

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Diplomová práce

**Vyhodnocení moderních optických bezdrátových
přenosů**

Bc. František Vencel

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. František Vencel

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Vyhodnocení moderních optických bezdrátových přenosů

Název anglicky

Evaluation of modern optical wireless transmissions

Cíle práce

Základním cílem práce je ověřit, analyzovat, posoudit a definovat doporučení pro technologii přenosu dat pomocí optického paprsku bez použití optického vlákna na krátké vzdálenosti, tzv. LiFi. V druhé části práce budou diskutovány současné moderní trendy a předpokládaný vývoj v této oblasti. Posouzeny budou vhodné případy nasazení včetně cenového vyjádření.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika
4. Fyzikální principy technologie
5. Teoretické parametry a limity
6. Možnosti nasazení
7. Bezpečnost
8. Praktické testy a jejich zpracování
9. Výsledky a závěr
10. Doporučení a ceny
11. Porovnání dalších technologií
12. Předpokládaný vývoj

Doporučený rozsah práce

50 – 60 stránek včetně obrázků a grafů

Klíčová slova

počítačové sítě, bezdrátový přenos, optický přenos

Doporučené zdroje informací

- Almadani, Y.; Plets, D.; Bastiaens, S.; et al.: Visible Light Communications for Industrial Applications-Challenges and Potentials, ELECTRONICS Volume: 9 Issue: 12 Article Number: 2157 Published: DEC 2020
- firemní literatura Philips např.: <https://www.lighting.philips.cz/vzdelavani/blog-budoucnost-svetla/svetlo-ve-meste/pripojeni-pomoci-osvetleni-li-fi>
- "IEEE 802.15 WPAN Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication". IEEE 802 local and metro area network standards committee. 2009. Retrieved June 28, 2011.
- Jing Xue, Alok Garg, Berkehan Ciftcioglu, Jianyun Hu, Shang Wang, Ioannis Savidis, Manish Jain, Rebecca Berman, Peng Liu, Michael Huang, Hui Wu, Eby G. Friedman, Gary W. Wicks, Duncan Moore (June 2010). "An Intra-Chip Free-Space Optical Interconnect". the 37th International Symposium on Computer Architecture. Retrieved June 30, 2011.
- Lee, I.E.; Sim, M.L.; Kung, F.W.L.; , "Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver," Optoelectronics, IET , vol. 3, no. 1, pp. 30–39, February 2009.
- PragueBest s.r.o. "Free Space optics (FSO) with capacity 10 Gigabits Full Duplex – EC System". www.ecsystem.cz. Retrieved 14 March 2018.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2021

doc. Ing. Jan Malaták, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 15. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vyhodnocení moderních optických bezdrátových přenosů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Zdeňku Votrubovi, Ph.D. za užitečné rady, vedení a cenné poznatky při tvorbě této diplomové práce. Dále bych poděkoval panu Borisu Zupančičovi z firmy Signify za poskytnutí jejich systémů pro potřeby měření. Závěrečné poděkování patří mé přítelkyni a sestře za podporu a pomoc.

Vyhodnocení moderních optických bezdrátových přenosů

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vyhodnocením moderních optických bezdrátových přenosů pro krátké vzdálenosti. Jedná se o systém Li-Fi pracující v oblasti viditelného světelného spektra. V úvodní části se práce zaměřuje na problematiku obecného fungování, možnosti nasazení a omezujících limitů. Je zde porovnání se současně využívanými bezdrátovými technologiemi a příklady komerčně dostupných Li-Fi systémů. V praktické části jsou realizována měření, která jsou zpracována podle stanovených scénářů. Měření se zaměřuje na ověření dostupných vzdáleností, obecné problémy optického přenosu a rušivými vlivy vztahujícími se k zabezpečení. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v podobě grafů, které jsou dle jednotlivých scénářů popsány a vyhodnoceny. Na základě výsledků je vidět veliký potenciál těchto technologií v budoucím využití.

Klíčová slova: Li-Fi, optický paprsek, bezdrátový přenos, viditelné světlo, datová komunikace

Evaluation of modern optical wireless transmissions

Abstract

This diploma thesis deals with the evaluation of modern optical wireless transmissions for short distances. It is a Li-Fi system working in the visible light spectrum. In the introductory part, the work focuses on the issue of general functioning, deployment options and limiting limits. There is a comparison with currently used wireless technologies and examples of commercially available Li-Fi systems. In the practical part, measurements are realized, which are processed according to the set scenarios. The measurement focuses on the verification of available distances, general optical transmission problems and security-related interference. The measured values are displayed in the form of graphs, which are described and evaluated according to individual scenarios. Based on these results, the great potential of these technologies can be seen in the future use.

Keywords: Li-Fi, optical beam, wireless transmission, visible light, data communication

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce a metodika.....	2
2.1 Cíl práce.....	2
2.2 Metodika	2
3 Technologie Li-Fi.....	3
3.1 Historie.....	3
3.1.1 VLC	5
3.2 Základní informace	7
3.2.1 Základní části technologie.....	7
3.2.2 Princip fungování	8
3.3 Prvky vysílače a přijímače	9
3.3.1 Zdroj záření.....	9
3.3.2 Přijímač záření	10
3.4 Druhy modulace signálu	10
3.4.1 Single Carrier Modulation (SCM).....	11
3.4.2 Multi-Carrier Modulation (MCM).....	12
3.4.3 Specifická modulace Li-Fi.....	12
3.5 Standardizace	13
3.5.1 Architektura	13
3.5.2 Propagační kanál.....	14
3.6 Topologie	14
3.7 Modely použití	16
3.8 Potencionální nasazení	18
3.9 Limity.....	20
3.9.1 Výhody a nevýhody	20
3.9.2 Problémy při budování	21
4 Porovnání s ostatními technologiemi	22
4.1 Technologie infračerveného spektra	22
4.2 Technologie radiového spektra	23
4.3 Li-Fi vs. Wi-Fi	25
4.3.1 Hlavní čtyři výhody oproti radiové komunikaci	26
4.4 Komerční produkty Li-Fi.....	28
4.4.1 pureLiFi	28
4.4.2 Oledcomm	28
4.4.3 Signify	29
5 Praktická realizace	30

5.1	Popis využitých Li-Fi systémů	30
5.1.1	Trulifi 6002.....	30
5.1.2	Trulifi 6013.....	31
5.1.3	Konfigurace Li-Fi zařízení	33
5.2	Využité prostředí.....	34
5.3	Použitý vyhodnocovací software	34
5.3.1	Program TamoSoft	35
5.3.2	Konfigurace programu pro praktické měření	35
5.3.3	Průběh vyhodnocení	37
5.4	Průběh měření	37
5.4.1	Testování	37
6	Praktická měření.....	40
6.1	Měření vzdálenosti.....	40
6.1.1	Zařízení Trulifi 6002	40
6.1.2	Zařízení Trulifi 6013	44
6.2	Měření skrz materiály	48
6.2.1	Zařízení Trulifi 6002	49
6.2.2	Zařízení Trulifi 6013	53
6.3	Měření odrazem	57
6.3.1	Zařízení Trulifi 6002	58
6.3.2	Zařízení Trulifi 6013	61
6.4	Měření přes rušivé vlivy	66
6.4.1	Zařízení Trulifi 6002	67
6.4.2	Zařízení Trulifi 6013	71
7	Zhodnocení výsledků	74
8	Závěr	76
9	Seznam použitých zdrojů	77
10	Přílohy.....	81

Seznam obrázků

Obr. 1: Princip fungování photophonu (Zdroj:[2]).....	3
Obr. 2: Princip systému Li-Fi přes fotovoltaický článek (Zdroj:[6])	4
Obr. 3: Rozsah viditelného světelného spektra (Zdroj:[9])	6
Obr. 4: Základní prvky technologie Li-Fi (Zdroj:[11])	8
Obr. 5 Princip datového toku (Zdroj:[15])	9
Obr. 6: Schématická značka LED (Zdroj:[18])	10
Obr. 7: Schématická značka fotodiody (Zdroj:[20])	10
Obr. 8: Architektura Li-Fi (Zdroj:[22])	13
Obr. 9: Ukázka topologie Li-Fi (Zdroj:[13])	15
Obr. 10: a) Hybridní systém přenosu, b) Agregovaný systém přenosu (Zdroj:[22])	16
Obr. 11: a) model Giga Dock, b) model Giga beam (Zdroj:[28])	17
Obr. 12: a) model Giga Shower, b) model Giga MIMO (Zdroj:[28])	17
Obr. 13: možné využití v letectví (Zdroj:[30])	18
Obr. 14: Části optického pojítka FSO (Zdroj:[36])	22
Obr. 15: Topologie technologie WiMAX (Zdroj:[39])	23
Obr. 16: Princip připojení Wi-Fi (Zdroj:[44] - upraveno dle autora)	25
Obr. 17: Produkt LiFi-XC (Zdroj:[47])	28
Obr. 18: Systém LiFiMAX Dongle (Zdroj:[45]).....	29
Obr. 19: Princip spojení Trulifi 6002 (Zdroj:[52] – upraveno dle autora)	31
Obr. 20: a) modem, b) IR vysílače, c) přijímač (Zdroj:[52]).....	31
Obr. 21: Vysílač/přijímač Trulifi 6013 (Zdroj:[53])	32
Obr. 22: Příklad využití Trulifi 6013 v praxi (Zdroj:[52])	32
Obr. 23: Ukázka nainstalovaného ovladače (Zdroj:[vlastní])	33
Obr. 24: Konfigurace serverové části programu (Zdroj:[vlastní]).....	36
Obr. 25: Připojení klientské části programu (Zdroj:[vlastní]).....	36
Obr. 26: Ukázka měření na chodbě (Zdroj:[vlastní])	46
Obr. 27: Ukázka přenosu skrz materiál (Zdroj:[vlastní])	55
Obr. 28: Ukázka měření přes roh místnost (Zdroj:[vlastní]).....	58
Obr. 29: Ukázka z měření PplexS2 (Zdroj:[vlastní])	65
Obr. 30: Ukázka z měření Infteps1 (Zdroj:[vlastní]).....	69
Obr. 31: Ukázka z měření PkourS2 (Zdroj:[vlastní]).....	73

Seznam tabulek

Tab. 1: Provozní režimy PHY (Zdroj:[22])	14
Tab. 2: Porovnání technologií (Zdroj:[22] - upraveno dle autora, [43, 38, 41, 8])	24
Tab. 3: Wi-Fi vs. Li-Fi (Zdroj:[22] - upraveno dle autora, [8])	26
Tab. 4: Porovnání produktu Trulifi 6002 a 6013 (Zdroj:[vlastní]).....	33
Tab. 5: Výsledky testovaných měření (Zdroj:[vlastní])	38
Tab. 6: měření vzdálenosti Trulifi 6002 (Zdroj:[vlastní])	40
Tab. 7: měření vzdálenosti Trulifi 6013 (Zdroj:[vlastní]).....	44
Tab. 8: Seznam vybraných materiálů (Zdroj:[vlastní])	48
Tab. 9: měření prostupem Trulifi 6002 (Zdroj:[vlastní])	49
Tab. 10: měření prostupem Trulifi 6013 (Zdroj:[vlastní])	53
Tab. 11: Seznam vybraných materiálů (Zdroj:[vlastní])	57
Tab. 12: měření odrazem Trulifi 6002 (Zdroj:[vlastní]).....	58
Tab. 13: měření odrazem Trulifi 6013 (Zdroj:[vlastní]).....	62
Tab. 14: Seznam vybraných přístrojů (Zdroj:[vlastní]).....	66
Tab. 15: měření přes rušivé vlivy Trulifi 6002 (Zdroj:[vlastní]).....	67
Tab. 16: měření přes rušivé vlivy Trulifi 6013 (Zdroj:[vlastní]).....	71

Seznam grafů

Graf 1: měření I3S (Zdroj:[vlastní])	38
Graf 2: měření I3T (Zdroj:[vlastní])	38
Graf 3: měření P2S (Zdroj:[vlastní])	39
Graf 4: měření P2T (Zdroj:[vlastní])	39
Graf 5: měření I2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	41
Graf 6: měření I2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	41
Graf 7: měření I6S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	42
Graf 8: měření I6S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	42
Graf 9: měření IS (Zdroj:[vlastní])	43
Graf 10: měření P2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	44
Graf 11: měření P2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	45
Graf 12: měření P5S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	45
Graf 13: měření P5S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	46
Graf 14: měření PS (Zdroj:[vlastní])	47
Graf 15: měření IP2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	49
Graf 16: měření IP2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	50
Graf 17: měření IEPP2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	50
Graf 18: měření IEPP2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	51
Graf 19: měření IE2S (Zdroj:[vlastní])	52
Graf 20: měření PP1S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	53
Graf 21: měření PP1S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	54
Graf 22: měření PEP3S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	54
Graf 23: měření PEP3S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	55
Graf 24: měření PE1S (Zdroj:[vlastní])	56
Graf 25: měření Izr2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	59
Graf 26: měření Izr2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	59
Graf 27: měření IrohS - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	60
Graf 28: měření IrohS - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	60
Graf 29: měření IskS (Zdroj:[vlastní])	61
Graf 30: měření PzrS2 - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	62
Graf 31: měření PzrS2 - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	62
Graf 32: měření PmS - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	63
Graf 33: měření PmS - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	64
Graf 34: měření PplexS2(Zdroj:[vlastní])	65
Graf 35: měření IinftepS1- 1/2 (Zdroj:[vlastní])	68
Graf 36: měření IinftepS1- 2/2 (Zdroj:[vlastní])	68
Graf 37: měření Ipz - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	69
Graf 38: měření Ipz - 2/2 (Zdroj:[vlastní])	70
Graf 39: měření PledS - 1/2 (Zdroj:[vlastní])	71

Graf 40: měření PledS - 2/2 (Zdroj:[vlastní]).....	72
Graf 41: měření PkourS2 (Zdroj:[vlastní]).....	72

Seznam použitých zkratek

Li-Fi	Light Fidelity
VLC	Visible Light Communications
OWC	Optical Wireless Communication
IR	Infrared
RF	Radio Frequency
RGB	Red Blue Green
MAC	Media Access Control
LoS	Line of Sight
nLoS	non Line of Sight
MRI	Magnetic resonance imaging
OBS	Optický bezdrátový spoj
FSO	Free Space Optics
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
AES	Advanced Encryption Standard
CCMP	Chainig Message Authentication Code Protocol
PoE	Power over Ethernet
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
QoS	Quality of Service
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

1 Úvod

V dnešní době se pohybuje v prostředí internetu téměř každý. Svět čím dál více spěje do úplné digitální podoby, ve které každý z nás bude muset všechny své úřední, osobní a další záležitosti vyřizovat pouze online. Na světě existují různé druhy technologií, které slouží k připojení do internetu. S rozšiřující se digitalizací rostou požadavky na pohodlné, stabilní a rychlé připojení, které by bylo dostupné na každém rohu. Aktuálně nejrozšířenější internetové připojení je prostřednictvím mobilních datových sítí typu LTE nebo 5G a bezdrátových Wi-Fi sítí, které jsou všude kolem nás. Tyto dvě bezdrátové technologie pracují v oblasti radiového spektra, které je v současné době značně zarušené a začíná být nedostatečné. Z tohoto důvodu se v posledních letech vyvíjejí nové bezdrátové technologie, které tyto problémy řeší a zároveň splňují požadavky moderní doby na rychlost, pohodlnost a dostupnost připojení.

Předložená práce se zaměřuje na jednu z těchto vyvíjených technologií s vyhodnocením předpřipravených scénářů měření. Jedná se o systém Li-Fi pracující v oblasti viditelného světelného spektra. Práce je rozdělena do dvou částí. V první z nich je probrána teoretická stránka této technologie zaměřující se na historický vývoj, základní princip fungování, možné budoucí využití a porovnání se současně využívanými bezdrátovými systémy. Druhá část se zaměřuje na praktická měření prostřednictvím dvou odlišných Li-Fi zařízení. Měření se zaměřuje na ověření vlastností uváděných výrobcem, obecnou problematiku optického přenosu a možné omezení ovlivňující bezpečnost této optické bezdrátové technologie. Svět se neustále zrychluje a je jen otázkou času, kdy využití této moderní bezdrátové technologie bude potřeba prakticky realizovat, a proto je vhodné se tímto systémem zabývat a připravit se na budoucí požadavky.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je analyzovat a posoudit technologii optického bezdrátového spoje pro krátké vzdálenosti v podobě systému Li-Fi. Je nutné realizovat praktická měření, na jejichž základě je technologie ověřena a vyhodnocena prostřednictvím předpřipravených scénářů, ke kterým se jednotlivá měření vztahují. Tyto scénáře se musí zaměřovat na důležité vlastnosti a omezení, které mohou systémy Li-Fi při reálném nasazení potkat. Součástí vyhodnocení výsledků je doporučení zaměřující se na jednotlivá měření. Dalším cílem je poukázat na důvod vývoje těchto moderních optických bezdrátových systémů a definovat princip fungování, vhodné případy nasazení, omezující limity a porovnat systém Li-Fi se současně využívanou bezdrátovou technologií sloužící pro připojení k internetu.

2.2 Metodika

Podstatou této diplomové práce je vyhodnocení moderních optických bezdrátových přenosů. Toto vyhodnocení bude realizováno prostřednictvím praktických měření na dvou typově odlišných systémech Li-Fi. Jedno zařízení funguje v oblasti blízkého infračerveného spektra a druhé pracuje v oblasti viditelného světelného spektra. Pro obě zařízení je potřeba mít stabilní síťové připojení v podobě lokálních síťových prvků a kabelové infrastruktury.

K reálnému nasimulování podmínek, ve kterých použité Li-Fi systémy pracují, je potřeba zajistit patřičně osvětlené prostředí. Pro realizaci měření jsou nutné dostatečně velké vnitřní prostory, které jsou důležité pro všechny části vyhodnocení této diplomové práce. Dále je potřeba zajistit vybrané vzorky materiálů, na kterých bude testována propustnost vysílaných druhů signálu testovaných zařízení. Nakonec je nezbytné využít speciální přístroje, které budou sloužit pro poslední část vyhodnocení zaměřující se na potencionální nebezpečí v rámci používání těchto optických bezdrátových systémů.

Sběr dat bude realizován pomocí programu třetí strany zaměřující se na síťový provoz v lokálních sítích. Tento software funguje na bázi klient/server. Z tohoto důvodu je potřeba mít v lokální síti, kde bude měření probíhat, výpočetní zařízení v podobě počítače. Ten je připojený prostřednictvím síťového kabelu a pracuje pro vyhodnocovací program jako server. Tento server má za úkol vysílat síťový provoz, na jehož základě se realizuje vyhodnocení připravených scénářů pro tyto moderní optické bezdrátové spoje v podobě sledování kvality a rychlosti datového přenosu.

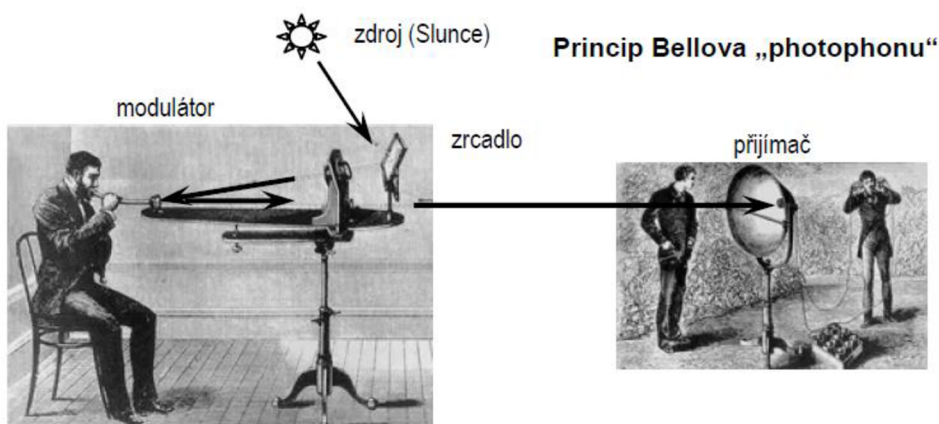
3 Technologie Li-Fi

Teoretická část práce se zaměřuje na moderní optický bezdrátový spoj využívající vysokorychlostní datový přenos. Jedná se o systém Li-Fi využívající k přenosu dat viditelné světlo. V této části je probrána historie optického bezdrátového přenosu, základní parametry, princip fungování, možnosti budoucího využití, omezující limity apod.

3.1 Historie

Přenos informace pomocí světla se využíval již od dob starověku. Homér v díle Iliada zmiňuje využití optického signálu k přenosu zpráv o Řeckém oblehání Troje kolem roku 1200 př.n.l. K přenosu zpráv na dlouhé vzdálenosti se využívaly požární majáky na vrcholcích hor, které se zapalovaly. I když tato komunikace přenášela pouze jednu informaci, byl to nejrychlejší způsob, jak informovat o důležitých událostech a nebezpečích. Dalším využitím bylo rozsvícení majáků v přístavech, které informovaly lodě o blížícím se pobřeží. [1]

Historicky první zařízení, které fungovalo na základě přenosu informace pomocí optického signálu bylo patentováno A. G. Bellem a jeho spolupracovníkem Ch. S. Tainterem roku 1880. Jednalo se o tzv. photophone, který Bell považoval za svůj největší vynález. Dokonce větší, než byl telefon. U photoponu je zdrojem světla slunce, které svítí na nastavený systém zrcadel. Jedno z těchto zrcadel má funkci modulátoru. Toto modulační zrcadlo bylo vychylováno lidským hlasem, který způsobil změny optické intenzity na přijímači sestavy. Tyto detekované změny optického výkonu byly na přijímači přeměněny na elektrický proud a pomocí sluchátek byly přeměněny zpět na lidský hlas. Princip tohoto přenosu znázorňuje obr. 1. Technologie photoponu jako první prakticky demonstrovala funkci optického bezdrátového signálu. Nemohla však zajistit požadovanou kvalitu komunikace, a proto byla roku 1895 nahrazena rádiovou komunikací představenou G. Marconim. [2]

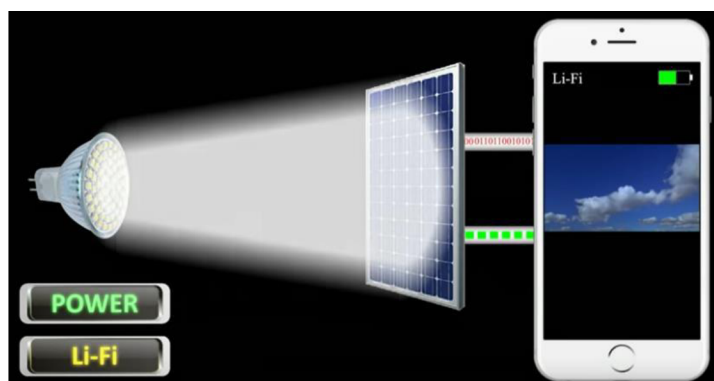


Obr. 1: Princip fungování photoponu (Zdroj:[2])

Přenos dat prostřednictvím světla se začal více rozvíjet koncem 20. století, když vědci z Nakagawa laboratoře na univerzitě v Keio v Japonsku vydali první známou práci zabývající se moderní komunikací ve viditelném spektru (VLC) prostřednictvím LED diod. [3] Evropská unie zahájila v roce 2008 vlastní výzkumný projekt VLC s názvem OMEGA. Cílem projektu bylo vyvinout ultrarychlou domácí přístupovou síť s rychlostí až 1 Gb/s. Síť zahrnovala kombinaci bezdrátových technologií, jako je gigabitová radiová frekvence a optické spoje ve volném prostoru s komunikací po elektrickém vedení. Síť měla realizovat služby nové generace jako jsou 3D hry, virtuální realita a videa ve vysokém rozlišení. [3, 4]

VLC je obecný termín, který zahrnuje všechny komunikační technologie využívající viditelné světlo. Li-Fi využívá základní principy VLC, avšak používá obousměrný síťový protokol k poskytování vysokorychlostní síťové konektivity. Velká část výzkumu Li-Fi byla provedena týmem výzkumníků z University of Edinburgh pod vedením prof. Haralda Haase. S výzkumem technologie VLC začali již v roce 2006. Velká část jejich výzkumu se zaměřila na využití světla jako média pro obousměrný přenos dat, což připravilo cestu pro technologii Li-Fi. [3]

Právě prof. Haas je považován za zakladatele Li-Fi a spoluzaložil firmu pureLifi zabývající se touto technologií. V červenci 2011 na konferenci TED Global v Edinburghu předvedl první prototyp Li-Fi široké veřejnosti. Použil stolní lampu s LED žárovkou k přenosu dat pro HD video kvetoucí květiny, která byla promítána na obrazovku v přednáškové místnosti. Při přednesu zakrýval světlo lampy rukou, aby dokázal, že lampa byla skutečně zdrojem dat přehrávaného videa. Upozornil na čtyři hlavní problémy rádiových vln, které technologie Li-Fi řeší. Jsou jimi bezpečnost, kapacita, dostupnost a účinnost. [14, 23] Později v roce 2015 na konferenci TED ukázal profesor Haas Li-Fi systém, ve kterém vysílal datový tok přes standartně vyráběnou LED žárovku na fotovoltaický článek spojený s notebookem, který fungoval jako datový přijímač. Poprvé tak demonstroval možnost nabíjet zařízení při stálém přenosu dat ve vysoké rychlosti, a to vše prostřednictvím světla. Tento proces je vidět na obr. 2. Na přednášce také předvedl chování tohoto spoje při mlze, kterou simuloval kapesníkem. Při této simulaci byl vidět pokles přijaté energie na fotovoltaickém článku, avšak datový tok stále probíhal. [6]



Obr. 2: Princip systému Li-Fi přes fotovoltaický článek (Zdroj:[6])

Jednou z hlavních výhod, na kterou profesor Haas ve svém výzkumu poukazuje, je fakt, že spektrum viditelného světla má dostatečnou kapacitu pro přenos dat při využití celosvětové již existující infrastruktury, která je až $10\,000\times$ dostupnější. Dalším důležitým aspektem, který se v dnešní době považuje takřka za hlavní, je přenosová rychlost. Na počátku, při demonstraci Li-Fi na konferenci TED, dosáhla přenosová rychlost 10 Mb/s. Již po měsíci dalšího výzkumu se přenosová rychlost zvýšila na 123 Mb/s. Hlavními faktory vedoucí k dalšímu výzkumu této technologie jsou možné vyčerpání šířky pásma a rychlost přenosu dat. [7]

3.1.1 VLC

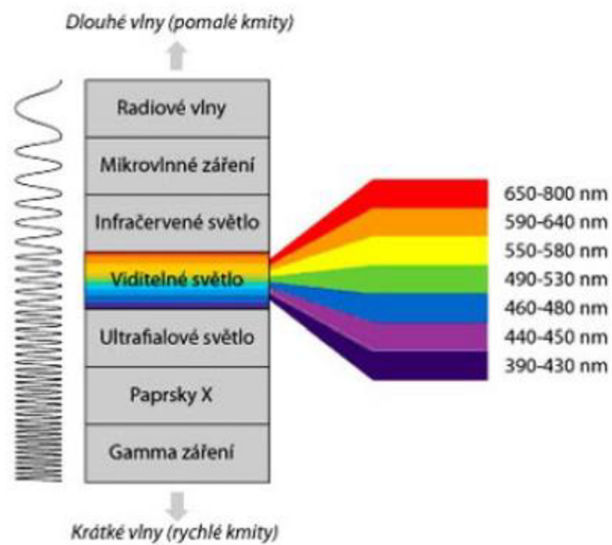
Technologie OWC (v angličtině optical wireless communication) pracující ve viditelném spektru se označují jako systémy VLC. VLC (v angličtině visible light communications) je obecné označení komunikační technologie využívající pro přenos dat viditelné světlo. [8] Viditelné světlo je část elektromagnetické spektra, jehož vlnové délky se pohybují v rozmezí od 390 – 800 nm (* někteří autoři uvádějí od 375 – 780 nm). Toto světelné spektrum se nachází mezi infračerveným a ultrafialovým světlem. Vlnové délky viditelného světelného spektra jsou $10^9\times$ kratší než rádiové vlny a mají skoro o 10^3 větší frekvenci. [9]

Paprsky tohoto viditelného světla se nacházejí mezi 400 – 800 THz jako optický nosič pro přenos dat světlem. K přenosu dat využívá rychlé pulsy, které lidské oko nedokáže zachytit. Proces standardizace VLC probíhá v rámci pracovní skupiny pro bezdrátové osobní sítě standardu IEEE 802.15. Jednou z hlavních vlastností je poskytování široké šířky pásma viz obr. 3. [10]

Systémy VLC se skládají z vysílače, přijímače a komunikačního kanálu. Hlavní součásti jsou:

- Vysoce svítivé LED žárovky nebo jiné zdroje světla fungující jako vysílač.
- Křemíková fotodiody, která má roly detektoru a vykazuje dobrou odezvu na viditelnou vlnovou délku.
- Komunikační kanál jako je vzduch nebo vláknová optika. [10]

K těmto hlavním součástem se obvykle přidávají některé nezbytné obvody jako je vysílací a přijímací obvod. Vysílací obvod se skládá z řídicího obvodu a výstupního obvodu pro modifikaci dat pro odeslání. Přijímací obvod se skládá z filtru pro výběr požadovaného pásma a zesilovacího obvodu za účelem demodulace. [10] Systémy VLC zpravidla pracují v simplexním provozu. Příčinou je viditelné světlo, jež funguje jako vysílač, nikoli jako přijímač. Přijímače jsou nesvítivá zařízení tzv. fotodetektory. Obousměrné komunikace lze dosáhnout viditelným světlem pro datové stahování (downlink) a infračerveným přenosem pro datové nahrávání (uplink). Na obr. 3 je vidět rozsah viditelného světelného spektra. [11]



Obr. 3: Rozsah viditelného světelného spektra (Zdroj:[9])

Frekvenční spektrum, které máme v atmosféře k dispozici, se skládá z mnoha vlnových oblastí jako je gama záření, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření, rádiové vlny atd. Důvody pro zvolení viditelného světla jsou snadná dostupnost a zdravotní nezávadnost. Viditelné světlo je méně nebezpečné pro aplikace s vysokým výkonem a lidé jej mohou vnímat a patřičně se chránit. Ostatní vlnové délky mají následující nevýhody:

- Gama záření je škodlivé a je nebezpečné s ním manipulovat. Má nepříznivé účinky na lidské zdraví.
- Rentgenové záření v dlouhodobém používání vede k zdravotním problémům stejně jako gama záření.
- Ultrafialové záření při dlouhodobém působení mohou také negativně ovlivňovat lidský organismus.
- Infračervené záření lze využít díky vysoké bezpečnostní regulaci. Používá se však pro nízké výkony.
- Rádiové vlny se používají nejčastěji. Jsou však drahé (kvůli poplatkům za spektrum) a méně bezpečné (kvůli rušení a možnosti odposlechu). [12]

Část viditelného světla od červené k modré (viz obr. 3) je ideální pro využití VLC. Nezpůsobují lidem žádné zdravotní problémy, poskytují větší šířku pásma a jsou bezpečné. [12]

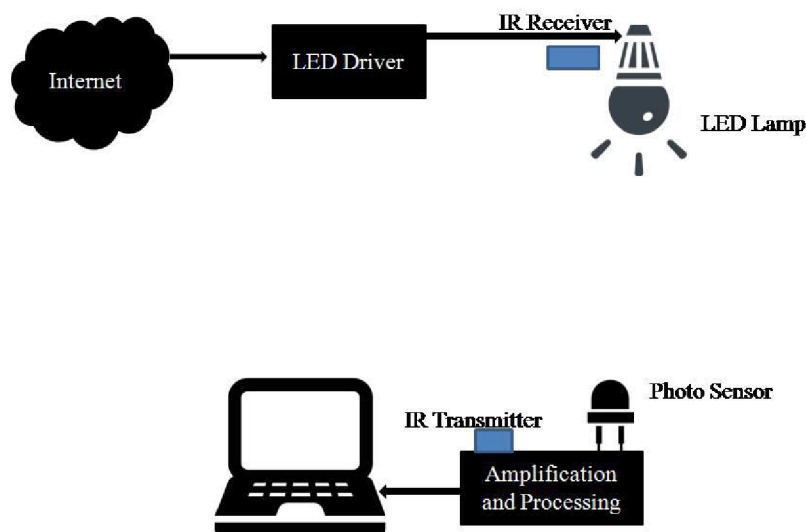
3.2 Základní informace

Li-Fi (v angličtině Light Fidelity), je technologie zajišťující přenos dat prostřednictvím viditelného světelného spektra, kterou popisuje standard IEEE 802.15.7. Standard IEEE 802.15.7 definuje vysokorychlostní, obousměrný přenos plně založený na síťové bezdrátové komunikační technologii podobně jako Standard IEEE 802.11 pro Wifi. Li-Fi jako součást VLC využívá viditelné světlo elektromagnetického spektra od 375 do 780 nm s frekvencí mezi 400 THz a 800 THz jako optický nosič pro datový a světelný přenos. Obecně se dá říct, že Li-Fi poskytuje lepší šířku pásma, efektivitu a konektivitu než konkurenční radiová komunikace Wi-Fi a zároveň může dosahovat rychlosti větší než 1 Gb/s. Hlavní součástí základního systému Li-Fi jsou LED žárovky fungující jako zdroj světelného přenosu a fotodiody jako přijímací prvek. Pomocí vysokorychlostních LED žárovek a různých technik multiplexu lze dosáhnout komunikační rychlosti vyšší než 100 Mb/s. Tato rychlost může být teoreticky zvýšena až na 10 Gb/s prostřednictvím paralelního přenosu dat pomocí pole LED žárovek, přičemž každá LED přenáší jiný datový tok. [12]

Zdrojem vysílaného světla je LED žárovka, která pulsuje s velmi vysokou frekvencí, jež rychlost je pro lidské oko nepostřehnutelná. Tato frekvence se dá upravovat, a to je jedna z klíčových vlastností při vysílání. Znamená to, že při nízkých hodnotách frekvence, které lidské oko vnímá jako tmou, lze stále nepřerušeně udržet datový tok. Tento princip vysílání řeší obavy z nutnosti potřeby stálého svícení a velké spotřeby energie. Další problémy, které tato technologie vyřešila, jsou zabezpečena bezdrátová komunikace a elektromagnetické rušení jiných zařízení. [8]

3.2.1 Základní části technologie

Základními prvky technologie Li-Fi je svítidlo neboli vysílač a fotodetektor neboli přijímač. Vysílač, jehož součástí je připojení k internetu, se skládá z LED ovladače, IR přijímače a LED žárovky. Tato sestava se nazývá přístupový bod Li-Fi (anglicky Li-Fi Access Point). Na druhé straně přenosu jsou prvky jako je fotosenzor, IR vysílač pro zpětnou komunikaci do internetu, zesilující a procesorová jednotka a jakékoliv připojené zařízení jako je např. počítač, notebook nebo telefon. [11] Součástky vysílače a přijímače Li-Fi můžeme vidět na následujícím obr. 4.



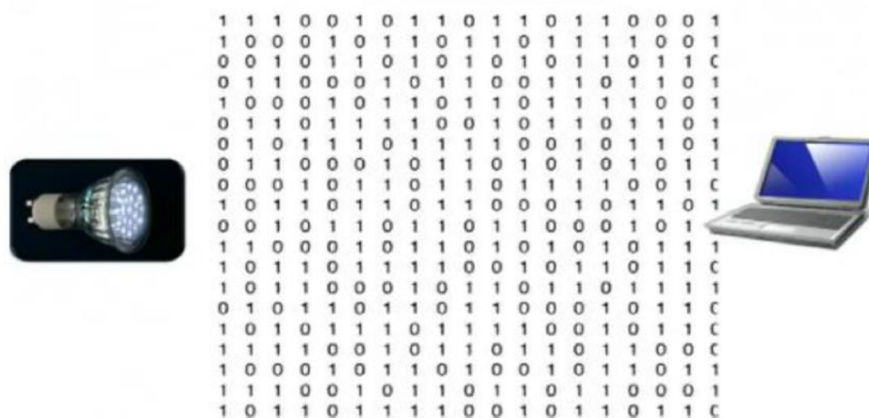
Obr. 4: Základní prvky technologie Li-Fi (Zdroj:[11])

3.2.2 Princip fungování

Princip fungování Li-Fi je velmi jednoduchý. Na jednom konci je osazena LED žárovka (vysílač) a na druhém konci je posazen fotodetektor (přijímač). Z páteřního internetu se pomocí LED ovladače převeďte data na fotonický signál. Ten je pomocí LED žárovky vysílán přes volný prostor (vzduch) do fotodetektoru, který signál přijme a dekoduje, čímž je fotonický signál převeden zpět na elektrický.

Jelikož je provozní rychlost LED žárovky menší než $1\mu\text{s}$, lze jí velmi rychle vypínat a zapínat. To způsobuje, že je světelný zdroj pro lidské oko nepřetržitě zapnutý. Toto rychlé vypínání a zapínání umožňuje přenos dat pomocí binárního kódu, kdy zapnutí (LED ON) je binární 1 a vypnutí (LED OFF) je binární 0. LED žárovka tímto způsobem vysílá světelné pulzy nul a jedniček skrz volný prostor do přijímače. Ten tyto malé rozdíly amplitudy, které se vytvořily na vysílači, přijme a převede na elektrický signál. Tento elektrický signál je poté převeden na vysokorychlostní datový tok. Zpětná komunikace probíhá pomocí IR vysílače u koncového zařízení a IR přijímače na světelné sestavě. Technologie Li-Fi tímto způsobem dokáže vytvořit rychlost přenosu větší než 1 Gb/s. [8] [13] Princip přenosu datového toku je zobrazen na obr. 5 níže.

Problémem tohoto způsobu přenosu by mohlo být okolní světlo, které by dopadalo na přijímač a rušilo by příjem signálu. Tento zdánlivý problém je však vyřešen nastavením přijímače. Přijímač je nastavený tak, že zaznamenává pouze malé změny amplitudy neboli binární 1 a 0. Okolní rušivé světlo i o stejné vlnové délce proto na rušení signálu nemá žádný vliv. To je další z mnoha problémů, se kterými se tato technologie vypořádala. [14]



Obr. 5 Princip datového toku (Zdroj:[15])

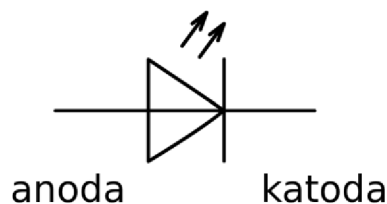
3.3 Prvky vysílače a přijímače

Pro přenos dat se využívá vysílač jakožto zdroj světla vysílaného signálu. Na druhé straně spoje je přijímač, jenž světlo přijímá a pomocí další prvků zpracovává.

3.3.1 Zdroj záření

Na světě existuje mnoho zdrojů záření. Nejdůležitějším zdrojem je slunce, které vyzařuje viditelné, infračervené, ultrafialové a rentgenové světlo. Dalšími zdroji může být blesk, oheň, různá zahřátá tělesa jako je rozžhavený kus železa nebo vlákno žárovky. Právě žárovky, zářivky a LED jsou v dnešní době nepostradatelné. [16] Díky schopnosti rychlého zapínání a vypínání jsou LED diody ideálními světelnými zdroji pro Li-Fi. [17]

LED (v angličtině Light-Emitting Diode), je elektronická polovodičová součástka fungující na principu P-N přechodu. Prochází-li P-N přechodem elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje světlo v určitém spektru neboli o určité vlnové délce. Schématická značka LED je zobrazena na obr. 6. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení používané polovodičové součástky. LED diody se vyrábějí v různých pásmech vyzařování, a to od ultrafialových, přes různé barvy viditelného záření jako je modrá, červená, zelená, až po infračervené pásmo, které je pro lidské oko neviditelné. Mezi výhody LED patří dlouhá životnost, malá provozní teplota a jejich možná práce s malými hodnotami napětí a proudu. [8] Hlavní výhodou jsou nízké náklady na provoz ve srovnání s klasickou žárovkou, která má až 10× menší účinnost. Nevýhoda oproti klasickým žárovkám je vyšší pořizovací cena. [9]

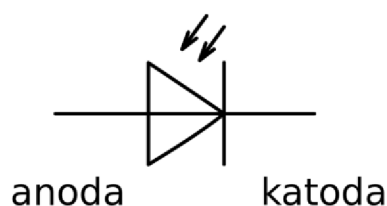


Obr. 6: Schématická značka LED (Zdroj:[18])

3.3.2 Přijímač záření

Příjem světla probíhá pomocí fotodetektorů. Fotodetektor přijímá světelné záření, které v případě technologie Li-Fi zajišťuje LED dioda. Toto záření se na fotosenzoru převede na elektronický signál, který dál postupuje obvodem. Nejznámější jsou fotodiody, fotorezistory a fotovoltaiický článek. [9]

Fotodioda je polovodičová součástka, která přeměňuje dopadající záření na elektrický proud. Je konstrukčně upravená tak, aby do oblasti P-N přechodu pronikalo světlo. Pokud není P-N přechod osvětlen, má voltampérová charakteristika stejný průběh jako běžná dioda. Fotodioda je založena na vnitřním fotoelektrickém jevu. Pokud mají dopadající fotony na detektor dostatečnou energii, generují volné páry elektron-díra. Tyto páry vzniknou tak, že dopadající světlo (foton) na P-N přechodu narazí do elektronu ve valenční vrstvě a předá mu svoji energii. Elektron energii fotonu absorbuje, a tím získá dostatečnou energii k opuštění valenčního pásu a přeskočení do vodivostního pásu. Tím vznikne volný elektron a na jeho místě vznikne díra. Schématická značka fotodiody je zobrazena na obr. 7. Tento fotoelektrický jev nastává také u fotorezistoru. [19]



Obr. 7: Schématická značka fotodiody (Zdroj:[20])

3.4 Druhy modulace signálu

Pokud chceme přenášet data pomocí světla, je potřeba tyto data modulovat. Můžeme proto využít obvykle používané modulační techniky RF komunikace s nezbytnými úpravami. Použití viditelného světla pro bezdrátovou komunikaci poskytuje řadu jedinečných a specifických modulačních formátů. [21]

V modulačních technikách pro Li-Fi je nutné, aby komunikace byla stále dostupná, i když není potřeba světlo. Proto by modulační technika měla podporovat stmívatelné osvětlení. Kolísání intenzity světla odpovídá informacím v signálu datového toku. Proto existuje mnoho typických modulací jako je modulace jednoho nosiče (SCM), modulace více nosičů (MCM) a modulace na základě barvy. [22]

Aby bylo možné vysílat data pomocí LED, je nutné je modulovat do nosného signálu. Nosný signál se skládá ze světelných pulzů vysílaných v krátkých intervalech. Způsob, jakým se modulace provádí, závisí na použitém modulačním schématu. Existuje více způsobů modulace, systémy Li-Fi využívají následující modulační schémata, která se dělí do tří kategorií. [23]

3.4.1 Single Carrier Modulation (SCM)

Modulační systémy s jednou nosnou využívají pro přenos dat pouze jednu frekvenci signálů. Je vhodná pro aplikaci s nízkou až střední rychlostí přenosu dat. [24] Široce používaná schémata pro Li-Fi zahrnují binární modulaci (OOK), modulaci polohy pulzu (PPM) a amplitudovou pulzní modulaci (PAM), které byly studovány v bezdrátové infračervené oblasti komunikačních systémů. [21]

On-Off Keying (OOK)

OOK je jedním z dobře známých modulačních schémat, který poskytuje dobrý kompromis mezi výkonem systému a složitostí implementace. Podle [25] je to nejjednodušší forma modulace amplitudového posunu a představuje digitální data jako ON (binární 1) nebo OFF (binární 0) nosné vlny. OOK ze své podstaty přenáší data sekvenčním otáčením. Tedy zapnutím a vypnutím LED, jak je uvedeno v IEEE 802.15.7. Stmívání lze dosáhnout zjemněním úrovně ON/OFF nebo použitím symbolové kompenzace. Stmívání prostřednictvím zjemnění úrovně ON/OFF může zachovat stejnou rychlost přenosu dat, avšak spolehlivý komunikační dosah by se při nízkých úrovních stmívání snížil. Na druhou stranu stmívání pomocí kompenzace symbolů lze dosáhnout vložением dalších ON/OFF impulsů, jehož trvání je určeno požadovanou úrovní stmívání. [21]

Pulse Position Modulation (PPM)

Ve srovnání s OOK je PPM energeticky výhodnější, ale má nižší účinnost. Pulzní poziční modulace kóduje data pomocí polohy pulzu v nastaveném časovém období. [23] Funguje na principu změny polohy impulsů v poměru k okamžitým hodnotám signálu zprávy. [21]

Pulse Amplitude Modulation (PAM)

Jedná se amplitudovou pulzní modulaci, ve které je signál v pravidelných intervalech vzorkován. Každý vzorek je úměrný amplitudě modulačního signálu. Amplituda nosné frekvence se mění úměrně okamžité amplitudě signálu zprávy. [21]

3.4.2 Multi-Carrier Modulation (MCM)

S nárůstem požadavků na rychlost přenosu dat v sítích Li-Fi modulace jednoho nosiče (SCM) zahrnující OOK, PPM a PAM začala trpět nežádoucími efekty jako je např. nelineární zkreslení signálu. Proto pro vysokorychlostní optické bezdrátové komunikace se začali využívat modulace více nosičů (MCM). MCM je účinnější na šířku pásma, ale je energeticky náročnější než s SCM. [21]

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Nejběžnější realizací MCM v sítích Li-Fi je modulace OFDM, kde jsou paralelní datové toky přenášeny současně prostřednictvím sub-nosných vln směrem k přijímači. [21] Tam se demodulují a převádí na vysokorychlostní sériový signál. [26]

Jak pronesl Z. Bumbálek: „Modulační metoda OFDM spočívá v použití několika desítek až tisíců nosných kmitočtů. Jednotlivé nosné jsou vzájemně ortogonální (tj. jejich skalární součin je nulový), takže maximum každé nosné by se mělo překrývat s průchody nulou ostatních. Datový tok celého kanálu se tak dělí na stovky dílčích datových toků jednotlivých nosných. Tím, že ve výsledku jsou toky na jednotlivých nosných přenášeny relativně nízkou modulační rychlostí, je OFDM odolná vůči vícecestnému šíření. Velkou výhodou použití OFDM u bezdrátových sítí pro lehké přizpůsobení měnícím se podmínkám přenosového média. Vyskytuje-li se v přenosovém pásmu silně rušené sub-pásmo, je možné je vynechat (za cenu snížení přenosové rychlosti).“ [27]

3.4.3 Specifická modulace Li-Fi

Vysílače Li-Fi jsou obecně určeny nejen pro optickou bezdrátovou komunikaci, ale také pro osvětlení, které lze realizovat buď pomocí modrých LED nebo mícháním barev barevných LED. Svítidla vybavená vícebarevnými LED mohou poskytnout další možnosti modulace a detekce signálu v systémech Li-Fi. Proto se využívá modulace CSK. V této modulaci jsou signály zakódovány do intenzity barev typu RGB. [21]

Colour Shift Keying (CSK)

Používá se, pokud systém osvětlení používá LED diody typu RGB. Kombinací různých barev světla mohou být výstupní data přenášena samotnou barvou, a tudíž intenzita výstupu může být téměř konstantní. Smícháním primárních zdrojů RGB vznikají různé barvy, které jsou kódovány jako informační bity. Nevýhodou je, že zvyšuje složitost vysílačů. [23]

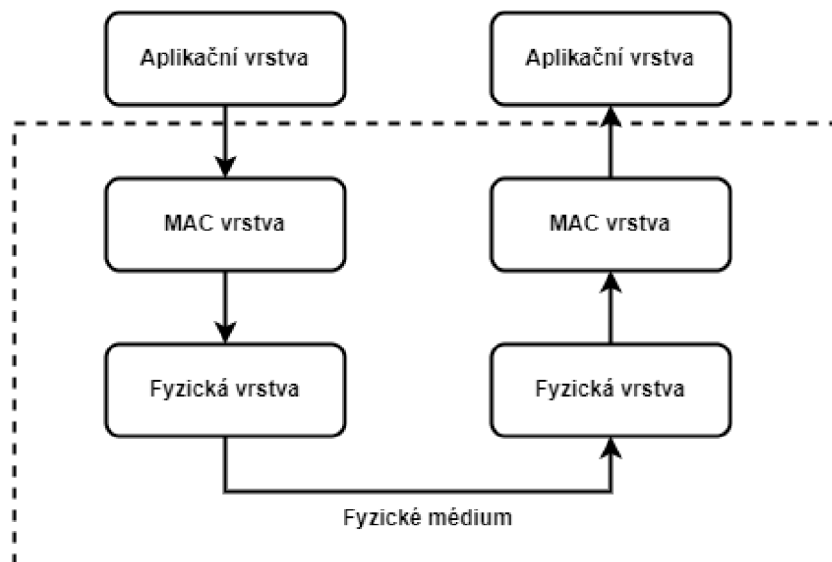
3.5 Standardizace

Li-Fi je modelována podle protokolu nadřazené pracovní skupiny pro VLC, standardu IEEE 802.15. Ten definuje fyzickou vrstvu (PHY) a řídicí vrstvu (MAC) pro VLC/Li-Fi. Vrstva řízení podporuje tři technologie vícenásobného přístupu: klient-klient (peer-to-peer, P2P), hvězdicovou konfiguraci (star configuration) a režim vysílání (broadcast mode). Zaměřuje se také na problémy se správou fyzické vrstvy jako je adresování, předcházení kolizím a protokoly potvrzení dat. Fyzická vrstva je rozdělena do tří typů: PHY I, PHY II a PHY III a využívá kombinaci různých modulačních schémat. [23]

Modulační formáty PHY I a PHY II zahrnují schémata OOK. Manchesterké kódová pro PHY I a PHY II zahrnuje hodiny uvnitř přednášených dat, které představují logickou 0 pro OOK symbol “01“ a logickou 1 pro OOK symbol “10“. Vše se stejnou směrnou složkou. Stejnou směrnou složka zabraňuje zhasnutí světla v případě prodlouženého běhu logických 0. [12]

3.5.1 Architektura

Architektura Li-Fi je založena na vrstvách. V této architektuře se Li-Fi skládá ze tří vrstev, kterými jsou aplikační vrstva, vrstva MAC a fyzická vrstva, jak je vidět na obr. 8. IEEE 802.15 definuje pouze dvě, vrstvy PHY a MAC.



Obr. 8: Architektura Li-Fi (Zdroj:[22])

Fyzická vrstva (PHY)

Fyzická vrstva je zodpovědná za vysílání/příjem, aktivaci/deaktivaci optického vysílače a detekci stavu přenosového kanálu, zda je nečinný nebo zaneprázdněný. K dispozici jsou tři provozní režimy PHY. Rozdíly jednotlivých provozních režimů můžeme vidět v tab. 1. [22]

Provozní režim	Využití	Kategorie	Rychlosti
PHY I	Venkovní	Nízká	11,6 Kb/s – 266,6 Kb/s
PHY II	Vnitřní	Mírný	1,25 Mb/s – 96Mb/s
PHY III	Vícenásobný optický vysílač	Modulace CSK	12 Mb/s – 96 Mb/s

Tab. 1: Provozní režimy PHY (Zdroj:[22])

Vrstva řízení (MAC)

Vrstva řízení definuje tři topologie sítě: peer-to-peer, star a broadcast. Ve všech topologiích existuje komunikační zařízení v podobě koordinátoru, který zprostředkovává signál. V topologii peer-to-peer existují pouze dvě zařízení včetně koordinátoru. V topologie star probíhá komunikace ve více zařízeních. V této topologii je koordinátor použit jako osvětlující infrastruktura. V broadcast mode jsou prostřednictvím koordinátoru posílána data jednosměrně do ostatních zařízení. [22]

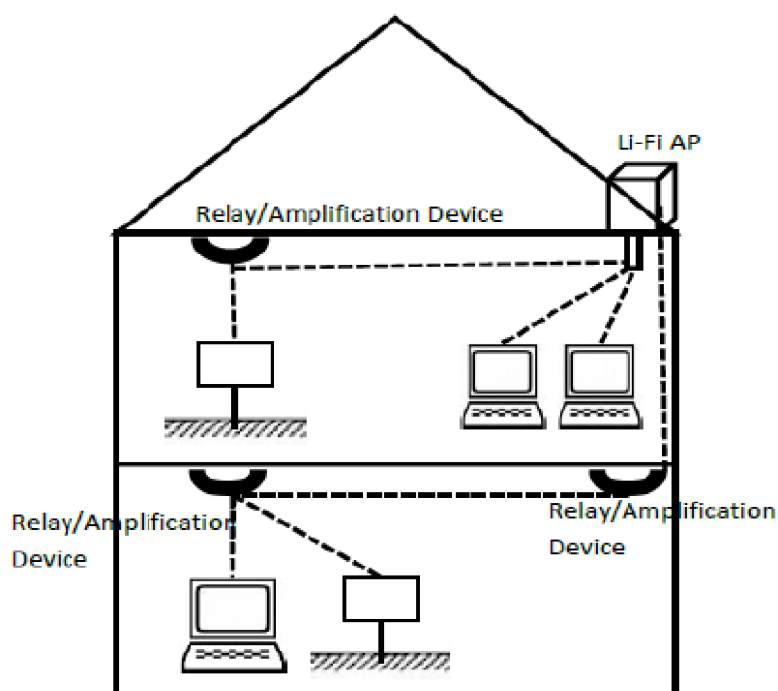
3.5.2 Propagační kanál

Propagační kanál Li-Fi se neliší od kanálu pro VLC. Podle [22] [16] se vnitřní prostředí, které je charakterizované šesti různými konfiguracemi, týká infračervených spojů. Vysílač a přijímač komunikuje dvěma způsoby: přímá a nepřímá viditelnost. Tyto kritéria jsou založena na míře směřování vysílače na přijímač. Při přímé viditelnosti (anglicky Line of sight, LoS) je vysílač přímo namířený na přijímač. To maximalizuje výkon účinnosti a minimalizuje ztrátu cesty. LoS je důležitá podmínka pro dosažení stabilně vysokých přenosových rychlostí. Nepřímá viditelnost (non-LoS) je naopak založena na odrazu paprsku. Zvyšuje robustnost a usnadňuje použití. Umožňuje spoji fungovat i při překážkách. [22]

3.6 Topologie

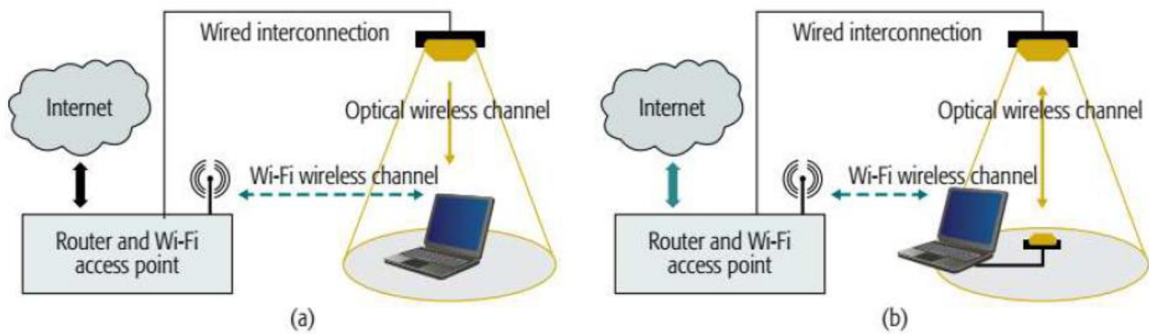
Li-Fi popisuje kompletní bezdrátový síťový systém. To zahrnuje obousměrné víceuživatelské komunikace typu poin-to-multipoint a multipoint-to-point. Li-Fi vytváří více přístupových bodů, což představuje bezdrátovou síť malých optických přípojních míst. Díky tomu umožňuje plnou uživatelskou mobilitu, a proto tvoří novou vrstvu v rámci stávajících bezdrátových sítí. [21]

Podle [13] jsou pro topologii využívány dvě úrovně komunikace. V úrovni 1 je pro komunikaci využívána Li-Fi a v úrovni 2 stávající veřejná infrastruktura. Vnitřní komunikace v budovách a domech probíhá přes Li-Fi a vnější komunikace přes stávající komunikační infrastrukturu jako je optická kabelová síť. Každý dům nebo budova by měly Li-Fi přístupový bod (v angličtině Access point), který by pomocí speciálního hardwaru převáděl světelné signály na elektrické nebo radiové signály. Tento Li-Fi AP by tak sloužil pro připojení a komunikaci s veřejnými sítěmi, a to bezdrátově nebo pomocí drátové infrastruktury (úroveň 2). Na druhé straně jsou zařízení jako počítače, mobily a další, které by se připojovaly k Li-Fi AP prostřednictvím komunikace point-to-point (PP) (úroveň 1). Pro tento typ topologie je přenosová rychlost sítě vysoká, protože využívá Li-Fi, které má vyšší přenosovou rychlost než radiová komunikace. Další výhodou použití je ušetření obrovského množství radiových kanálů. Ukázka topologie je zobrazena na obr. 9.



Obr. 9: Ukázka topologie Li-Fi (Zdroj:[13])

Další topologií dle [22] je prototyp VLC s názvem HetNet. Tento koncept využívá různorodé spektrum vln k poskytování vysoce kvalitních služeb ve vnitřních prostorech. V bezdrátové síti HetNet je vrstva využívající vnitřní gigabitové body, které nabízejí další bezdrátovou kapacitu. Tato topologie má dva modely, a to hybridní a agregovaný model. V hybridním modelu systém využívá pro připojení do internetu Wi-Fi, avšak downlink probíhá přes Li-Fi. V agregovaném systému je uživatel připojen na Wi-Fi a Li-Fi paralelně pro obousměrnou komunikaci. To přispívá ke zlepšení propustnosti a dosažení robustní konektivity. Oba systémy lze vidět na obr. 10.



Obr. 10: a) Hybridní systém přenosu, b) Agregovaný systém přenosu (Zdroj:[22])

Cílem tohoto konceptu je dosáhnout dobrého výkonu. V hybridním systému propustnost závisí pouze na kapacitě Li-Fi downlink, kdy při zvýšení vzdálenosti rychlost degraduje. Tento problém řeší právě agregovaný systém, který zvyšuje spolehlivou dostupnost síťové komunikace. [22]

3.7 Modely použití

V rámci využití Li-Fi je podporováno několik datových služeb prostřednictvím různorodé struktury. Na počátku konsorcium zabývající se Li-Fi definovalo různé typy technologií, aby nabídlo bezpečná, ultrarychlá a spolehlivá bezdrátová komunikační rozhraní. Mezi ně patřily systémy s gigabitovou rychlostí, technologie optické mobility, technologie přesné lokalizace a navigace. [17] Do technologie s gigabitovou rychlostí byly definovány modely Giga Dock, Giga Beam, Giga Shower, Giga Spot a Giga MIMO. Tyto modely se mají vypořádat s různými uživatelskými požadavky a scénáři pro bezdrátový přenos dat ve vnitřních prostorech. [23]

Giga Dock je bezdrátové dokovací řešení, které zahrnuje bezdrátové nabíjení pro chytré telefony, tablety a notebooky s teoretickou rychlostí až 10 Gb/s. [23] Přenos dat probíhá na velmi krátké vzdálenosti, a to do 10 cm. Vlnové délky tohoto optického modelu se pohybují v horní hranici světelného spektra těsně u infračerveného záření. [9]

Model Giga Beam je datovým spojem typu point-to-point pro kioskové aplikace a přenos dat mezi zařízeními. Pro představu, dvouhodinový full HD film o velikosti 5Gb lze přenést z jednoho zařízení do druhého během 4 sekund. [23] Náhled na použití modelů Giga Dock a Giga Beam je na obr. 11.



a)



b)

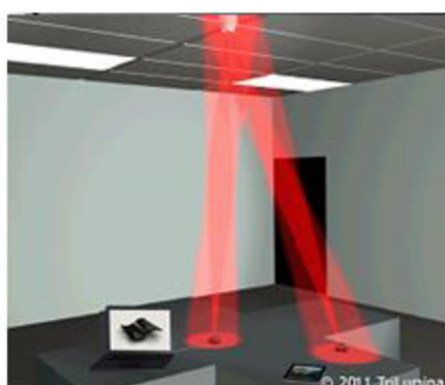
Obr. 11: a) model Giga Dock, b) model Giga beam (Zdroj:[28])

Dalšími interními komunikačními modely jsou Giga Shower, Giga Spot a Giga MIMO. Jedná se o struktury, kde na jedné straně je vysílač nebo přijímač namontován do stropu a na druhé straně jsou přenosná nebo pevná zařízení na stolech kanceláří, operačních sálech, ve výrobních halách nebo na letištích. [23]

Giga shower, podle [9] nazývaný také jako Giga Broadcasting, poskytuje více uživatelům jednosměrný datový tok prostřednictvím mnoha kanálů s gigabitovou rychlostí na několik metrů. Lze ho využít pro sledování TV, poslech různých rozhlasových stanic a dalších v případech, kde není potřeba žádný nahrávací kanál. Giga Spot a Giga MIMO jsou optické bezdrátové jedno nebo více kanálové řešení nabízející obousměrnou komunikaci. Využívají se například v místnostech, halách nebo nákupních centrech. [23] Můžou dosahovat rychlosti až 1 Gb/s a umožňují využívat plnou šířku pásma každého optického spoje Li-Fi. Díky tomu, že se jedná o obousměrnou komunikaci, lze model Giga Spot použít k určování přesné polohy připojeného zařízení v budovách. [9] Modely Giga Shower a Giga MIMO jsou zobrazeny na obr. 12.



a)



b)

Obr. 12: a) model Giga Shower, b) model Giga MIMO (Zdroj:[28])

3.8 Potencionální nasazení

Jak již bylo zmíněno výše. Systémy Li-Fi se hodí pro běžnou vnitřní bezdrátovou komunikaci a přenos dat v budovách pro standardní uživatelská zařízení jako je počítač, tablet, mobil. Používá bezplatné, nelicencované spektrum, které není ovlivněno RF šumem a využívá vysokorychlostní optický přenos s vysokým zabezpečením. Technologie Li-Fi nachází uplatnění v celé řadě dalších oblastí jako je průmysl, doprava, energetika, zdravotnictví atd. Díky svým výhodám najde využití v řadě oblastí, kde by časem mohla vytlačit radiovou komunikaci Wi-Fi. Níže jsou probrány důležité aplikace, pro které se Li-Fi dokonale hodí a které by mohly mít veliký potenciál využití v budoucnu.

Lékařství a zdravotnictví

Kvůli obavám z radiace operační sály neumožňují připojení Wi-Fi, a přestože je Wi-Fi zavedena v několika nemocnicích a je dnes pravidelnou součástí lůžkových oddělení, rušení z mobilů, tabletů a počítačů může blokovat případně zkreslovat signály z lékařských a monitorovacích zařízení. Systém Li-Fi tyto problémy řeší. Světla jsou nezbytnou součástí všech operačních sálů, a proto lze Li-Fi bezpečně využít pro moderní lékařské přístroje umístěné v operačních sálech. Díky tomu, že nevyzařuje žádné elektromagnetické rušení, nebude rušit další lékařské přístroje jako jsou například MRI skenery. [23]

Letectví

Před vzletem a přistáním letadla je často vyžadováno vypnutí mobilních telefonů, abychom zabránili rušení signálu mobilních telefonů s navigačními a řídicími systémy letadla. V průběhu letu lze mobil využít maximálně v takzvaném „letadlovém režimu“, při kterém je mobil odštěpen od mobilních a dalších sítí. Ze stejného důvodu je na palubě letadla zakázáno Wi-Fi připojení. Jelikož jsou letadla vybavena mnoha světly, lze využít systém Li-Fi jako přístupový bod do internetu, aniž bychom rušili přístroje letadla. Ideálním využitím pro tento systém jsou světla nad sedadly cestujících, jak je vidět na obr. 13. [29]



Obr. 13: možné využití v letectví (Zdroj:[30])

Elektrárny a nebezpečná prostředí

V moderní době vyžadují takřka všechny průmyslové oblasti rychlé a stabilní internetové připojení. To platí převážně pro elektrárny a petrochemické závody, které vyžadují rychlé a vzájemně propojené datové systémy pro monitorování intenzity sítě, poptávky, teploty atd. V těchto citlivých oblastech není vhodné používat bezdrátové připojení Wi-Fi. Pro bezdrátovou konektivitu lze využít systém Li-Fi, který je odolný vůči elektromagnetickému rušení z prostředí a nabízí ideální bezpečnou alternativu. [23] Dle [29] lze využít Li-Fi i v ropných a chemických závodech, kde by jiné radiové frekvence mohly být nebezpečné.

Pouliční osvětlení

Tato světová infrastruktura by mohla v budoucnu sloužit k poskytování Li-Fi hotspotů. [23] Na celém světě jsou miliony pouličních lamp. Každá z těchto lamp by mohla být potenciálním přístupovým bodem do internetu. [8]

Dopravní provoz

Li-Fi může pomoci lépe řídit provoz a díky vzájemné komunikaci mezi LED světly automobilů i snížit počet dopravních nehod. Různé dopravní signály, značky a semaforey postupně přecházejí na LED světlo. Semaforey by hrály roli odesílatele a díky tomu by mohly komunikovat s vozem i mezi sebou a efektivněji řídit provoz na silnicích. Jednotlivé vozy prostřednictvím LED světel by mohly komunikovat a efektivně tak předcházet dopravním nehodám. [23, 29]

Podvodní komunikace

Použití RF signálu pod vodou je nepraktické kvůli vysoké absorpci vody. Akustické vlny mají malou šířku pásma a narušují mořský život. [23] Pro komunikaci na krátké vzdálenosti pod vodou by šlo využít systémů Li-Fi. Použití by našlo uplatnění pro vojenské a výzkumné operace. Ponorky by tak mohly používat své světlomety ke vzájemné komunikaci, autonomně zpracovávat data a posílat je zpět na povrch pomocí dálkově ovládaných vozidel. [29] V rámci výzkumných operací by šlo dálkově ovládat podvodní vozidla, které by díky bezdrátovému přístupu měli volnější pohyb a díky světlometům by mohli spolu komunikovat a zpracovávat data. [23]

Řízení katastrof

Li-Fi by šlo využít jako výkonný komunikační prostředek v době katastrof, jako je zemětřesení nebo hurikány v místech jako stanice metra nebo tunely. Ty jsou běžnými mrtvými zónami pro řadu nouzových komunikací. [15]

3.9 Limity

Technologie Li-Fi, jako každá jiná technologie, má určité výhody, nevýhody a omezení. Na ty je potřeba se zaměřit při budování Li-Fi infrastruktury. Hlavním omezením je nutnost přímé viditelnosti (LoS) mezi vysílačem a přijímačem. Pokud je spoj zastíněný neprůhledným materiálem, signál se přeruší. [31] V některých topologiích dle [17] jde při přerušení signálu přepnout na komunikaci přes radiové vlny. Další omezujícím problémem může být způsob, jakým bude přijímač přenášet data zpět do vysílače. Tento problém je však řešen prostřednictvím jednotlivých typů Li-Fi zařízení. Každý potenciální uživatel si tak může vybrat zařízení, které mu vyhovuje do infrastruktury.

Oblast pokrytí může být dalším problémem, protože Li-Fi pracuje na velmi vysoké frekvenci mezi 400-800 THz. To omezuje oblast pokrytí na menší vzdálenost. [31] Odrazující mohou být také vyšší náklady na instalaci systému, avšak následné náklady na provoz jsou nižší. Pro větší implementace to mohou být poplatky spojené s údržbou. [17] Prostá skutečnost, že bez světelného zdroje není internet, by mohla omezit místa a situace, ve kterých jde Li-Fi využívat. Vzhledem tomu, že je v technologii využito viditelné světlo, je možné, že okolní světlo a běžné elektrické světlo může v některých případech ovlivnit rychlost datového přenosu. [32, 33]

3.9.1 Výhody a nevýhody

Jak již bylo zmíněno, Li-Fi technologie má řadu omezení. V následující části se podíváme na obecné výhody a nevýhody Li-Fi technologie.

Výhody

- Kapacita (Řeší problémy s nedostatečnou šířkou radiového spektra.)
- Rychlost (Lze dosáhnout vysokorychlostního přenosu o rychlosti až 10 Gb/s.)
- Bezpečnost (Poskytuje vysoké soukromí a zabezpečení.)
- Účinnost (Nízké náklady na údržbu.)
- Je bezpečná pro člověka [17]
- Využití v IoT
- Lepší energetická účinnost [34]

Nevýhody

- Potřeba přímé viditelnosti (LoS)
- Topologie sítě point-to-point
- Snadná blokáce signálu [25]
- Malá přenosová vzdálenost (S rostoucí vzdáleností intenzita světla klesá.)
- Větší počáteční náklady [8]

3.9.2 Problémy při budování

Při budování Li-Fi sítě je potřeba si dát pozor na omezení a nevýhody, které tato technologie sebou přináší. Každé zařízení má své omezení a ani LED žárovky nejsou výjimkou. Ty jsou ideální pro použití v implementaci Li-Fi především pro svoji rychlou odezvu a dlouhou životnost. Zároveň však přináší několik omezení. V této části jsou probrány různé problémy, kterým můžeme při budování systému Li-Fi čelit. [11]

Důležité faktory, které je třeba vzít v úvahu při navrhování Li-Fi, jsou následující:

- Přítomnost světla – umístění LED pro plné pokrytí světelného signálu
- Přímá viditelnost (LoS)
- Využití LED světla pro lepší výkon [12]

Vysílač

Dle [11] může současná komerčně dostupná Li-Fi komunikace nabídnout maximální dosah pracovní vzdálenosti 1 až 50 metrů. Tato vzdálenost je výrazně menší díky potřebě přímé viditelnosti (LoS). Díky využití RGB LED namísto fosforeskujících LED můžeme zvýšit propustnost, a to až 3×.

Optický bezdrátový vnitřní komunikační kanál

Komunikační systém Li-Fi je omezen především na typ komunikace přímé viditelnosti. Jakékoliv nesprávné nastavení může výrazně snížit výkon. Efekt stínování způsobený blokováním přímé dráhy mezi vysílačem a přijímačem lze využít pro rekonstrukci dat pomocí komunikačního kanálu bez přímé viditelnosti (nLoS). [11]

Přijímač

Změna intenzity světla je detekována pomocí fotosenzorů na straně přijímače. Porovnáním výkonů různých fotodiód bylo zjištěno, že lavinové fotodiody mohou být použity pro systémy Li-Fi díky jejich menší velikosti, rychlé odezvě a menší ceně. V důsledku rušení slunečním zářením a jinými svítidly však může dojít ke snížení výkonu systému. Použitím specifických filtrů lze následky rušení výrazně snížit. [11]

Modelování pohybu uživatele

Při návrhu sítě Li-Fi je potřeba zvážit a modelovat pohyb uživatelů a orientaci zařízení pro zajištění bezproblémové konektivity. Model náhodných bodů se používá pro simulaci uživatelů, avšak v reálných scénářích je nepoužitelný. Uživatelé v nákupních centrech mají jiný pohyb než uživatelé v kancelářích. [11]

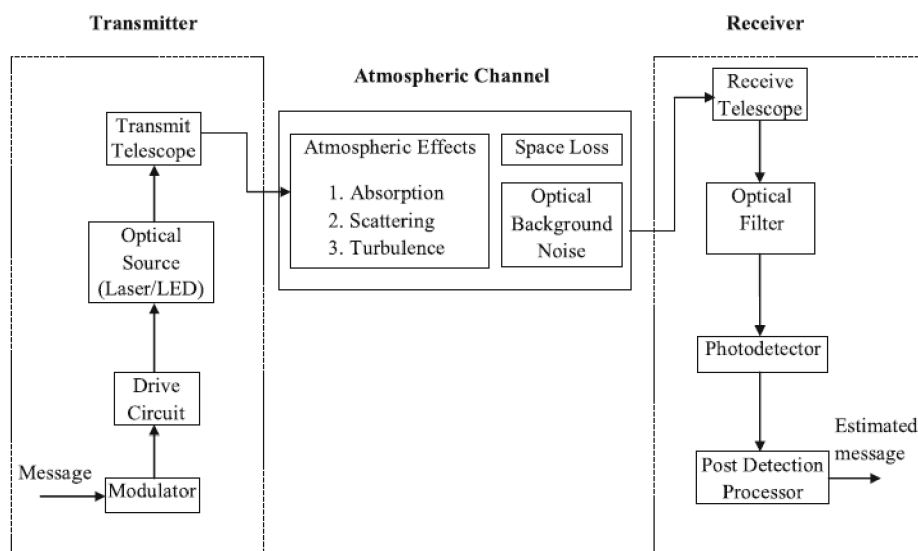
4 Porovnání s ostatními technologiemi

Na světě existuje mnoho druhů bezdrátových technologií pracujících v různých oblastech elektromagnetického spektra, jako je radiové spektrum, spektrum viditelného světla, infračervené spektrum atd. Jedná se o nejrozšířenější spektra pro bezdrátovou datovou komunikaci.

4.1 Technologie infračerveného spektra

V oblasti infračerveného spektra se jedná například o technologii optických bezdrátových spojů (OBS). Pod pojmem optický bezdrátový spoj (v angličtině free space optic, FSO) se rozumí spoj, ve kterém probíhá datová komunikace pomocí optických vln pohybujících se volným prostorem. Jedná se o technologii využívající laserový paprsek k přenosu dat ve vysokých rychlostech. Tento paprsek se přenáší v infračerveném spektru o vlnové délce mezi 830 – 1550 nm. Vzhledem k tomu, že světlo viditelné lidským okem se pohybuje v pásmu mezi 400 – 750 nm, je zřejmé, že paprsek OBS je pro naše oko neviditelný. [35]

Soustavu OBS podle [36] tvoří vysílač, přijímač a volný prostor (kanál). Vysílač a přijímač jsou známy jako optické pojítka. Základními částmi vysílače jsou modulátor, obvod ovladače pro optický zdroj a dalekohled řídicí optické směřování k přijímači. Přijímač se skládá z přijímacího dalekohledu, optického filtru, fotodetektoru a demodulátoru. Volným prostorem se myslí komunikační prostředí v podobě atmosféry, která je však ovlivňována nepředvídatelnými přírodními faktory a událostmi jako je mlha, déšť a sníh. Tyto faktory způsobují zhoršení a útlum vysílaného signálu. Komunikační prostředí je jedním z omezujících faktorů OBS. Princip fungování je popsán v následujícím odstavci. Náznak přenosu je zobrazen na obr. 14



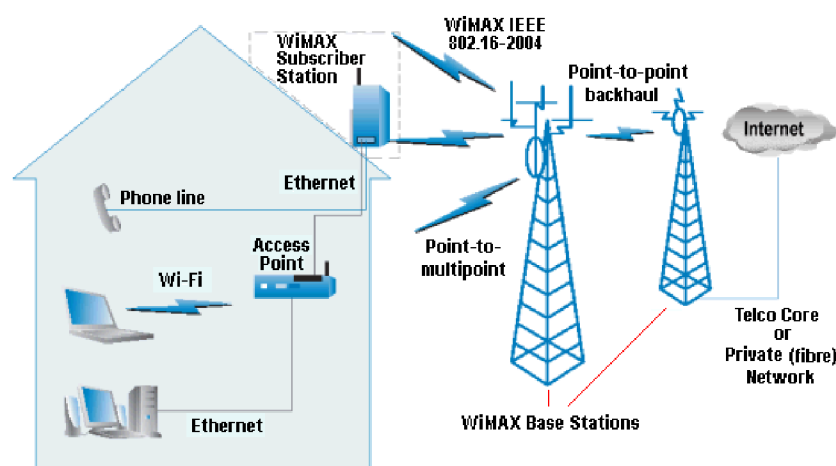
Obr. 14: Části optického pojítka FSO (Zdroj:[36])

Vysílaný signál je modulován modulátorem a prostřednictvím optického zdroje (laseru) vysílán skrz atmosféru k přijímači. V atmosféře na něj působí různé vnější vlivy prostředí jako je absorpce a rozptyl. Na druhé straně je přijímač, který prostřednictvím přijímacího dalekohledu optický signál usměrní a zaostří přes optický filtr na fotodetektor. Optický filtr snižuje úroveň záření pozadí a fotodetektor převádí dopadající optický signál na elektrický signál. [36]

Dle [8] se OBS používá pro WMAN sítě v případech, kdy není možná komunikace prostřednictvím vláknové optiky. Existuje mnoho druhů topologií. V realizaci prostřednictvím topologie typu point-to-point (z budovy na budovu) může dosahovat rychlost až 10 Gb/s, a to do vzdálenosti až 4 km. Na základě těchto informací můžeme vidět značné rozdíly ve využití, dosahované vzdálenosti a typu spojení v porovnání s technologií Li-Fi.

4.2 Technologie radiového spektra

Technologie pracující v oblasti radiového spektra jsou například WiMAX nebo Bluetooth. WiMAX (v angličtině Worldwide Interoperability for Microwave Access) pracuje ve skupině IEEE 802.16 zabývající se metropolitními bezdrátovými systémy. Jedná se o bezdrátový komunikační systém určený pro metropolitní sítě (WMAN). Poskytuje širokopásmový bezdrátový datový přístup pro pevné stanice do 50 km a pro mobilní stanice do 5-15 km. V pásmu 2,3 – 5,8 GHz nabízí přenosovou rychlost až 70 Mb/s. [37] Technologie WiMAX funguje v architektuře/konfiguraci point-to-multipoint, která se skládá ze dvou částí. Těmito částmi jsou základní stanice a přijímač v podobě malé krabičky či antény, jak je vidět na obr. 15. Základní stanice pracuje přes externí anténu, která vysílá signál k přijímači. Ten ho distribuuje dále (bezdrátově v podobě Wifi nebo drátově prostřednictvím ethernetového kabelu) do připojených zařízení. WiMAX funguje v podstatě jako Wi-Fi avšak o vysokých rychlostech a na dlouhé vzdálenosti. Oproti Wi-Fi nabízí vyšší odolnost vůči rušení a efektivnější využití pásma. [37, 38]



Obr. 15: Topologie technologie WiMAX (Zdroj:[39])

Velmi populární technologií pro přenos dat a komunikaci mezi zařízeními na krátkou vzdálenost se stala technologie Bluetooth. Bluetooth je technologie sloužící k bezdrátové radiové osobní komunikaci (WPAN) s krátkým dosahem mezi připojenými zařízeními. Je součástí pracovní skupiny IEEE 802.15.1 a funguje v konfiguraci point-to-point nebo point-to-multipoint. Zařízení se mohou kdykoliv od sítě odpojit a nejsou závislé na síťové infrastruktuře. Jako každá radiová komunikace je náchylnější na odposlech, ale krátký přenosový dosah přispívá k jeho zabezpečení. Bluetooth měl primárně sloužit jako náhrada kabelů na krátkou vzdálenost mezi počítači a periferiemi počítače, a pro přenos dat a sdílení. [40]

Od svého vzniku v roce 1994 se vyvinula celá řada verzí, které posouvali možnosti využití. V současné době se využívá Bluetooth ve verzi 5, který má venkovní dosah až 240 m a vnitřní dosah okolo 40 m. Rychlost přenosu se pohybuje kolem 2 Mb/s. Platí pravidlo – čím vyšší rychlost, tím nižší dosah. [41] V moderní době tuto technologii pro komunikaci využívá celá řada různých druhů zařízení od výpočetní techniky jako mobily, počítače, notebooky, myši, klávesnice, sluchátka, tiskárny, skenery až po audio zařízení, fotoaparáty, kamery apod. V následující tab. 2 je porovnána technologie Li-Fi s WiMAX, Bluetooth a OBS (FSO). [42]

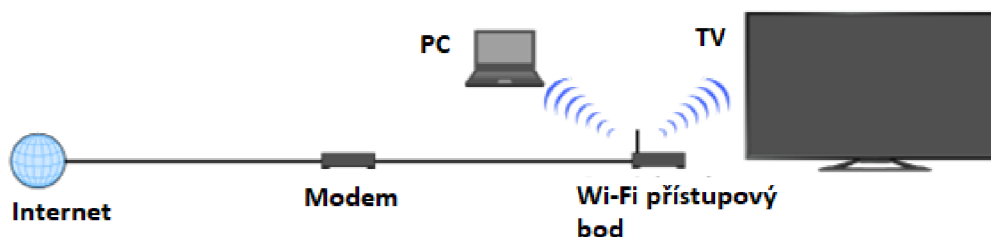
Parametr	Bezdrátové technologie			
	Li-Fi	WiMAX	Bluetooth 5	OBS (FSO)
Elektromagnetické spektrum	Viditelné světlo	Radiové vlny	Radiové vlny	Infračervené světlo
Vlnová délka	375 – 780 nm	100 – 10 mm	100 – 10 mm	830 – 1550 nm
Rychlost přenosu	> 1 Gb/s	Až 70 Mb/s	Až 2 Mb/s	> 2,5 Gb/s
Bezdrátová síť	WLAN	WMAN	WPAN	WMAN
Vzdálenost	max. 10 m	max. 50 km	max. 240 m	max. 5 km
Operační frekvence	400 – 800 GHz	2,3 – 5,8 GHz	2,4 GHz	194 – 375 THz
Latence	V řádu mikrosekund	V řádu milisekund	V řádu milisekund	V řádu mikrosekund
Spolehlivost	Střední	Střední	Střední	Střední
Bezpečnost	Velmi dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá

Tab. 2: Porovnání technologií (Zdroj:[22] - upraveno dle autora, [43, 38, 41, 8])

V tab. 2 jsou porovnány různé druhy bezdrátových technologií a jejich parametry. Každá technologie je specifická pro potřeby využití a má své výhody a nevýhody. Systém Li-Fi má obecně menší přenosovou vzdálenost a vysokou rychlost. WiMAX má velké přenosové vzdálenosti o menších rychlostech. Bluetooth má kratší přenosovou vzdálenost a je nezávislý na síťové infrastruktuře a technologie OBS může fungovat na dlouhé vzdálenosti s vysokými rychlostmi, ale může být velice nestabilní v závislosti na místu využití a počasí.

4.3 Li-Fi vs. Wi-Fi

Za neznámější bezdrátový datový přenos je v současné době považována komunikace prostřednictvím Wi-Fi. Wi-Fi (z anglického Wireless Fidelity neboli bezdrátový přenos) pracuje v oblasti rádiových vln a využívá bezlicenčního frekvenčního pásma o frekvencích 2,4 GHz a 5 GHz. Rychlost datového přenosu je odvozena od použitého datového standardu. Byla založena kolem roku 1997, kdy mezinárodní standardní institut (IEEE) publikoval specifikaci standardu bezdrátové sítě pod označením IEEE 802.11. V současné době existuje mnoho podstandardů jako 802.11a, 802.11b, 802.11g atd. Každý podstandard určuje specifické parametry vysílaného signálu. Wi-Fi se využívá pro lokální bezdrátové sítě (WLAN) v konfiguraci point-to-multipoint, kdy se k jednomu přístupovému bodu připojuje více zařízení. Přístupový bod Wi-Fi je zařízení, které prostřednictvím antény vysílá rádiové vlny do svého okolí. Uživatelská zařízení, jako je mobil, tablet, počítač, televize či tiskárna se k tomuto signálu připojí, a tím zahájí komunikaci po datové síti do internetu. [43] Princip fungování je zobrazen na obr. 16.



Obr. 16: Princip připojení Wi-Fi (Zdroj:[44] - upraveno dle autora)

Technologie Li-Fi by mohla být v budoucnu přímým konkurentem rozšířeného systému Wi-Fi. Prostřednictvím Li-Fi i Wi-Fi mohou uživatelé bezdrátově přistupovat k internetu a obě technologie přenáší data přes elektromagnetické spektrum. Rozdíl je v tom, že technologie Wi-Fi využívá k datovému přenosu rádiové vlny, zatímco Li-Fi využívá viditelné světelné vlny. [33] Oba systémy jsou topologicky navrženy pro lokální síť, ať už v kombinaci s lokální kabelovou sítí nebo samostatně v podobě bezdrátové lokální sítě WLAN. Rychlost datového přenosu u systému Wi-Fi závisí nejen na použitém standardu pro připojení, ale i na dalších faktorech jako je vzdálenost připojeného zařízení od vysílače, množství a druh překážek v případě připojení přes zeď. Podle [13] v rámci standardu 802.11n je maximální rychlost 150 Mb/s. U jiných standardů jako je 802.11n nebo 802.11ac může být vyšší. Rychlost u Li-Fi závisí na typu modulace signálu. Dle [8] by rychlost Li-Fi dle standardu 802.15.7 měla přesahovat 1 Gb/s. V nynějších laboratorních podmínkách a v budoucnu by se mohlo jednat o rychlost až o 10Gb/s.

Vysílač u Li-Fi je realizovaný prostřednictvím LED žárovek. Dosah signálu při zachování připojení se podle [22] pohybuje do 10 m. (* někteří autoři uvádějí až 50 m) U Wi-Fi se vzdálenost určuje podle použitého vysílače a jeho antény. Ve vnitřních prostorech se vzdálenost pohybuje kolem 20 m, ve vnějších až po 100 m. V rámci bezpečnosti je Li-Fi odolnější proti narušení než Wi-Fi. To je proto, že oblast pokrytí Li-Fi je pouze na osvětlených plochách. I když signál nemůže proniknout skrz zdi, může pronikat mezerami mezi podlahou a dveřmi nebo oknem, a to v některých situacích může způsobovat bezpečnostní problém. Signál Wi-Fi může procházet zdmi, a tím způsobit zranitelnost pro ztrátu a únik dat. Parametry těchto dvou technologií jsou porovnány v tab.3 níže.

Parametr	Bezdrátové technologie	
	Li-Fi	Wi-Fi
Elektromagnetické spektrum	Viditelné světlo	Radiové vlny
Vlnová délka	375 – 780 nm	100 – 10 mm
Rychlost přenosu	~1 Gb/s	~150 Mb/s
Bezdrátová síť	WLAN	WLAN
Vzdálenost	Do 10 m (max. 50 m)	20 - 100 m
Operační frekvence	400 - 800 GHz	2,4GHz, 5GHz
Topologie	Point-to-point	Point-to-multipoint
Latence	V řádu mikrosekund	V řádu milisekund
Spolehlivost	Střední	Střední
Bezpečnost	Velmi dobrá	Dobrá
Vysílač	LED	Anténa
Standard	IEEE 802.15.7	IEEE 802.11

Tab. 3: Wi-Fi vs. Li-Fi (Zdroj:[22] - upraveno dle autora, [8])

Technologii Wi-Fi budeme v budoucnu stále potřebovat. LED žárovka ve viditelném spektru nemůže poskytovat data na delší vzdálenosti a v oblastech, kde se vyskytují stromy, zdi a překážky. [17] V tomto ohledu dominuje Wi-Fi, která je ideální pro obecné bezdrátové pokrytí v rámci budov, kampusů a areálů. Naopak Li-Fi je ideální pro vysokorychlostní bezdrátové datové pokrytí v omezených oblastech a místnostech. [33]

4.3.1 Hlavní čtyři výhody oproti radiové komunikaci

Jak je již probráno v kapitole 3.1. profesor Haas při své první demonstraci systému Li-Fi široké veřejnosti na konferenci TED v roce 2011 poukázal na čtyři hlavní problémy radiových vln, které systém viditelného světla překonal. Těmito problémy jsou kapacita, dostupnost, bezpečnost a účinnost.

Kapacita

Na světě je více než 1,4 milionu vysílačů (údaje k roku 2011) určených pro mobilní telefony. Prostřednictvím telefonu se převede tisíce TB dat za měsíc. Tyto data se přenáší pomocí rádiových vln. Vlny jsou omezené, je jich nedostatek a jsou drahé. Na druhé straně existuje 14 miliard LED žárovek (údaje k roku 2011) vysílající světlo. Díky tomu, že spektrum viditelného světla má šířku pásma až $10\,000\times$ větší než rádiové spektrum můžeme zjistit, že potřebná infrastruktura pro technologii Li-Fi již existuje. [14] Nejdůležitějšími parametry v oblasti kapacity tak jsou šířka pásma, hustota dat a rychlost přenosu. Li-Fi může dosáhnout až $1000\times$ větší hustoty dat než Wi-Fi. Je to dáno tím, že viditelné světlo zůstává v určitém prostoru, zatímco rádiové vlny mají tendenci se šířit. Rychlost přenosu je blíže popsána v kapitole 3.2, ale obecně se jedná o vysokorychlostní bezdrátovou technologii. [10]

Účinnost

Těchto 1,4 milionu vysílačů tzv. základních stanic spotřebuje velké množství elektřiny. Většina spotřebované elektřiny není využita k přenosu rádiových vln, ale k chlazení těchto základních stanic. Díky tomu, že jsou data přenášena světlem, které je určeno primárně pro osvětlení, je datový přenos zadarmo. To znamená vysokou energetickou účinnost. [14] Spotřebu elektrické energie lze také minimalizovat použitím osvětlení LED, které je již využíváno v řadě domácností, kanceláří a obchodních domech. LED jsou efektivní z hlediska nízkých nákladů a nízké požadované energie. [10]

Dostupnost

Dostupnost rádiových vln se nezaměřuje na místa, kde není žádoucí rušení a ovlivnění funkčnosti okolních zařízení. Tato místa jsou popsána v kapitole 3.8. Jedná se o palubu letadla, nemocnice atd. Díky přenosu prostřednictvím světla technologie Li-Fi tyto problémy s rádiovým rušením může vyřešit. [14] Systém Li-Fi je stále ještě v rámci vývoje a zdokonalování, avšak můžeme již dnes pozorovat některé sestavy, které se již využívají v plném nasazení v provozu.

Bezpečnost

Bezpečnost můžeme rozdělit na dva druhy. Jedna se zaměřuje na působení a vliv na lidský organismus, druhá na bezpečnost datového přenosu. Světlo je všude kolem nás, je přirozenou součástí života a jako takové nepůsobí negativně na lidský organismus. Nemá žádné vedlejší účinky pro život. Rádiové a jiné komunikační vlny, které se využívají, mohou nebezpečně rušit elektromagnetické obvody a mít vliv na živý organismus. [10] Rádiové vlny mohou procházet zdmi. Mohou být zachyceny a odcizeny. Tento bezpečnostní problém je díky použití Li-Fi zanedbatelný, protože Li-Fi nedokáže prostupovat zdmi a datový přenos funguje pouze na jeho osvětlených plochách. [14] Díky tomu, že je vidět, kam data směřují, není potřeba další zabezpečení. [10]

4.4 Komerční produkty Li-Fi

Existuje řada implementovaných systémů, projektů a firem, které se zabývají technologií Li-Fi. Tyto projekty a firmy poskytují zajímavý pohled na aplikaci, využití a inovaci této technologie do reálného světa. Snaží se rozšířit povědomí široké veřejnosti o této technologii a poukázat na výhody jejího použití. V následující části jsou rozebrány tři firmy zabývající se technologií Li-Fi, kterými jsou pureLiFi, Oledcomm a Signify.

4.4.1 pureLiFi

Společnost pureLiFi je uznávána jako lídr v oboru využití viditelného světelného spektra pro bezdrátovou datovou komunikaci. Spoluzakladatel společnosti je profesor Haas, který je považován za největšího průkopníka technologie Li-Fi. Firma pureLiFi sídlí ve Spojeném království a poskytuje vysokorychlostní bezdrátový přístup prostřednictvím technologie Li-Fi. [10] V roce 2016 společnost pureLiFi představila první Li-Fi Dongle na světě, Li-Fi-X. Poté představila jeho výkonnějšího nástupce, a to produkt Li-Fi-XC jenž je obr. 17. Slibuje poskytování rychlosti až 42 Mb/s a je kompatibilní s operačními systémy Windows 7, Windows 10, Linux a macOS. [45] Jeden přístupový bod (Li-Fi Access point) podporuje až 8 přijímačů Li-Fi-XC a využívá technologii PoE. Přijímače Li-Fi-XC pracují ve vzdálenosti od 1 m do 6 m v pracovní teplotě od -10 °C do 45 °C. Cena balíčku 2×Li-Fi-XC, 2×Li-Fi AP a 2×LED žárovka stojí v současné době kolem £5000. [46]



Obr. 17: Produkt Li-Fi-XC (Zdroj:[47])

4.4.2 Oledcomm

Oledcomm je francouzská telekomunikační společnost, která zahájila svůj výzkum Li-Fi na univerzitě v Paříži. Vytvořila svůj první prototyp systému Li-Fi, který lze využít v automobilovém průmyslu. [48] Zařízení umožňují přenos dat prostřednictvím neviditelného paprsku světla. Toto světlo putuje mezi vysílačem (Access point) vybaveným LED žárovkami obvykle instalovaným ve stropě a přijímačem (Dongle) připojeného na zařízení. Nyní se společnost Oledcomm stala lídrem ve výrobě zařízení pro síťové rozhraní Li-Fi jako jsou

modemy, mosty a Li-Fi Dongly. V portfoliu nalezneme produkty jako je LiFiMAX Access Point podporující rychlost 100 Mb/s a s možností připojit až 16 uživatelů. Na opačné straně je přijímač, LiFiMAX Dongle podporující rychlost 100 Mb/s s možností připojení přes USB A a funkcí plug&play. Produkt LiFiMAX se prodává kolem \$1100 za jeden set. [49] Tento produkt je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18: Systém LiFiMAX Dongle (Zdroj:[45])

4.4.3 Signify

Společnost Philips je více než 125 let známá jako výrobce elektroniky a elektrotechniky. Byla založena Gerarden Leonardem Philipsem a Antonem Frederickem Philipsem v roce 1891. Společnost si vybudovala zastoupení ve více než 70 zemích světa. [48] Je rozdělena do tří hlavních divizí. Divize Philips Lighting jako jeden z největších inovátorů v oboru osvětlení si v roce 2018 změnila název na Signify. Nové jméno má údajně odrážet strategii, vizi celé firmy a záměr společnosti odhalit mimořádný potenciál světla. Signify je průkopníkem inovací v oblasti osvětlení a v současné době se zaměřuje na osvětlení pro internet věcí (IoT) a inteligentní osvětlení, které lze ovládat pomocí chytrého telefonu. [50] Firma se stala první globální osvětlovací společností, která zabudovala Li-Fi do kancelářských svítidel. Vytvořila řadu Li-Fi systémů pod názvem Trulifi, které představuje pod sérií Trulifi 6002 pro kancelářské použití a Trulifi 6013 pro průmyslové využití. Přenos prostřednictvím systému Trulifi 6002 se realizuje pomocí infračerveného světla elektromagnetického spektra. Oproti tomu přenos sérií Trulifi 6013 je realizován prostřednictvím viditelného světla elektromagnetického spektra v různých barvách jako je modrá, červená nebo zelená. [51]

5 Praktická realizace

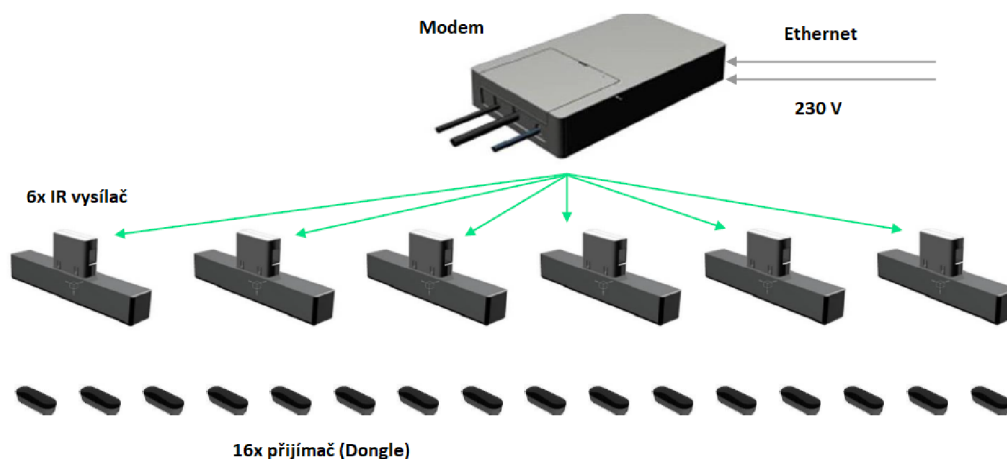
Teoretická část práce pojednává o systému, který přenáší data prostřednictvím bezdrátového optického spoje ve viditelném spektru Li-Fi. Byly probrány základní části tohoto zařízení, princip fungování, pozitivní a negativní vlastnosti, potenciální využití a další důležité informace nezbytné k pochopení hlavní myšlenky této technologie. Tato následující část práce se zaměřuje na praktická měření a vyhodnocení funkčnosti tohoto moderního bezdrátového přenosu. Měření se zaměřují na vyhodnocení některých důležitých vlastností Li-Fi systémů zadaných výrobcem, ověření omezujících způsobů komunikace prostřednictvím této optické bezdrátové komunikace a otestování potencionálního bezpečnostního problému. Pro relevantní výsledky je třeba vybrat optimální prostory, které odpovídají místům využití testovaných produktů. Dále je třeba stanovit a zajistit materiály na kterých bude testována datová dostupnost a odrazivost v podobě měřených veličin rychlosti a ztráty. V poslední části je nezbytné využít speciální přístroje. Sběr dat je realizován pomocí programu třetí strany.

5.1 Popis využitých Li-Fi systémů

Praktická měření jsou realizována prostřednictvím dvou různých/odlišných Li-Fi systémů od firmy Signify, která byla představena v kapitole 4.4. Pro realizaci této diplomové práce společnost Signify poskytla dva modely Li-Fi technologie v řadě Trulifi. Série Trulifi 6002 se zaměřuje na kancelářské prostory a pracuje v oblasti blízkého infračerveného spektra. Druhý systém pod názvem Trulifi 6013 je vyvinut převážně pro průmyslové použití a funguje v oblasti viditelného světelného spektra.

5.1.1 Trulifi 6002

Produkt Trulifi 6002 je navržený pro kancelářský typ prostoru. Jedná se o vnitřní osvětlené prostory o pokojové teplotě s optimální délkou komunikace od 1,8 - 2,8 m. Celý systém se skládá ze tří základních komponent, kterými jsou modem (Access point), IR vysílač a přijímač (Dongle). Modem pro svoje fungování potřebuje na vstupu napájení 230 V a síťové připojení prostřednictvím ethernetového kabelu s koncovkou RJ45. Na výstupu je 6 ethernetových portů s koncovkou RJ12 sloužící pro připojení vysílačů. Z toho plyne, že jeden modem dokáže obhospodařovat až 6 IR vysílačů, jak je vidět na obr.19. Tato konfigurace dokáže vytvořit prostor o velikosti 20 m² s pokrytým Li-Fi signálem. Jeden IR vysílač dokáže pokrýt prostor v průměru 2,4 m. Tento rozsah je závislý na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Pro přijetí signálu na straně uživatele slouží Dongle. Ten je připojený přes port USB-A 3.0 k počítači. Systém Trulifi 6002 podporuje operační systémy Windows a macOS. [52, 55]



Obr. 19: Princip spojení Trulifi 6002 (Zdroj:[52] – upraveno dle autora)

Zařízení pracuje v oblasti blízkého infračerveného spektra pro oba směry přenosu. Pro datový přenos od IR vysílače do přijímače (data downlink) systém funguje ve vlnové délce 850 nm. Pro opačný přenos pracuje ve vlnové délce 940 nm. Tento princip eliminuje vzájemné rušení v případě použití stejné vlnové délky. Rychlost pro datový downlink se pohybuje okolo 150 Mb/s a pro datový uplink 140 Mb/s. Datový přenos používá 128bitové šifrování AES CCMP. [52] Na následujícím obr. 20 jsou představeny jednotlivé části této Li-Fi sestavy.



Obr. 20: a) modem, b) IR vysílače, c) přijímač (Zdroj:[52])

5.1.2 Trulifi 6013

Systém Trulifi 6013 je navržený spíše pro průmyslové aplikace. Je stavěný pro rozsáhlejší vnitřní prostory s teplotou pohybující se mezi $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální dosah tohoto systému je stanovený na vzdálenost 8 m. Model Trulifi 6013 se vyrábí ve třech variantách, přičemž existují verze s USB 3.1-C, verze s napájením PoE a verze bez napájení PoE. Pro praktická měření v této diplomové práci byla využita varianta USB 3.1-C, kterou lze připojit k jakémukoliv systému Windows nebo macOS s funkcí plug&play. Celý systém se skládá ze tří částí, a to PoE zdroje, vysílače a přijímače. Do PoE zdroje je přivedeno napájení 230 V a prostřednictvím ethernetového kabelu i síťová konektivita. Tento zdroj je díky funkci PoE

připojen ethernetovým kabelem k vysílači. Vysílač vysílá paprsek kuželového tvaru, který v závislosti na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem mění svůj rozsah. Pro přijetí signálu na straně uživatele slouží přijímač, který vypadá stejně jako vysílač. Ten je připojený přes port USB-A k počítači. [53] Na obr. 21 níže je vidět vysílač/přijímač Trulifi 6013.



Obr. 21: Vysílač/přijímač Trulifi 6013 (Zdroj:[53])

Model 6013 pracuje v oblasti viditelného světelného spektra pro oba směry datového přenosu. Vyrábí se ve třech barevných provedení. Využívané LED žárovky mohou mít červenou, zelenou nebo modrou barvu. Pro účely praktického měření byla poskytnuta varianta s LED žárovkou modré barvy. Vlnová délka této barvy se pohybuje kolem 470 nm. Rychlost pro datový downlink i uplink se pohybuje okolo 250 Mb/s. Datový přenos používá šifrování v podobě 128bitového AES CCMP. [53, 54] Obr. 22 představuje využití produktu Trulifi 6013 v praxi.



Obr. 22: Příklad využití Trulifi 6013 v praxi (Zdroj:[52])

Při využití zařízení Trulifi 6013 v konfiguraci s LED žárovkou modré barvy je potřeba dodržovat bezpečnostní pokyny pro laser třídy 2. LED žárovky v této bezpečnostní třídě jsou považovány za neškodné, ale mají maximální povolenou dobu přímého pohledu do svazku stanovenou na 0,25 s. [54] Následující tab.4 porovnává produkty Trulifi 6002 a 6013.

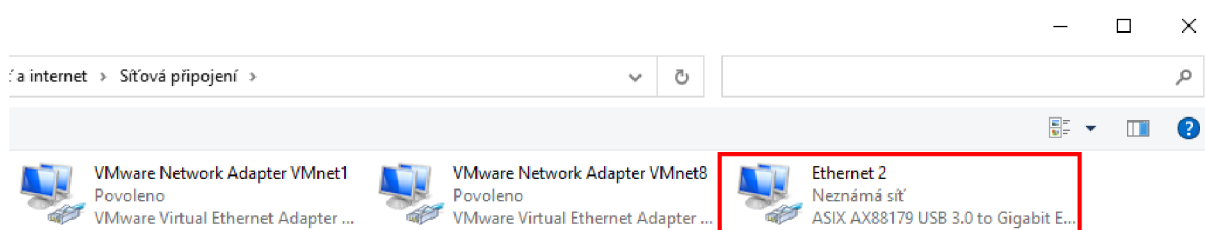
Parametr	Produkty Signify	
	Trulifi 6002	Trulifi 6013
Přenos prostřednictvím	IR záření	Viditelné světlo
Dosah	2,8 m	8 m
Rychlost	150/140 Mb/s	250 Mb/s
Vlnová délka	850/940 nm	470 nm
Využití	Kanceláře	Průmyslové objekty
Provozní teplota	10 °C až 40 °C	-10 °C až 40 °C

Tab. 4: Porovnání produktu Trulifi 6002 a 6013 (Zdroj:[vlastní])

5.1.3 Konfigurace Li-Fi zařízení

Před prvním použitím těchto dvou Li-Fi zařízení je potřeba jednotlivé systémy nakonfigurovat. Konfigurace při dodržení systémových požadavků není složitá. K nastavení zařízení Trulifi 6002 je zapotřebí konfigurační soubor umístěný na Li-Fi USB flash disku. Po připojení Donglu do počítače je potřeba tento konfigurační soubor nainstalovat. V rámci této instalace se nainstalují potřebné ovladače pro připojení. Po instalaci ovladačů lze přes webový prohlížeč a příslušnou IP adresu přistupovat do rozhraní modemu, kde lze provést další dodatečná nastavení jako je upgrade firmwaru.

Nastavení zařízení Trulifi 6013 je ještě jednodušší. Po splnění systémových požadavků stačí připojit přijímací část sestavy do počítače. To automaticky nainstaluje správný ovladač USB do kategorie Ethernet. Tento řadič s názvem “ASIX AX88179 USB 3.0 to Gigabit Ethernet controller“ je ukázán na obr. 23. Po tomto připojení lze, stejně jako u zařízení Trulifi 6002, přistupovat přes webové rozhraní a IP adresu do administrace vysílače. Tam lze měnit parametry jako DHCP, rozsah IP adres apod. Po těchto prvních konfiguracích už oba systémy pracují s funkcí plug&play. Tato funkce umožňuje automatické připojování bez nutnosti dalšího nastavování.



Obr. 23: Ukázka nainstalovaného ovladače (Zdroj:[vlastní])

5.2 Využití prostředí

Pro zajištění relevantních výsledků měření je potřeba co nejpřesněji nasimulovat prostředí, ve kterém systémy Li-Fi pracují. Oba testované produkty se zaměřují na funkčnost ve vnitřních osvětlených prostorech budov. Produkt Trulifi 6002 je určen převážně do kancelářských prostor o pokojové teplotě kolem 23 °C. S optimálním použitím ve vzdálenosti od 1,8 m do 2,8 m je zřejmé, že IR vysílač bude implementován do stropních podhledů kanceláří a přijímač bude připojen k pracovní stanici. Oproti tomu produkt Trulifi 6013 je vytvořen převážně pro průmyslové objekty. Jedná se především o průmyslové prostory bez specifických podmínek jako je nadměrná prašnost nebo extrémní mráz. Ideálními prostory pro využití jsou různé montážní, plnicí a výrobní haly. Jak je uvedeno v tab. 4, provozní teplota série Trulifi 6013 se pohybuje od -10 °C do 40 °C. Maximální dosah se udává do vzdálenosti 8 m, z čehož plyne, že zařízení je možné využít pro přenos dat v rámci různých průmyslových konstrukcí, pro které je nežádoucí použití síťových kabelů. V rámci všech výše zmíněných požadavků byly stanoveny jako nejrelevantnější prostory pro realizaci praktických měření, prostory Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Přesněji se jedná o prostor laboratoře výpočetní techniky v místnosti LVA M219/2 a chodba druhého patra před učebnou LVA M219/2. V místnosti laboratoře výpočetní techniky se provádělo měření v rámci ověření omezujících způsobů komunikace a testování potenciálních bezpečnostních problémů. Na chodbě před laboratoří se provádělo měření pro ověření vlastností udávané výrobcem. Důvodem k výběru těchto vnitřních prostor je skutečnost, že splňují hlavní potřeby pro optimální simulování prostředí. Jedná se o rozsáhlé vnitřní prostory s adekvátním osvětlením v podobě zářivek a ideální pokojovou teplotou kolem 21 °C až 23 °C.

K realizaci praktického měření je potřeba stabilní síťové připojení prostřednictvím kabelové struktury. Zdrojem síťové konektivity pro připojení testovaných produktů Trulifi 6002 a 6013 byla lokální kabelová síť laboratoře výpočetní techniky LVA M219/2. Síť obsahuje aktivní síťové prvky a je realizována prostřednictvím strukturované kabeláže s využitím ethernetového kabelu CAT 6. Využitý ethernetový port pro připojení systémů Li-Fi se nacházel za aktivními síťovými prvky v podobě routeru od firmy TP-Link a management switchu od firmy Zyxel. V síti se rovněž nachází kolem 24 pevných počítačů, které jsou určeny pro potřeby výuky.

5.3 Použitý vyhodnocovací software

Pro vyhodnocení předpřipravených scénářů měření je potřeba využít optimální software zaměřující se na síťový datový provoz v rámci lokálních sítí. Pro vyhodnocení výsledků této diplomové práce byl využit software TamoSoft – Throughput Test (WLAN Performance Meter) ve verzi 1.0. Jedná se o síťový nástroj od firmy TamoSoft zaměřující se na testování výkonu bezdrátových nebo drátových sítí. Tento software je bezplatný a lze ho najít na adrese: <https://www.tamos.com/download/main/>. [5]

5.3.1 Program TamoSoft

Nástroj funguje na principu nepřetržitého odesílání datového toku protokolů TCP a UDP po síti a vypočítává důležité metriky jako jsou hodnoty propustnosti pro upstream a downstream, ztráty paketů a dobu odezvy. Tyto výsledky zobrazuje s číselným a grafickým formátů prostřednictvím grafu. U testu propustnosti podporuje připojení IPv4 i IPv6 a umožňuje vyhodnotit výkon sítě v závislosti na nastavení. [5]

Minimální systémové požadavky pro korektní pracování programu jsou:

- Operační systém Windows 7 a novější
- Operační systém MacOS Maverick, Yosemite, El Capitan, Siaerra
- Velikost alespoň 1 GB RAM
- 5 MB volného místa [5]

K provedení testu propustnosti používá aplikace dvě součásti: server a klient. Serverová část aplikace je spuštěna na libovolném počítači splňující minimální požadavky na program uvedené výše. Tato část aplikace naslouchá připojení klienta, který se k tomuto serveru připojí prostřednictvím vnitřní IP adresy a portu. Jakmile je spojení navázáno, klient a server odesílají data oběma směry a klientské část aplikace vypočítává uvedené síťové metriky. [5]

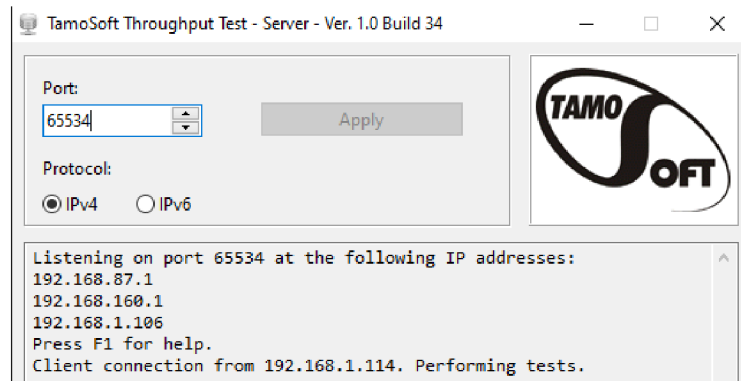
Při instalaci programu se na pracovní stanici nainstaluje serverová i klientská část programu. V rámci konfigurace s WLAN je serverová část spuštěna na drátové straně sítě prostřednictvím počítače a klientská část běží na klientovi WLAN. V tomto typu nastavení je downstream datový tok z kabelové strany sítě přes přístupový bod (Access point) ke klientovi a upstream datový tok od klienta přes přístupový bod k serveru. Klientská část programu umožňuje jednotlivé nastavení QoS pro řízení datového toku. [5]

5.3.2 Konfigurace programu pro praktické měření

Po instalaci a následném spuštění programu na straně serveru jsou k nastavení pouze dvě konfigurovatelné možnosti: port, na které server naslouchá a použitý síťový protokol IP v podobě IPv4 nebo IPv6. Program dále využívá vnitřní IP adresu daného zařízení. Na obr. 24 je vidět nastavení konfigurace pro praktické měření.

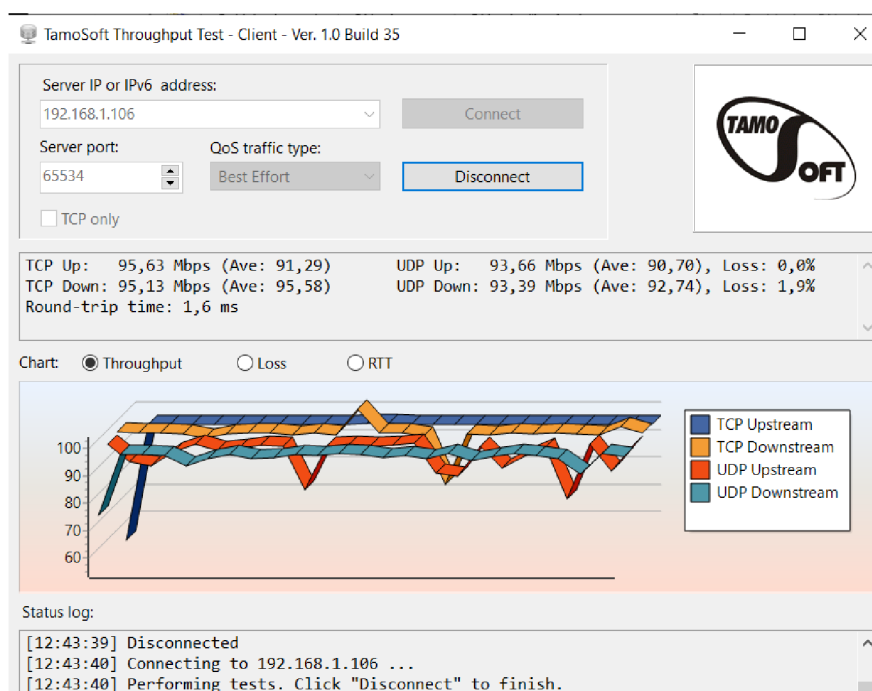
Hodnoty konfigurace serveru pro všechny praktické měření této diplomové práce jsou:

- **Port:** 65534
- **IP protokol:** IPv4
- **IP adresa serveru:** 192.168.1.106



Obr. 24: Konfigurace serverové části programu (Zdroj:[vlastní])

Na straně klienta je nastavení podobné. Jako první je potřeba nainstalovat příslušný program. Po jeho instalaci a následném spuštění je třeba nastavit IP adresu a port, který jsme nastavili na straně serveru. Dále je potřeba vydefinovat QoS type. Ten je pro všechna praktické měření nastaven na Best Effort. Toto nastavení je výchozí a stanovuje provoz, který má stejnou prioritu sítě jako běžný provoz. Po spuštění tlačítka Connect dojde k ověření připojení a program začne vyhodnocovat příslušné metriky datového výkonu sítě. Připojení klientské části aplikace je vidět na obr. 25.



Obr. 25: Připojení klientské části programu (Zdroj:[vlastní])

Klientské okno aplikace zobrazuje hodnoty propustnosti pro protokoly TCP a UDP (up/down), procento ztráty toku UDP (Loss up/down) a dobu odezvy (RTT). Je potřeba mít na paměti, že rychlost protokolů TCP/UDP je dána v Mb/s a doba odezvy v ms.

5.3.3 Průběh vyhodnocení

Vyhodnocení naměřených metrik bylo pomocí programu TamoSoft neefektivní a zdouhavé. Velkým kladem vybraného programu je skutečnost, že dokáže zpracovávat vybrané metriky v reálném čase. Naneštěstí je však neumožňuje ukládat do externího textového souboru v podobě .txt nebo .csv. Z tohoto důvodu byl potřeba další software, který v průběhu měření nahrával klientské okno programu TamoSoft a nahrávky ukládal. Tímto programem je aplikace OBS, která se zaměřuje na nahrávání a sdílení obrazovky. Vzhledem k tomu, že software TamoSoft zpracovává jednotlivé datové vlny paketů každé cca. 3 sekundy, lze vyhodnotit jednotlivá praktická měření s různými vnějšími událostmi v reálném čase. Toto vyhodnocení bylo docíleno prostřednictvím manuálního přepisování naměřených hodnot z pořízených nahrávek.

5.4 Průběh měření

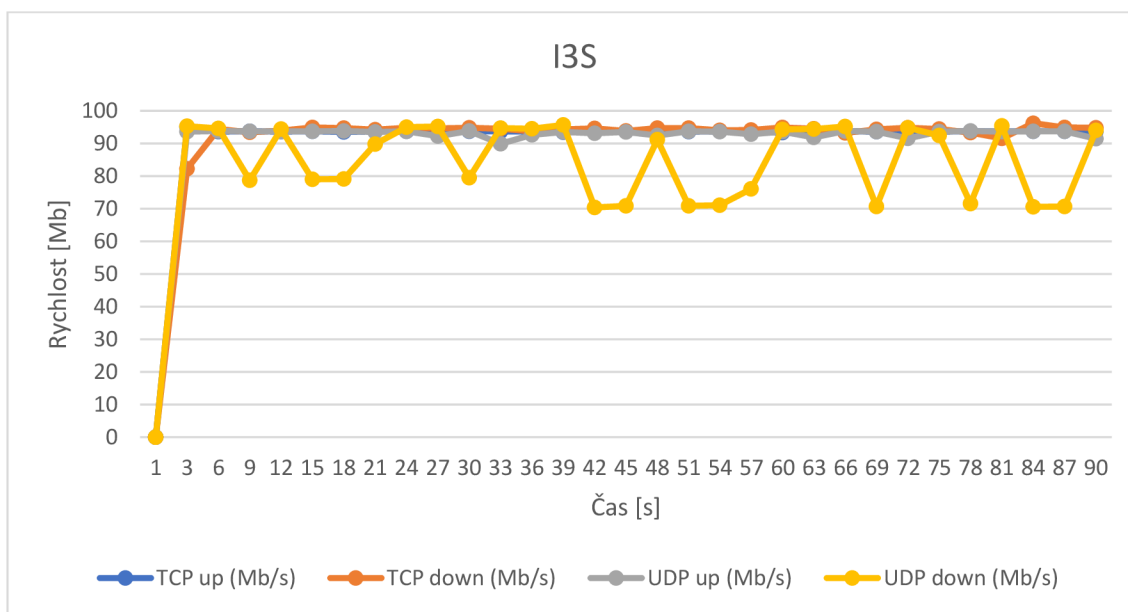
Na začátku prvního testovacího měření bylo potřeba nakonfigurovat a nastavit potřebné softwarové ovladače pro přijímací část sestavy, jak je uvedeno v kapitole 5.1.3. Toto nastavení proběhlo pouze jednou a později již nebylo potřeba konfiguraci opakovat. Poté bylo potřeba jednotlivé části zařízení sestavit. To bylo učiněno prostřednictvím manuálu pro jednotlivé části Li-Fi sestavy, viz kapitola 5.1. Po sestavení a natočení jednotlivých částí vysílače a přijímače na sebe, v rámci požadavku systému na spojení LoS, bylo po pár vteřinách spojení ověřeno a navázáno. Následovalo ověření dostupnosti internetu prostřednictvím webových stránek České zemědělské univerzity. Poté, co bylo připojení ověřeno se postupovalo dle potřeb jednotlivých scénářů. Před každým měření byla rovněž změřena intenzita osvětlení v místnosti, a to prostřednictvím mobilní aplikace Lux. V tomto duchu byla prováděna všechna praktická měření uvedená v této diplomové práci.

5.4.1 Testování

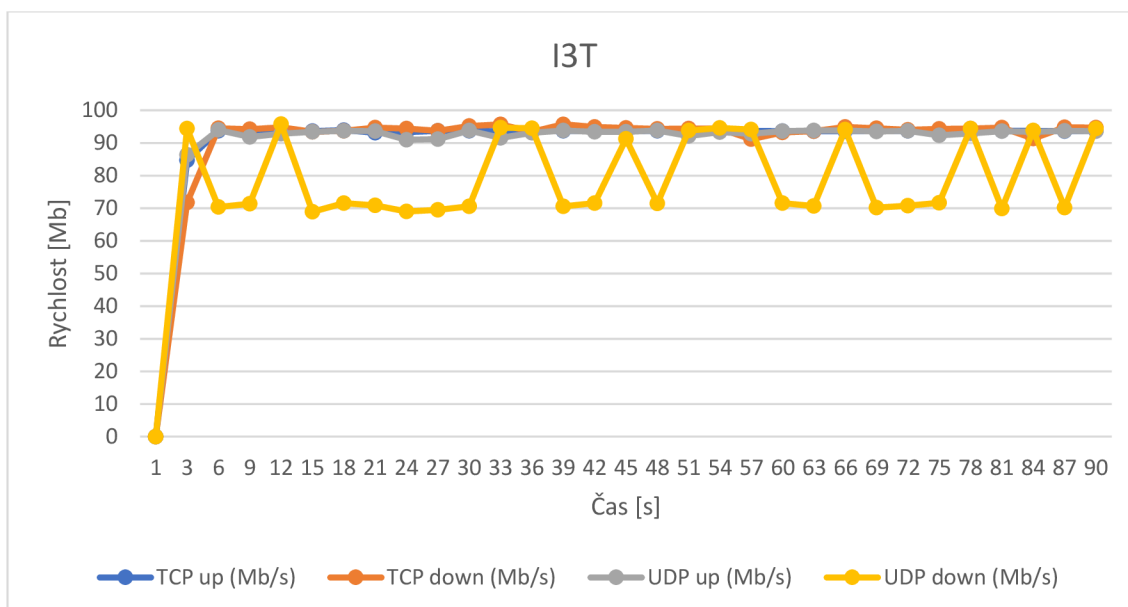
Před realizací praktických měření bylo potřeba zjistit, zda okolní světlo neovlivňuje rychlost nebo stabilitu jednotlivých Li-Fi zařízení. To bylo realizováno testovacími měřeními datového přenosu. Jak je uvedeno v tab. 5 níže, jednotlivá měření probíhala za přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem za rozdílných světelných podmínek. Intenzita osvětlení při zapnutém světle v místnosti dosahovala hodnoty 360 LUX, zatímco vypnuté světlo bylo vnímáno jako tma s hodnotou 1 LUX. Měření proběhla na zařízeních Trulifi 6002 ve vzdálenosti 2,3 m a Trulifi 6013 ve vzdálenosti 4 m. Tyto vzdálenosti byly vybrány jako $\frac{1}{2}$ maximální vzdálenosti udávané výrobcem. Tab. 4 odkazuje na výsledky průběhů jednotlivých měření, které jsou zobrazeny v podobě grafů 1, 2, 3 a 4.

Měření	Osvětlení (v LUX)	Typ přenosu	Trulifi 6022; Vzdálenost (2,3 m)	Trulifi 6013; Vzdálenost (4 m)
Světlo	360	LoS	I3S	P2S
Tma	1	LoS	I3T	P2T

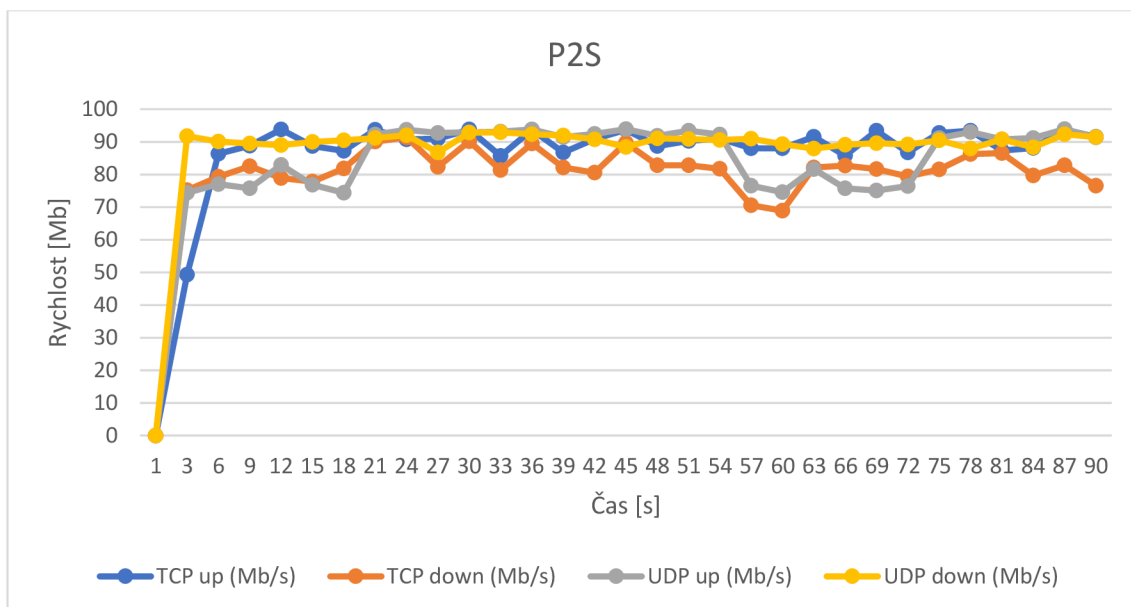
Tab. 5: Výsledky testovaných měření (Zdroj:[vlastní])



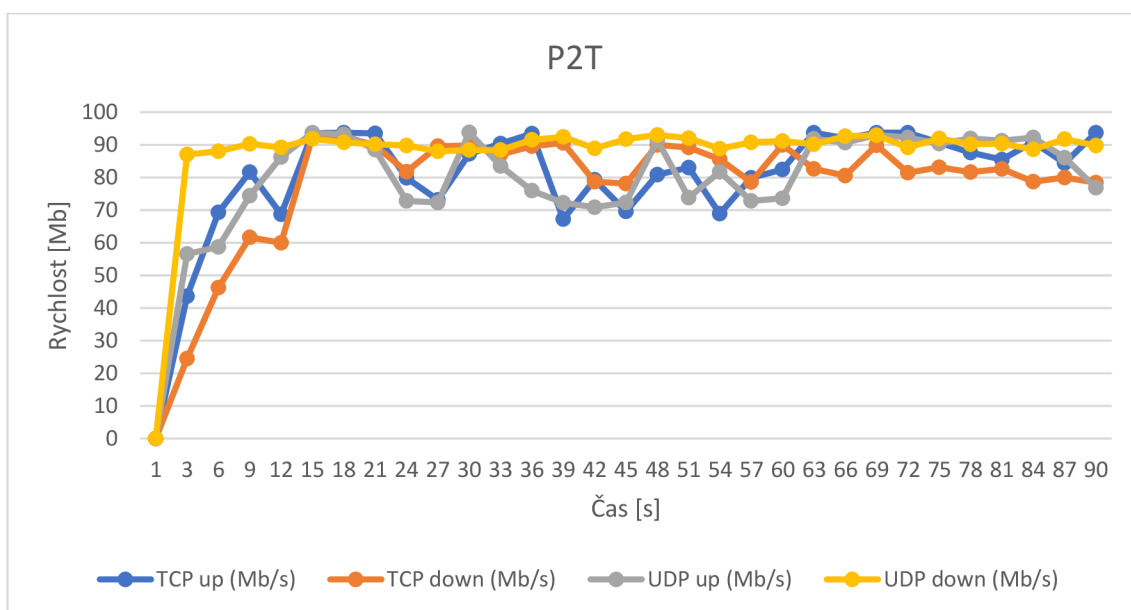
Graf 1: měření I3S (Zdroj:[vlastní])



Graf 2: měření I3T (Zdroj:[vlastní])



Graf 3: měření P2S (Zdroj:[vlastní])



Graf 4: měření P2T (Zdroj:[vlastní])

V grafech 1 a 2 jsou takřka totožné hodnoty, a proto je zřejmé, že okolní světlo u systému Trulifi 6002 nemá žádný vliv na rychlost a spolehlivost přenosu dat tohoto optického bezdrátového spoje. Z grafů 3 a 4 u zařízení Trulifi 6013 vyplývá, že naměřené hodnoty rychlosti jsou oproti produktu Trulifi 6002 více rozptýlené. Z celkového průběhu lze považovat systém Trulifi 6013 za odolný proti okolnímu světlu. Vzhledem k tomu, že oba testované systémy jsou proti okolnímu světlu odolné, veškerá praktická měření jsou realizována při zapnutém osvětlení v simulačních místnostech. Toto vyhodnocení je na základě více realizovaných testovacích měření.

6 Praktická měření

V této části se práce zaměřuje na praktická měření potřebná k vyhodnocení předem definovaných vlastností a různých typů předpřipravených scénářů. Tato kapitola je rozdělena to čtyř podkapitol. Jedná se o podkapitoly měření vzdálenosti, měření prostupu přes různé druhy materiálů, měření odrazem a měření přes rušivé prvky. Pro ukázkou vyhodnocení realizovaného měření jsou v této kapitole zobrazeny pouze vybrané části přenosů. Zbytek měření je uveden v přílohách této diplomové práce dle označení v tabulkách pro jednotlivá zařízení.

6.1 Měření vzdálenosti

Tato podkapitola se zaměřuje na jednu z nejdůležitějších vlastností, se kterou je třeba při nasazování Li-Fi systémů v sítích WLAN počítat. Touto vlastností je maximální či optimální vzdálenost pro stabilní bezdrátový přenos dat. Výrobce pro jednotlivé systémy udává rozdílné hodnoty v závislosti na plánech používání těchto zařízení. Pro produkt Trulifi 6002 je stanovena provozní vzdálenost od 1,8 m do 2,8 m. Oproti tomu Trulifi 6013 pro průmyslové použití má stanovenou maximální vzdálenost 8 m.

Pro realizaci tohoto měření je potřeba velký vnitřní prostor, proto byl využit prostor chodby před učebnou LVA M219/2. Před samotným měřením bylo potřeba stanovit hodnoty měřených vzdáleností, které byly stanoveny hluboko přes maximální hodnoty zadané výrobcem. Cílem tohoto měření je zjistit, pro jak reálně dlouhou vzdálenost jsou zařízení schopná vysílat stabilní datový přenos. V následujících tab. 6 a 7 jsou definované testované vzdálenosti pro jednotlivé typy zařízení a jednotlivá měření, které jsou vizualizovány v podobě grafů. Součástí každého vyhodnocení jsou naměřené hodnoty ztráty (Loss up/down) a odezva. Tyto údaje jsou také k dispozici v podobě grafů. Tabulky rovněž ukazují intenzitu osvětlení v průběhu jednotlivých měření. Měření proběhlo za přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem.

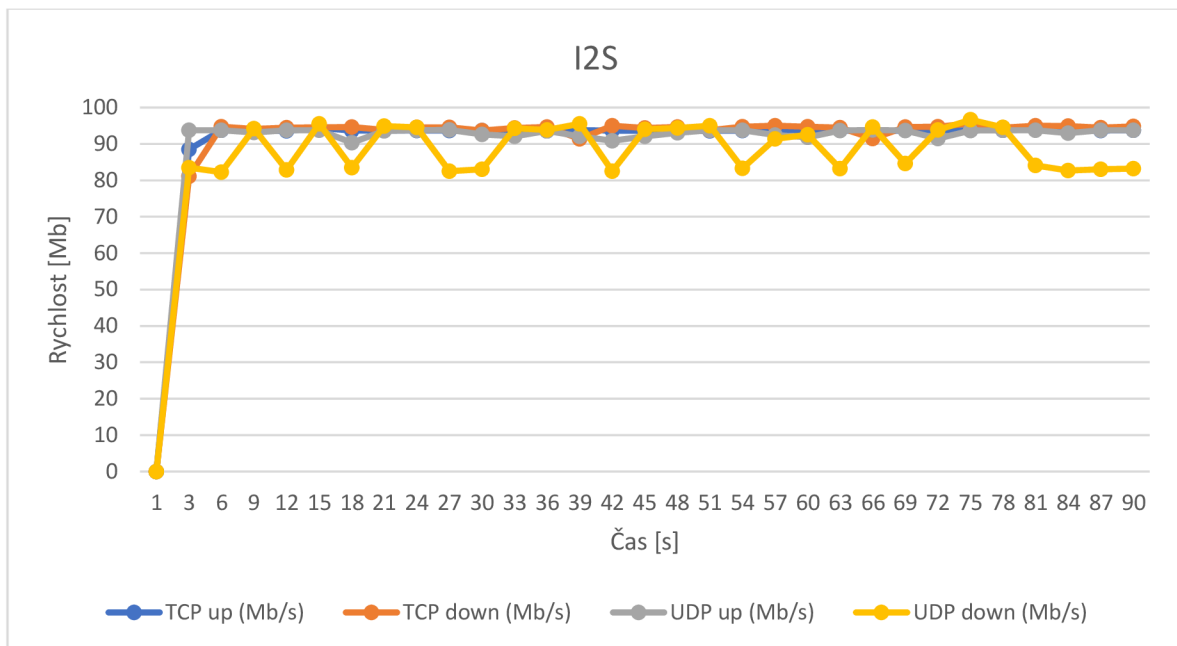
6.1.1 Zařízení Trulifi 6002

Tabulka Li-Fi systému Trulifi 6002 s vydefinovanými vzdálenostmi, intenzitou osvětlení při měření a výsledky měření.

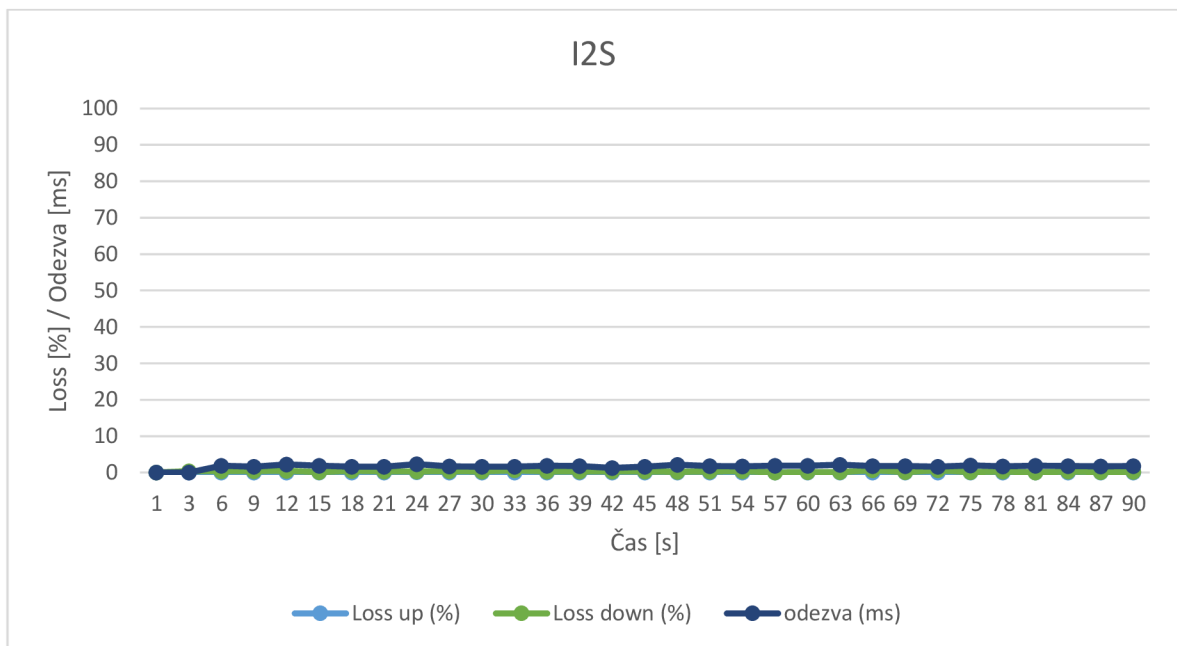
6002	LUX	Vzdálenost							
		1 m	1,8 m	2,3 m	2,8 m	4 m	5 m	6 m	7 m
světlo	360	I1S**	I2S	I3S**	I4S**	I5S**	I6S	I7S**	*
Celkový průběh v reálném čase					IS				

Tab. 6: měření vzdálenosti Trulifi 6002 (Zdroj: [vlastní])

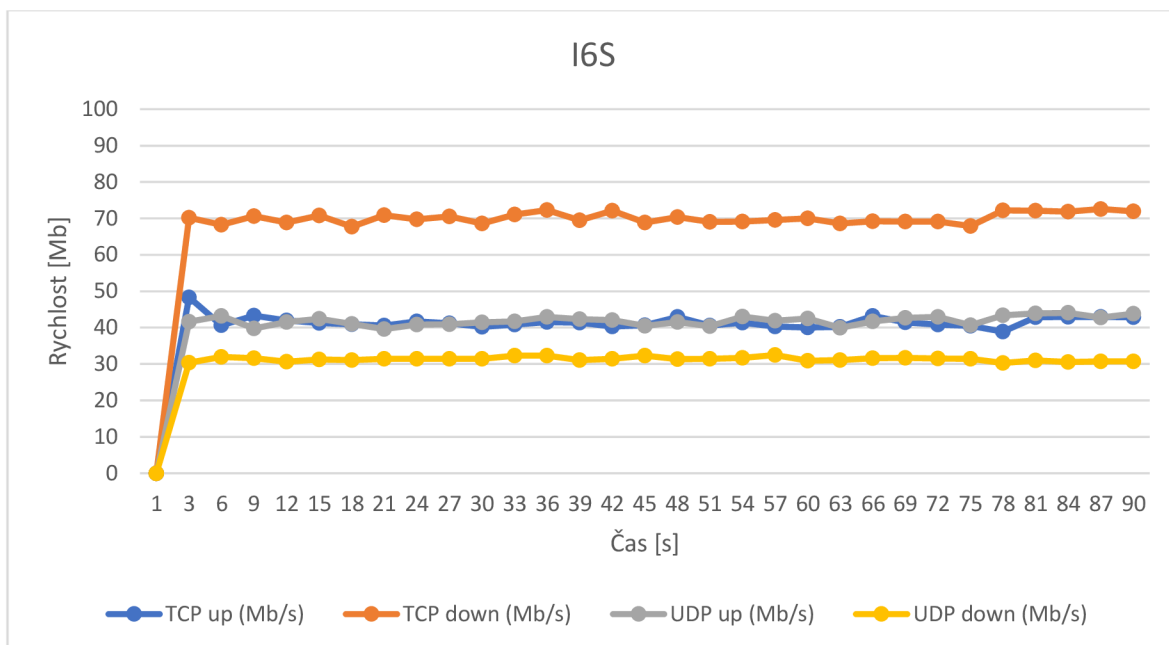
(* ztráta připojení – disconnect; ** viz příloha)



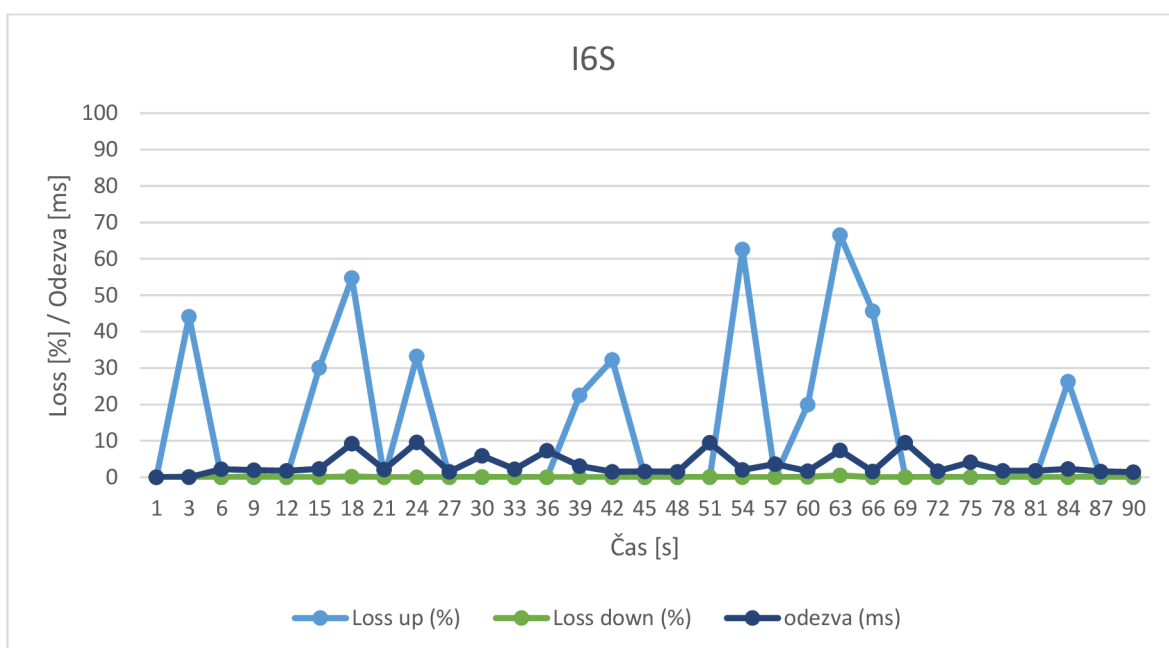
Graf 5: měření I2S - 1/2 (Zdroj: [vlastní])



Graf 6: měření I2S - 2/2 (Zdroj: [vlastní])



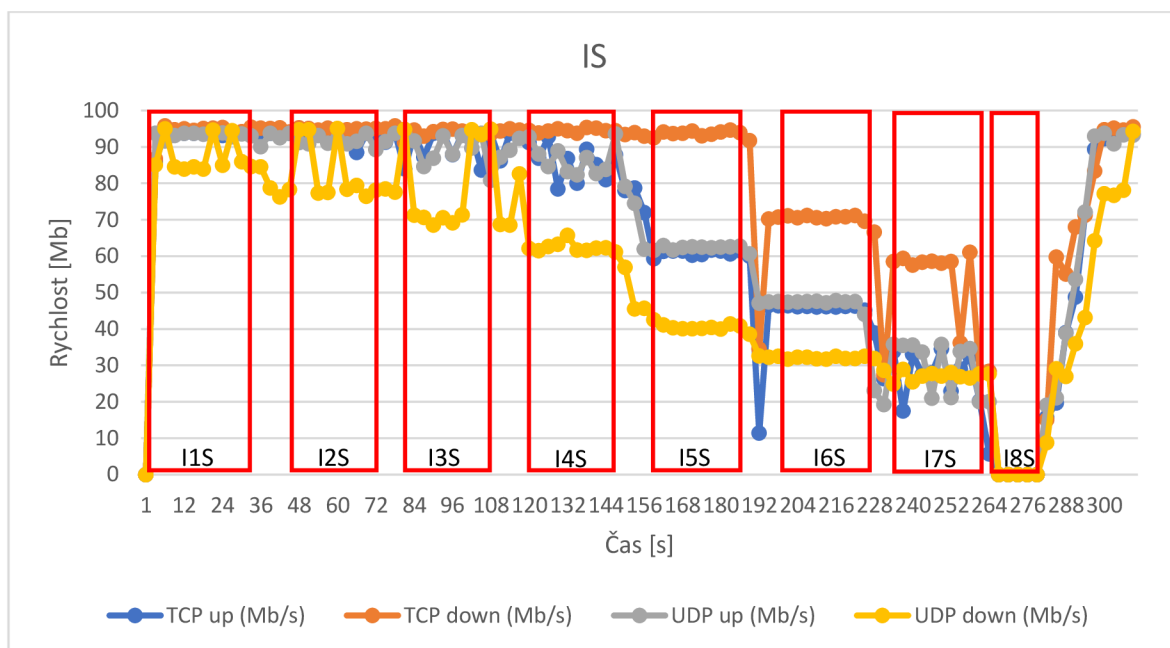
Graf 7: měření I6S - 1/2 (Zdroj: [vlastní])



Graf 8: měření I6S - 2/2 (Zdroj: [vlastní])

Z hodnot v grafu 5 naměřeného na zařízení 6002 vyplývá, že ve vzdálenosti 1,8 m, kterou výrobce udává jako optimální je rychlost a stabilita protokolu TCP up/down a UDP up takřka lineární kolem hodnoty 94 Mb/s. Protokol UDP down nepravidelně kmitá mezi hodnotami 80 – 93 Mb/s. Na grafu 6 můžeme vidět, zanedbatelné hodnoty ztráty a velice nízkou odezvu kolem 1,5 ms. Oproti tomu při měření na vzdálenost 5 m, která hluboce přesahuje vzdálenost udávanou výrobce, je z grafu 7 vidět velké snížení rychlosti, a to u protokolů TCP up a UDP

up/down o více než 50 %. Všechny měřené protokoly se pohybují po lineární úrovni, kdy protokol TCP down si zachoval nejvyšší rychlost, a to kolem 70 Mb/s. Na grafu 8 můžeme vidět špičky ukazující na zvýšení datových ztrát paketů (Loss up) a viditelné zvýšení odezvy datového přenosu sítě. Navzdory těmto skutečnostem lze považovat měření I6S za adekvátní pro přenos datového signálu. V průběhu měření nedošlo ke ztrátě paketů signalizující odpojení od sítě. V následujícím grafu 9 lze pozorovat celkový průběh všech předem vybraných hodnot vzdálenosti chronologicky dle velikosti.



Graf 9: měření IS (Zdroj: [vlastní])

Výsledný graf 9 představuje měření všech definovaných hodnot vzdálenosti v reálném čase. Jedná se o komplexní měření zaměřující se na aktivní přesun přijímače po přesně definovaném okně 10ti změřených pulsů, kde se provádělo měření dané vzdálenosti. Úzké mezery mezi obdélníky definují okno, ve kterém probíhal aktivní přesun přijímače k další vytyčené hodnotě vzdálenosti. Z průběhu měření je vidět, jak se s rostoucí vzdáleností mění jednotlivé rychlosti vybraných protokolů. V bloku I4S, který představuje vzdálenost 2,8 m udávanou výrobcem jako maximální je vidět odstup protokolů TCP up, UDP up/down od lineární hranice kolem 90 Mb/s, na které stále pracuje protokol TCP down. S přibývajícím vzdáleností je vidět rapidní snížení rychlosti až do posunu na vzdálenost 7 m představující blok I8S, kde došlo k odpojení od sítě. Po ztrátě připojení následoval posun přijímače zpět po ose vzdálenosti na hranici 1 m, jak je vidět v konečné části grafu. V průběhu posunu se připojení okamžitě obnovilo a ustálilo zpět kolem 93 Mb/s. Měření IS poukazuje na možnost využití produktu Trulifi 6002 na vzdálenost až 6 m při snížené rychlosti přenosu dat.

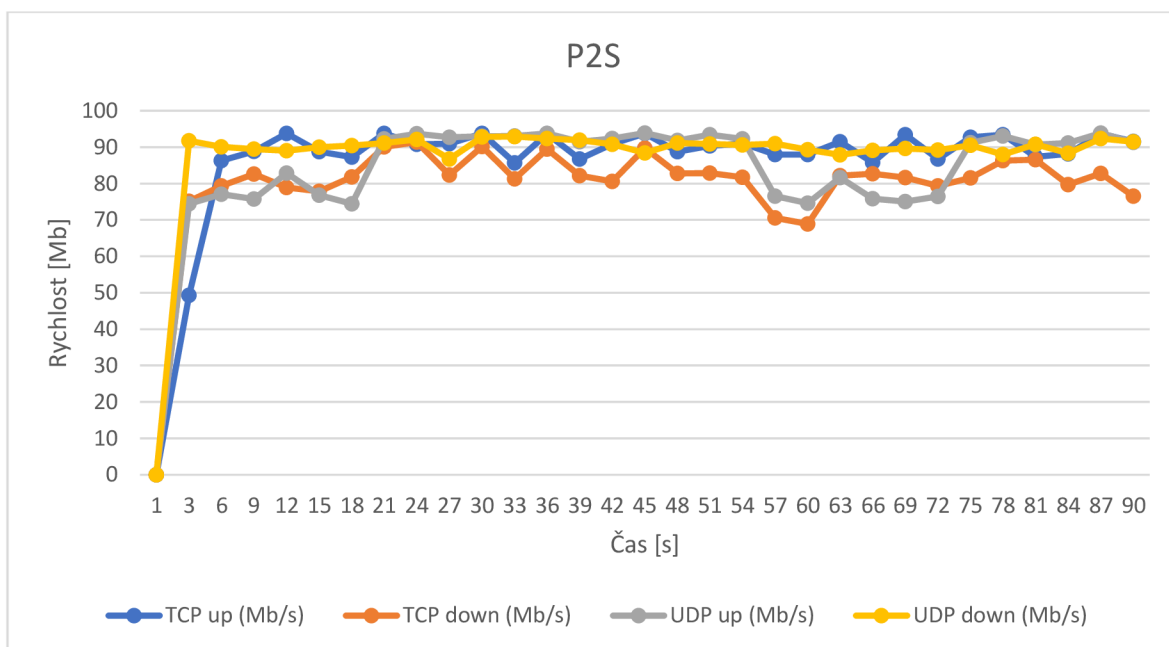
6.1.2 Zařízení Trulifi 6013

Tabulka Li-Fi systému Trulifi 6013 s vydefinovanými vzdálenostmi, intenzitou osvětlení a výsledky realizovaného měření.

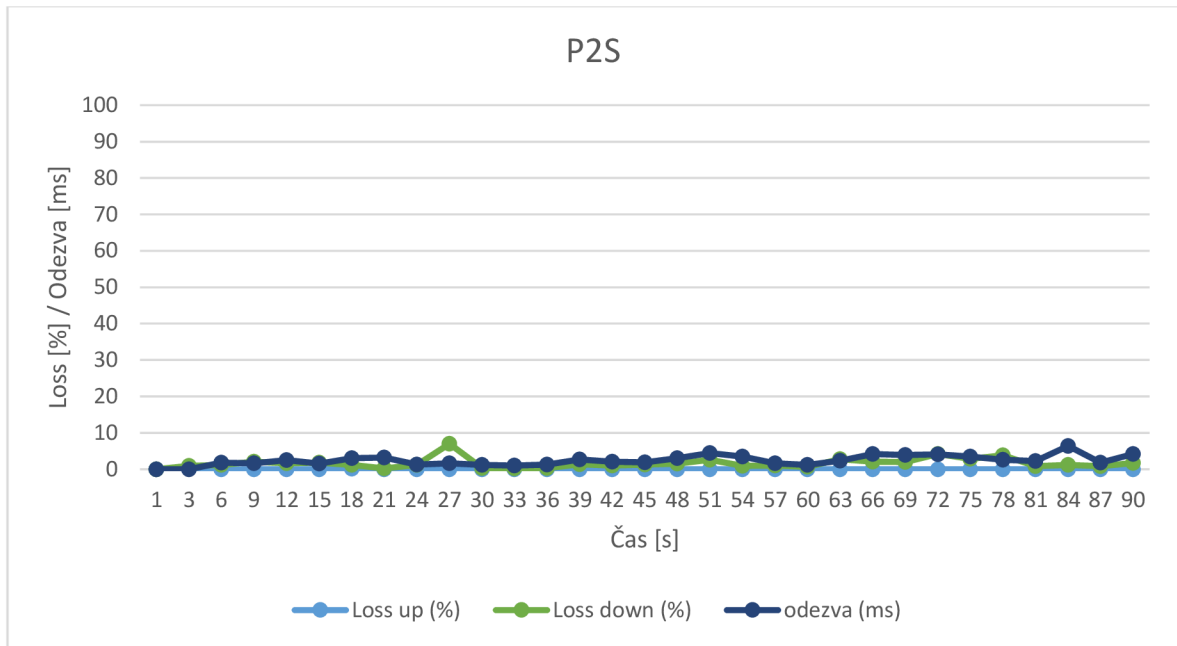
6013	LUX	Vzdálenost					
		2 m	4 m	6 m	8 m	9 m	10 m
světlo	360	P1S**	P2S	P3S**	P4S**	P5S	*
Celkový průběh v reálném čase				PS			

Tab. 7: měření vzdálenosti Trulifi 6013 (Zdroj:[vlastní])

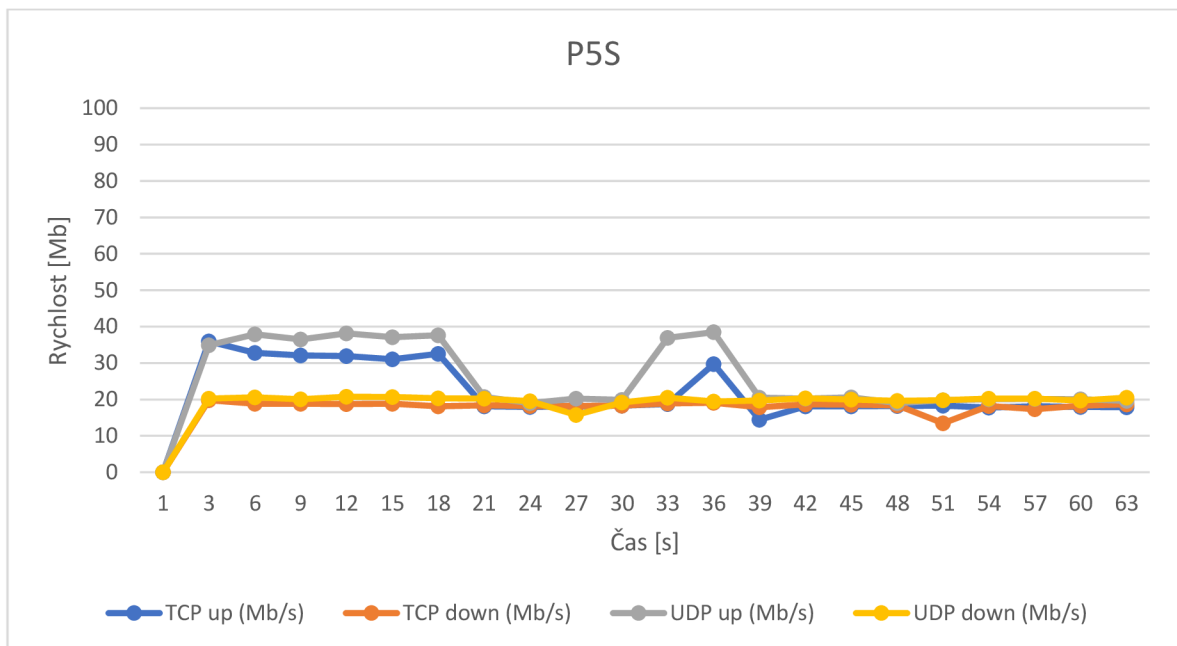
(* ztráta připojení – disconnect; ** viz příloha)



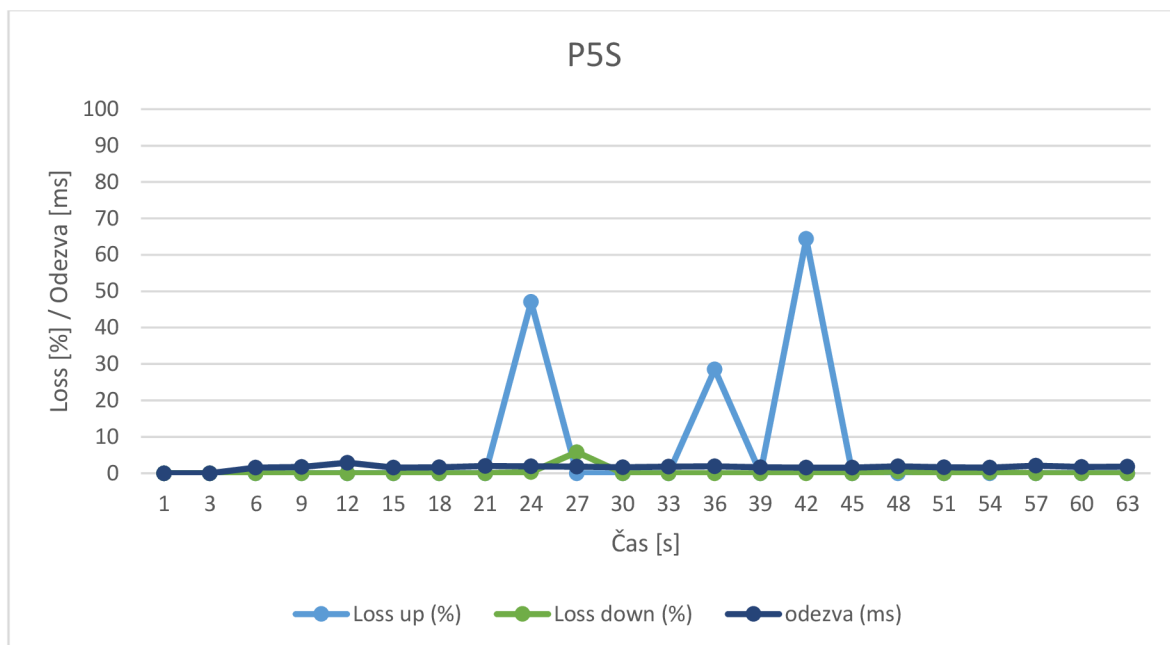
Graf 10: měření P2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])



Graf 11: měření P2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])



Graf 12: měření P5S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])

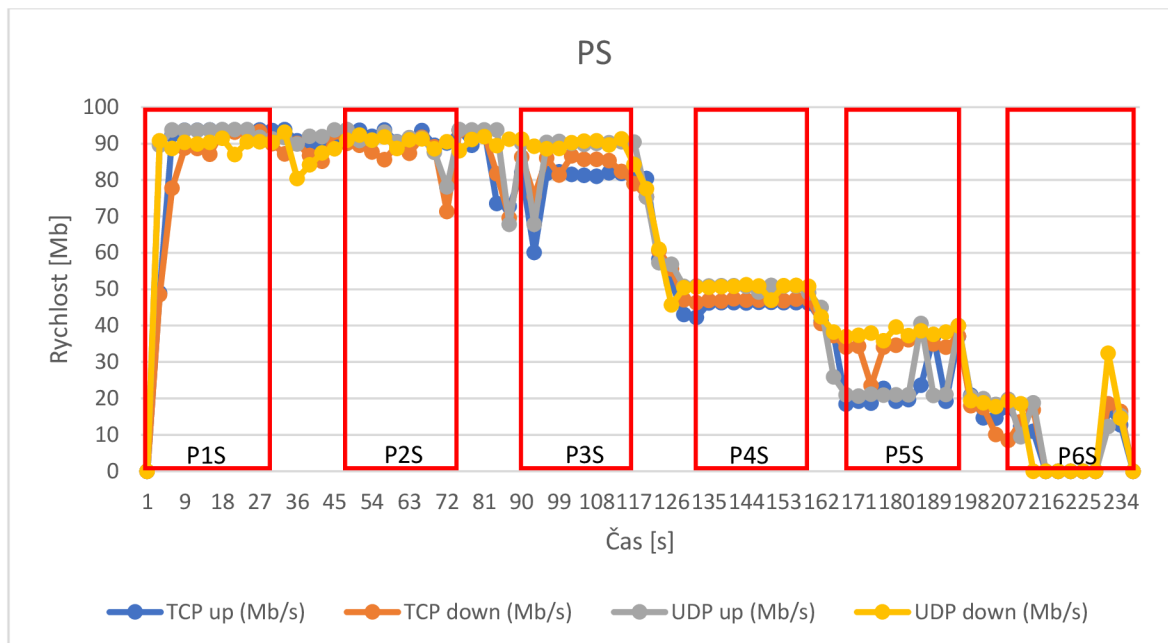


Graf 13: měření P5S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])

Z naměřených hodnot v grafu 10 pro zařízení Trulifi 6013 vyplývá, že při využití tohoto systému pro přenos na vzdálenost 4 m se rychlost všech protokolů pohybuje mezi 70 – 93 Mb/s. Při srovnání výsledků měření P2S a I2S můžeme vidět značné rozdíly ve stabilitě rychlosti. Zatímco rychlost u zařízení 6013 byla takřka dokonale konstantní, rychlost u zařízení 6013 je značně nepravidelná. Jak je vidět z grafu 11, ztráty pro uplink a downlink jsou prakticky zanedbatelné. Odezva se pohybuje kolem 2,5 ms, což je stále akceptovatelné pro datový provoz. Měření ve vzdálenosti 9 m, což je pouhý metr přes maximální vzdálenost udávanou výrobcem vypadá mnohem hůře. Jak je vidět v grafu 12, rychlost ze standardních hodnot klesla pro protokoly TCP down a UDP down na konstantní hodnotu 20 Mb/s a pro protokoly TCP up a UDP up na hodnotu kmitající mezi 20 – 35 Mb/s. Z příruženého grafu 13 vyplývá, že kromě tří viditelných špiček pro Loss up dosahující ztráty až 60 % jsou ostatní parametry takřka totožné s parametry v měření P2S. V průběhu měření nedošlo ke ztrátě paketů, které by způsobilo odpojení od sítě. Na obr. 26 je vidět realizace průběhů měření na zařízení Trulifi 6013. V následujícím grafu 14 můžeme pozorovat celkový průběh chronologicky dle vybraných velikostí.



Obr. 26: Ukázka měření na chodbě (Zdroj:[vlastní])



Graf 14: měření PS (Zdroj:[vlastní])

Graf 14 představuje rychlost přenosu dat všech vybraných hodnot vzdálenosti, z tab. 7. při aktivním pohybu přijímače na základě daného počtu změřených pulzů. Toto okno bylo stanoveno stejně jako v případě měření v grafu 7 na dobu 10ti pulzů. Tedy, měření 10ti hodnot probíhalo ve vzdálenosti P1S. Poté byl přijímač v okně několika pulzů (2 až 4) aktivně přesunut na vzdálenost P2S, kde probíhalo další měření. Tento postup byl opakován po hodnoty v měření P6S, kde na hranici 10 m došlo k přerušení spojení se sítí. Z hodnot z grafu vyplývá, že rychlost do vzdálenosti 4 m se pohybovala, až na pár viditelných rychlostních útlumů, kolem rychlosti 90 Mb/s. V rámci přesunu ze vzdálenosti 4 m na 6 m je vidět kolísání rychlosti, které se pro UDP up/down ustálilo na hodnotě 90Mb/s a pro hodnoty TCP up/down na hodnotách kolem 80 – 85 Mb/s. Před dalším měřicí blokem P4S ve vzdálenosti 8 m následoval prudký pád na skoro konstantní rychlost kolem 50 Mb/s. Tato vzdálenost je udávaná výrobcem jako maximální vzdálenost přenosu. Při přesunu na vzdálenost 10 m, jak udává měření P6S došlo ke kritické ztrátě stability, při které optický spoj ztratil síťové připojení. Z měření IS je vidět, že rychlost přenosu závisí na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem s velkým viditelným skokem při posunu z P3S do P4S. Maximální vzdálenost udávaná výrobcem v zásadě odpovídá naměřeným hodnotám, které jsou použitelné pro datový přenos v praxi.

6.2 Měření skrz materiály

V této a následující podkapitole 6.3 se práce zaměřuje na ověření omezujících způsobů komunikace pomocí bezdrátového optického přenosu. Jedná se o komunikaci při nepřímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Tato první část se zaměřuje na nepřímou komunikaci skrz vybrané druhy materiálů. Pro realizaci tohoto měření bylo potřeba stanovit takové druhy materiálů, kterými dotáže optické světlo alespoň částečně projít. Díky tomu, je možné změřit stav datového přenosu po prostupu paprsku pevným materiálem. Intenzita prosvitu je v rámci jednotlivých materiálů rozdílná, a proto bylo potřeba měřit ve dvou odlišných vzdálenostech.

Realizace tohoto měření proběhla v laboratoři LVA M219/2, která má optimální prostory pro tento typ vyhodnocení. Před samotným měřením bylo třeba stanovit materiály, kterými bude datový přenos procházet. Vybranými materiály jsou skla, plexiskla a barevná plexiskla. Překážky z barevného plexiskla jsou vyrobeny ve formě poloprůhledných desek o různých hodnotách prosvitu. Záměrem tohoto měření je zjistit, jaké materiály mají či nemají vliv na rychlost datového přenosu, který prochází skrz ně. V následující tab.8 je zobrazen seznam vybraných materiálů s krátkým popisem pro realizaci měření.

Typ materiálů	Popis
Sklo (Sklo 4)	Standartní křemíkové sklo, tloušťka 4 mm
Sklo (Sklo 6)	Standartní křemíkové sklo, tloušťka 6 mm
Plexisklo (Plexi)	GUTTA polystyrol hladké, čiré, tloušťka 2 mm
Plexisklo (Plexi 4 mm)	GUTTA polystyrol hladké, čiré, tloušťka 4 mm
Plexisklo (Plexi 78 %)	ZENIT plexiglasXT, lesklé, bílý, propustnost světla: 78 %, tloušťka 4 mm
Plexisklo (Plexi 45 %)	ZENIT plexiglasXT, lesklé, bílý, propustnost světla: 45 %, tloušťka 4 mm
Plexisklo (Plexi černý)	GUTTA polystyrol, lesklé, šedé, tloušťka 4 mm

Tab. 8: Seznam vybraných materiálů (Zdroj:[vlastní])

Pro praktická měření byly vybrány materiály v podobě standartního křemíkového skla o tloušťce 4 a 6 mm a čirého plexiskla v tloušťkách 2 a 4 mm. Tyto materiály mají oproti barevným materiálům propustnost světla 100 %. Barevnými materiály jsou v rámci testování tři plexiskla s různými propustnostmi světla uvedenými v tabulce výše.

6.2.1 Zařízení Trulifi 6002

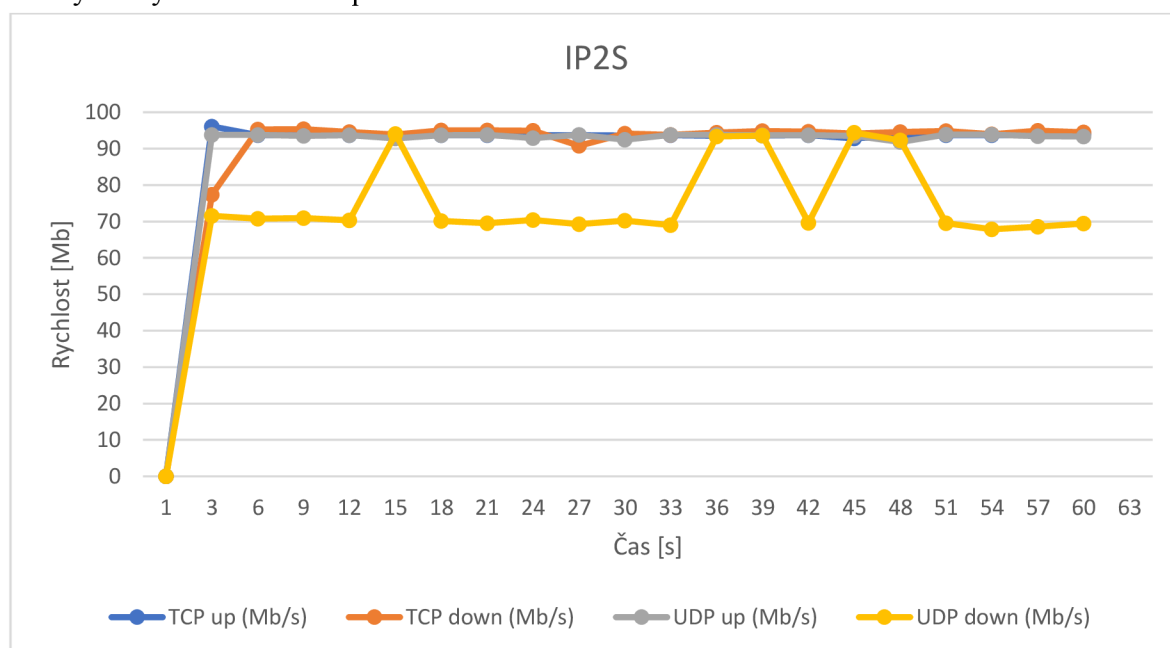
Měření prostřednictvím zařízení Trulifi 6002 proběhlo na vzdálenost 1 a 2,3 m, jak je vidět v tab. 9. Vzdálenost 2,3 m byla vybrána jako ½ vzdálenosti udávané výrobcem tohoto zařízení. Měření probíhalo za přímého světla v podobě stropních laboratorních zářivek. Vyhodnocení je zobrazeno v grafech prostřednictvím měření uvedených v tab. 9.

6002	LUX	Vzdálenost (m)	Přímé	Sklo 4 a 6 mm	Plexi 2 a 4 mm	Plexi 78 %	Plexi 45 %	Plexi černý
světlo	505	1	IP1S**	***	***	***	IEP2S**	***
		2,3	IP2S	***	***	IEP1S* *	IEPP2S	***
Celkový průběh (1 m):			IE1S2**	Celkový průběh (2,3 m):			IE2S	

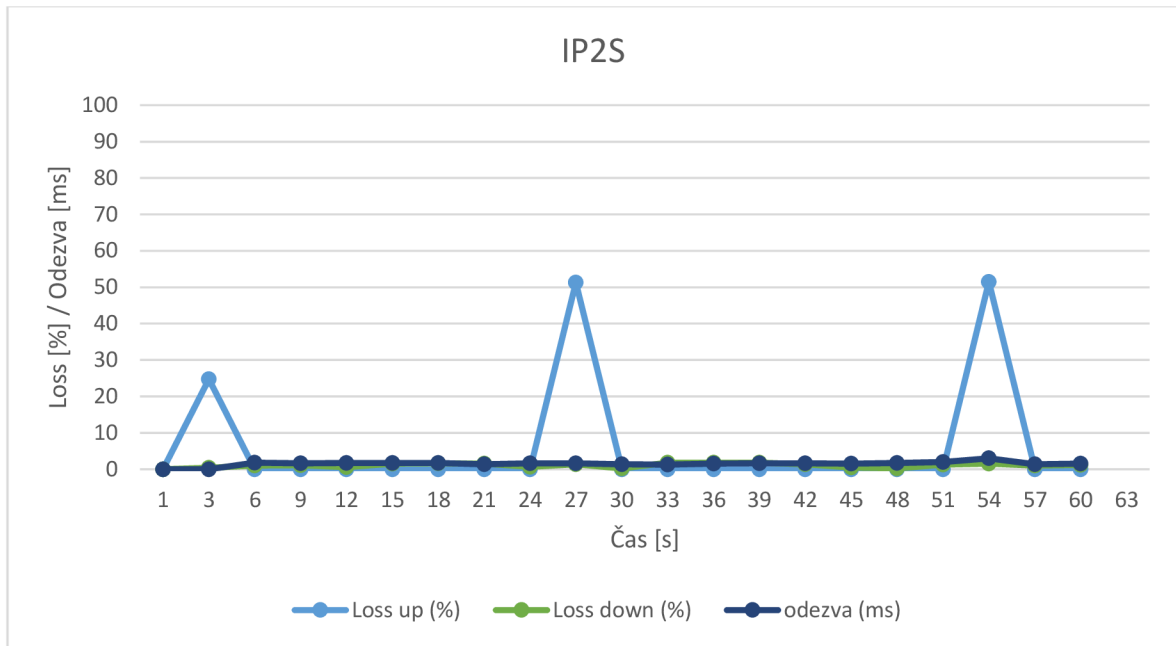
Tab. 9: měření prostupem Trulifi 6002 (Zdroj:[vlastní])

(** viz příloha; *** bez rozdílu oproti přímému měření)

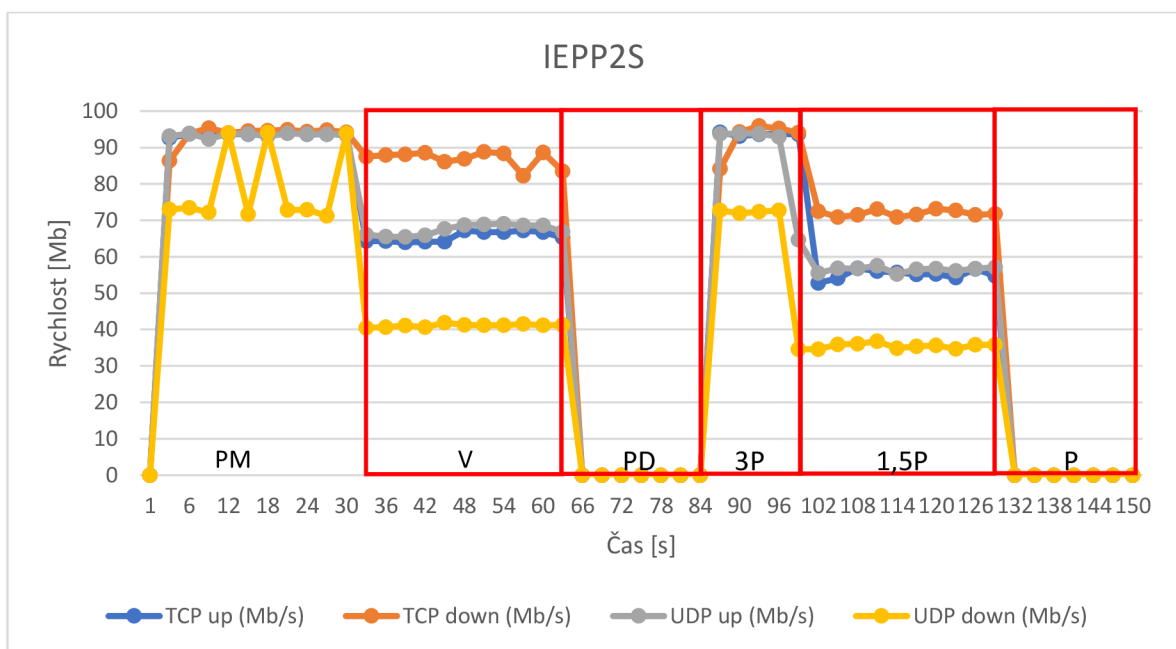
Při měření prostupnosti pro scénáře IEP2S, IEP1S, IEPP2S bylo zjištěno, že rychlost datového přenosu je závislá na vzdálenosti příslušného materiálu od přijímače sestavy. Proto byla příslušná měření realizována formou aktivního pohybu materiálu v ose datového přenosu po předem definovaných časových blocích pro jednotlivé úseky. Bloky měření jsou ve tvaru: přímé měření (PM) – těsné zastínění u vysílače (V) – zastínění v 1/2 vzdálenosti (PD) – zastínění 3 cm od přijímače (3P) – zastínění 1,5 cm od přijímače (1,5P) - těsné zastínění u přijímače (P). Časový blok byl nastaven na hodnotu 30 s s tím, že nedojde k výpadku. V rámci toho byl daný blok časově upraven.



Graf 15: měření IP2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])



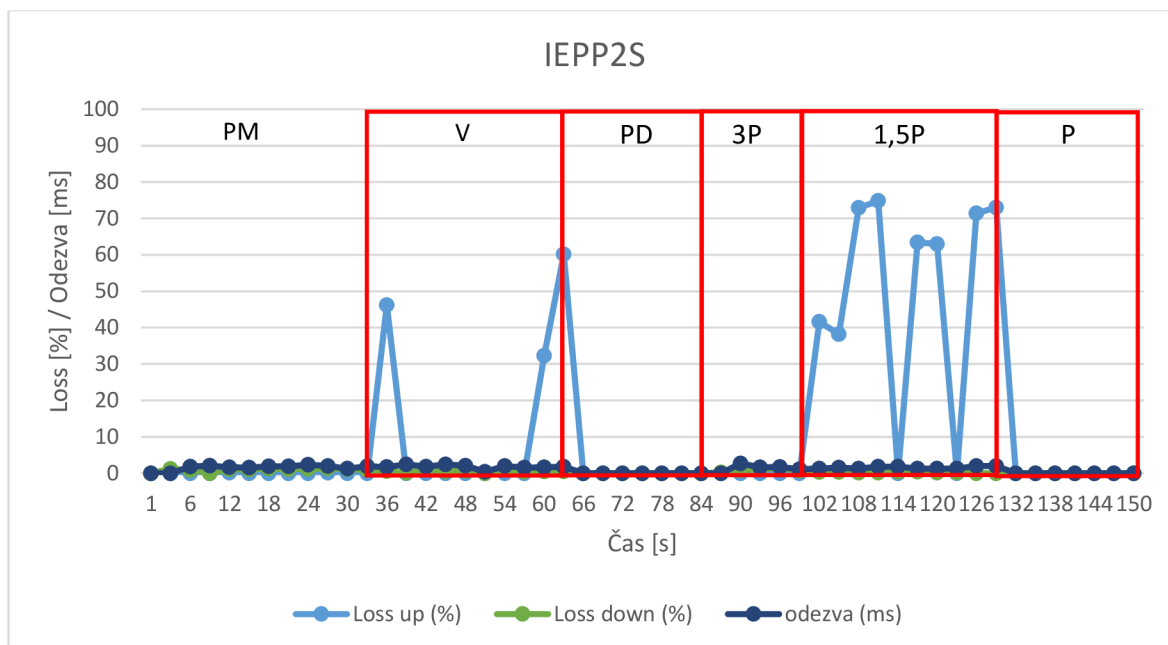
Graf 16: měření IP2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])



Graf 17: měření IEPP2S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])

Bloky:

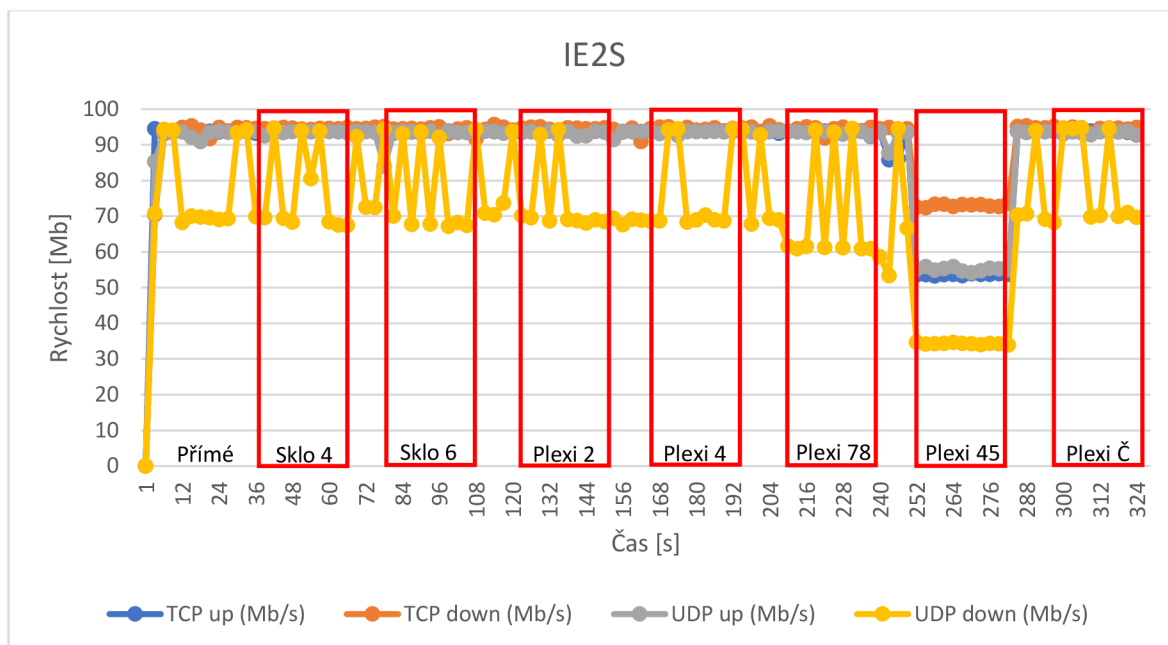
- PM – přímé měření
- V – těsné zastínění u vysílače
- PD – zastínění v 1/2 vzdálenosti
- 3P – zastínění 3 cm od přijímače
- 1,5P – zastínění 1,5 cm od přijímače
- P – těsné zastínění u přijímače



Graf 18: měření IEPP2S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])

Naměřená rychlost v grafu 15 je totožná s vyhodnocením v rámci měření I3S viz. kapitola 6.1, jenž je uvedena v příloze. V přidruženém grafu 16 jsou oproti měření I3S vidět tři špičky pro Loss up, které jsou způsobené ztrátou paketů při prostupu signálu přes materiál. Při pohledu na vyhodnocení v grafu 17, kde bylo měření realizováno formou aktivního pohybu materiálu v ose přenosu jsou vidět předdefinované časové bloky v podobě červených obdélníků. V těchto blocích jsou zobrazeny naměřené rychlosti pro danou pozici testovaného materiálu.

Jak ukazuje graf 17, při posunu plexiskla s propustností světla 45 % z bloku PM do bloku V je vidět ztráta rychlosti u všech měřených protokolů. Při dalším posunu materiálu doprostřed měřené vzdálenosti z bloku V do PD je zřejmá úplná ztráta síťového připojení. Jakmile se stínící materiál posunul na pouhé 3 cm od přijímače, tedy z bloku PD do 3P, signál připojení se obnovil a rychlost se vrátila do stejného tvaru jako při přímém měření. Následné posunutí materiálu na vzdálenost 1,5 cm od přijímače způsobilo další viditelné ztráty rychlosti a při závěrečném posunutí z bloku 1,5P do P došlo k opětovnému odpojení a ztrátě konektivity. Tomuto průběhu odpovídá i graf 18, kde v blocích V a 1,5P, kde bylo vidět snížení rychlosti se ukazují výrazné ztráty paketů pro Loss up. Z uvedeného průběhu je patrné, že záleží na umístění daného materiálu. V následujícím grafu 19 je vizualizován celkový průběh měření dle použitých stínících materiálů.



Graf 19: měření IE2S (Zdroj: [vlastní])

Graf 19 výše, ukazuje naměřené hodnoty rychlosti při využití všech vybraných materiálů z tab. 8. Materiály byly na základě předem definovaného časového okna vkládány do spoje mezi vysílačem a přijímačem. Toto okno bylo stanoveno na dobu 30 s. Tedy, po dobu 30 s probíhalo měření přes materiál skla o tloušťce 4 mm (Sklo 4). Poté byl v okně 10 s vyměněn za materiál za sklo o tloušťce 6 mm (Sklo 6), pro které probíhalo další měření. Tento postup byl opakován do posledního testovaného materiál v podobě černého plexiskla (Plexi Č) po kterém bylo měření ukončeno. Tento princip se opakuje i u měření IE1S2 uvedené v příloze.

Z průběhu měření IE2S je vidět, že změny v rychlosti nastali pouze v okně Plexi 78, kde protokol UDP down rozšířil své působení mezi rychlosti 60 – 93Mb/s, a v okně Plexi 45, kde je vidět prudký pád a následné ustálení na konstantních hodnotách pro jednotlivé protokoly. Okno Plexi 45 se přímo podobá bloku 1,5P v měření IEPP2S. Veškeré měření vybraných materiálů bylo realizováno 1,5 cm od přijímače Li-Fi sestavy. Je zřejmé, že různé druhy plexiskla mohou mít v určitém nastavení vliv na datový tok. Přesto lze považovat materiály skla i plexiskla v určitých podmínkách za zcela propustné datovému toku testovaného zařízení.

6.2.2 Zařízení Trulifi 6013

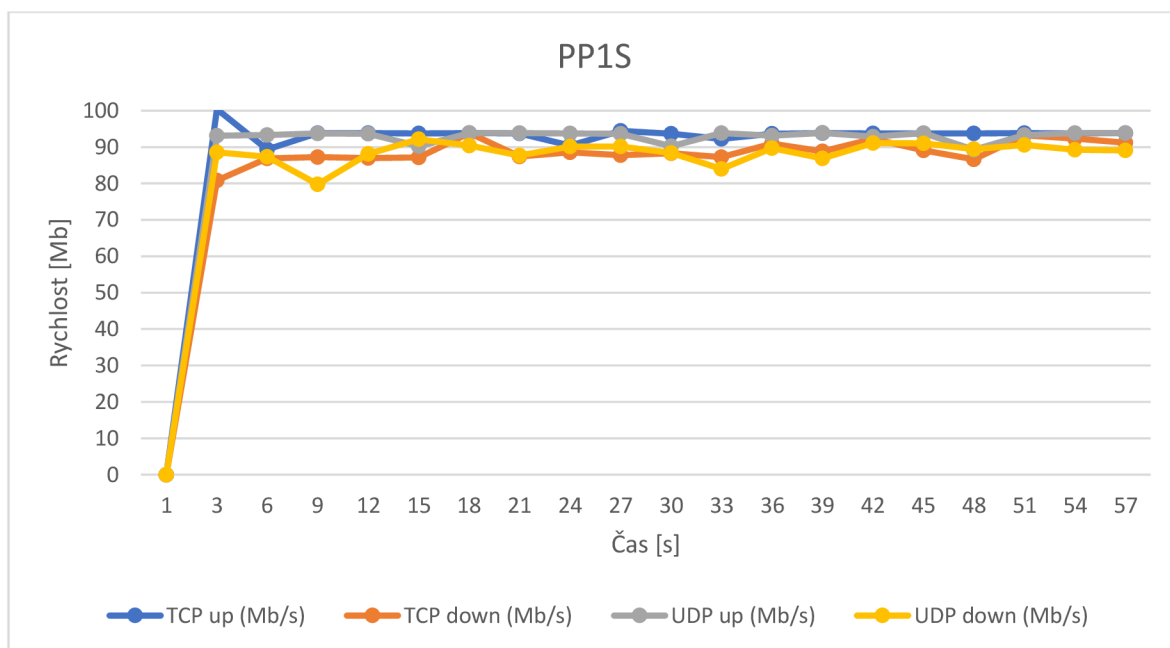
Vyhodnocení prostřednictvím zařízení Trulifi 6013 proběhlo na vzdálenost 1 a 4 m, kdy vzdálenost 4 m byla vybrána jako ½ vzdálenosti udávané výrobcem tohoto zařízení. Měření probíhalo za denního a přímého světla v podobě stropních laboratorních zářivek. Jak je vidět v tab. 10, vybrané značky přesně určují konfiguraci měření a v rámci toho odkazují na naměřené hodnoty v podobě grafů.

6013	LUX	Vzdálenost (m)	přímé	Sklo 4 a 6	Plexi 2 a 4	Plexi 78 %	Plexi 45 %	Plexi černý
světlo	660	1	PP1S	***	***	PEP1S**	*	PEP3S
		4	PP2S**	***	***	*	*	*
Celkový průběh (1 m):			PE1S	Celkový průběh (4 m):			PE2S**	

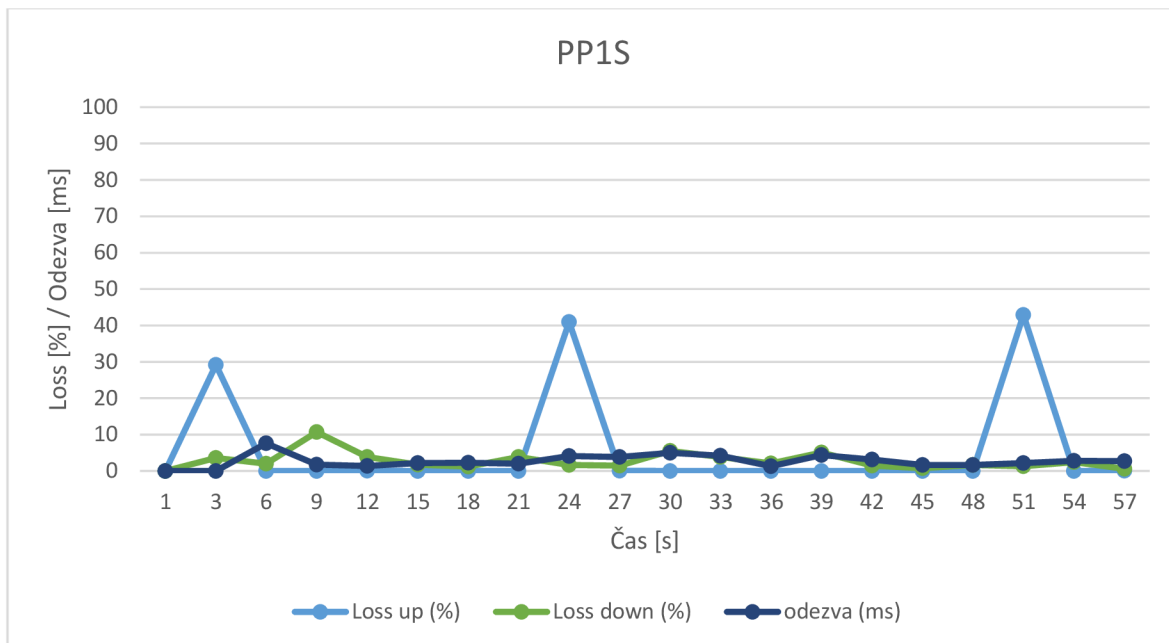
Tab. 10: měření prostupem Trulifi 6013 (Zdroj:[vlastní])

(* ztráta připojení – disconnect; ** viz příloha; *** bez rozdílu oproti přímému měření)

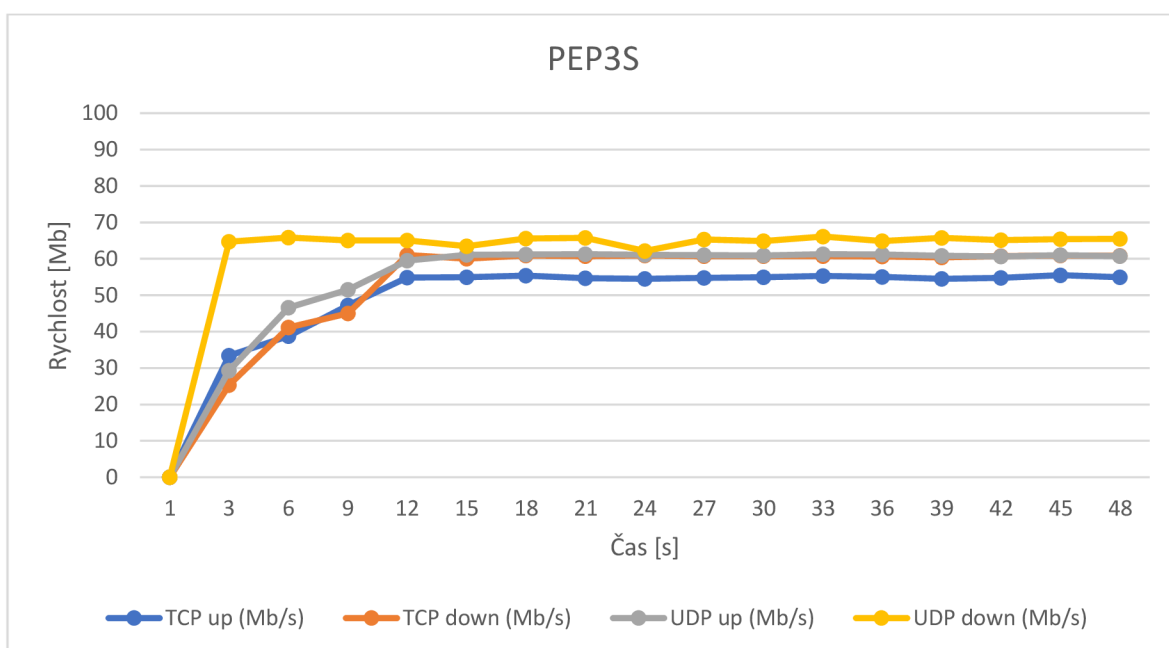
Z tab. 10 vyplývá, že úspěšnost měření skrz materiály na zařízení Trulifi 6013 je oproti měření na produktu Trulifi 6002 o pozvání horší. Zatímco na zařízení 6002 se v určitých scénářích při použití plexiskla v ½ optimální vzdálenosti dosahovalo hodnot srovnatelných s přímým měřením. V obdobné vzdálenosti 4 m se při pokusech na zařízení 6013 spojení nedokázalo ani připojit. To je zřejmě dáno druhem využívaného elektromagnetického spektra. Jak je vidět v tab. 10. při vzdálenosti 1 m se barevné plexisklo (Plexi 78 % a Plexi černý) dokázalo připojit a vyhodnotit příslušné parametry. Ve vzdálenosti 4 m se ani jedno z barevných plexi nedokázalo spojit a navázat konektivitu.



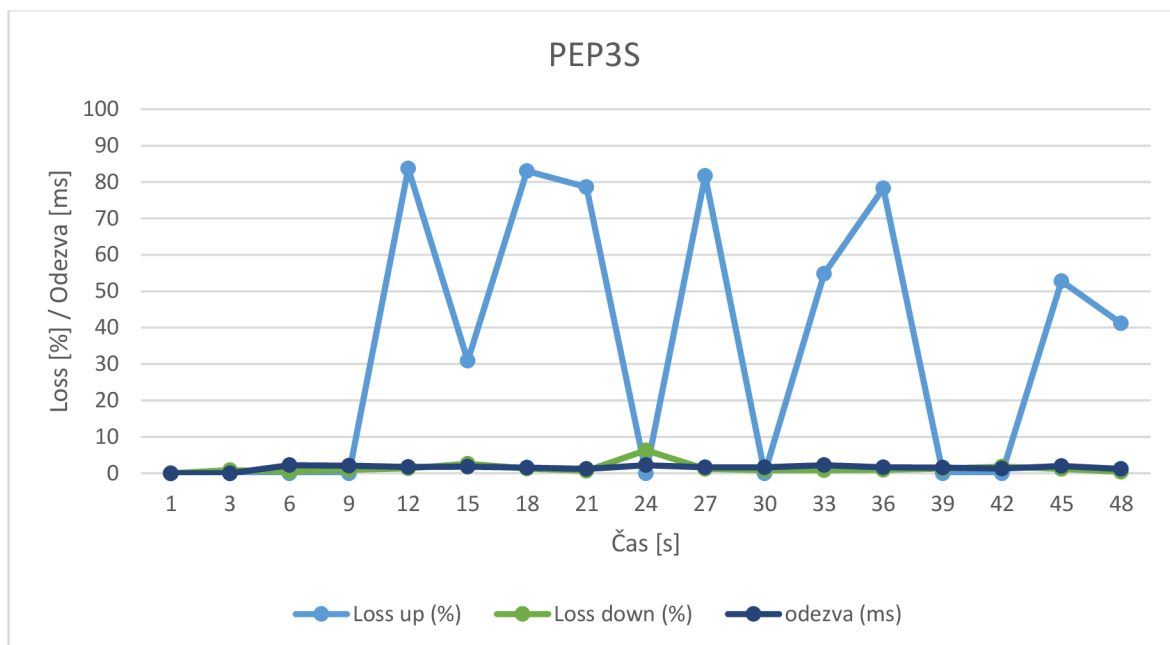
Graf 20: měření PP1S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])



Graf 21: měření PP1S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])



Graf 22: měření PEP3S - 1/2 (Zdroj:[vlastní])

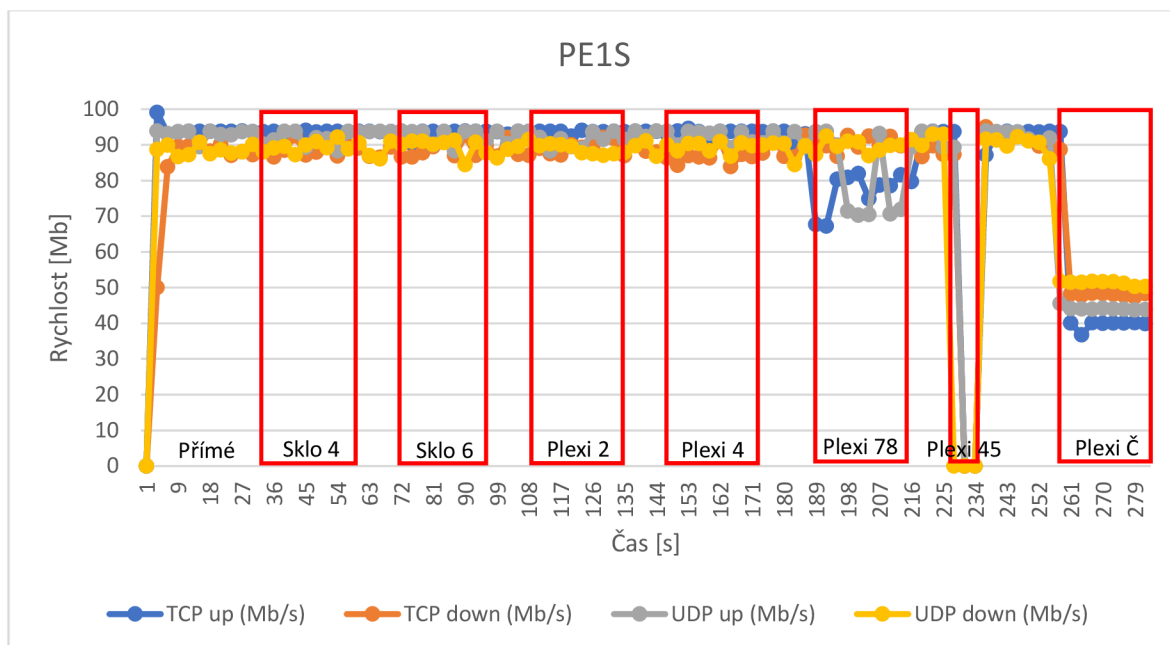


Graf 23: měření PEP3S - 2/2 (Zdroj:[vlastní])

V přímém měření grafu 20 a na vzdálenost 1 m je vidět stabilní připojení, kde se všechny měřené protokoly pohybují kolem hodnoty 90 Mb/s. Tomu odpovídají i občasné špičky v přidruženém grafu 21. Při měření přes materiál černého plexiskla je vidět v grafu 22 ztráta rychlosti a ustálení na konstantní hodnotách mezi 55 – 65 Mb/s. V rámci tohoto měření jsou z grafu 23 zřejmé větší ztráty Loss up. Na obr. 27 je vyobrazen průběh měření přes čiré plexisklo. Následující graf 24 vizualizuje celkový průběh měření dle použitých materiálů.



Obr. 27: Ukázka přenosu skrz materiál (Zdroj:[vlastní])



Graf 24: měření PE1S (Zdroj:[vlastní])

Měření PE1S reprezentované grafem 24 ukazuje naměřené hodnoty rychlosti při využití vybraných materiálů z tab. 8. Stejně jako u měření na zařízení 6002 byly materiály na základě předem definovaného časového okna vkládány do spoje mezi vysílačem a přijímačem. Toto okno bylo nastaveno na dobu 30 s neboli 10 vyhodnocených měření. Jak je vidět v grafu výše, okno při vložení plexiskla s propustností světla 45 % bylo zmenšeno, protože došlo k okamžitému odpojení od sítě. Hodnoty rychlosti naměřené přes čiré sklo i plexisklo jsou naprosto srovnatelné s rychlostí při přímém měření bez prostupu materiálem.

Při vložení materiálu barevného plexiskla (Plexi 78 %) došlo k lehké korekci rychlosti z 93 Mb/s na hodnoty mezi 70 – 90 Mb/s pro různé protokoly. Poslední blok grafu je věnován měření přes černé plexisklo, které s lehkou korekcí rychlosti směrem dolů kopíruje měření PEP3S výše. Stejně jako při měření na zařízení 6002 je jasné, že různé druhy převážně barevného plexiskla mají v určité konfiguraci vliv na datový tok. Přesto lze považovat materiály čírého skla i plexiskla zcela propustné datovému připojení.

6.3 Měření odrazem

Měření odrazem je druhá část zaměřující se na vyhodnocení omezujících způsobů komunikace pomocí bezdrátového optického přenosu. Jedná se o bezdrátový datový přenos pomocí odrazu od různých druhů materiálů. Jelikož je datový tok přenášen odrazem, opět se jedná o komunikace za nepřímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. (nLoS) Rychlost datového přenosu je otestována na matných, lesklých i průsvitných materiálech, které odráží příchozí paprsek v úhlu, ve kterém k nim paprsek dorazil. Testovaný úhel pro všechny odrazové materiály je 90°. Čili zařízení vysílá světelný signál na materiál v úhlu 90°, ten se odrazí a putuje do druhé části zařízení. Tímto způsobem pracují oba datové směry.

Realizace tohoto měření proběhla opět v laboratoři LVA M219/2. Bylo potřeba zajistit pevný držák, který by dokázal držet vybrané materiály ve svislé poloze, jenž je potřeba pro scénáře tohoto měření. Dále bylo potřeba zajistit předem vybrané materiály, které otestují základní možnosti při přenosu dat odrazem od materiálu. Pro potřeby měření byly vybrány materiály zrcadlo, lesklá deska, matná deska, sklo a plexisklo. Sklo a plexisklo již bylo použito v měření v kapitole 6.2. Všechny použité materiály jsou v tab. 11. Účelem tohoto měření je zjistit, zda jde technologii Li-Fi využít při úplné nepřímé viditelnosti prostřednictvím odrazu se stále vysokou přenosovou rychlostí a stabilitou datového signálu.

Typ materiálů	Popis
Zrcadlo (Zrcadlo)	Crystal E22
Lesklá deska (Lesklá deska)	GUTTA Guttacryl eben Glatt Opal, lesklá, bílá
Matná deska (Matná deska)	GUTTA Polyvinylchlorid Hobbycolor, matná, bílá
Plexisklo (Plexi 4 mm)	GUTTA Polystyrol hladké, čiré, tloušťka 4 mm
Sklo (Sklo 4 mm)	Standartní křemíkové sklo, tloušťka 4 mm

Tab. 11: Seznam vybraných materiálů (Zdroj:[vlastní])

Pro primární testování přenosu prostřednictvím odrazu byly vybrány materiály zrcadlo, lesklá deska a matná deska. U těchto materiálů nemůže dojít k prostupu paprsků skrz materiál, jak bylo otestováno v kapitole 6.2. Prostup paprsků u materiálu skla a plexiskla může způsobovat ztráty datového toku v rámci měření v této kapitole.

6.3.1 Zařízení Trulifi 6002

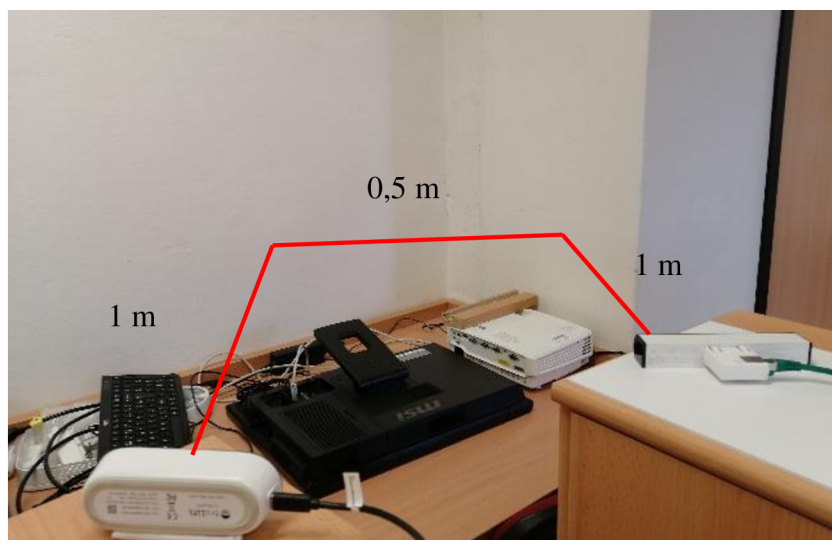
Při měření se zařízením Trulifi 6002 bylo využito všech připravených materiálů z tab. 11. Realizace proběhla za rozsvíceného světla v simulační místnosti na vzdálenost 1,8 m, jak je vidět v tab. 12.

6002	LUX	Vzdálenost (m)	Zrcadlo	Lesklá deska	Matná deska	
světlo	710	1,8	Izr2S	Iles2S**	Imat2S**	
6002	LUX	Vzdálenost (m)	Plexi 4 mm	Sklo 4 mm	Zed (<)	Zed (I)
světlo	710	1,8	IplexS**	IskS	IzdS**	IrohS

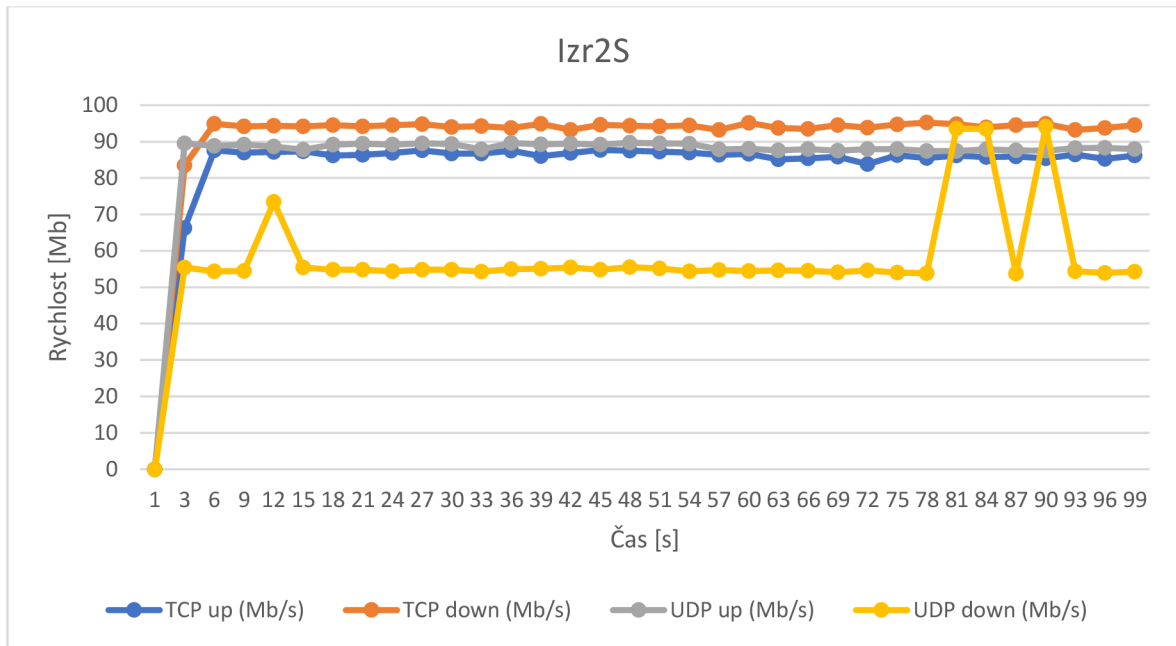
Tab. 12: měření odrazem Trulifi 6002 (Zdroj:[vlastní])

(** viz příloha)

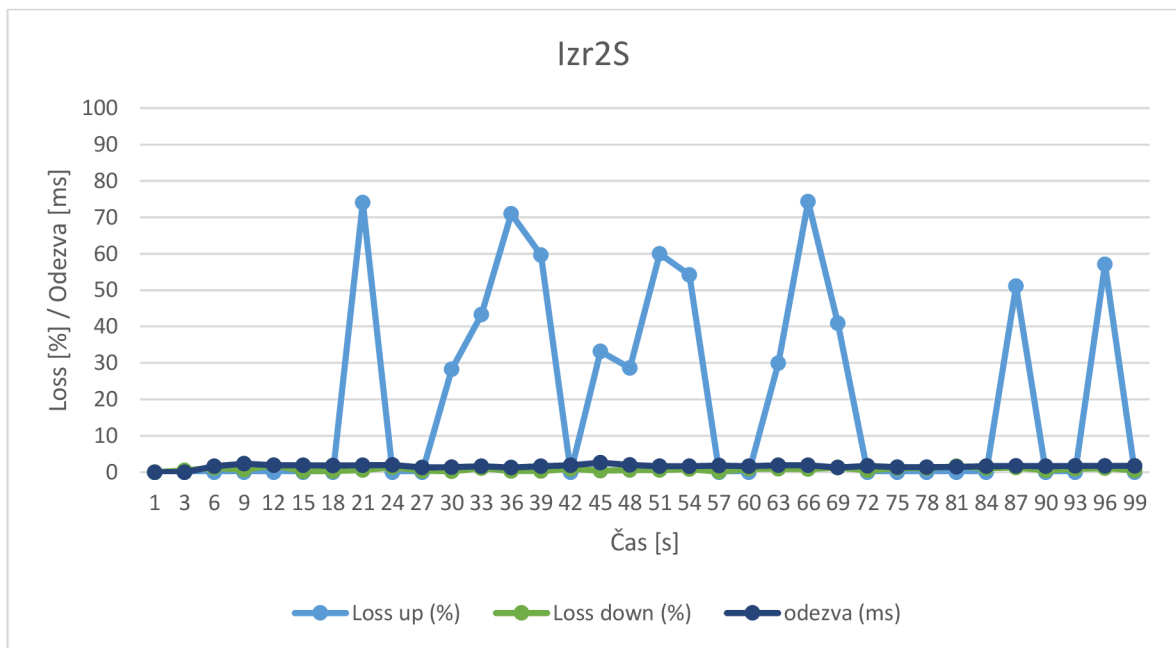
Vzhledem k tomu, že vyhodnocení při testu s matným materiálem dopadlo nad očekávání, byl proveden pokus, při kterém místo vybraného materiálu z tab. 11 byla obyčejná zeď bílé barvy v simulační místnosti. Tento test je označen jako Zed (<). V návaznosti na toto vyhodnocení proběhlo měření dvojitého odrazu přes roh místnosti od zdi pod označením Zde (I). Toto měření je se vzdálenostmi přenosu zobrazeno na obr. 28. Po tomto překvapivě úspěšném testu bylo rozhodnuto o přidání těchto scénářů k vybraným měřením dle tab. 12 pod jejich definovanými zkratkami. Vizualizace příslušných měření je v podobě grafů dále. Při měřeném přenosu odrazem nedošlo k žádné ztrátě konektivity s připojenou sítí.



Obr. 28: Ukázka měření přes roh místnost (Zdroj:[vlastní])



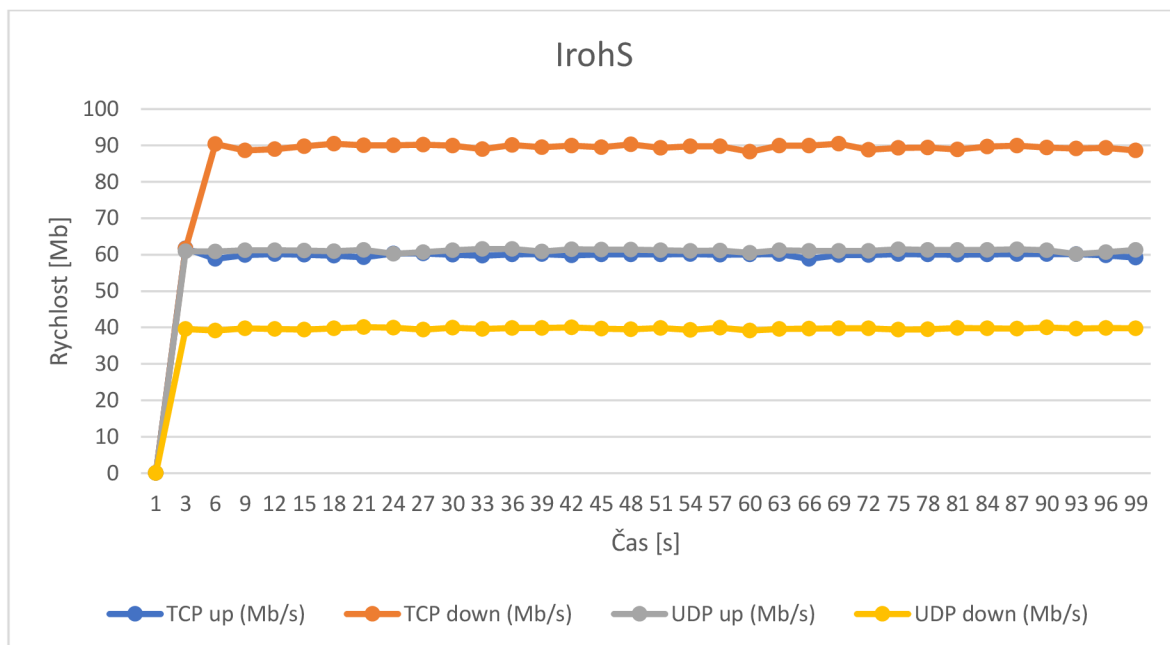
Graf 25: měření Izr2S - 1/2 (Zdroj: [vlastní])



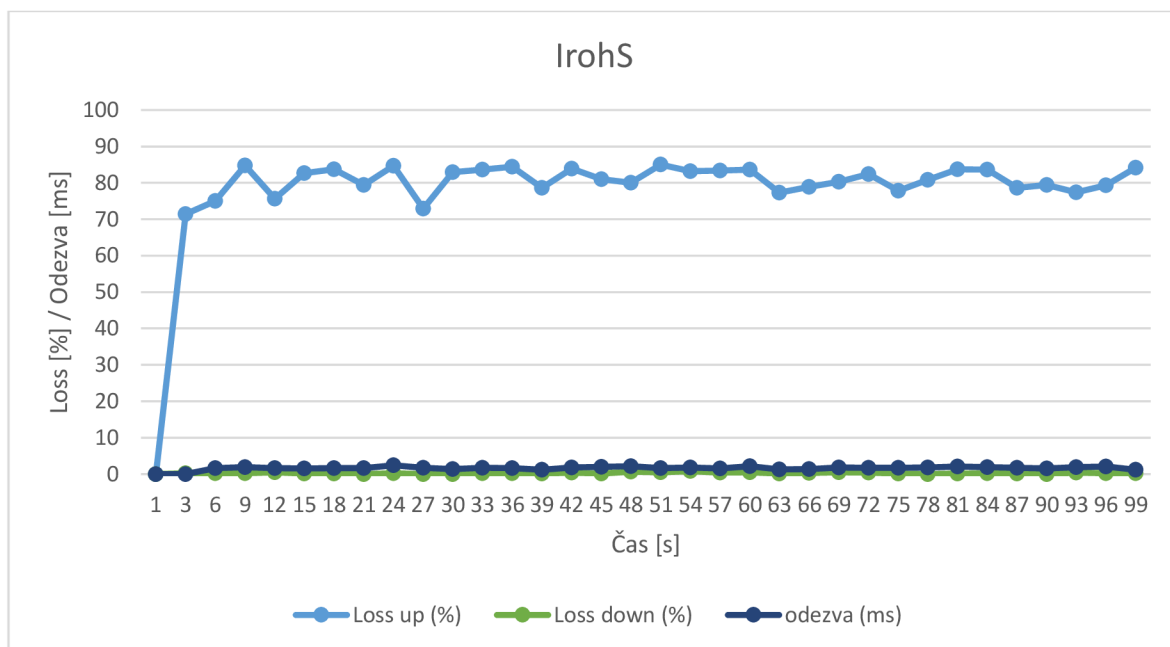
Graf 26: měření Izr2S - 2/2 (Zdroj: [vlastní])

Hodnoty rychlosti vybraných protokolů v grafu 25 jsou při scénáři přenosu odrazem od zrcadla ve vzdálenosti 1,8 m podobné hodnotám naměřeným při přímém měření na vzdálenost 2,8 m ve vyhodnocení I4S, které je součástí přílohy. Protokoly TCP up/down a UDP up se pohybují v konstantní hodnotě kolem 90 Mb/s. Protokol UDP down je ustálen na hodnotě kolem 55 Mb/s s viditelnými špičkami k ostatním měřeným protokolům. V přidruženém grafu 26, který vyhodnocuje velikost ztrát a dobu odezvy jsou vidět pravidelné špičky pro ztrátu (Loss up)

dosahující 70 %. Tyto špičky u srovnaného přenosu I4S neexistují, a proto lze konstatovat, že ačkoliv je rychlost podobná, rozdíl ve ztrátě (Loss up) packetů u přenosu odrazem je viditelný.



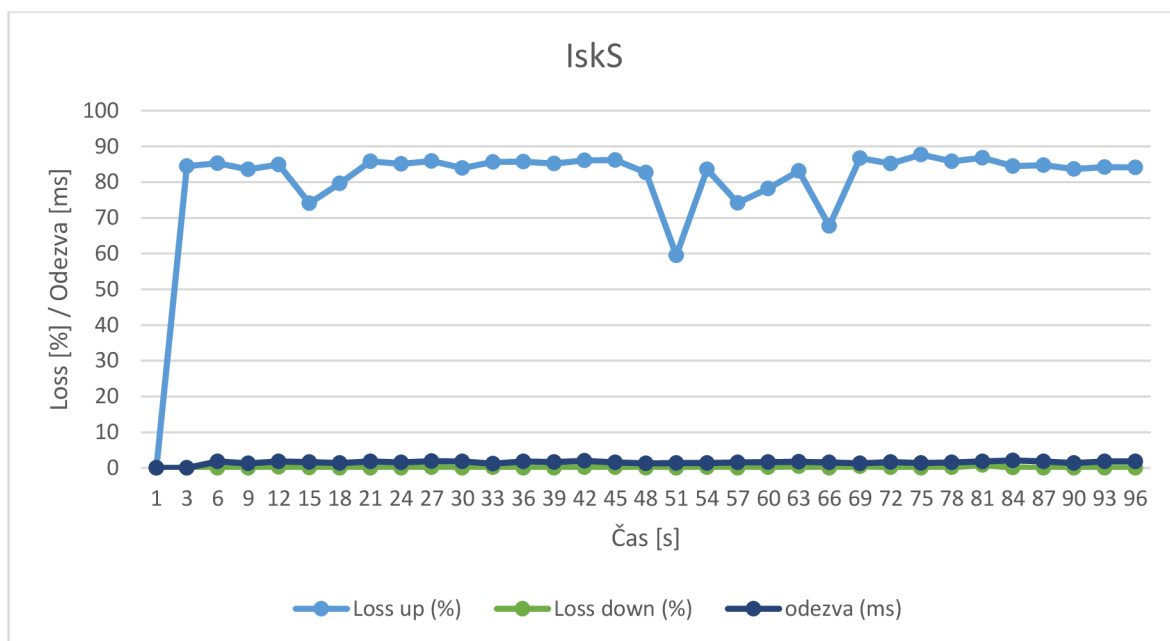
Graf 27: měření IrohS - 1/2 (Zdroj: [vlastní])



Graf 28: měření IrohS - 2/2 (Zdroj: [vlastní])

Měření datového toku odrazem od stěny přes roh místnosti je vyhodnoceno v grafu 27. Naměřené hodnoty rychlosti jsou totožné s hodnotami v přímém měření I5S ve vzdálenosti 4 m realizované na chodbě, jenž je součástí přílohy. Pokud jsou ale porovnány jejich hodnoty ztrát

a odezvy, je zde vidět diametrální rozdíl. Zatímco v žerění I5S se objevují dvě viditelné špičky ztrát Loss up dosahujících hodnot kolem 40 %, v grafu 28 je viditelná konstantní ztráta kolem hodnoty 80 %. To je v rámci stejné rychlosti přenosu rapidní rozdíl. Pokud však lze vůbec realizovat optický datový přenos bez přímé viditelnosti (nLoS) pomocí dvojitěho odrazu od obyčejné zdi. Jedná se o objev, který rozšiřuje nasazení a využití této technologie. Následující graf 29 demonstruje ztráty při přenosu IskS.



Graf 29: měření IskS (Zdroj:[vlastní])

V sadě měření v kapitole 6.2 bylo zjištěno, že přenos dat pomocí optického signálu je realizovatelný skrz vybrané druhy materiálů. Jedním z těchto materiálů bylo sklo, které pro měřené scénáře IE1S2 a IE2S nemělo patrně žádné rozdílné ztráty (Loss up) oproti přímému měření v kapitole 6.1. Pokud jsou tyto naměřené ztráty pohybující se kolem 0 % srovnány s grafem 29, kde ztráty dosahují konstantní velikosti mezi 80 – 90 % je očividné, že optický paprsek může procházet materiálem a zároveň se za snížené rychlosti a výrazně větších ztrát (Loss up) odrážet při stálém zachování síťové konektivity.

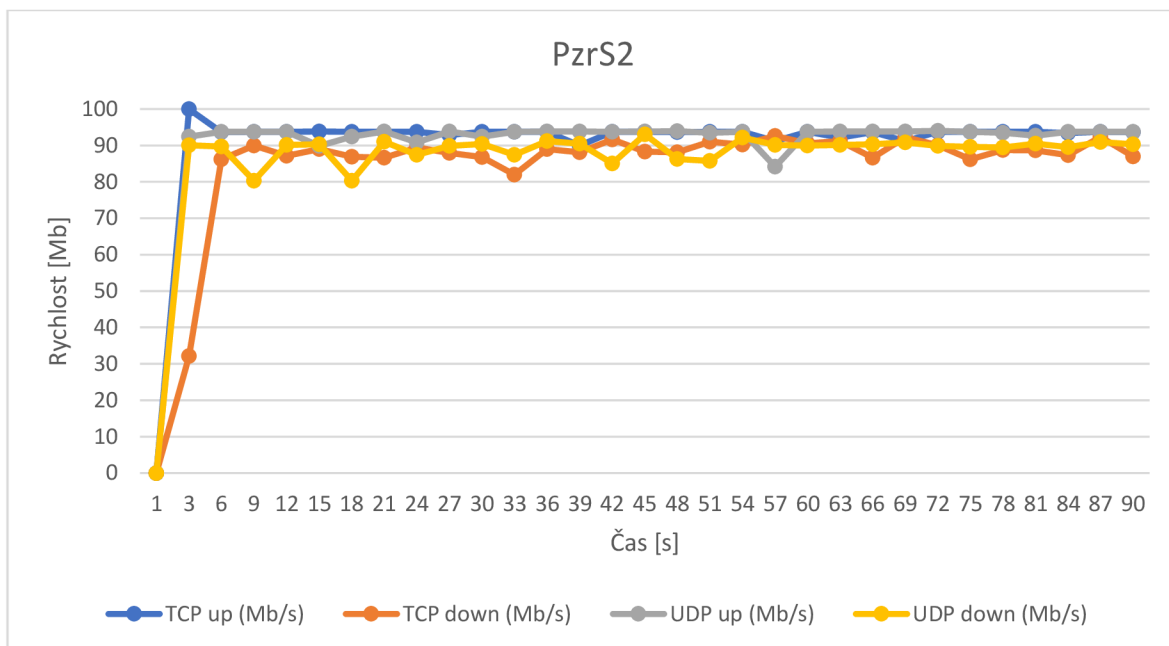
6.3.2 Zařízení Trulifi 6013

Při měření na produktu Trulifi 6013 bylo využito všech vybraných materiálů z tab. 11. Realizace proběhla při rozsvíceném světla o intenzitě 660 LUX na vzdálenost 1,8 m, jak udává tabulka 13.

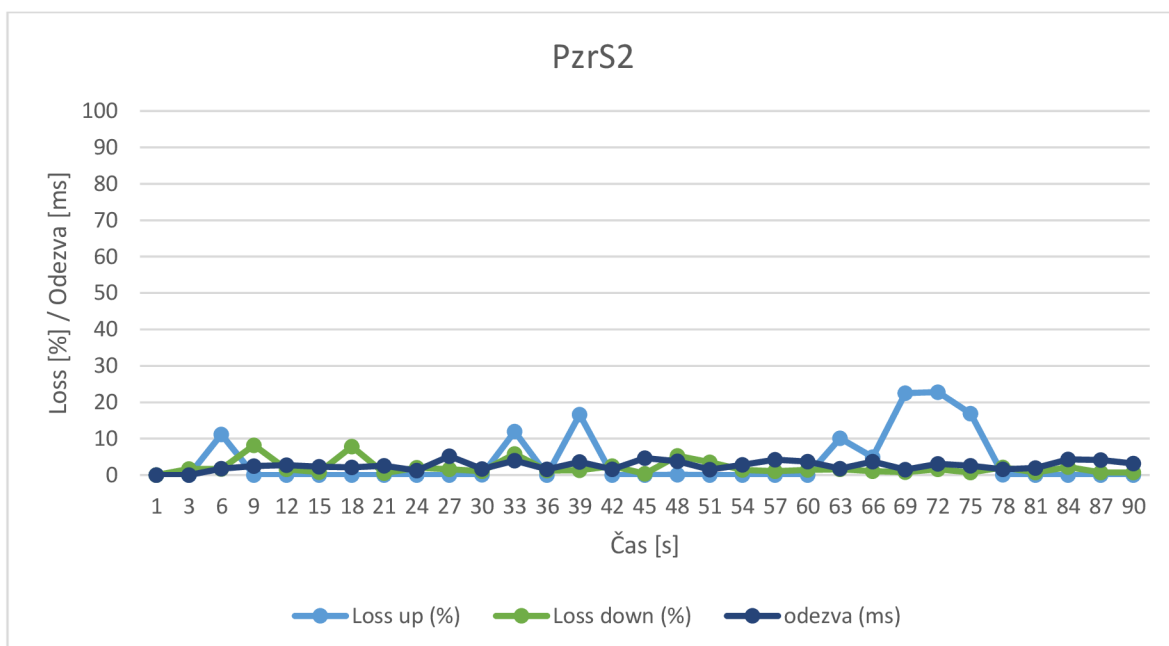
6013	LUX	Vzdálenost (m)	Zrcadlo	Lesklá deska	Matná deska
světlo	660	1	PzrS2	PmS	*
6013	LUX	Vzdálenost (m)	Plexi 4 mm	Sklo 4 mm	
světlo	660	1	PplexS2	PskloS**	

Tab. 13: měření odrazem Trulifi 6013 (Zdroj: [vlastní])

(* ztráta připojení – disconnect; ** viz příloha)

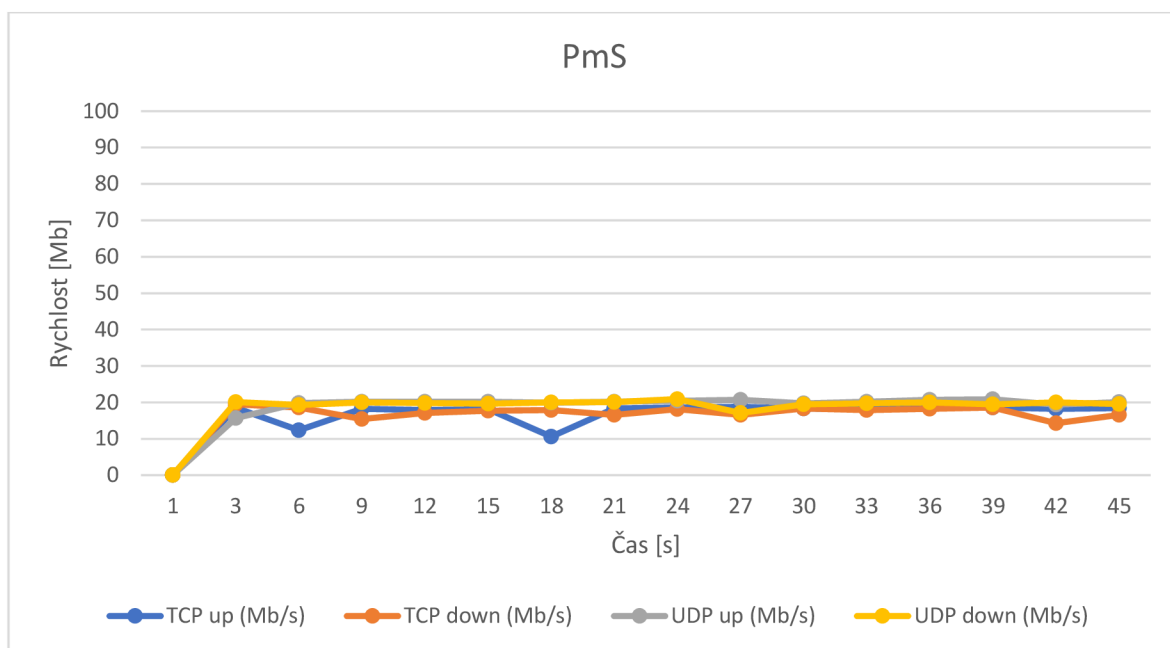


Graf 30: měření PzrS2 - 1/2 (Zdroj: [vlastní])

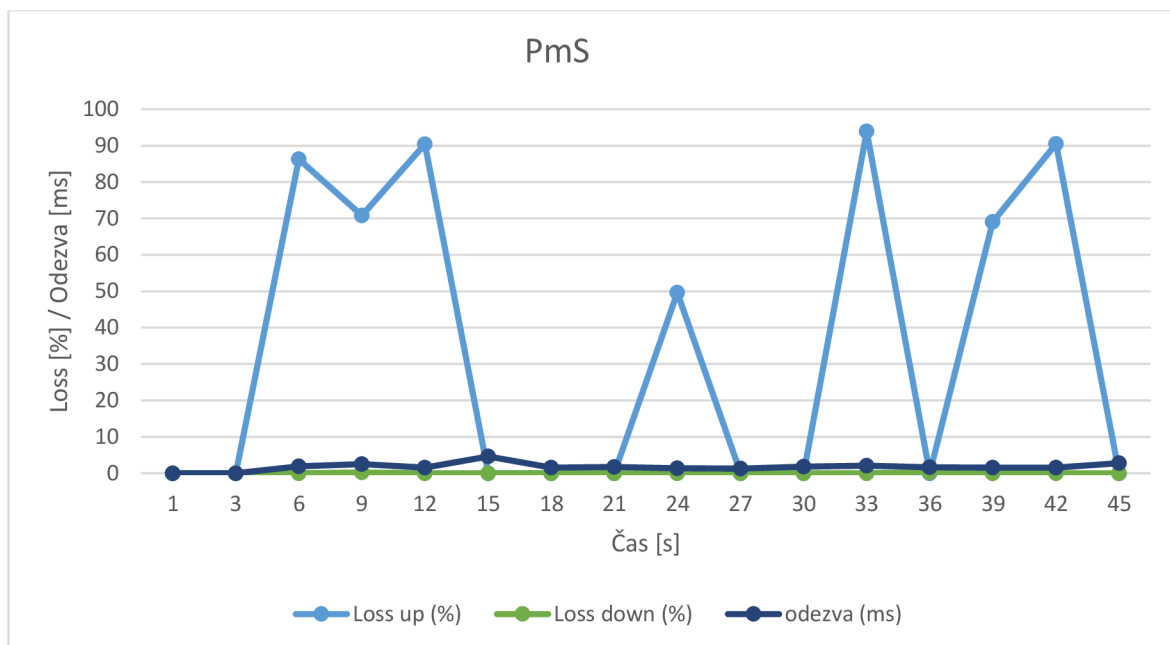


Graf 31: měření PzrS2 - 2/2 (Zdroj: [vlastní])

Jak je vidět z naměřených hodnot v grafu 30, na vzdálenost 1 m se rychlost všech měřených protokolů pohybuje kolem 90 Mb/s. Tyto naměřené hodnoty jsou zcela totožné s naměřenými hodnotami v měření P1S, které proběhlo za přímé viditelnosti na vzdálenost 2 m a je součástí přílohy. Při porovnání naměřených hodnot ztrát však můžeme vidět rozdíly, a to především ve ztrátě (Loss up). Zatímco v grafu 31 můžeme vidět občasné špičky, u měření P1S jsou ztráty rovné konstantní nule. V rámci scénáře tohoto měření bylo otestováno měření odrazem od zrcadla na vzdálenost 1,6 m. To proběhlo za stejné rychlosti jako při měření na vzdálenost 1 m, avšak bylo patrné rapidní zhoršení ztrát (Loss up). Toto měření není součástí této diplomové práce.

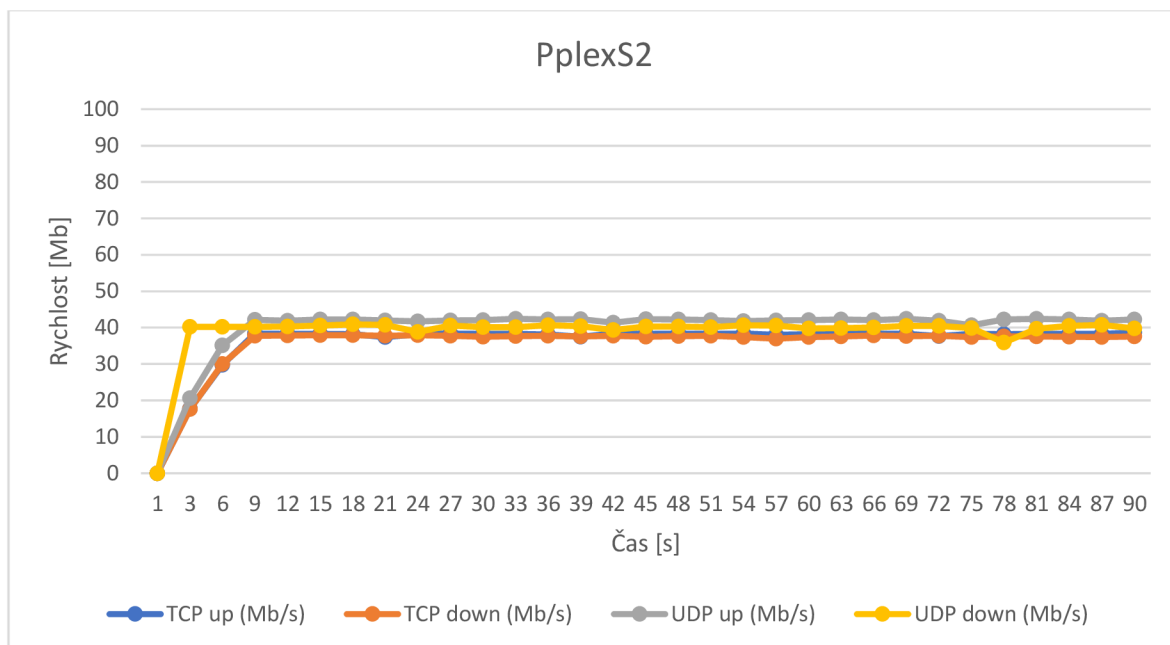


Graf 32: měření PmS - 1/2 (Zdroj:[vlastní])



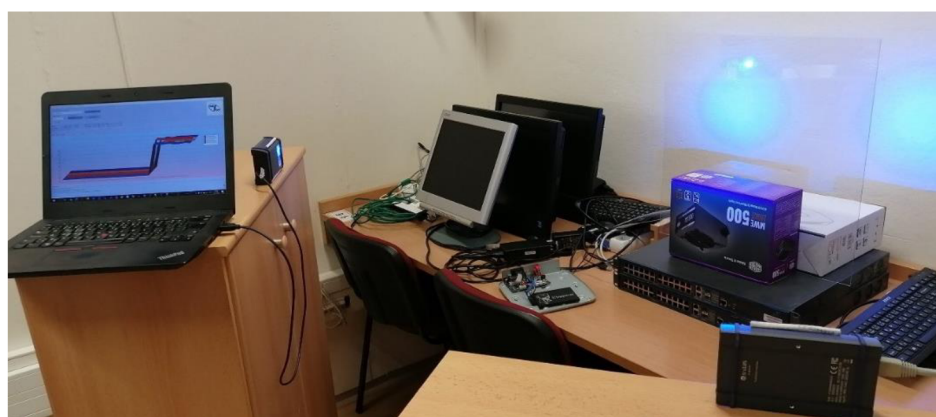
Graf 33: měření PmS - 2/2 (Zdroj:[vlastní])

V měření PzrS2 bylo zjištěno, že odraz pomocí zrcadla je srovnatelný s přímým měřením za jasně nastavených podmínek. Při odrazu přes zrcadlo a lesklou bílou desku, je za stejných světelných podmínek a totožné vzdálenosti, vidět značný rozdíl. Ten je zobrazen v grafu 32, kde rychlost přenosu všech měřených protokolů se pohybuje konstantně blízko 20 Mb/s. V rámci přidruženého grafu 33 je ve srovnání v grafem 31 vidět větší špičková ztrátovost Loss up dosahující až 90 %. I přes tyto omezující faktory testovaný přenos zůstal stabilní a k odpojení ze sítě nedošlo. V následujícím grafu 34 je vyobrazen průběh měření přes plexisklo.



Graf 34: měření PplexS2 (Zdroj: [vlastní])

V rámci vyhodnocení v kapitole 6.2 pro produkt Trulifi 6013 bylo zjištěno, že plexisklo o tloušťce 2 a 4 mm nemá vliv na rychlost datového přenosu při zastínění vysílaného paprsku. Z měření v Grafu 34 vyplývá, že paprsek viditelného světla lze odrazit za konstantní rychlosti kolem 40 Mb/s při vzdálenosti 1 m. Tento stav, jak bylo zmíněno v kapitole 6.3.1, poukazuje na fakt, že je možné, aby i u tohoto produktu dokázal světelný paprsek vysílaný LED žárovkou přenášet datový tok materiálem a zároveň se za snížené rychlosti a větších ztrát (Loss up) dokázal odrazit, při čemž si udržel síťové připojení. Je otázkou, jak by tento spoj reagoval na dva vzájemně se rušící datové spoje, kde by jeden vysílal přes materiál a druhý odrazem od materiálu. Tento pokus z důvodu nedostatku zařízení nebylo možné realizovat a vyhodnotit. Na obr. 29 níže je vidět ukázka z měření PplexS2.



Obr. 29: Ukázka z měření PplexS2 (Zdroj: [vlastní])

6.4 Měření přes rušivé vlivy

Tato kapitola se zaměřuje na potencionální bezpečnostní problémy, kterým přenos optickým bezdrátový signálem může čelit. Je zde probrána problematika možných rušivých vlivů, které mohou ovlivňovat jak bezpečnost datové sítě, tak materiální případně nemovitostní zabezpečení. Tyto rušivé vlivy jsou otestovány prostřednictvím útlumu signálu nasimulovaným kouřem, zarušení přijímače jiným světlem či odstínění paprsku polopropustným zrcadlem. Většina zmíněných scénářů je realizována za přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Obecně je známo, že viditelné světlo má v případě vysoké prašnosti, kouře či mlhy značné problémy způsobené útlumem paprsku velkým množstvím prachových částic, které paprsek pohltní či odstíní. Tento problém se týká právě produktu Trulifi 6013 při využití v oblast jeho nasazení, jak uvádí výrobce tohoto systému.

Měření výše zmíněných scénářů proběhlo v laboratoři LVA M219/2 za konstantních světelných podmínek. Pro vyhodnocení velikosti útlumu realizovaného prostřednictvím kouře bylo potřeba zajistit přístroj na jeho výrobu. Pro další scénáře bylo nutné zajistit světelné zdroje, která pracují ve stejné vlnové délce jako testovaná zařízení. Dále bylo potřeba zajistit polopropustné zrcadlo fungující jako zrcadlo z jedné strany a sklo ze strany druhé. Toho bylo docíleno využitím polopropustné folie, která funguje na úplně stejném principu. Všechny použité materiály a přístroje jsou vidět v tab. 14. Účelem této realizace měření je zjistit, zda jde technologie Li-Fi utlumit kouřem v případě požáru, úmyslně zarušit nebo odstínit a odposlouchávat za stabilního spojení. Všechny použité zařízení jsou součástí tab. 14.

Typ zařízení/materiálu	Popis
Kouřovač (Kouř)	Eurolite N-19 smoke-machine, 700 W
Infračervený teploměr (Infra)	UX-A-01, non-contact, response time <2 s
LED (LED)	LED pásek SMD 3528 – 9,6 W, modrý, 470 nm
Polopropustná folie (Folie)	Zrcadlová samolepící folie, stříbrná, pokovaná – ztmavená

Tab. 14: Seznam vybraných přístrojů (Zdroj: [vlastní])

Pro testování odolnosti optických bezdrátových spojů proti rušení kouřem je využit přístroj pro výrobu kouře N-19 smoke-machine. Pro test úmyslného zarušení optického paprsku byly vybrány světelné zdroje v podobě infračerveného teploměru pracujícího v oblasti blízkého infračerveného spektra a LED pásky modré barvy fungující ve vlnové délce 470 nm. Tato vlnová délka přesně odpovídá vlnové délce, na kterém funguje zařízení Trulifi 6013. Pokus odstínění a odposlechnutí je realizovaný pomocí zrcadlové folie.

6.4.1 Zařízení Trulifi 6002

Při vyhodnocení scénářů pro zařízení Trulifi 6002 bylo využito všech přístrojů z tab. 14 výše. Realizace proběhla při rozsvíceném světla o intenzitě 526 LUX na vzdálenost 2,3 m a 1 m, jak udává tabulka 15.

6002	LUX	Vzdálenost (m)	Přímé	Kouř	Infra	LED	Folie (odraz)
světlo	526	2,3	IPS1**	IkourS1**	IinftepS1	IledS**	IpoloS1**
6002	LUX	Vzdálenost (m)	Folie (prostup)		Folie (prostup i odraz)		
světlo	526	1	IpoloS3**		Ipz		

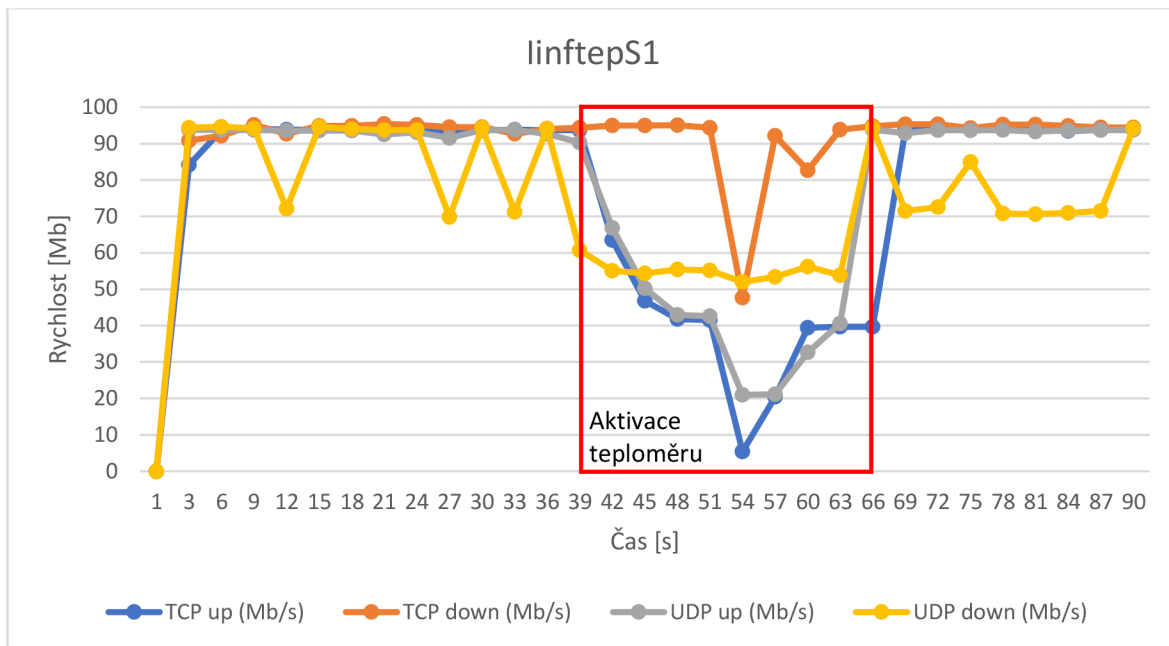
Tab. 15: měření přes rušivé vlivy Trulifi 6002 (Zdroj: [vlastní])

(** viz příloha)

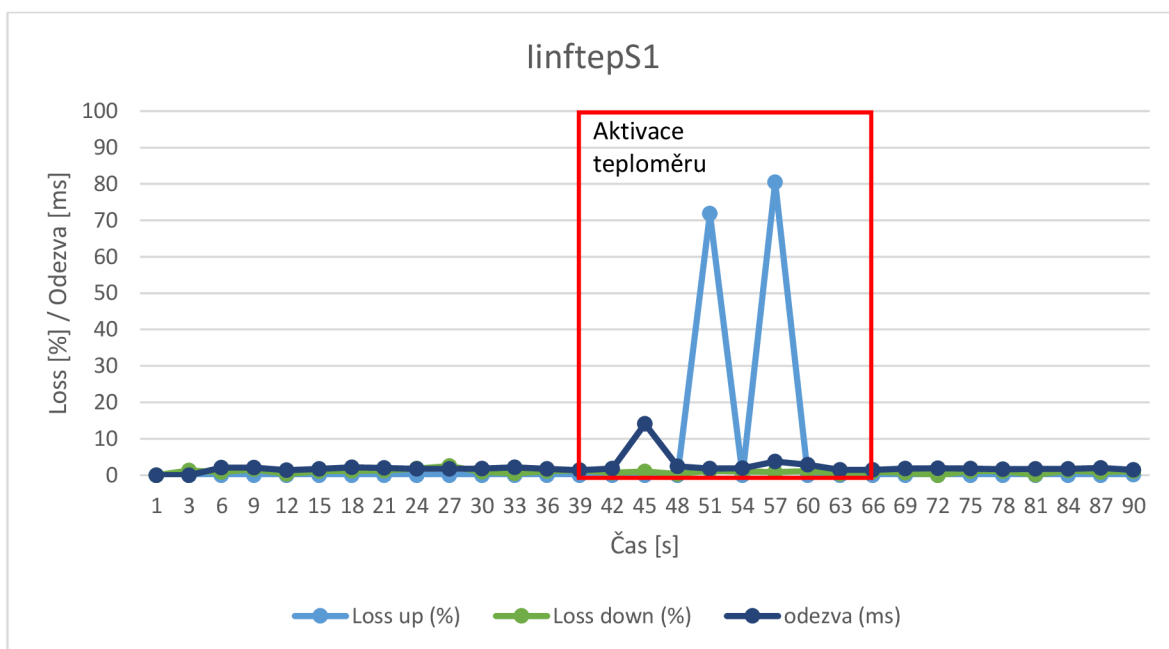
V průběhu měření byla snaha realizovat všechny testy v jedné vzdálenosti. Při měření prostupu optického paprsku ve vzdálenosti 2,3 mezi vysílače a přijímačem došlo k odpojení připojení od sítě. Toto měření není součástí této diplomové práce. Proto se měření rozšířilo o testování na vzdálenost 1 m, kde se vyhodnocená měření IpoloS3 a Ipz dokázala připojit. Při měření IkourS1 bylo potřeba zjistit, jak velké bude snížení intenzity osvětlení před, v průběhu a po skončení vytváření kouře pomocí přístroje Eurolite N-19. Tyto hodnoty byly změřeny následovně:

- v přímém měření před kouřením – 526 LUX
- v průběhu kouření – 400 LUX
- po kouření – 500 LUX.

Z grafu pro měření IkourS1 v příloze je patrné, že kouř nemá prakticky žádný vliv na datový přenos.



Graf 35: měření linftepS1- 1/2 (Zdroj:[vlastní])



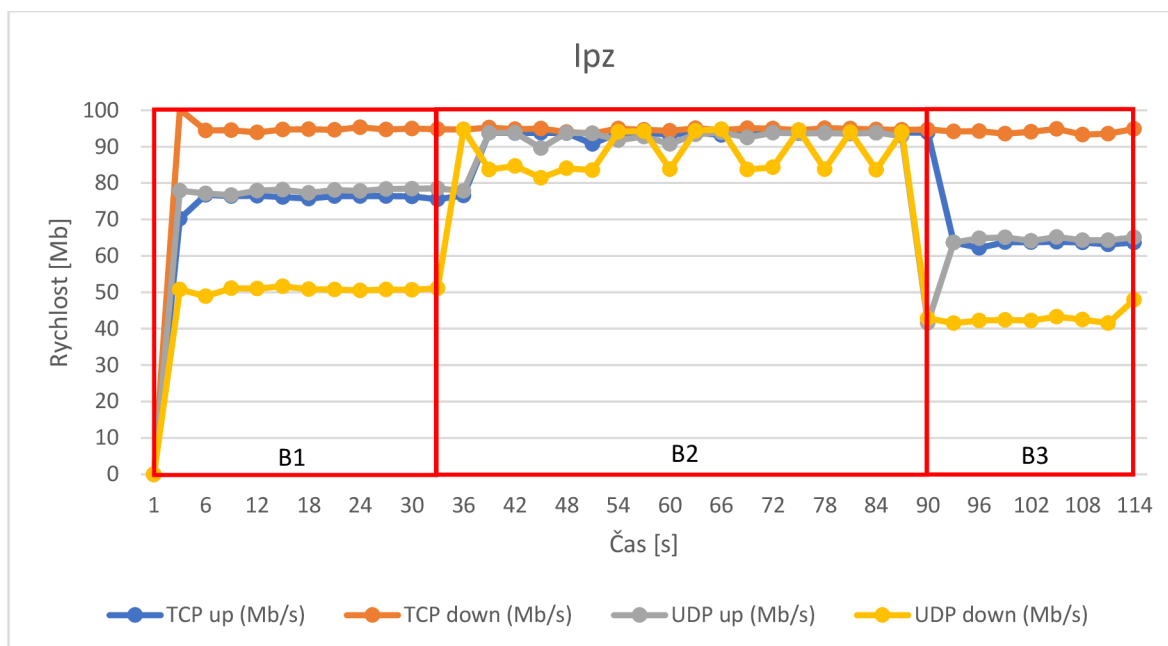
Graf 36: měření linftepS1- 2/2 (Zdroj:[vlastní])

Vyhodnocené měření, které se orientovalo na odolnost proti úmyslnému zarušení přenášeného datového toku, můžeme vidět v grafu 35. Při tomto měření bylo využito infračerveného teploměru, prostřednictvím kterého byl utlumen přenášený datový signál. Okno, kdy byl infračervený teploměr aktivován, je vyznačeno v podobě červeného obdélníku. Ve chvíli, kdy se nastavený teploměr, který byl od vysílače 10 cm, začal aktivně zapínat, je patrná rapidní ztráta rychlosti převážně pro protokoly TCP up/down a UDP down. Z přidruženého grafu 36

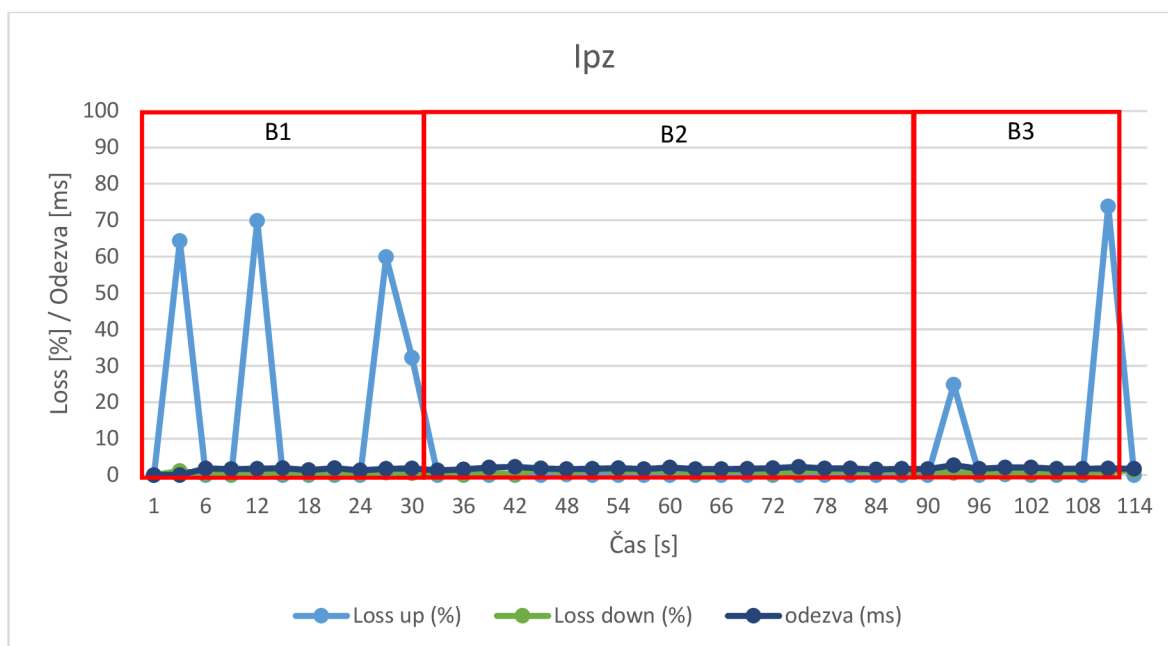
vyplývá, že ve vyznačeném okně vznikly dvě velké špičky ztrát (Loss up) dosahující 70 %. Na obr. 30 je vidět aktivace teploměru při měření linftepS1.



Obr. 30: Ukázka z měření linftepS1 (Zdroj:[vlastní])



Graf 37: měření Ipz - 1/2 (Zdroj:[vlastní])



Graf 38: měření Ipz - 2/2 (Zdroj:[vlastní])

Vzhledem k tomu, že pro zařízení Trulifi 6002 byly při měření k dispozici dva IR vysílače, mohl se realizovat scénář, při kterém skrz polopropustnou folii vysílá jeden IR vysílač a druhý vysílá odrazem od té stejné folie. Výsledkem je měření Ipz, které je zobrazeno prostřednictvím grafu 37. Toto měření probíhalo při aktivní změně IR vysílačů. První blok B1 vyznačený červeným obdélníkem byl realizován formou prostupu datového toku skrz polopropustnou folii stejně jako v měření IpoloS3. Když se srovnají naměřené údaje rychlosti přenosu u měření IpoloS3 a prvního bloku B1, můžeme vidět naprosto totožné hodnoty. Po cca. 30 s měření byl přidán další IR vysílač, který přenášel data pomocí odrazu. Po přidání druhého vysílače se v prostředním bloku B2 rychlost přenosu zvedla a ustálila mezi 80 – 90 Mb/s. Při následném odebrání IR vysílače, který byl připojený skrz materiál polopropustného zrcadla, můžeme v posledním bloku B3 pozorovat další snížení rychlosti do stavu podobnému v prvním bloku, ovšem s lehkým úbytkem rychlosti u protokolů TCP up a UDP up/down. Z přidruženého grafu 38 je patrné, že materiál polopropustného zrcadla má lepší účinky na ztrátu paketů (Loss up) oproti sklu v měření IskS v rámci scénáře s odrazem paprsku.

6.4.2 Zařízení Trulifi 6013

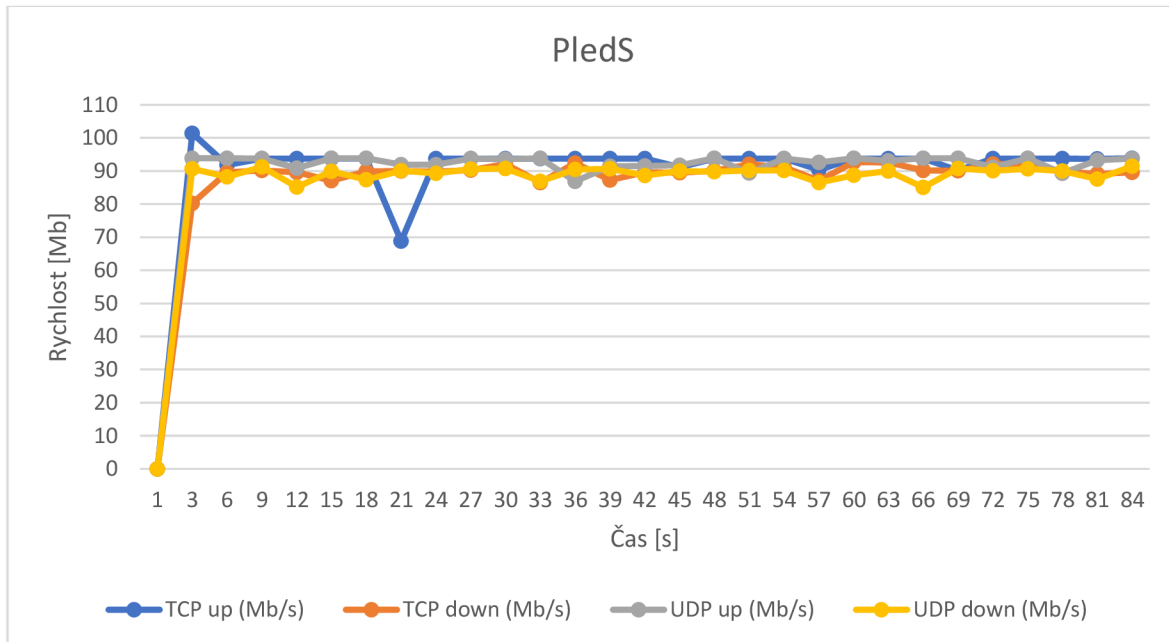
Pro vyhodnocení všech scénářů pro zařízení Trulifi 6013 bylo využito přístrojů a materiálu z tab. 14. Realizace proběhla při rozsvíceném světla o intenzitě 477 LUX na vzdálenost 4 a 1 m. Jednotlivá měření jsou vidět v tab. 16.

6013 světlo	LUX	Vzdálenost (m)	Přímé	Kouř	Infra	Folie (prostup)
	540	4	PPS1**	PkourS2	PinftepS**	*
6013 světlo	LUX	Vzdálenost (m)	LED	Folie (odraz)	Folie (prostup)	
	540	1	PledS	PpoloS2 **	PpoloS3**	

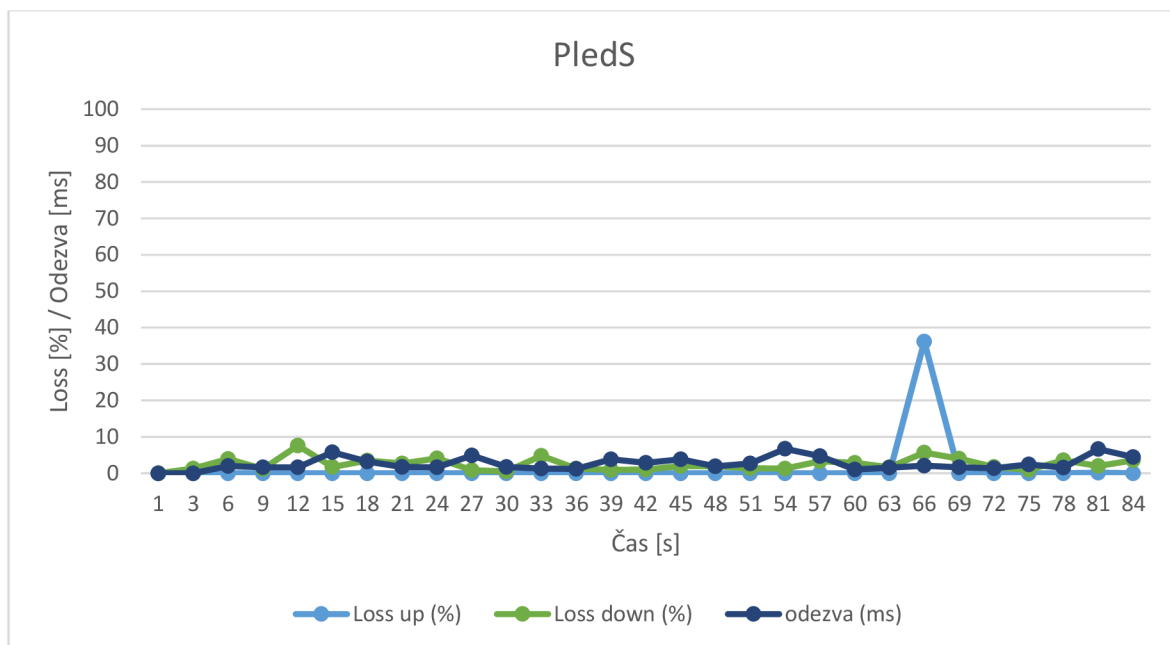
Tab. 16: měření přes rušivé vlivy Trulifi 6013 (Zdroj: [vlastní])

(* ztráta připojení – disconnect; ** viz příloha)

Z tab. 16 vyplývá, že při pokusu o měření prostupu paprsku skrz polopropustnou folii na vzdálenost 4 m se nepodařilo spojení se sítí navázat. Zřejmě kvůli velkému útlumu vysílaného viditelného paprsku. Toto měření není součástí této diplomové práce. Z tohoto důvodu probíhalo měření se scénáři polopropustné folie ve vzdálenosti 1 m, kde se podařilo spojení navázat.

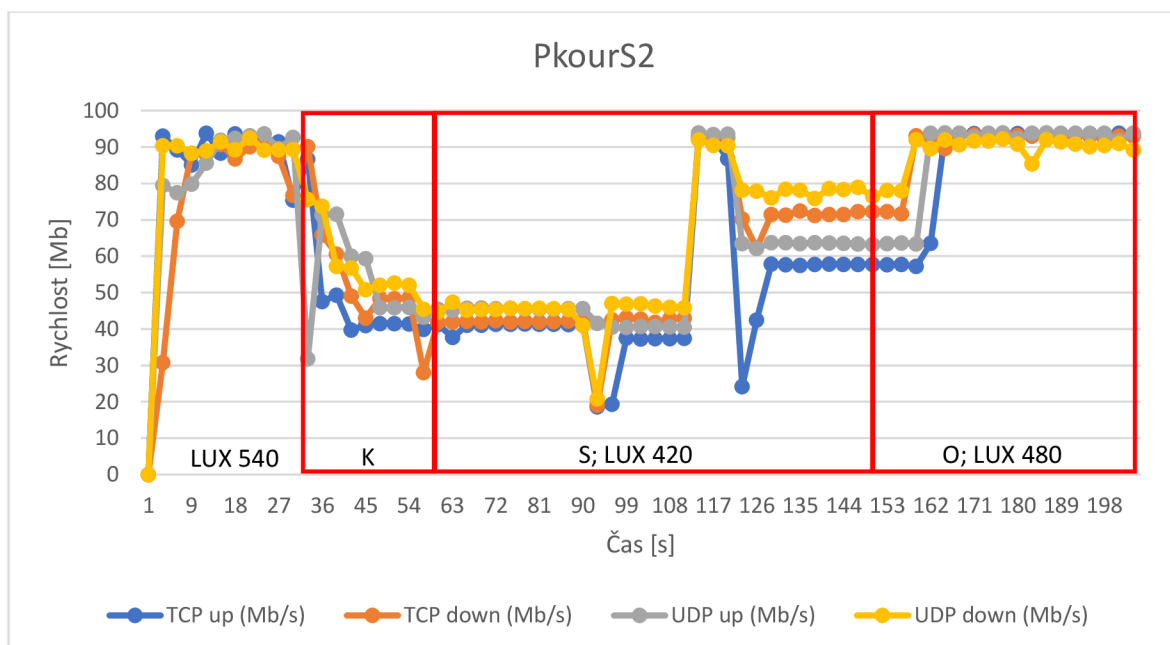


Graf 39: měření PledS - 1/2 (Zdroj: [vlastní])



Graf 40: měření PledS - 2/2 (Zdroj:[vlastní])

Z měření PledS v grafu 39 vyplývá, že světelný zdroj, v podobě LED pásků modré barvy pracující ve vlnové délce 470 nm, nezpůsobuje žádné viditelné snížení rychlosti. Tato vlnová délka je úplně stejná, ve které pracuje zařízení Trulifi 6013. Z příruženého grafu 40 je vidět, že rušivé světlo nezpůsobuje ani žádné změny ve stabilitě ztrát datového signálu.



Graf 41: měření PkourS2 (Zdroj:[vlastní])

Pro vyhodnocení optického signálu v případě požáru je potřeba využít speciální přístroj na výrobu kouře. Využitým přístrojem je Eurolite N-19 smoke-machine, který dokáže

simulovat kouřové částice. Tento přístroj byl před začátkem měření umístěn v ½ měřené vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Měření PkourS2, jak je vidět v grafu 41, probíhalo ve třech fázích. V každé fázi bylo provedeno měření intenzity osvětlení, které se v průběhu měření měnilo vlivem kouře, který vznikl. Hodnoty změřené intenzity světla jsou součástí červených bloků v grafu 25. Celý průběh tohoto měření je následující.

Na začátku probíhá vyhodnocení dat za přímé viditelnosti bez použití jakýchkoli rušivých vlivů a přístrojů. V tomto průběhu byla změřena intenzita světla v hodnotě 540 LUX. Při uplynutí 30 s je spuštěn přístroj na výrobu kouře, který v bloku K dalších 30 s vyrábí kouř. V grafu 41 je v tomto bloku vidět značný útlum rychlosti všech měřených protokolů. Po uplynutí těchto 30 s se přístroj N-19 vypne a další následující 2 minuty probíhá měření v zakouřené místnosti. V tomto časovém okně je provedeno druhé měření intenzity světla, které zobrazilo hodnotu 420 LUX. Je vidět snížení intenzity světla oproti prvnímu měření vlivem vyrobeného kouře. V průběhu tohoto bloku setrvání označeného v grafu jako S je vidět prudký nárůst rychlosti. To je způsobeno kouřem, který se v místnosti rozpíná a jeho kouřové návaly se zřejmě posunuly z přímého spojení mezi vysílačem a přijímačem.

Ve třetí fázi v grafu označené jako O se v místnosti spustilo odvětrávání. V rámci toho proběhlo poslední měření intenzity světla, které ukázalo hodnotu 480 LUX. Na grafu v této fázi je vidět, jak v jednu chvíli kouřový nával úplně opustil spojení mezi vysílačem a přijímačem a rychlost se ustálila na hodnotách srovnatelné s přímým měřením. Tento postup byl úplně stejně aplikován při měření IkourS1 na zařízení Trulifi 6002, kde však vlivem kouře nedošlo prakticky k žádným změnám. V průběhu tohoto měření nedošlo k odpojení síťové konektivity. Lze však předpokládat, že při vyšší koncentraci kouře by k odpojení dojít mohlo. Na obr. 31 níže je zobrazeno měření PkourS2.



Obr. 31: Ukázka z měření PkourS2 (Zdroj: [vlastní])

7 Zhodnocení výsledků

Součástí této diplomové práce je vyhodnocení problematiky optických bezdrátových spojů pro krátké vzdálenosti. Praktická měření vyhodnocena v této práci byla realizována na dvou odlišných zařízeních systému Li-Fi, kde jedno nazývané Trulifi 6002 pracuje v oblasti blízkého infračerveného spektra a druhé Trulifi 6013 funguje v oblasti viditelného světla. Měření na každém z uvedených zařízení bylo rozděleno do čtyřech částí zaměřujících se na ověření udávaných informací výrobce testovaných produktů, analýzu omezujících způsobů této bezdrátové komunikace a testování potenciálních bezpečnostních problémů.

V kapitole 6.1 zaměřující se na uváděné vlastnosti výrobce bylo provedeno měření maximálních přenosových vzdáleností jednotlivých produktů. Z uvedených výsledků je zřejmé, že oba testované systémy dosahují vyšší přenosové vzdálenosti, než uvádí výrobce. U systému Trulifi 6002, kde výrobce udává optimální vzdálenost pro přenos mezi 1,8 – 2,3 m, se měřením podařilo dostat do vzdálenosti 6 m, což je takřka trojnásobek uváděné vzdálenosti. V této měřené vzdálenosti se viditelně snížila rychlost, při které však nedošlo k odpojení síťové konektivity. U zařízení Trulifi 6013 se ukázalo, že uvedená maximální vzdálenost 8 m koresponduje s výsledky měření, kde ve vzdálenosti 8 m se rychlost pohybovala konstantně na hodnotě kolem 40 Mb/s, což je pro stabilní datový přenos dostatečné. Ve vzdálenosti 9 m se rychlost pohybovala okolo 20 Mb/s a v 10 m nastala ztráta připojení.

V měření v kapitole 6.2 bylo zjištěno, že obecná problematika nemožnosti prostupu je u testovaných produktů lichá. U obou zařízení bylo zjištěno, že některé materiály typu sklo nebo plexisklo dovolující vstup paprsku, nepůsobovaly žádné změny v rychlosti datového přenosu. V případě testování barevně laděných materiálů byla zjištěna ztráta jak v rychlosti, tak ve větší míře v rámci přenášených paketů. V tomto vyhodnocení dominovalo zařízení Trulifi 6002, které při žádném z realizovaných testů v předem vybraných vzdálenostech nedovolilo odpojení od sítě. V případě produktu Trulifi 6013 byl vidět značnější účinek materiálů na světelný datový tok, který v několika případech dopadl ztrátou spojení.

V druhé části problematiky zaměřující se na omezující způsoby komunikace bylo v kapitole 6.3 realizováno měření přenosu při nepřímé viditelnosti pomocí odrazu paprsku od vybraných materiálů. Z výsledků měření vyplývá, že je reálné za určitých podmínek využít na krátké vzdálenosti přenos odrazem. Na tento přenos mají největší vliv různé druhy materiálů a vzdáleností od odrazu, které mají u obou zařízení značný vliv na rychlost přenosu a velikost ztráty přenášených paketů. Zajímavým zjištěním bylo, že v měření IrohS, které bylo realizováno dvojitým odrazem od obyčejné zdi byla vyhodnocena konstantní rychlost určitých protokolů kolem rychlosti 60 Mb/s. Toto měření však mělo konstantní ztráty paketů kolem 80 %. I přes tento nedostatek je zjištěno, že možnost optického přenosu dvojitým odrazem od rohu místnosti velkým úspěch, který by mohl najít své využití.

Poslední část praktických měření byla zaměřena na oblast bezpečnosti. V tomto měření v kapitole 6.4 je realizována simulace požáru prostřednictvím kouřového přístroje. Z uvedených výsledků je zřejmé, že u zařízení Trulifi 6013, kde došlo k viditelnému útlumu světla, se rychlost diametrálně změnila, a to z 90 Mb/s na hodnoty kolem 45 Mb/s. Není pochyb, že při větší koncentraci kouře by optický spoj ztratil konektivitu. Oproti tomu v případě zařízení Trulifi 6002 bylo spojení bez jakýchkoliv viditelných znaků rušení signálu. Toto zařízení však v případě rušení jiným zdrojem světla bylo v oblasti rychlosti optického přenosu viditelně utlumeno. Tento útlum se v případě přenosu přes zařízení Trulifi 6013 neprojevil.

V rámci vyhodnocení bylo napříč jednotlivými částmi měření zjištěno, že případná realizace úspěšného přenosu prostupem a odrazem může poukazovat na bezpečnostní riziko tohoto přenosu. Pokud optický paprsek prochází materiálem a zároveň se od daného materiálu odráží, je zřejmé, že tímto materiálem je možné odstínění paprsku a následné odposlechnutí datové komunikace.

8 Závěr

Uvedená diplomová práce se zaměřuje na vyhodnocení optických bezdrátových přenosů pro krátké vzdálenosti v podobě technologie Li-Fi. Jelikož se jedná o moderní technologii přenosu dat, je potřeba poukázat na její přednosti a principy, které mohou mít pozitivní dopady pro celou naši společnost. Z tohoto důvodu byla v práci zpracována problematika omezujících limitů při nasazení a výhody, které by mohli kladně posunout aktuální světové trendy. Byl nastíněn princip fungování této technologie s teoretickými možnostmi budoucího využití, které by v řadě nasazení byli velkým skokem v oblasti bezdrátových komunikací. Vzhledem k tomu, že bezdrátové komunikační technologie jsou v současné době nejrozšířenější alternativou připojení do internetu. Bylo provedeno porovnání aktuálně využívaných technologií se systémem přenosu pomocí optického signálu Li-Fi.

Hlavním cílem práce bylo ověřit a analyzovat optický bezdrátový spoj pro přenos dat. Toho bylo docíleno prostřednictvím praktických měření realizovaných podle předem připravených scénářů. V průběhu měření jednotlivých konfigurací bylo zjištěno, že maximální udávané vzdálenosti přenosu pro testovaná zařízení neodpovídají reálné možnosti jejich využití. Z naměřených hodnot ve scénářích prostupu či odrazu optického paprsku přes materiál vyplynulo, že testovaná Li-Fi zařízení mohou stabilně fungovat i za nepřímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Tato skutečnost může sloužit k rozšíření možností nasazení této technologie v praxi. Z vyhodnocených měření při testování útlumu paprsku z pohledu bezpečnostních hrozeb vyplynulo, že jednotlivá zařízení jsou více citlivá na jiné rozdílné druhy hrozby. Testovaná zařízení Trulifi 6002 jsou citlivé na rušení jiným zdrojem optického pracující ve stejné oblasti elektromagnetického spektra. Zařízení Trulifi 6013 je oproti Trulfi 6002 zase citlivé na útlum světla prostřednictvím prachových částic. Tuto informaci udává výrobce produktu a tímto vyhodnocením se potvrdila její relevantnost.

Testování odhalilo další možnosti využití této technologie. Dle mého názoru by šlo tuto technologii využít k přenosu dat mezi stroji v oddělených místnostech, které neumožňují připojení přes kabelovou infrastrukturu. Další použití by mohlo být prostřednictvím odrazu na těžko dostupná místa, kde je neakceptovatelné žádné jiné připojení. Každým rokem se svět neuvěřitelně posouvá, zvláště když se jedná o technologie. To, co bylo běžnou součástí života před 10ti lety, je pro potřeby dnešní doby takřka nepoužitelné. Systémy optických spojů by mohly v určitých směrech nahradit dosud používanou technologii Wi-Fi. Měření v této diplomové práci poukazuje na skutečnost, že technologie Li-Fi je bezpečnější a stabilnější než aktuálně používané bezdrátové řešení. Pomalu nastupující vysokorychlostní optické bezdrátové přenosy jsou jen dalším krokem v nezastavitelném vývoji naší civilizace.

9 Seznam použitých zdrojů

1. HRANILOVIC, Steve. Wireless optical communication system [online]. Boston: Springer Science + Business Media, 2005 [cit. 2021-11-23]. ISBN 0-387-22785-7
2. WILFERT, Otakar a Zdeněk KOLKA. Optické (laserové) bezdrátové spoje [online]. Ústav radioelektroniky, VUT v Brně [cit. 2021-12-1].
3. The History of LiFi. *lifi.co* [online]. 2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://lifi.co/the-history-of-lifi/>
4. EU-funded OMEGA project to develop user-friendly gigabit home networks. *Cordis.europa.eu* [online]. 2008 [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/article/id/29045-eufunded-omega-project-to-develop-userfriendly-gigabit-home-networks>
5. TamoSoft® Throughput Test: Help Documentation Version 1.0 [online]. 2016, 12 [cit. 2021-10-08]. Dostupné z: <https://www.tamos.com/download/manual/>
6. HAAS, Harald. Forget Wi-Fi. Meet the new Li-Fi Internet | Harald Haas. In: Youtube.com [online]. 2015 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iHWIZsIBj3Q>
7. KHANDAL, Dinesh a Sakshi JAIN. *Li-Fi (Light Fidelity): The Future Technology in Wireless Communication* [online]. International Journal of Information & Computation Technology, 2014 [cit. 2022-12-01]. ISSN 0974-2239. Dostupné z: <http://www.irphouse.com>
8. VENCL, František. *Moderní trendy v bezdrátovém přenosu optického signálu pro datovou komunikaci* [online]. ČZU v Praze, 2020 [cit. 2021-12-02]. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.
9. MAREŠ, Jan. *Jak pracuje LiFi?*. ČVUT z Praze, 2017 [cit. 2021-12-03]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
10. EGJAM, Abdulhafid a Nizar ZARKA. *Light Fidelity (Li-Fi) Technology: Forget Wi-Fi. It's Li-Fi: internet through Lightbulbs!* [online]. 4. Higher Institute for Applied Sciences and Technology, 2015 [cit. 2022-01-02]. DOI: 10.13140/RG.2.1.1440.0080. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/288175446>
11. SALVI, Sanket a Vasantha GEETHA. From Light to Li-Fi: Research Challenges in Modulation, MIMO, Deployment Strategies and Handover [online]. 2020 [cit. 2022-01-05]. ISBN 978-1-7281-2087. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/339472291>
12. *LiFi (Light Fidelity) & its Applications* [online]. FN Division, TEC [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.tec.gov.in/pdf/Studyaper/lifi%20study%20paper%20-%20approved.pdf>
13. SHANTI PRAGNYA, Swayanshu a Abhishek GUPTA. *The Future Technology LiFi* [online]. International Journal for Scientific Research & Development, 2018 [cit. 2022-01-16]. ISSN 2321-0613. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/323552097>

14. HAAS, Harald. *Wireless data from every light bulb* [online]. TEDGlobal, 2011 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
15. KARTHIKA, R. a S. BALAKRISHNAN. *Wireless Communication using Li-Fi Technology* [online]. International Journal of Electronics and Communication Engineering, 2015 [cit. 2022-01-12]. ISSN 2348–8387. Dostupné z: www.internationaljournalsrg.org
16. VÍTKOVÁ, Blanka. *Měření slunečního záření*. 2012. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Mgr. Tomáš Milěš.
17. AHMED SHAHEEN, Javed. *Li-Fi Architecture and Network Access Through it* [online]. 2017 [cit. 2022-01-19]. ISSN 2005-4238. Dostupné z: <http://article.nadiapub.com/IJAST/vol100/4.pdf>
18. LED. *Cs.wikipedia.org* [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/LED#/media/Soubor:LED_symbol_cs.svg
19. ŠŤASTNÝ, Martin. *širokopásmový transimpedanční zesilovač pro fotodiodu*. Brno, 2019. Bakalářská práce. vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.
20. Fotodioda. *Cs.wikipedia.org* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotodioda#/media/Soubor:Photodiode_symbol_CS.svg
21. HAAS, Harald a Liang YIN. *What is LiFi?* [online]. journal of lightwave technology [cit. 2022-01-22]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/What-is-LiFi-Haas-Chen/5f4edc9860ff11101fef2481fbe98053f240f33d>
22. RAMADHANI, E. a G. P. MAHARDIKA. *The Technology of LiFi: A Brief Introduction* [online]. 2017 [cit. 2022-02-01]. doi: 10.1088/1757-899X/325/1/012013. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323713862_The_Technology_of_LiFi_A_Brief_Introduction
23. SARKAR, Anurag, Shalabh AGARWAL a Asoke NATH. *Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light* [online]. 2015 [cit. 2022-02-11]. ISSN 2321-7782. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279530585_LiFi_Technology_Data_Transmission_through_Visible_Light
24. JIANG, Tao. *Multicarrier Modulation* [online]. ScienceDirect, 2017 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/multicarrier-modulation>
25. KHARE, Yash, Kumkum BALA a Prakash TIWARI. *Li – Fi Technology, Implementations and Applications* [online]. ResearchGate: International Research Journal of Engineering and Technology, 2016 [cit. 2022-02-02]. ISSN 2395-0056. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/309374975>
26. KOCUR, Z. a M. ŠAFRÁNEK. *Bezdrátové systémy v přístupové síti* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2008 [cit. 2022-01-23]. ISSN: 1214-9675. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008020002>
27. BUMBÁLEK, Z. *Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2010 [cit. 2022-02-03]. ISSN: 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020004>

28. KRAUS, Walter. *LiFi technology – A new wireless network technology* [online]. Electronics Media, 2017 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.electronicmedia.info/2017/12/15/lifi-technology-new-wireless-network-technology/>
29. POLSHETWAR POONAM, V. a Mr. Saad SIDDIQUI. *Li-Fi Technology* [online]. Everest Educational Society's Group of Institutions, Aurangabad., 2014 [cit. 2022-03-28]. ISSN 0975-9646.
30. NextLifi. *Nextlifi.com* [online]. 2016 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <http://www.nextlifi.com/wp-content/uploads/2017/04/Li-Fi-Airplane.jpg>
31. WAKCHAURE, Sushma L., Shailaja D. PAWAR a Vijay V. THITME. *Overview of Li-Fi Technology* [online]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017 [cit. 2022-02-08]. ISSN 2395-0072.
32. NITESH, K. C. a Kumar. K. DHRUVA. *A Study on Li-Fi (Light -Fidelity)* [online]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017 [cit. 2022-02-16]. ISSN 2319-8354.
33. *A Review Paper on Li-Fi Technology* [online]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017 [cit. 2022-03-28]. ISSN 2278-0181.
34. KALYANI, Foram, Monika KHAKHARIYA a Debalina NANDI. *Li – Fi : Light Fidelity – A Critical Technical Study* [online]. 2016 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/305739403>
35. BURIAN, Jiří, Jaroslav HRB a Vladimír MYSLÍK. *Optická pojítka (Free Space Optics)* [online prezentace]. CESNET [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2615865/>
36. KAUSHAL, Hemani, V. Jain a Subrat KAR. *Free Space Optical Communication* [online]. New Delhi: Springer, 2017 [cit. 2021-02-18]. ISBN 978-81-322-3689-4.
37. PETRŽÍLKA, Tomáš. *Přenosové technologie Wi-Fi a WiMAX* [online]. Praha, 2010 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://is.ambis.cz/th/b7601/Prenosove_technologie_WiFi_a_WiMAX_2942010.pdf. Diplomová práce. Bankovní institut vysoká škola Praha. Vedoucí práce Ing. Vladimír Beneš.
38. *What is WiMAX Technology & Its Working* [online]. WatElectronics, 2021 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.watelectronics.com/wimax-technology-working-standards/>
39. *WiMAX Technology* [online]. 2022 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://www.pctechguide.com/mobile-communications/wimax-technology>
40. *Bezpečnost Bluetooth* [online]. ČVUT, 2007 [cit. 2022-02-29]. Dostupné z: https://dsn.felk.cvut.cz/wiki/_media/vyuka/cviceni/x36mti/prezentace2007/dolezr1-doc.pdf
41. *Bluetooth (INFORMACE): verze, dosah, frekvence a protokoly* [online]. Alza, 2021 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/slovník/bluetooth-art12370.htm#bluetooth>
42. PERWEJ, Yusuf. *The Next Generation of Wireless Communication Using Li-Fi (Light Fidelity) Technology* [online]. Science and Education Publishing, 2017 [cit. 2022-03-02]. DOI: 10.12691/jcn-4-1-3.

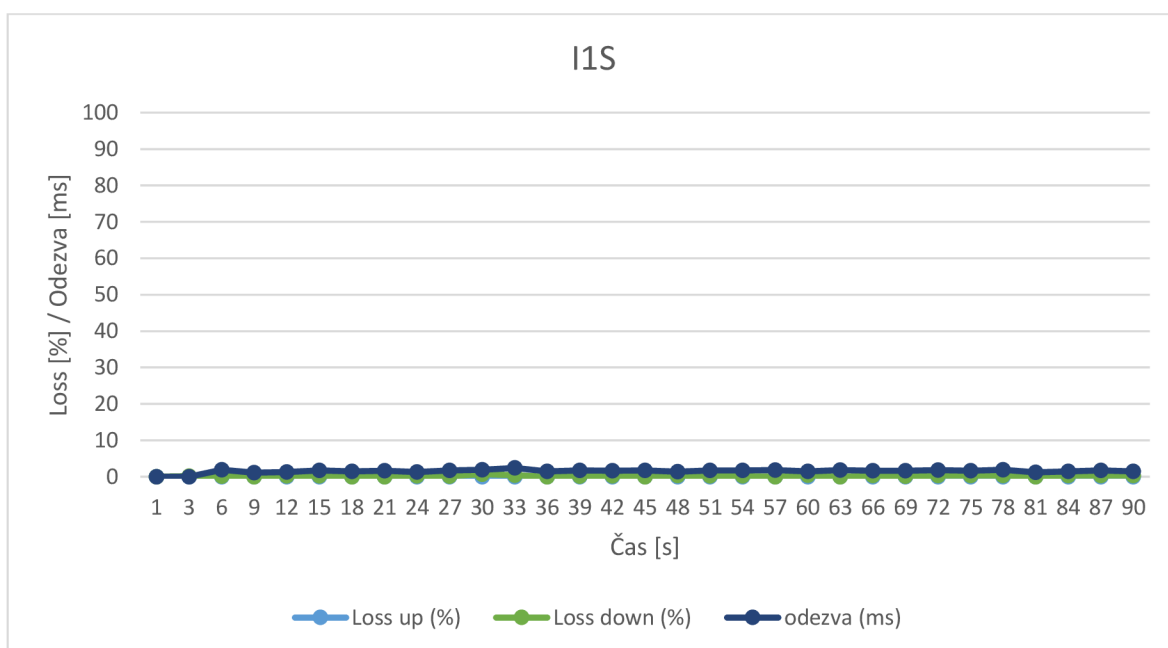
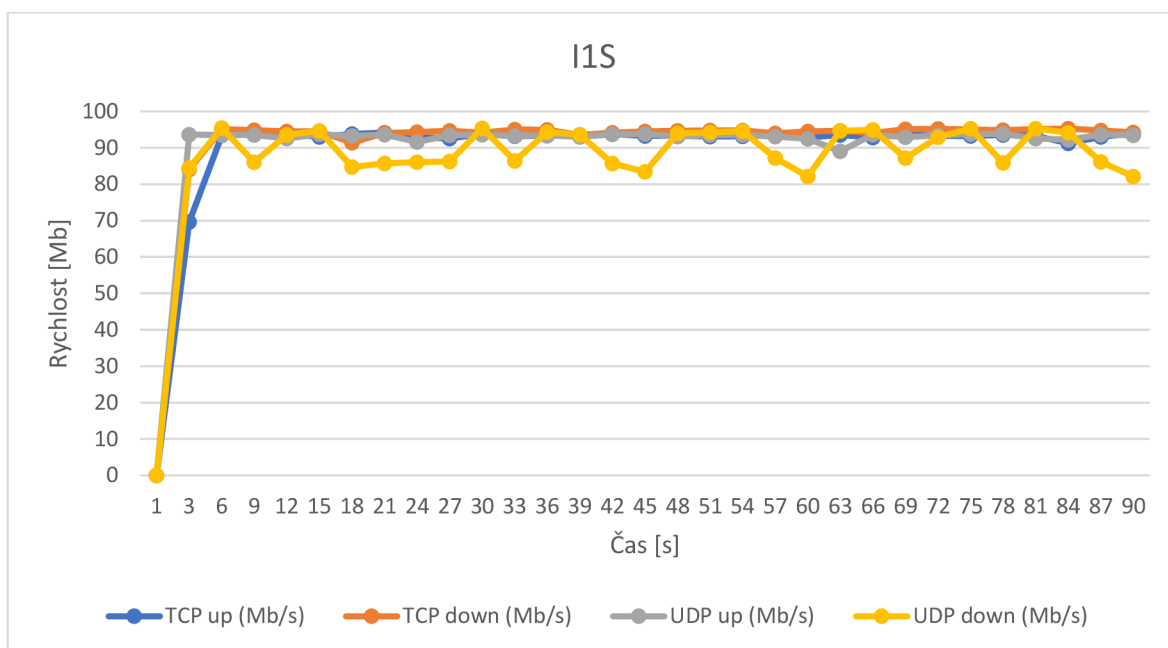
43. PŘIKRYL, Drahomír. *Návrh měření teploty na rotujících částech elektrického stroje* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7031. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.
44. *Bezdrátové připojení (zabudovaná bezdrátová LAN)* [online]. helpguide.sony.net [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: https://helpguide.sony.net/gbmig/C5131001/v1/cze/c_cntnet_wfintegrated.html
45. *LiFi Products* [online]. lifi.co, 2021 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://lifi.co/lifi-products/>
46. *LiFi-XC Brochure Snap shot A5 version: DataSheet* [online]. pureLifi, [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.rocor-teq.eu/wp-content/uploads/2018/09/LiFi-XC-DataSheet_short.pdf
47. PureLiFi products – LiFi-XC – Station. *Purelifi.com* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://purelifi.com/lifi-products/stn>
48. *LiFi Companies* [online]. lifi.co, 2021 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://lifi.co/lifi-companies/>
49. *Product Portfolio* [online]. Oledcomm, 2022 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.oledcomm.net/product-range/>
50. *Společnost Signify: světový lídr na trhu s osvětlením* [online]. Signify Holding, 2022 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.lighting.philips.cz/vzdelavani/blog-budoucnost-svetla/vzdelavani-a-trendy/signify-lidr-na-trhu>
51. *Trulifi: světlo se stává novým chytrým jazykem* [online]. Signify Holding, 2022 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.signify.com/cs-cz/innovation/trulifi>
52. *Trulifi by signify: Light becomes an intelligent language* [online]. Signify Holding [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://mediasite.czu.cz/Mediasite/Play/babf1161e60d4cb79cf92029bbee9de71d>
53. *Securelink 6013: datasheet* [online]. Signify Holding, 2020 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/Assets/signify/global/20200416-specsheet-trulifi-6013.pdf>
54. *Trulifi 6013: Trulifi 6013 Quick setup guide* [online]. Signify Holding, 2019 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.signify.com/global/innovation/trulifi/downloads>
55. *Trulifi 6002 Office installation guide* [online]. Signify Holding, 2021 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.assets.signify.com/is/content/Signify/Assets/signify/global/20210128-4422-947-86223-460-trulifi-6002-2-system-installation-instructions.pdf>

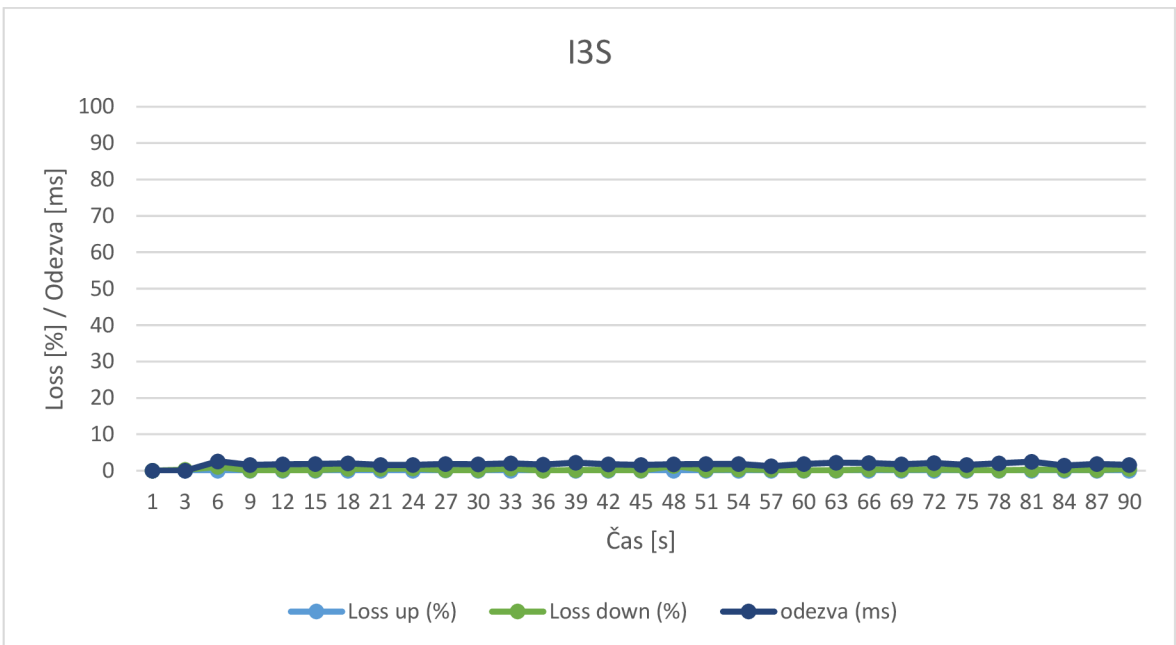
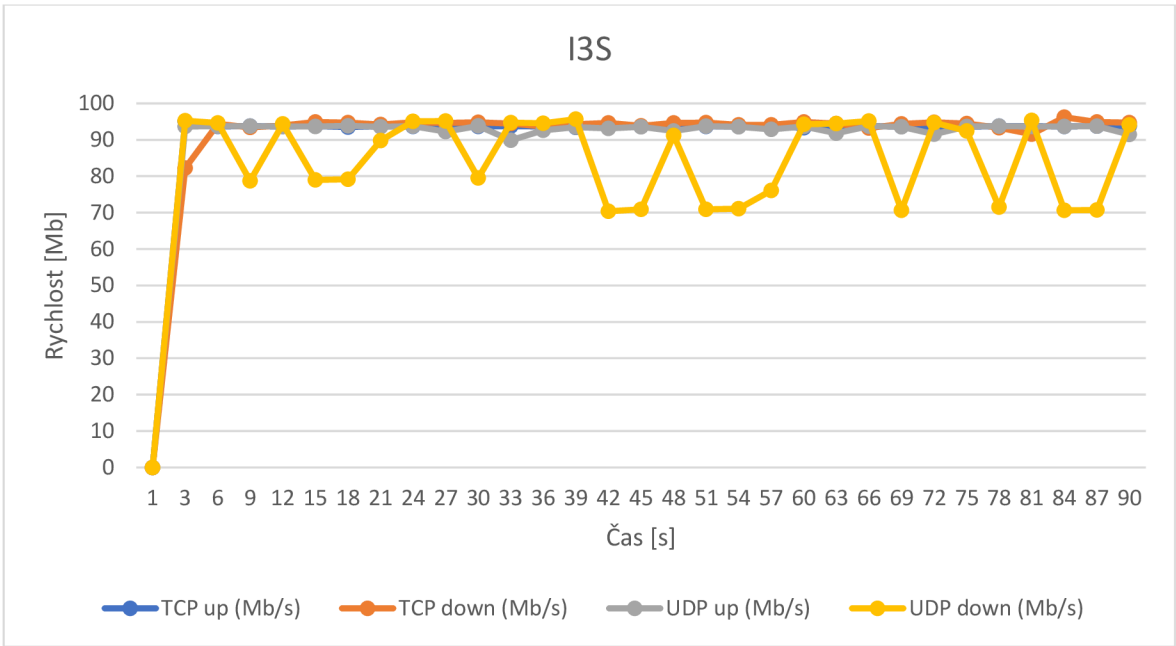
10 Přílohy

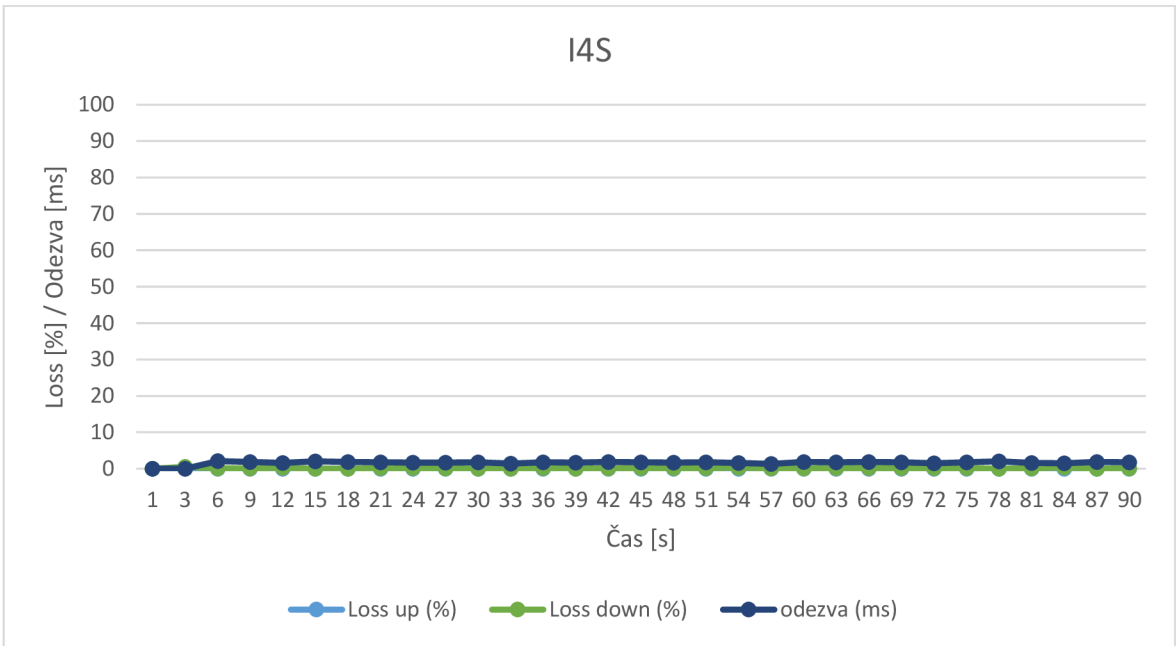
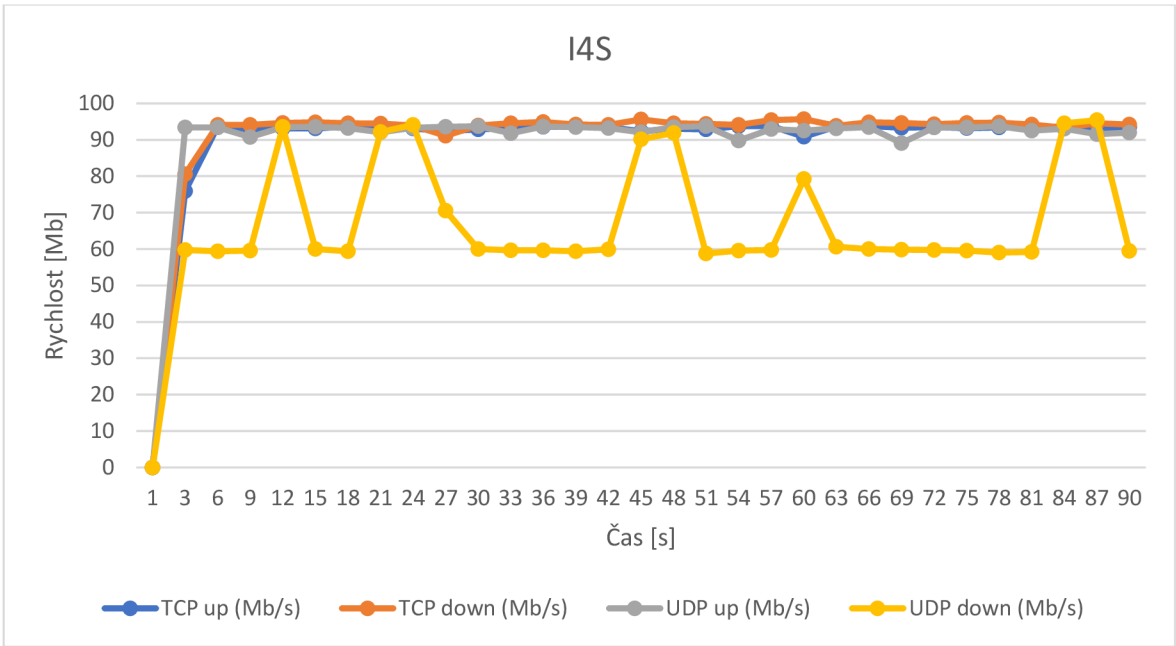
Příloha 1	Měření vzdálenosti
Příloha 2	Měření skrz materiál
Příloha 3	Měření odrazem
Příloha 4	Měření přes rušivé vlivy
Příloha CD	Tabulky naměřených hodnot

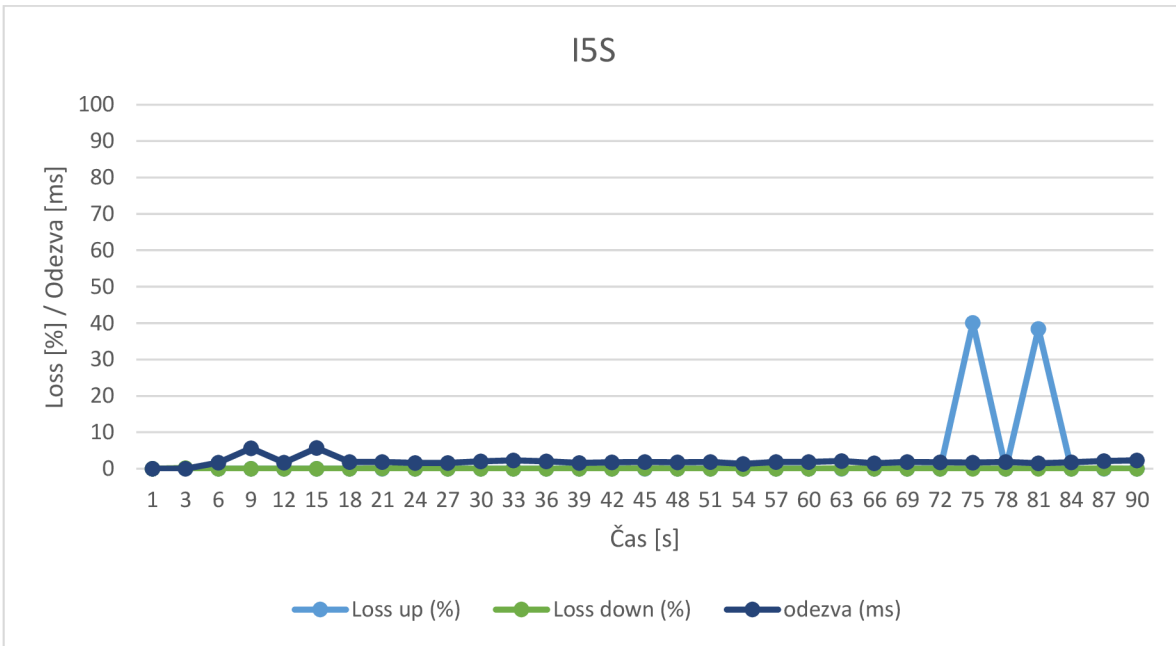
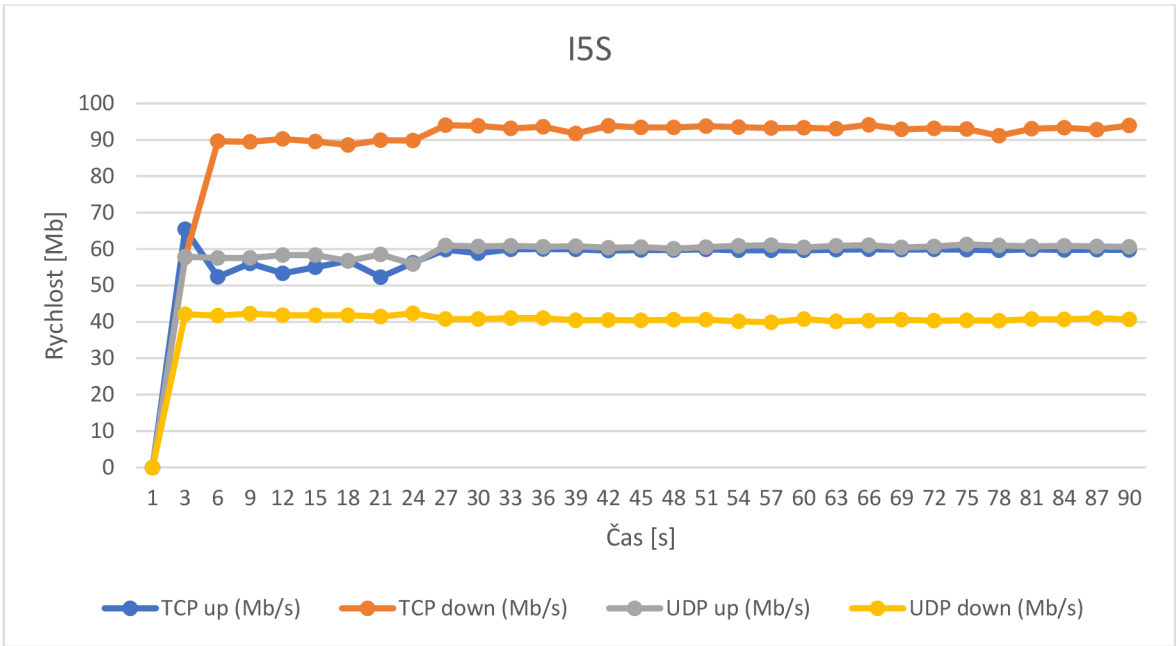
Příloha 1: Měření vzdálenosti

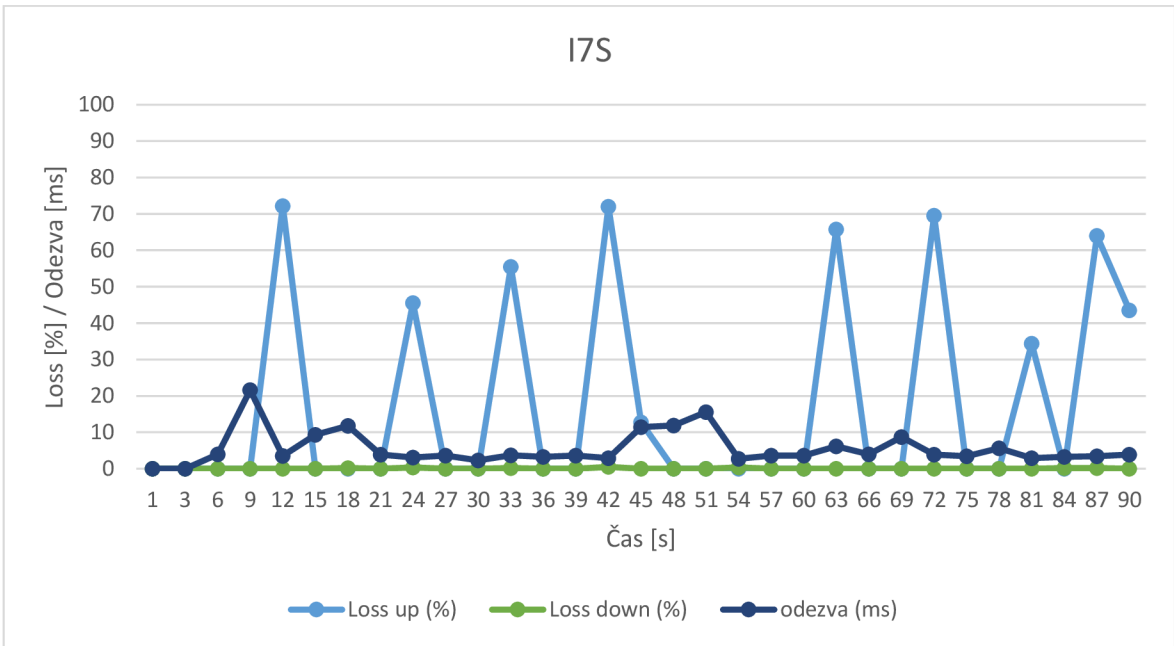
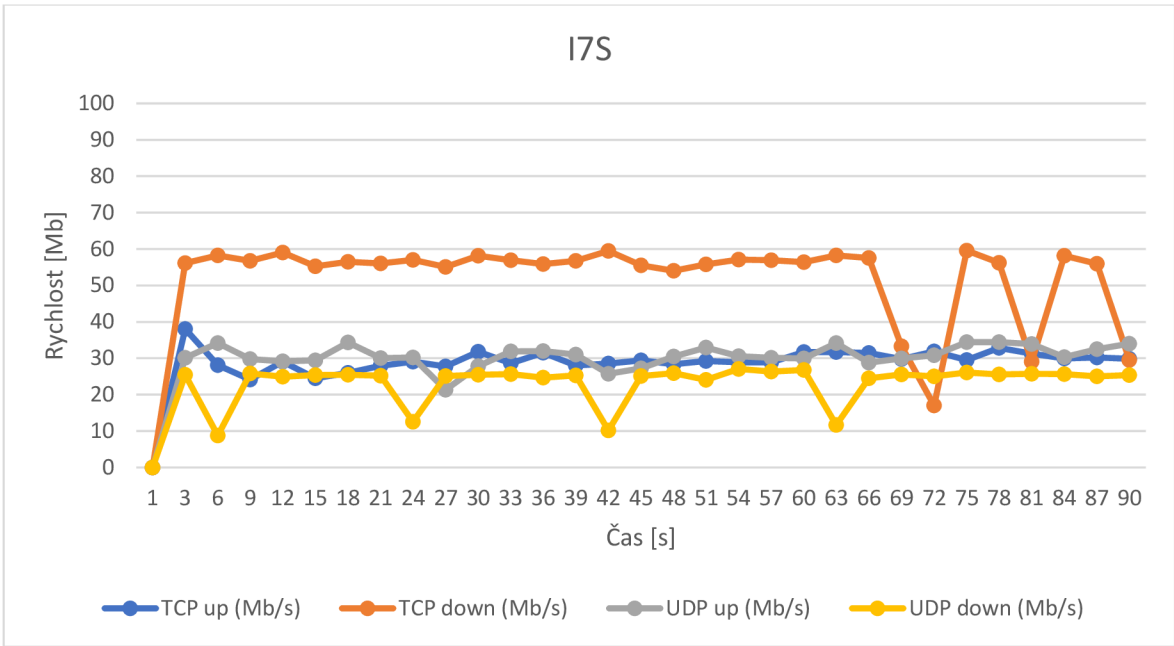
Systém Trulifi 6002

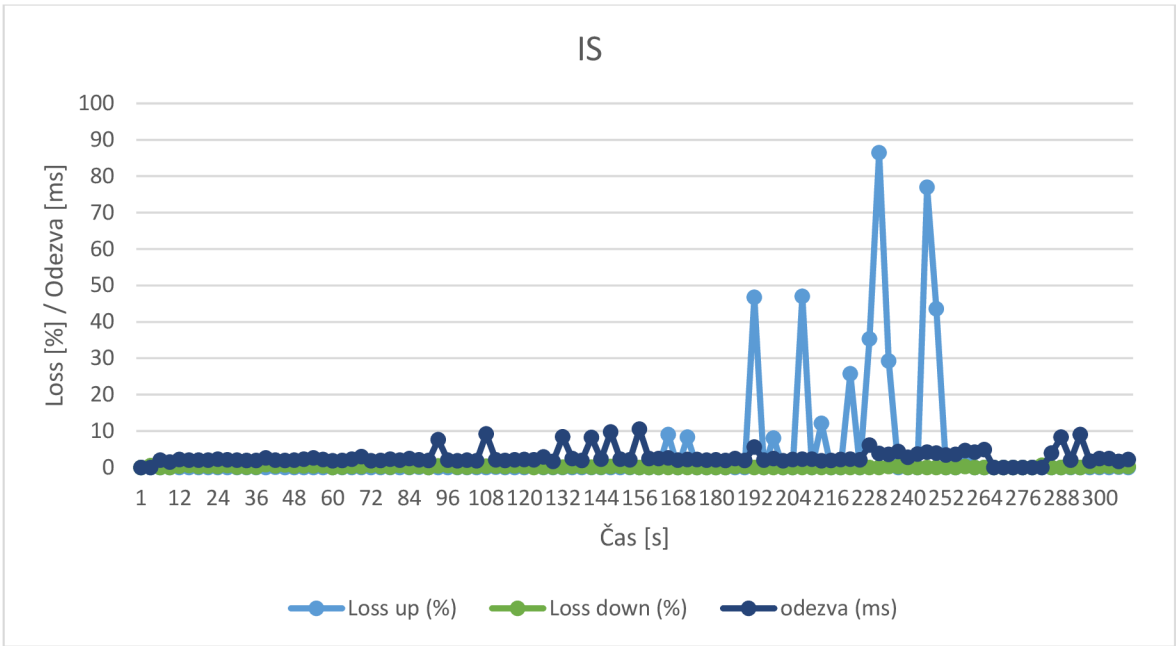




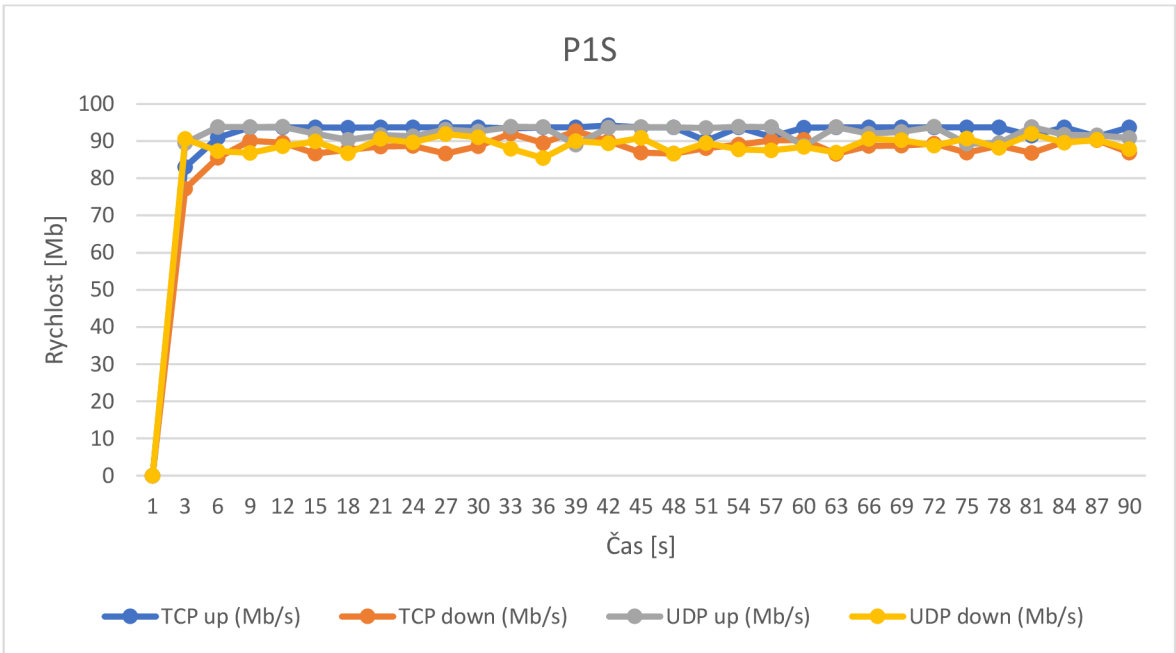


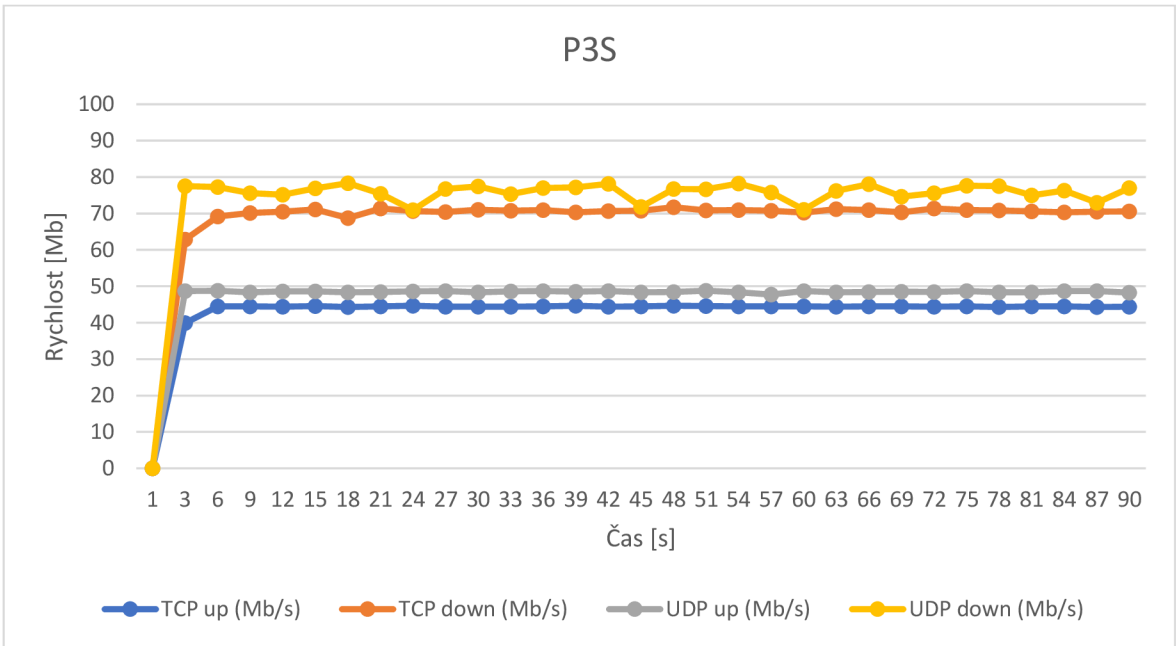
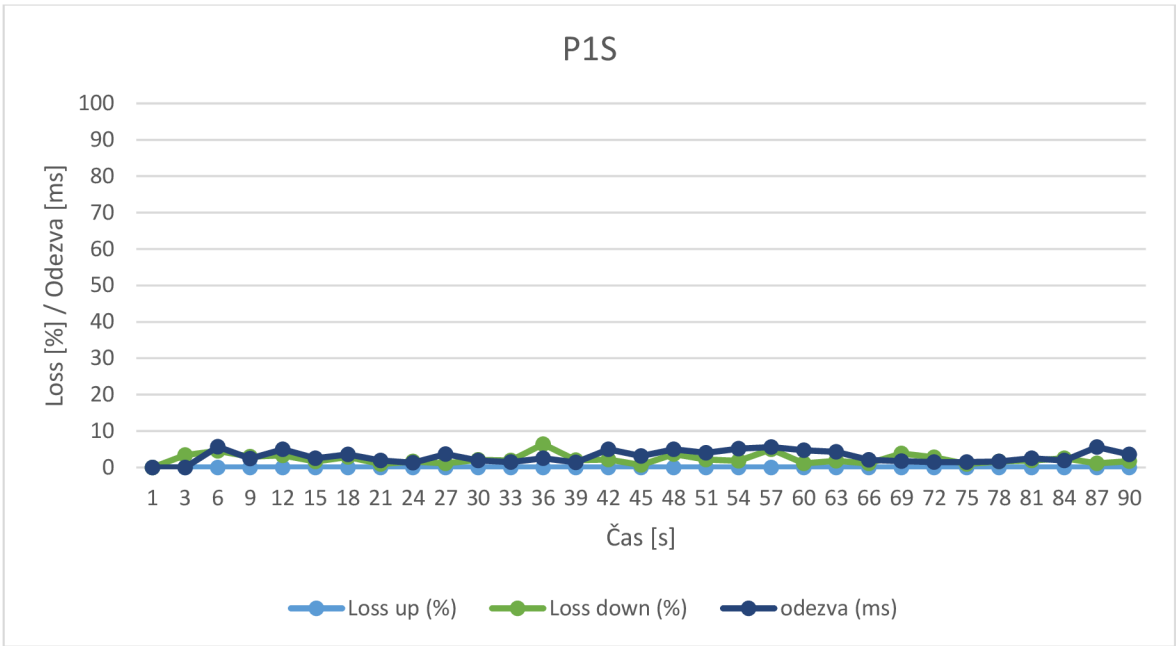


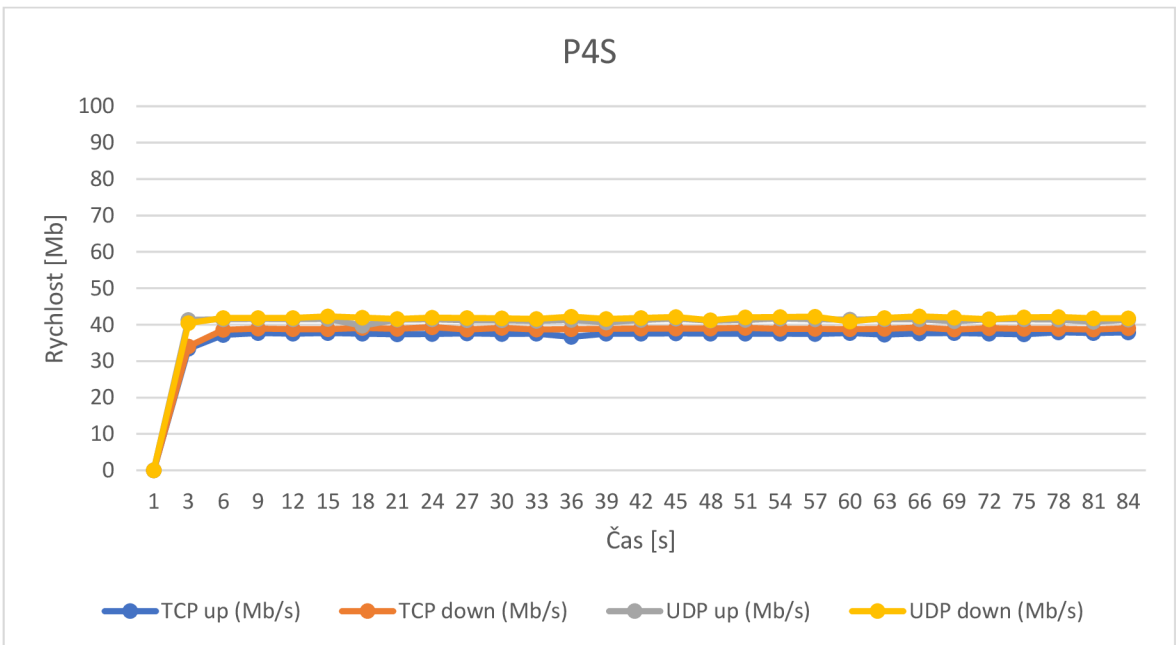
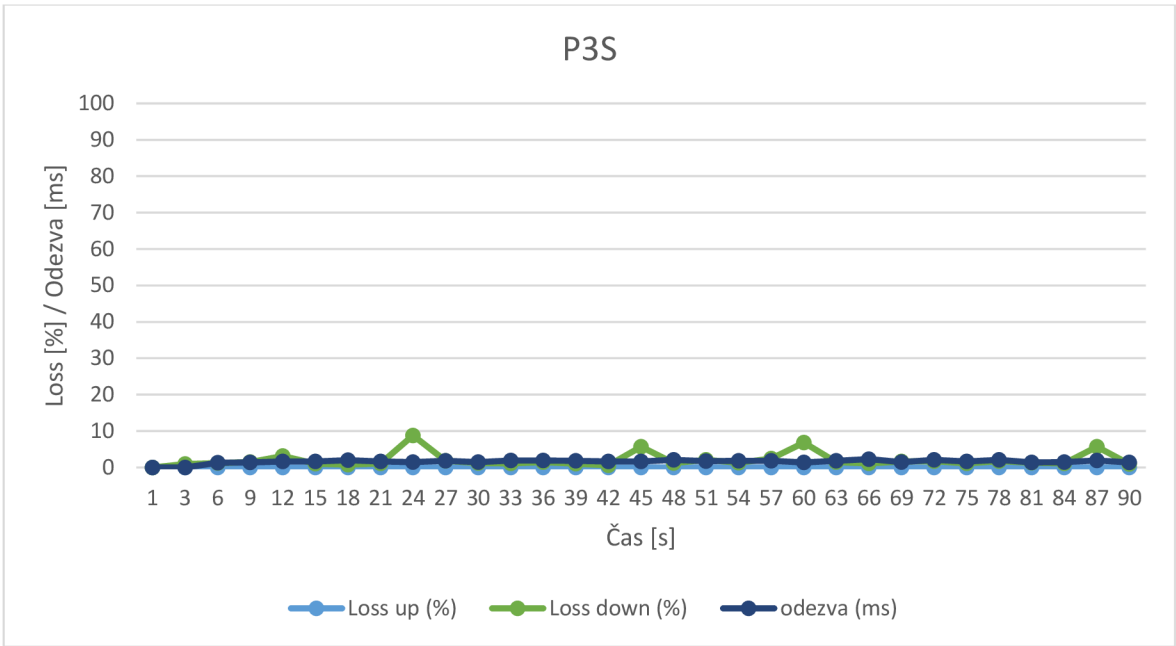


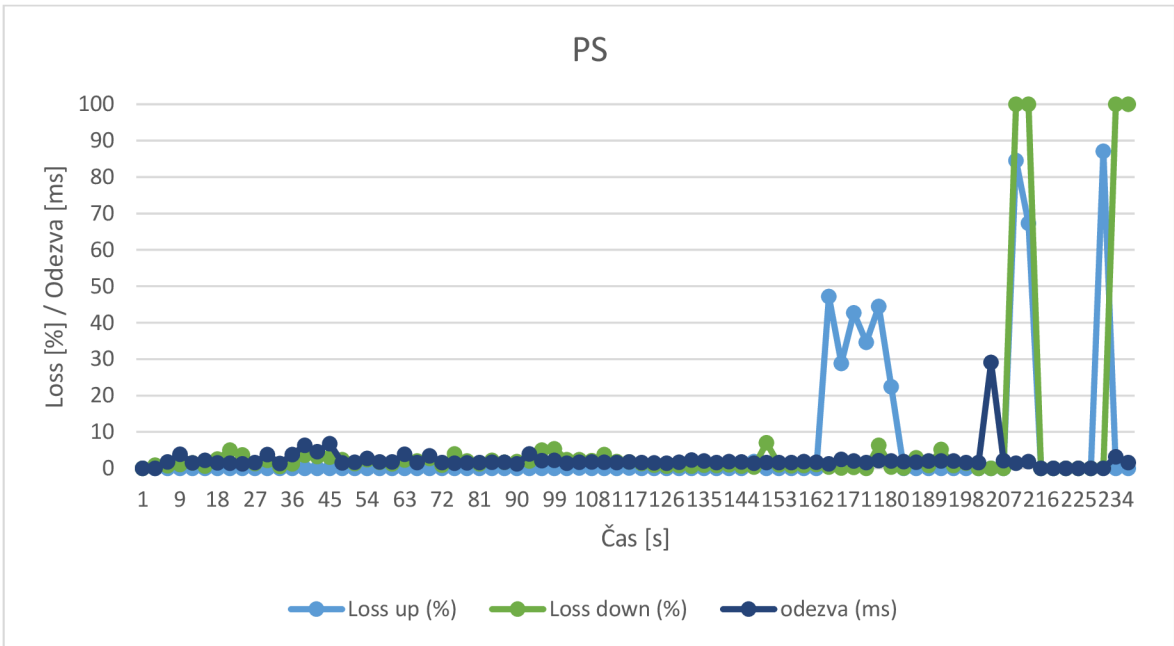
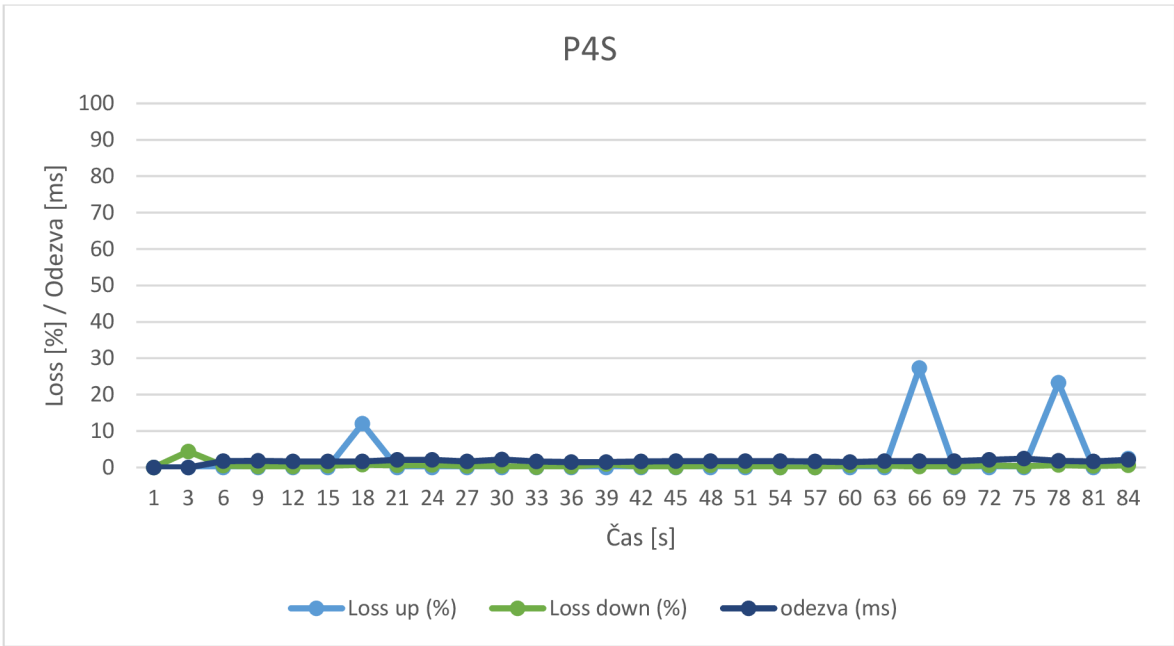


System Trulifi 6013



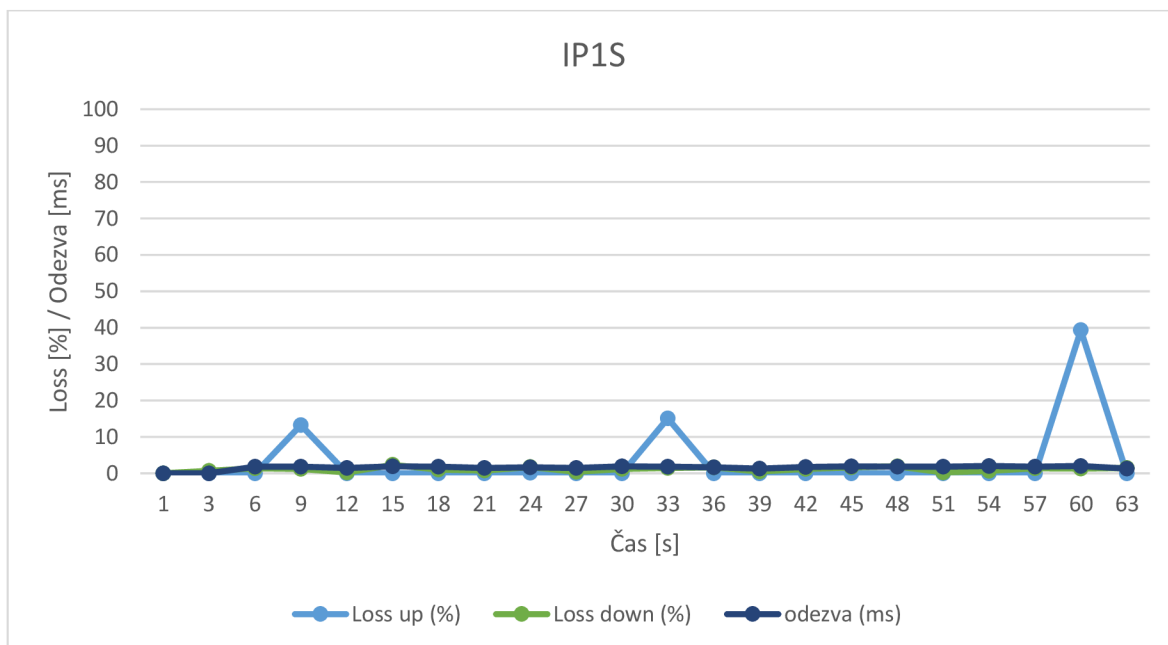
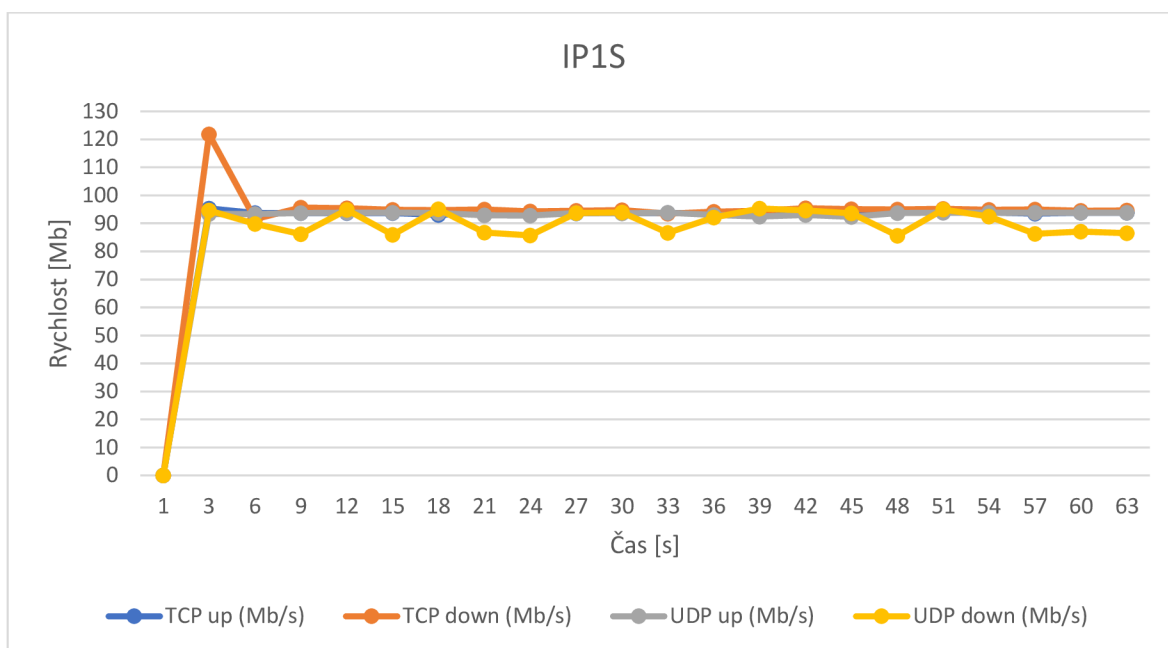


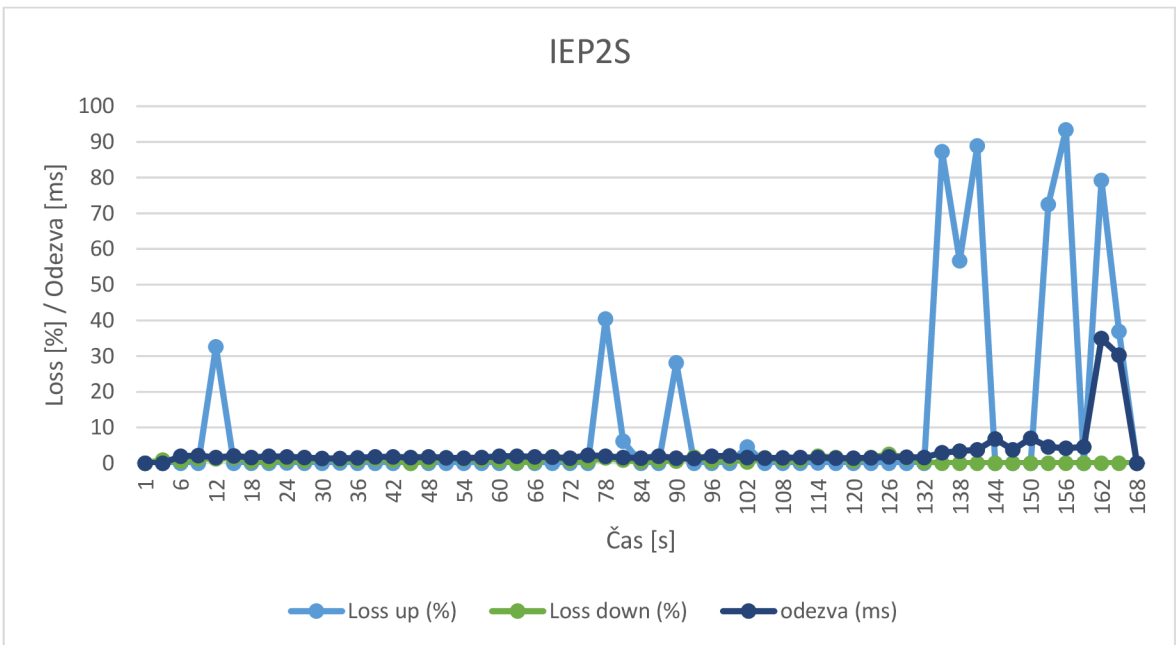
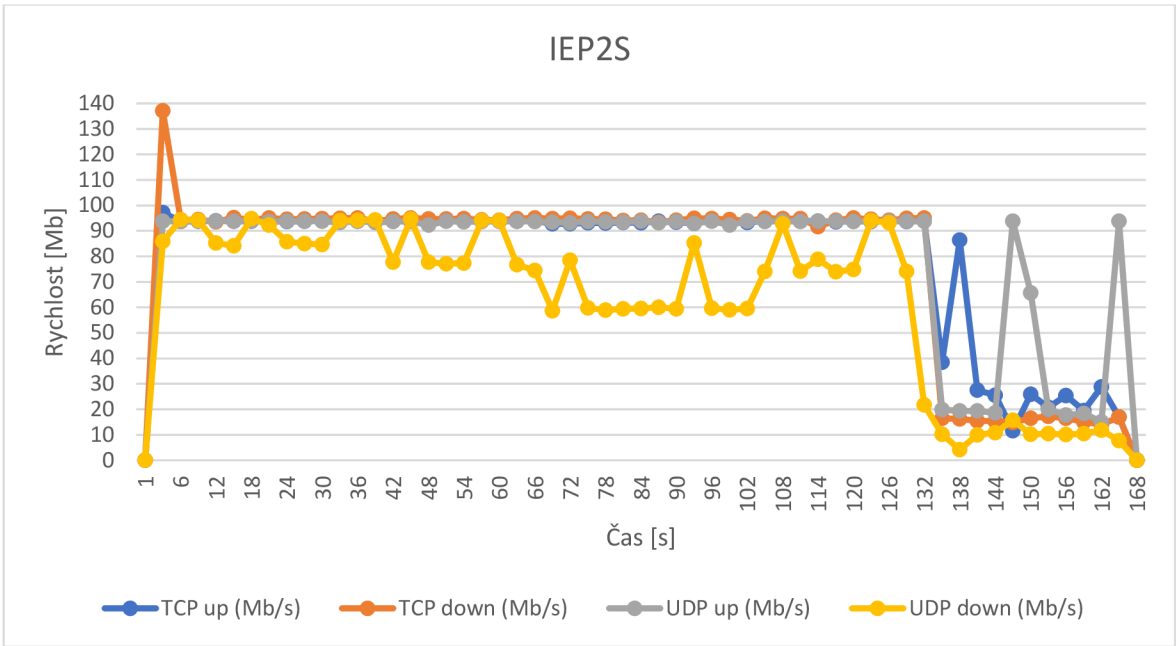


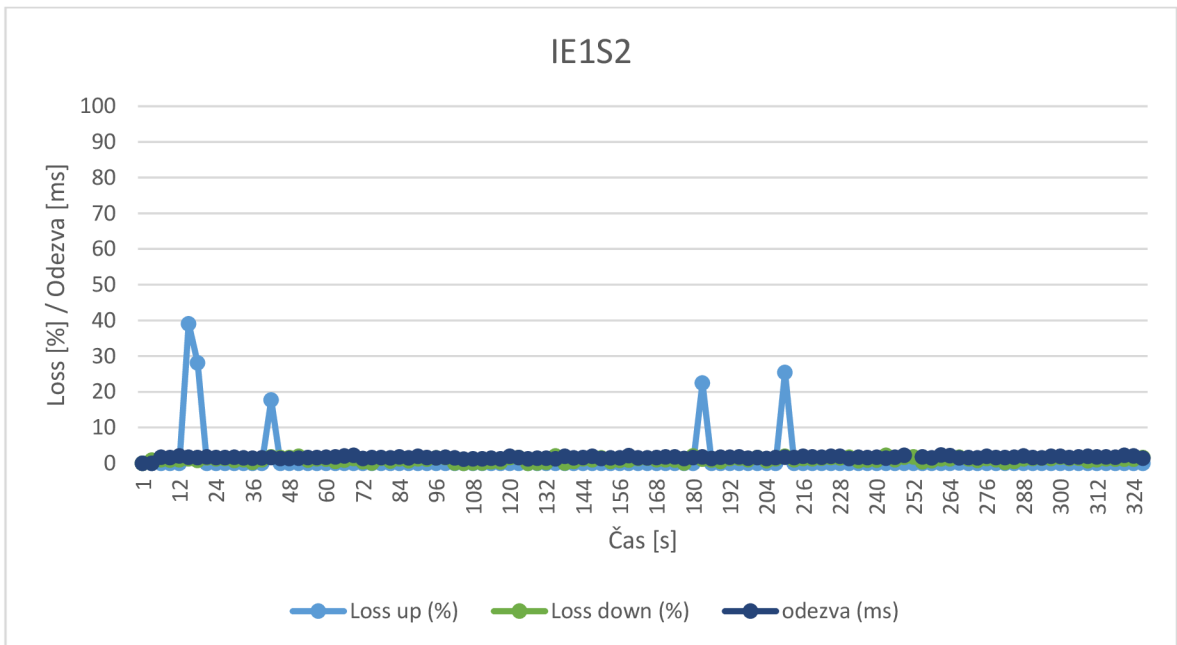
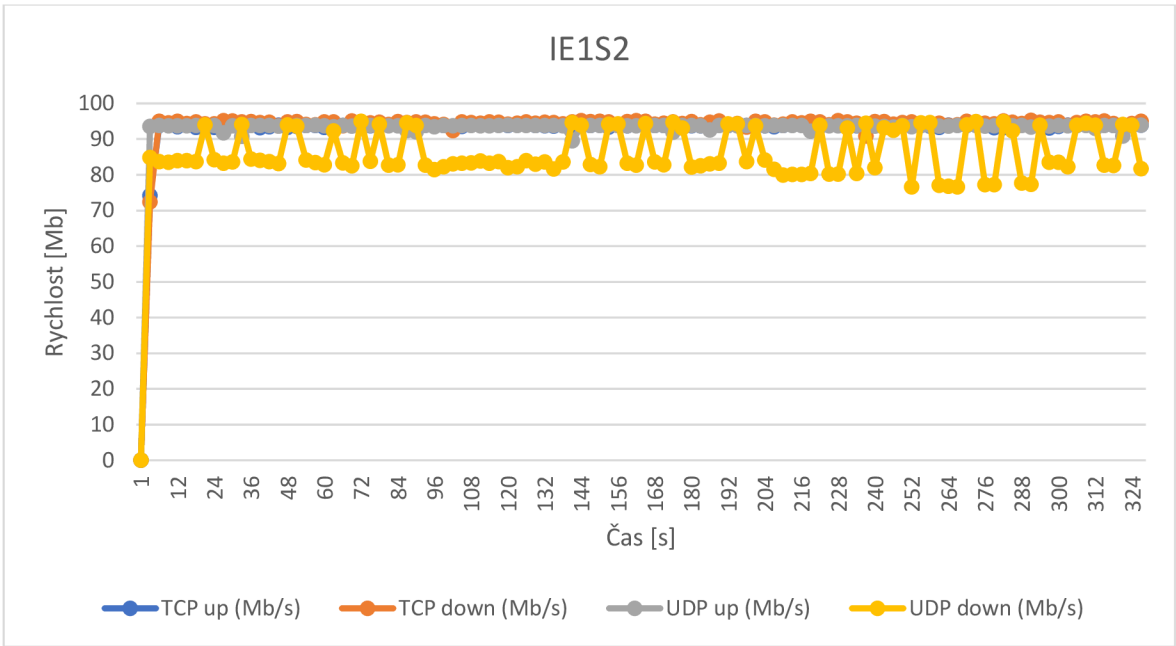


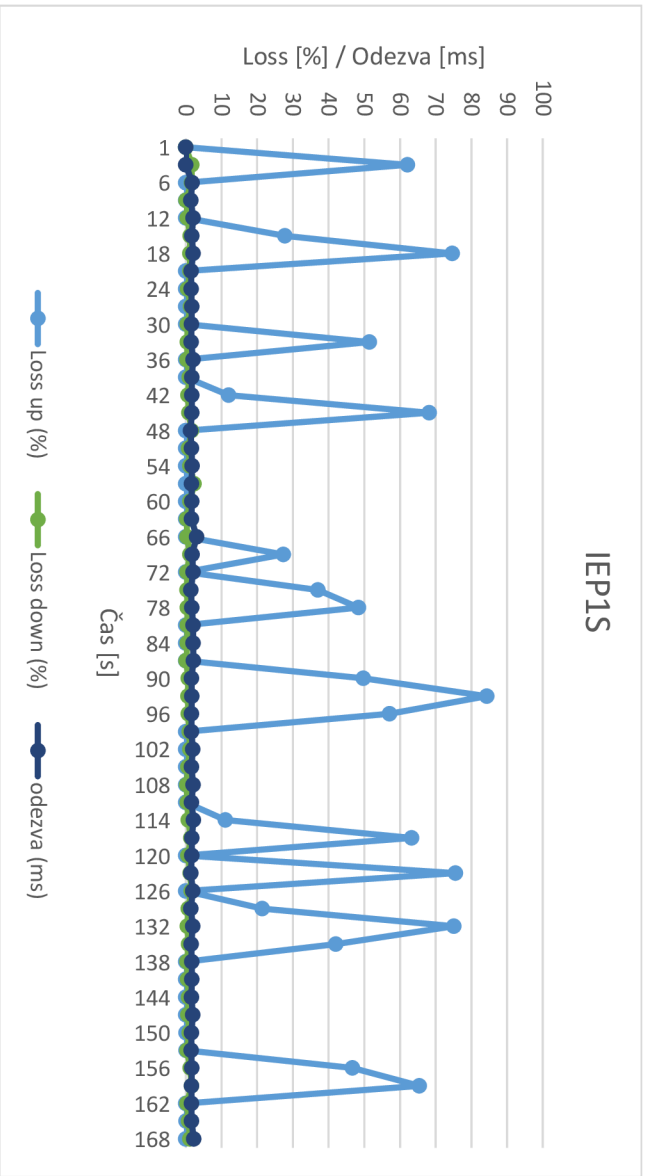
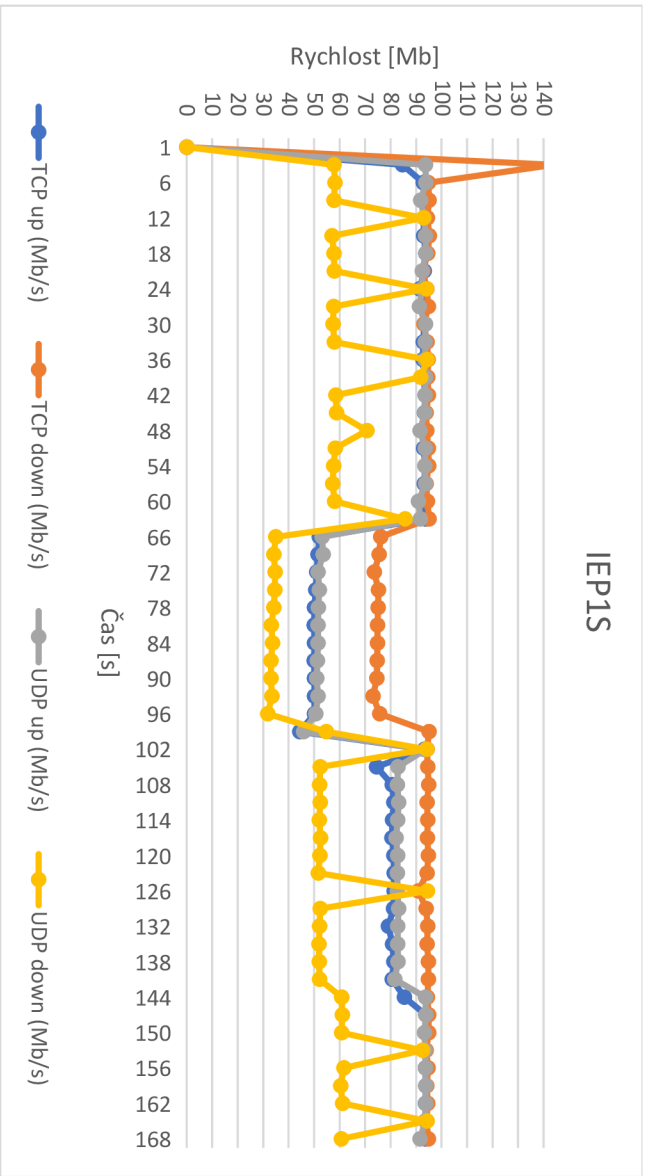
Příloha 2: Měření skrz materiál

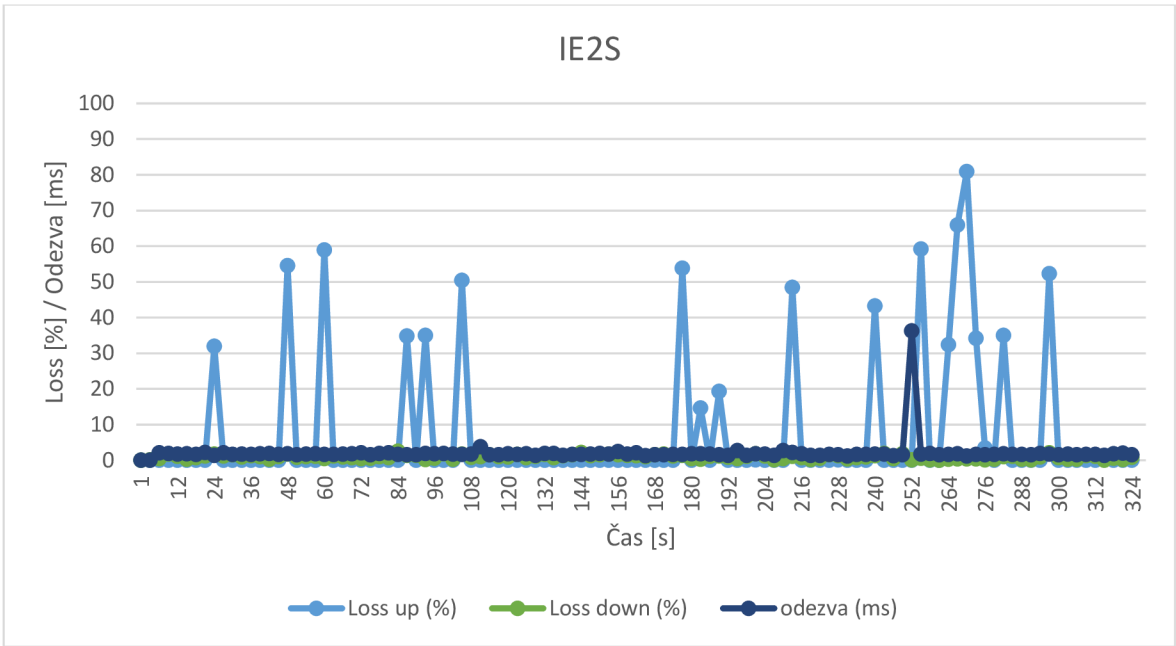
System Trulifi 6002



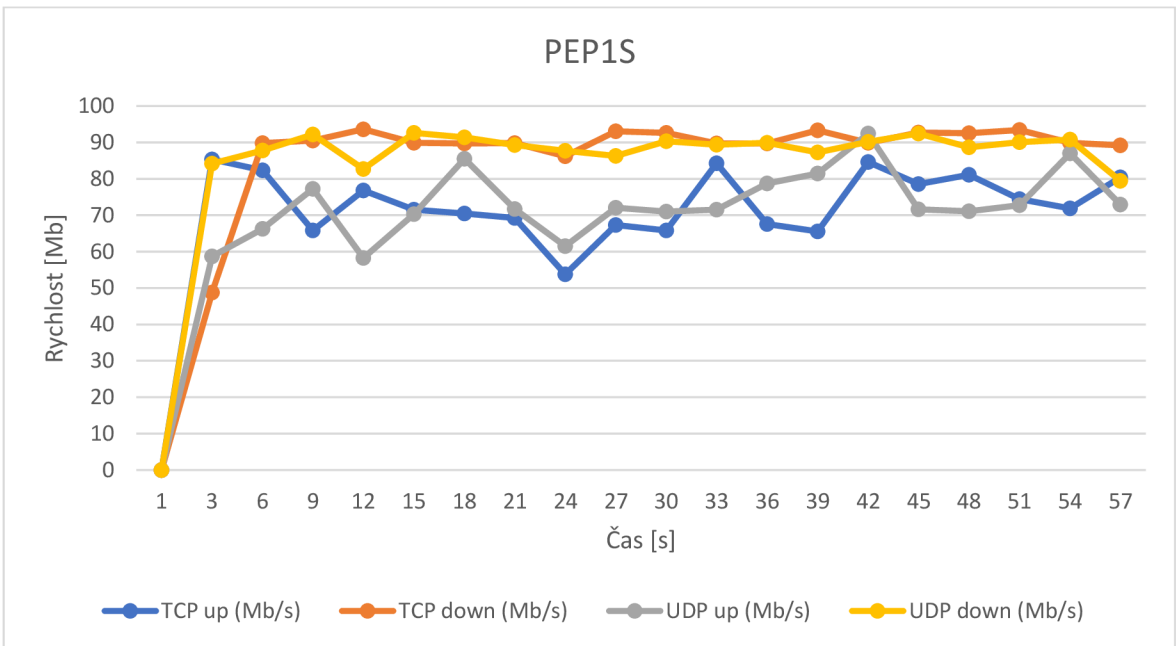


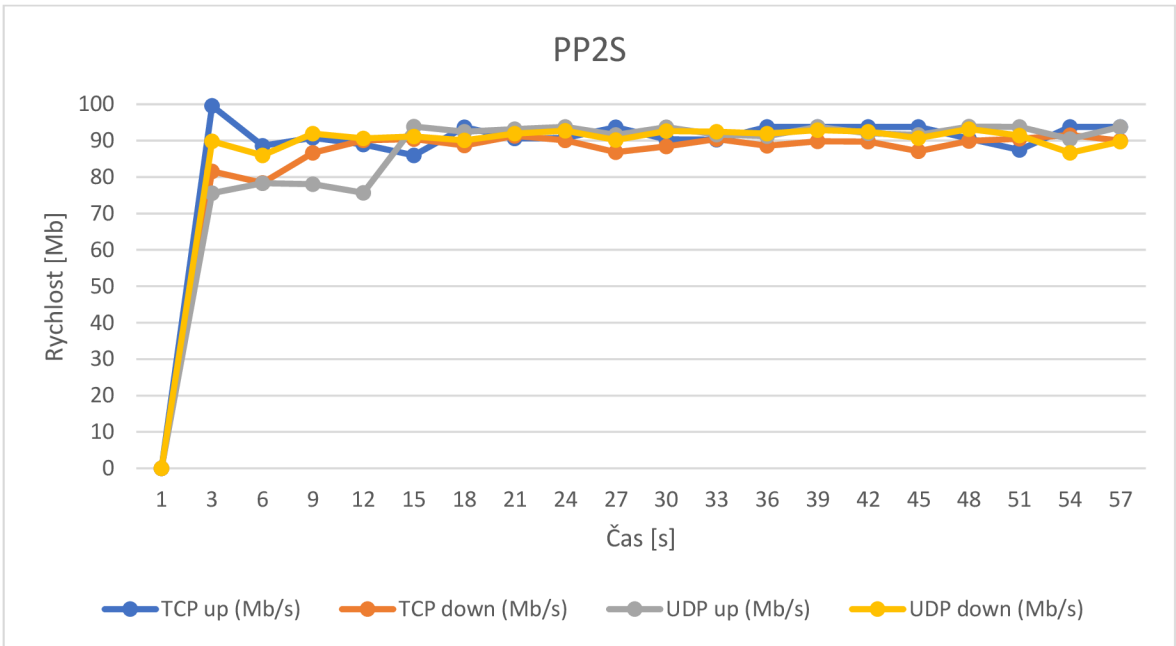
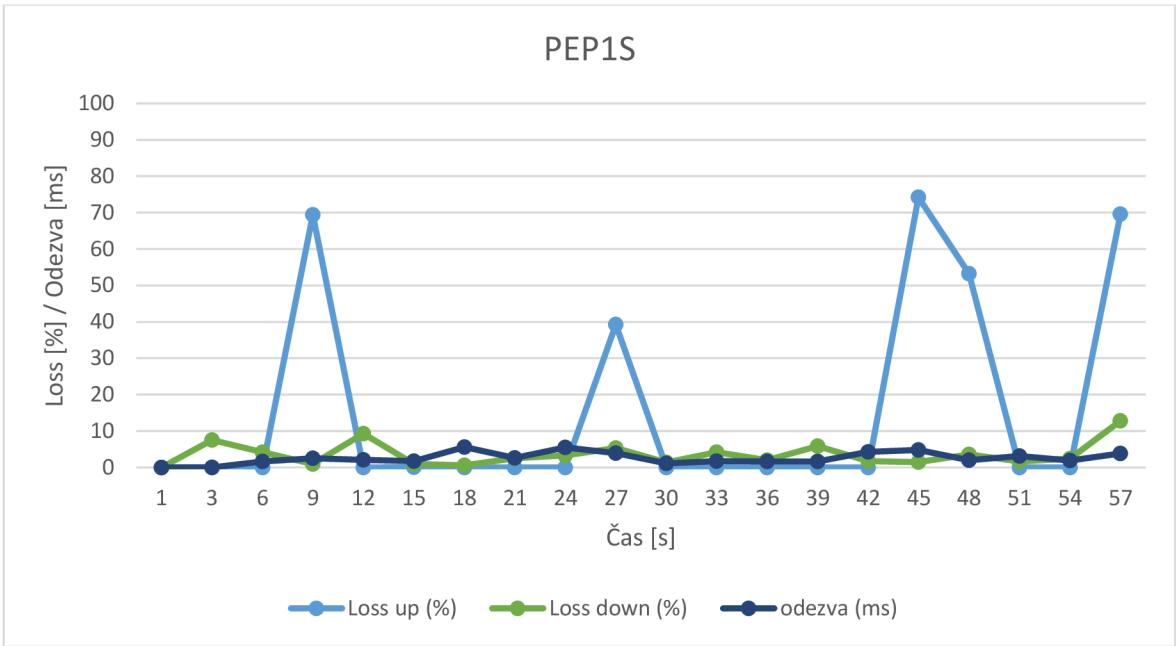


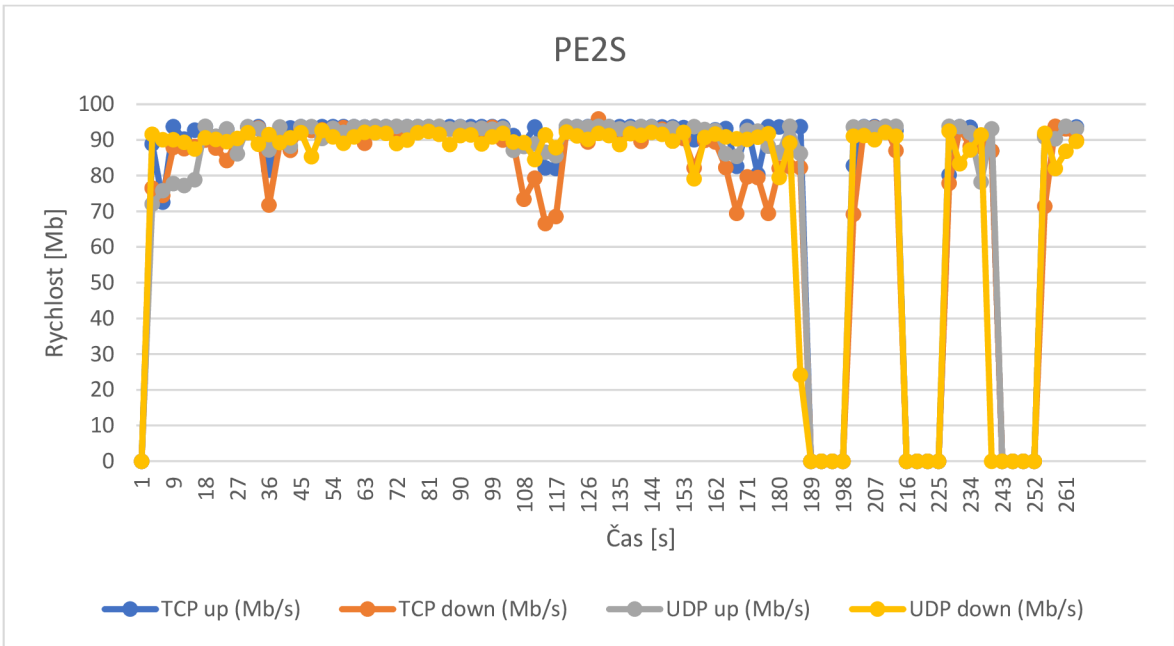
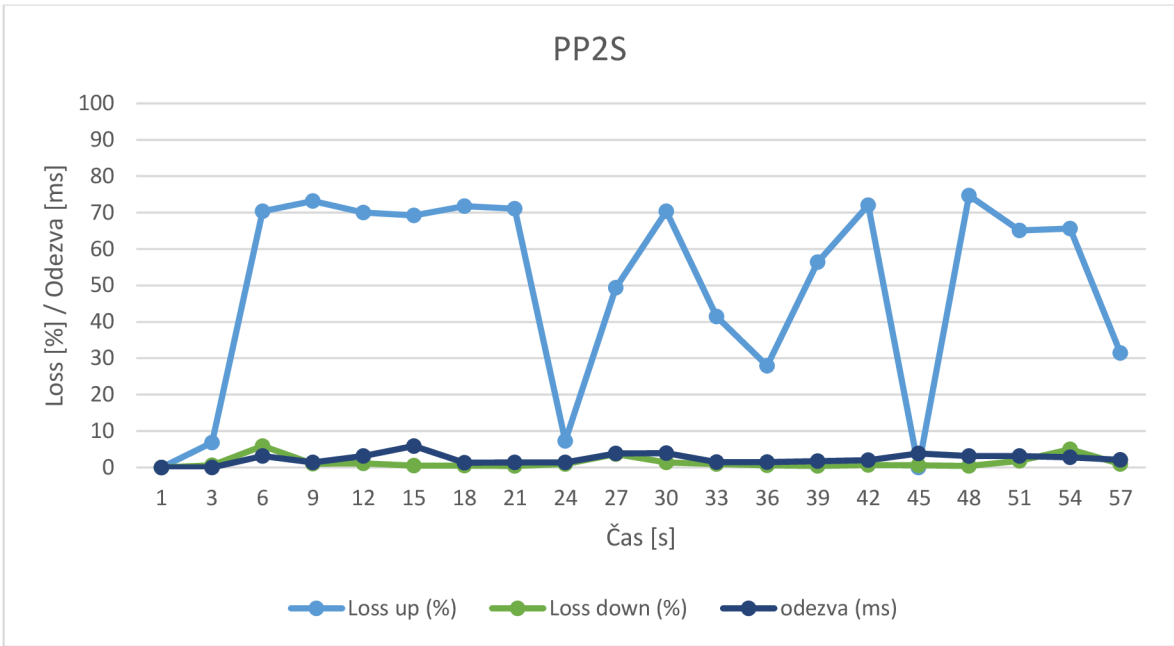


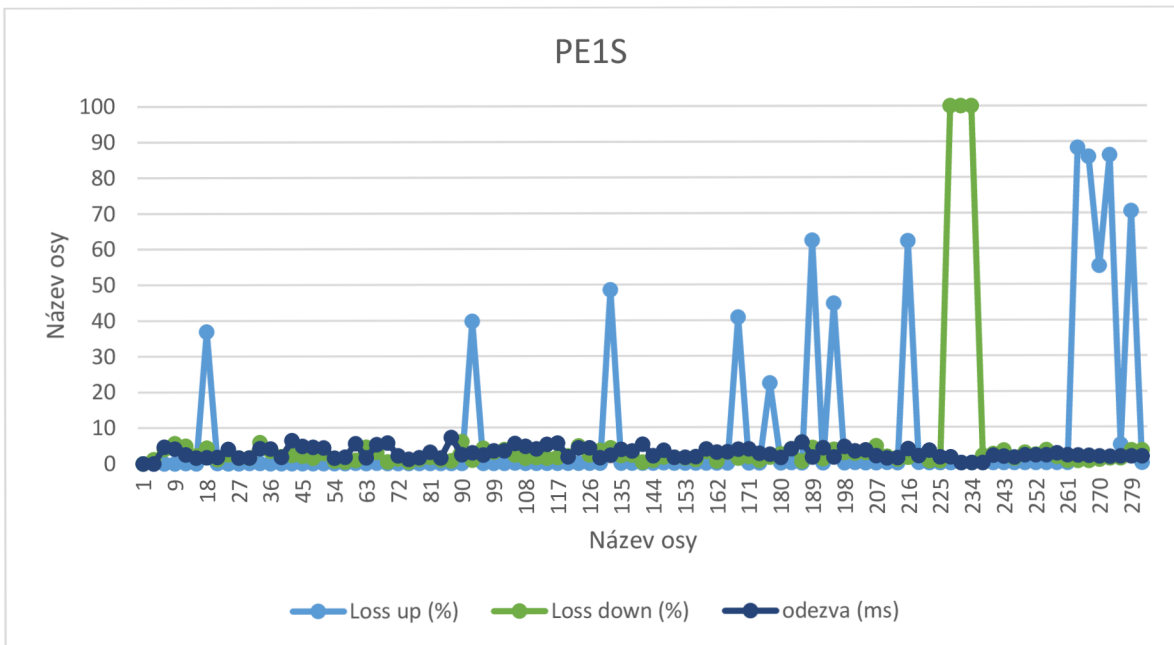
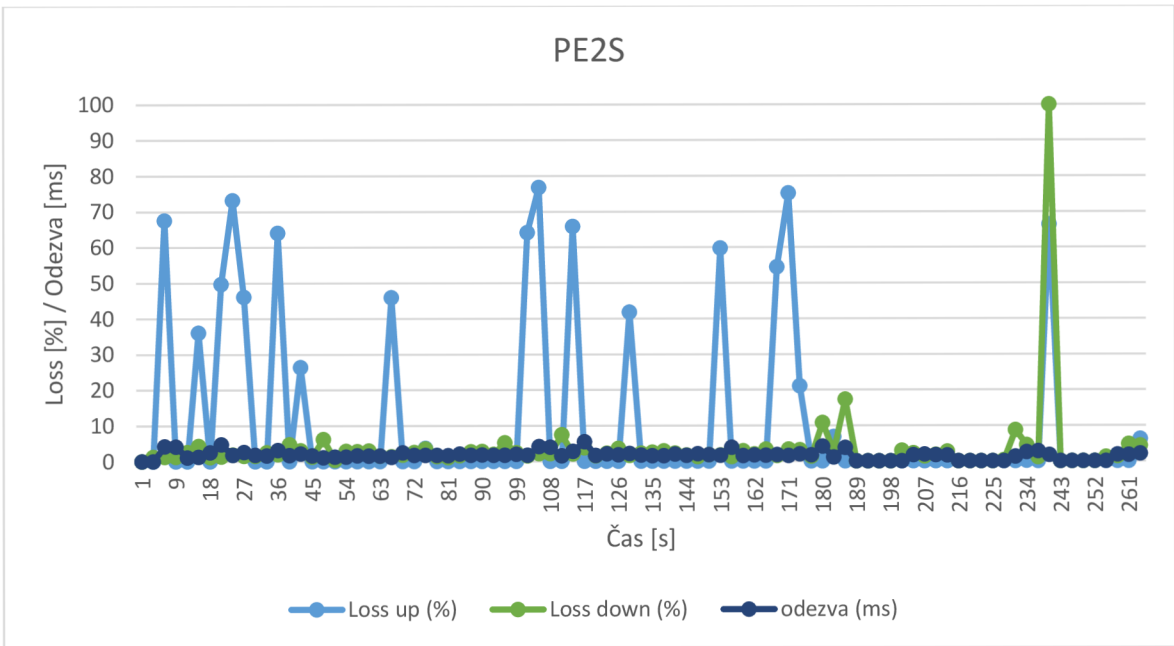


System Trulifi 6013



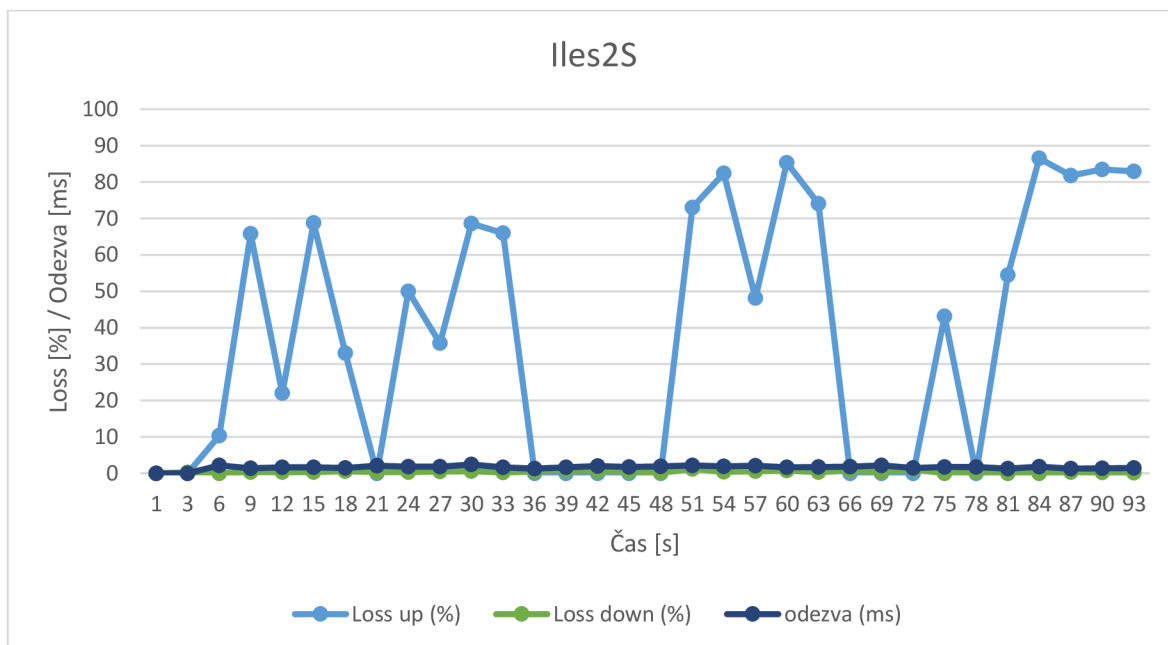
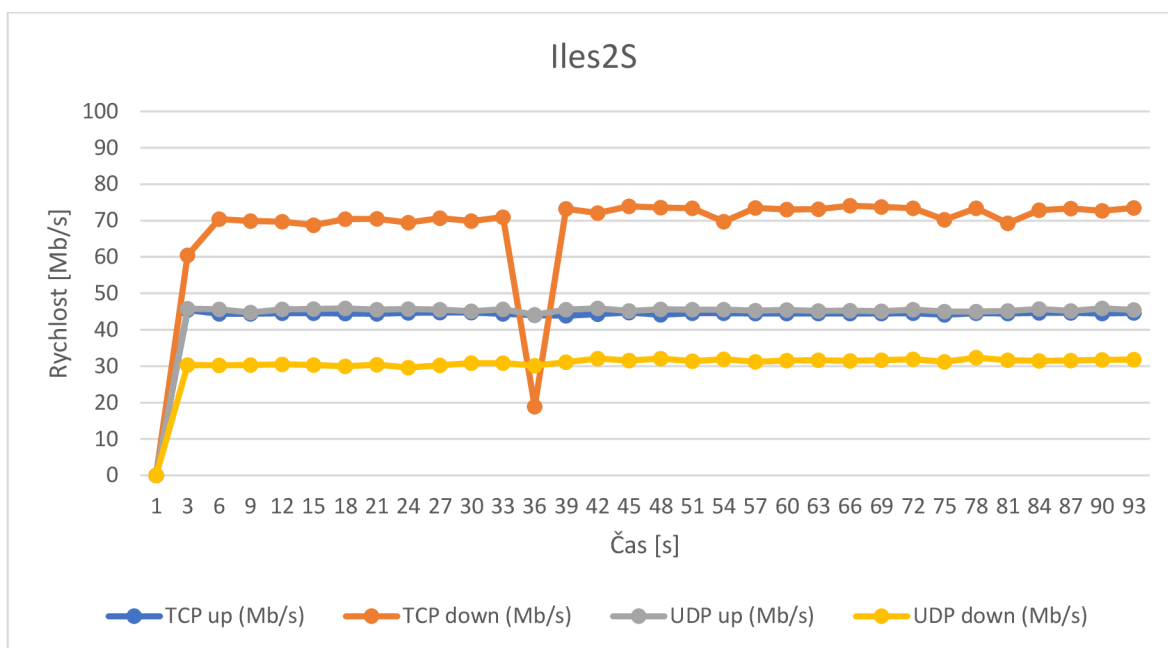


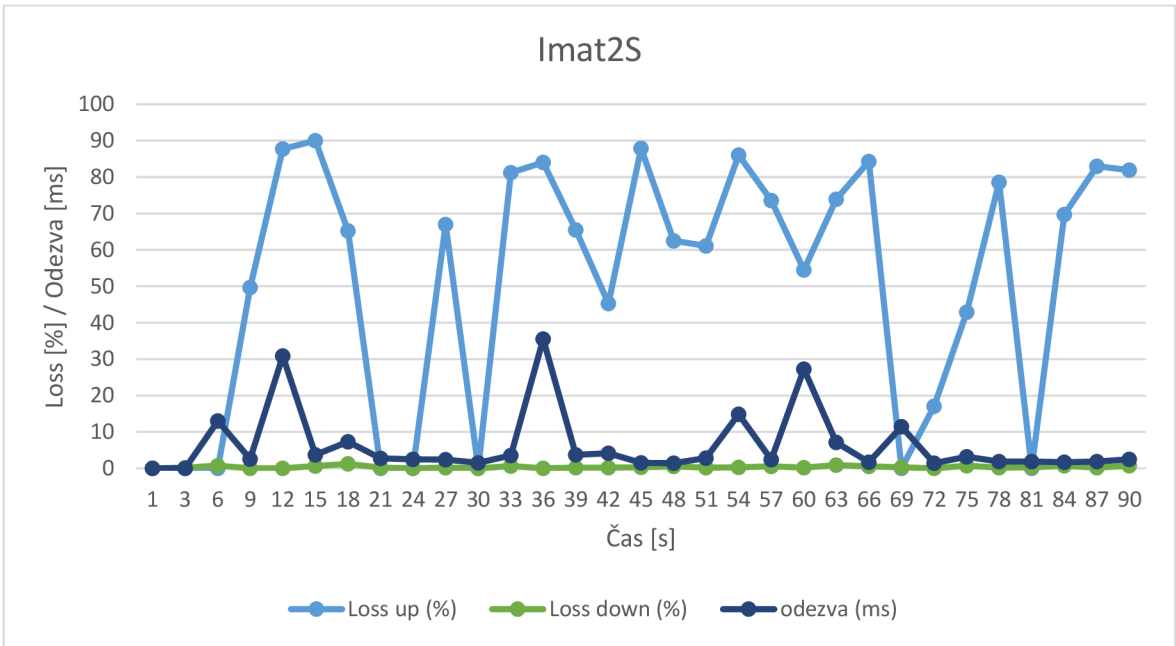
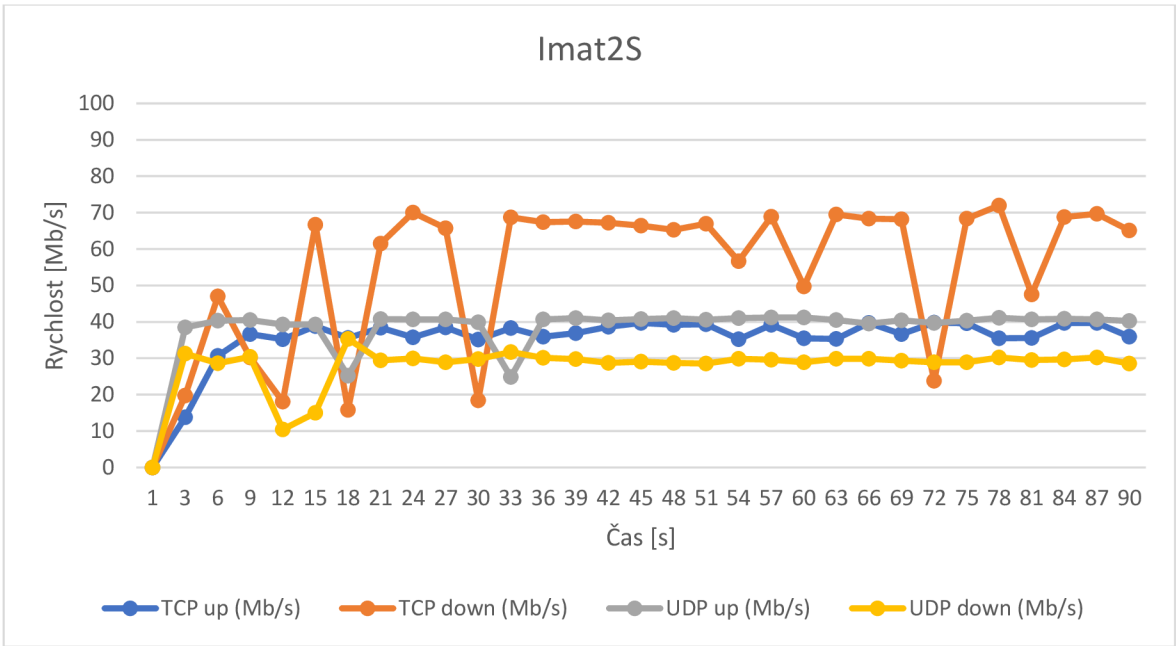


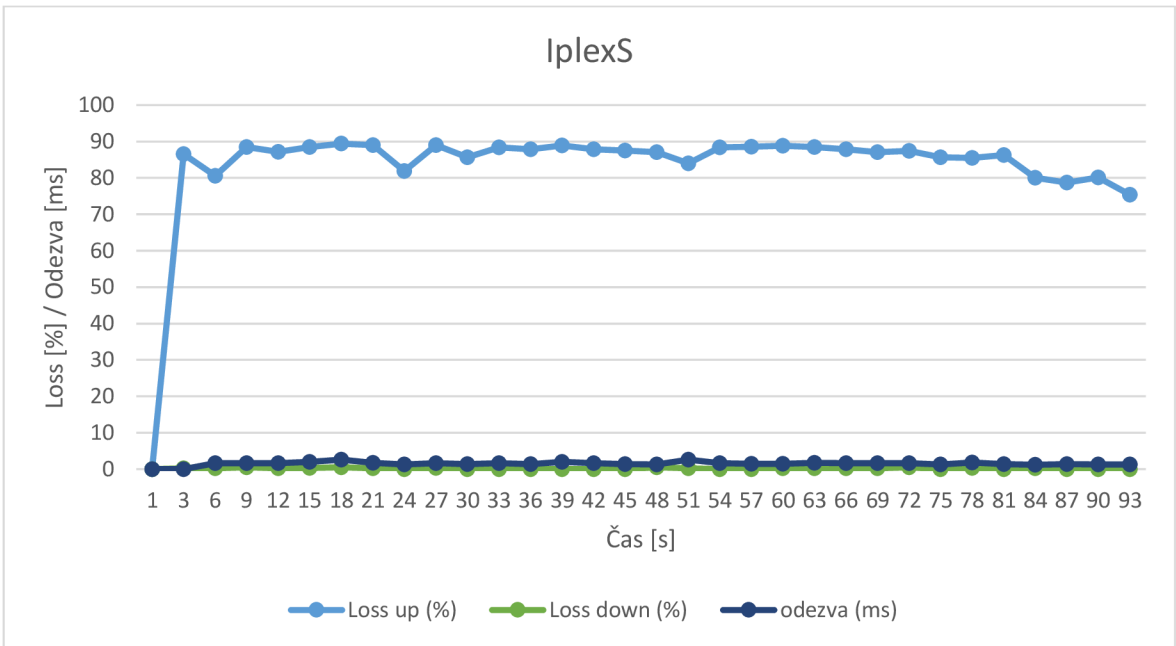
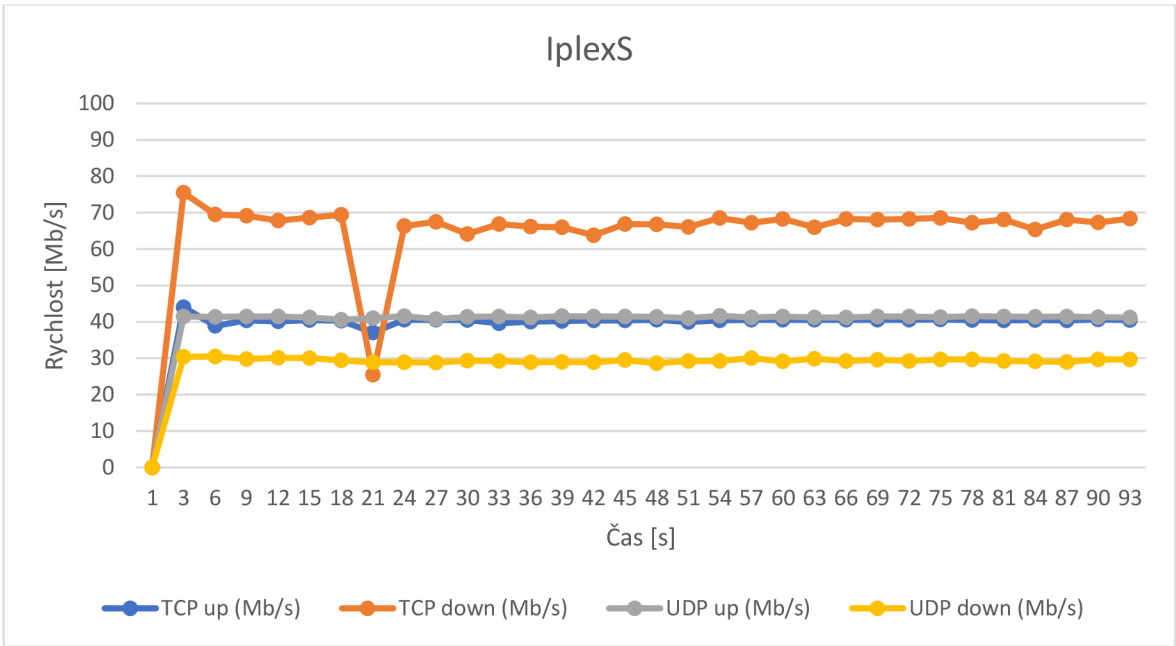


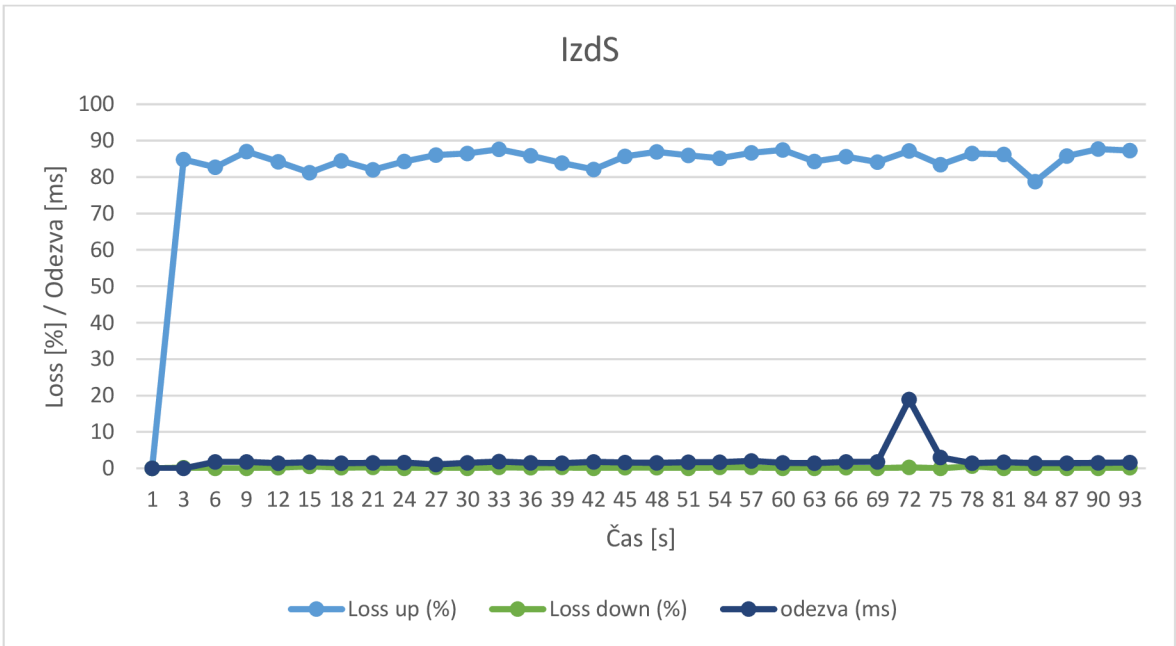
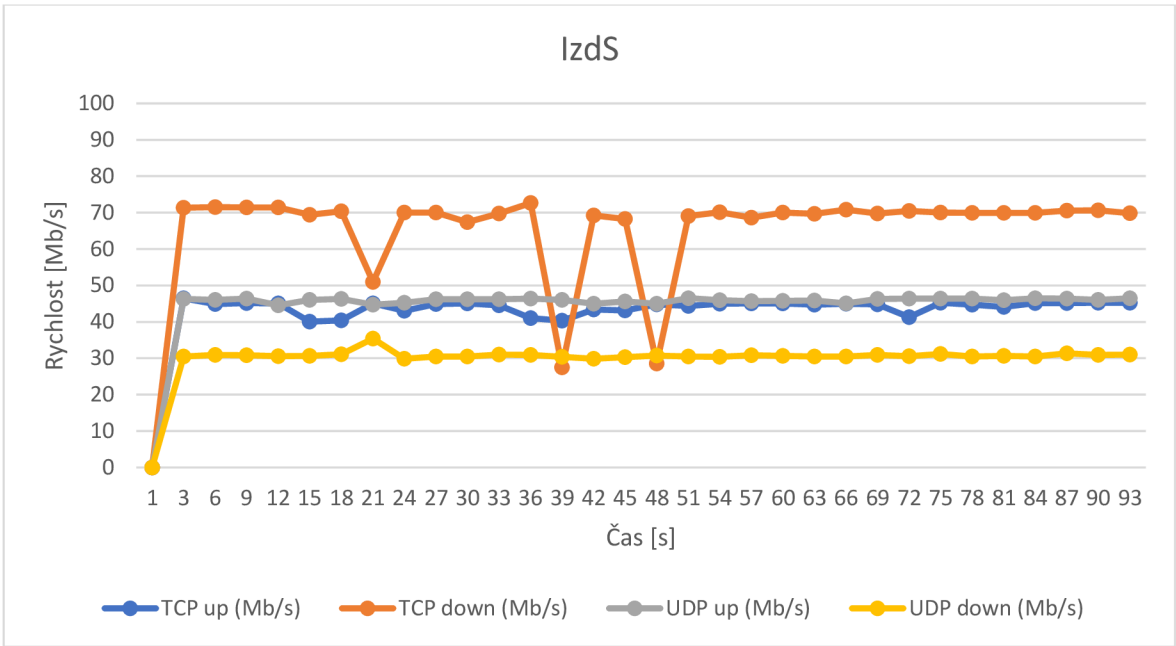
Příloha 3: Měření odrazem

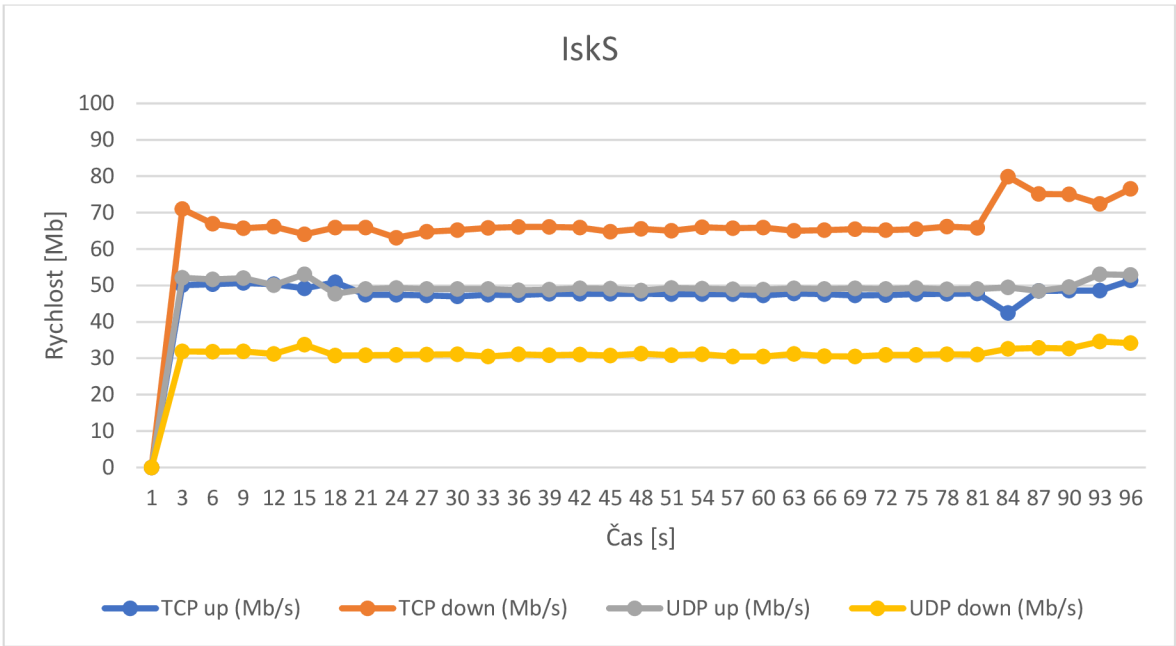
System Trulifi 6002



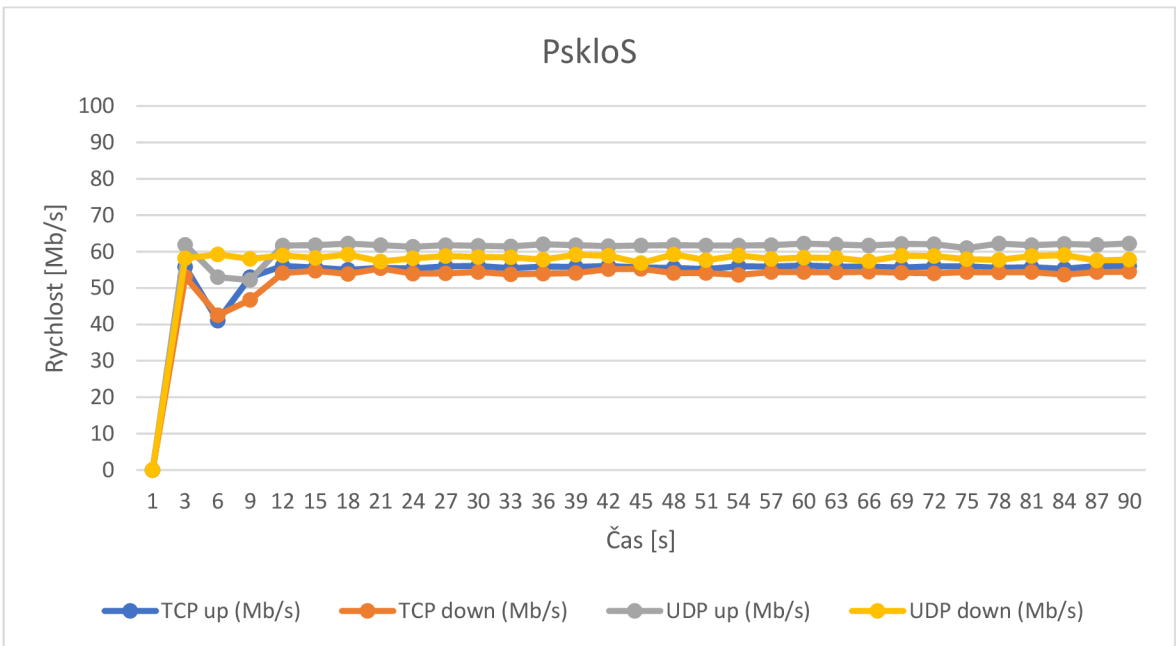


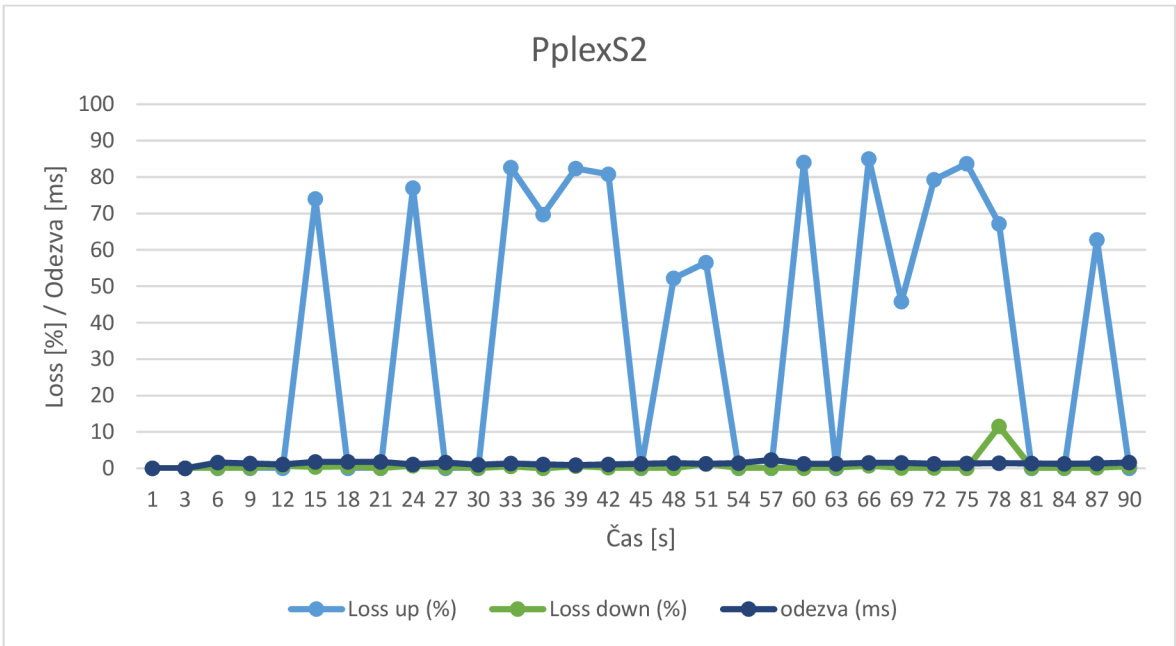
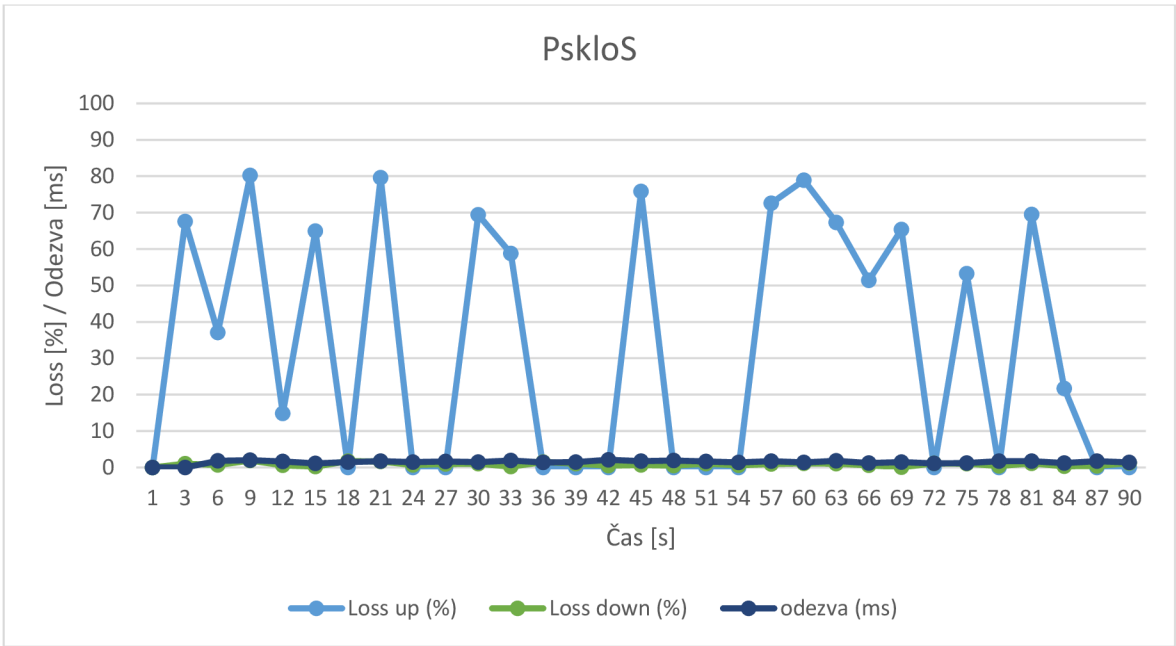






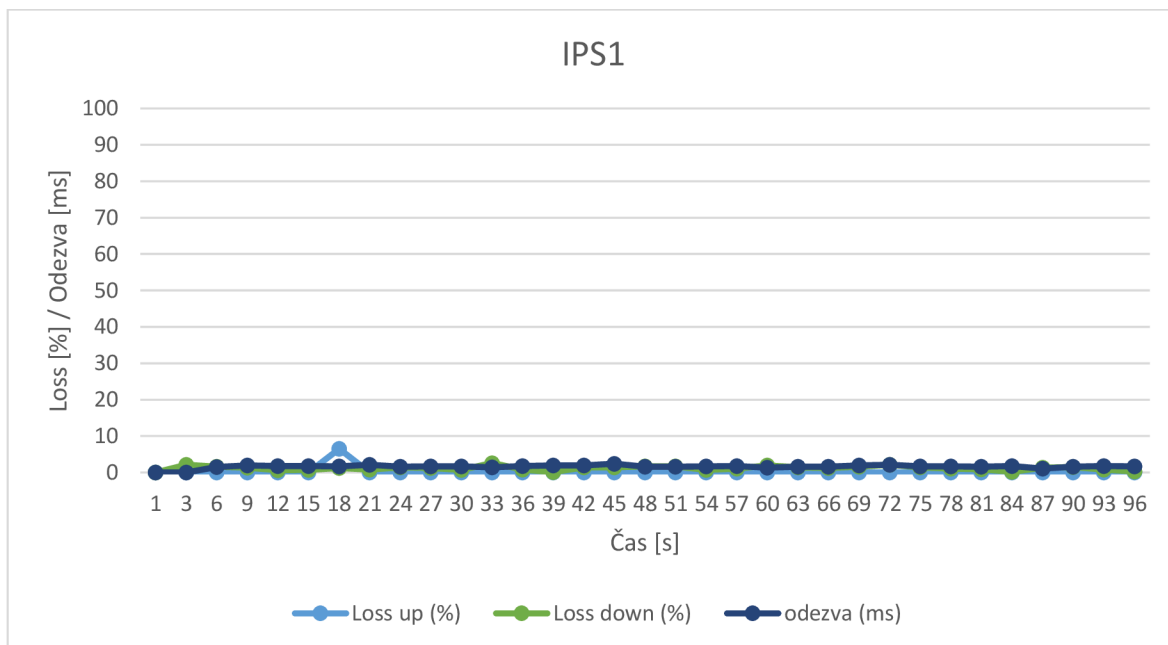
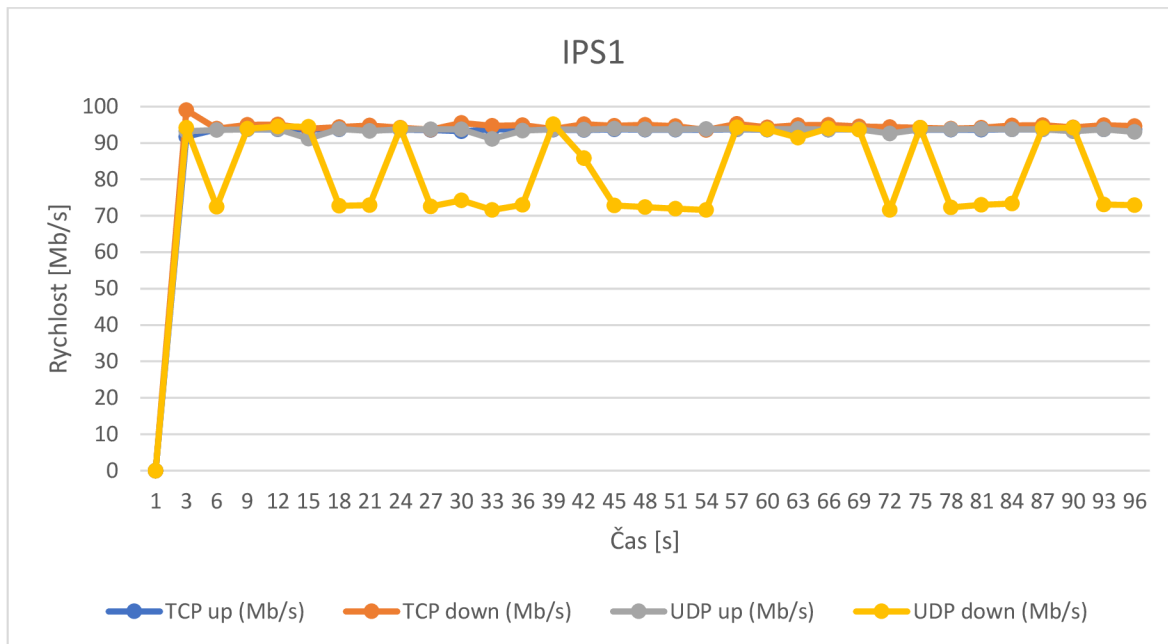
System Trulifi 6013

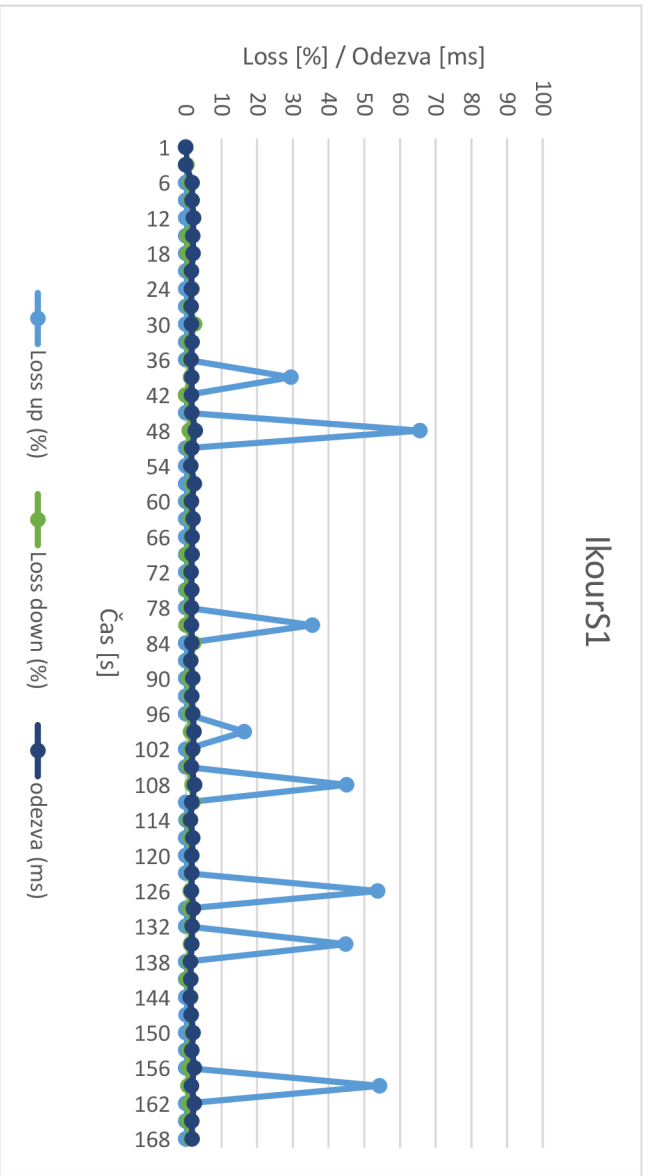
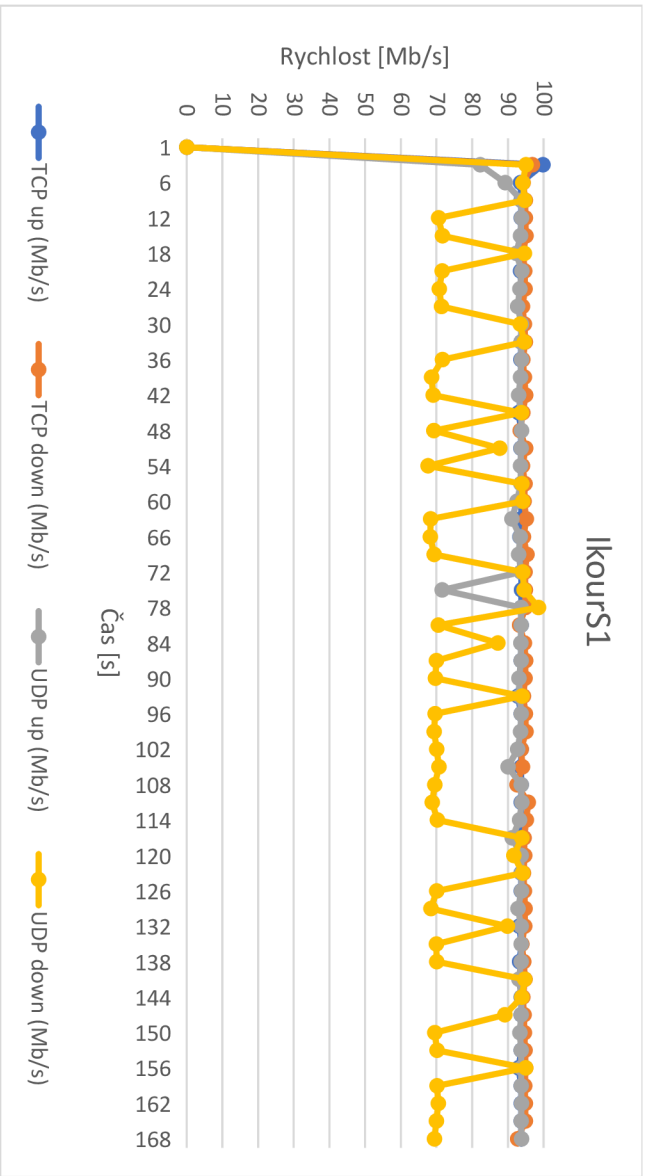


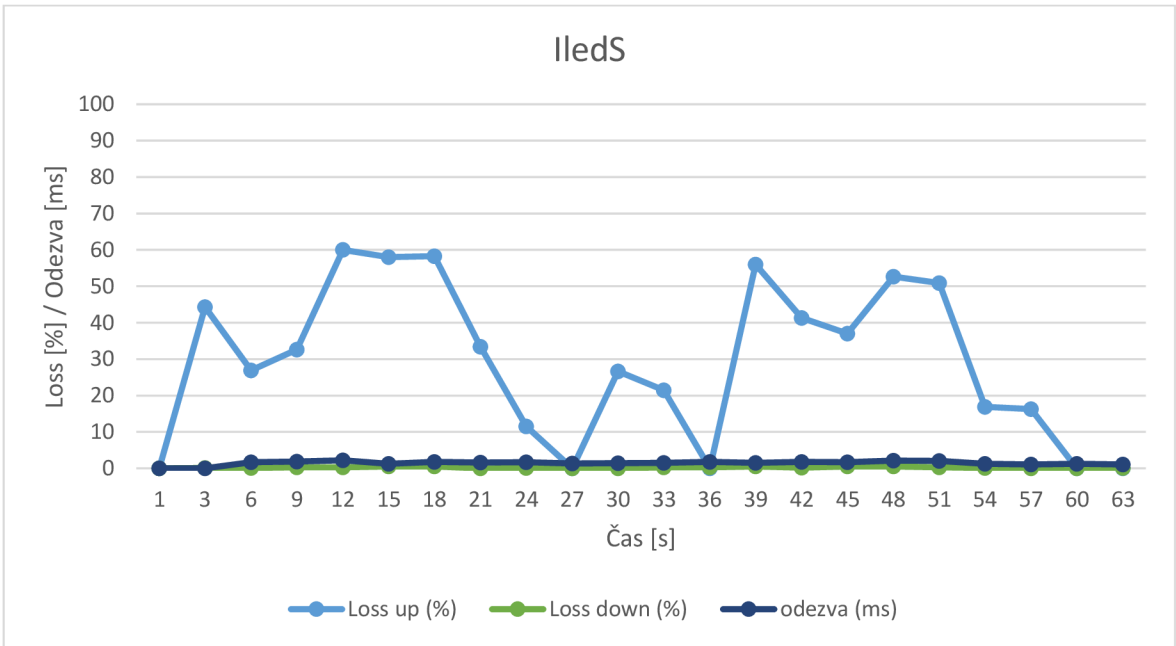
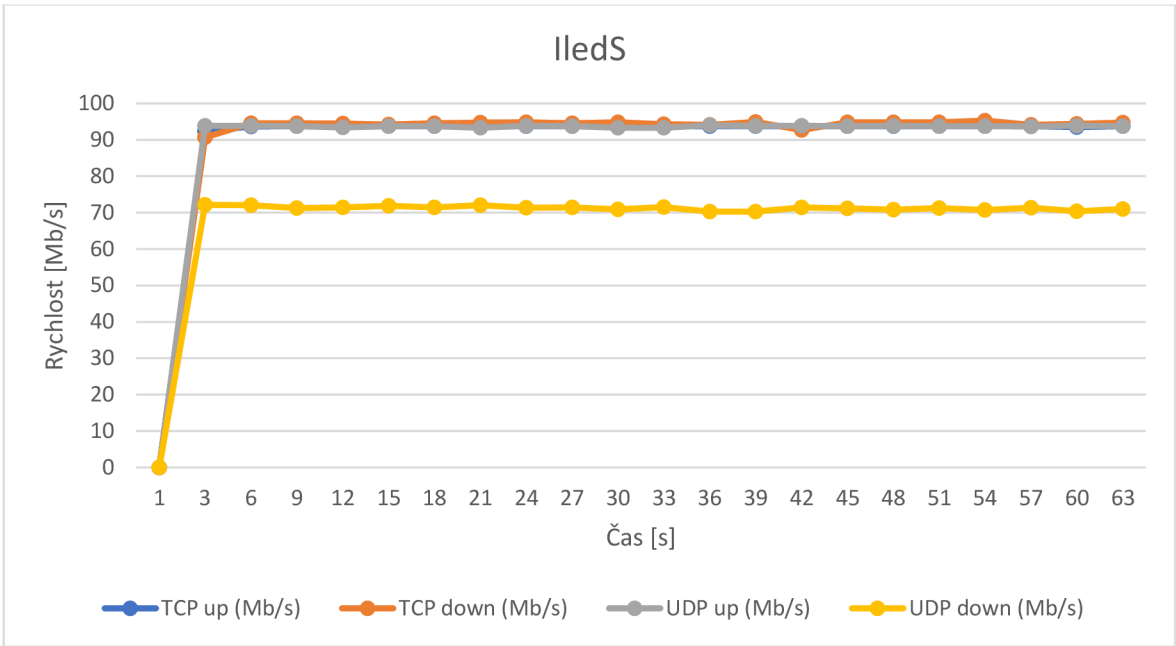


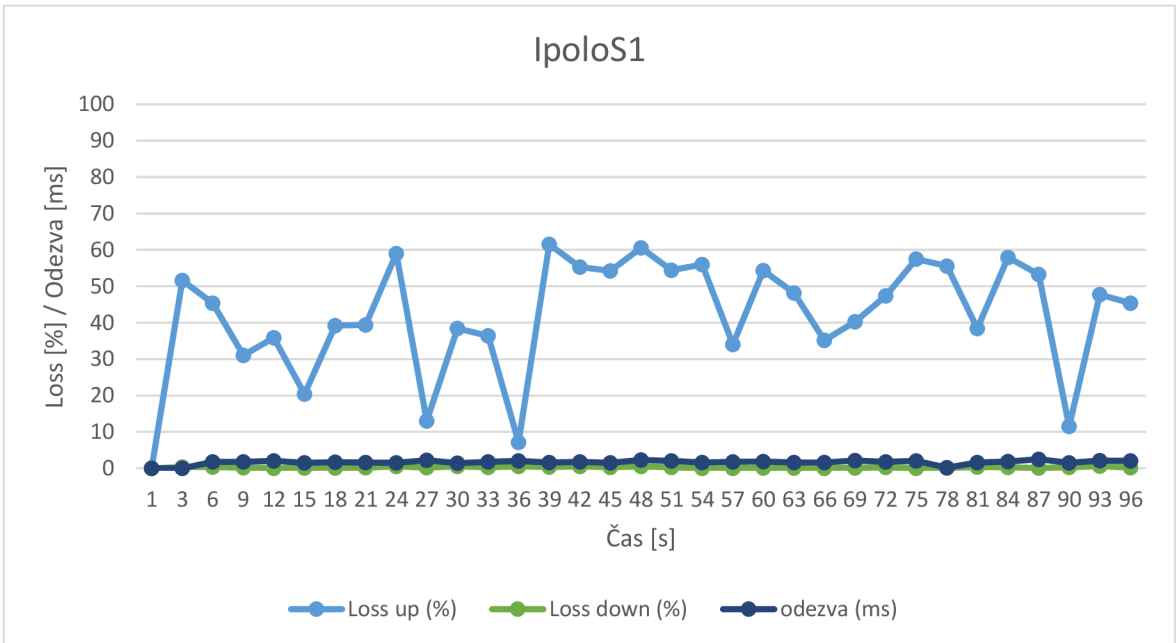
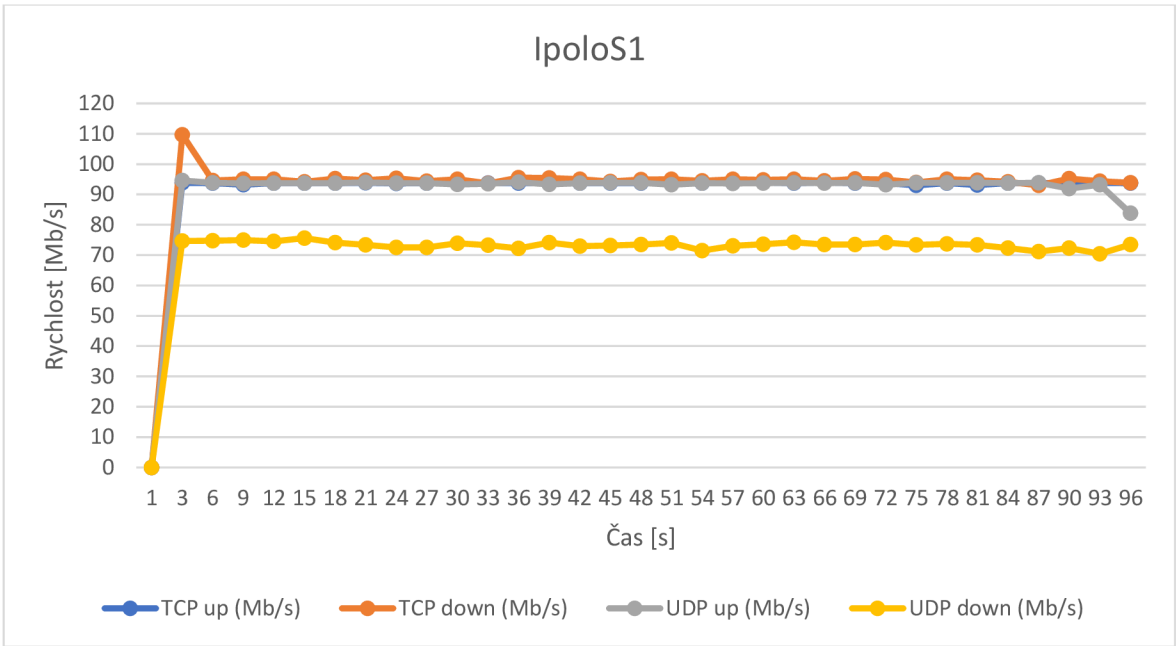
Příloha 4: Měření přes rušivé vlivy

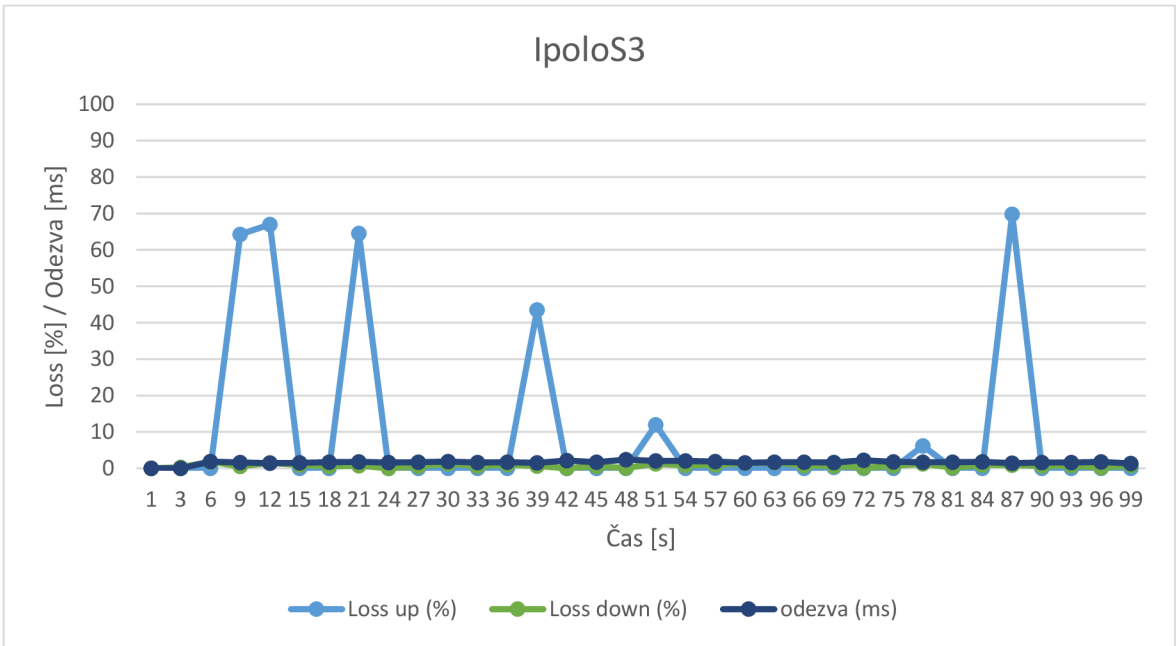
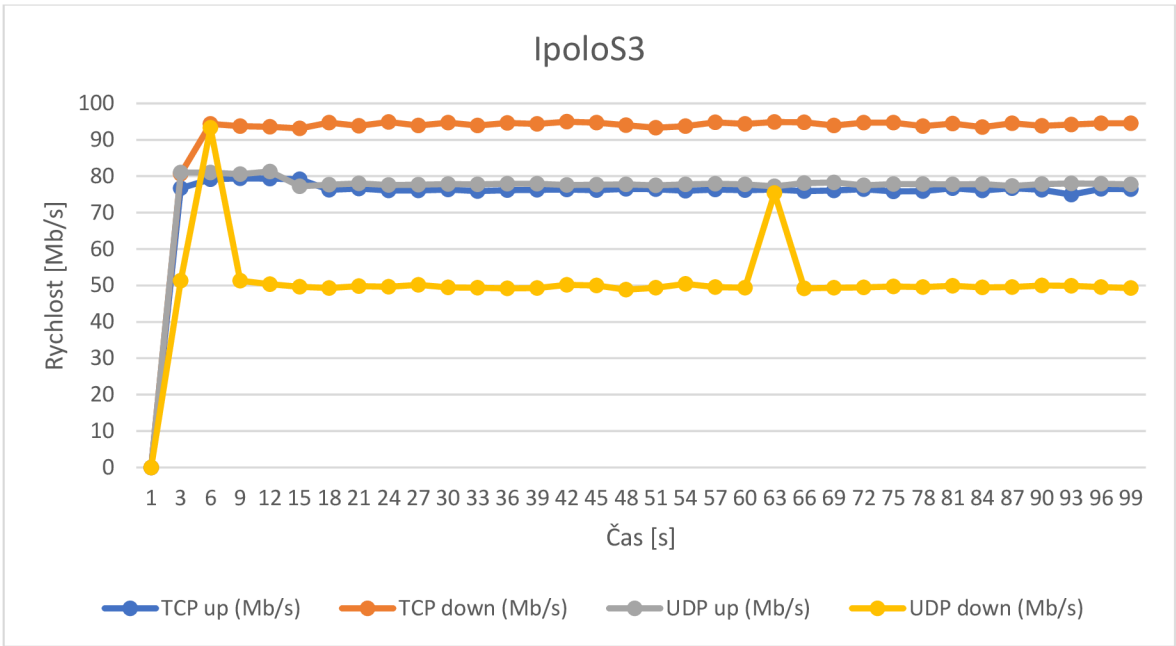
System Trulifi 6002











System Trulifi 6013

