávanie súborov typu .pcap na jednotlivých uzloch, ktoré je možné analyzovať v programe Wireshark. Tab. 7 prehľadne zobrazuje parametre simulácií.

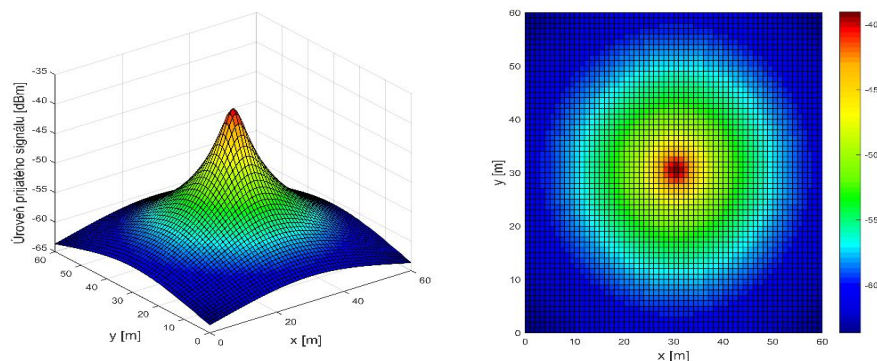
Tab. 7 Parametre simulácií

AP	vysielací výkon	20 dBm
	počet vysielacích antén	4
	počet prijímacích antén	4
	zisk antény	0 dBi
STA	vysielací výkon	15 dBm
	počet vysielacích antén	2
	počet prijímacích antén	2
	zisk antény	-2 dBi
Štandard		<b>IEEE 802.11ac</b>
Šírka kanála		20 MHz, 40 MHz, 80 MHz alebo 160 MHz
Model fyzickej vrstvy		<i>SpectrumWifiPhy</i>
Model chybovosti		<i>NistErrorRateModel</i>
Úroveň detekcie energie EDT		v závislosti od šírky kanála podľa [9], v Tab. 6
Úroveň detekcie CCA		v závislosti od šírky kanála podľa [9], v Tab. 6
Algoritmus dátového toku		<i>ConstantRateWifiManager</i>
Model mobility		<i>ConstantPositionMobilityModel</i>
Čas simulácie		11 s (generovanie dátovej prevádzky 10 s)
MCS		3 (16-QAM, 1/2), 5 (64-QAM, 2/3) alebo 8 (256-QAM, 3/4)
Ochranný interval GI		400 ns
RTS/CTS		žiadne
Beacon interval		100 ms

## 6 VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

### 6.1 Sila signálu v okolí prístupového bodu

Na určenie sily signálu v okolí AP bola prevedená simulácia, ktorá zaznamenáva úroveň prijatého signálu. Meranie úrovne prebiehalo pomocou klientskej stanice asociovanej k AP, prechádzajúcej jednotlivými bodmi priestoru. Prístupový bod je v tomto prípade umiestnený na súradniciach  $[x, y] = [30 \text{ m}, 30 \text{ m}]$  vo výške  $h_a = 3,5 \text{ m}$  a stanica bola v každom simulovanom bode  $[x, y]$  umiestnená vo výške  $h_s = 1 \text{ m}$ . Úrovne signálu boli odčítané pomocou NS-3 funkcie *MonitorSniffRX* triedy *WifiPHY*, ktorá umožňuje získať informácie ako číslo kanála, frekvenciu a úroveň prijatého signálu z rámcov prenášaných medzi prístupovým bodom a zariadením. Obr. 18 znázorňuje úrovne prijatého signálu v okolí AP, pri použití kanála číslo 38 so šírkou 40 MHz. So zmenou kanála by došlo k malej zmene úrovni prijatého signálu v dôsledku zmeny frekvencie.



Obr. 18 Úroveň prijatého signálu pre kanál 38

Tak ako bolo očakávané, sila signálu klesá s narastajúcou vzdialenosťou od prístupového bodu. Tento pokles je daný zvoleným modelom propagačných strát, ktorý bol v tomto prípade *FriisPropagationLossModel*. Najvyššiu úroveň prijatého signálu zaznamenala stanica v bode  $[x, y] = [30 \text{ m}, 30 \text{ m}]$ , kedy bola k prístupovému bodu v najbližšej vzdialenosti  $d = 2,5 \text{ m}$ . Úroveň signálu v tomto bode bola  $P_{\text{signal}} = -39,06 \text{ dBm}$ .

### 6.2 Simulácia pre rôzne MCS

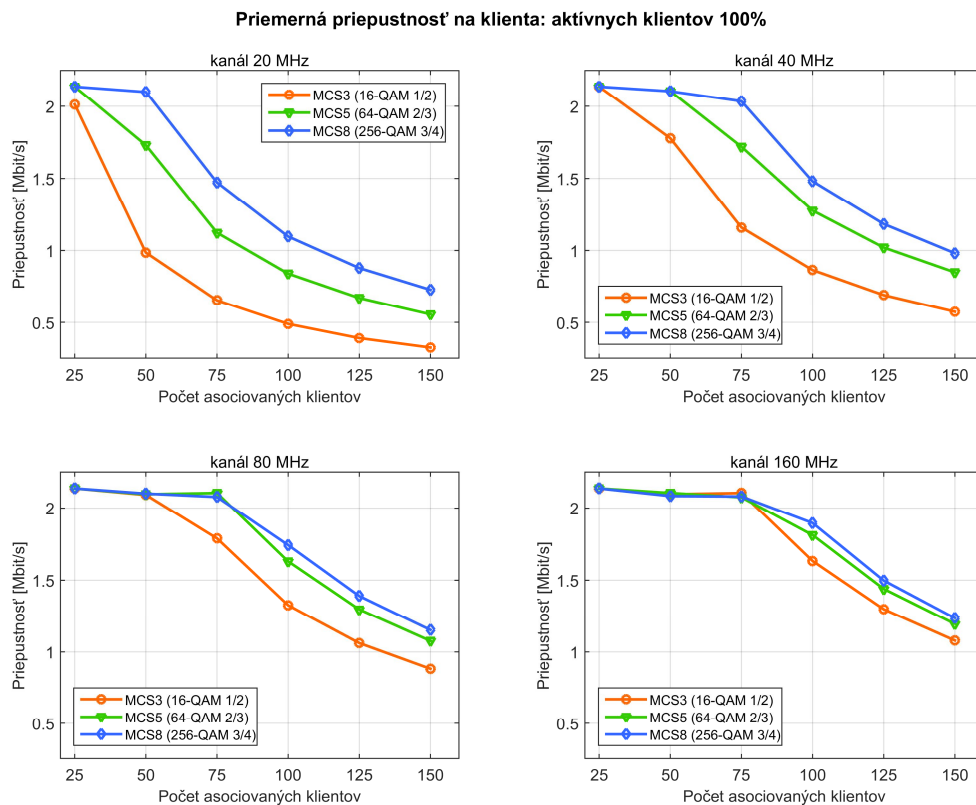
Sieť podľa topológie popísanej v kapitole 5 bola podrobená záťažovým testom. Simulácia bola prevedená pre modulačné a kódové schémy číslo 3, 5 a 8. V tomto prípade bol počet aktívnych klientov rovný počtu asociovaných klientov, teda v každom momente sa snažilo k médiu pristupovať 100% simulovaných klientských zariadení. Čas simulácie je stanovený na 11 sekúnd, generovanie dátovej prevádzky prebieha od prvej sekundy do konca simulácie, teda  $t_{\text{gen}} = 10 \text{ s}$ . Simulácie prebiehali so zvyšujúcim sa počtom asociovaných klientov od 25 do 150 s krokom 25. V prípade počtu 150 klientov sa všetci k prístupovému bodu a SSID *HighDensity-0* úspešne asociovali do prvej sekundy od začatia simulácie ako môžeme vidieť na Obr. 19, ktorý zobrazuje zachytené rámce asociačných žiadostí

a odpovedí pre simuláciu 150 klientov. Asociačná odpoveď prístupového bodu na žiadosť posledného klienta je zvýraznená modrou farbou.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
603	0.072583	00:00:00_00:00:98	00:00:00_00:00:21	802.11	168	Association Response, SN=147, FN=0, Flags=.....C
605	0.072745	00:00:00_00:00:98	00:00:00_00:00:8d	802.11	168	Association Response, SN=148, FN=0, Flags=.....C
607	0.074142	00:00:00_00:00:6e	00:00:00_00:00:98	802.11	139	Association Request, SN=0, FN=0, Flags=...R...C, SSID=HighDensity-0
609	0.074346	00:00:00_00:00:98	00:00:00_00:00:6e	802.11	168	Association Response, SN=149, FN=0, Flags=.....C
6056	0.500345	00:00:00_00:00:76	00:00:00_00:00:98	802.11	139	Association Request, SN=1, FN=0, Flags=.....C, SSID=HighDensity-0
6072	0.501203	00:00:00_00:00:98	00:00:00_00:00:76	802.11	168	Association Response, SN=545, FN=0, Flags=.....C

Obr. 19 Asociačné žiadosti a odpovede v programe Wireshark

Obr. 20 znázorňuje priemernú priepustnosť na klienta  $P_{AV}$  pri použití rôznych modulačných a kódových schém MCS 3, 5 a 8 a rôznych širok kanálov. Dátová prevádzka v tejto simulácii prechádzala v smere od prístupového bodu ku klientským zariadeniam. Na aplikačnej vrstve bola generovaná s rýchlosťou 2 Mbit/s, s využitím UDP ako transportného protokolu a veľkosťou IP paketu 1 500 B.



Obr. 20 Priemerná priepustnosť na klienta pre MCS 3, 5 a 8

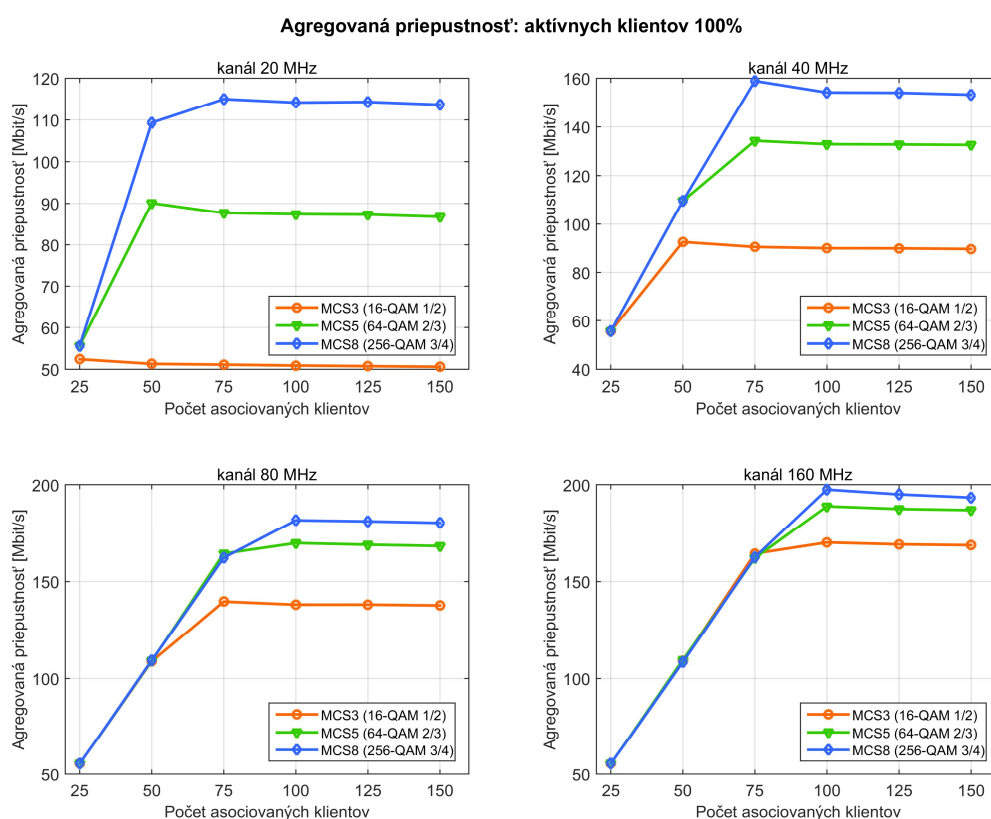
Z grafov je vidieť, že priemerná priepustnosť na klienta klesá so zvyšujúcim sa počtom aktívnych klientov. Taktiež ako sa dalo očakávať, vyššie priepustnosti sú dosahované pri použití vyššej modulácie. Ako vidieť u 80 a 160 MHz kanála, rozdiel v priemernej priepustnosti na klienta pri použití MCS 5 a 8 nie je veľký, čo je pravdepodobne spôsobené tým, že daný model prevádzky nie je schopný vyťažiť kanál na maximum. Maximálne prenosové rýchlosti definované na fyzickej vrstve pri použití MCS 3, 5 a 8, krátkeho ochranného intervalu GI a klientských zariadení vo verzii MIMO 2x2:2 sú uvedené v Tab. 8.



Tab. 8 Maximálne prenosové rýchlosti dané schémami MCS 3, 5 a 8

MCS index	Počet priestorových tokov	Modulácia a kódovanie	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
			Prenosová rýchlosť [Mbit/s]			
3	2	16-QAM, 1/2	57,8	120,0	260,0	520,0
5		64-QAM, 2/3	115,6	240,0	520,0	1040,0
8		256-QAM, 3/4	173,3	360,0	780,0	1560,0

Ako je spomínané v kapitole 3.1, pomocou vzťahu (3) je možné odhadnúť priepustnosť jedného klienta využívajúceho bezdrôtovú sieť samostatne z prenosovej rýchlosti po započítaní protokolovej nadbytočnosti MAC+IP+UDP. Na Obr. 21 je zobrazená agregovaná priepustnosť kanála pri použití MCS 3, 5 a 8 pre simulované počty aktívnych klientov.



Obr. 21 Agregovaná priepustnosť kanála pre MCS 3, 5 a 8

Ak by sme napríklad na maximum prenosovej rýchlosti pre MCS 5 a kanál o šírke 20 MHz aplikovali vzťah (3) za predpokladu UDP transportného protokolu, dostali by sme hodnotu  $P_{max} = 92,5$  Mbit/s. Agregovaná priepustnosť simulovaná pre tento prípad bola pre 150 klientov simuláciou stanovená na  $P_{agr} = 73,6$  Mbit/s, už bez uvažovania hlavičiek protokolov MAC+IP+UDP.

Hodnota  $P_{agr}$  je počítaná podľa vzťahu:

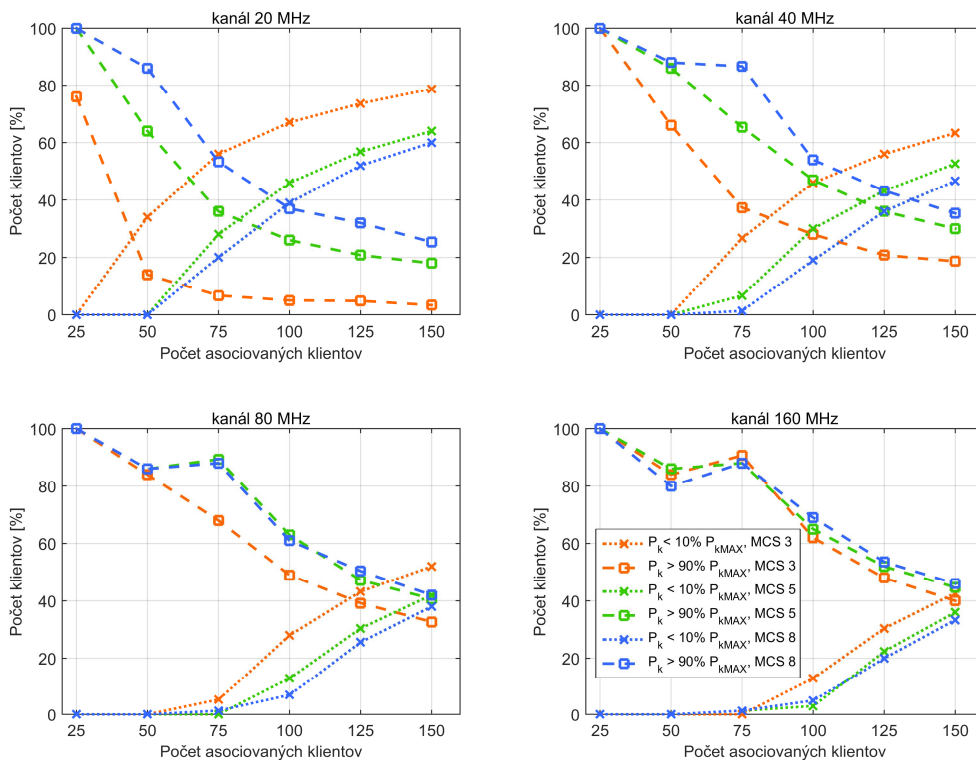
$$P_{agr} = \frac{N_{Rx, Packets} * PayloadSize * 8}{(t_{gen, end} - t_{gen, start}) * 1024 * 1024} \quad [\text{Mbit/s}] \quad (9)$$

kde  $N_{Rx, Packets}$  je počet prijatých paketov,

$PayloadSize$  je veľkosť užitočných dát UDP datagramu [B].

Rozdiel medzi odhadovanou priepustnosťou  $P_{max}$  a simulovanou  $P_{agr}$  je daný tým, že v  $P_{max}$  je započítaná iba protokolová nadbytočnosť a nie je zarátaná nadbytočnosť v podobe kontrolných a radiacích rámcov, pri viacerých klientoch snažiacich sa získať prístup k médiu.

Pri pohľade na Obr. 20 a grafy zobrazujúce priemernú priepustnosť na klienta by sa mohlo zdať, že pri použití kanála o šírke 20 MHz, počte klientov 100 a použití MCS 8, každý z nich dosahuje priepustnosť okolo hodnoty 1 Mbit/s. Je však potrebné si uvedomiť, že graf zobrazuje priemernú priepustnosť a skutočné hodnoty pre jednotlivých klientov sa môžu výrazne líšiť.



Obr. 22 Počet klientov s daným percentom priepustnosti pre MCS 3, 5 a 8

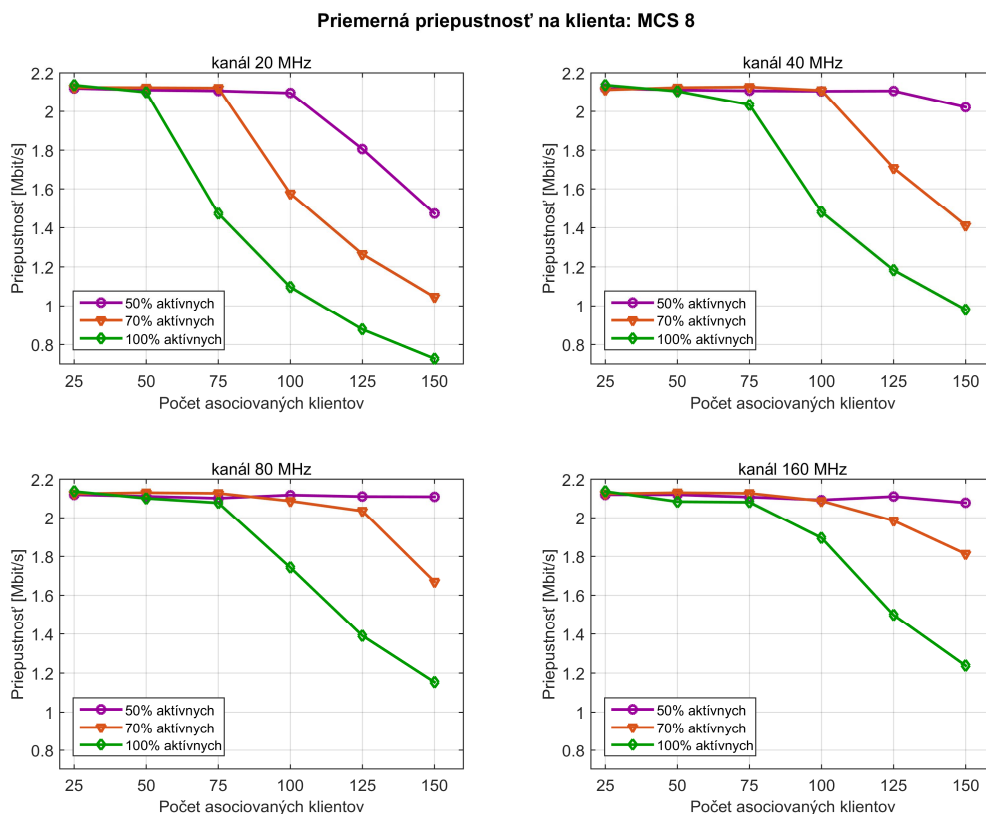
V grafoch na Obr. 22 je čiarkovane vyznačené percento klientov, ktorí dosahujú viac ako 90% z maximálnej priepustnosti na klienta, ktorá je možná pre daný kanál a MCS. Bodkovane je vyznačené percento klientov, ktorí dosahujú menej ako 10% z maximálnej priepustnosti. Napríklad u kanálu so šírkou 20 MHz, pri použití MCS 8 (modrá čiara) a počte klientov 50 vidíme, že 86% klientov dosahuje viac ako 90% maximálnej priepustnosti dosiahnuteľnej pre dané parametre, a žiaden z klientov neprenáša dáta rýchlosťou menšou ako je 10% maxima. Čím vyššie hodnoty nadobúda bodkovaná čiara, tým väčší počet klientov dosahuje pri uvažovanom modeli dátovej prevádzky, priepustnosť približne pod 200 kbit/s.

Môžeme teda povedať, že pre zadané parametre za predpokladu použitia maximálnych prenosových rýchlostí je hranica použiteľnosti 20 MHz kanála s ohľadom na spokojnosť užívateľov pri 50 súčasne aktívnych klientských zariadeniach. So zvyšujúcou sa šírkou kanála sa táto hranica posúva k vyšším počtom užívateľov, napríklad u 80 MHz kanálu je pri súčasne 75 súčasne aktívnych klientských staníc.

### 6.3 Simulácia pre rôzny počet aktívnych klientov

Táto simulácia bola postavená na rovnakej topológii ako simulácia v kapitole 6.2 a prevedená pre modulačnú a kódovú schému MCS 8. Simulácie prebiehali so zvyšujúcim sa počtom asociovaných klientov od 25 do 150, avšak nie všetci klienti boli aktívni súčasne. V jednotlivých simuláciách generovalo dátovú prevádzku vždy len určité percento asociovaných klientov a to 50, 70 alebo 100%. Čas simulácie je opäť stanovený na 11 sekúnd a generovanie dátovej prevádzky prebieha od prvej sekundy do konca simulácie, teda  $t_{gen} = 10$  s. Dátová prevádzka je zadaná v smere od prístupového bodu ku klientským staniciam, opäť využitím konštantného toku UDP datagramov s rovnakými parametrami ako v predošlom prípade.

Na Obr. 23 je zobrazená priemerná priepustnosť na klienta pre tento simulačný scenár. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade je z grafov vidieť, že priemerná priepustnosť na klienta klesá so zvyšujúcim sa počtom aktívnych klientských zariadení. Je však rozdiel medzi hodnotami priepustnosti v prípade, že počet asociovaných klientov je vyšší ako počet aktívnych. Napríklad pre počet 75 asociovaných klientov a súčasne aktívnych 100% je priemerná priepustnosť na klienta  $P_{75,100\%} = 2,034$  Mbit/s. Pri počte 150 asociovaných klientov a súčasne aktívnych 50% je priepustnosť  $P_{150,50\%} = 2,022$  Mbit/s. V oboch prípadoch je súčasne aktívnych 75 zariadení, no priemerná priepustnosť na aktívneho klienta je nižšia v prípade viacerých asociovaných zariadeniach.

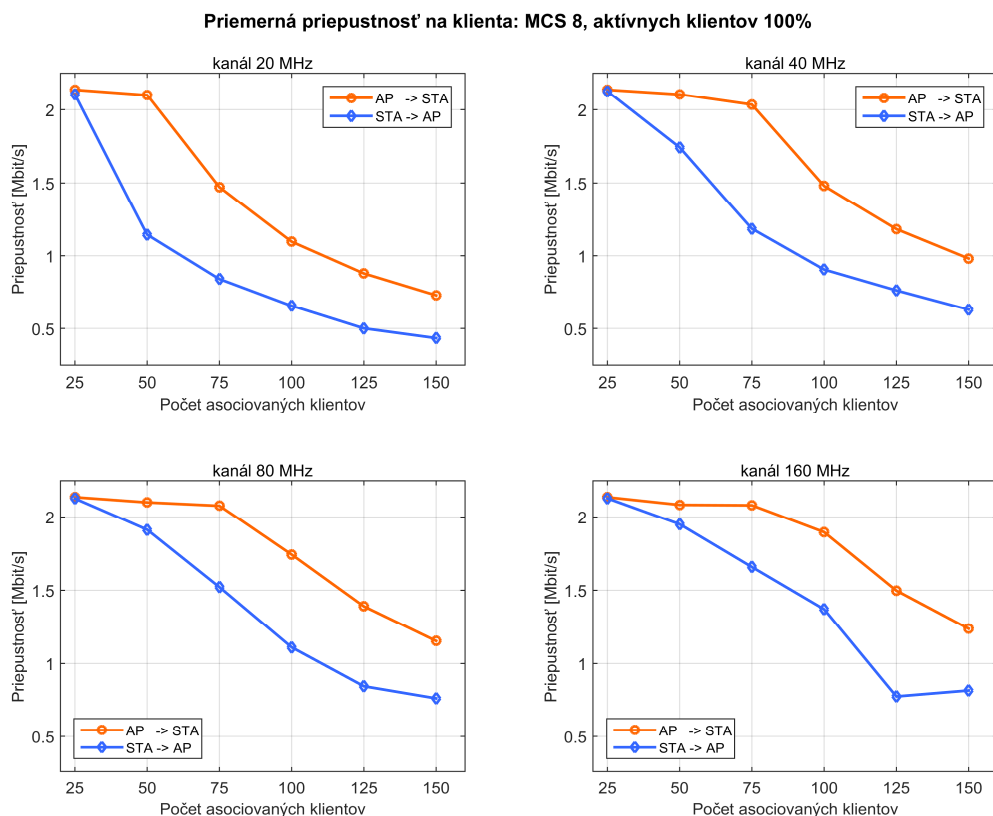


Obr. 23 Priemerná priepustnosť na klienta pre 50, 70 a 100% aktívnych klientov

### 6.3 Simulácia dátovej prevádzky v rôznych smeroch

Pre modulačnú a kódovú schému MCS 8 bola simulovaná dátová prevádzka v smere od klientského zariadenia k prístupovému bodu, ako aj v opačnom smere od klientskej stanice k AP. V oboch prípadoch boli v priebehu simulácie súčasne aktívni všetci asociovaní klienti. Model prevádzky bol definovaný rovnako ako v predchádzajúcich dvoch prípadoch.

Na Obr. 24 je zobrazená priemerná priepustnosť na klientské zariadenie a Obr. 25 ilustruje agregovanú priepustnosť jednotlivých kanálov pri prevádzke v smere od klienta k AP (*uplink*) a prevádzke v smere od prístupového bodu ku klientovi (*downlink*).

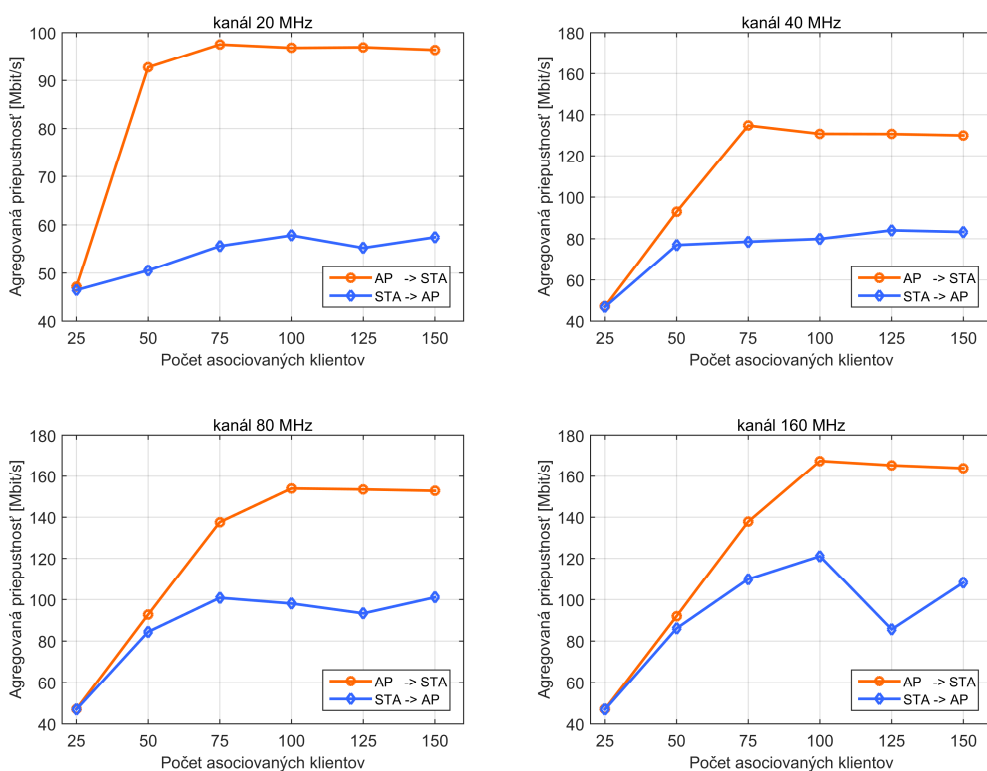


Obr. 24 Priemerná priepustnosť na klienta pri rôznom smere dátovej prevádzky

Z grafov na Obr. 24 a Obr. 25 je viditeľný výrazný rozdiel v priepustnosti medzi vzostupným a zostupným smerom, čo je spôsobené tým, že v prípade zostupného smeru je zariadením, ktoré vysiela dáta iba AP a teda nie je potrebné aby súťažilo o prístup k médiu s ostatnými zariadeniami. V prípade vzostupného smeru je konkurencia v súťaži o prístup k médiu násobne väčšia. Čím viac staníc sa snaží pristupovať k médiu súčasne, tým častejšie dochádza ku kolíziám, retransmisiám rámcov a teda znižovaniu priepustnosti.

Z výsledkov je zjavné, že v prípade ak sa o prístup k médiu pokúša viac ako 50 klientských zariadení súčasne, priemerná priepustnosť na klienta sa pohybuje v stovkách kilobitov za sekundu. V skutočnosti sa pri takých počtoch zariadení, niektorí klienti vôbec nedostanú k vysielaníu dát.

**Agregovaná priepustnosť: MCS 8, aktívnych klientov 100%**



*Obr. 25 Agregovaná priepustnosť pri rôznom smere dátovej prevádzky*

## 7 ZHRNUTIE

Táto práca analyzuje metódy návrhov bezdrôtových sietí pre veľmi hustú prevádzku postavených na štandarde IEEE 802.11ac. S prihliadnutím na návrhové postupy a niektoré limitácie zhmútené v kapitole 5 sú v simulátore NS-3.26 prevedené simulácie vysokohustotnej bezdrôtovej siete.

Simulovaný sieťový model pozostáva z prístupového bodu a k nemu asociovaných klientských zariadení. Topológia je uvažovaná s ohľadom na možné rozmiestnenie staníc v prostredí konferenčných či prednáškových miestností. Parametre simulačných scenárov boli volené tak, aby bolo možné preskúmať limitné stavy bezdrôtovej siete, čo sa týka počtu súčasne aktívnych klientov a priepustností dosahovaných za stanovených podmienok. Analyzované boli tri simulačné scenáre:

1. pre rôzne simulačné a kódové schémy,
2. pre rôzne percento súčasne aktívnych klientských zariadení,
3. pre dátovú prevádzku v smere od prístupového bodu ku klientom a naopak.

Simulácie sú napriek odporúčaniam využívať v rámci vysokohustotných bezdrôtových sietí iba kanály o šírke 20 MHz, prevedené aj pre ostatné šírky kanálov definované štandardom 802.11ac, a ich predpokladom bol dostatočný odstup signálu od šumu pre umožnenie použitia modulačnej a kódovej schémy číslo 8. V simuláciách nebola okrem rušenia spôsobeného susednými klientskými stanicami uvažovaná žiadna ďalšia interferencia, ktorá by sa potenciálne mohla vyskytnúť v bezdrôtovej sieti, čo mohlo priaznivo ovplyvniť výsledky.

Simulácie ukázali, že so zvyšujúcim sa počtom klientských zariadení, klesá priepustnosť prenosového kanála a teda aj priemerná priepustnosť na jednu klientskú stanicu. Zo simulácií je taktiež vidieť, že pre väčšie šírky kanála sú dosahované vyššie agregované priepustnosti. Použitie napríklad 40 MHz kanála dvojnásobne zmenší množstvo použiteľných kanálov pri plánovaní kanálového rozloženia. Ak je však počet prístupových bodov potrebných na zabezpečenie pokrytia vnútorných priestorov menší ako počet dostupných 40 MHz kanálov, je možné za účelom zvýšenia priepustnosti použiť aj tieto šírky kanálov. V reálnych prístupových bodoch navyše funguje dynamické alokovanie šírky pásma ako bolo popísané v teoretickej časti, čo v NS-3 nebolo možné simulovať.

Vo väčšine prípadov pri použití MCS 8 bolo približne 50 súčasne aktívnych klientov schopných dosiahnuť požadovanú priepustnosť zadefinovaná modelom dátovej prevádzky. V prípade bezdrôtových sietí pre prostredia konferenčných či prednáškových miestností väčšinou nie je bežná situácia súčasnej aktivity 100% asociovaných klientov, a teda v takomto prostredí môže byť priemerná priepustnosť na klienta vyššia ako ukázali simulácie. Príklad 100% aktívnych klientov však môže byť predpokladaný v prípade využívania bezdrôtovej siete napríklad v školách na účely prenosu výukových videí.

Na realizáciu bezdrôtových sietí pre veľmi hustú prevádzku sa používajú kontroléry a prístupové body určené pre podnikový segment, ktoré vo väčšine prípadov operujú nie len v pásme 5 GHz, ale súčasne aj v pásme 2,4 GHz, čo umožňuje jedným prístupovým bodom zabezpečiť prístup k sieti väčšiemu počtu zariadení. V pásme 2,4 GHz sa nachádzajú len tri neprekrývajúce sa kanály, teda oproti pásmu 5 GHz má výrazne menšie možnosti, čo sa týka plánovania kanálového rozloženia. Preto je odporúčané uvažovať rozdelenie klientov medzi pásma 2,4 GHz a 5 GHz v pomere 25% k 75%.

Štandard 802.11ac definuje technológiu MU-MIMO, ktorá si určite vo vysokohustotných bezdrôtových sieťach nájde svoje patričné miesto. V priebehu roku 2016 sa začali na trhu objavovať prvé prístupové body druhej vlny 802.11ac zariadení, ktoré túto technológiu implementujú. MU-MIMO však vyžaduje podporu ako na strane prístupového bodu, tak aj na strane klientského zariadenia, čo v súčasnosti ešte nie je bežné.

S príchodom druhej vlny zariadení podporujúcich štandard 802.11ac treba brať do úvahy, že priepustnosť bezdrôtovej siete môže prekročiť gigabitové rýchlosti. Preto je potrebné pri návrhoch bezdrôtových sietí dimenzovať taktiež štrukturovanú kabeláž a prislúchajúcu L2 infraštruktúru tak, aby bola schopná zvládať takúto prevádzku a na napájanie prístupových bodov bude PoE+ nevyhnutnosťou.

## ZÁVER

Diplomová práca na tému *Bezdrôtové siete pre veľmi hustú prevádzku* je zameraná na analýzu mechanizmov pokrytia vnútorných priestorov bezdrôtovou sieťou postavenou na štandarde IEEE 802.11ac. Analytická časť sa zaoberá samotným štandardom IEEE 802.11ac, štruktúrou rámcov a princípmi na spodných dvoch vrstvách OSI modelu.

V ďalšej časti sú rozobrané metódy návrhu vysokohustotných bezdrôtových sietí a súhrn faktorov, ktoré treba vziať do úvahy pri návrhu WLAN primárne určenej do prostredia s vysokou hustotou klientských zariadení.

Súčasnú metódu návrhov boli modelované v simulátore NS-3.26, ktorý je stručne popísaný v kapitole 4. V kapitole 5 sú zhrnuté predpoklady a parametre simulačných scenárov, ktoré boli zvolené s ohľadom na návrhové odporúčania a analyzované metódy.

Výsledkom tejto práce sú simulačné skripty, ktorými boli simulované scenáre bezdrôtovej siete pre veľmi hustú prevádzku, za účelom preskúmania limitných stavov takejto siete, čo sa týka počtu súčasne aktívnych klientov a dosahovaných priepustností. Výstupy týchto simulácií popísané v kapitole 6.

Pôvodne bolo zamýšľané porovnať výsledky simulácií s výsledkami reálnej implementácie zmieňovanej siete, čo sa však nepodarilo realizovať z dôvodu nedostatku klientských zariadení s podporou štandardu 802.11ac.



## ZOZNAM ZDROJOV

- [1] WALKE, B., MANGOLD, S., BERLEMANN, L.: *IEEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2006. ISBN 04-700-1439-3.
- [2] COLEMAN, David D.: *CWNA: Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide: Exam CWNA-106*. 4th ed. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 11-188-9370-0.
- [3] *Využívání vymezených rádiových kmitočtů* [online]. [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <<https://www.ctu.cz/vyuzivani-vymezenych-radiovych-kmitoctu>>
- [4] GAST, M.: *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. 2nd ed. Farnham: O'Reilly, 2005. ISBN 05-961-0052-3.
- [5] GAST, M.: *802.11ac: A Survival Guide*. Beijing: O'Reilly, 2013. ISBN 14-493-4314-7.
- [6] RACKLEY, S.: *Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementation*. Oxford: Newnes/Elsevier, 2007, s. 137-250. ISBN 9780750667883.
- [8] HOLT, A., HUANG Chi-Yu: *802.11 Wireless Networks: Security and Analysis*. New York: Springer, 2010. ISBN 18-499-6275-8.
- [9] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *802.11ac-2013 - IEEE Standard for Information technology-- 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--Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz*. [online]. [cit. 2016-09-29]. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6687187. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6687187/>>
- [10] GAST, M.: *802.11n: A Survival Guide*. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2012. ISBN 14-493-1204-7.
- [11] *Dokumentácia k simulátoru NS-3 verzie 26* [online]. [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <<https://www.nsnam.org/ns-3-26/documentation/>>
- [12] *User Documentation of Wi-Fi Module* [online]. [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <<https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-user.html>>
- [13] *NetAnim* [online]. [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <<https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim>>
- [14] *Design Documentation of Wi-Fi Module* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <<https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-design.html>>

- [15] 802.11ax High Efficiency WLAN Study Group, "11-14-0980-14 TGax simulation scenarios," [online]. [cit. 2016-09-14].  
Dostupné z: <<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-14-00ax-simulation-scenarios.docx>>
- [16] BURBANK, Jack L., ANDRUSENKO, L., EVERETT, Jared S., KASCH, William T. M.: *Wireless Networking: Understanding Internetworking Challenges*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2013. ISBN 978-111-8122-389.
- [17] *Wireless LAN Design Guide for High Density Client Environments in Higher Education* [online]. [cit. 2016-11-22].  
Dostupné z: <[www.cisco.com/c/dam/en\\_us/./cisco\\_wlan\\_design\\_guide.pdf](http://www.cisco.com/c/dam/en_us/./cisco_wlan_design_guide.pdf)>
- [18] LUKASZEWSKI, Ch., LI, L.: *VERY HIGH-DENSITY 802.11ac NETWORKS* [online]. [cit. 2016-09-07].  
Dostupné z: <<https://community.arubanetworks.com/t5/Validated-Reference-Design/Very-High-Density-802-11ac-Networks-Validated-Reference-Design/ta-p/230891>>
- [19] *WiFi SNR to MCS data rate mapping* [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <<http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2014/09/wi-fi-snr-to-mcs-data-rate-mapping.html>>
- [20] TANENBAUM, Andrew S., WETHERALL, D.: *Computer networks*. 5th ed. Boston: Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 01-321-2695-8.
- [21] GONG, M. X., HART, B., LIANGFU X., a WANT, R.: *Channel Bounding and MAC Protection Mechanisms for 802.11ac*. *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011* [online]. IEEE, 2011, [cit. 2016-10-30]. DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133869. ISBN 978-1-4244-9268-8.  
Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6133869/>>

## ZOZNAM PRÍLOH

### A. Priložené CD:

- A1. Elektronická verzia diplomovej práce vo formáte PDF
- A2. Simulačný skript NS-3 na modelovanie sily signálu:  
*coverage.cc*
- A3. Simulačný skript NS-3 na modelovanie vysokohustotnej bezdrôtovej siete:  
*high-density.cc*
- A4. Skript na automatické spustenie simulácií a uloženie dát:  
*simulation\_run.sh*
- A5. Skripty programu Matlab na spracovanie dát získaných simuláciami:  
*coverage.m*  
*processing\_mcs3\_5\_8.m*  
*processing\_active50\_70\_100.m*  
*processing\_mcs8\_uplink\_downlink.m*