

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra využití strojů



Bakalářská práce

Analýza stávajících mesh sítí

Jan Král

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Král

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Analýza stávajících mesh sítí

Název anglicky

Analysis of existing mesh networks

Cíle práce

Cílem práce je analyzovat a prakticky ověřit moderní trendy při realizaci mesh sítí nové generace. Zjištěné výsledky budou analyzovány jak z fyzikálního, tak i technologického hlediska a bude stanoven základní předpoklad použití těchto sítí.

Metodika

Na základě detailní literární rešerše student analyzuje fyzikální a technické možnosti mesh sítí dle jednotlivých frekvencí (síla signálu, úbytek síly signálu, pohlcování materiály) a na základě této analýzy definuje předpoklad fungování mesh sítě v definovaných podmínkách. Tuto hypotézu ověří prakticky. Výsledek praktického testování zobecní a definuje obecné zásady.

Doporučený návrh osnovy:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Analýza teorie mesh sítí
4. Praktické technologie a frekvence využívané v mesh sítích
5. Nasazení mesh sítí v domácích a komerčních prostorách
6. Bezpečnost
7. Praktické ověření funkce
8. Finanční zhodnocení
9. Závěr a doporučení

Doporučený rozsah práce

30 až 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

mesh, počítačová síť, bezpečnost, IoT

Doporučené zdroje informací

firemní literatura

HELD, G. *Wireless Mesh Networks*, Taylor & Francis Ltd · 2019 , ISDN: 224214381

RANI, Alka; KUMAR, Nirmal; SINGH, S.K.; SINHA, N.K.; JENA, R.K.; PATRA, Himesh. *Remote sensing data analysis in R*. Abigdon: CRC Press, 2021. ISBN 978-0-367-72562-4.

SHARDA, Ramesh; DELEN, Dursun; TURBAN, Efraim. *Analytics, data science, & artificial intelligence : systems for decision support* /. Harlow: Pearson Education Limited, 2021. ISBN 978-1-292-34155-2.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra využití strojů

Elektronicky schváleno dne 10. 3. 2023

doc. Ing. Petr Šařec, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2024

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Analýza stávajících mesh sítí vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla“

V Praze dne 24. 3. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Zdeňku Votrubovi, Ph.D. za vedení a konzultace při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při tvorbě mé bakalářské práce.

Analýza stávajících mesh sítí

Abstrakt

Práce řeší fyzikální a technologické fungování mesh sítí. Na základě literární rešerše byla navržena metodika testování a ověřování teoretických vztahů. První část práce se zabývá historií mesh sítí a fyzikálním principem bezdrátového přenosu. Dále je analyzováno fungování mesh sítě, vybrané směrovací protokoly a některé přenosové standardy použitelné na mesh síti. Zvláštní kapitolou práce je popis zabývající se bezpečností. V praktické části je provedeno měření na mesh síti v domácím použití. Při měření byla zjišťována doba připojení klienta mezi mesh stanicemi, přenosová rychlost a síla signálu v patrovém domě.

Klíčová slova: mesh, počítačová síť, bezpečnost

Analysis of existing mesh networks

Abstract

The thesis deals with the physical and technological functions of mesh networks. Based on literature research, a methodology for testing and validating the theoretical relationships was proposed. The first part of the thesis deals with the history of mesh networks and the physical principles of wireless transmission. Then the mesh network operation, selected routing protocols and some transmission standards applicable to mesh network are analysed. A special part of the thesis deals with security. In practical part measurements are made on mesh network in domestic use. During the measurements the client switching time between mesh nodes, the transmission rate between mesh nodes and the signal strength in the detached house was measured.

Keywords: mesh, computer network, security

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce a metodika	2
2.1 Cíl práce	2
2.2 Metodika	2
3 Teoretická východiska mesh sítí	3
3.1 Historie	3
3.2 Multihop vs. Singlehop	4
3.3 Komunikace bod a bod vs. bod a multibod	4
3.4 Fyzikální popis přenosu	5
3.4.1 Fyzikální výpočty přenosu signálu	6
3.4.2 Průchod, odraz, difrakce a rozptyl signálu	7
3.4.3 Dopplerův jev	8
3.4.4 Modulace signálu	8
3.5 Anténa	10
4 Mesh síť	12
4.1 Důvod vzniku bezdrátových mesh sítí	12
4.2 Komponenty mesh sítě	13
4.3 Architektura sítě	13
4.4 Výhody mesh sítě	14
4.5 Nevýhody mesh sítě	14
4.6 Propojení mesh uzlů	15
4.6.1 Rozdíly využití mesh sítě a wifi extenderu	15
4.6.2 Nevýhody Wi-Fi směrovačů	15
4.7 Navazování spojení mezi mesh uzly	15
4.8 Směrovací protokoly	16
5 Bezpečnost mesh sítě	19
5.1 Specifické problémy mesh sítě	19
5.2 Obranné mechanismy	21
5.2.1 Prevence před vniknutím	21
5.2.2 Detekce po vniknutí	21
6 Komunikační a přenosové standardy	22
6.1 Standard IEEE 802.11s	22
6.2 Bluetooth/BLE	22
6.3 Zigbee.....	23
6.4 Thread	24

7 Praktická část	25
7.1 Popis mesh zařízení využitého k měření	25
7.1.1 Popis SW použitého k měření	25
7.1.2 Popis HW použitého k měření	26
7.2 Měření přenosových rychlostí na mesh síti	26
7.3 Heatmapa	26
7.4 Měření doby přepojování mezi mesh uzly	28
7.4.1 Výsledky měření č.1	30
7.4.2 Výsledky měření č.2	33
7.4.3 Výsledky měření č.3	36
8 Závěr.....	39
9 Seznam použitých zdrojů	40
10 Přílohy	i

Seznam obrázků

Obr. 1 Armádní použití MANET	3
Obr. 2 Frekvence – vlevo frekvence = 2, vpravo frekvence = 1.....	5
Obr. 3 Přenos signálu: 1 – průchod, 2 – difrakce, 3 – odraz, 4 – rozptyl signálu.....	8
Obr. 4 Dopplerův jev	8
Obr. 5 Modulace QAM.....	9
Obr. 6 DSSS přenos 2 bitů dat.....	10
Obr. 7 Mesh síť: a – plná mesh, b – částečná mesh.....	12
Obr. 8 Mesh komponenty	13
Obr. 9 OLSR (A je vysílající uzel, MPR je označen šedě).....	17
Obr. 10 AODV stromová struktura.....	17
Obr. 11 Červí díra	21
Obr. 12 TP-Link Deco X50	25
Obr. 13 Heatmapa 1. patro.....	27
Obr. 14 Heatmapa přízemí.....	27
Obr. 15 Program iperf3 jako server	29
Obr. 16 Aplikace Magic iPerf a Wifiman.....	29
Obr. 17 Graf přenosové rychlosti bez zátěže mezi uzly mesh1 a mesh2.....	31
Obr. 18 Graf porovnání přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh1 a mesh2	32
Obr. 19 Graf průměrné rychlosti před a po přepojení mezi uzly mesh1 a mesh2	33
Obr. 20 Graf přenosové rychlosti bez zátěže mezi uzly mesh2 a mesh3.....	33
Obr. 21 Graf porovnání přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh2 a mesh3	35
Obr. 22 Graf přenosové rychlosti bez zátěže mezi uzly mesh2 a mesh3 se serverem na mesh1	37
Obr. 23 Graf porovnání přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh2 a mesh3 se serverem na mesh1	38
Obr. 24 Graf průměrné přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh2 a mesh3 se serverem na mesh1	38

Seznam tabulek

Tab. 1 Vliv prostředí.....	6
Tab. 2 Vztah wattů a decibel-miliwattů.....	11
Tab. 3 Latence přepojování mezi centrální a druhou mesh stanicí.....	30
Tab. 4 Test měření 1	31
Tab. 5 Měření mezi druhou a třetí mesh stanicí	34
Tab. 6 Test měření 2	35
Tab. 7 Měření mezi druhou a třetí mesh stanicí a serverem na první mesh stanicí.....	36
Tab. 8 Test měření 3	37

1 Úvod

Tématem mojí bakalářské práce je analýza stávajících mesh sítí. Mesh sítě se stávají více a více využívány s rozvojem bezdrátových sítí a lze je považovat za další vývojový stupeň bezdrátových sítí. Mesh síť je tvořena vícero zařízeními, která jsou propojena a vytváří tak jedinou společnou síť. Jednotlivé uzly sítě si poté předávají připojená zařízení dle nejlepšího spojení, a tím nám dovolují zůstat připojeni k síti i v těch nejméně přístupných místech. Díky tomu, že mesh síť je tvořena několika zařízeními, lze dosah sítě rozšiřovat zapojením dalšího uzlu do již existující sítě a tím následně pokrýt požadovanou plochu. Takováto síť umožňuje snadné přepojování uživatele mezi různými uzly mesh sítě. Samotné přepojování probíhá automaticky bez zásahu uživatele. Výběr, ke kterému uzlu se zařízení připojí, probíhá pomocí protokolu, který vyhodnocuje, z kterého uzlu má zařízení nejlepší možný signál. Na rozdíl od klasické Wi-Fi sítě, která je tvořena jediným směrovačem a má omezený dosah, neboť signál se vzdáleností a rušením slábne. Při využití Wi-Fi je potřeba ručního přepojování mezi jednotlivými přípojnými body, popřípadě k přepojení dojde až po ztrátě signálu k přípojnému bodu, a nejedná se tak o příliš komfortní řešení. Zapojení mesh sítě je jednoduché, vytvoření je často pomocí aplikace od výrobce, kde se mesh uzly spolu spárují, a některé aplikace i dokážou doporučit nejvíce vhodné umístění. Využití mesh sítě je v domácnostech, průmyslu, městské zástavbě anebo kdekoliv, kde je potřeba internetového pokrytí s minimem kabeláže.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je analýza stávající mesh sítě z fyzikálního a technologického hlediska, rozbor jednotlivých přenosových protokolů, bezpečnostních kritérií a následné praktické ověření mesh sítě v reálném provozu. Z tohoto důvodu bude sestavena vlastní mesh síť, kde bude docházet k ověřování sítě bez zátěže a se zátěží. Na základě provedeného měření bude provedeno statistické vyhodnocení a formulovány závěry.

2.2 Metodika

Metodika práce je podmíněna optimálním postupům zjištění přenosových charakteristik vybraných mesh sítí. V teoretické části práce je popsána fyzikální a technologická vrstva přenosu. V praktické části práce se pak provádí vlastní testování.

Tyto testy se budou provádět na třech mesh stanicích. Mesh stanice jsou rozmístěny v patrovém domě. Centrální mesh stanice je připojena k internetu přes modem a je umístěna v druhém patře. Na centrální mesh stanici je napojena druhá mesh stanice taktéž umístěna v druhém patře, spojení s centrální mesh stanicí je přes zeď. Třetí mesh stanice je v přízemí a je připojena na druhou mesh stanici přes strop. Testování bude provedeno pomocí programu Iperf3, který umožňuje testovat rychlost spojení na lokální síti, a programu Wireshark pomocí kterého bude zjišťována doba přepojování mezi mesh stanicemi. Program Iperf3 bude spuštěn na počítači, připojeném pomocí UTP kabelu k centrální mesh stanici jako server, a jako klient bude program spuštěn na dalším zařízení. Následně bude měřena přenosová rychlost při pohybování se mezi mesh stanicemi a doba přepojení od jedné mesh stanice ke druhé mesh stanici. Při tomto testování bude měřena rychlost přenosu na nezatížené síti, kdy nebudou připojena žádná další zařízení. Následně bude lokální síť zatížena přenosem souborů mezi FTP serverem a klientem, zátěž se bude upravovat rychlostí přenosu souborů. Výsledky získané měřeními se následně statisticky a graficky analyzují.

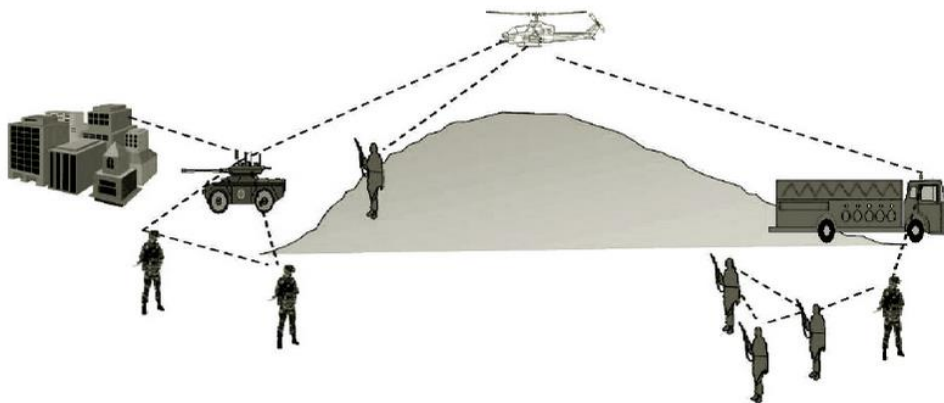
3 Teoretická východiska mesh sítí

3.1 Historie

První předchůdce dnešních bezdrátových mesh sítí byly sítě drátové. První sítě využívaly telefonních linek a pro připojení k dalšímu uzlu bylo potřeba vlastního přenosového rozhraní, jelikož každý uzel má omezený výpočetní výkon, bylo možné připojit jen omezené množství uzlů. Toto omezení řešila částečná mesh síť, příkladem je síť Tymnet v 70. letech 20. století, která propojovala stovky uzlů. Propojení jednotlivých uzlů nebylo provedeno každý s každým, ale jednotlivé uzly byly propojeny pouze s dalšími dvěma či třemi uzly pro zajištění alternativní cesty. V tomto případě již jsou zapotřebí směrovací protokoly, které předávají řídicí zprávy pro zajištění přenosu do cílového uzlu. Řídicí zprávy byly zajišťované centrem síťových operací, které řídilo provoz na síti. Bezdrátový předchůdce vznikl v 70. letech 20. století s cílem vytvořit bezdrátovou síť pro vojenské využití. Každé zařízení neboli uzel měl v této síti fungovat jako směrovač bez centrálního řízení. První přenosy byly polo-duplexní, signál se tedy mohl v jednu chvíli pouze odesílat anebo přijímat. Jednalo se o bezdrátovou kopii ARPANETu, kde se využívala rádia s malou propustností. (Held, 2005, s. 12-13; Mesh Topology, 2021; Ellis et al., 2020; Heires, 2015)

První Mobilní Ad-hoc síť (MANET) byla vyvinuta pro potřeby armády. Na bojišti byla potřeba zajistit komunikaci, která funguje bez předchozí vybudované centralizované infrastruktury, aby jednotky mohly spolu komunikovat na pohyblivém bojišti (Obr. 1). (Loo et al., 2011, s. 8)

Obr. 1 Armádní použití MANET



Zdroj:(Loo et al., 2011)

Mobilní ad-hoc síť je tvořena propojením minimálně dvěma zařízeními neboli uzly, které spolu komunikují bez potřeby centrálního řízení. Jedná se o dynamickou síť, fungující pouze pokud jsou zařízení dostupná v přenosové vzdálenosti. Zařízení se mohou v prostoru sítě volně pohybovat, současně také mohou volně do sítě přicházet a odcházet, z tohoto důvodu je síť vysoce dynamická a je zde kladen důraz na přenosové protokoly zajišťující směrování. Přenosovým protokolem musí být vybaven každý uzel v síti, aby byl schopen směrování. Předpokládané využití je převážně pro mobilní zařízení, která mají omezenou baterii, a pro tyto potřeby je designován přenosový protokol uzpůsobený pro malou energetickou spotřebu. (Held, 2005, s. 27; Loo et al., 2011, s. 5-8)

3.2 Multihop vs. Singlehop

Komunikace na síti probíhá jako singlehop nebo multihop. Single-hop funguje na principu připojení klienta k přípojnému bodu pouze v jednom přeskoku. Příkladem může být běžná WLAN síť, ve které se nachází přístupové body (AP), které jsou napojeny na páteřní síť – LAN. Klient se připojuje na dané AP pomocí jednoho přeskoku a všechna další komunikace probíhá pouze přes spojení AP a klienta. (Zhang et al., 2009, s. 6-7)

Multi-hop komunikace probíhá od zdrojového zařízení do destinace přes více přenosových uzlů, které zprávu posílají dále, dokud zpráva nedorazí do cíle. Multi-hop umožňuje komunikaci s uzlem, se kterým se jinak nedokáže přímo spojit, umožní to sousední uzel či některý z dalších uzlů, které se však již spojit s požadovaným uzlem dokážou. Komunikace tak probíhá v několika přeskocích. Na multi-hop komunikaci funguje MANET i mesh síť. (Zhang et al., 2009, s. 6-7)

Mesh síť je multi-hop síť, která se odlišuje od MANET sítě primárně v tom, že je relativně statická, většina uzlů nemění svou polohu, naopak u MANET sítě se každé zařízení pohybuje v dynamické topologii. Výhodou mesh sítě je napojení na zdroj energie, díky čemuž odpadá největší z omezení MANET sítí, tedy energetické omezení. (Zhang et al., 2009, s. 8)

3.3 Komunikace bod a bod vs. bod a multibod

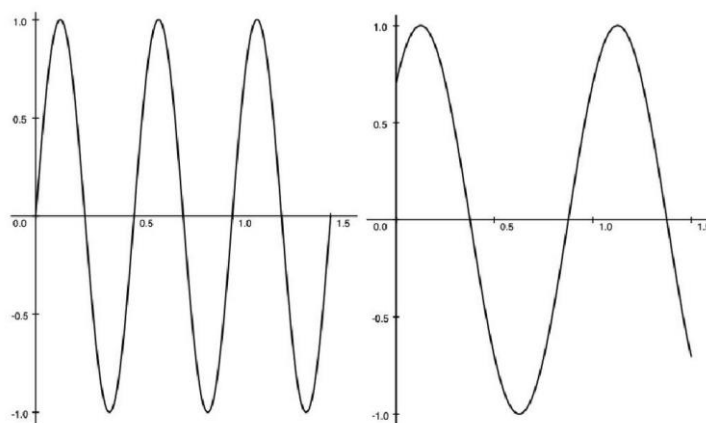
Bod s bodem je základní a nejjednodušší spojení dvou uzlů, které spolu díky tomuto propojení komunikují. Komunikace je rychlá a vcelku snadno proveditelná, problém je její rozšiřování, neboť spolu vždy komunikují pouze dvě zařízení/sítě. Lze využít pro páteřní síť, avšak při poruše není snadná náhrada, jelikož není redundantní cesta. Další možností je bod s multibodem. V tomto zapojení zvládá multibod komunikovat s více uzly. Toto

zapojení se využívá pro vysílače, na které jsou napojeni další klienti, rozšíření sítě dalším klientem je snadné, hlavní podmínkou připojení je dostatečně silný signál. Poslední možností je multibod s multibodem, kdy každý uzel zvládá komunikaci s více uzly. Na tomto principu je postavené mesh síť. Jednotlivé uzly dokážou současně přijímat zprávy od více uzlů a současně dokážou odesílat zprávy více uzlům. (Khan, 2009, s. 24-26)

3.4 Fyzikální popis přenosu

Přenos dat na bezdrátové síti probíhá přes elektromagnetické rádiové vlny o určité frekvenci a šířce pásma, to následně určuje množství dat, které je možno přenést za čas. Frekvence je, kolikrát se opakovaný děj signálu provede za čas jedné sekundy, a udává se v hertzech [Hz] (Obr. 2). Perioda je převrácená hodnota frekvence a odpovídá časové délce pro provedení jednoho opakovaného děje. Amplituda je výška vlny od nuly do maxima. Šířka pásma je udávána pomocí frekvence od její nejnižší hodnoty po nejvyšší hodnotu, na ní probíhá přenos dat pro internet, rádio, televizi. Z důvodů možného rušení jsou některá pásma licencovaná a některá nikoliv, o rozdělování licencí se stará stát. V České republice jsou pro domácí použití využívány nejčastěji nelicencovaná pásma 2,4 GHz a 5 GHz. Každé pásmo má své výhody a nevýhody, konkrétně 2,4 GHz má lepší propustnost přes překážky, ale horší rychlost než pásmo 5 GHz. Pro protokol Zigbee je možné využívat pásmo 868 MHz, které je určeno pro přenos malého objemu dat. I když se ale jedná o nelicencovaná pásma, je přenosový výkon limitován na 100 mW, aby nedocházelo ke zbytečnému zahlcení sítě. (Held, 2005, s. 35-38)

Obr. 2 Frekvence – vlevo frekvence = 2, vpravo frekvence = 1



Zdroj:(Hassan, 2022)

3.4.1 Fyzikální výpočty přenosu signálu

V bezdrátové síti záleží na vzdálenosti umístění jednotlivých uzlů pro vytvoření stabilního spojení. To závisí na frekvenci signálu, citlivosti přijímače, přenosovém výkonu a prostředí přenosu. Síla signálu ve vzdálenosti d od antény lze ve volném prostoru vypočítat dle vzorce:

$$P_d = P_0 - 10 \times 2 \times \log_{10}(f) - 10 \times 2 \times \log_{10}(d) + 27.56 \text{ [dBm]} \quad (3.1)$$

P_d je síla signálu ve vzdálenosti d [dBm]

P_0 je síla signálu v nulové vzdálenosti od antény [dBm]

f je frekvence signálu [MHz]

d je vzdálenost v metrech od antény [m]

Ve skutečném světě tato rovnice není přesná, neboť přenos signálu neprobíhá ve volném prostoru, ale spíše uvnitř budov, kde dochází k rušení signálu, a tím i snížení síly signálu, proto je používána tato úprava:

$$P_d = P_0 - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(d) + 30 \times n - 32.44 \text{ [dBm]} \quad (3.2)$$

kde koeficient n označuje efekt prostředí, v Tab. 1 je zobrazen koeficient n . (Farahani, 2008, s. 171-173)

Tab. 1 Vliv prostředí

N	Prostředí
2.0	Volný prostor
1.6–1.8	Uvnitř budovy bez překážek
1.8	Obchod s potravinami
2.09	Konferenční místnost se židlemi a stolem
2.2	Maloobchod
2-3	Uvnitř továrny
2.7-4.3	Kancelář bez překážek

Zdroj:(Farahani, 2008)

Vlnová délka signálu je vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jedné periody. Například pro 868 MHz je vlnová délka 34,5 cm, pro 2485 MHz je vlnová délka 12 cm, pro 5160 MHz je vlnová délka 5,7 cm. (Farahani, 2008, s. 174) Výpočet je:

$$\lambda = C \times T = \frac{C}{f} [m] \quad (3.3)$$

C je rychlost šíření signálu ve vzduchu ($C = 3 \times 10^8$ metrů za sekundu)

f je frekvence signálu [Hz]

Přenosová kapacita kanálu je vypočtena pomocí Nyquista za předpokladu nerušivého prostředí, kde lze přesně rozeznat velké množství symbolů. Vzorec výpočtu je:

$$\text{Nyquistova kapacita} = 2 \times B \times \log_2 M [bps] \quad (3.4)$$

B je šířka pásma [Hz]

M je množství symbolů [-]

Přenosovou kapacitu je také možno vypočíst dle Shannona, který zahrnuje horní hranici symbolů, které lze přenést, neboť přenos probíhá v rušivém prostředí. Vzorec výpočtu je:

$$\text{Shannonova kapacita} = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) [bps] \quad (3.5)$$

B je šířka pásma [Hz]

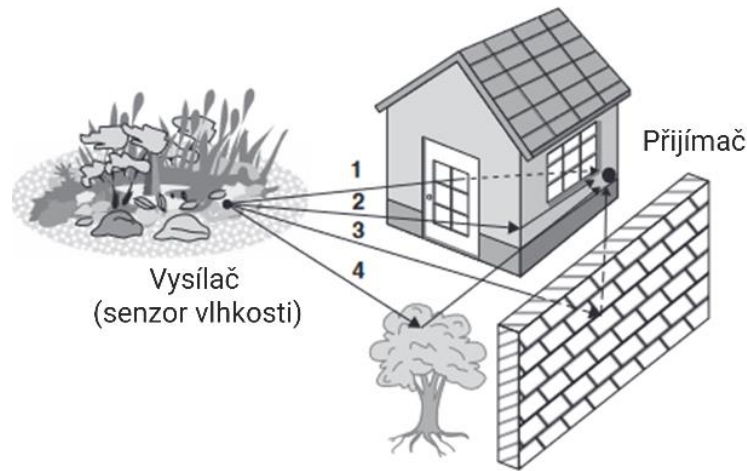
S je síla přijatého signálu [W]

N je síla rušení [W]. (Hassan, 2022, s. 24-25)

3.4.2 Průchod, odraz, difrakce a rozptyl signálu

Dalším důležitým prvkem je prostupnost signálu objektem. Závisí na frekvenci signálu, typu materiálu a teplotě, kterým prochází. Každý materiál má konstantu útlumu v (dB/m), například voda má pro signál o frekvenci 2,4 GHz útlum 330 dB/m a je víceméně neprůchozí. Stejně tak kovové materiály neumožňují průnik a signál odráží. Obecně lze říct, že s vyšší frekvencí roste konstanta útlumu. Při přenosu může signál dorazit do cíle několika způsoby, nejlepší způsob je, kdy na sebe obě zařízení přímo vidí. Nicméně přenos je umožněn i při odrazech signálu, ten je dělen na odraz, kdy signál zasáhne velký objekt, například zeď, a dojde k odrazu, difrakce je odraz od ostrého kraje, který způsobí jeho ohnutí směrem k objektu a rozptyl nastane při nárazu do velmi malého objektu nebo drsného objektu, za drsný povrch se považuje, pokud je různorodost povrchu větší než vlnová délka $\lambda/8$. Toto má za dopad, že signál může dopadnout na přijímač několika různými cestami (Obr. 3). (Hassan, 2022, s. 37; Farahani, 2008, s. 174-176)

Obr. 3 Přenos signálu: 1 – průchod, 2 – difrakce, 3 – odraz, 4 – rozptyl signálu



Zdroj:(Farahani, 2008)

3.4.3 Dopplerův jev

Dopplerův jev vzniká v případě pohybujícího se uzlu, který se vzdaluje od přijímače nebo přibližuje k přijímači (Obr. 4), pro frekvence do 10 GHz není pohyblivost uzlu problém, avšak se zvyšováním frekvence vzniká frekvenční chyba. Ta lze vypočítat:

$$\Delta f = \frac{v}{c} \times f_c \text{ [Hz]} \quad (3.6)$$

f_c je původní frekvence [Hz]

v je rychlost uzlu [m/s]

c je rychlost světla [m/s] (Hassan, 2022, s. 30-31; Farahani, 2008, s. 181-183)

Obr. 4 Dopplerův jev



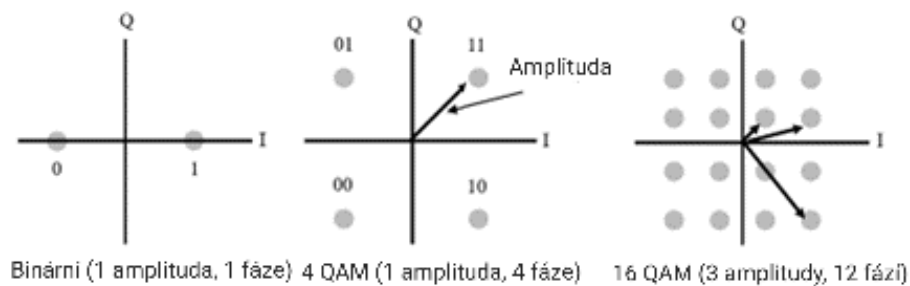
Zdroj:(Farahani, 2008)

3.4.4 Modulace signálu

Při přenosu dat je využívána modulace k úpravě původního signálu. Symbol je označení jako nejmenší část signálu s amplitudou, frekvencí a fází, které mohou být detekovány, kratší délka signálu pak umožňuje přenést více symbolů. Přenosová rychlost udává, kolik symbolů je možné přenést za čas. Rychlost přenosu dat je poté množství přenesených dat v Mb/s, moderní modulace bezdrátových sítí dokáže přenášet několik bitů v jednom symbolu. Modulace umožňuje upravovat amplitudu, frekvenci a fázi. Pro zvýšení přenosu dat se

využívá současné modulace amplitudy a fáze QAM (Quadrature Amplitude and Phase Modulation). Pro vizualizaci QAM je využíván konstelační diagram (Obr. 5), úroveň QAM, která je využívána, je vypočtena pomocí počtu kombinací fáze a amplitudy. Dnešní sítě využívají až 1024 QAM a lze předpokládat další zvýšení s rozvojem výkonu hardwaru. (Hassan, 2022, s. 21-24)

Obr. 5 Modulace QAM



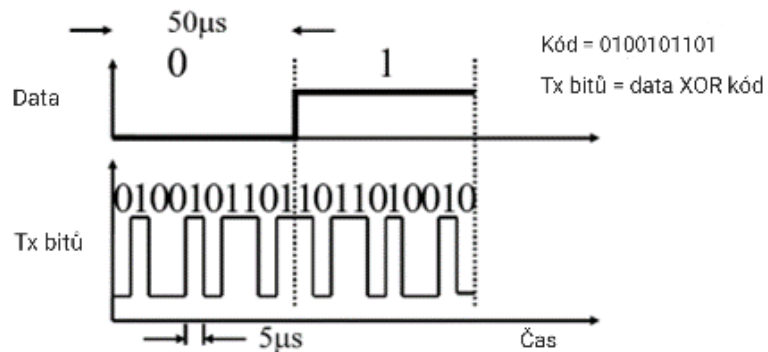
Zdroj:(Hassan, 2022)

Dalším způsobem modulace signálu je rozšíření spektra rozdělením signálu do mnohem širšího pásma, jejím cílem je zlepšení bezpečnosti, snížením detekce signálu, zvýšená odolnost proti rušení a zahlcování sítě. Nejčastěji jsou k tomu využívány techniky FHSS a DSSS. (Hassan, 2022, s. 28)

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) při přenosu dat náhodně přeskakuje na frekvencích pásma. Příjímá i vysílač využívají ke generování stejný seed¹, proto jsou oba ve správné chvíli na správné frekvenci. Toto se využívá v Bluetooth, kde dochází ke změně frekvence 1600 za sekundu k vyhnutí interference s blízkými Wi-Fi sítěmi. (Hassan, 2022, s. 28-29)
- DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) využívá pro přenos dat rozšíření jednoho bitu o další jedničky a nuly pomocí aplikace tajného kódu (Obr. 6). Příjímá i odesílatel znají tajný kód a dokážou signál dekodovat, minimální počet bitů pro přenos jednoho bitu je 10, avšak pro lepší zabezpečení se počet bitů zvyšuje, v armádním využití se jedná až o tisíce bitů pro odeslání jednoho bitu. Přenos signálu je tedy násobně vyšší než přenos samotných dat. (Hassan, 2022, s. 28-29)

¹ Číslo využitě pro generátor pseudonáhodných čísel

Obr. 6 DSSS přenos 2 bitů dat



Zdroj:(Hassan, 2022)

Orthogonal Frequency Division Multiple Acces (OFDMA) je součástí standardu 802.11ax, jedná se o modulaci signálu, která rozděluje zdroje kanálu pro jednotlivá zařízení. Nejmenší jednotka je tvořena šířkou pásma o velikosti 78,125 kHz, tyto nejmenší jednotky jsou poté seskupeny do 6 skupiny po 26 (cca 2 MHz), 52, 106, 242, 484 nebo 996 (cca 80 MHz) jednotkách. Skupiny mohou být následně při přenosu různě kombinovány pro dosažení požadovaného přenosu, a tím mohou obsluhovat několik zařízení současně. (Hassan, 2022, s. 51-53; Cisco, c2024)

3.5 Anténa

Důležitým prvkem v mesh síti je anténa, díky které je umožněn bezdrátový přenos. Anténa funguje na přeměně elektrické energie na magnetickou sílu. Zisk antény je měřen v dBi, čím větší je zisk, tím lépe dokáže anténa přijímat signál. Antény lze dělit na jednosměrové a všesměrové, jak z názvu napovídá jednosměrové vysílají pouze jedním směrem a všesměrové vysílají do všech směrů. U jednosměrových záleží na šířce a směru paprsku. (Held, 2005, s. 49-50)

Vlny signálu ztrácejí při pohybu výkon až několika řádů, proto je měřen v logaritmických jednotkách. Měření výkonu při přenosu se počítá pomocí decibelů:

$$dB = 10 \times \log_{10}\left(\frac{P_0}{P_1}\right) \quad (3.7)$$

P_0 je přijatý výkon

P_1 přenášený výkon

Testování se provádí při výkonu 1 mW a je zaveden termín decibel-miliwatt (dBm). Z těchto prvků je vypočtena síla přijatého signálu. Jednotky dBm, dBi a dB lze sčítat, výsledek vyjde

v dBm, například síla signálu o 20 dBm se ztrátou signálu 25 dB a ziskem antény 5 dBi lze sečíst jako $20 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} + 5 \text{ dBi} = 0 \text{ dBm}$. Nelze však sčítat jednotky dBm spolu a je nutné je nejdříve převést na jednotky Watt a poté zpět na dBm, například 20 dBm a 20 dBm jsou převedeny na 100 mW a 100 mW a sečteny na 200 mW a až poté jsou převedeny zpět na dBm, kde je výsledek roven pouze 23 dBm, viz Tab. 2. Dalším prvkem přenosu je rušení, které je tvořeno pohybem elektronů v elektronickém obvodu přijímače, rušení ztěžuje dekódování dat, pokud je příliš silné ku síle signálu, rušení je měřeno v dB. (Held, 2005, s. 43-49; Hassan, 2022, s. 19-21)

Tab. 2 Vztah wattů a decibel-miliwattů

Výkon ve wattech	Síla v decibel-miliwattech
0,001 mW	-30
0,01 mW	-20
1 mW	0
1 W	30
1 kW	60
1 MW	90

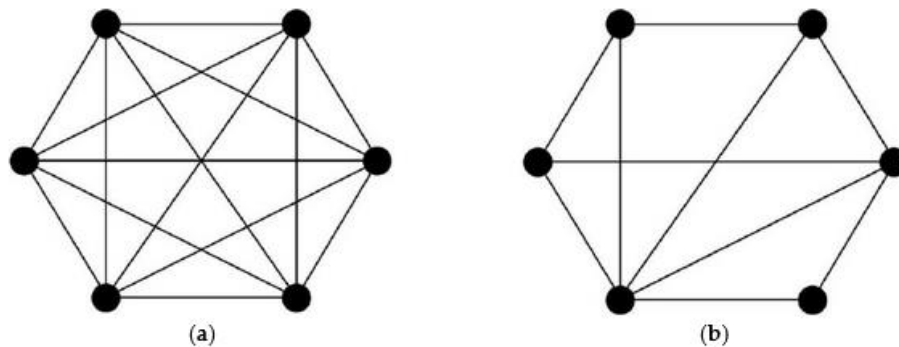
Zdroj:(Held, 2005)

Multiple Input Multiple Output (MIMO) využívá více antén ke zvýšení kvality, spolehlivosti a přenosové kapacity bezdrátové komunikace. Antény jsou rozděleny pro příjem dat a pro odesílání dat. Počet antén je označován například jako 2×2 , kdy první číslo označuje počet vysílacích antén a druhé číslo počet přijímacích. Využívají se pro zvýšení dosahu signálu, jelikož jednotlivé antény mohou zesilovat paprsek signálu určitým směrem. MU-MIMO (Multiple User MIMO) je poté rozšíření pro obsluhování více zařízení současně, předchází SU-MIMO (Single User MIMO) umožňovala současnou komunikaci pouze s jedním zařízením a musela mezi připojenými zařízeními přepínat. MU-MIMO rozděluje datové toky mezi uživatele a lépe rozděluje kapacitu sítě a také snižuje latenci, neboť nemusí přepínat mezi zařízeními. (Hassan, 2022, s. 85-86, 48-49; Tp-link, b. r.)

4 Mesh síť

Mesh síť je druhem topologie sítě. Může se jednat o částečnou mesh (Obr. 7 b), kdy spolu komunikují pouze nejbližší uzly nebo plnou mesh (Obr. 7 a), kdy všechny uzly spolu mohou komunikovat navzájem. Pro přenos dat mezi jednotlivými uzly jsou využívány algoritmy, které neustále vypočítávají nejvhodnější cestu. Nejčastěji je využíváno jednoho mesh uzlu jako směrovače a zbytek připojených uzlů jako opakovače. Současně však každý uzel může fungovat i jako směrovač. Výhoda této topologie spočívá v jednoduchém rozšíření sítě, automatické organizaci uzlů, rozložení zátěže. Toto je zajištěno směrovacími protokoly, které sdílí všechny mesh uzly. Síť vytvořená uzly se nazývá jako páteřní a zajišťuje přenos dat od klienta k bráně. (Sathyanarayanan, Pedamkar, 2023; Mesh Topology, 2021)

Obr. 7 Mesh síť: a – plná mesh, b – částečná mesh



Zdroj:(Paszkievicz et al., 2019)

4.1 Důvod vzniku bezdrátových mesh sítí

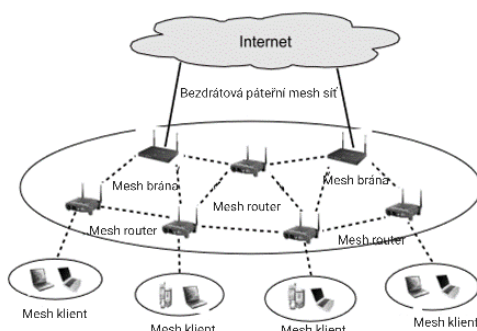
Bezdrátová mesh síť vznikla z důvodů propojení míst, kde nebylo možné propojení kabelem, jelikož kabel má omezenou vzdálenost zapojení. Jedná se o místa jako například velká skladiště nebo venkovní prostory, kde propojení pomocí kabelu není příliš proveditelné. Proto byl v roce 2003 definován standard 802.11 a v něm se nacházela základní definice pro bezdrátovou komunikaci mezi přístupovými body. V roce 2011 byl publikován dodatek 802.11s, který se zabývá mesh sítěmi a definuje, jakým způsobem se mesh stanice vyhledávají, navazují spojení, zabezpečují komunikaci a také například jak se dynamicky adaptují na polohu nebo spotřebu energie zavedením lehkého a hlubokého režimu spánku. Nahrazení kabelového propojení bezdrátovým má výhody ve flexibilitě, samo-organizaci a samo-opravě sítě. (Henry, 2011, s. 3)

4.2 Komponenty mesh sítě

Bezdrátová mesh síť se skládá ze dvou komponentů, respektive tří (Obr. 8), a to mesh klientů a mesh stanic, které jsou však schopny dle potřeby fungovat jako mesh router nebo mesh brána.

- Klient v mesh síti je schopen připojení a komunikování se sítí, není schopen ale už fungovat jako router nebo brána, klient je například mobilní telefon, notebook a podobná zařízení. (Zhang et al., 2009, s. 9)
- Mesh router přeposílá data, které dostane do určené destinace. Funguje jako přístupový bod (AP) pro mesh klienty. Hlavním úkolem je vytvářet a udržovat spojení v mesh síti. (Loo et al., 2011, s. 430)
- Mesh brány jsou rozšířením mesh routerů a umožňují spojení s dalšími sítěmi. (Loo et al., 2011, s. 430)

Obr. 8 Mesh komponenty



Zdroj:(Yang et al., 2006)

4.3 Architektura sítě

Architekturu mesh sítě lze rozdělit do 3 různých typů:

- Infrastrukturovaná (páteřní síť) – tento typ architektury funguje na bezdrátovém spojení mesh uzlů. Některé z uzlů fungují jako brána a poskytují připojení na internet.
- Klientská – zapojení funguje v režimu ad-hoc, každý klient funguje současně jako router a provádí směrování a přeposílání dat.
- Hybridní – nejpoužívanější typ architektury, kombinuje klientskou a infrastrukturovanou architekturu. Společně umožňují připojení k internetu a dynamické rozšiřování sítě. (Pervez, 2016, s. 3-5)

4.4 Výhody mesh sítě

- Flexibilita umožňuje připojení pohybujících se prvků, např. robotů, a snižuje také spotřebu hardwaru na připojení přístupových bodů, neboť pro připojení kabelem je potřeba switch a kabelové spojení pro každý přístupový bod, kabel má omezenou vzdálenost s přesně nadefinovanou cestou, naopak při bezdrátovém řešení se na jeden uzel může připojit více přístupových bodů.
- Samoorganizace umožňuje upravování cesty dle nejvhodnější trasy.
- Samooprava umožňuje, že při odebrání jednoho z uzlů bude pro přenos nalezena další nejlepší cesta bez potřeby okamžité náhrady. Je zajištěna dynamickým seznamováním se sousedními uzly.
- Rozšíření mesh sítě lze provést připojením dalšího kompatibilního uzlu do sítě. Rozšiřování je však omezené a záleží na konkrétním prostředí, kde se síť nachází a na užitém komunikačním standardu. Nesmírnou výhodou je také, že není potřeba drátového spojení pro zapojení dalšího uzlu, lze tedy uzel například zapojit do dalšího patra domu a snadno ho připojit do sítě. (Held, 2005, s. 30-32; Henry, 2011)

4.5 Nevýhody mesh sítě

- Uzly musí znát cesty k ostatním uzlům a při více rozměrné síti a použití špatného směrovacího protokolu dojde k zahlcení uzlů informacemi, které následně budou snižovat výkon uzlů. (Held, 2005, s. 33)
- Bezpečnost může být jednou z nevýhod, přenos probíhá bezdrátově a je možný odposlech, proto je důležité zašifrování. Stejně tak je potřeba kvalitní ověřování mesh uzlů v síti. (Held, 2005, s. 33)
- Vysoká komplexnost uzlů, neboť každý z nich musí zvládat přijímání, odesílání a směrování dat. (Link Labs, 2016)
- Spotřeba energie může být nevýhoda, pokud se v síti nachází uzly na baterii, jelikož uzly musí být schopny přeposílat zprávy dalším uzlům, musí tak být neustále dostupné pro příjem zpráv. (Link Labs, 2016)
- Latence z uzlu, než se dostane do cílového uzlu/brány, avšak záleží na konkrétním mesh zařízení, s jakou rychlostí dokáže zpracovávat příchozí zprávy, obecně méně energeticky náročné uzly budou dosahovat menší rychlosti zpracování, a tím větší latence. (Link Labs, 2016)

4.6 Propojení mesh uzlů

Propojení jednotlivých uzlů lze provést bezdrátově anebo drátově pomocí UTP kabelu. Kabelové řešení má výhody v přesně nadefinované trase kabelem, stabilní rychlosti a latenci. Nevýhoda naopak tkví v potřebném fyzickém položení kabelu, který je potřeba uložit do lišt či schovat do zdí. Hlavní nevýhoda je v protokolu ethernet, jelikož v mesh síti musí každý uzel komunikovat s každým, tak by vzniklo kruhové zapojení, ethernet ale nesmí tvořit kruh, proto je potřeba speciální služby, která vytvořené kruhy zapojuje a odpojuje. Současně kabelové zapojení znemožňuje větší manipulaci s uzlem. Při bezdrátovém provedení není potřeba žádná stavební úprava a je možné jednoduše uzly přemísťovat dle potřeby. Nevýhody bezdrátového přenosu jsou v omezené vzdálenosti přenosu a se zvyšující se vzdáleností klesající rychlost přenosu a zvyšující se latence.

4.6.1 Rozdíly využití mesh sítě a wifi extenderu

Jedno z možných řešení pro prodloužení signálu ve Wi-Fi sítích je využití Wi-Fi extenderu. Jedná se o zařízení, které se zapojí do elektrické zásuvky a po připojení na původní Wi-Fi signál ho posílá dále. Nevýhoda tohoto řešení však spočívá ve snížení přenosové rychlosti na maximálně polovinu původní. V případě použití dvoupásmového extenderu rychlost není snížena, neboť jedno pásmo bude sloužit jako páteřní ke komunikaci s routerem a druhé bude pro komunikaci s klientskými zařízeními. (Trčálek, 2019)

4.6.2 Nevýhody Wi-Fi směrovačů

Dalším řešením pro pokrytí většího prostoru je využití více Wi-Fi směrovačů, jedním řešením je vytvoření další sítě, druhým řešením je využití Wi-Fi směrovače jako přístupového bodu. Nejlépe je propojení páteřní sítě kabelem, lze však směrovač propojit i bezdrátově, opět ale dojde ke snížení přenosové rychlosti na polovinu, pokud se pro páteřní komunikaci nevyužívá jiné pásmo. Je však nutné zajistit co nejmenší rušení jednotlivých sítí a využívat kanály pro přenos dat, nevhodnější jsou 1, 6 a 11 pro 2,4 GHz při šíři kanálu 20 MHz, dalšími možnými kanály jsou 1, 5, 9 a 13. Vznikne zde však problém, kdy se klient nebude automaticky přepojovat mezi přístupovými body a k přepojení dojde až po ztrátě signálu z prvního bodu nebo po ručním přepojení na připojeném zařízení. (Trčálek, 2019)

4.7 Navazování spojení mezi mesh uzly

Pro navázání spojení mezi mesh uzly je nejdříve provedena fáze vyhledávání, může se jednat o aktivní, kdy zařízení aktivně hledá další uzly, nebo pasivní, kdy naopak uzel přijímá

signály. Při této fázi jsou vysílány zprávy, které obsahují identifikační číslo mesh uzlu (ID), prvek obsahující možnou konfiguraci mesh uzlu, protokol počítající nejlepší cestu a jakým způsobem se vypočítává, způsob synchronizace a autentizace, informace o počtu připojených mesh uzlů a zda přijímá nové uzly. Po této fázi se mohou uzly propojovat, propojení vzniká poté, co si dva uzly navzájem odešlou žádost o spojení a oba uzly následně tuto žádost schválí. Důležitou vlastností je samospráva těchto spojení od každého uzlu. Spojení tedy zůstává aktivní, dokud jsou mesh uzly ve společné vzdálenosti a sdílí stejný mesh profil. Spojení je také přerušeno v případech, pokud mesh uzel neodpoví na zprávu v požadovaný čas nebo je překročen povolený počet propojených uzlů nebo dojde ke změně bezpečnostních údajů. (Henry, 2011, s. 9-11)

4.8 Směrovací protokoly

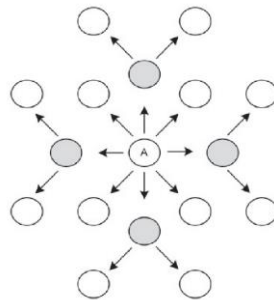
Směrovací protokoly mají za cíl najít správnou cestu pro přesun dat na síti. Většina je založena na principu protokolů OLSR, AODV a DSR. Lze je rozdělit na:

- Proaktivní – Každý uzel si uchovává směrovací tabulku, ve které má uloženou cestu ke každému z uzlů, který se nachází v síti. Jedná se o nepraktické řešení pro velké sítě, neboť zabírají propustnost sítě pro udržení aktuálních informací pro směrování. (Loo et al., 2011, s. 437)
- Reaktivní – Uzel si o cestu k žádanému uzlu požádá pouze, když ji potřebuje. Trvá zde delší dobu, neboť se musí postupně předávat žádosti a čekat na odpovědi od uzlů. Nejedná se o vhodné řešení pro síť, které požadují okamžitou dostupnost. (Loo et al., 2011, s. 437-438)
- Hybridní – Kompromis předchozích řešeních, využívá reaktivní směrování pro klientskou část, která se mění a proaktivní pro páteřní část, která je spíše statická. (Loo et al., 2011, s. 438)

OLSR – Optimazed Link State Routing (Obr. 9) využívá algoritmus založený na stavu spojení. Každý uzel určuje nejvíce optimální cestu pomocí počtu přeskoků, které jsou uchovány v tabulce s topologií sítě a směrovací tabulkou sousedních uzlů. Každý uzel periodicky vysílá „HELLO“ zprávu, díky které zjišťuje stav lokálních spojení, současně v této zprávě zasílá všechny své sousední uzly, tímto pak tedy zná každý uzel všechny uzly se vzdáleností do dvou přeskoků. Ke snížení počtu kontrolních zpráv se využívá MPR (multi point relay), takto se označuje uzel, který dále preposílá kontrolní zprávy od vysílajícího uzlu. Vysílající uzel si vybírá optimální počet MPR a komunikace s dalšími uzly probíhá

pouze přes MPR. Tento protokol je vhodný převážně pro větší sítě, neboť v malých sítích je většina sousedních uzlů zvolena jako MPR. Současně by mohl vzniknout problém malým počtem kontrolních zpráv v případě, že je nekvalitní spojení a není další redundantní cesta. (Campista, Rubinstein, 2014, s. 35)

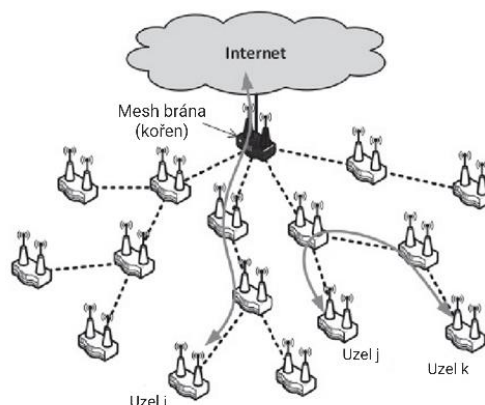
Obr. 9 OLRS (A je vysílající uzel, MPR je označen šedě)



Zdroj:(Campista, Rubinstein, 2014)

AODV – Ad hoc On-Demand Distance Vector (Obr. 10) je reaktivní protokol. Každý uzel si uchovává směrovací tabulku, ve které je uložen další skok možné destinace. Pokud chce uzel odeslat zprávu a nemá ji ve směrovací tabulce, tak vysílající uzel zahájí objevovací fázi a odesílá zprávu Route REQuest (RREQ) svým sousedům, ti zprávu posílají dalším uzlům, dokud není nalezen cílový uzel nebo uzel, který zná trasu do cílového uzlu. Pro zajištění, aby nedošlo k zacyklení a udržení aktuálnosti se využívají sekvenční čísla a vysílací ID. Každý RREQ paket má unikátní označení, tím jsou uzly schopny odstranit duplikátní a staré pakety. Protokol také udržuje aktuálnost sítě a pokud je nějaký uzel odstraněn, tak jeho sousední uzly odešlou zprávu RERR, která o odstranění informuje další uzly. (Campista, Rubinstein, 2014, s. 38-39)

Obr. 10 AODV stromová struktura



Zdroj:(Campista, Rubinstein, 2014)

DSR – Dynamic Source Routing je reaktivní protokol. Každý uzel má mezipaměť, ve které jsou uchovávány trasy, a tím je následně minimalizován objevovací proces, uzel může uchovávat až několik tras k cílovému uzlu. Když uzel odešle paket do cílového uzlu, tak přijímací uzel nejdříve zkontroluje, zda se trasa nenachází v mezipaměti, pokud ne, tak zahajuje objevovací fázi, ve které vysílá zprávu se žádostí o trasu. Zpráva obsahuje vysílací uzel, přijímací uzel a unikátní identifikátor. Každý uzel, který tuto zprávu obdrží, zkontroluje mezipaměť, zda nezná trasu, pokud ne, tak připojí svoji vlastní adresu do trasy a přepoše zprávu dále. Odpověď na žádost je vrácena, pokud je dosaženo cílového uzlu nebo uzlu, který zná trasu. Pokud už uzel jednou tuto zprávu se žádostí obdržel, tak na další nereaguje. DSR nevyžaduje periodickou výměnu HELLO zpráv, uzly tak mohou lépe šetřit energií. Nehodí se pro velké sítě, kde by se paket zvětšoval s velikostí sítě a mohl by zabírat velkou část přenosu. (Campista, Rubinstein, 2014, s. 37-38)

LQSR – Link Quality Source Routing je kombinací proaktivního a reaktivního protokolu. LSQR udržuje mapu celé topologie, ale ke snížení počtu aktualizací je využíváno DSR pro vyhledávání a udržování tras nejvíce využívaných uzlů. V LQSR pro vytvoření trasy každý uzel připojí svou adresu a hodnotu kvality spojení s uzlem, který odeslal žádost, ta poté obsahuje kompletní list spojení a jejich kvalitu. Reaktivní část probíhá při odeslání paketu, kdy každý přeposílací uzel aktualizuje hodnotu kvality spojení a poté pošle paket dále. Považuje se i za proaktivní, neboť jsou udržovány aktuální hodnoty spojení. (Campista, Rubinstein, 2014, s. 53)

RA-OLSR – Radio Aware Optimazed Link State Routing je proaktivní protokol, na rozdíl od OLSR využívá MAC adresy místo IP adres, a také místo počtu přeskoků využívá časovou délku přenosu. Aktualizace směrovací tabulky probíhá častěji se sousedními uzly, vzdálenějším uzlům stačí znát, že existuje trasa. (Campista, Rubinstein, 2014, s. 55)

HWMP – Hybrid Wireless Mesh Protocol je základním protokolem pro 802.11s. Využívá proaktivní stromové vyhledávání pro udržování tras a reaktivní pro vytváření nových tras. Hybridní operace je využita, pokud uzel potřebuje poslat paket dalšímu uzlu, ale nezná trasu, pošle tedy paket kořenovému uzlu, který zná cestu ke všem uzlům v síti a ten ji poté přepoše cílovému uzlu. Tento protokol zvládá fungovat pouze i za použití reaktivního směrování a funguje jako AODV s modifikovanými zprávami, které se zabývají kvalitou spojení. Proaktivní směrování probíhá vždy, když kořenový uzel vyšle oznamovací zprávu a následně dojde k aktualizaci směrovací tabulky. (Campista, Rubinstein, 2014, s. 61)

5 Bezpečnost mesh sítě

Ze své podstaty fungování přenosu jsou bezdrátové sítě náchylné na útoky. Bezpečnost je tedy jedna ze starostí mesh sítí. Na rozdíl od drátových sítí, které jsou chráněny fyzickým prostředím, neboť jsou schované v budovách nebo pod zemí, anebo klasických Wi-Fi sítí, kde komunikace probíhá bod s bodem, musí být mesh sítě schopné čelit útokům s falešnou identitou zařízení, a je tedy potřeba spolehlivá autentifikace sousedních mesh stanic. Pro zabezpečení přenosu je využíván výpočetní výkon, je tedy potřeba najít vyváženost mezi bezpečností a rychlostí přenosu. Mesh sítě je nutné zabezpečit proti všeobecným bezpečnostním problémům, které se týkají i ostatních sítí a musejí být zajištěny i u mesh sítí. (Zhang et al., 2009, s. 386-387) Mezi všeobecné bezpečnostní problémy jsou zařazeny:

- Soukromí – zajistit soukromý přenos mezi uživateli, aniž by byl možný odposlech
- Integrita – zajistit nemožnost změnění obsahu přenášeného souboru během přenosu
- Přístupnost – zajistit přístup i přes pokusy o „DoS“
- Autentifikace – schopnost identifikovat uživatele, zda se jedná skutečně o jeho
- Autorizace – uživatelé mohou provádět pouze činnosti, ke kterým mají oprávnění
- Účetnictví – schopnost měřit využití sítě uživatelem v případě zpoplatnění sítě (Hossain, Leung, 2007, s. 310)

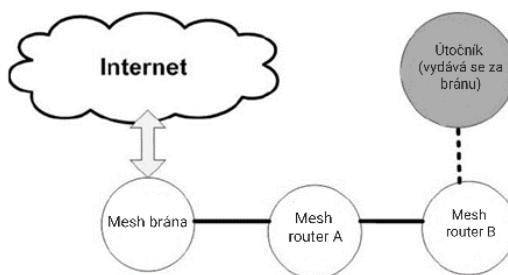
5.1 Specifické problémy mesh sítě

- Zahlcovací útoky („jamming“ útoky) – jako pro každou bezdrátovou síť je pro útočníky vcelku snadné narušovat komunikaci odposlechem nebo zahlcením sítě. Útok lze provést ze zařízení, které vysílá silné signály, čímž je narušeno doručování paketů v síti. Největším problémem jsou zprávy, které zasílají do sítě falešné směrovací zprávy, a tím narušují celé fungování sítě. (Zhang et al., 2009, s. 115)
- Autentifikační mechanismus – je důležité zabezpečit, aby se útočník nedostal do sítě, k tomu se využívají klíče, respektive hesla. Útoky pro získání hesla lze provést pomocí slovníkového útoku a „brute force“ útoků. Zabezpečení je provedeno silným heslem a dobrým šifrováním při přenosu autentifikačních zpráv. (Zhang et al., 2009, s. 389)

- Odcizení/fyzické napadení – v případě venkovní umístění mesh uzlů v městské zástavbě na sloupech či střechách, útočník může převzít kontrolu nad mesh uzlem a získá tak do sítě přístup jako autorizovaný mesh uzel. (Chen et al., 2013, s. 234)
- Pasivní odposlech – Útočník může odposlouchávat přenos, pokud se nachází v přenosové vzdálenosti. Nebezpečí hrozí také i uvnitř sítě, kdy napadený mesh uzel si zachovává kopie dat, které přeposílá. Tento útok nenarušuje funkcionalitu sítě, ale porušuje se integrita přeposílaných dat. Před tímto útokem je nejčastější ochrana silné zašifrování dat. (Chen et al., 2013, s. 234-235) Zašifrovaná data jsou pro útočníka zbytečná, neboť i když je dešifrování možné pomocí „brute force“² útoku, tak v porovnání ceny za získané informace se útok příliš nevyplatí. (Zhang et al., 2009)
- Denial of Service (DoS) – Tento útok může probíhat na různých vrstvách, na fyzické ve formě „jammingu“ nebo napadení mesh uzlu a požadování neustálých práv pro přenos. Při tomto útoku dojde k omezení přenosu dat pro ostatní mesh uzly na síti. (Chen et al., 2013, s. 235)
- Červí/černé/šedé díry – Tyto díry fungují na principu přesměrování komunikace do napadených uzlů. Vznikají zasíláním nepravdivých informací. Lze je rozdělit na černé díry, ty vymazávají všechna obdržená data. Šedé díry se pokouší o větší maskování v síti a mažou pouze některé vybraná data. Nejhorší jsou červí díry, které mohou narušovat integritu sítě. Obr. 11 popisuje, jak takový útok může vypadat. Útočník se vydává za bránu do další sítě, pokud by toto mesh router B nebyl schopný rozeznat, tak by všechna komunikace určené do dané sítě šla k útočníkovi. Vzhledem k tomu, že takovému útoku není možné zabránit, tak musí být mesh uzly schopné takové útoky rozeznat pomocí autentifikace. (Chen et al., 2013, s. 235)

² Brute force – útok hrubou silou

Obr. 11 Červí díra



Zdroj:(Hossain, Leung, 2007)

5.2 Obranné mechanismy

Pro ochranu mesh sítě jsou zavedeny obranné mechanismy, ty lze rozdělit na preventivní ochranu před vniknutím do sítě, avšak žádná prevence není neproniknutelná, proto je doplněna detekcí po vniknutí. (Zhang et al., 2009, s. 126)

5.2.1 Prevence před vniknutím

Jako prevence před vniknutím je využíváno generování klíče. Každý souseď se podílí na generování klíče, neboť každý uzel odesílá část klíče. Uzel může složit celý klíč jen v případě, že dostane požadovaný kus klíče od každého souseda a zároveň mu sousedi schválí jeho část klíče. Jde tedy o poměrně dobré zabezpečení, neboť útočník nedokáže tento kus klíče vygenerovat. Klíč se generuje synchronně od odesílatele i příjemce, to znemožňuje užití starého klíče. Při použití špatného klíče se přijatý paket vymaže, v případě napadení uzlu mu příště sousedi neobnoví autentifikaci. (Zhang et al., 2009, s. 127)

Na síťové vrstvě je využíváno směrovacích protokolů, ty využívají kryptografické algoritmy k vybudování důvěry k sousedním uzlům pomocí vzájemné autentifikace. Tento obranný mechanismus funguje proti červím/černým dírám, je však nutná dodatečná detekční ochrana. (Zhang et al., 2009, s. 130)

5.2.2 Detekce po vniknutí

Na druhé vrstvě dochází k detekování uzlů, které se nechovají dle protokolu na MAC, jedná se převážně o zahlcovací a „DoS“ útoky. (Zhang et al., 2009, s. 130)

Detekce po vniknutí probíhá převážně na síťové vrstvě, bylo navrženo několik mechanismů, které jsou založeny na znalosti systému a sběru informací. Dochází k monitorování hodnot uzlů na síti, a pokud dojde k odchýlení od normy, je snížena důvěryhodnost uzlu, popřípadě dojde k jeho úplnému vyřazení ze sítě. Tímto způsobem jsou detekovány útoky červích/černých/šedých děr. (Zhang et al., 2009, s. 131-132)

6 Komunikační a přenosové standardy

Komunikační a přenosové standardy definují způsob komunikace mezi jednotlivými mesh uzly. Nejrozšířenější standard pro meshové LAN sítě je založen na IEEE 802.11s. Existují také protokoly založené na standardu IEEE 802.15, které jsou zaměřeny na sítě PAN pro komunikaci na krátké vzdálenosti, jejich využití je převážně v senzorových a IOT zařízeních. Každý standard využívá směrovací protokoly dle konkrétního cílového využití daného standardu.

6.1 Standard IEEE 802.11s

Standardy označení IEEE802.11 jsou určeny pro bezdrátovou komunikaci na lokální síti, konkrétně Standard IEEE 802.11s je označení pro samo organizující se bezdrátové sítě a zabývá se mesh sítěmi. Tento protokol zavádí nové směrovací protokoly na MAC vrstvě a také se zabývá bezpečností. Směrovací protokol HWMP (Hybrid wireless mesh protocol) založen na protokolu AODV byl zvolen jako povinný základní protokol, kterým musí být vybaveno každé zařízení se standardem 802.11s. (Henry, 2011, s. 3; Wei, 2013, s. 116-117)

SAE (simultaneous authentication of equals) je protokol zabývající se bezpečností na bázi ověřování hesla a vytváření bezpečnostního klíče. Vzhledem k tomu že se zde nenachází centrální řízení, tak musí být vzájemné ověřování peer to peer. Při tomto ověřování nikdy není odesláno heslo ani v zašifrované podobě, ověřování probíhá tak, že uzel dokazuje, že zná heslo, aniž by něco o heslu vyzradil. Každý uzel derivuje náhodné číslo pomocí sdíleného hesla, následně si uzly toto číslo společně se skalárem navzájem pošlou, a pokud u výpočtu získají stejné číslo, tak dojde k autentifikaci. Zabezpečení je odolné proti slovníkovým útokům a po jedné neúspěšné žádosti další nepřijímá a i v případě brute force útoku je výpočet hesla skoro nemožný. (Henry, 2011, s. 13-14; Wei, 2013)

6.2 Bluetooth/BLE

Bluetooth Low Energy (BLE) je modifikací komunikačního protokolu Bluetooth, rozdíl je ve snížení spotřeby energie se zachováním přenosových vlastností. Jedná se o novější standard z roku 2017. BLE nalézá využití pro sítě se zaměřením na IoT a průmysl, výhodou BLE je také, že běžná zařízení mají Bluetooth čip a mohou tak snadno spravovat BLE mesh síť. Přenosové frekvence se nachází v pásmu 2402-2480 MHz, pásmo je rozděleno na 40 kanálů a velikost jednoho kanálu jsou 2 MHz. Komunikace mezi uzly probíhá pomocí zpráv, které jsou rozděleny na zprávy s potřebou odpovědi a bez potřeby odpovědi. Bez potřeby

odpovědi se po přijetí zprávy nic neděje, pokud však je potřeba odpověď, tak uzel musí potvrdit přijetí zprávy, a pokud je požadováno, tak i data, která po něm odesílající uzel požadoval. Přeposílání zpráv probíhá přes skenování a vysílání. (Future Internet, 2019; MOKOBlue, 2021; Arar, 2022)

- Vysílání – zajišťuje odesílání a přeposílání zpráv pomocí „floodingu“, pokud uzel není cílový, přeposílá zprávu dalším uzlům po náhodně vygenerovaném čase. Pro zabránění zahlcení sítě mohou zprávy přeposílat pouze uzly s oprávněním. Každá zpráva obsahuje odesílatele a příjemce, sekvenční číslo, které je částí bezpečnosti, současně je zpráva zašifrovaná a také obsahuje Time to live. Maximální velikost jedné zprávy je 384 byte. (Future Internet, 2019, s. 11; MOKOBlue, 2021)
- Skenování – Pracovní cyklus pro skenování je 100%, zařízení tak vždy poslouchá příchozí zprávy. Zařízení limitována baterií nejsou pro takto náročný cyklus vhodné, řešením je vytvořit pár společně se zařízením, které má 100% pracovní cyklus, přijaté zprávy jsou limitovanému zařízení po žádosti přeposílána. Zprávy jsou po přijetí ukládané do mezipaměti pro zabránění odesílání duplikátních zpráv. (Future Internet, 2019, s. 11; MOKOBlue, 2021)

BLE se od Zigbee odlišuje například v zaslání zpráv, BLE využívá „floodingu“, kdy jsou zprávy odeslány všem sousedním uzlům, naproti tomu Zigbee využívá přesné směřování, které posílá zprávu po dané trase od uzlu A do uzlu B. BLE mesh může mít až 32 767 uzlů v jedné síti s maximem 127 přeskoků pro přenos zprávy. (Arar, 2022; Afaneh, 2022)

6.3 Zigbee

Zigbee je standardizovaný komunikační protokol IEEE 802.15.4, vytvořen seskupením ZigBee Alliance. Zigbee je určen pro přenos malého množství dat s nízkou spotřebou energie. Zigbee funguje na frekvenci 2,4 GHz s maximálním přenosem dat 250 kbps, využívá navíc další dvě nelicencovaná pásma, v Evropě pásmo 868 MHz s maximálním přenosem dat 20 kbps a v Severní Americe pásmo 915 MHz s 40 kbps. Díky těmto vlastnostem nalézá využití u zařízení bez připojení k elektrické síti, která fungují na baterii a nepotřebují přenášet velké množství dat, převážně tedy senzorová zařízení v průmyslu. Zařízení s protokolem Zigbee dokážou vydržet bez nabíjení až několik let, je to způsobené spánkovým režimem, ve kterém zařízení tráví většinu svého času, pracovní cyklus, kdy je zařízení vzhůru je méně než 1 % celkového času. Maximální délka přenosu je 10 až 100 metrů a je ovlivněna prostředím. (Held, 2005, s. 42-43)

6.4 Thread

Thread je standard z roku 2015 vytvořen seskupením výrobců z technologického průmyslu. Využívá protokol 802.15.4 a je podobný protokolu Zigbee, na rozdíl od něj však využívá ke komunikaci IP adresy IPv6 a může tak komunikovat s již existujícími sítěmi využívající IPv6. Zigbee má naopak přidělenou 16bitovou adresu, která musí být bránou přeložena na IP adresu. Stejně jako Zigbee se jedná se o standard pro přenos malého množství dat s rychlostí 250 kbps, určený pro zajištění dlouhé životnosti připojených zařízení na baterii. Využití IP adresy pro komunikaci je výhodné díky snadné komunikaci s Wi-Fi sítěmi. Nevýhoda využívání IPv6 je větší riziko při napadení sítě, je tedy potřeba využívat lepší zabezpečení komunikace. Thread mesh podporuje až 250 zařízení v síti, připojená zařízení se dělí na routery, to jsou zařízení s připojením k elektrické síti, například chytrá zásuvka, a na koncová zařízení, která jsou na baterii, například senzory. Ke komunikaci s dalšími sítěmi pak využívají Thread Border Router, který je připojen k internetu. (Pattison Tuhoy, 2022; The Verge, 2022)

7 Praktická část

7.1 Popis mesh zařízení využitého k měření

K měření jsou využity mesh stanice Deco X50 od výrobce TP-link. Mesh stanice podporují standard 802.11ax a na 5 GHz pásmu podporují přenosovou rychlost až 2 402 Mbit/s, v 2,4 GHz pásmu 574 Mbit/s. Každá stanice má 3 gigabitové porty pro kabelové připojení a 2 vnitřní antény s 2×2 MU-MIMO. Dále využívá modulaci signálu 1024-QAM a OFDMA. Přenosový výkon certifikovaný CE pro Evropu je <20 dBm pro 2,4 GHz a <23 dBm pro 5 GHz, pro USA poté certifikace FCC <30 dBm pro 2,4 GHz a <30 dBm pro 5 GHz. Vzhled stanice je na Obr. 12. (TP-Link Česká republika, 2024)

Obr. 12 TP-Link Deco X50



Zdroj: (TP-Link Česká republika, 2024)

7.1.1 Popis SW použitého k měření

Pro měření byl využit program iPerf3, jedná se nástroj pro měření maximální přenosové rychlosti sítě na IP sítích. Program podporuje nastavení pro časování, protokoly TCP a UDP. Původní verze iPerf byla vyvinuta společností NLANR/DAST, iPerf3 je vyvinut společností ESnet. Program je zdarma ke stažení ze stránky <https://iperf.fr/>. (Gueant, b. r.)

Dalším programem využitým pro měření byl Wireshark. Jedná se software dostupný zdarma ke stažení ze stránky <https://www.wireshark.org/>. Wireshark je určen pro analyzování síťového provozu, program umožňuje zaznamenávání a prohledávání sítě na počítači připojeného k dané síti. Program je dostupný pro Windows, macOS, Linux a UNIX. (Wireshark, b. r.)

7.1.2 Popis HW použitého k měření

Zařízení použitá k měření jsou počítač, notebook a mobilní telefon. Počítač je vybaven základní deskou B450 Tomahawk max, která obsahuje síťovou kartu s maximální propustností 1 Gb/s. Notebook obsahuje základní desku se síťovou kartou s maximální rychlostí 1 Gb/s a bezdrátovým Wi-Fi adaptérem s maximální rychlostí přenosu 433,3 Mb/s. Poslední zařízení je chytrý telefon Samsung S20 FE 5G s podporou 802.11ax a 1024 QAM.

7.2 Měření přenosových rychlostí na mesh síti

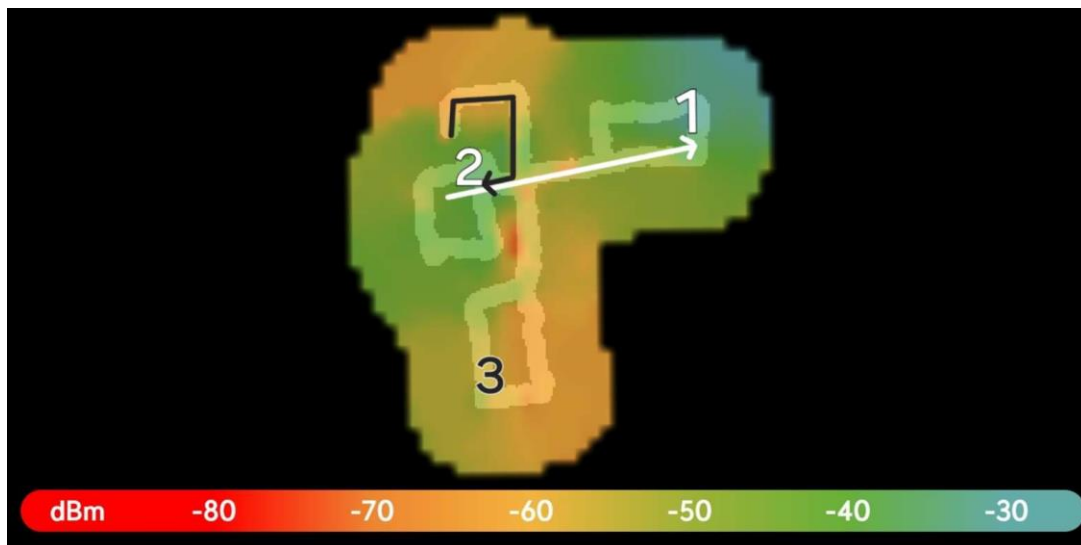
Pro zjištění maximální přenosové rychlosti samotné mesh sítě bylo provedeno měření bez zátěže. Na počítači připojenému k centrální mesh stanici pomocí UTP kabelu byl spuštěn iperf3 server. Následně se ke druhé, respektive třetí mesh stanici připojil notebook, také pomocí UTP kabelu, tím byla eliminována ztráta přenosové rychlosti, která vzniká při bezdrátovém přenosu. Na notebooku se spustil iperf3 klient a měření probíhalo spojením klient-server.

7.3 Heatmapa

Heatmapa zobrazuje sílu signálu mesh sítě pro určité místo. K vytvoření heatmapy byla využita mobilní aplikace Wifiman, dostupná zdarma ke stažení. V aplikaci byla vybrána funkce měření signálu s vytvořením heatmapy. Po spuštění měření se s chytrým telefonem postupně a pomalu pohybovalo po místech, kde byly požadovány naměřené hodnoty. Při měření byla postupně vytvářena heatmapa, která barevně zobrazuje sílu signálu v daném místě. Mesh stanice jsou na mapě označeny číslem, centrální mesh je označen číslem 1. Mesh stanice, které se nacházejí v jiném patře jsou označeny černou barvou.

Na heatmapě 1. patra (Obr. 13) je možné pozorovat, že síla signálu je nejlepší v místnostech s mesh stanicí, kde se pohybuje od -30 dBm do -50 dBm. Slabší signál je ve třetí místnosti, kde se mesh stanice nenachází, avšak místnost je umístěna nad třetí mesh stanicí, která je umístěna v přízemí. Hodnoty ve třetí místnosti se pohybují okolo -60 dBm, lze zde vidět i místo silnějšího signálu, kde je o patro níže umístěna třetí mesh stanice. Nejslabší signál byl naměřen na chodbě a na schodišti, ten je způsoben rušením signálu průchodem zdmi a dalšími objekty, signál by bylo možné zlepšit vhodnějším umístěním uzlů, ale vzhledem k tomu, že se nejedná o běžné místnosti, není jejich lepší pokrytí příliš podstatné.

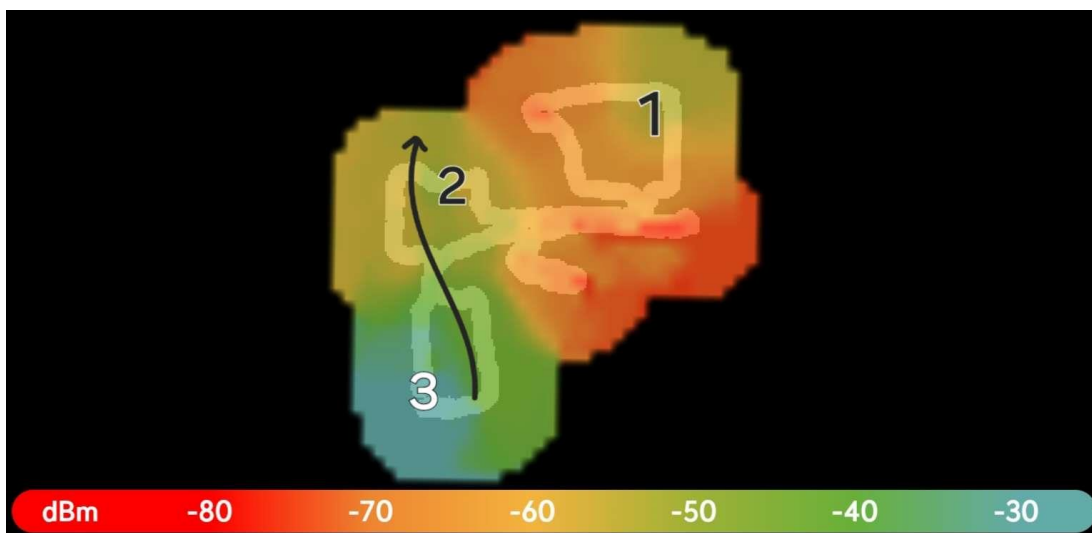
Obr. 13 Heatmapa 1. patro



Zdroj: Vlastní

Na heatmapě přízemí (Obr. 14) jsou pozorovatelné větší rozdíly mezi jednotlivými místy na mapě. Nejlepší signál je v místnosti s třetí mesh stanicí. Naopak nejslabší signál se nachází v předsíni se silou signálu až -80 dBm, to je způsobeno rušením signálu průchodem prostředím.

Obr. 14 Heatmapa přízemí



Zdroj: Vlastní

Při měření maximální přenosové rychlosti sestavené mesh sítě bylo na druhé mesh stanici naměřena přenosová rychlost 343 Mb/s. Na třetí stanici, která je napojena přes druhou stanici na centrální bylo naměřeno 89,5 Mb/s. Rychlosti by bylo možné zlepšit v případě potřeby lepším umístěním stanic.

7.4 Měření doby přepojování mezi mesh uzly

Měření latence přepojení bylo provedeno mezi dvěma mesh uzly. Při tomto měření byla zjišťována doba přepojení od jednoho mesh uzlu k druhému mesh uzlu. K měření byl využit počítač připojený k centrální mesh stanici UTP kabelem Cat.5E. Na počítači byl spuštěn program *iperf3* ve formě serveru a také program Wireshark, který zaznamenává jednotlivé pakety na síti. Druhé zařízení je chytrý telefon se spuštěnou aplikací MagicIperf jako klient a aplikací Wifiman, ve které lze zobrazit, pokud dojde přepojení k jinému mesh uzlu. Na počátku každého měření se spustí záznam portu Ethernet v programu Wireshark a následně se spustí přenos v aplikaci MagicIperf mezi klientem a serverem, následně se chytrý telefon bude vzdalovat od prvního mesh uzlu a bude se přibližovat k druhému mesh uzlu v předem stanovené trase, po příchodu do blízkosti 2 m ke druhému mesh uzlu se vyčká na konec měření a naměřené hodnoty z programu Wireshark a *iperf3* jsou uloženy pro následné vyhodnocení. Měření se 9krát opakuje nejprve mezi centrálním mesh uzlem a druhým mesh uzlem bezdrátově připojeným na centrální mesh uzlu a poté mezi druhým mesh uzlem a třetím mesh uzlem, třetí mesh uzlu je připojen bezdrátově na druhý mesh uzlu. Provede se i měření se zátěží, simulovanou přenosem na FTP serveru, rychlost přenosu bude limitována na 25 Mb/s, což představuje přehrávání videa v rozlišení 4K. Server FTP bude zajištěn programem BabyFTP, který poběží na počítači. FTP klient bude spuštěn na notebooku, jedná se o program Filezilla, ten umožňuje limitování přenosové rychlosti. Oba programy jsou dostupné zdarma ke stažení z webových stránek <https://filezilla-project.org> a https://www.pablosoftwaresolutions.com/html/baby_ftp_server.html. (FileZilla, b. r.; Baby FTP Server, 2015)

Program *iperf3* (viz Obr. 15) je spuštěn přes příkazový řádek, pomocí příkazů *cd* se přejde do složky s programem *iperf3.exe*, který je následně příkazem *iperf3.exe* spuštěn. Po spuštění programu je zobrazena nabídka dostupných příkazů pro *iperf3*. Na počítači je spuštěn server příkazem *iperf3 -s*. Parametry pro připojení na server byly následující:

- IP adresa IPv4: 192.168.68.61
- Port: 5201

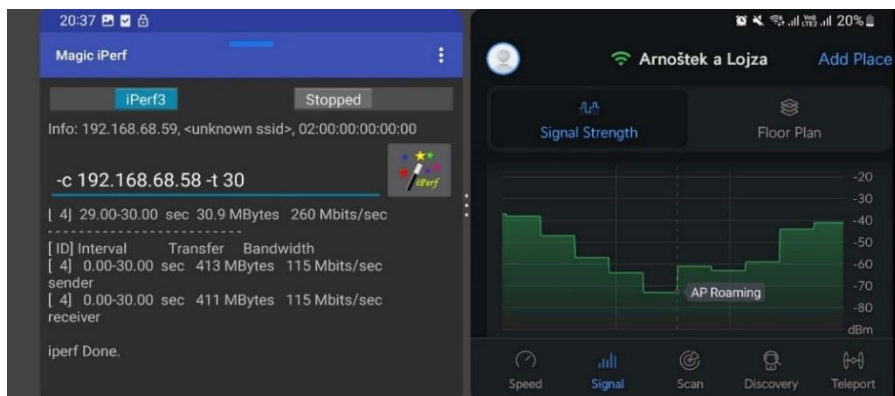
Obr. 15 Program iperf3 jako server

```
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 192.168.68.55, port 35360
[ 5] local 192.168.68.61 port 5201 connected to 192.168.68.55 port 35362
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 5] 0.00-1.01    sec 9.54 MBytes  79.4 Mbits/sec
[ 5] 1.01-2.00    sec 10.5 MBytes  88.2 Mbits/sec
[ 5] 2.00-3.00    sec 10.5 MBytes  88.5 Mbits/sec
[ 5] 3.00-4.00    sec 9.58 MBytes  80.3 Mbits/sec
[ 5] 4.00-5.00    sec 8.57 MBytes  71.7 Mbits/sec
[ 5] 5.00-6.00    sec 8.36 MBytes  70.2 Mbits/sec
[ 5] 6.00-7.00    sec 8.92 MBytes  74.9 Mbits/sec
[ 5] 7.00-8.01    sec 7.32 MBytes  60.8 Mbits/sec
[ 5] 8.01-9.01    sec 6.00 MBytes  50.5 Mbits/sec
[ 5] 9.01-10.00   sec 14.8 MBytes  125 Mbits/sec
[ 5] 10.00-11.00  sec 14.5 MBytes  122 Mbits/sec
[ 5] 11.00-12.00  sec 14.0 MBytes  117 Mbits/sec
[ 5] 12.00-13.00  sec 14.3 MBytes  120 Mbits/sec
[ 5] 13.00-14.01  sec 15.1 MBytes  126 Mbits/sec
[ 5] 14.01-15.00  sec 16.6 MBytes  140 Mbits/sec
[ 5] 15.00-16.00  sec 16.0 MBytes  133 Mbits/sec
[ 5] 16.00-17.00  sec 16.4 MBytes  138 Mbits/sec
[ 5] 17.00-18.00  sec 22.3 MBytes  187 Mbits/sec
[ 5] 18.00-19.00  sec 22.5 MBytes  189 Mbits/sec
[ 5] 19.00-20.00  sec 22.6 MBytes  190 Mbits/sec
[ 5] 20.00-20.03  sec 766 KBytes  213 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 5] 0.00-20.03   sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[ 5] 0.00-20.03   sec 269 MBytes  113 Mbits/sec
-----
sender
receiver
```

Zdroj: Vlastní

Program jako klient je následně spuštěn jako mobilní aplikace Magic iPerf na chytrém telefonu Samsung S20 FE 5G. V aplikaci se zvolí připojení přes iperf3 a do příkazového řádku jsou nastaveny parametry pro připojení, příkaz má následující podobu *iperf3 c 192.168.68.61 -t 20*. Příkaz *-t* označuje délku doby měření v sekundách, po kterou klient odesílá pakety na server. Výsledkem měření jsou hodnoty zobrazující rychlost přenosu dat během intervalu 1 sekundy a výsledná průměrná hodnota za čas *t*, konkrétně 20 sekund pro příkaz výše. Při měření doby přepojení dojde po přepojení na druhou mesh stanici ke skokové změně rychlosti a současně v aplikaci Wifiman je zobrazeno, že došlo k přepojení na druhý mesh uzel (viz Obr. 16).

Obr. 16 Aplikace Magic iPerf a Wifiman



Zdroj: Vlastní

Pomocí informace o přepojení nalezneme v programu Wireshark pakety, které jsou vysílány znovu, neboť při přepojování nebyly odeslány, časový rozdíl mezi paketem, který sděluje, že předchozí pakety nebyly odeslány a posledním předchozím přijatým paketem počítáme jako časovou prodlevu při přechodu z jedné mesh stanice na druhou.

7.4.1 Výsledky měření č.1

Výsledky z měření byly vloženy do tabulek dle stanic, u kterých docházelo k měření. Měření č.1 proběhlo mezi centrální mesh stanicí a druhou mesh stanicí.

Tab. 3 Latence přepojování mezi centrální a druhou mesh stanicí

Pokus č.	Doba přepojení [s]	Průměrná rychlost před přepojením [Mb/s]	Průměrná rychlost po přepojení [Mb/s]	Doba přepojení se zátěží [s]	Průměrná rychlost před přepojením se zátěží [Mb/s]	Průměrná rychlost po přepojení se zátěží [Mb/s]
1	0,2219	68,37	235	0,2506	38,96	220
2	0,1491	74,8	243	0,2248	46,56	198
3	0,2042	73,34	267	0,2338	69,01	229
4	0,2877	64,375	262	0,2802	56,83	191
5	0,2138	50,7	166	0,3189	60,03	233
6	0,2623	61,78	259	0,2677	61,32	177
7	0,2376	76,68	258	0,2666	53,63	215
8	0,2045	71,19	268	0,2623	49,96	184
9	0,1812	61,95	223	0,3931	53,85	263

Z výsledků měření doby přepojování byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Výsledky byly vloženy do tabulky, kde byl proveden F-test a studentův dvouvýběrový t-test pro porovnání měření bez zátěže a se zátěží. Nulová hypotéza je stanovena jako $H_0: \mu_1 = \mu_2$ a hypotéza $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. Neboli H_0 je rovnost středních hodnot doby přepojování. Nulovou hypotézu zamítáme, pokud p hodnota je menší než hladina testu

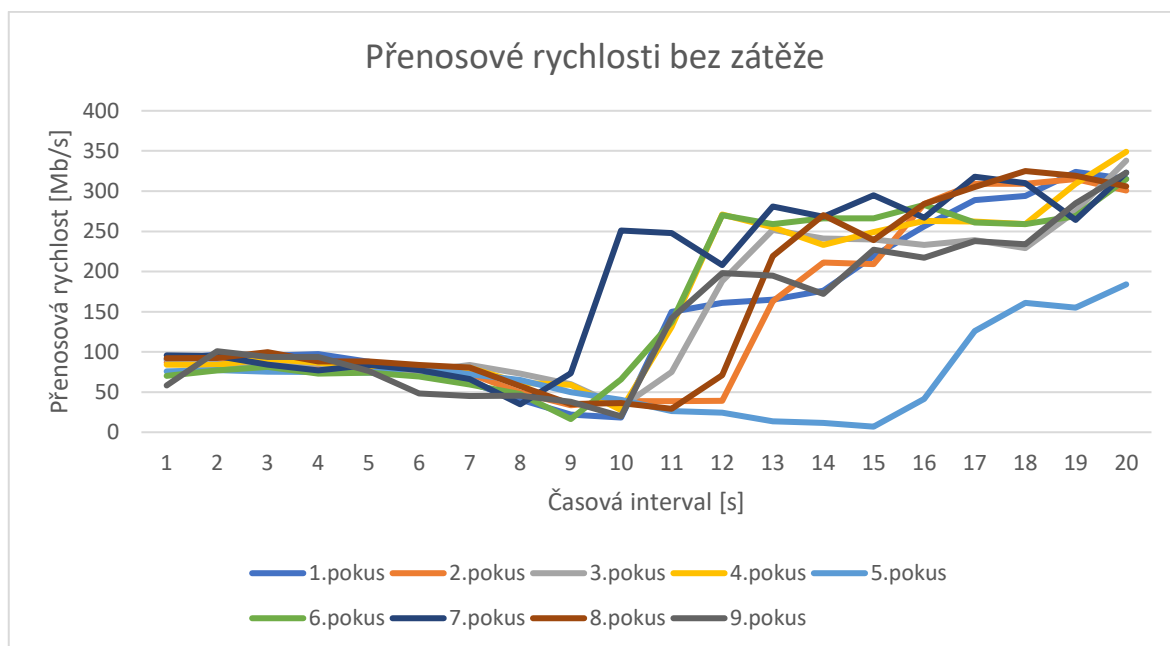
0,05. Z výsledku (Tab. 4) testu je zamítnuta nulová hypotéza a je přijata alternativní. Byl tedy prokázán významný rozdíl v době přepojování bez zátěže a se zátěží.

Tab. 4 Test měření 1

Měření č.1	Počet pokusů	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	F-test	t-test p hodnota
Bez zátěže	9	0,2180	0,0414	0,28	0,01
Se zátěží	9	0,2776	0,0512		

Výrobce na svých stránkách uvádí, že přepojování od jedné mesh stanice na druhou mesh stanici proběhne za méně než 0,3 sekundy. (TP-Link Česká republika, 2024) Z naměřených výsledků lze pozorovat, že nejkratší doba pro přepojení byla naměřena 0,1491 sekundy, nejdelší poté byla 0,2877 sekundy. Přepojení i při nejdelší době přepojování proběhne o 0,0123 sekundy dříve, než udává výrobce. Naměřené pokusy byly vloženy do grafu (viz Obr. 17), který zobrazuje přenosovou rychlost v závislosti na časovém intervalu.

Obr. 17 Graf přenosové rychlosti bez zátěže mezi uzly mesh1 a mesh2

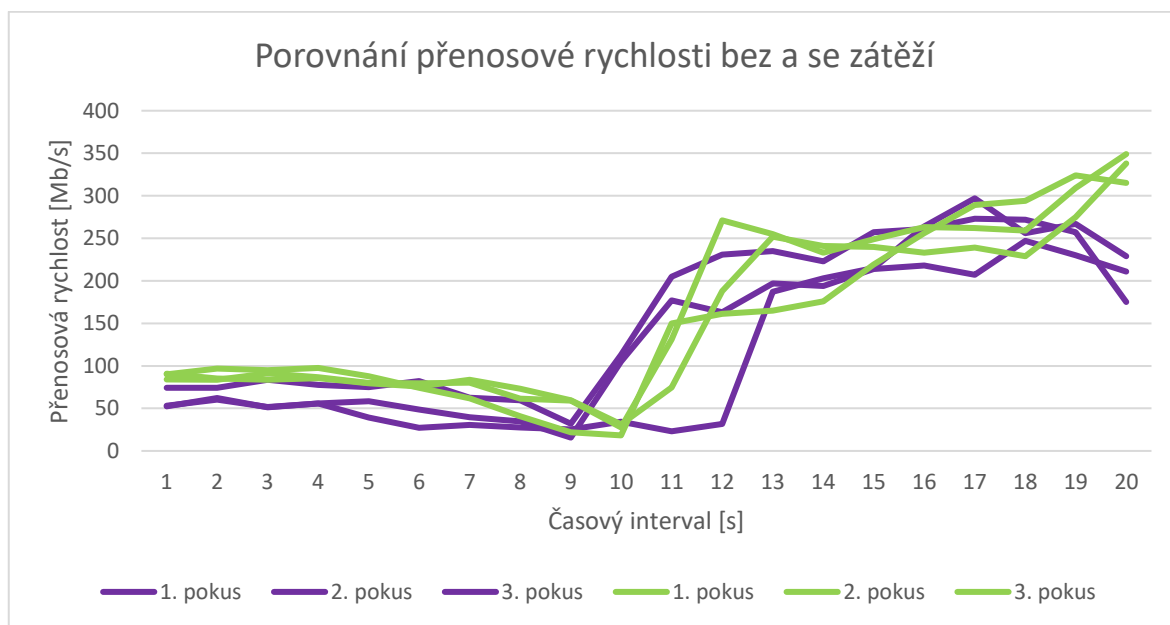


Nastavení programu Iperf3 neumožňuje snížit interval zápisu průměrné hodnoty přenosové rychlosti na nižší hodnotu než 1 sekundu, avšak i přesto je možné pozorovat skokové zvýšení rychlosti při přepojení na centrální mesh stanici. Z grafu (viz Obr. 17) lze pozorovat, že po přepojení skokově vzroste průměrná přenosová rychlost. Při pátém pokusu mohla vzniknout chyba pomalou rychlostí přenosu chytrého telefonu, popřípadě trvalo déle, než mesh síť

vyhodnotila nutnost přepojení. Při zbylých pokusech jsou průběhy velmi podobné, kdy se přenosová rychlost pohybuje do hodnot 100 Mb/s a po přepojení na centrální mesh skokově stoupne až do 350 Mb/s. Průměrná přenosová rychlost je poté před přepojením vytvořená průměrem z jednotlivých měření 67 Mb/s a po přepojení 242,3 Mb/s.

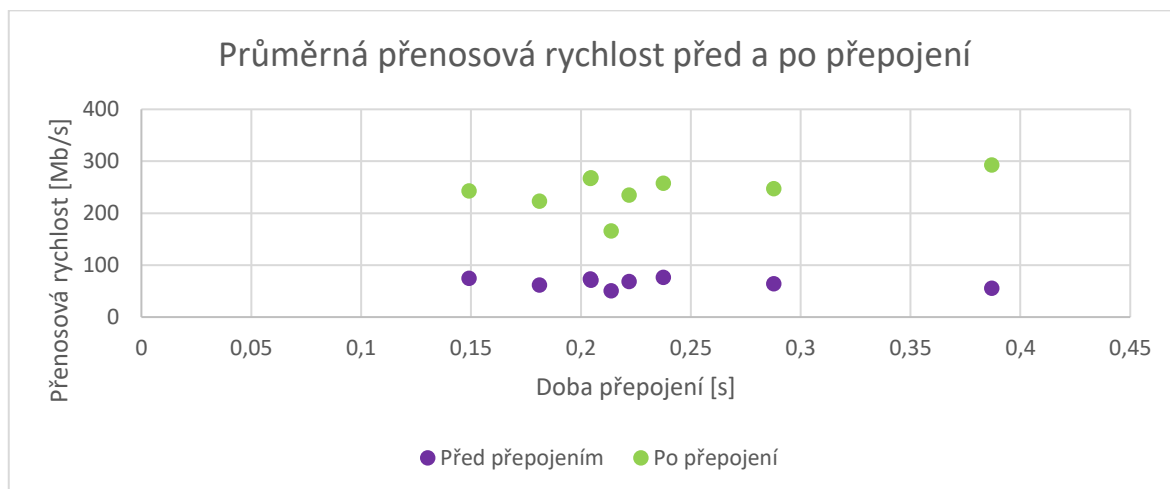
Nejkratší naměřená doba přepojování se zátěží je 0,2248 sekundy, nejdelší doba přepojování 0,3931 sekundy. I se zátěží je nejdelší doba přepojení delší pouze o 0,0931 sekundy. Pouze při dvou pokusech trvala doba přepojení déle než 0,3 sekundy. Pokud porovnáme aritmetický průměr, tak se zátěží je vyšší o 0,0596 sekundy než bez zátěže. Do grafu (viz Obr. 18) byly pro porovnání přenosové rychlosti bez zátěže a se zátěží vybrány 3 pokusy od obou měření. Zelenou barvou jsou označeny pokusy bez zátěže a fialovou barvou pokusy se zátěží. Stejně barevné označení bude používáno i dále v práci.

Obr. 18 Graf porovnání přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh1 a mesh2



Z grafu na Obr. 18 lze pozorovat, že se zátěží je přenosová rychlost před přepojením mírně nižší než přenosová rychlost bez zátěže. Obě přenosové rychlosti poté klesají, než dojde k přepojení. Pokles je pro obě měření podobný, neboť dochází k zeslabení signálu, a tím i snížení přenosové rychlosti mezi chytrým telefonem a druhou mesh stanicí, a nedochází tak k dosažení přenosové rychlosti, kterou je mesh schopný přenést. Po přepojení mají podobné průběhy, pouze přenosová rychlost je se zátěží mírně nižší. Průměrná přenosová rychlost se zátěží před přepojením vytvořená průměrem naměřených hodnot je 54,46 Mb/s a po přepojení je 212,2 Mb/s. Rozdíl oproti měření bez zátěže je 11,84 Mb/s před přepojením a 30,1 Mb/s po přepojení.

Obr. 19 Graf průměrné rychlosti před a po přepojení mezi uzly mesh1 a mesh2

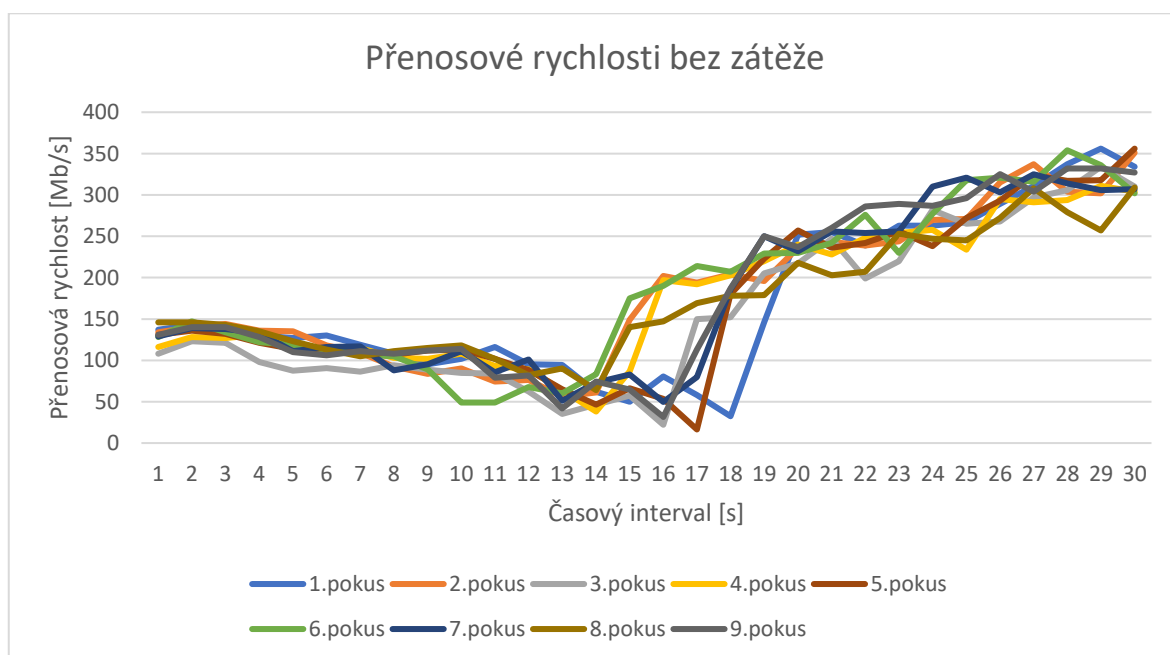


V grafu z Obr. 19 jsou zobrazeny průměrné přenosové rychlosti v závislosti na době přepojení, výsledky jsou si velmi podobné a doba přepojování nemá významný vliv. Pouze při pokusu 5 (viz Obr. 17) nedosáhla přenosová rychlost po přepojení vyšších hodnot.

7.4.2 Výsledky měření č.2

Druhé měření probíhá mezi druhou a třetí mesh stanicí. Při tomto měření je notebook připojen UTP kabelem k druhé mesh stanici. Na notebooku je spuštěn iperf3 server a program Wireshark, který zaznamenává pakety na Ethernet portu. Výsledky měření jsou vloženy do Tab. 5. Přenosové rychlosti byly vloženy do grafu (viz Obr. 20), který zobrazuje přenosové rychlosti bez zátěže v závislosti na časovém intervalu.

Obr. 20 Graf přenosové rychlosti bez zátěže mezi uzly mesh2 a mesh3



Přenosové rychlosti bez zátěže při měření provedeném mezi mesh uzly 2 a 3 dosahují před přepojením přenosových rychlostí až 150 Mb/s. Následně přenosová rychlost klesá až k hodnotám 50 Mb/s, neboť dochází ke snížení síly signálu a poté opět strmě stoupá po přepojení na druhou mesh stanici.

Tab. 5 Měření mezi druhou a třetí mesh stanicí

Pokus č.	Latence přepojení [s]	Průměrná rychlost před přepojením [Mb/s]	Průměrná rychlost po přepojení [Mb/s]	Latence přepojení se zátěží [s]	Průměrná rychlost před přepojením se zátěží [Mb/s]	Průměrná rychlost po přepojení se zátěží [Mb/s]
1	0,2458	100	278	0,2871	77,5	161
2	0,2642	103	257	0,3807	100	208
3	0,2282	80,5	254	0,2797	90,1	188
4	0,2417	103	244	0,2882	94,1	226
5	0,1846	113	231	0,3513	87,5	215
6	0,2195	99,2	255	0,3664	71	195
7	0,2953	101	268	0,3463	84,4	186
8	0,4044	95,7	278	0,4527	87,6	180
9	0,2264	98,3	275	0,2637	69,4	180

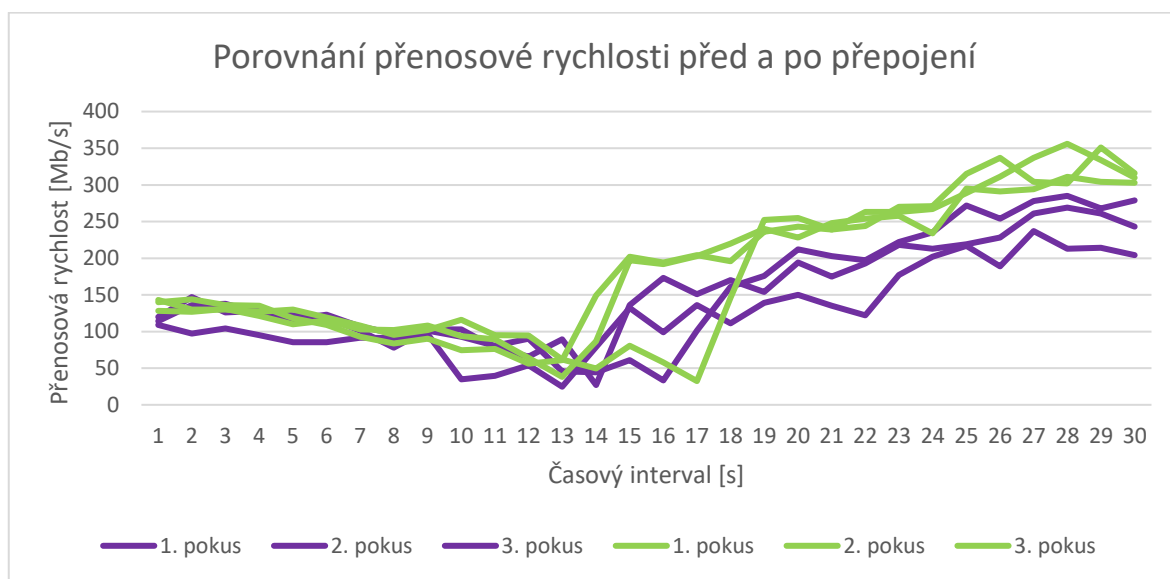
Stejně jako pro první měření byl vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka a F-test s t-testem, výsledky byly vloženy do Tab. 6. Nejdelší naměřená doba přepojování bez zátěže a současně jediný pokus, který překročil 0,3 sekundy je čas 0,4044 sekundy, nejkratší doba přepojení byla poté naměřena 0,2195 sekundy, vypočtený rozdíl mezi nejkratší a nejdelší dobou přepojení je 0,1849 sekundy. Průměrná rychlost před přepojením byla naměřena 99,3 Mb/s a po přepojení vzroste až na 260 Mb/s.

Tab. 6 Test měření 2

Měření č.2	Počet pokusů	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	F-test p hodnota	t-test p hodnota
Bez zátěže	9	0,2567	0,0632	0,46	0,02
Se zátěží	9	0,3351	0,0612		

Studentův dvouvýběrový test má stejnou hypotézu jako při měření č.1 $H_0: \mu_1 = \mu_2$ a hypotéza $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. Jelikož p hodnota je menší než hladina testu, tak zamítáme nulovou hypotézu a přijímáme alternativní, tedy že střední hodnota doby přepojování je různá se zátěží a bez zátěže. Se zátěží překročilo dobu přepojování 5 pokusů, nejednalo se však o příliš velký rozdíl. Nejdelší doba přepojení trvala déle jen o 0,1527 sekundy, nejkratší doba přepojení proběhla za 0,2637 sekundy. Průměrná rychlost před přepojením je 84,6 Mb/s a po přepojení 193 Mb/s.

Obr. 21 Graf porovnání přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh2 a mesh3



Do grafu z Obr. 21 byly pro porovnání přenosové rychlosti se zátěží a bez zátěže vloženy pouze první 3 pokusy od obou měření pro lepší přehlednost. Z grafu (Obr. 21) vyplývá zvýšení přenosových rychlostí po přepojení z druhé mesh stanice na třetí mesh stanici. Před přepojením dosahují maximální přenosové rychlosti 150 Mb/s, po přepojení rychlost naroste až na hodnotu 350 Mb/s. Průměr přenosových rychlostí bez zátěže před přepojením je vyšší o 14,7 Mb/s a po přepojení je vyšší o 66,8 Mb/s. Pokud jsou porovnány přenosové rychlosti před přepojením s měřením č.1, tak při tomto měření jsou přenosové rychlosti mírně vyšší,

to je způsobeno lepším signálem, který mezi sebou stanice 2 a 3 mají. Signál mezi stanicemi 2 a 3 je vyhodnocen v aplikaci od výrobce na 2 ze 4, a signál mezi stanicemi 1 a 2 pouze na 1 ze 4. Průběh přenosové rychlosti je velmi podobný předchozímu měření č.1.

7.4.3 Výsledky měření č.3

Při tomto měření byla měřena přenosová rychlost od třetí mesh stanice přes druhou mesh stanici na centrální mesh stanici. Iperf3 byl spuštěn jako server na počítači připojeném k centrální stanici.

Tab. 7 Měření mezi druhou a třetí mesh stanicí a serverem na první mesh stanici

Pokus č.	Latence přepojení [s]	Průměrná rychlost před přepojením [Mb/s]	Průměrná rychlost přepojení [Mb/s]	Latence přepojení se zátěží [s]	Průměrná rychlost před přepojením se zátěží [Mb/s]	Průměrná rychlost po přepojení se zátěží [Mb/s]
1	0,4889	41,32	65,48	2,3983	7,27	14,61
2	0,5193	36,00	60,99	0,4804	9,62	33,12
3	0,2509	36,01	56,15	0,2163	15,30	33,67
4	0,8778	34,62	45,95	4,1191	21,42	48,80
5	0,3935	38,57	51,80	0,3004	29,59	69
6	0,2641	38,6	54,81	0,1540	27,46	31,83
7	0,1963	42,65	49,25	0,2350	19,99	45,45
8	0,2400	40,5	58,75	0,2084	20,35	44,43
9	0,4067	29,55	68,27	0,6610	28,07	19,41

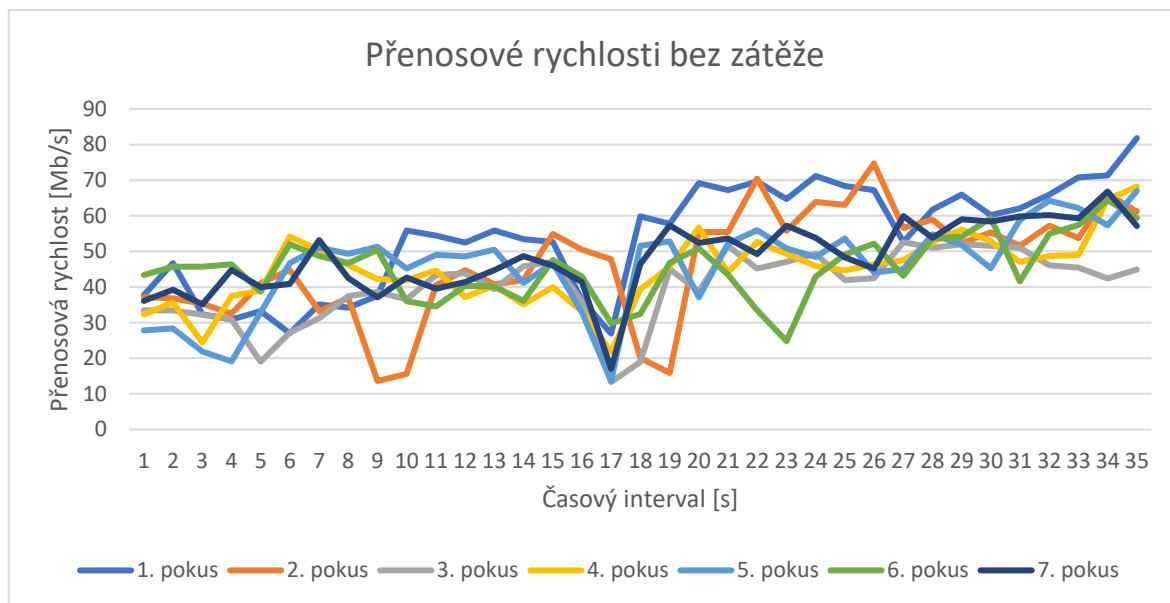
Z naměřených hodnot doby přepojování bez zátěže lze pozorovat vysoký rozdíl mezi nejkratší dobou 0,196 a nejdelší dobou přepojení 0,878 jež činí 0,682 sekundy. Z hlediska používání může být nejdelší naměřený čas již znatelný, neboť se jedná skoro o sekundové zpoždění, které může být pozorovatelné. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou byly společně s F-testem a t-testem vloženy do Tab. 8. Z výsledků F-testu, byla zjištěna nerovnost rozptylů, t-test byl tedy proveden s nerovností rozptylů, nulová hypotéza zůstala

stejná a výsledek t-testu ji nezamítá, nelze tedy prokázat významný rozdíl mezi dobou přepojování bez a se zátěží.

Tab. 8 Test měření 3

Měření č.3	Počet pokusů	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	F-test p hodnota	t-test p hodnota
Bez zátěže	9	0,4042	0,2116	0,00	0,25
Se zátěží	9	0,9748	1,374		

Obr. 22 Graf přenosové rychlosti bez zátěže mezi uzly mesh2 a mesh3 se serverem na mesh1

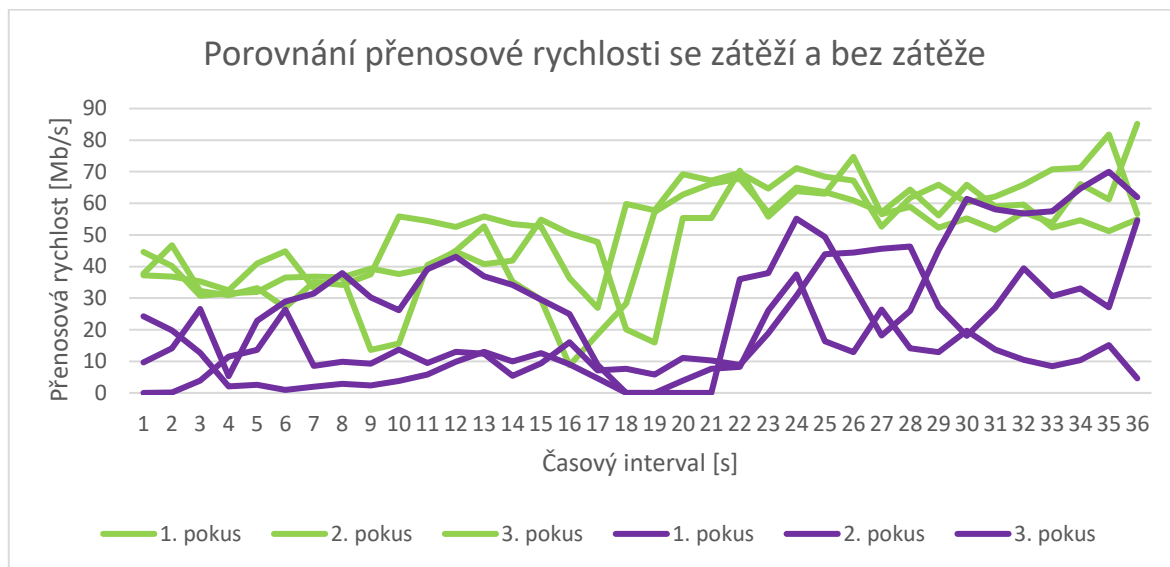


Kvůli lepší přehlednosti bylo do grafu z Obr. 22 vloženo pouze prvních 7 pokusů. V grafu lze pozorovat velice nerovnoměrné výsledky jednotlivých měření. Lze i přesto vidět přibližný časový interval kde dochází k přepojení, neboť přenosová rychlost klesá a poté opět rychle stoupá. K přepojení dochází přibližně v 16 až 18 sekundě. Přenosové rychlosti se pohybují v intervalu od 20 do 50 Mb/s před přepojením, ani po přepojení nejsou přenosové rychlosti příliš stabilní, dosahují však vyšších hodnot od 30 do 70 Mb/s.

Při měření se zátěží byl naměřen největší rozdíl mezi nejmenší a největší naměřenou hodnotou 3,965 sekundy, nejmenší hodnota je 0,154 sekundy a největší 4,119 sekundy. Při nejdělsí době přepojení došlo k výpadku ze sítě, který je znatelný a může znepříjemňovat užívání sítě. Avšak opakovaným měřením bylo zjištěno, že delší doba přepojování nastává

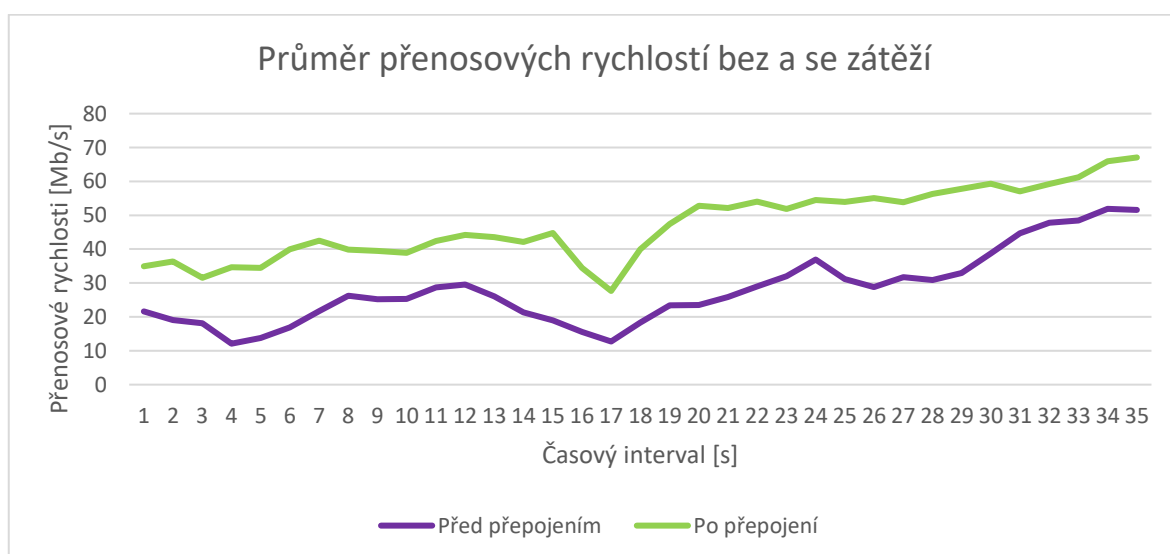
pouze při některých pokusech a při zbylých došlo k přepojení za dobu kratší, než udává výrobce.

Obr. 23 Graf porovnání přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh2 a mesh3 se serverem na mesh1



Při porovnání výsledků přenosové rychlosti bez zátěže a se zátěží tak z grafu (viz Obr. 23) je možné pozorovat, že výsledky bez zátěže dosahují vyšších rychlostí před přepojením a následně i po přepojení. Z grafu lze také sledovat, že výsledky bez zátěže jsou více rovnoměrně rozložené a pohybují se na podobných přenosových rychlostech.

Obr. 24 Graf průměrné přenosové rychlosti bez a se zátěží mezi uzly mesh2 a mesh3 se serverem na mesh1



Výsledky jednotlivých pokusů byly zprůměrovány a následně z nich byl vytvořen graf (viz Obr. 24), který lépe zobrazuje rozdíl mezi přenosovými rychlostmi bez a se zátěží.

8 Závěr

Na počátku práce je analyzován fyzikální a technologický princip fungování mesh sítě. Dále jsou analyzovány vybrané směrovací protokoly, bezpečnostní problémy mesh sítě a obranné mechanismy. V praktické části práce bylo provedeno testování na sestavené meshové síti. Testování se zabývalo dobou přepojování mezi mesh uzly, přenosovými rychlostmi a silou signálu v patrovém domě.

Mesh síť je tvořena několika stanicemi, které vytváří jedinou společnou síť. Připojená zařízení se poté mohou snadno přepojovat k uzlu sítě s nejlepším signálem. Rozšíření sítě je snadné zapojením dalšího mesh uzlu do již existující sítě. Jednotlivé mesh uzly spolu mohou komunikovat bezdrátově. Jedná se o skvělou náhradu místo prostého použití přípojných bodů. Přípojné body totiž udržují spojení se zařízením co nejdéle a k odpojení dojde až po ztrátě signálu, což má za následek připojení k slabšímu přípojnému bodu, i když je k dispozici bod se silnějším signálem.

Dle výše zjištěných výsledků měření bylo zjištěno, že jednotlivé mesh stanice jsou schopny si předávat komunikaci bez znatelného zpoždění. Výsledky měření mezi dvěma mesh stanicemi jsou charakteristické. Byl zjištěn rozdíl v době přepojování mezi mesh stanicemi se zátěží a bez zátěže. Výsledky mezi třemi mesh stanicemi byly způsobeny okolními překážkami a neočekávaně zde nebyl prokázán rozdíl v době přepojování bez zátěže a se zátěží viz kapitola 7. Přenosová rychlost dosahuje nejvyšších hodnot na centrální mesh stanici a na dalších stanicích klesá, kvůli rušení okolními překážkami. Přepojování mezi mesh stanicemi je také ovlivněno dle typu aktuálně použitého aplikačního protokolu, při použití broadcast a multicast přenosů může dojít k výraznému zpoždění přepojení. Použité měřicí zařízení má vliv na výsledky měření.

Dle provedeného měření byly proměřeny způsoby komunikace mesh uzlů při zátěži i bez zátěže. Ze zjištěných výsledků je možné doporučit vhodnost užití mesh sítě do podobných objektů, pro které je pokrytí jedním routerem nedostatečné, ale je požadována bezproblémová konektivita. Jedná se převážně o rodinné domy, kde je požadováno rychlé a stabilní spojení, které by nebylo možné dosáhnout bez použití mesh systému. Naopak použití mesh je zbytečné v případě pokrývání menších prostor, převážně menších bytů, které jsou dostatečně pokryty jediným přístupovým bodem. Technologie mesh sítě je výrazně koncepčnější než prosté použití přípojných bodů a také i bezpečnější.

9 Seznam použitých zdrojů

AFANEH, Mohammad, 2022. *Bluetooth Mesh Networking: The Ultimate Guide*. Online. Novel Bits. Dostupné z: <https://novelbits.io/bluetooth-mesh-networking-the-ultimate-guide/>. [cit. 2024-02-06].

ARAR, Steve, 2022. *An Introduction to Bluetooth Mesh Networking*. Online. Technical Articles. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-bluetooth-ble-mesh-networking/>. [cit. 2023-11-25].

Baby FTP Server, 2015. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: https://www.pablosoftwaresolutions.com/html/baby_ftp_server.html. [cit. 2024-02-08].

CAMPISTA, Miguel Elias Mitre a RUBINSTEIN, Marcelo Gonçalves, 2014. *Advanced Routing Protocols for Wireless Networks*. 1. John Wiley & Sons, Incorporated. ISBN 9781118984925.

Cisco, c2024. Online. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html#~q-a>. [cit. 2024-01-26].

ELLIS, Brian; SCHRADIN, Ryan; RIVERA, Lena; SCHRADIN, Ryan; GOIN, Alex et al., 2020. *How the U.S. military helped develop mobile mesh networking*. Online. The Last Mile. Dostupné z: <https://thelastmile.gotennapro.com/how-the-u-s-military-helped-develop-mobile-mesh-networking/>. [cit. 2023-11-25].

FARAHANI, Shahin, 2008. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. 1. Newnes. ISBN 978-0-7506-8393-7.

FileZilla, b. r.. Online. The free FTP solution. Dostupné z: <https://filezilla-project.org/>. [cit. 2024-02-08].

Future Internet, 2019. Online. Roč. 11, č. 4. ISSN 1999-5903. [cit. 2023-11-24].

GUEANT, Vivien, b. r. *IPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP Test the limits of your network Internet neutrality test*. Online. The TCP, UDP and SCTP network bandwidth measurement tool. Dostupné z: <https://iperf.fr/>. [cit. 2024-01-31].

HASSAN, Mahbub, 2022. *Wireless and Mobile Networking*. 1. Taylor & Francis Group. ISBN 9781000642797.

HEIRES, Katherine, 2015. *The Rebirth of Mesh Networks*. Online. RMMagazine. Dostupné z: <https://www.rmmagazine.com/articles/article/2015/10/01/-The-Rebirth-of-Mesh-Networks->. [cit. 2023-11-25].

HELD, Gilbert, 2005. *Wireless Mesh Networks*. 1. Taylor & Francis Group. ISBN 0849329604.

HENRY, Jerome, 2011. *802.11s Mesh Networking*. 1.

- HOSSAIN, Ekram a LEUNG, Kin (ed.), 2007. *Wireless Mesh Networks*. Online. 1. Boston, MA: Springer US. ISBN 978-0-387-68838-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68839-8>. [cit. 2023-11-24].
- CHEN, Lei; JI, Jiahuang a ZHANG, Zihong, 2013. *Wireless Network Security*. Online. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-36510-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36511-9>. [cit. 2023-11-24].
- KHAN, Kamran, 2009. *Wireless Mesh Networks - Reliability and Flexibility*. Online. Oriental Journal of Computer Science and Technology. Dostupné z: <https://www.computerscijournal.org/vol2no1/wireless-mesh-networks-reliability-and-flexibility/>. [cit. 2023-11-24].
- Link Labs*, 2016. Online. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/mesh-network-topology-advantages-disadvantages>. [cit. 2023-12-08].
- LOO, Jonathan; MAURI, Jaime Lloret a ORTIZ, Jesús Hamilton (ed.), 2011. *Mobile Ad Hoc Networks : Current Status and Future Trends*. 1. Taylor & Francis Group. ISBN 9781439856505, 9781439856512.
- Mesh Topology*, 2021. Online. NETWORK ENCYCLOPEDIA. Dostupné z: <https://networkencyclopedia.com/mesh-topology/>. [cit. 2023-11-24].
- MOKOBlue: Original Bluetooth/BLE IoT*, 2021. Online. Dostupné z: <https://www.mokoblue.com/what-is-bluetooth-mesh/>. [cit. 2023-11-25].
- PASZKIEWICZ, Andrzej; BOLANOWSKI, Marek a ZAPAŁA, Przemysław, 2019. Phase Transitions in Wireless MESH Networks and Their Application in Early Detection of Network Coherence Loss. Online. *Applied Sciences*. Roč. 9, č. 24, s. 3. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app9245508>. [cit. 2023-12-08].
- PATTISON TUHOY, Jennifer, 2022. *Thread is Matter's secret sauce for a better smart home*. Online. The Verge. Dostupné z: <https://www.theverge.com/23165855/thread-smart-home-protocol-matter-apple-google-interview>. [cit. 2024-01-25].
- PERVEZ, Shahbaz, 2016. Wireless Mesh Network Architecture and Applications. Online. *ResearchGate*. Roč. 2016, s. 1-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2572.0722>. [cit. 2023-11-24].
- SATHYANARAYANAN, A., PEDAMKAR, Priya (ed.), 2023. *What is Mesh Topology?* Online. EDUCBA. Dostupné z: <https://www.educba.com/what-is-mesh-topology/>. [cit. 2023-11-24].
- The Verge*, 2022. Online. Dostupné z: <https://www.theverge.com/23165855/thread-smart-home-protocol-matter-apple-google-interview>. [cit. 2024-01-25].
- TP-Link Česká republika*, 2024. Online. Dostupné z: <https://www.tp-link.com/cz/home-networking/deco/deco-x50/#tp-link-mesh>. [cit. 2024-02-06].
- TP-Link Česká republika*, 2024. Online. Dostupné z: <https://www.tp-link.com/cz/home-networking/deco/deco-x50/>. [cit. 2024-01-25].

Tp-link, b. r.. Online. Dostupné z: <https://www.tp-link.com/cz/MU-MIMO/>. [cit. 2024-01-25].

TRČÁLEK, Antonín, 2019. Wi-Fi v každém koutě. *Computer*. Roč. 2019, č. 6, s. 42-45.

WEI, Hung-Yu, 2013. *WiFi, WiMAX, and LTE Multi-Hop Mesh Networks : Basic Communication Protocols and Application Areas*. 1. John Wiley & Sons, Incorporated. ISBN 9780470481677.

Wireshark, b. r.. Online. Dostupné z: https://www.wireshark.org/faq.html#_what_is_wireshark. [cit. 2024-02-08].

YANG, Junmo; SAKAI, Kazuya; KIM, Bonam; OKADA, Hiromi a SUN, Min-Te, 2006. Cost-Aware Route Selection in Wireless Mesh Networks. Online. In: CAO, Jiannong; STOJMENOVIC, Ivan; JIA, Xiaohua a DAS, Sajal K. (ed.). *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*. 1. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 171-184. ISBN 978-3-540-49932-9. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/11943952_15. [cit. 2024-01-26].

ZHANG, Yan; ZHENG, Jun a HONGLIN, Hu, 2009. *Security in Wireless Mesh Networks*. 1. Taylor & Francis Group. ISBN 9780849382505.

10 Přílohy

Tabulka 1 Měření 1 bez zátěže (v Mb/s)	i
Tabulka 2 Měření 1 se zátěží (v Mb/s)	i
Tabulka 3 Měření 2 bez zátěže (v Mb/s)	ii
Tabulka 4 Měření 2 se zátěží (v Mb/s)	iii
Tabulka 5 Měření 3 bez zátěže (v Mb/s)	iv
Tabulka 6 Měření 3 se zátěží (v Mb/s)	v

Tabulka 1 Měření 1 bez zátěže (v Mb/s)

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
1	89,9	86,9	90,8	84	75,9	70,2	95,5	92	58,1
2	96,7	88,4	85,1	83,7	77,2	76,6	95	92,4	101
3	95,1	82,6	83,6	91,1	75,2	81,2	84	99,7	93,8
4	97,4	81,4	85,4	86,6	75,1	73	77,1	88,1	93,5
5	87,8	78,3	79,7	79,8	74,3	74,2	83,6	88	76,3
6	74,4	81,8	75,8	79,6	81,2	69,5	77,3	83,7	48,4
7	61,7	73,1	83,6	80,3	72,3	59,6	66,2	80,7	45,2
8	40,6	49,6	73	61,6	65	47,6	34,8	57,5	45,6
9	21,80	33,6	59,7	59,1	49,9	16,4	73,5	35,3	37,8
10	18,3	38,9	31,30	27,60	40,5	65,7	251	36,5	19,8
11	150	38,7	74,8	131	26,50	137	248	29,2	142
12	161	39,2	188	271	24,20	270	208	70,8	198
13	165	163	252	255	13,80	259	281	219	195
14	176	211	241	233	11,80	266	268	270	172
15	219	209	240	249	6,97	266	295	239	227
16	256	284	233	263	41,4	283	267	284	217
17	289	309	239	262	126	261	318	305	238
18	294	309	229	259	161	259	310	325	234
19	324	315	275	309	155	269	264	319	285
20	315	301	338	349	184	315	323	306	323

Tabulka 2 Měření 1 se zátěží (v Mb/s)

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
1	53,2	52,6	74,4	55,9	75,8	63,7	46,6	56	77,7
2	60,3	62,3	74,2	53,1	77,3	64,7	53,9	57,8	72,4
3	51,6	51,4	83,5	23,6	80,2	68	69,9	56,4	76,4
4	55,9	55,8	77,6	47	80,2	68,5	64,8	54,1	70,3
5	39,2	58,3	75,1	81	78	63,7	68	60,7	54,9
6	27,3	48,7	82,2	81,5	75,7	62,8	65,5	49,6	58,2
7	30,6	39,7	62,6	67,9	61,9	57	55,4	42,2	66,6
8	27,6	34,6	59,5	73	54,2	42,2	42,6	22,9	63,3

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
9	25,5	15,7	32	28,5	26,1	59,1	16	68	36,7
10	34,3	105	113	64,8	29,5	141	76,7	162	41,5
11	23,1	177	205	133	21,5	197	148	115	23,5
12	31,9	163	231	143	69,1	207	172	128	4,74
13	187	197	235	165	163	230	156	161	168
14	203	194	223	188	171	221	171	151	240
15	215	214	257	196	238	173	233	121	229
16	264	218	261	235	338	132	253	153	262
17	297	207	273	258	285	135	220	232	287
18	256	247	272	250	321	147	227	221	294
19	267	230	257	253	320	212	290	196	263
20	229	211	175	229	291	163	309	330	299

Tabulka 3 Měření 2 bez zátěže (v Mb/s)

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
1	137	134	108	116	146	128	129	131	131
2	143	140	123	128	146	147	139	136	140
3	130	144	121	127	143	134	138	132	140
4	130	136	97,8	131	135	122	133	121	128
5	127	135	87,7	121	123	119	111	114	110
6	130	118	90,5	110	113	113	116	113	106
7	119	109	86,2	115	105	107	117	111	111
8	108	92,7	93,9	103	111	105	88	107	108
9	95,3	83,6	88,8	102	115	89,2	95,3	112	112
10	102	90,1	84,7	108	118	49	111	113	114
11	116	74,4	84	93,5	102	49	85,7	102	78,8
12	95,1	76,1	62,5	89,2	82,1	67,6	101	88,3	81,8
13	94,4	56,1	35,3	63,8	90,1	60	51,3	65	41,7
14	62	61	46,3	38,1	64	83,2	73	46,5	74,5
15	49,8	149	57,2	86,7	140	175	82,9	66,1	64,5
16	80,4	202	22,1	197	147	190	49,7	53,3	31,5
17	58	194	150	192	169	214	79,7	16,4	113
18	32,4	204	152	203	178	207	186	180	187
19	146	196	205	220	179	229	250	223	250
20	252	236	217	240	218	230	232	257	237
21	255	243	247	228	203	242	256	236	260
22	239	239	199	248	207	276	254	242	286
23	263	244	220	254	253	230	256	256	289
24	263	270	282	258	247	277	310	238	287
25	267	271	265	234	245	318	321	272	296
26	289	315	268	295	272	321	303	293	325

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
27	311	337	297	291	308	316	325	324	304
28	337	304	306	294	279	354	314	317	332
29	356	302	334	311	257	336	306	318	332
30	334	351	310	304	309	302	307	356	327
31	310	316	364	303	324	302	335	388	307

Tabulka 4 Měření 2 se zátěží (v Mb/s)

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
1	109	120	107	114	113	99,3	109	107	117
2	97,1	147	143	136	124	81,5	127	124	98,3
3	104	126	131	138	119	98,3	126	125	92,1
4	94,9	128	99,2	125	129	103	124	121	96,2
5	85,5	122	122	117	109	86	119	117	92
6	85,3	119	121	123	112	90,7	111	118	91,3
7	91,5	101	120	107	106	85,7	108	117	76
8	91,2	77,8	89,9	97,2	105	80	94,8	109	76,6
9	96,2	103	102	101	104	86,1	89,9	105	92,2
10	34,9	103	86,1	92,9	99,5	85,7	91,1	109	80,4
11	39,5	78,1	89	80,8	78,6	66,6	92	96,2	48,3
12	53,8	65,6	65,7	90	76,1	68,9	69,2	87,4	49,2
13	24,7	89,2	67,6	45,7	56,4	64,5	67	67,5	39,6
14	78,7	27	46,1	44,5	34	41,9	19,9	46,9	30,7
15	132	136	45,7	60,9	28,3	43	34,8	43,7	29,6
16	99	173	55,1	33,3	51	48,3	32,5	47,2	36,9
17	136	151	41,9	101	43,1	42,4	20,5	53,5	35
18	111	170	62,3	161	69,1	7,32	51,9	46,4	79,5
19	139	154	148	176	155	146	132	23,9	153
20	150	194	160	212	208	149	170	159	122
21	135	175	186	203	198	176	176	176	95,3
22	122	193	176	197	185	178	178	112	139
23	177	218	203	222	224	166	190	112	151
24	202	213	183	235	235	187	187	163	150
25	217	219	176	272	239	196	205	162	159
26	189	228	220	254	244	230	244	175	195
27	237	261	238	278	239	198	217	228	208
28	213	269	218	285	240	240	221	200	282
29	214	261	231	268	257	225	221	220	264
30	204	243	224	279	280	249	239	198	260
31	154	281	210	260	243	201	185	256	264

Tabulka 5 Měření 3 bez zátěže (v Mb/s)

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
1	37,7	37,2	33,5	32,3	27,8	43,4	36,1	33,6	33,2
2	46,7	36,8	33,4	35,6	28,4	45,7	39,2	29,4	32,2
3	32,3	35,3	32,2	24,4	21,9	45,7	35,1	30,7	26,3
4	30,9	32,5	30,9	37,4	19,1	46,3	44,8	45,3	24,4
5	33,2	41	19	39	32,9	38,7	40	42,2	24
6	27	44,8	27,2	54,2	46,7	52	40,9	41,5	25,5
7	35,1	33,2	31,2	50,3	51,1	48,7	53,2	38,5	40,8
8	34,2	36,9	37,4	46,2	49,3	46,7	42,5	38,5	26,7
9	37,5	13,6	38,6	42,2	51,3	50,4	37,1	52,3	32,4
10	55,9	15,6	36,5	41,9	45,2	36	42,7	50,3	25,9
11	54,4	40,5	43,4	44,6	49	34,6	39,5	43,8	31,9
12	52,5	44,7	43,8	37,2	48,6	40,3	41,4	48,9	40,5
13	55,9	40,8	39,4	40,4	50,5	40,1	44,7	48,4	31,4
14	53,4	41,9	45,8	35,1	41,1	36,1	48,7	43,8	32,9
15	52,6	54,9	47,1	40	46,8	47,6	46	43,9	24,2
16	36,3	50,5	35,9	33,1	32,9	42,9	41,4	16,9	20,6
17	26,9	47,8	13,3	21,8	13,6	29,8	17	54,9	23,8
18	59,8	20,1	18,9	39,3	51,6	32,4	46,4	59	32,1
19	57,8	15,9	45	45,7	52,8	46,8	57,3	62,7	42,4
20	69,2	55,4	38,8	56,7	37,1	50,8	52,4	64	51
21	67,2	55,4	51,6	44,1	52,2	43,5	53,6	48,6	53
22	69,6	70,4	45,2	52,6	56	33,5	49,2	50,6	59,5
23	64,7	55,8	47,1	49,3	50,8	24,8	57,2	53,6	63,1
24	71,2	63,9	49,3	45,9	48,4	42,9	53,8	54,2	60,9
25	68,4	63,1	41,9	44,6	53,6	49,1	48,3	55,3	61,1
26	67,2	74,7	42,5	46,3	44,1	52,2	45,2	61,5	61,7
27	52,6	56,6	52,6	47,5	45	43,1	59,9	65,8	61,1
28	61,7	58,9	51	52,6	54,8	53,7	53,8	55	65,2
29	65,9	52,3	52	56,1	51,8	54,1	59	52	77,5
30	60,2	55,3	51,6	52,8	45,3	59,4	58,4	67,5	83,7
31	62,1	51,6	51	47,1	58,8	41,6	59,8	50,3	91,4
32	65,9	57,2	46,1	48,7	64,2	55	60,2	57,2	78,8
33	70,8	53,7	45,4	49	62,2	57,4	59,3	64	88,8
34	71,3	66,1	42,4	64,6	57,3	64,4	66,8	60,7	100
35	81,8	61,2	44,9	68,2	67	59,4	57,1	68,6	95,4
36	56,7	85,2	55,8	73,2	88,4	71,7	79,3	69,5	115

Tabulka 6 Měření 3 se zátěží (v Mb/s)

Interval [s]	1.pokus	2.pokus	3.pokus	4.pokus	5.pokus	6.pokus	7.pokus	8.pokus	9.pokus
1	24,2	0	10,7	9,67	30,9	36,3	37,5	24,7	20,6
2	19,8	0,117	25,8	14,1	6,75	33,7	26,9	15,3	28,8
3	12,7	3,86	17,3	26,6	8,15	30,9	27,7	9,68	26,6
4	2,09	11,5	10,2	5,35	8,28	33,6	24,1	3,03	10,7
5	2,54	13,6	6,68	22,8	10,1	38,1	12,1	2,12	15,6
6	0,967	26,4	7,13	28,9	5,07	35,7	11,9	1,27	34,9
7	1,91	8,56	18,4	31,4	37,7	29,3	12,9	14,9	40,3
8	2,91	9,87	18,2	37,9	56,1	29,2	9,09	32,5	40,7
9	2,41	9,23	18,2	30,2	53,3	26,6	9,54	37,3	40,5
10	3,83	13,7	15,9	26,2	41,3	28,2	24,1	35,4	39,1
11	5,83	9,41	29,4	39,1	47,4	25	30	30,4	41,8
12	9,81	13	22	43,1	53,4	26,6	23,9	34,7	39,3
13	13	12,4	15,1	36,9	42,1	27,7	24	35,5	28
14	10	5,44	15,2	34,2	39,9	24,2	20,3	17,2	25,6
15	12,6	9,33	7,43	29,5	20,7	22,5	23,9	23,9	21
16	9,03	16	7,2	25	12,3	25,2	16	14,4	15,1
17	4,58	7,14	13,6	8,88	33,3	18,6	5,84	13,7	8,58
18	0	7,63	21,6	0	40,9	17,3	20,3	22,3	34,7
19	0	5,77	38,8	0	71,5	13,1	31,2	29,3	21,3
20	3,87	11,1	35,6	0	68,3	21,1	32,8	37	1,59
21	7,61	10,3	34,6	0	84,5	28,7	35,6	30,4	1,44
22	8,23	8,81	16,6	36	86	32,5	30,4	42,1	0,528
23	26,1	18,9	24	37,9	80,8	22,9	32,8	38,3	6,25
24	37,5	30,7	27,3	55,2	79,2	7,47	44	43,1	7,72
25	16,3	43,9	25	49,4	52	6,93	43,7	35,4	7,54
26	12,9	44,4	13,5	33,7	54,2	8,44	44,7	32,8	14,5
27	26,4	45,6	30,6	18,2	57	11,3	39,1	50,7	6,76
28	14,1	46,3	33,8	26	62,9	8,74	40,9	34,2	11,2
29	12,9	27,3	16,2	45,2	63,1	18,3	48,3	39,3	25,8
30	19,7	18,1	22,1	61,4	68	38,3	51,8	47,1	21,7
31	13,7	27	33	58,1	69,9	39,1	55,3	57,3	48,7
32	10,5	39,4	58,3	56,8	66,1	40	58,6	56,3	43,9
33	8,46	30,6	73,2	57,5	73,6	41,1	71,6	47,3	33,1
34	10,4	33,1	49,1	64,7	90,4	54,1	66	60,5	38,8
35	15,1	27,1	55	70	79,6	61,1	66,1	66,8	23,7
36	4,6	54,6	51,5	61,9	98,7	101	50,3	74,1	19,6