

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Matej Jošťák



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH
VLASTNOSTÍ BEZDRÁTOVÝCH TECHNOLOGIÍ IEEE
802.11AC/AD**

EXPERIMENTAL EVALUATION OF IEEE 802.11AC/AD WIRELESS TECHNOLOGY PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Jošták

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kryštof Zeman

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Matej Jošťák

ID: 139278

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální ověření přenosových vlastností bezdrátových technologií IEEE 802.11ac/ad

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce bude prozkoumat možnosti aktuálně dostupných bezdrátových technologií určených pro přenosy velkých objemů dat na krátké vzdálenosti. Vybrané technologie budou detailně popsány a u vybrané bude provedeno experimentální ověření přenosových vlastností v předem definovaných podmínkách. Toto měření bude provedeno za pomoci jednoduché aplikace vytvořené pro operační systém Android či Windows.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Develop. Android Developers [online]. [cit. 2016-09-14]. Dostupné z: <https://developer.android.com/develop/index.html>

[2] PERAHIA, Eldad, Carlos CORDEIRO, Minyoung PARK a L. Lily YANG. IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi. 2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. IEEE, 2010, , 1-5. DOI: 10.1109/CCNC.2010.5421713. ISBN 978-1-4244-5175-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5421713>

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Kryštof Zeman

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá experimentálnym overením prenosových vlastností bezdrôtových technológií, so zameraním sa na vysokorýchlostné prenosy. Pre meranie boli vybrané štandardy IEEE 802.11ac/ad. V teoretickej časti sa práca zaoberá popisom IoT a spôsobom komunikácie medzi zariadeniami, hlavne spôsobom M2M. Nasleduje chronologický popis štandardu IEEE 802.11. Praktická časť sa skladá z popisu dostupného hardwaru, po ktorom nasleduje podrobný popis návrhu a praktickej realizácie aplikácie a merania. V poslednej časti práca obsahuje dosiahnuté výsledky, ich hodnotenie a vyvodenie dôsledkov. V prílohe sa nachádzajú zdrojové kódy nami vytvorenej aplikácie a grafy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

IoT, M2M, 802.11ac/ad, WiFi, Rozšírená realita, Java, JavaFX, Iperf3

ABSTRACT

This bachelor work is about experimental verification features of wireless network, with focused on high speed transfers. For measurement was chose standard IEEE 802.11ac/ad. In the theoretical part, we describe the Internet of Things and communications between devices, especially the M2M communication. Then in work follows the chronological description of standard IEEE 802.11. The practical part is about describing the used hardware, after which follow the detailed describe of theoretical and practical realization of application and measurements itself. The last part of work is about measured values, its evaluation and makes conclusions. In the inclosure are source codes of our applications and graphs.

KEYWORDS

IoT, M2M, 802.11ac/ad, WiFi, Augmented reality, Java, JavaFX, Iperf3

JOŠŤÁK, Matej *Experimentální ověření přenosových vlastností bezdrátových technologií IEEE 802.11ac/ad*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Rok. 78 s. Vedúci práce bol Ing. Kryštof Zeman

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Experimentální ověření přenosových vlastností bezdrátových technologií IEEE 802.11ac/ad“ vypracoval(a) samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor(ka) uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil(a) autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol(-la) nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý(-á) následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Kryštofovi Zemanovi, za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



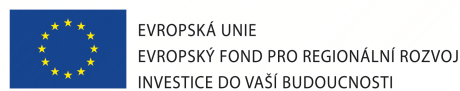
Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v tejto bakalárskej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)



OBSAH

Úvod	12
1 Internet vecí	13
1.1 História IoT	14
1.2 Komunikácia	14
1.2.1 Human-to-Human	15
1.2.2 Machine-to-Machine	15
1.2.3 Device-to-Device	15
2 Machine-to-machine	18
2.1 História M2M	18
2.2 Vlastnosti M2M	19
2.3 Protokoly, štandardy a technológie	20
2.3.1 IEEE 802.11	20
2.3.2 IEEE 802.15.1 - Bluetooth	21
2.3.3 IEEE 802.15.4 - ZigBee	21
2.3.4 IEEE 802.15.4 - Thread	21
2.3.5 Z-Wave	21
2.3.6 IEEE 802.15.4 - 6LowPAN	22
2.3.7 Cellular	22
2.3.8 NFC	22
2.3.9 Sigfox	22
3 Štandard IEEE 802.11	24
3.1 História	25
3.2 IEEE 802.11a	25
3.2.1 Špecifikácie	26
3.3 IEEE 802.11b	27
3.3.1 Špecifikácie	27
3.3.2 Modulácia	27
3.4 IEEE 802.11g	28
3.4.1 Špecifikácie	28
3.5 IEEE 802.11n	29
3.5.1 Špecifikácie	29
3.5.2 OFDM	30
3.5.3 MIMO	30
3.5.4 Anténne technológie	31

3.6	IEEE 802.11ac	31
3.6.1	Špecifikácie	31
3.6.2	Spektrálna maska	33
3.6.3	Modulácia Kódovej Schémy	34
3.6.4	256-QAM modulácia	35
3.6.5	Strážny interval	36
3.7	IEEE 802.11ad	36
3.7.1	Špecifikácie	36
3.7.2	Beamforming	38
4	Experimentálne overenie prenosových vlastností bezdrôtových technológií	40
4.1	Použitý hardware na meranie vlastností IEEE 802.11ac	40
4.1.1	Samsung Galaxy S7 SM-G930F	40
4.1.2	Intrinsyc's Open-Q™ 820 Development Kit	42
4.1.3	Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black	44
4.2	Realizácia merania IEEE 802.11ac	46
4.2.1	JAVA	46
4.2.2	Návrh a realizácia aplikácie	46
4.2.3	Metodika merania	48
4.3	Výsledky merania IEEE 802.11ac	50
4.4	Použitý hardware na meranie vlastností IEEE 802.11ad	52
4.4.1	Dell Wireless Dock D5000	52
4.4.2	Dell DW1601 Wireless card	53
4.4.3	HP Elitebook 8740w a desktop PC	54
4.5	Realizácia merania IEEE 802.11ad	55
4.5.1	Teoretická a praktická realizácia	55
4.5.2	Metodika merania	57
4.6	Výsledky merania IEEE 802.11ad	58
4.6.1	Zhodnotenie nameraných hodnôt	58
4.7	Meranie v EMC miestnosti	60
4.7.1	Meranie EMC	61
5	Záver	63
	Literatúra	66
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	70
	Zoznam príloh	74

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Internet Vecí	13
1.2	Human-to-Human komunikácia	15
1.3	Device-to-Device	16
2.1	Machine-to-machine	18
3.1	Spektrálna maska	34
3.2	64 - 256 QAM	35
3.3	Chybový vektor	36
3.4	Princíp technológie beamforming	39
4.1	Samsung Galaxy S7 SM-G930F	41
4.2	Intrinsyc's Open-Q™ 820 Develompment Kit	42
4.3	Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black	44
4.4	Grafický výstup aplikácie SpeedTest	49
4.5	Skoky v dôsledku čistenia pamäte	50
4.6	Dokovacia stanica DellD5000	53
4.7	Dell Wireless DW1601 QCA9005	54
4.8	Výsledná podoba navrhutej aplikácie	57
4.9	EMC	62
A.1	Samsung Galaxy S7 SM-G930F	75
A.2	Intrinsyc's Open-Q™ 820 Develompment Kit	76
A.3	Graf EMC vs Normálne prostredie	77
A.4	Závislosť rýchlosti na vzdialenosti pre TCP a UDP protokol	78

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Prehľad M2M prenosových technológií	23
3.1	Prehľad IEEE 802.11 technológií	24
3.2	Vlastnosti IEEE 802.11a	26
3.3	Typy modulácií a ich prenosové rýchlosti	26
3.4	Vlastnosti IEEE 802.11b	27
3.5	Zhrnutie fyzických vrstiev	28
3.6	Vlastnosti IEEE 802.11g	29
3.7	Vlastnosti IEEE 802.11n	30
3.8	Vlastnosti IEEE 802.11ac	32
3.9	Kľúčové frekvenčné vlastnosti	33
3.10	Spektrálna maska	34
3.11	Modulácie a kódové pomery pre rôzne MCS	35
3.12	Vlastnosti IEEE 802.11ad	37
3.13	Použité frekvencie vo svete podľa polohy	37
4.1	Prehľad vlastností Samsung Galaxy S7	41
4.2	Prehľad vlastností Open-Q™ 820	43
4.3	Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black	45
4.4	Namerané priemerné hodnoty Samsung Galaxy S7	51
4.5	Namerané priemerné hodnoty Intrinsyc's Open-Q™ 820	51
4.6	Namerané hodnoty pri tienení hlavou na vzdialenosť 5 m so zariadením Samsung Galaxy S7	52
4.7	Prehľad vlastností Dell D5000	53
4.8	Prehľad vlastností Dell DW1601	54
4.9	Namerané priemerné hodnoty rýchlosti TCP protokolu v závislosti na vzdialenosti zariadení	59
4.10	Namerané priemerné hodnoty rýchlosti UDP protokolu v závislosti na vzdialenosti zariadení	60
4.11	Namerané priemerné hodnoty Intrinsyc's Open-Q™ 820 v EMC miestnosti	61

ÚVOD

Cielom bakalárskej práce bolo experimentálne overenie prenosových vlastností bezdrôtových technológií, ktoré sú určené na prenos veľkých objemov dát na krátke vzdialenosti. Zvolený bol štandard IEEE 802.11, s jeho najnovšími implementáciami IEEE 802.11ac a IEEE 802.11ad. Tento štandard bol vybraný pre jeho vlastnosti a rozšírenosť. Pre meranie IEEE 802.11ac bola vytvorená aplikácia v programovacom jazyku Java. Pre IEEE 802.11ad bola použitá aplikácia Iperf3, pre ktorú bolo naprogramované GUI v jazyku JavaFX.

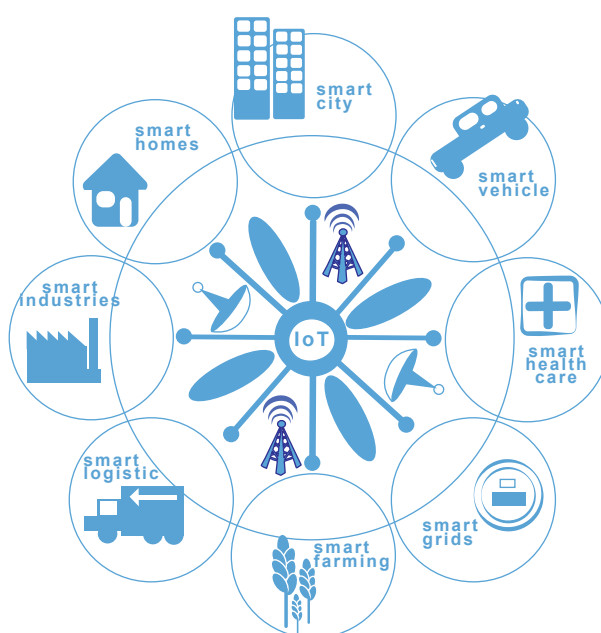
V prvej časti sa práca venuje teoretickému popisu Internetu vecí a popisu spôsobu komunikácie medzi zariadeniami. Detailnejšie sa venuje spôsobu M2M komunikácii, u ktorej sú uvedené aj najčastejšie použité štandardy a technológie. V ďalšej časti sa práca venuje podrobnejšiemu popisu štandardu IEEE 802.11, kde sú uvedené chronologicky všetky štandardy spolu s ich vlastnosťami a základnými údajmi, až po testované technológie IEEE 802.11ac a IEEE 802.11ad.

V praktickej časti sa práca zaoberá popisom vybraného hardwaru, pomocou ktorého bolo vykonané meranie. Ďalej popisuje zvolený programovací jazyk a zdôvodňuje jeho výber. Nasleduje praktický popis a realizácia navrhutej aplikácie. Poslednú časť praktickej časti tvorí podrobný popis metodiky a postupu meranie spolu s popisom jednotlivých krokov.

Nasleduje zhrnutie a hodnotenie dosiahnutých výsledkov. V priebehu práce sa nám naskytla možnosť zmerať elektromagnetickú kompatibilitu testovaných zariadení. V predposlednej časti sú popísané výsledky týchto meraní spoločne s grafmi a z ich vyhodnotením. V poslednej časti práca obsahuje namerané hodnoty, ktoré sú ďalej spracované do tabuliek a grafov. V závere diskutujeme a uvádzame dôvody rozdielu medzi očakávanými a dosiahnutými hodnotami a popisujeme technológie, ktoré nám to umožnili, hlavne technológiu beamforming-u. Grafy sa nachádzajú v prílohách kvôli väčšej prehľadnosti.

1 INTERNET VECÍ

V dnešnej dobe už Internet nie je len o ľuďoch, médiách a obsahu, ale začleňujú sa do neho aj rôzne „veci“ - transformuje sa do takzvaného Internetu Vecí (IoT – Internet of Things) obr.č. 1.1. Tieto „veci“ si rovnako ako inteligentné bytosti vymieňajú informácie, komunikujú medzi sebou a s ľuďmi a napomáhajú k zlepšeniu výrobného procesu a vytváraniu inteligentných prostredí. Dôležitou vlastnosťou je možnosť komunikácie cez Internet bez ľudskej interakcie [1].



Obr. 1.1: Internet Vecí

Tieto „veci“ sú vybavené potrebnou elektronikou, senzormi, softwarom a sieťovými prvkami tak, aby boli schopné zbierať požadované informácie, alebo vykonávať im zadané úlohy. Vďaka rozvoju elektroniky sú takéto zariadenia veľmi malé a cenovo dostupné. Taktiež rozvoj komunikačných technológií umožňuje bezdrôtovú komunikáciu s malou energetickou spotrebou na veľké vzdialenosti. To postupne umožňuje vložiť takéto zariadenia do všetkých sfér nášho života od domácností až po priemysel. Nehovoríme už ani tak o Internete Vecí, ale skôr o Internete Všetkého (IoE - Internet of Everything) . V ďalšej časti sa práca bude venovať histórii IoT [2].

1.1 História IoT

V roku 1999 Kevin Ashton, spoluzakladateľ a výkonný riaditeľ firmy Auto-ID Centra na MIT, popísal Internet Vecí približne takto [3]:

Všetky doterajšie počítače, a taktiež Internet, boli závislé od ľudí. Takmer všetky dáta, ktoré sú dostupné, boli zachytené ľuďmi písaním, stlačením tlačidla nahrávania, skenovania atď. Problémom však je, že ľudia majú limitovanú presnosť a pozornosť, z čoho vyplýva, že nie sú úplne vhodní, na zapisovanie dát v reálnom čase. Ak by sme mali počítače, ktoré vedia všetky potrebné informácie o danej veci bez ľudskej pomoci, boli by sme schopný presne určiť a zistiť takmer všetko. Presne by sme vedeli kedy vymeniť, opraviť alebo znovu obnoviť dané veci aby najlepšie slúžili svojmu úžitku.

Tento koncept však bol predstavený už skôr. Za úplne prvú IoT vec sa považuje hriankovač, ktorý bol pripojený k Internetu a dal sa cez neho ovládať: zapínať – vypínať [2]. Bolo to v roku 1990. V roku 1999 Kevin Ashton vytvoril a použil termín IoT, ktorý vysvetlil, ako je uvedený vyššie. Potom prišiel útlm, a IoT sa ako technológia veľmi nespomínala. Týmto problémom sa začali zaoberať spoločnosti, ktoré vytvorili v roku 2008 IPSO Alianciu (Internet Protocol Smart Object - Internetový Protokol Inteligentných Zariadení), slúžiacu na promovanie využitia IoT. Postupne s rozvojom smart zariadení, elektroniky v podaní rôznych senzorov a snímačov, a komunikačných technológií, nastal veľký rozmach IoT. Postupne sa začali budovať veľké metropolitné siete zamerané čisto na IoT zariadenia. Odhaduje sa, že v roku 2020 bude 26 miliárd zariadení pripojených do IoT [4].

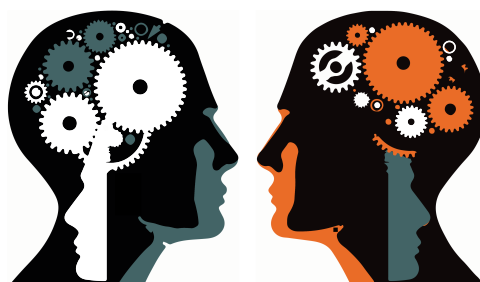
Práve spôsob komunikácie je u IoT veľmi dôležitý, a preto sa práca v ďalšej časti zameriava na jeho stručné vysvetlenie.

1.2 Komunikácia

Komunikácia v elektronike predstavuje výmenu určitých informácií medzi dvoma a viacej zariadeniami. Práve spôsob, akým komunikácia prebieha je veľmi dôležitý. Môže byť rozdelená na tri druhy. Prvý spôsob potrebuje k výmene informácie ľudskú interakciu. Druhý spôsob prebieha bez ľudskej interakcie, alebo len s veľmi malým pričinením. Tretí spôsob predstavuje priamu komunikáciu medzi zariadeniami bez potreby centrálného zariadenia. V tejto kapitole budú podrobne rozobrané vyššie spomenuté spôsoby komunikácie.

1.2.1 Human-to-Human

Veľká väčšina dnešnej mobilnej komunikácie, či už v lokálnych sieťach, alebo na Internete, prebieha buď spôsobom Človek-ku-Človeku (angl. Human-to-Human - H2H) obr. 1.2, alebo Človek-ku-Stroju (angl. Human-to-Machine - H2M). Takýto spôsob komunikácie vyžaduje ľudskú interakciu, čo znamená, že nemôže prebiehať bez zásahu človeka. Spravidla sa jedná o hlasové a textové správy alebo o veľké objemy dát. Veľký objem dát predstavujú multimediálne prenosy, ako filmy a videá, hry a on-line distribúcie programov, napríklad rôzne verzie Linuxových distribúcií. Požaduje sa väčší výpočtový výkon ako iba u klasických senzorov a snímačov. Je to z dôvodu, že dáta sa musia spracovávať na vyšších vrstvách modelu OSI/ISO. U napríklad už spomenutého senzoru stačí, ak posiela určitý čas danú informáciu a spracovanie prebieha až na strane hlavnej jednotky. U takýchto zariadení sa nekladú požiadavky na čo najnižšiu spotrebu, pretože takéto zariadenia sú z princípu umiestnené priamo v elektrickej sieti alebo sa dajú ľahko a efektívne dobíjať [5].



Obr. 1.2: Human-to-Human komunikácia

1.2.2 Machine-to-Machine

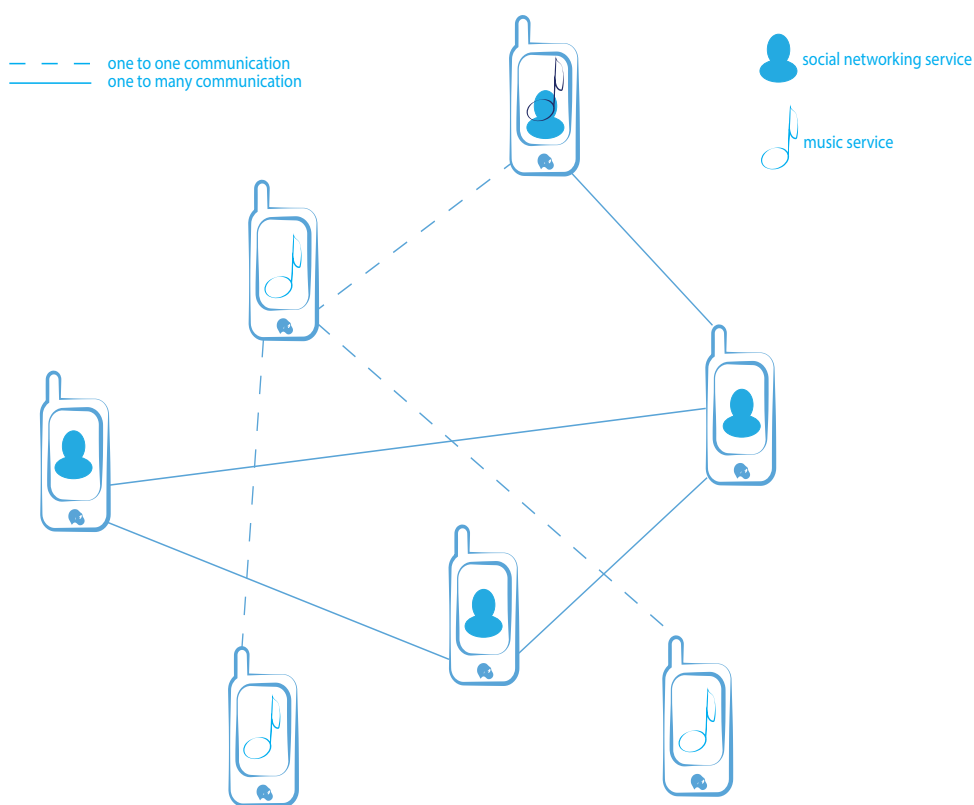
Machine-to-Machine (Stroj-ku-Stroju – M2M) komunikácia prebieha bez interakcie človeka a využíva sa hlavne v priemysle. Konkrétne sa využíva v rôznych senzoch a snímačoch, ktoré informovali o stave sledovanej veci. Tieto zariadenia sú nenáročné na výpočtový výkon, keď informácie nemusia spracovávať, ale len zasielajú na centrálnu jednotku. Komunikácia spravidla prebieha káblovým spojením, avšak všade tam, kde to prostredie umožňuje, je postupne nahradzovaná bezdrôtovými technológiami. Detailnejšie sa tomuto druhu komunikácie bude práca venovať v nasledujúcej kapitole.

1.2.3 Device-to-Device

Ďalší vývojový stupeň komunikácie, nielen v IoT, predstavuje komunikácia Zariadenia-ku-Zariadeniu (angl. Device-to-Device D2D). Tento spôsob komunikácie je považo-

vaný za dôležitú súčasť budúcnosti IoT [6].

Hlavným rozdielom oproti vyššie spomenutým spôsobom komunikácie je to, že zariadenia spolu komunikujú priamo bez potreby centrálnej kontroly. Schopnosť zbierať, spracovávať a posielať dáta ďalej v reálnom čase je kľúčová práve pre IoT, závisí však od zložitosti zariadenia. Čím je zariadenie zložitejšie, tým bude schopné získavať viac údajov. V prípade, že máme dostatočný počet takýchto zariadení, vieme z nich efektívne vyhodnocovať dáta a v reálnom čase reagovať na vzniknuté problémy. Takéto dáta nám následne umožnia vytvárať inteligentné prostredia, ktoré budú schopné reagovať na vzniknuté situácie bez ľudskej interakcie. Ako príklad uvedieme zápchu v meste. Navigácia bude schopná získavať takéto dáta od zariadení rozmiestnených po meste, a na ich základe navrhnuť optimálnu trasu.



Obr. 1.3: Device-to-Device

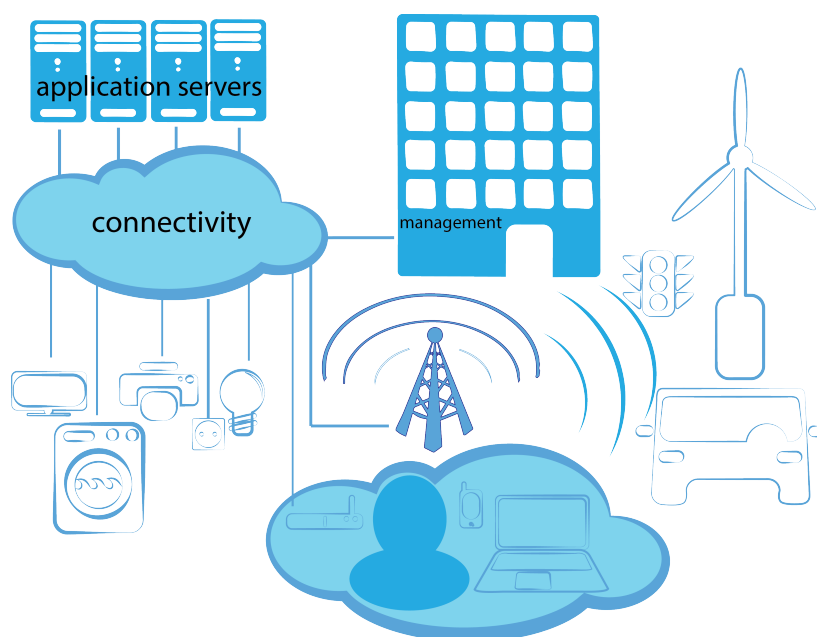
Princíp tejto komunikácie bol v praxi využívaný už dlhý čas. V minulosti bol využívaný len na veľmi jednoduchú komunikáciu, ako je otváranie garážových dverí, alebo odomykanie auta. Postupne s rozvojom elektroniky sa stávajú tieto zariadenia čoraz výkonnejšie a umožňujú väčšie možnosti, ako len zasielanie dát. Zariadenia sú

dáta schopné prijímať, vyhodnocovať a odosielať medzi sebou navzájom. Toto pomôže k odľahčeniu centrálnych sietí, ktoré nie sú dimenzované na tak veľký počet zariadení, aké sa predpokladá pripájať do IoT. Toto predstavuje nové výzvy v sieťovej komunikácii, kedy takéto problémy už nie je možné riešiť tradičnými smerovacími protokolmi. V súčasnej dobe sa objavujú a vznikajú nové protokoly prispôbené práve pre D2D komunikáciu.

V nasledujúcej časti sa práca bude zaoberať podrobnejším popisom M2M komunikácie.

2 MACHINE-TO-MACHINE

Machine-to-Machine (M2M) predstavuje komunikáciu dvoch zariadení, spravidla sa jedná o snímače alebo senzory, ktoré posielajú určené dáta do centrálnej jednotky. Tu sa vyhodnocujú, spracujú a na ich základe sa vykonáva určitá činnosť. Táto komunikácia popisuje mechanizmy, algoritmy a technológie, ktoré umožňujú zariadeniam a službám, pripojeným káblom alebo bezdrôtovo, pohodlne si vymieňať informácie a vykonávať akcie bez ľudskej interakcie. Táto komunikácia je kľúčová pre IoT a všade prítomné aplikácie, ako mobilná zdravotná starostlivosť, telemetria a inteligentné spôsoby dopravy. V ďalšej kapitole bude v krátkosti popísaná história IoT [7].



Obr. 2.1: Machine-to-machine

2.1 História M2M

História prvej M2M komunikácie siaha až do druhej svetovej vojny. V tej dobe bol Britským vojenským výskumom vynájdený RADAR – Radio Detection And Ranging, čo znamená Rádiová Detekcia a Vytýčenie Trasy. Slúžil na detekciu nepriateľských lietadiel. Aby si ich nemýlili s vlastnými, vynašli technológiu IFF – Identify: Friend or Foe (Identifikácia – Priateľ alebo Nepriateľ). Bol to druhý radar a išlo v podstate o to, že priateľské lietadlá mali správne zakódovanú „značku“, takže vedeli, že sa jedná o ich lietadlá. Pokiaľ sa IFF signál nevrátil v správnom tvare, išlo o nepriateľské lietadlá [8].

V minulosti sa využíval tento spôsob komunikácie, ako bolo spomenuté v kapitole 1.2.2, hlavne v priemysle, kde išlo prevažne o telemetrické údaje (teplota, rýchlosť, tlak, atď.). Tieto zariadenia boli veľmi jednoduché. S postupným znižovaním sa zariadení, a rozvojom komunikačných technológií sa rozšírili tieto „veci“ do všetkých sfér ľudského života. Práve rozvoj M2M komunikácie umožnil postupný vznik IoT. Tieto dve veci spolu veľmi súvisia, rozdiel spočíva v tom, že IoT je označenie súboru technológií schopných autonómne komunikovať cez Internet, zatiaľ čo M2M je spôsob výhradnej komunikácie. V ďalšej časti sa práca bude venovať vlastnostiam M2M komunikácie a detailnejšie sa rozoberú prenosové protokoly a technológie.

2.2 Vlastnosti M2M

M2M komunikácia je charakteristická energetickou nenáročnosťou, nízkou cenou a schopnosťou pracovať bez ľudskej interakcie. Ľudská interakcia sa z pravidla využíva len pri počítačovej správe systému, ďalej hlavne u opráv a riadenia spracovávaných dát. Typicky pozostáva z niekoľkých zariadení zapojených do jednej siete a brány. Brána je zodpovedná za spojenie sa s ostatnými sieťami, spravidla to býva do Internetu. Komunikácia pozostáva z troch častí: kolekcia dát, posielanie dát a spracovanie dát. Kolekcia spočíva z fyzického získania informácií. Posielanie predstavuje mechanizmus doručenia dát z lokálnej siete na server. Spracovanie dát je proces, v ktorom dochádza k analyzovaniu dát a následnému vyhodnoteniu ako riadiť proces. Nasledujú hlavné obmedzujúce faktory, ktoré musia M2M zariadenia prekonať [1]:

- **Rušenie** – v dnešnej dobe je rušenie veľmi intenzívne, keď neustále pribúdajú nové technológie, taktiež sa zahľucuje voľné dostupné pásmo ISM (Industry, Scientific, and Medical – Priemyselné, Vedecké a Medicínske).
- **Obmedzenie zdrojov** – veľkosť a batéria, u zariadení sa požaduje čo najväčší výkon, ale kvôli batériám a rozmerom sa musí hľadať kompromis, podľa toho, na čo má požadované zariadenie slúžiť.
- **Rôznorodosť zariadení, komunikačných tech. a protokolov** – M2M siete obsahujú veľké množstvo rozličných zariadení a služieb generovaných rôznymi zdrojmi [9].
- **Samo-manažovateľné** – nízka ľudská interakcia je kľúčovou vlastnosťou u M2M komunikácie a preto je nutnosťou schopnosť samo-konfigurácie, samo-správy, samo-opravy a samo-manažovania.
- **Kvalita služieb (QoS)** – typickým príkladom vyžadovania QoS pre M2M komunikáciu je biomedicínska sieť senzorov, kde sú kritické informácie o životne dôležitých funkciách, kedy je neprípustné, aby boli dáta zdržané alebo zničené

cestou kvôli zahlteniu pamäte v smerovači.

- **Bezpečnosť** – v dôsledku čo najväčšej úspory na zariadeniach môžu nastať problémy v oblasti bezpečnosti, či už fyzickému odcudzeniu alebo sa dostaniu k citlivým informáciám na sieti v dôsledku slabého softwarového zabezpečenia.

2.3 Protokoly, štandardy a technológie

M2M komunikácia sa v poslednej dobe využíva aj na vysoké dátové prenosy, napríklad pre Virtuálnu realitu. U väčšiny zariadení, ktoré snímajú určité vlastnosti sa nepožaduje veľká prenosová rýchlosť. Preto sa najčastejšie využívajú pásma v rozmedzí 100 MHz až 5.8 GHz. Tieto pásma možno rozdeliť do dvoch skupín a to [10]:

- **Nelicencované** - 433 MHz; 868 MHz; 2,4 GHz; 5 GHz; 5,8 GHz takmer celosvetovo; 60 GHz
- **Licencované** - 2G(900/1800 MHz), 3G(2100 MHz) , 4G(800/900/1800/2100 MHz)

2.3.1 IEEE 802.11

Pre bezdrôtovú komunikáciu je štandard IEEE 802.11 jeden z najbežnejšie používaných štandardov v dnešnej dobe. Je vysoko rozšírený a dnes už dostupný v mnohých zariadeniach od domácnosti, cez kancelárie, školy alebo priemyselné komplexy. Jeho najzošerenejším rozšírením je Wi-Fi.

Tomuto napomohlo niekoľko atribútov. Hlavným z nich je, že táto technológia pracuje v nelicencovanom pásme, čo značne znižuje jej cenu. Spolu s dobrými vlastnosťami ako je dosah, priepustnosť a korekcia chýb bola táto technológia ideálna k celoplošnému rozšíreniu. Infraštruktúra nie len Wi-Fi sieti spočíva v smerovačoch, ktoré zabezpečujú sieťovú obsluhu a tým môže ostať klient jednoduchší. Používajú hviezdicovú topológiu. V čase písania sa najbežnejšie používa štandard IEEE 802.11ac, ktorý bol predstavený v roku 2013. Používajú sa aj staršie štandardy IEEE 802.11a/b/g a n . Nevýhodou týchto štandardov pri použití v IoT zariadeniach je, že vyžadujú viac elektrickej energie, ako ostatné technológie spomenuté v tejto práci. V prípade, že zariadenie musí byť napájané pomocou batérie, nemusí byť Wi-Fi najvhodnejšie riešenie. Aj keď obsahuje techniky šetrenia energie, môže sa niekedy správať energeticky náročne [11][12][13].

Pre riešenie tohto problému bol vytvorený priemyselný štandard IEEE802.11ah, ktorý ale nepatrí do podštandardu Wi-Fi. Pracuje v nelicencovanom pásme pod 900 MHz. Prenosová rýchlosť sa pohybuje v rozmedzí od 0,15 – 4, Mbps pri 1 MHz

šírke kanálu a od 0,65 – 7,8 MB/s pri použití 2 MHz kanálu. Záleží aj na použitej modulácii. Tento štandard podporuje BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM a 256-QAM. Spotreba je od menej ako 10 mW až do 1 W v závislosti od prostredia a vzdialenosti, na aké sa bude využívať [14].

Ďalšie zo štandardov zahrnuté v štandarde IEEE 802.11 sú napr. IEEE 802.11ac IEEE 802.11ad a IEEE 802.11ay. Tieto dosahujú vysoké prenosové rýchlosti.

2.3.2 IEEE 802.15.1 - Bluetooth

Veľmi dôležitá technológia s krátkym dosahom. Pracuje na frekvencii 2.4 GHz v pásme ISM. Dosah je priemerne 50 metrov na otvorenom priestranstve. Najnovšia verzia Bluetooth Low Energy sa zameriava na čo najväčšie zníženie spotreby elektrickej energie. Využíva 1 Mbps GFSK moduláciu, čo mu dáva väčšiu priepustnosť ako u klasického Bluetooth, až do 1 Mbps. Hlavným rozdielom oproti klasickému spočíva v možnosti pripojenia až 128 zariadení [9].

2.3.3 IEEE 802.15.4 - ZigBee

Tento štandard vznikol na využívanie v domácnostiach a priemyselných automatizáciách. Je to združenie cez 200 spoločností, ktoré sa snažia vytvoriť jednoduchý a robustný model siete. Zameriavajú sa na čo najmenšiu energetickú náročnosť, bezpečnosť, cenu, a schopnosť kooperovať s ostatnými štandardami v pásme ISM. Je postavený na štandarde IEEE 802.15.4. Obsahuje tri sieťové prvky, a to koordinátor, smerovač a koncové zariadenie. Pracuje v pásme 2,4 GHz a pri správnom nastavení kanálov je schopný pracovať spolu s Wi-Fi sieťami bez rušenia. Jeho dosah je približne od 10 do 100 metrov, a rýchlosti dosahuje v priemere 250 kbps [9].

2.3.4 IEEE 802.15.4 - Thread

Thread vznikol v roku 2014 ako združenie firiem v Thread Group. Je to otvorený štandard, ktorý sa zameriava na čo najnižšiu možnú spotrebu zariadenia a mobilnú D2D komunikáciu v domácnostiach. Je postavený na štandarde IEEE 802.15.4. Veľkou výhodou je podpora IPv6 protokolu. Dokáže spojiť až 250 zariadení do jednej siete. Pracuje na frekvencii 2,4 GHz [9].

2.3.5 Z-Wave

Komunikačná technológia s nízkou spotrebou so zameraním sa na využívanie v domácich automatizáciách. Optimalizovaná na spoľahlivosť s prenosovou rýchlosťou do 100 kbps. Pracuje v pásme 900 MHz, aby sa vyhla rušeniu s ostatnými mobilnými

technológiami. Dosah má približne 30 metrov. Použité frekvencie sa rôznia podľa toho, v akej krajine sa využívajú. V Európe je to 868,42 MHz a v Amerike to je 908.42 MHz. V tomto pásme sa môže vyhnúť systémom, ktoré operujú na 2,4 GHz, avšak toto pásme je využívané aj sieťami pre mobilné telefóny, čo môže spôsobovať rušenie. Táto technológia je schopná pripojiť k jednému uzlu až 232 zariadení [9].

2.3.6 IEEE 802.15.4 - 6LowPAN

Kľúčovou technológiou v protokoloch postavených na IP je 6LowPAN (Internet Protocol v.6 Low-Power Wireless Personal Area Network - Internetový Protokol verzie 6 pre Nízko-Energetickú Bezdrôtovú Osobnú Sieť). Nie je to čisto protokol zameraný na IoT, ale definuje zapuzdrenie a mechanizmus na kompresiu hlavičiek. Nemá frekvenčné obmedzenie a preto sa môže prispôbiť ostatným, už používaným sieťam. Bol navrhnutý pre použitie v domácnostiach alebo budovách [9].

2.3.7 Cellular

Technológie, ktoré potrebujú väčší dosah, môžu využiť výhody GSM/3G/4G pásma. Táto technológia je ideálna pre zariadenia, ktoré nepotrebujú veľkú šírku pásma. Prenosové rýchlosti závisia na použitom pásme, je to od 35-170 kps u GPRS až po 3-170 Mbps u LTE sieti. Rozsah je taktiež rozdielny od 35 km pre GSM až do 100 km u HSPA [9].

2.3.8 NFC

NFC (Near Field Communication) je technológia, ktorá umožňuje jednoduchú a bezpečnú komunikáciu medzi elektrickými zariadeniami a aplikáciami, zvláštne pre platobné a prístupové karty. Je to v podstate rozšírenie schopnosti bezkontaktných kartových technológií, ktorá umožňuje zariadeniam zdieľať informácie na vzdialenosť približne 4 centimetre a rýchlosť dosahuje približne od 100 do 420 kbps [9].

2.3.9 Sigfox

Táto technológia sa zameriava na zariadenia stredného dosahu. Využíva nelicencované pásmo 900 MHz ktoré patrí do skupiny ISM pásiem, ktoré sú voľne k dispozícii. Využíva technológiu Ultra Narrow Band, ktorá dokáže prenášať len 10 až 1000 bps ale spotrebuje iba 50 mikrowatov oproti 5000 microwattom pre bunkové systémy. Táto sieť sa v poslednej dobe značne rozmáha celou Európou. Dokáže pojať milióny zariadení na niekoľko kilometroch štvorcových územia. To predstavuje ideálny

nástroj na M2M komunikáciu. V nezastavanom prostredí je dosah 30 - 50 km v zastavanom iba 3 – 10 km [9].

V tab.č. 2.1 je zhrnutie všetkých vyššie uvedených technológií.

Tab. 2.1: Prehľad M2M prenosových technológií [9][13]

Názov technológie	Rýchlosť	Dosah	Frekvencia
IEEE 802.15.1 - Bluetooth LE	1 Mbps	50 - 150 m	2,4 GHz
IEEE 802.15.4 - Zigbee	250 Kbps	10 - 100 m	2,4 GHz
Z-Wave	9,6/40/100 kbps	30 m	900 MHz
IEEE 802.15 - 6LoWPAN	Záleží od použitej platformy	Záleží od použitej platformy	1 / 2,4 GHz
IEEE 802.15 - Thread	250 Kbps	30 m	2,4 GHz
IEEE 802.11n - Wi-Fi	150 Mbps	70 m	2,4 / 5 GHz
IEEE 802.11ac - Wi-Fi	7,2 - 780 Mbps	35 m	5 GHz
IEEE 802.11ad - Wi-Fi	6,75 Gbps	60 m	60 GHz
IEEE 802.11ay - Wi-Fi	100G bps	60 m	60 GHz
Sigfox	10 - 1000 bps	30-52 Km	900 MHz
NFC	100 - 420 kbps	10 cm	13,56 MHz
Cellular	35 kbps 10 Mbps	35 - 100 Km	900/1800 MHz 1900/2100 MHz

Práca sa ďalej zaoberala technológiou Wi-Fi, s ohľadom na jej najnovšie prenosové štandardy, a to IEEE 802.11ac a IEEE 802.11ad. Táto technológia bola zvolená z hľadiska prenosových technológií, hlavne kvôli rýchlostiam a použitým technológiám. Tieto technológie sa dajú využiť v rôznych odvetviach, napríklad aj pre Virtuálnu Realitu.

3 ŠTANDARD IEEE 802.11

Tento štandard sa zaoberá bezdrôtovými lokálnymi sieťami WLAN (Wireless Local Area Network – Bezdrôtová Lokálna Sieť) a patrí k najúspešnejším štandardom pre bezdrôtovú komunikáciu. Jeho najznámejší podštandard je Wi-Fi. O jeho vývoj sa stará skupina IEEE. Pracuje v pásme ISM, najčastejšie na frekvenciách 2,4 GHz; 5 GHz a 60 GHz. Tento štandard má veľa rozšírení, ktoré pracujú aj na iných, než uvedených frekvenciách. V súčasnosti sa veľmi rozširuje štandard pre podporu IoT, ktorý pracuje v pásme pod 1 GHz. Prehľad štandardov nájdete v tab.č. 3.1 [13].

Tab. 3.1: Prehľad IEEE 802.11 technológií [13][15]

Názov štandardu	Stručný popis
IEEE 802.11a	Operuje v ISM pásme 5 GHz a dokáže prenášať dáta až 54 Mbps
IEEE 802.11b	Operuje v pásme 2,4 GHz a dokáže prenášať 11 Mbps
IEEE 802.11e	Podporuje QoS
IEEE 802.11f	Predávanie hovorov
IEEE 802.11g	Operuje v ISM pásme 2,4 GHz a prenáša dáta 54 Mbps
IEEE 802.11h	Spotreba energie
IEEE 802.11i	Autentifikácia a šifrovanie
IEEE 802.11k	Meracie reporty
IEEE 802.11n	Operuje v pásmach 2,4 GHz a 5 GHz a dokáže prenášať dáta rýchlosťou 600 Mbps
IEEE 802.11ac	Operuje v pásme 5 - 5,8 GHz a prenáša dáta až 1 Gbps pre viac staničné vysielanie a 500 Mbps na jednej linke
IEEE 802.11ad	Priepustnosť niekoľko Gbps a pracuje na frekvencii 60 GHz
IEEE 802.11af	Wi-Fi v TV spektre v bielych miestach (nazýva sa White-Fi)
IEEE 802.11ah	Spektrum pod 1 GHz pre veľké vzdialenosti a podporu IoT
IEEE 802.11ay	Spektrum cez 60 GHz, priepustnosť niekoľko GHz, lepšie šírenie ako u IEEE 802.11ad

3.1 História

Skupina IEEE vytvorila projekt nazvaný 802 v roku 1980. V roku 1990 IEEE zostavila pracovnú skupinu, ktorá bola súčasťou IEEE 802 štandardu a ktorá sa zamerala na vývoj bezdrôtového LAN štandardu. Zamerali sa primárne na využívanie pásma ISM 2,4 -2,5 GHz. Bolo to z dôvodu, že už od roku 1985 Federálna Komunikačná Komisia (FCC – Federal Communication Commission) v Spojených Štátoch Amerických uvoľnila frekvenčné spektrum od 2,4 – 2,5 GHz pre Priemysel, Vedu a Medicínu (ISM), čo znamenalo, že sa tieto pásma mohli začať voľne využívať. To napomohlo rozvoju, ale problémom bolo, že vznikalo veľké množstvo rôznych technológií, ktoré boli patentované, drahé, pomalé, alebo málo rozšírené [13].

Štandard IEEE bol prijatý v roku 1997. Maximálna rýchlosť bola 2 Mbps a obsahoval doprednú korekciu chýb, a dve formy zníženia rušenia – priama sekvencia alebo frekvenčné skoky. Za jeho veľkým úspechom stála kompatibilita s IEEE 802 sieťami, špeciálne s IEEE 802.3 káblovými Ethernetovými sieťami. Kritická pre túto kompatibilitu bola nezávislosť fyzického a médiového prístupu od pokrytia komunikačnou vrstvou [13].

V roku 1999 bola založená organizácia Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA - Aliancia Bezdrôtovo Ethernetovej Kompatibility), neskôr známa ako Wi-Fi Aliancia. Je to nezisková organizácia pre štandardizáciu a propagáciu Wi-Fi technológií. Združuje stovky popredných technologických firiem [13].

V ďalšej časti sa práca bude podrobne zaoberať konkrétnymi implementáciami štandardu IEEE 802.11 .

3.2 IEEE 802.11a

Tento štandard predstavuje prvý z rodiny IEEE 802.11 štandardov. Bol ratifikovaný v roku 1999, skoro rovnakom čase, ako štandard IEEE 802.11b, avšak nikdy nedosiahol takého rozšírenia ako pravé b-čková verzia. Bolo to hlavne z dôvodu jeho vysokej ceny. Tá bola spôsobená zložitou čipov, keďže tento štandard pracuje na ISM frekvencii 5 GHz na rozdiel pravé od b verzie, ktorá pracuje na 2,4 GHz. V tej dobe nebola dôležitá rýchlosť ale cena, a tak sa väčšina výrobcov rozhodla pre štandard IEEE 802.11b. Základné parametre sa nachádzajú v tab.č. 3.2, a typy používaných modulácií spolu s rýchlosťami sa nachádzajú v tab.č. 3.3.

Tab. 3.2: Vlastnosti IEEE 802.11a [16]

Parametre	Hodnoty
Dátum uvedenia štandardu	Júl 1999
Maximálna rýchlosť	54 Mbps
Typická rýchlosť dát	25 Mbps
Typicky dosah vo vnútri	30 m
Modulácia	OFDM
Frekvenčné pásmo	5 GHz
Počet priestorových tokov	1
Šírka pásma	20 MHz

Tab. 3.3: Typy modulácií a ich prenosové rýchlosti [16]

Rýchlosť [Mbps]	Modulácia	Kódový pomer
6	BPSK	1/2
9	BPSK	3/4
12	QPSK	1/2
18	QPSK	3/4
24	16-QAM	1/2
36	16-QAM	3/4
48	64-QAM	1/2
54	64-QAM	3/4

3.2.1 Špecifikácie

Tento štandard využíva OFDM moduláciu. Táto modulácia poskytuje značnú redukciu strát pri rušení, ktoré nastáva pri efekte viacerých ciest. Ďalej poskytuje okrem maximálnej rýchlosti 54 Mbps taktiež redukciu na 48, 36, 24, 18, 12, 9 a 6 Mbps. Signál OFDM využívaný v IEEE 802.11a pozostáva z 52 pomocných subpásiem. 48 z nich sa používa pre prenos dát a 4 sa využívajú ako riadiace. Každé zo subpásiem môže obsahovať jednu z modulácií uvedených v tab.č. 3.3. Rozdiel medzi nimi je 0,3125 MHz. Dôvodom je 20 MHz pásmo rozdelené do 64 pomocných subpásiem, z ktorých sa využíva 52, čo znamená celkové vyťaženie kanálu je 16,6 MHz. Zvyšné pásmo slúži ako ochranné pásmo medzi kanálmi.

OFDM: Ortogonálny Multiplex s Časovým Delením je forma vysielania, ktorá

používa veľké číslo uzavretých rozložených nosných zložiek, ktoré sú modulované malým dátovým tokom. Normálne by sa tieto signáli rušili navzájom, ale tým, že je signál ortogonálny navzájom, nedochádza k prirodzenému rušeniu. Dáta určené k prenosu sa rozdelia na všetky nosné tak, aby sa zvýšila odolnosť proti efektu selektívneho slabnutia z dôvodu príjmu signálu z viacerých ciest [16].

3.3 IEEE 802.11b

Tento štandard bol prvým bezdrôtovým štandardom, ktorého použitie sa široko rozšírilo. Ratifikovaný bol IEEE v júli roku 1999 [17].

3.3.1 Špecifikácie

Maximálna rýchlosť tohto štandardu je 11 Mbps s dosahom maximálne 30 m. Pri tejto vzdialenosti však už nedosahuje plné rýchlosti. V nasledujúcej tab.č 3.4 sú uvádzané základné parametre [17]:

Tab. 3.4: Vlastnosti IEEE 802.11b [17]

Parametre	Hodnoty
Dátum uvedenia štandardu	Júl 1999
Maximálna rýchlosť	11 Mbps
Typická rýchlosť dát	5 Mbps
Typický dosah vo vnútri	30 m
Modulácie	CCK(DSSS)
Frekvenčné pásmo	2,4 GHz
Šírka pásma	20 MHz

Pri prenose dát využíva CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - Naslúchanie na Nosnej s Viacnásobným Prístupom s Detekciou Kolízií) techniku, ktorá bola definovaná v originálnom 802.11 štandarde. Táto technika popisuje prenos medzi zariadeniami. Ak chce stanica vysielat, počká si na prázdny kanál, a až potom začne vysielat. Ak neobdrží potvrdenie príjmu dát, počká určitý časový úsek, aby sa vyhla ďalšiemu rušeniu, a potom opäť opakuje prenos.

3.3.2 Modulácia

Formát signálu sa využíva CCK (Complementary Code Keying - Komplementárne Kódové Klúčovanie). Je to štíhla verzia CDMA (Code Division Multiple Access - Kó-

dový Multiplex s Viacnásobným Prístupom), ktorý používa základnú DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum - Priama Sekvencia s Rozprestreným Spektrom) ako jej základnú zložku. Vďaka tomuto bolo veľmi ľahké vylepšiť existujúce čipy a ostatné zariadenia tak, aby boli kompatibilné s novým štandardom. To dopomohlo k jeho relatívne rýchlemu nasadeniu na trhu. Ako už bolo spomenuté, maximálna rýchlosť je 11 Mbps, ktorá však klesá so vzdialenosťou. Systém monitoruje úroveň signálu a v prípade, že signál klesne alebo príde k rušeniu, zmení schému modulačného kódovania na také, kde je lepšia rekonštrukcia chýb pomocou samo-opravovacích mechanizmov a je odolnejšia proti rušeniu. Postupne tak môže rýchlosť klesnúť na 5,5 Mbps, potom na 2 Mbps a finálne na 1 Mbps. Táto schéma sa nazýva ako Adaptívne Určovanie Rýchlosti (ARS - Adaptive Rate Selection) [17].

3.4 IEEE 802.11g

Tento štandard vznikol ako rozšírenie predchádzajúceho štandardu IEEE 802.11b. Hlavnou požiadavkou bolo zvýšenie rýchlosti, ktorá by bola porovnateľná so štandardom 802.11a, teda aspoň na 54 Mbps, ale pri využití 2,4 GHz pásma. Štandard bol uvedený v júny roku 2003 [18].

3.4.1 Špecifikácie

Tab. 3.5: Zhrnutie fyzických vrstiev [18]

Fyzická vrstva	Použitie	Dátový tok v Mbps
ERP - DSSS	Povinný	1 2 5,5 11
ERP - OFDM	Povinný	6 9 12 18 24 35 48 54
ERP - PBCC	Voliteľný	1 2 5,5 11 22 33
DSSS - OFDM	Voliteľný	6 9 12 18 24 36 48 54

Štandard prešiel viacerými úpravami oproti IEEE 802.11b, ktoré môžete vidieť v tab.č. 3.6. Za hlavnú moduláciu bola vybraná OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Ortogonálne Frekvenčný Časový Multiplex).

Vyššie uvedená tab.č. 3.6 ukazuje rýchlosti pri použití rôznych fyzických vrstiev a modulácií, ktoré štandard IEEE 802.11g podporuje. Tieto modulácie, ktoré môžu fungovať súbežne, napomáhajú znížiť rušenie.

Tab. 3.6: Vlastnosti IEEE 802.11g [18]

Parametre	Hodnoty
Dátum uvedenia štandardu	Jún 2003
Maximálna rýchlosť	54 Mbps
Typická rýchlosť dát	5 Mbps
Typický dosah vo vnútri	30 m
Modulácie	CCK,DSSS or OFDM
Frekvenčné pásmo	2,4 GHz
Šírka pásma	20 MHz

3.5 IEEE 802.11n

V roku 2004 rozhodla IEEE ustanoviť novú výskumnú skupinu pre prácu na novom vysokorýchlostnom štandarde. V roku 2006 dospela pracovná skupina spolu s ostatnými spoločnosťami zaoberajúcimi sa výskumom k dohode na podobe tohto štandardu. Vďaka tomu sa mohli spoločnosti začať zaoberať výskumom vlastných čipov. A preto, keď bol štandard v júli roku 2009 publikovaný, podporovalo ho už mnoho zariadení na trhu, čo dopomohlo k rýchlemu rozšíreniu [19].

3.5.1 Špecifikácie

Hlavná myšlienka štandardu bola, aby mal čo najlepší výkon a bol schopný držať krok s rýchlo sa rozvíjajúcimi rýchlosťami v technológiách ako Ethernet. Jeho základné vlastnosti nájdeme v tab.č. 3.7

Pre dosiahnutie týchto vylepšení boli zavedené nasledujúce inovácie [19]:

- **OFDM** - zmena implementácie, definované dva nové formáty pre PHY-LCP (PHY Convergence Protocol - PHY Protokol Konverencie), Mixed Mode a Green Field
- **MIMO** - Multiple Input and Multiple Output - Viacnásobný Vstup a Viacnásobný Výstup, šetrenie energie, keďže MIMO značne zvyšuje spotrebu, v prípade, že nie je využívané, ostáva vypnuté
- **Šírka pásma** - väčšia šírka prenosového kanálu, až 40 MHz
- **Anténne technológie** - beamforming, rôznorodosť prijímaných signálov, viac v časti 3.5.4
- **Spätná kompatibilita** - pre lepšiu priepustnosť je možná, len za presne vymedzených podmienok

Tab. 3.7: Vlastnosti IEEE 802.11n [19]

Parametre	Hodnoty
Dátum uvedenia štandardu	Júl 2009
Maximálna rýchlosť	600 Mbps
Počet priestorových tokov	1 2 3 4
Typický dosah vo vnútri	70 m
Modulácie	CCK, DSSS or OFDM
Frekvenčné pásmo	2,4 / 5 GHz
Šírka pásma	20 a 40 MHz

Mnoho z týchto vylepšení bolo zakomponovaných priamo do čipu, čo umožnilo pri veľkej výrobe značne znížiť cenu produkcie [19].

3.5.2 OFDM

Formáty signálu sa menia, podľa toho v akom móde pracuje [19].

- **Legacy Mode** - môže pracovať v 20 MHz aj 40 MHz pásme
- **Mixed Mode** - v tomto móde sú pakety prenášané s preambulou kompatibilnou so staršími verziami, zvyšok paketu má nový tréningový sekvenčný formát MIMO
- **Greenfield Mode** - v tomto formáte sú pakety s vysokou priepustnosťou prenášané bez dedičných elementov, čo umožňuje dosiahnuť značne vyššie prenosové rýchlosti

3.5.3 MIMO

Dve hlavné limitácie v komunikačnom kanále sú mnoho-smerová interferencia a dátová priepustnosť, ktorá odpovedá Shannonovmu teorému. MIMO poskytuje cestu ako využiť signály z rôznych smerov, ktoré existujú medzi vysielačom a prijímačom, aby sa dosiahli vyššie prenosové rýchlosti pri prenose jedným kanálom s jeho definovanou šírkou pásma. Využívaním viacerých antén pri vysielaní a prijímaní spolu s digitálnymi technológiami, umožňuje MIMO systému nadviazať viacero dátových tokov na jednom kanály, zvyšujúc dátovú kapacitu kanálu.

Pre rýchlu indikáciu kapacity systému sa zaviedla notifikácia $a \times b : c$, kde a je maximálne číslo vysielačích antén, b je maximálny počet prijímacích antén a c predstavuje maximálny počet priestorových ciest. Tento štandard umožňuje maximálnu

konfiguráciu 4 x 4 : 4 , ale najbežnejšie sa využívajú 2 x 2 : 2; 2 x 3 : 2; 3 x 2 : 2.

Jedným z problémov pri využívaní technológie MIMO je značné zvýšenie spotreby elektrickej energie daného zariadenia [19].

3.5.4 Anténne technológie

- **Beamforming** - táto technológia usmerňuje vysielaný rádiový signál z viacerých antén do jeden priamej cesty k prijímacej anténe zariadenia, aby zvýšila celkový výkon. Vyššia úroveň signálu a lepší pomer signálu ku šumu umožní využitia plnej šírky prenosového kanála. Viacej sa o tejto technológii dočítate v podkapitole 3.7.2.
- **Rôznorodosť** - využíva viaceré dostupné antény a ich kombináciou zabezpečuje optimálne vlastnosti signálu. Väčšina smerovačov má viacej antén, ako prijímacie zariadenia, takže ostatné antény môžu byť použité na zabezpečenie prenosu podľa potreby [19].

3.6 IEEE 802.11ac

V roku 2011 ustanovila IEEE novú výskumnú skupinu, ktorá do roku 2013 predstavila štandard IEEE 802.11ac. Už v januári 2014 bol schválený a predstavený verejnosti. Hlavné zameranie skupiny bolo na rýchlosť, ktorá bola očakávaná v rozmedzí 1 Gbps až 7 Gbps. Vďaka týmto rýchlostiam získala aj označenie 5G Wi-Fi. Implementácie gigabitovej Wi-Fi bola potrebná pre zabezpečenie potreby užívateľov, ktorí žiadali rýchlejšie prenosové rýchlosti, vhodné konkurovať metalickým spojom. Pôvodne sa uvažovalo, že sa bude využívať iba pásmo 5 GHz. Skupina mala taktiež povolenie budovať gigabitový štandard vo frekvenčnom pásme 60 GHz. Táto technológia bola už v tej dobe zaujímavá, lenže vyžadovala zásadné zmeny v štruktúre sietí, pretože dosah je v takomto kmitočtovom pásme veľmi obmedzený. Spravidla iba niekoľko metrov a aj to v prostredí bez prekážok [20].

3.6.1 Špecifikácie

Nasledujúca tab.č. 3.8 ukazuje hlavné výhody tohto štandardu.

Pre dosiahnutie takto vysokých rýchlostí musel štandard okrem už vyššie spomenutých technológií OFDM a MIMO využívať ešte nasledujúce [21]:

- **MU-MIMO** – Multi-Užívateľské MIMO umožňuje vzájomné vysielanie rôznych dátových rámcov k rôznym klientom. Použitie tejto techniky potrebuje

Tab. 3.8: Vlastnosti IEEE 802.11ac [21]

Parametre	Hodnoty
Dátum uvedenia štandardu	Január 2014
Maximálna rýchlosť	6,93 Gbps
Beamforming	Voliteľný
Typický dosah vo vnútri	35 m
Modulácie	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM voliteľná
Frekvenčné pásmo	5 - 5,8 GHz
Šírka pásma	20, 40 a 80 MHz 160 a 80 + 80 MHz voliteľné
FEC kódovanie	Konvolúcia alebo LPDC (voliteľná) s kódovým pomerom $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, alebo $\frac{5}{6}$
MIMO	Podporuje jedno a viacej užívateľské MIMO až s 8 rôznymi priestorovými tokmi

vybavenie, ktoré je schopné využiť priestorové znalosti o rôzne vzdialených klientov. Taktiež je potreba sofistikovaného systému, ktorý dokáže využiť výhody prostredia pri vhodných podmienkach a vysielat k viacerým klientom.

- **Kódové opravenie chýb** - vďaka výkonnejším čipom je možné použiť pokročilejšie prot chybové kódovania
- **Zväčšenie šírky pásma** - prechádzajúce štandardy využívali šírku pásma od 20 do 40 MHz. Tento štandard pracuje so šírkou pásma až 160 MHz, a to buď v jednom kanáli alebo v dvoch 80 MHz kanáloch
- **256-QAM** - štandard posiela sériu symbolov, kde každý bit je reprezentovaný danou bitovou postupnosťou, jedno zariadenie môže preniesť až šesť bitov v jednom symbole, po využití komplexnejšej modulácie môže prenášať až osem bitov v jednom symbole
- **Beamforming** - u tohto štandardu došlo k radikálnej špecifikácii technológie smerovanie lúča tzv. beamforming, a bola vybraná a preferovaná iba jedna z mnohých možností. Bolo to z dôvodu, že pri štandarde IEEE 802.11n bolo skoro nemožné nájsť výrobcov s rovnakou špecifikáciou, keďže každý výrobca

uprednostňoval svoju vlastnú.

Kľúčové frekvenčné vlastnosti sú uvedené v nasledujúcej tab.č. 3.9:

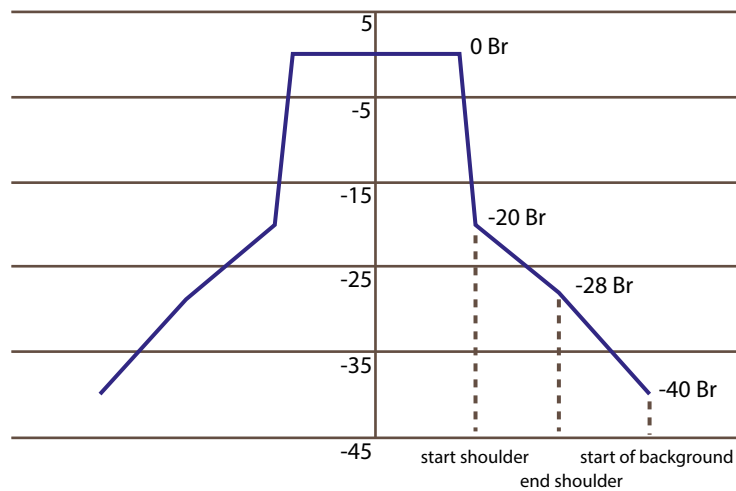
Tab. 3.9: Kľúčové frekvenčné vlastnosti [21]

Vlastnosť	Povinné	Voliteľné
Šírka pásma	20 , 40 , 80 MHz	160 , 80+80 MHz
FFT	64 , 128, 256	512
Dáta pomocná nosná / signálna	52 / 4 , 108 / 6 , 234 / 8	468 / 16
Typy modulácie	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	256-QAM
Priestorové toky a MIMO	1	2 až 8 TxBF STBC, Viac-Užívateľské MIMO

Tento štandard dokáže využiť až 8 priestorových tokov tak isto dobre, ako dokáže využiť Viac-Užívateľské MIMO, kde rôzne toky môžu byť použité k podpore rôznych klientov. Umožňuje taktiež schému viacerých prístupov. Táto technika sa dá ilustrovať na príklade vysieláča so 4 anténami. Pomocou nich dokáže zasielať dáta 4 prijímacím anténam, prípadne rozdeliť toky medzi 2 zariadenia s 2 anténami a tým zvýšiť prenosovú rýchlosť daných zariadení. Plných prenosových rýchlostí sa dá dosiahnuť len pri použití 256-QAM modulácie spolu so 160 MHz šírkou pásma a so všetkými ôsmimi priestorovými anténami [21].

3.6.2 Spektrálna maska

Štandard má presne takú istú spektrálnu masku, ako jeho predchodca. Jediný rozdiel je v šírke prenesenej energie. Nasledujúci graf ukazuje hlavný tvar masky, ktorá je popísaná relatívnymi decibelmi(dBr) vzhľadom na maximálnu výšku strednej hodnoty frekvencie kanálu. Neobsahuje presné frekvencie, pretože maska je rovnaká pre všetky šírky kanálu, ktoré sa používajú. Tento graf popisuje špičku pri maximálnej spotrebe elektrickej energie. Ďalej tam je vyznačený začiatok ramena, bod kde dochádza k zlomu ramena, a nakoniec je tam vyznačený bod, kedy sa dosiahne hodnota pozadia [20].



Obr. 3.1: Spektrálna maska

Tab. 3.10: Spektrálna maska

Šírka nálu	ka-	Vrchol špičky (0 dBr)	Začiatok ramena (-20 dBr)	Koniec ramena (-28 dBr)	Začiatok pozadia (-40 dBr)
20 MHz		9 MHz	11 MHz	20 MHz	30 MHz
40 MHz		19 MHz	21 MHz	40 MHz	60 MHz
80 MHz		39 MHz	41 MHz	80 MHz	120 MHz
160 MHz		79 MHz	81 MHz	160 MHz	240 MHz

3.6.3 Modulácia Kódovej Schémy

Výber MCS (Modulation Coding Scheme - Modulácia Kódovej Schémy) je omnoho jednoduchší, ako u IEEE 802.11n. Oproti viac ako 70 rôznym možnostiam v štandarde IEEE 802.11n obsahuje tento iba 10. Iba prvých 7 je povinných, ale väčšina zariadení podporuje aj 256-QAM a tým pádom všetkých 9. Pri vyšších moduláciách sa vyžaduje lepší pomer signálu ku šumu. Základnou vlastnosťou opravy chýb je, že pridáva nadbytočnú informáciu k posieleným dátam. Pomer $R = \frac{1}{2}$ znamená, že na jeden užívateľský byt sa prenášajú dva bity na kanál. Vyššie kódové pomery umožňujú preniesť viacej dát s menšou nadbytočnosťou avšak budú mať horšiu opravu chýb. Kódovanie a modulácia sa udávajú v jednom čísle, takzvanom MCS indexe. Každé toto číslo vedie k rôznym rýchlostiam v závislosti od použitého kanálu, od počtu antén a strážneho intervalu. V tab.č. 3.11 sa nachádzajú modulácie a kódové pomery pre rôzne MCS [20].

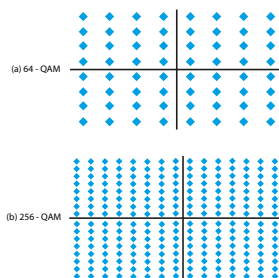
Tab. 3.11: Modulácie a kódové pomery pre rôzne MCS [20]

MCS hodnota	Modulácia	Kódový pomer (R)
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	1/2
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

3.6.4 256-QAM modulácia

QAM modulácia využíva pri vyšších rádoch kombináciu amplitúdovej úrovne a fázového posunu. Konštelácia pozostáva zo 16 fázových a zo 16 amplitúdových hodnôt úrovni. Pre lepšie predstavenie je uvedený nasledujúci obrázok č. 3.2. Vďaka zhustenie hodnôt bolo dosiahnuté dramatické zvýšenie rýchlosti, kedy sa neprenáša 6 bitov na pomocnej nosnej frekvencii, ale prenáša sa až 8 bitov. Vďaka tomu je 33% nárast oproti najbližšiemu ekvivalentu zo štandardu IEEE 802.11n .

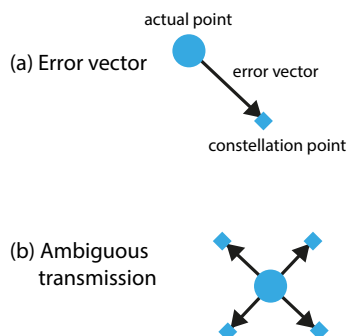
Aby sa však dosiahli takéto rýchlosti, musia byť na prenosovej linke veľmi malé chyby. Toto je však veľmi ťažké doceliť v reálnych podmienkach. Problém nastáva, keď pri prijímaní signálu nastane posun a informácia nesedí presne na mieste, kde by mala byť (obr.č. 3.3). Na odstránení tohto problému slúži takzvaný chybový vektor. Nezáleží na smere chyby, iba na jej veľkosti, ktorú nazývame chybová vektorová magnitúda [20].



Obr. 3.2: 64 - 256 QAM

3.6.5 Strážny interval

Štandard IEEE 802.11ac umožňuje skrátiť OFDM strážny interval v prípade, že to obe stanice, prijímacie aj vysielacia, podporujú. Interval sa môže skrátiť z 800 ns na 400 ns a zvýšiť tak kapacitu linky až o 10 % [20].



Obr. 3.3: Chybový vektor

3.7 IEEE 802.11ad

Jedným z najnovších štandardov patriacich do rodiny IEEE 802.11 je IEEE 802.11ad. Hlavný rozdiel oproti prechádzajúcim štandardom je, že pracuje na veľmi vysokých frekvenciách ISM pásma, v oblasti milimetrových vln, v okolí 60 GHz. Presné frekvencie sú v tab. č. 3.13 [22].

Tento štandard začal vznikáť v roku 2007, kedy The Wireless Gigabite Alliance (Wi-Gig - Bezdrôtová Gigabitová Aliancia) ustanovila výskumnú skupinu pre bezdrôtový vysokorýchlostný prenos. Táto aliancia sa v roku 2010 dohodla s Wi-Fi alianciou a začali spoločne spolupracovať na novom štandarde. K ním sa koncom toho istého roku pridala ešte Video Electronics Standards Association (VESA – Asociácia pre Video Elektronické Štandardy) pre definovanie novej generácie bezdrôtového video štandardu. Oficiálne bol štandard predstavený v Decembri roku 2012 [23].

3.7.1 Špecifikácie

V nasledujúcej tab. č. 3.12 môžete vidieť základné charakteristiky tohto štandardu.

Tab. 3.12: Vlastnosti IEEE 802.11ad [23]

Parametre	Hodnoty
Frekvencia	60 GHz ISM pásmo
Šírka pásma	2,16 GHz
Maximálna rýchlosť	7 Gbps
Anténa technológia	Využíva beamforming
Typický dosah	1 - 10 m
Modulácie	Rôzne: s jednou nosnou alebo OFDM

Tab. 3.13: Použité frekvencie vo svete podľa polohy [23]

Región	Frekvencie [GHz]
Európska únia	57,00 - 66,00
USA a Kanada	57,05 - 64,00
Severná Kórea	57,00 - 64,00
Japonsko	59,00 - 66,00
Austrália	59,40 - 62,90

Tento štandard podporuje MAC vrstvu, ktorá je zdieľaná pre celú rodinu 802.11. To mu umožňuje prepínať medzi režimami a komunikovať so zariadeniami, ktoré operujú v pásmach v 2,4 GHz a 5 GHz. WiGig pásmo používa 60 GHz. Táto spätná kompatibilita je veľmi dôležitá.

Táto vrstva podporuje tri hlavné signály s rôznymi moduláciami [23]:

- **Control PHY, CPHY** - poskytuje kontrolu, tento signál má vysokú úroveň opravy a detekcie chýb a preto má malú priepustnosť. Nestará sa o prenos hlavných dát, ale zabezpečuje kontrolné správy kanálu. Využíva diferenciálne kódovanie, rozprestrené kódovanie a BPSK moduláciu
- **Single Carrier PHY, SCPHY** - používa modulácie s jednou nosnou – BPSK, QPSK alebo 16-QAM na potlačenie nosnej nachádzajúcej sa v strede prenosového kanálu. Signál má fixnú symbolovú rýchlosť 1,76 Gsym/sec. K dispozícii sú rôzne protichybové kódovania v závislosti na konkrétnych požiadavkách

Ortogonalno Frekvenčný Časový Multiplex PHY, OFDMPHY - táto schéma využíva modulácie s viacerými nosnými aby dosiahla vyššiu dátovú

priepustnosť

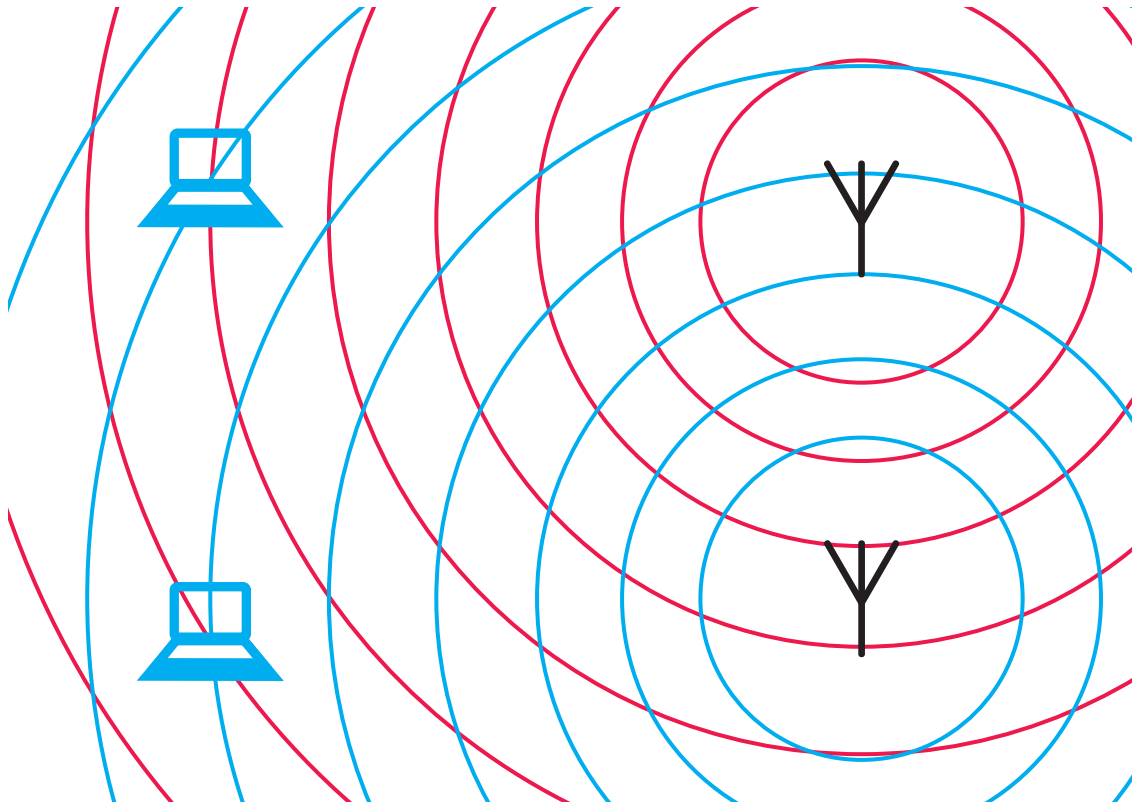
- **Low Power Single Carrier PHY, LPSCPHY** - táto vysielacia schéma využíva jednu nosnú a orientuje sa na čo najnižšiu spotrebu elektrickej energie. Využíva sa hlavne u zariadení s malou batériou, ktoré nebudú schopné podporovať spracovanie OFDM modulácie [23].

3.7.2 Beamforming

Beamforming je jedna z pokročilých MIMO technológií, ktorá dokáže rapídne zvýšiť priepustnosť linky. Koordinácia antény pre usmernenie lúča je možná vďaka CSI odozve, ktorá je nevyhnutná na efektívne doručenie informácie medzi vysielacou a prijímacou stranou. V štandarde IEEE 802.11n boli ešte 4 CSI schémy, z ktorých bola nakoniec vybraná kompresovaná explicitná väzba. Tá sa stala výhradne používanou schémou [24].

Pre štandard IEEE 802.11ad je beamforming technológia veľmi dôležitá pre dosiahnutie väčších vzdialeností ako 10 metrov. Musí ale podporovať ešte ďalšie vylepšenia. Vyžaduje sa, aby obe strany podporovali beamforming s riadiacimi smerovými anténami a taktiež musí zabezpečiť nárast signálu, ktorý vyplýva z pohybu ľudí. Pri frekvencii 60 GHz dosahuje oslabenie signálu vo všeobecnosti viac ako 20 dB. Tento zisk je dosiahnutý prenosom fázovo posunutých signálov z viacerých antén. Signály sú fázovo posunuté tak, aby v cieľovom mieste dochádzalo k ich koherencii [22].

Ďalšou dôležitou vlastnosťou beamformingu je tréning. Beamforming tréning určuje príslušný antény sektor pre prijímaciu aj vysielaciu stranu. Dosahuje sa to prenosom obojsmerného tréningového sekvenčného rámca. Počas tohto procesu sa vynecháva obojsmerná všesmerová komunikácia, pretože má obmedzený dosah. Beamforming fázu môžeme rozdeliť do dvoch častí. Prvá časť, ktorá prebieha počas SLS (Sector-Level Sweep – Hľadanie Úrovne-Sektorov) určí narýchlo počiatočný sektor antén. Táto informácia je použitá v nasledujúcom voliteľnom kroku, ktorý sa volá BRP (Beam Refinement Phase – Fáza Upresňovania Lúča), ktorá má na starosti jemné a presné doladenie vybraných sektorov. Počas SLS fáze, každá z dvoch staníc trénuje aj prijímacie aj vysielacie antény sektory. Ak sú zariadenie schopné zvýšiť požadovaný výkon u svojich vysielacích anténach, najbežnejšie sa trénujú iba vysielacie sektory počas SLS, a prijímacie sektory sa z nich odvodlia počas fázy BRP. Pri dosiahnutí najlepšieho spresnenia lúča na prijímacej aj vysielacej strane umožňuje dosiahnuť niekoľko gigabitové rýchlosti aj nad 10 metrov [25].



Obr. 3.4: Princíp technológie beamforming

4 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE PRENOSOVÝCH VLASTNOSTÍ BEZDRÔTOVÝCH TECHNOLOGIÍ

Cielom bakalárskej práce bolo experimentálne overiť prenosové vlastnosti vybraných štandardov v reálnych podmienkach. Tieto štandardy boli vybrané z dôvodu ich rozšírenia, každodenného bežného použitia a taktiež na základe dostupného hardwaru. Štandard IEEE 802.11ac sa vyznačuje tým, že pracuje na 5 GHz, štandard IEEE 802.11ad pracuje v okolí 60 GHz, v mikrovlnnom pásme (presné frekvencie nájdete v tabuľke č. 3.13). Pomocou vytvorenej aplikácie boli overené ich prenosové vlastnosti a namerané hodnoty boli analyzované a podrobne rozobrané. Výsledky boli následne diskutované, a z nich boli vyvedené prenosové vlastnosti danej technológie.

4.1 Použitý hardware na meranie vlastností IEEE 802.11ac

Výhodou zvoleného hardwaru, konkrétne telefónu, bola možnosť simulácie reálnych situácií. Vďaka tomu bolo možné využiť tienenie pomocou ľudského tela, ktoré predstavuje jedno z najčastejších, ku ktorému dochádza pri jeho bežnom používaní. Ďalším testovaným zariadením bola vývojová doska, ktorá bola použitá ako ekvivalent a slúžila na porovnanie hodnôt. Posledným zariadením bol smerovač s podporou štandardu IEEE 802.11ac. V ďalšej časti sa práca bude venovať podrobnejšiemu predstaveniu testovaného hardwaru.

4.1.1 Samsung Galaxy S7 SM-G930F

Jednalo sa o inteligentný telefón 4.1, ktorý bol vybavený 8-jadrovým Samsung Exynos procesorom a operačnou pamäťou 4 GB. Operačný systém bol Android verzie 6 Marshmallow. Ďalej obsahoval pre nás dôležitý modul, ktorý podporoval IEEE 802.11ac s 2x2 MIMO a mal by dosahovať teoretickú rýchlosť sťahovania až 867 Mbps [26].

V tabuľke č. 4.1 bol uvedený prehľad základných parametrov:



Obr. 4.1: Samsung Galaxy S7 SM-G930F

Tab. 4.1: Prehľad vlastností Samsung Galaxy S7 [26]

Parametre	Hodnota
Operačný systém	Android 6.0.1 Marshmallow
Čip set	64 bit – Samsung Exynos 8 Octa 8890
Processor	Octa-core 2,3 GHz Quad Core Exynos M1 Mongoose 1,6 GHz Quad Core ARM cortex A53
Grafický procesor	ARM Mali T880 MP12
Operačná pamäť	4 GB LPDDR4
Interná pamäť	32 GB (Použiteľných 22 GB)
Externá pamäť	200 GB micro sd, microSDHC, microSDXC
Veľkosť displeja	5,1 palca
Max. rýchlosť sťahovania dát pri prezeraní Internetu	450 Mbps
Max. rýchlosť odosielania dát prezeraní Internetu	50 Mbps
Wi-Fi podpora	802.11a/b/g/n/ac
MIMO	2x2 s maximálnou rýchlosťou 867 Mbps s 80 MHz šírkou pásma
Bluetooth	4.2 s A2DP

4.1.2 Intrinsic's Open-Q™ 820 Development Kit

Intrinsic's Open-Q™ 820 predstavovala jednoduchú vývojársku sadu pre rôzne potreby testovania vložených vecí a IoT zariadení. Obsahovala podporu IEEE 802.11ac v maximálnej konfigurácii 2x2 MU-MIMO. Pracovala s operačným systémom Android 6.0 Marshmallow. Cena tohto kitu sa pohybovala okolo 500\$ v závislosti na počtu kúpených rozšírení [27].



Obr. 4.2: Intrinsic's Open-Q™ 820 Development Kit

V Tab.č. 4.2 bol uvedený popis špecifikácií, ktoré tento vývojový kit obsahoval:

Tab. 4.2: Prehľad vlastností Open-Q™ 820 [27]

Parametre	Hodnota
Operačný systém	Android 6.0 Marshmallow
Procesor	Qualcomm Snapdragon 820 (4x 64-bit, 14 nm Kryo cores s 2x 2,2 GHz, 2x @ 1,6 GHz) 624 MHz Adreno 530 GPU Hexagon 680 DSP 14-bit Spectra ISP
Operačná pamäť	3 GB LPDDR4 RAM
Veľkosť disku	32 GB UFS 2.0 Flash 1-lane, výbava 3
Externá pamäť	200 GB micro sd, microSDHC, microSDXC
Bezdrôtová komunikácia	IEEE 802.11n /ac (Qualcomm 2,4 GHz / 5 GHz 2x2 MU-MIMO) Bluetooth 3,0 / 4.1 Qualcomm IZat Gen 8C GNSS (GPS and GLONASS)
Displej a multimédia	HDMI výstup Voliteľný 4,5 palcový FWVGA displej 3x MIPI-CSI , 4-kanálový, duálny ISP, až do 25 megapixelov pre podporu 3D kamier Voliteľný 13,5 megapixelový kamerový modul 20- pinový audio vstup (3x analog 3x digital) 20- pinový audio výstup (5x analog 1x digital)
Ostatné vstupno - výstupné zariadenia	Micro-USB 3.0 2x USB 2.0 Micro-USB 2.0 OTG 8x DIO (4-pinový port konfigurovateľný cez I2C, SPI, UART, alebo GPIO)
Rozšírenie	PCIe x1 v2.1; mini-PCIe v1.2
Napájanie	12 V vstup
Rozmery	170 x 170 mm

4.1.3 Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black

Pre smerovanie bolo vybrané zariadenie Xiaomi Mi Wi-Fi Router, obr.č. 4.3, 1 TB Black. Jednalo sa o bezdrôtový smerovač, ktorý obsahoval dvojjadrový procesor 1 GHz ARM Cortex-A9, 256 MB RAM pamäte, 1 TB pevný disk a podporoval štandard IEEE 802.11ac v maximálnej konfigurácii 2x MU-MIMO. Operoval v pásmach 2,4 a 5 GHz. V nasledujúcej tab.č. 4.3 boli uvedené hlavné parametre [28].



Obr. 4.3: Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black

Tab. 4.3: Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black [28]

Parametre	Hodnota
Procesor	BCM4709 Cortex-A9 1 GHz
Operačná pamäť	256 MB DDR3-1600
Pamäť ROM	16 MB SPI Flash
Wi-Fi	802.11a/b/g/n/ac 2,4 GHz až 300 Mbps 5 GHz až 867 Mbps Duálne všesmerové antény 2 kusy
Porty	1x USB 2.0 Port (DC výstup 5 V/1 A) 1x DC 2*10/100/1000M Prenosné LAN Port(Auto MDI/MDIX) 1*10/100/1000M Prenosné WAN port(Auto MDI/MDIX) 1x Systém stand by režim
Bezdrôtové kanále	5 GHz kanále: 149 , 153 , 157 , 161 , 165 5 GHz DFS kanále: 36 , 40 , 44 , 48 , 52 , 56 , 60 , 64
Modulácia	11b : DSSS : DBPSK(1 Mbps) DQPSK (2 Mbps) CCK (5,5/11 Mbps) QPSK (12/18 Mbps) 16-QAM (24/36 Mbps) 64-QAM (48/54 Mbps)
Podporovaný jazyk	Čínština
Pracovné prostredie	Od -40° až do 65° Celzia

4.2 Realizácia merania IEEE 802.11ac

4.2.1 JAVA

Programovací jazyk Java bol vybraný v naviazanosti na zvolené zariadenia. Obe pracovali s operačným systémom Android. Ďalšou možnosťou pre tento operačný systém bol programovací jazyk C , ale na základe dostupných knižníc a predchádzajúcich skúseností autora bola Java zvolená ako lepšia možnosť.

4.2.2 Návrh a realizácia aplikácie

Hlavnou požiadavkou bolo efektívne zmerať kapacitu prenosovej bezdrôtovej linky. Pre tento účel bola vybraná možnosť merania prenosovej rýchlosti za pomoci FTP serveru. Zo serveru sa pomocou aplikácie stiahli dáta, a na základe dátového toku a času prenosu sa následne vypočítala prenosová rýchlosť. Aplikácia ďalej obsahovala jednoduché GUI (Grahpicl User Interface - Grafické Užívateľské Rozhranie).

Teoretický návrh aplikácie

Ako už bolo spomenuté, základ celej aplikácie bola komunikácia s FTP serverom. Komunikácia bola realizovaná pomocou knižnice JSpeedTest [29]. Medzi hlavné vlastnosti tejto knižnice patrili:

- **testovanie rýchlosti sťahovania**
- **testovanie rýchlosti odosielania**
- **sledovanie procesu sťahovania / odosielania**
- **konfigurácia mena a hesla / portu / názvu serveru**
- **konfigurácia veľkosti posielaných súborov**

Táto knižnica bola vybraná vďaka vyššie spomenutým vlastnostiam a vďaka svojej ľahkej implementácii.

Pomocou jednoduchého GUI, bol zadávaný názov serveru, prihlasovacie meno a heslo. Názov serveru mohol byť zvolený meno alebo IP adresa. Aplikácia obsahovala zadanie portu, ktorý bol nadstavený na 21, čo predstavovalo defalutný port pre FTP prenos. Tento port mohol byť ale zmenený, a preto bola pridaná takáto voľba. Ďalej pozostávala z položky pre zadanie názvu súboru, ktorý bol sťahovaný zo serveru. Bolo veľmi dôležité, aby aplikácia merala downlink, a nie uplink, pretože downlink bol využívaný častejšie. Aplikácia stiahla zadaný súbor a vypočítala priemernú rýchlosť sťahovania dát. Sťahovanie bolo v jednotkách megabytov za sekundu. Okrem rýchlostí bola aplikácia schopná vypísať veľkosť požadovaného súboru a aktuálny

percentuálny stav. Pri zadaní nesprávnych údajov vypísala chybové oznámenie. Názov aplikácie bol SpeedTest a grafický dizajn vidieť na obr.č. 4.4.

Praktická realizácia

Aplikácia bola písaná v Android štúdiu. Verzia systému bola zvolená 4.4 s názvom KitKat. Tento operačný systém bol vybraný cielene, hlavne kvôli jeho veľkej rozšíriteľnosti. V dobe písania práce mal operačný systém KitKat približne 18,8 % podiel na trhu [30].

Pôvodne bola aplikácia postavená na knižnici *org.apache.commons.net.ftp*, avšak pri použití tejto knižnice bola rýchlosť FTP prenosu nižšia, ako bola kapacita prenosovej linky, a preto bolo nutné ju nahradiť. Knižnica mala problém s čistením bufferu počas prenosu, čo spôsobovalo značnú chybu merania rýchlosti. Za ďalšie, dokázala v jednom vlákne prenášať len približne 60 Mbps, pritom priepustnosť linky dosahovala až okolo 300-400 Mbps.

Stahovanie samotného súboru prebehlo na pozadí, a mohli nastať dva prípady. V prvom prípade server podporoval užívateľské účty. Preto bolo potrebné na prihlásenie zadať meno serveru, číslo portu, názov súboru, užívateľské meno a heslo. Druhá možnosť bola tá, že server naslúchal na vybraných portoch a v tom prípade stačilo zadať názov serveru a meno sťahovaného súboru, čo popisoval nasledujúci kód.

```
@Override
protected String doInBackground(Void... voids) {
    if (auth) {
        speedTestSocket.startFtpDownload
            (host, port, file, user, password);
    } else {speedTestSocket.startFtpDownload
        (host, file);
    } return "OK";}
```

Pre nás najdôležitejšia časť kódu spočívala vo vypočítaní priemernej rýchlosti. O to sa staral nasledujúci kód.

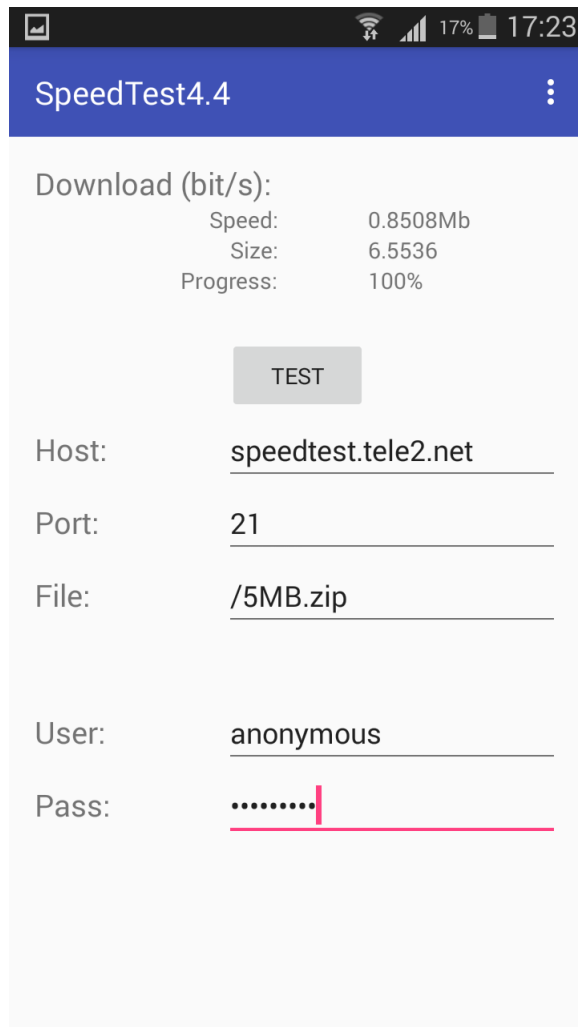
```
@Override
public void onDownloadFinished(SpeedTestReport report) {
    activity.setText(downSpeed, (humanReadableByteCount(
        report.getTransferRateBit().longValue(), false))
        + "/" + (humanReadableBiteCount(
            report.getTransferRateBit
                ().longValue(), false)));
    activity.setText(dwSize, "" + humanReadableByteCount(
        report.getTotalPacketSize()*8, false));
    activity.setText(progress, "100%");
    lastgc = 0;
    System.gc();
}
```

4.2.3 Metodika merania

Podstatou merania bolo experimentálne overenie prenosových vlastností testovanej vysokorýchlostnej bezdrôtovej siete, konkrétne štandardu Wi-Fi IEEE 802.11ac. Tento štandard umožňuje teoretické rýchlosti až do 6,77 Gbps. V tomto prípade smerovač obsahoval 2x MU-MIMO, takže teoretická maximálna prenosová rýchlosť tejto technológie bola teda 867 Mbps pri použití 80 MHz pásma. Samsung Galaxy S7 mohol dosiahnuť maximálnej rýchlosti 867 Mbps [26][28].

Meranie prebiehalo v nasledujúcich krokoch:

1. Na jeden koniec miestnosti bol umiestnený smerovač, na druhý koniec bolo umiestnené meracie zariadenie Samsung Galaxy S7.
2. V miestnosti boli vyznačené body pre jednotlivé stanovištia. Tieto body sa nachádzali na priamke spojujúcej smerovač a meracie stanovisko vo vzdialenosti po jednom metri.
3. Pri nastavení FTP serveru bolo potrebné dať pozor na nastavenie veľkosti bufferu. Tento buffer bol pôvodne nastavený na hodnotu 0. Kvôli tomu dochádzalo k jeho častému čisteniu, čo malo výrazný vplyv na meranie. Postupne bola menená jeho hodnota a najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri hodnote 8192 Kb. Preto bola ponechaná táto hodnota.



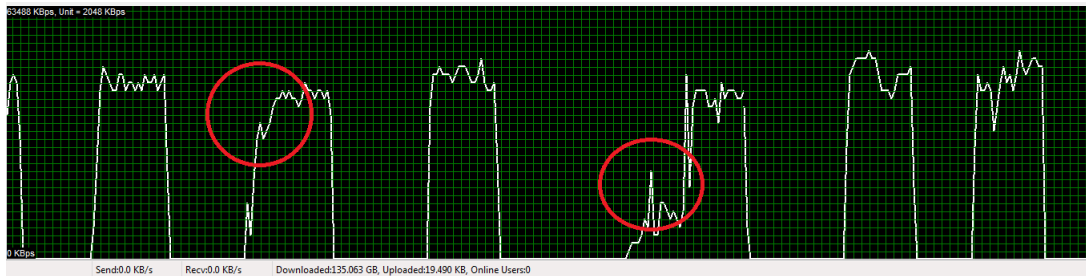
Obr. 4.4: Grafický výstup aplikácie SpeedTest

4. Aplikácia sa pripojila na vytvorený FTP server a následne stiahla súbor. Súbor mal veľkosť 500 MB. Veľkosť súboru bola zámerné zvolená niekoľkokrát väčšia, ako prenosová rýchlosť média. Ak by bol použitý menší súbor, ako bola prenosová rýchlosť, nebolo by možné efektívne merať, pretože by sa súbor poslal skôr, ako by sa stihlo vyťažiť celé pásmo linky.
5. Meranie bolo uskutočnené pre každú vzdialenosť(1,2,3,4 a 5 m)10x a výsledky boli následné spriemerované, vďaka čomu boli získané relevantnejšie výsledky a bol obmedzený vplyv negatívnych javov. U merania zariadenia Samsung Galaxy S7 bez tienenia bola zameraná rýchlosť aj pri nulovej vzdialenosti, kedy bol telefón skoro opretý o smerovač. Pri meraní s tienením to nebolo prakticky možné, lebo prekážky nebolo kam umiestniť. Zároveň bol menený typ tienenia, na ktoré bolo využívané ľudské telo. Telo predstavuje najbežnejší typ rušenia, s ktorým prichádza telefón do kontaktu pri každom použití. Ako tienenie bolo

použité celé telo, hlava a obe ruky.

6. Tienenie prebiehalo vložení časti tela medzi komunikačný kanál smerovača a telefónu Samsung Galaxy S7. Cieľom bolo tieniť vždy v rovnakej vzdialenosti od meracieho zariadenia. Jednalo sa o vzdialenosť 10 cm a prekážky boli vždy umiestnené v rovnakej polohe pre všetky merania.
7. Meranie bolo opakované pre vývojovú dosku Intrinsic's Open-Q™ 820 Development Board.

V priebehu merania sa zistilo, že pokiaľ prišlo pri prenose k vyčisteniu pamäte, boli výsledky značne skreslené. Tieto nežiaduce merania sa do konečného merania nezahrnovali a meranie bolo opakované. Pre lepšie pochopenie problému bol vložený obr.č 4.5 zo záznamu FTP serveru. Smerovač bol v bežnom nastavení 5 GHz pásme, vysielal na kanáli 46 a šírka pásma bola 80 MHz. U smerovača bola vypnutá funkcia, ktorá zosilňovala vyžarovanie signálu v prípade detekcie rušenia na prijímacej strane.



Obr. 4.5: Skoky v dôsledku čistenia pamäte

4.3 Výsledky merania IEEE 802.11ac

V nasledujúcich dvoch tabuľkách č. 4.4 a č. 4.5 sa nachádzajú namerané a sprámerované hodnoty v MBps, ktoré boli následne vynesené do grafov č. A.1 a č. A.2.

Z grafov bolo vidno, že hodnoty so vzdialenosťou neklesali, ale dokonca ešte stúpali. Prenosová rýchlosť klesala zväčša pri 2-hom a 4-tom metri, a opäť rástla pri 3-tom a 5-tom metri.

Z prvotných výsledkov bolo usúdené, že aplikácia nepracovala ako mala, alebo bola chybná metodika merania. Rolu mohlo hrať aj chybné nastavenie smerovača. Po kontrole rýchlostí inou aplikáciou bola vylúčená možnosť chybného počítania. Bolo zistené, že problém bol v nastavovaní vysielacieho výkonu. Preto bola táto možnosť na smerovači vypnutá, čo ale nemalo žiadny vplyv na prenosovú rýchlosť. Z toho bol vyvodený záver, že technológia Wi-Fi s testovaným rozšírením obsahovala takúto možnosť aj v telefónoch (mobilných zariadeniach). Kvôli názornej ukážke

Tab. 4.4: Namerané priemerné hodnoty Samsung Galaxy S7

Vzdialenosť	Bez tienenia	Tienenie rukami	Tienenie telom	Tienenie hlavou
0 m	43,19 MBps	-	-	-
1 m	45,44 MBps	49,53 MBps	39,97 MBps	46,75 MBps
2 m	40,88 MBps	45,67 MBps	40,11 MBps	45,37 MBps
3 m	37,00 MBps	47,23 MBps	47,39 MBps	47,00 MBps
4 m	40,96 MBps	44,77 MBps	43,77 MBps	42,63 MBps
5 m	43,04 MBps	46,99 MBps	45,36 MBps	43,12 MBps

Tab. 4.5: Namerané priemerné hodnoty Intrinsyc's Open-Q™ 820

Vzdialenosť	Bez tienenia	Tienenie rukami	Tienenie telom	Tienenie hlavou
1 m	44,41 MBps	45 MBps	41,63 MBps	43,90 MBps
2 m	44,63 MBps	45,87 MBps	45,80 MBps	44,17 MBps
3 m	42,75 MBps	46,00 MBps	44,65 MBps	43,32 MBps
4 m	43,39 MBps	43,81 MBps	45,16 MBps	42,02 MBps
5 m	45,55 MBps	43,98 MBps	42,36 MBps	45,06 MBps

bola uvedená tab. č. 4.6. Meranie prebiehalo chvíľu po meraní bez prekážok. Na prvom meraní bolo vidieť, že v prípade umiestnenia tienenia medzi zariadenia signál klesol o viac ako polovicu. Ďalšie merania už potvrdili stúpajúcu tendenciu. Tento experiment bol vyskúšaný ešte raz, kedy bolo uskutočnené meranie s tienením hlavou. Následné bolo asi na minútu nechané zariadenie voľne ležať bez tienenia. Potom bolo uskutočnené ďalšie meranie, konkrétne číslo 8. a 9. a signál opätovne dosahoval znížené hodnoty.

Ďalším dôvodom, prečo signál opätovne rástol a klesal bol beamforming. Táto technológia bola popísaná v časti 3.7.2. a na obr.č. 3.4. Z grafov bolo krásne vidieť, ako signál v konkrétnych miestach klesal, a potom opäť rástol, čo bolo spôsobené konštruktívnou a deštruktívnou interferenciou vysielaných signálov. Táto technológia spolu s nastavovaním výkonu vedela efektívne dosiahnuť maximálny signál aj pri pôsobení rušenia.

Tabuľka číslo č. 4.5 zobrazuje prenosové rýchlosti zmerané pomocou Intrinsyc's Open-Q™ 820. V grafe č. A.2 bolo vidieť mierne poklesy so vzrastajúcou vzdialenosťou.

Tab. 4.6: Namerané hodnoty pri tienení hlavou na vzdialenosť 5 m so zariadením Samsung Galaxy S7

Meranie č.	Hodnota v MBps	Hodnota v Mbps
1.	20,7	165
2.	45	359
3.	49.5	396
4.	48	384
5.	51.2	410
6.	51,1	408
7.	48	384
8.	27,6	220
9.	39,6	316
10.	48,1	385
11.	45,3	363

ťou. Avšak pri tienení hlavou a bez tienenia došlo pri piatom metri opäť k nárastom výkonu. Toto meranie potvrdilo vyššie spomenuté úvahy, a platili pre neho rovnaké závery, ako boli uvedené u merania telefónu.

Celkovo tieto dostupné technológie zvládali veľmi dobre prenosy veľkých objemov dát. Signál v pásme 5 GHz mal horšiu priepustnosť, avšak na voľných priestranstvách a pri bežnom rušení tela by boli úbytky pomerne nízke a nedochádzalo by k veľkému rušeniu. U merania telefónu bol maximálny útlm pod 6 MBps, u dosky bol maximálny útlm 4 MBps. Treba ale pripomenúť, že na voľnom priestranstve by nebolo možné využívať odrazu signálov. V prípade, že by sa bolo medzi prijímaciu a vysielaciu stanicu dostalo tienenie, malo by to razantné dopady na rýchlosť. Z tohto pohľadu môžeme povedať, že táto technológia by bola vhodná pre Virtuálnu a Rozšírenú Realitu len za predpokladu použitia kompresie videa [31].

4.4 Použitý hardware na meranie vlastností IEEE 802.11ad

4.4.1 Dell Wireless Dock D5000

Prvé zariadenie, ktoré bolo použité, bola dokovacia stanica od spoločnosti Dell, obr.č. 4.6, ktorej základné parametre boli uvedené v nasledujúcej tab.č. 4.7. Dokovacia stanica, niekedy nazývaná aj Port Replikátor, slúži na zvýšenie počtu a typu

portov možných využiť na pripojenom zariadení.

Tab. 4.7: Prehľad vlastností Dell D5000 [32]

Parametre	Hodnoty
Spotreba	60 Wattov
USB 3.0	3x
HDMI	1x 1.3 1920 x 1200 @ 60 Hz
Display Port	1x 1920 x 1200 @ 60 Hz
Audio výstup	3,5 mm jack
Max. prenos. rýchľ.	4,6 Gbps
Pásmo	60 GHz
Kanály	60.48 GHz - 62.64 GHz
Chipset	Welocity WIL6120 Marlon-M, WIL6110 Marlon-R
Rozmery	190x86x30.7 mm



Obr. 4.6: Dokovacia stanica DellD5000

4.4.2 Dell DW1601 Wireless card

Ďalším zariadením, ktoré bolo využité, bola Wi-Fi karta Dell DW1601, obr.č. 4.7. Karta bola nainštalovaná do krytu od zariadenia Dell D5000. K nej bola pripojená malá anténa s polom 8x2. Anténa tam bola umiestnená kvôli lepšiemu odrazu lúčov a kvôli lepšiemu odvodu tepla. S počítačom bola prepojená pomocou PCI redukcie.

Základné špecifikácie boli uvedené v nadchádzajúcej tab.č. 4.8.



Obr. 4.7: Dell Wireless DW1601 QCA9005

Tab. 4.8: Prehľad vlastností Dell DW1601 [33]

Parametre	Hodnoty
Podpora	WiGig v1.1, IEEE 802.11 ad D6.0 Wi-Fi IEEE 802.11 a/b/g/n Bluetooth so zvýšeným prenosom dát
Max. rýchlosť	WiGig - 4,6 Gbps Wi-Fi - 300 Mbps

4.4.3 HP Elitebook 8740w a desktop PC

Obe zariadenia boli prepojené s počítačmi. Konkrétne, ku karte Dell DW1601 bol pripojený desktopový PC pomocou mini-PCIe k PCIe slotu, vybavený procesorom Intel i5-6500 a SSD diskom o kapacite 240 GB. Na základe testov bolo nutné zvoliť zariadenia tak, aby stíhali zapisovať a spracovávať vysoké prenosové rýchlosti. Ku dokovacej stanici bol pripojený HP Elitebook 8740w [34].

4.5 Realizácia merania IEEE 802.11ad

Pri overovaní vlastností technológie IEEE 802.11ad bolo rozhodnuté nepoužiť aplikáciu vytvorenú pre predchádzajúce meranie, ale použiť voľne dostupný software na meranie priepustnosti pásma Iperf3. Bolo to z dôvodu značného nárastu zložitosti naprogramovať takúto aplikáciu na meranie požadovaných vysokých rýchlostí. Takýto program nemal ani byť hlavnou náplňou práce. Iperf bol program bez grafického rozhrania, ktorý pracoval z príkazového riadku. Pre lepšie ovládanie bolo naprogramované grafické rozhranie. Programovací jazyk pre túto aplikáciu bol zvolený opäť Java s grafickým rozšírením JavaFX.

4.5.1 Teoretická a praktická realizácia

Komunikácia zariadení prebiehala medzi serverom a klientom, ale tento krát nie za pomoci FTP serveru, ale serveru vytvoreného pomocou programu Iperf3. Tento program umožnil spustiť server na jednej strane, a na druhej strane linky, pomocou klienta, na základne vybraných parametrov merať prenosové kapacity linky. Program umožňoval merať protokoly TCP alebo UDP, ktoré sa dali ďalej podrobnejšie nastavovať. Program bol rozšírený o navrhnuté grafické rozhranie kvôli zjednodušeniu ovládania. Ako bolo vyššie uvedené, aplikácia bola napísaná v jazyku JavaFX hlavne z dôvodu predošlých skúsenosti s týmto jazykom a jeho grafickým rozšírením [35].

V prvom rade bolo potrebné zistiť základné parametre a funkčnosť programu Iperf. Ako bolo spomenuté vyššie, Iperf vedel pracovať v dvoch režimoch, režim klient a režim server. Vytvorená aplikácia vedela pracovať v oboch režimoch, ale dôležitejší bol režim klient. V tomto režime sa nastavujú všetky dôležité nastavenia. Režim server iba odpočúval na zadanom porte, čo bol defalutne nastavený na číslo 5201. Ďalej bolo potrebné zistiť základné parametre pre nevyhnutné spustenie programu. Pre klienta boli základné parametre -c ako klient, adresa serveru a parameter -p ako číslo portu. U serveru stačilo napísať -s ako server. Všetky ostatné parametre boli nastavené defalutne. Dôležité bolo dodržať správne poradie príkazov. Postupne bolo okrem základných vlastností pridané aj rozšírené nastavenia TCP a UDP protokolu. Boli pridané takmer všetky možnosti, ktoré boli implementované z dôvodu testovania rýchlosti pri rôznych nastaveniach. Vďaka grafickému rozhraniu bolo možné jednoducho nastaviť veľkosť okna, dĺžku bufferu a maximálnu dĺžku segmentu u protokolu TCP. U protokolu UDP bolo možné nastaviť šírku pásma. Konkrétne toto nastavenie bolo veľmi dôležité a detailnejšie bolo popísané v metodike merania. Ďalšími nastaveniami boli report interval, nastavenie výstupných

jednotiek, spôsob prenosu, No delay, TTL a typ servisu.

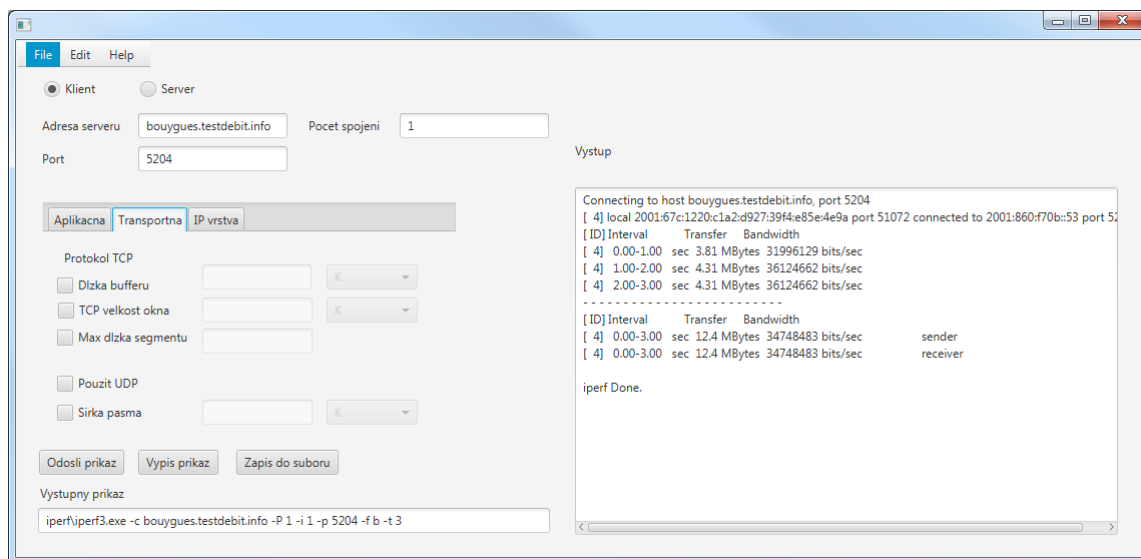
Samotný výstup aplikácie bol realizovaný do JavaFX pola TextArea. Tento výstup nebol nijako formátovaný, bol to výstup priamo z programu Iperf3, ktorý bol dostatočne prehľadný. Program umožňoval zápis výpisu do textového súboru. Kvôli prehľadnosti a testovaniu bola pridaná aj možnosť vypísať zadaný príkaz do pola TextField. Na obr.č. 4.8 vidieť grafickú podobu navrhnutej aplikácie.

Nasledujúci kód zabezpečoval cestu k programu Iperf3 a jeho spustenie s vybranými a zvolenými parametrami.

```
public void SpustiButton2(ActionEvent event) {
    ExecuteShellComand obj = new ExecuteShellComand();
    if (rbKlient.isSelected()) {
        String command = "iperf\\iperf3.exe" + vyberKS + " "
+ adresTF.getText()+ " -P" + " -i" + reportIntTF
.getText() + " -p" +portTF.getText() + bufferHod
+ segmentHod + oknoHod + " -f" + outFormat.getValue()
+ vyberVysielan + vysielanieTF.getText()+ nodelayHod
+ tosTF.getText() + sirkapasmaHod + udpHod;
        String output = obj.executeCommand(command);
        vystup.setText(output);
    }
}
```

Nasledujúci kód sa staral o vykonanie príkazu a zabezpečoval výstup vo formáte string.

```
public String executeCommand(String command) {
    StringBuffer output = new StringBuffer();
    Process p;
    try {
        p = Runtime.getRuntime().exec(command);
        p.waitFor();
        BufferedReader reader =
new BufferedReader
(new InputStreamReader(p.getInputStream()));
        String line = "";
        while ((line = reader.readLine()) != null) {
            output.append(line + "\n");
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
        return output.toString()
    }
```



Obr. 4.8: Výsledná podoba navrhnutej aplikácie

4.5.2 Metodika merania

Ako u predchádzajúceho merania, aj teraz bolo úlohou experimentálne overiť prenosové vlastnosti technológie IEEE 802.11ad. Táto technológia dosahovala teoretické rýchlosti 6.912 Gbps. V tomto prípade bol limit nastavený technológiou Ethernet, ktorá cez kábel zvládala prenášať 1 Gbps. Pre uskutočnené meranie bola táto rýchlosť dostačujúca. Bolo to z nasledujúcich dôvodov. Jednou z úloh bolo zmerať dosah štandardu, kedy neboli potrebné a nebolo ani možné dosahovať maximálne prenosové rýchlosti. Taktiež pri dosiahnutí rýchlostí do 1 Gbps sme vedeli, že aplikácia pracovala správne. Bolo to z dôvodu, že bola schopná využiť celé prenosové pásmo linky. Ak by aplikácia v najmenších vzdialenostiach dosahovala nižšie rýchlosti, nepracovala by správne. Technológia má teoretický dosah 20 metrov [23].

Meranie prebiehalo v nasledujúcich krokoch:

1. Na jeden koniec chodby bol umiestnený desktopový PC s SSD diskom, ku ktorému bola pripojená Wi-Fi karta Dell DW1601, a bola nasmerovaná tak, aby vyžarovala výkon súbežne s chodbou. Následne bol pomocou aplikácie na PC spustený server Iperf3 aplikácie. Server bežal na prednastavenom porte 5201. Všetky ostatné nastavenia ostali defaultné.
2. Na chodbe boli vyznačené body vzdialené od seba 1,5 m, ktoré boli využité ako kontrolné stanovišťa. Prvý bod sa nachádzal priamo pri Wi-Fi karte.
3. Na tieto body sa postupne presúvalo s druhým PC, ku ktorému bola pripojená dokovacia stanica Dell D5000. Vždy bolo snahou mať zariadenia otočené

priamo na seba.

4. Na každom stanovišti bolo pomocou aplikácie uskutočnené meranie. Po spustení aplikácie bola zadaná adresa serveru, číslo portu a boli zvolené jednotky pre výstup. Výstupy boli zvolené v Mbps. Report interval bol defaultne nastavený na 1 sekundu, čo znamená, že každú sekundu sme obdržali výpis na obrazovku o aktuálnej meranej rýchlosti. Na posielania dát boli na výber dve možnosti. Za prvé sa mohlo zvoliť poselať na server určenú veľkosť súboru, alebo sa mohol voliť časový úsek, po ktorý bude linka maximálne vyťažená. Pre každé meranie bol zvolený časový úsek po dobu 10 sekúnd. Výstup bolo možné vidieť ako na obr.č. 4.8. Čas 10 sekúnd bol zvolený zámerne, aby bolo dosiahnutých viacej výsledkov, ktorých priemer mal väčšiu výpovednú hodnotu.
5. Meranie TCP protokolu bolo v pôvodných nastaveniach. Pri protokole UDP bolo treba zadať parameter -b0 . Parameter -b značil šírku pásma, ktorá bola defaultne v Iperf u TCP protokolu nastavená na maximálnu hodnotu, ale u UDP bola nastavená na 1 Mbit. Pri takomto nastavení boli dosiahnuté veľmi pomalé prenosové rýchlosti a preto bolo potreba parametru -b priradiť hodnotu 0. To znamenalo maximálnu možnú prenosovú šírku pásma.
6. Meranie bolo uskutočnené až do vzdialenosti 49,5 metrov. Pre každú vzdialenosť bolo uskutočnené meranie TCP aj UDP protokolu.
7. Medzi zariadeniami prebehlo naviazanie spojenia, keď boli zariadenia v menšej vzdialenosti. Pri vzdialenosti 50 metrov zariadenia už neboli schopné naviazať spojenie.

4.6 Výsledky merania IEEE 802.11ad

Priemerné zmerané hodnoty boli uvedené v tabuľkách č. 4.9 a č. 4.10 a následné vynesené do grafov č. A.4.

4.6.1 Zhodnotenie nameraných hodnôt

V priebehu samotného merania bol prekvapením veľký dosah technológie. Ako sa uvádza v štandarde, priemerný dosah je do 20 metrov. Očakávania maximálnej vzdialenosti boli v okolí 20 m maximálne 30 metrov. Nakoniec bolo meranie uskutočnené až do vzdialenosti necelých 50 m. Väčšiu vzdialenosť nebolo možné dosiahnuť z dôvodu dosiahnutia druhého konca chodby [25].

Takáto veľká vzdialenosť bola dosiahnutá z dôvodu zosilnenia signálu spolu so správnym nastavením odrazu lúčov a použitia beamforming-u. Tieto efekty bolo nádherne vidieť na grafoch č. A.4. Bolo vidieť, ako vždy rýchlosť postupne klesala

Tab. 4.9: Namerané priemerné hodnoty rýchlosti TCP protokolu v závislosti na vzdialenosti zariadení

Vzdial. v m.	Rých. v Mbps	Vzdial. v m.	Rých. v Mbps
0	622	25,5	554
1,5	832	27	491
3	836	28,5	391
4,5	773	30	596
6	609	31,5	303
7,5	605	33	595
9	607	34,5	496
10,5	605	36	352
12	603	37,5	448
13,5	609	39	539
15	596	40,5	492
16,5	598	42	489
18	478	43,5	582
19,5	535	45	554
21	536	46,5	490
22,5	594	48	491
24	383	49,5	457

a pri dosiahnutí určitej hranice začala opäť stúpať. Boli to miesta, kde dochádzalo buď ku konštruktívnym alebo práve deštruktívnym interferenciám signálov. Úzka chodba mala ideálne vlastnosti pre odrazy signálov, vďaka čomu sa podarilo dosiahnuť prenos dát na tak veľké vzdialenosti. V otvorenom priestranstve by sa také vzdialenosti nedosiahli.

Výsledky boli takmer totožné pre oba protokoly. Rozdiel bol v maximálnych rýchlostiach. Zatiaľ čo u TCP sa rýchlosť pohybovala v okolí 600 Mbps, u UDP protokolu to bolo až 800 Mbps. Bolo to z dôvodu, pretože UDP protokol bol nespojitý a TCP bol spojitý protokol. Ako bolo vidieť na grafoch, do 2 metrov rýchlosti stúpali, potom začali klesať, až sa na približne 5 metroch dostali na stálu rýchlosť. Do 15 metrov sa oba testované protokoly držali na stabilných rýchlostiach. Za touto hranicou už dochádzalo k vyššie spomenutým úbytkom nasledovným opätovným zvýšením. Zaujímavosťou bolo, že žiadne zo zvýšení už neprekročilo rýchlosť dosiahnutú pri prvých 15 metroch. Z tohto dôvodu bolo experimentálne potvrdené predošlé tvrdenia, že technológia Ethernet bude dostačujúca, pretože dosahované

Tab. 4.10: Namerané priemerné hodnoty rýchlosti UDP protokolu v závislosti na vzdialenosti zariadení

Vzdial. v m.	Rých. v Mbps	Vzdial. v m.	Rých. v Mbps
0	719	25,5	649
1,5	942	27	666
3	931	28,5	508
4,5	794	30	678
6	794	31,5	369
7,5	799	33	718
9	783	34,5	770
10,5	784	36	331
12	786	37,5	546
13,5.	785	39	676
15	780	40,5	667
16,5	550	42	654
18	639	43,5	665
19,5	808	45	739
21	723	46,5	334
22,5	739	48	637
24	514	49,5	515

rýchlosti boli nižšie ako jej maximálna rýchlosť. Taktiež priepustnosť cez prekážky bola u tohto štandardu veľmi chabá, keď už len pri pohybe osoby cez chodbu dochádzalo k výpadkom spojenia.

4.7 Meranie v EMC miestnosti

Naskytla sa možnosť uskutočniť meranie v školskej EMC (Elektromagnetická kompatibilita) miestnosti, ktorá bola dokonale odizolovaná od vonkajších rušivých signálov, ako sú ostatné Wi-Fi a mobilné siete. Táto miestnosť bola taktiež bez odrazová, vďaka čomu nedochádzalo k ovplyvňovaniu signálov samých sebou. U smerovača by mala byť takýmto spôsobom výrazne obmedzená technológia MIMO. Meranie bolo zopakované pre vývojovú dosku Instrinsic's Open-Q 820. Zariadenie Samsung Galaxy S7 v tej dobe už nebolo k dispozícii, takže nebolo možné opakovať na ňom meranie. Samotné meranie prebiehalo presne takým istým spôsobom a pri použití rovnakých prekážok ako bolo v meraní v normálnom prostredí. Snaha bola čo naj-

vernejšie zopakovať meranie, aby bolo možné namerané hodnoty čo najvernejšie porovnávať [36].

Tab. 4.11: Namerané priemerné hodnoty Intrinsyc's Open-Q™ 820 v EMC miestnosti

Vzdialenosť	Bez tienenia	Tienenie rukami	Tienenie telom	Tienenie hlavou
1 m	47,31 MBps	48,05 MBps	40,83 MBps	43,38 MBps
2 m	36,36 MBps	42,28 MBps	39,66 MBps	44,77 MBps
3 m	37,08 MBps	42,87 MBps	44,79 MBps	42,51 MBps
4 m	41,94 MBps	41,04 MBps	32,45 MBps	38,93 MBps
5 m	36,41 MBps	41,99 MBps	36,41 MBps	38,87 MBps

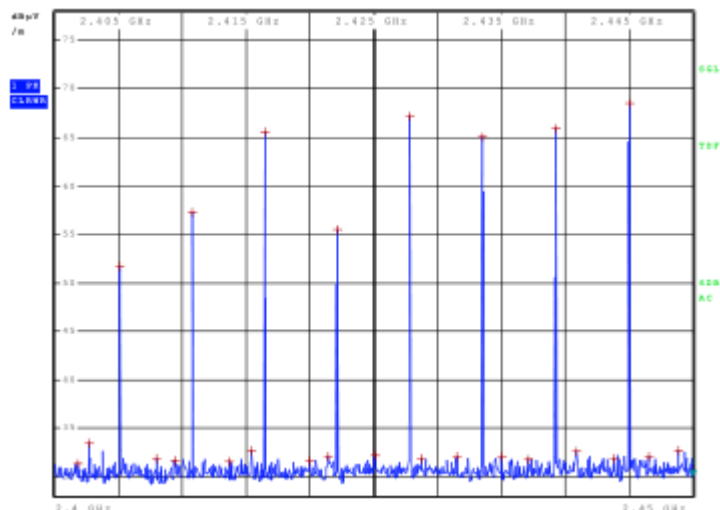
Namerané a z priemerované hodnoty boli uvedené vyššie v tab. č. 4.11. Z grafu č. A.3 bolo vidieť, že celkovo boli všetky rýchlosti v EMC miestnosti rádovo o jednotky MB nižšie, ako pri meraní uskutočnenom v klasickom prostredí. Z toho bolo usúdené, že časť technológie MIMO bola výrazne obmedzená, ako bolo predpokladom. Jednalo sa o časť, kedy dokáže viacero antén smerovať signál k jednej, alebo k viacero anténam vďaka rôznym odrazom od prostredia a tak docieľiť maximálnu rýchlosť. Avšak dané meranie ukázalo, že smerovač aj pri zlej využiteľnosti tejto technológie dokázal zabezpečiť zvýšenie prenosovej rýchlosti. Boli za to zodpovedné technológie beamforming a zvyšovanie výkonu. Beamforming bol detailnejšie popísaný v časti 3.7.2.

4.7.1 Meranie EMC

Vďaka prístupu k tejto miestnosti bola zameraná taktiež elektromagnetická kompatibilita. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnosť zariadenia, systému či prístroja správne fungovať v prostredí, v ktorom pôsobia aj iné zdroje elektromagnetických signálov, a zároveň však svojou vlastnou elektromagnetickou činnosťou nesmú neprípustne ovplyvňovať svoje okolie.

Meranie EMC sa uskutočnilo vo vyššie spomenutej miestnosti, ktorá bola elektromagneticky odtienená od okolia a taktiež bezodrazová.

Na obrázku č. 4.9 bolo zobrazené frekvenčné spektrum 2,4 GHz pásma vo vzdialenosti 3,5 metra od vysielača. Ak by bolo zariadenie správne elektromagneticky vyvážené, neboli by sa tam nachádzali špičky tak, ako to bolo možné vidieť na obrázku 4.9. Tie znamenali, že i keď zariadenie nevysielalo, stále bolo možné detekovať



Obr. 4.9: EMC

na týchto frekvenciách značné zvýšenie signálu. Znamenalo to, že zariadenie vysielalo signál i v nečinnosti. Tieto javy vznikali zlým tienením a nedokonalosťami pri návrhu daného obvodu. Jednalo sa o frekvencie, na ktorých sa vysielalo v pásme 2,4 GHz. Treba ale zohľadniť, že sa jednalo o vývojovú dosku kedy sa na takéto parametre veľký dôraz nekladie. Na druhú stranu, v praxi, pri komerčnom použití to môže byť značne nebezpečné.

5 ZÁVER

Cielom bakalárskej práce bolo experimentálne overiť prenosové vlastnosti bezdrôtových technológií IEEE 802.11ac a IEEE 802.11ad. Tieto nové štandardy boli schopné dosahovať vysoké prenosové rýchlosti. Vyznačovali sa pokročilými anténnymi technikami, ktoré využívali odraz lúča a beamforming. Tieto techniky boli schopné využívať vďaka technológii MIMO, čo znamenalo, že zariadenia obsahujú viacero antén, ktoré boli schopné ovládať a dosahovať tak maximálne prenosové rýchlosti aj v zhoršených podmienkach, alebo na väčšie vzdialenosti. Hlavný rozdiel medzi staršími štandardami je hlavne využívané prenosové pásmo a šírka kanálu.

V prvej časti sa práca venovala popisu Internetu vecí. Nasledoval teoretický popis spôsobu komunikácie medzi zariadeniami, kde sa detailnejšie zameriavala na popis spôsobu M2M komunikácie. V nasledujúcej časti sa práca venovala histórii štandardom IEEE 802.11, až po zvolené štandardy na experimentálne overenie IEEE 802.11ac/ad.

V úvode praktickej časti práca popisuje všetky dostupné zariadenia použité pri meraní. Ďalšia časť pozostávala z výberu programovacieho jazyka, ktorým bola Java, a praktického návrhu aplikácie na meranie rýchlosti prenosu štandardu IEEE 802.11ac. Na meranie štandardu IEEE 802.11ad bol zvolený použiť voľne dostupný software Iperf3, na ktorý bolo naprogramované GUI, opäť v jazyku Java s grafickým rozšírením JavaFX. V tejto časti sa nachádza aj realizácia samotného merania a jeho metodika.

Zaujímavé výsledky sa dosiahli pri oboch štandardoch. Pri meraní technológie IEEE 802.11ac rýchlosť neklesala tak, ako bolo očakávaním, ale naopak držala sa konštantná i na väčšie vzdialenosti. Ako bolo vidieť v grafoch, rýchlosť klesala a potom opätovne stúpala. Bolo to spôsobené niekoľkými faktormi. V prvom rade testované zariadenia obsahovali power control režim, ktorý pri poklese sily signálu na prijímacej strane dokázal signál zosilniť. Takýmto spôsobom mohli zariadenia opätovne dosahovať maximálne rýchlosti. Ďalšou technológiou bol odraz signálov od stien prostredia. Vďaka tejto technológii bol smerovač schopný správne nastaviť odrazené signály tak, aby k prijímaciemu miestu dorazili v správnom čase a poradí. Posledná technológia, ktorá dopomohla k maximalizácii výkonu i v sťažených podmienkach bola beamforming. Táto technológia dokázala vo vybraných miestach zosilniť signál vďaka fázovému posunutiu. Doslova, smerovač nasmeroval svoj výkon na požadované miesto, a tak zabezpečil maximálnu prenosovú rýchlosť. Táto úvaha bola aj experimentálne overená. Jedno meranie sa vykonalo bez prekážky a následne bola v ďalšom meraní vložená medzi zariadenia prekážka. Rýchlosť v prvých dvoch meraniach klesla a následne sa vrátila na pôvodnú hodnotu.

U technológie IEEE 802.11ad boli výsledky ešte zaujímavejšie. Teoretický dosah sa udával do 20 metrov. V uskutočnenom meraní bola rýchlosť zmeraná takmer ešte pri 50 metroch. Meranie prebiehalo na úzkej chodbe a podobne ako štandard IEEE 802.11ac, aj tento využíval pokročilé antény technológie. Do prvých 15 metrov si oba testované protokoly, TCP aj UDP, držali stabilné rýchlosti. Potom začalo dochádzať k úbytkom a opätovným nárastom rýchlostí. Rýchlosti ale už nikdy nepresiahli hodnoty, ktoré sa podarilo namerať pri prvých 15 metroch. Práve vďaka tvaru chodby a odrazu lúčov bolo možné dosiahnuť väčšie vzdialenosti s takýmito rýchlosťami. Lúč sa mohol ideálne odrážať od stien chodby a tak prekonať väčšiu vzdialenosť. Vo vonkajších podmienkach bol predpoklad, že by sa takéto vzdialenosti nepodarilo dosiahnuť. Taktiež beamforming technológia značne predlžovala dosah a výkon tohto štandardu. Ako bolo vidieť na grafe, rýchlosti klesali a opätovne stúpali podľa miesta merania. Pre oba grafy boli miesta úbytkov a nárastov na približne rovnakých miestach. To krásne ilustrovalo funkciu beamformingu, kedy v určitých miestach dochádzalo ku konštruktívnemu a v iných miestach k deštruktívnemu spojeniu signálov. Takéto hodnoty bolo možné dosiahnuť spojením týchto technológií, kedy sa zosilnené lúče mohli odrážať na väčšie vzdialenosti a opäť tak v určitých miestach interferovať. Treba pripomenúť, že na vzdialenosť 50 metrov sa zariadenia neboli schopné pripojiť. Ak boli pripojené, meranie fungovalo vďaka vyššie spomenutým technológiám. Taktiež, už pri malom rušení, ako prechodu osoby cez chodbu, dochádzalo k výpadkom spojenia a bolo potreba nadviazať spojenie pri menšej vzdialenosti. To len potvrdilo chabú priepustnosť štandardu cez prekážky.

Tieto merania overili, že tieto nové štandardy obsahujú veľmi pokročilé antény techniky, vďaka ktorým sú schopné zabezpečiť prenos i v sťažených podmienkach.

Štandard IEEE 802.11ac sa ukázal ako vhodný na nahradenie v dnešnej dobe bežne používaných starších štandardov z rodiny Wi-Fi. Jeho dosah aj priepustnosť boli dobré na každodenné používanie.

U tohto štandardu sa do budúcnosti počíta s rozšírením IEEE 802.11ax. Vyznačovať by sa mal lepším dosahom a vyššími prenosovými rýchlosťami, ktoré by mal dosiahnuť pomocou lepšej modulácie, znížením veľkosti subpásiem a ďalšími technológiami. Pracovať by mal v pásme pod 6 GHz [37].

Štandard IEEE 802.11ad by bol vhodný na domáce používanie alebo tam, kde by sa vyžadovali veľké prenosi dát na malé vzdialenosti a pri priamej viditeľnosti. Vďaka jeho zlej priechodnosti cez prekážky sa na bežné používanie nehodí. Ideálne využitie by bolo pri multimédiách, napríklad pre domáce streamovanie Full HD obsahu.

Do budúcnosti sa počíta s vylepšením štandardom IEEE 802.11ay, ktorý by mal zabezpečovať práve lepší dosah a taktiež dosahovať väčšie prenosové rýchlosti v pásme 60 GHz [38].

LITERATÚRA

- [1] HÖLLER, J., TSIATSIS, V., MULLIGAN, C., KARNOUSKOS, S., AVESAND, S., BOYLE, D., *From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence, 2014, s. 299-336. ISBN : 978-0-12-407684-6*
- [2] *Internet of Things History* [online]. [cit. 1. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.postscapes.com/internet-of-things-history/>>.
- [3] ROUSE, M. *Internet of Things (IoT)* [online]. 2016, [cit. 30. 10. 2016]. Dostupné z URL: <<http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>>.
- [4] *Understanding Internet of Things* [online]. [cit. 30. 10. 2016]. Dostupné z URL: <<http://internetofthingswiki.com/internet-of-things-definition/>>.
- [5] *Model OSI* [online]. [cit. 2. 11. 2016]. Dostupné z URL: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Model_OSI>.
- [6] BELLO, O., ZEADALLY, S., *Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things* [online]. [cit. 20. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6725683>>.
- [7] *When Machines Talk to Machines: M2M deployment can make your business systems smarter* [online]. [cit. 30. 10. 2016]. Dostupné z URL: <https://www.streakwave.com/cradlepoint/CradlePoint_M2M_White_Paper.pdf>.
- [8] KENNY, P., J., *History and Development of Radar* [online]. [cit. 30. 10. 2016]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5329493>>.
- [9] *11 Internet of Things (IoT) Protocols You Need to Know About* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<https://www.rs-online.com/designspark/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about>>.
- [10] MOORE, E. *Frequency Bands Optimal for the Internet of Things* [online]. 18.3.2015, [cit. 19. 5. 2017]. Dostupné z URL: <<https://iot-daily.com/2015/03/18/frequency-bands-optimal-for-the-internet-of-things>>.

- [11] REITER, G., *Wireless connectivity for the Internet of Things* [online]. [cit. 19. 5. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/wp/swry010/swry010.pdf?DCMP=ep-con-wcs-cmtech&HQS=ep-con-wcs-cmtech-bn-whip-en>>.
- [12] *Wi-Fi® and the Internet of Things: (Much) more than you think* [online]. 2.1.2015, [cit. 20. 5. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.wi-fi.org/beacon/craig-mathias/wi-fi-and-the-internet-of-things-much-more-than-you-think>>.
- [13] BERG, J., *The IEEE 802.11 Standardization, Its History, Specifications, Implementations, and Future* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. Dostupné z URL: <http://telecom.gmu.edu/sites/default/files/publications/Berg_802.11_GMU-TCOM-TR-8.pdf>.
- [14] *802.11ah-2016 - 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 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation* [online]. 30.4.2017, [cit. 20. 5. 2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7920364/>>.
- [15] POOLE, I., *IEEE 802.11 Wi-Fi Standards* [online]. [cit. 19. 05. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php>>
- [16] POOLE, I., *IEEE 802.11a* [online]. [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11a.php>>
- [17] POOLE, I., *IEEE 802.11b* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11b.php>>
- [18] POOLE, I., *IEEE 802.11g* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11g.php>>
- [19] POOLE, I., *IEEE 802.11n* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11n.php>>
- [20] GAST, M., S., *802.11ac A survival Guide* [online]. 2016, [cit. 25. 11. 2016]. Dostupné z URL: <http://euro.ecom.cmu.edu/resources/elibrary/auto/802dot11ac_A_Survival_Guide.pdf>

- [21] POOLE, I., *IEEE 802.11ac* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ac-gigabit.php>>
- [22] PERAHIA, E., CORDEIRO, C., PARK, M., YANG, L., *IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi* [online]. 2010, [cit. 20. 05. 2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5421713>>
- [23] POOLE, I., *IEEE 802.11ad Microwave Wi-Fi / WiGig Tutorial* [online]. 2016, [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ad-microwave.php>>
- [24] KIM, J., LEE, I., *802.11 WLAN: History and New Enabling MIMO Techniques for Next Generation Standards* [online]. 2016, [cit. 20. 05. 2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7060495>>
- [25] NITSCHKE, T., CORDEIRO, C., FLORES, B., A., KNIHHTLY, W., E., PERAHIA, E., WIDMER, C., J., *IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gigabit-per-Second Wi-Fi* [online]. 2014, [cit. 20. 05. 2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6979964>>
- [26] *Samsung Galaxy S7 SM-G930F 32GB* [online]. 2016, [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.samsung.com/uk/consumer/mobile-devices/smartphones/galaxy-s/SM-G930FZKABTU/>>
- [27] *Intrinsyc's Open-Q™ 820 Development Kit* [online]. [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<https://intrinsyc.com/wp-content/uploads/2015/12/openq-820-devkit-datasheet.pdf>>
- [28] *Xiaomi Mi Wi-Fi Router 1 TB Black* [online]. 2016, [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<https://xiaomi-mi.com/wifi-routers/xiaomi-mi-wifi-router-1tb-black/>>
- [29] *JSpeedTest* [online]. 3.5.2016, [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<https://github.com/bertrandmartel/speed-test-lib>>
- [30] *Dashboards* [online] 2.5.2017, [cit. 27. 03. 2017]. Dostupné z URL: <<https://developer.android.com/about/dashboards/index.html>>

- [31] YAN, X., LIU, W., CUI, X., *Research and Application of Indoor Guide Based on Mobile Augmented Reality System* [online]. 3.5.2017, [cit. 27.03.2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7467255&tag=1>>
- [32] *Dell Wireless Dock D5000 User Manual* [online]. 2017, [cit. 15.05.2017]. Dostupné z URL: <http://downloads.dell.com/Manuals/all-products/esuprt_electronics/esuprt_docking_stations/dell-wir-dck_user%27s%20guide2_en-us.pdf>
- [33] *Dell Wireless DW1601 QCA 9005* [online]. 2.2013, [cit. 15.05.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ebay.com/itm/Dell-Wireless-DW1601-QCA9005-8V256-WiGig-802-11AD-7GbpsHalf-Mini-Wireless-Card-/261454166168>>
- [34] *HP EliteBook 8740w Mobile Workstation* [online]. [cit. 15.05.2017]. Dostupné z URL: <<https://support.hp.com/us-en/product/hp-elitebook-8740w-mobile-workstation/4138087/product-info>>
- [35] *Iperf* [online]. 2016, [cit. 15.05.2017]. Dostupné z URL: <<https://iperf.fr/>>
- [36] *Meranie v EMC miestnosti* [online]. 2016, [cit. 15.05.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node47>>
- [37] AFAQUI, M., S., VILLEGAS-GARCIA, E., LOPEZ-AGUILERA, E., *IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for future high efficiency WiFi* [online]. 2016, [cit. 20.05.2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7792393>>
- [38] LOMANEYEV, A., GAGIEV, Y., ERSHOV, I., MALTSEV, A., GENOSSAR, M., BOGDANOV, M., *Experimental Investigation of 60 GHz WLAN Channel for Office Docking Scenario* [online]. 2016, [cit. 20.05.2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7481706>>

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

IoT	Internet-of-Things - Internet vecí
IoE	Internet-of-Everything - Internet všetkého
MIT	Massachusetts Institute of Technology - Massachusettský technický inštitút
IPSO	Internet Protocol Smart Object - Internetový Protokol Inteligentných Zariadení
H2H	Human-to-Human - Človek-ku-Človeku
H2M	Human-to-Machine - Človek-ku-Stroju
OSI	Open System Interconnection
ISO	International Organization for Standardization - Medzinárodná organizácia pre štandardy
M2M	Machine-to-Machine - Stroj-ku-stroju
RFC	Request for comments - Žiadosť o komentáre
D2D	Device-to-Device - Zariadenie-ku-zariadeniu
RADAR	Radio Detection And Ranging - Rádiova Detekcia a vytýčenie trasy
IFF	Identify:Friend or Foe - Identifikácia: Priateľ alebo nepriateľ
ISM	Industry, Scientific, Medical - Priemysel, Veda, Medicína
QoS	Quality of Service - Kvalita služieb
TCP	Transmission Control Protocol - Protokol riadenia prenosu
UDP	User Datagram Protocol - Užívateľský Datagramový Protokol
IP	Internet protocol - Internetový protokol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Inštitút Elektrického a Elektronického inžinierstva
BPSK	Binary phase shift keying - Binárne kľúčovanie fázovým posunom
QPSK	Quadrature phase shift keying - Kvadrátne kľúčovanie fázovým posunom

QAM	Quadrature amplitude modulation - Kvadrátúrne amplitúdová modulácia
GFSK	Gaussian frequency shift keying - Gaussovské klúčovanie frekvenčným posunom
GSM	Global System for Mobile Communications - Globálny Systém pre Mobilnú komunikáciu
GPRS	General Packet Radio Service - Obecný paketový rádiový systém
6LowPAN	Internet Protocol v6 Low-Power Wireless Personal Area Network - Internetový Protokol verzie 6 Nízko-Energetická Bezdrôtová Osobná Sieť
LTE	Long Term Evolution - Internetový protokol
HSPA	High Speed Packet Access - Vysokorýchlostný Paketový Prístup
NFC	Near Field Communication - Krátko priestorová komunikácia
AR	Augmented reality - Rozšírená realita
VR	Virtual reality - Virtuálna realita
LAN	Local Area Network - Lokálna sieť
WLAN	Wireless Local Area Network – Bezdrôtová lokálna sieť
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance - Aliancia Bezdrôtovo Ethernetovej kompatibility
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - Viacnásobný prístup s odposluchávaním nosného kmitočtu s detekciou kolízií
CCK	Complementary Code Keying - Komplementárne Kódové klúčovanie
CDMA	Code Division Multiple Access - Kódovo rozdelený viacnásobný prístup
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum - Priama Sekvencia s rozprestreným spektrom
ARS	Addaptive Speed - Adaptívna určovanie rýchlosti
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ortogonálne Frekvenčný Časový Multiplex

MIMO	Multiple Input and Multiple Output - Viacnásobný vstup a viacnásobný výstup
EER	Extended Rate Physicals - Rozšírenie Fyzickej Rýchlosti
PBCC	Packet Binary Convolution Code - Binárny paketový konvolučný Kód
LDPC	Low-Density Parity-Check - Paritný Súčet s Malou Hustotou
MU-MIMO	Multi-user Multiple Input and Multiple Output - Viacero užívateľských Viacnásobných vstup a výstupov
FFT	Fast Fourier Transform - Rýchla Fourierová Transformácia
TxBF	Transmit Beamforming - Prenos Smerovania Lúča
STBC	Space-time Block Coding - Priestorovo-časové Blokované Kódovanie
MCS	Modulation Coding Scheme - Modulácia Kódovej schémy
MCS	Modulation Coding Scheme - Modulácia Kódovej schémy
VESA	Video Electronics Standards Association – Asociácia pre Video elektronické štandardy
MAC	Media Access Control – Kontrola Prístupu k prenosovému Médiumu
WiGig	Wireless Gigabit Alliance – Bezdrôtová Gigabitová Aliancia
PHY	Physical Layer – Fyzická vrstva
CPHY	Control Physical Layer – Kontrolná Fyzická vrstva
SCPHY	Single Carrier Physical Layer – Fyzická Vrstva s Jednou nosnou
LPSCPHY	Low Power Single Carrier Physical Layer – Nízko Energetická Fyzická Vrstva s Jednou nosnou
ARM	Advanced RISC Machine – Pokročilý RISC Stroj
FTP	File Transfer Protocol – Prenosový Súborový Protokol
GUI	Graphical User Interface - Užívateľské Grafické rozhranie
USB	Universal Serial Bus - Univerzálna sériová zbernica
EMC	Electromagnetic compatibility - Elektromagnetická kompatibilita

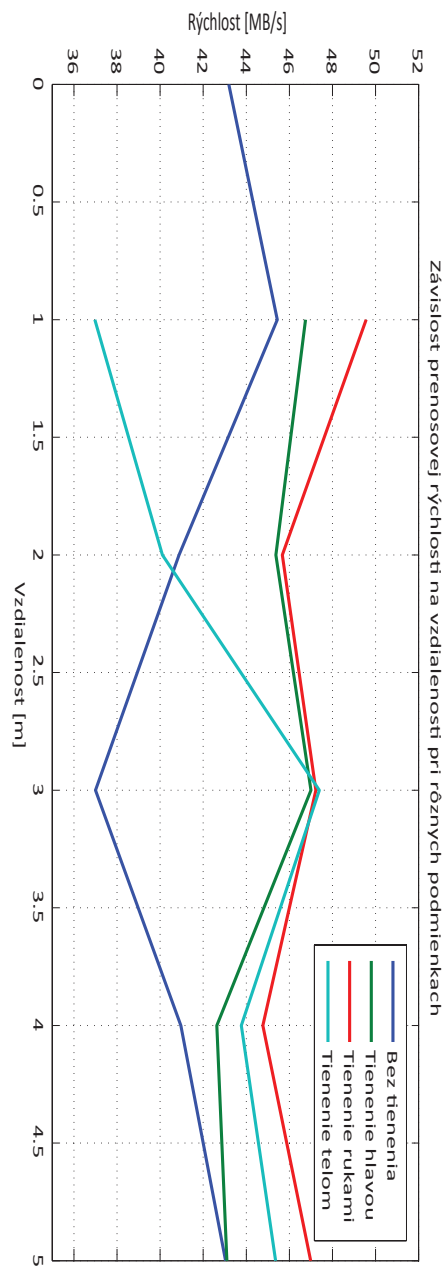
SLS Sector Level Sweep - Hľadanie Úrovne Sektorov
BRP Beam Refinement Phase - Fáza Upresnovania Lúča

ZOZNAM PRÍLOH

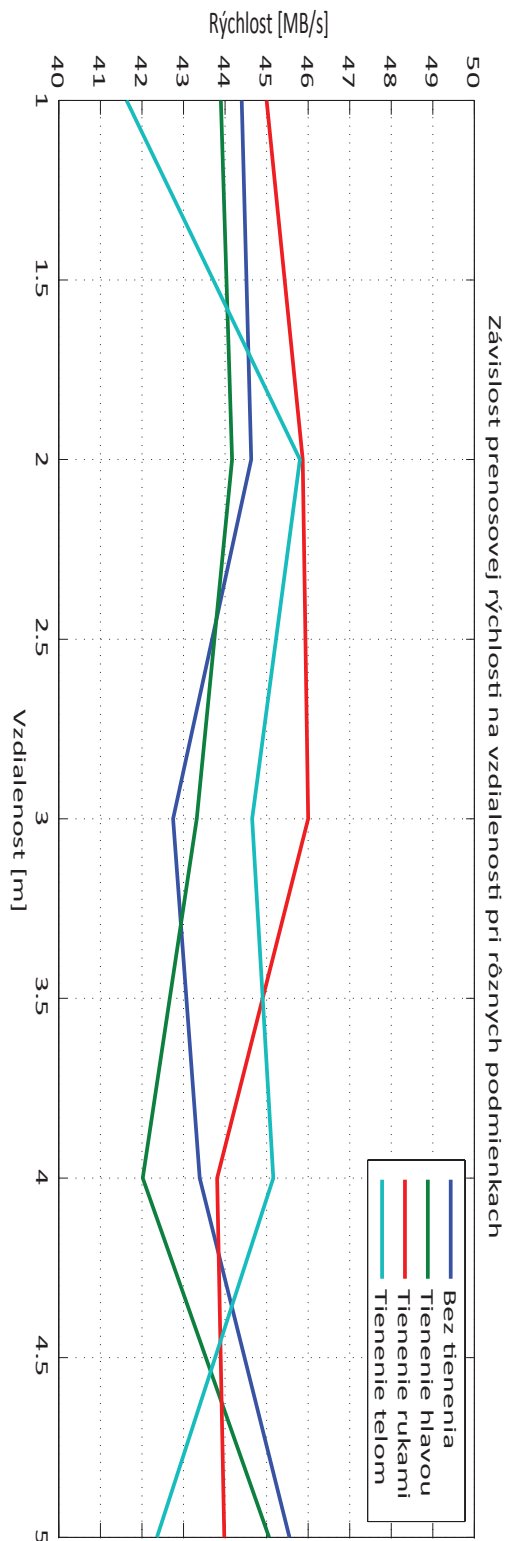
A Prílohy

75

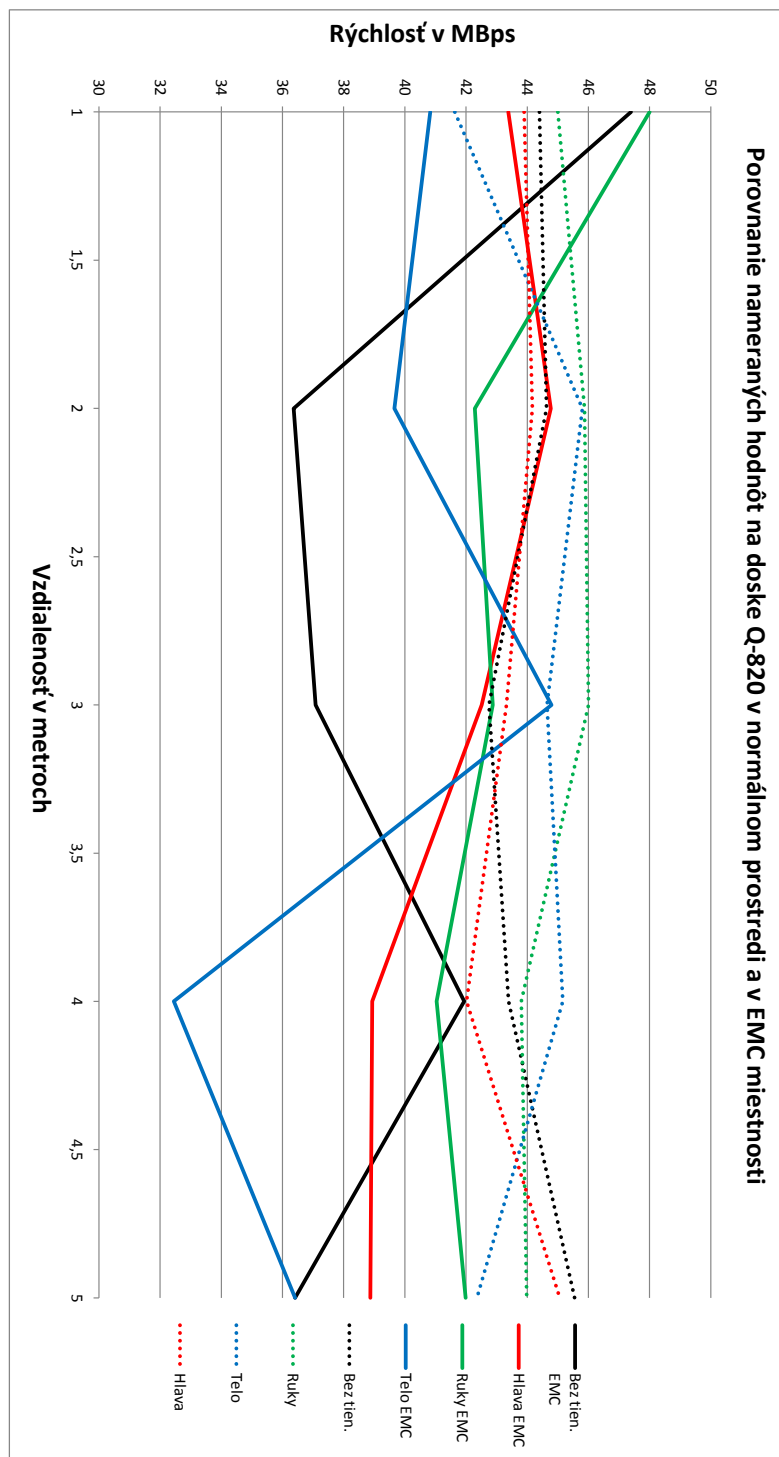
A PRÍLOHY



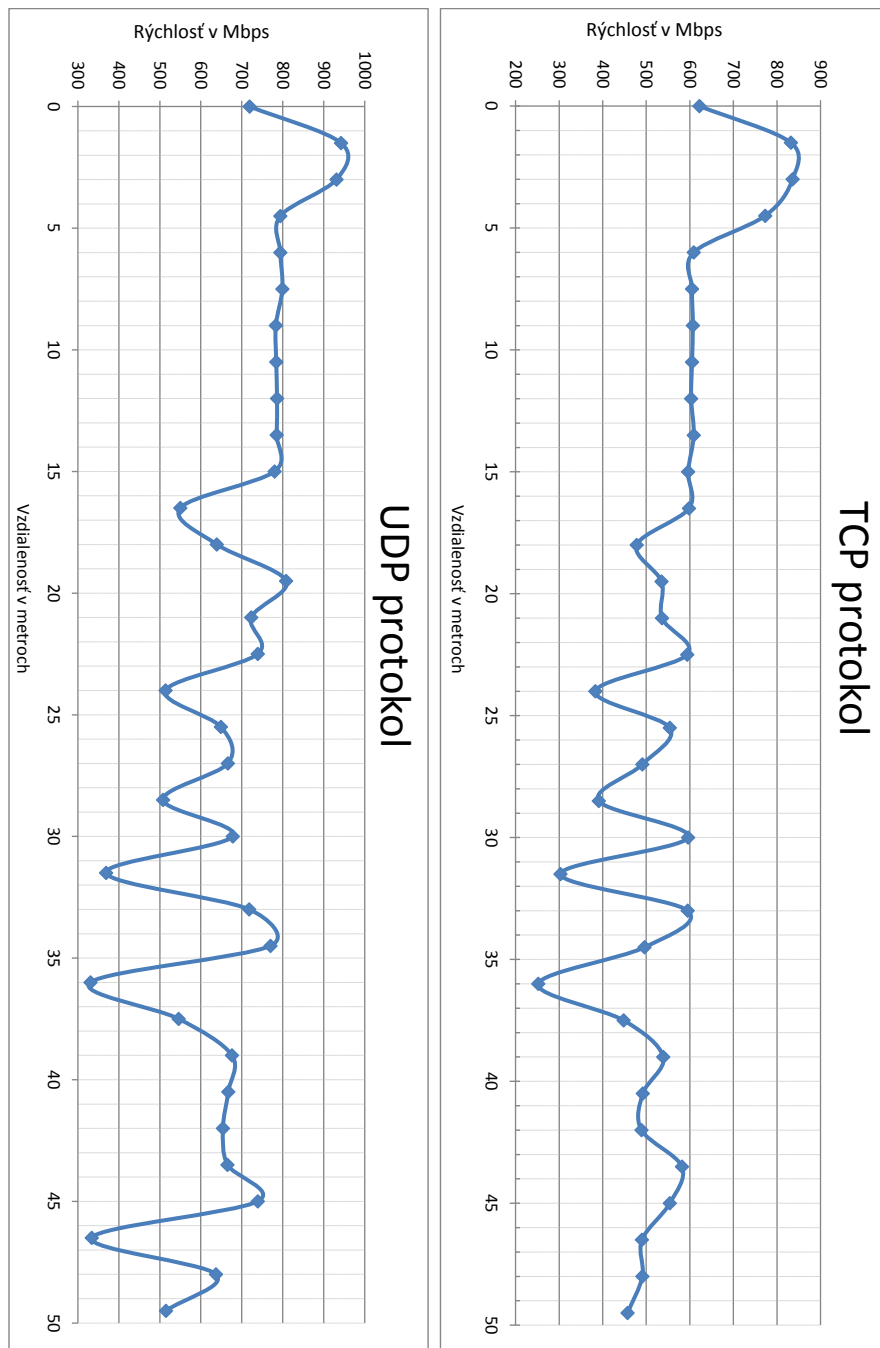
Obr. A.1: Samsung Galaxy S7 SM-G930F



Obr. A.2: Intrinsyc's Open-Q™ 820 Development Kit



Obr. A.3: Graf EMC vs Normálne prostredie



Obr. A.4: Závislosť rýchlosti na vzdialenosti pre TCP a UDP protokol