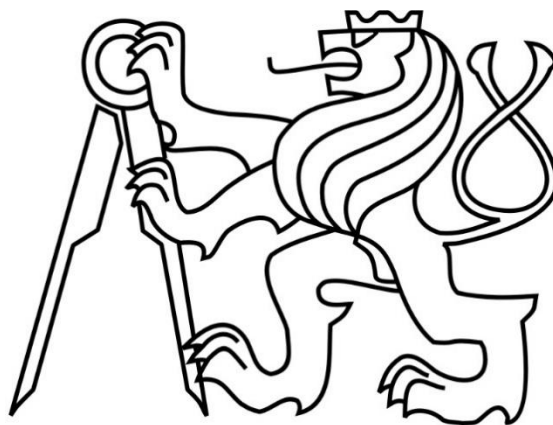


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



VYTĚŽOVÁNÍ DAT Z PŘÍSTUPOVÉ ČÁSTI MOBILNÍ SÍŤE

MOBILE DATA MINING – ACCESS NETWORK

2020

Autor: Bc. Andrea Stejskalová

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Kocur, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

.....

podpis diplomanta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stejskalová** Jméno: **Andrea** Osobní číslo: **456889**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Technologie internetu věcí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vytěžování dat z přístupové části mobilní sítě

Název diplomové práce anglicky:

Mobile Data Mining - Access Network

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je ověření schopnosti získat porovnatelné údaje (přenosová rychlost, zpoždění, ztrátovost apod.) mezi uživatelským měřením z uživatelského terminálu a měřením v infrastruktuře mobilní sítě. V rámci práce bude analyzována komunikační infrastruktura mobilní sítě za účelem definování míst, ve kterých lze získat relevantní a porovnatelné údaje s měřením z uživatelského terminálu (mob. telefon, modem apod.). V identifikovaných místech bude provedeno ověřovací měření, které bude srovnáno s měřeními prováděnými na uživatelských terminálech.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČTÚ Měření rychlosti přenosu dat - <https://www.ctu.cz/mereni-rychlosti-prenosu-dat>
- [2] F-Tester - zařízení pro měření kvality komunikačních sítí - <https://f-tester.fel.cvut.cz>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zbyněk Kocur, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **30.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Zbyněk Kocur, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studentky

ANOTACE

Cílem práce je ověření schopnosti získat porovnatelné údaje o přenosové rychlosti mezi měřením uživatele a v infrastruktuře mobilní sítě. Srovnání je provedeno na základě porovnání získaných dat dle jednotlivých vrstev referenčního modelu ISO/OSI (spojová, síťová, transportní a aplikační). V rámci práce je analyzována komunikační infrastruktura mobilní sítě za účelem definování míst, ve kterých lze získat relevantní údaje, porovnatelné s měřením z uživatelského terminálu (mob. telefon, modem apod.). V identifikovaných místech je provedeno ověřovací měření, které je srovnáno s měřeními prováděnými na uživatelských terminálech.

KLÍČOVÁ SLOVA

měření parametrů sítě, propustnost sítě, TCP, UDP, RLC

SUMMARY

The main goal of this thesis is to demonstrate, how the comparable data about the transfer speed can be obtained by the measurements of user's device and points within the mobile infrastructure itself. Comparison of the found data is made on the levels of the particular layers of the ISO/OSI model (connection, web, transport and application). I have measured and analysed the communication infrastructure of mobile's network, to be able to define specific points, where relevant data can be obtain. Moreover, these relevant data have to be comparable with data from the user's terminal (mobile phone, modem) to give usable outcome. The process of the comparison of the data's measurements is made between the identified points of network and user's terminal.

INDEX TERMS

Network measurement tools, throughput, TCP, UDP, RLC

PODĚKOVÁNÍ

Nejdříve bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Zbyňkovi Kocurovi, Ph.D. za jeho podnětné rady a odbornou pomoc, kterou mi poskytoval po celou dobu zpracování mé diplomové práce. Současně bych chtěla poděkovat kolegům za jejich odborné rady a poskytnutí přístupů k potřebným datům. Ráda bych poděkovala také své rodině a všem blízkým, kteří mě při vytváření této práce podpořili.

OBSAH

| | |
|---|------|
| SEZNAM UVEDENÝCH ZKRATEK | viii |
| SEZNAM TABULEK | x |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | xi |
| SEZNAM GRAFŮ..... | xii |
| 1 ÚVOD..... | 1 |
| 1.1 CÍLE PRÁCE..... | 2 |
| 1.2 STRUKTURA PRÁCE..... | 2 |
| 2 TEORETICKÝ ROZBOR..... | 3 |
| 2.1 VALIDACE MOBILNÍ SÍTĚ..... | 3 |
| 2.2 MOBILNÍ SÍŤ..... | 3 |
| 2.2.1 PÁTEŘNÍ ČÁST..... | 4 |
| 2.2.2 PŘÍSTUPOVÁ ČÁST..... | 5 |
| 2.2.3 UŽIVATELSKÉ ZAŘÍZENÍ..... | 7 |
| 2.3 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VÝKONU SÍTĚ..... | 10 |
| 2.3.1 PROPUSTNOST SÍTĚ..... | 11 |
| 2.3.2 SOFTWAREOVÉ ZAŘÍZENÍ..... | 11 |
| 2.3.3 HARDWAROVÉ ZAŘÍZENÍ..... | 11 |
| 2.3.4 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ V RÁMCI MĚŘENÍ DP..... | 12 |
| 3 NALEZENÍ VHODNÉHO MĚŘÍCÍHO MÍSTA..... | 13 |
| 3.1 RLC PROTOKOL..... | 14 |
| 3.2 TRANSPORTNÍ PROTOKOLY..... | 14 |
| 3.2.1 TCP PROTOKOL..... | 14 |
| 3.2.2 UDP PROTOKOL..... | 18 |
| 3.3 KOMUNIKACE MEZI VRSTVAMI..... | 18 |
| 3.3.1 KOMUNIKACE MEZI RLC A TCP..... | 19 |
| 4 METODIKA PRO MĚŘENÍ VÝKONU SÍTĚ..... | 20 |
| 4.1 POSTUP METODIKY..... | 21 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2 | APLIKACE METODIKY | 21 |
| 4.2.1 | SROVNÁNÍ TCP A UDP | 21 |
| 5 | ZÍSKÁNÍ DAT NA STRANĚ OPERÁTORA | 23 |
| 6 | VÝBĚR VHODNÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA STRANĚ UŽIVATELE | 24 |
| 6.1 | OOKLA..... | 25 |
| 6.1.1 | PARAMETRY A NASTAVENÍ APLIKACE | 25 |
| 6.1.2 | SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ | 25 |
| 6.2 | NETMETR..... | 26 |
| 6.2.1 | PARAMETRY A NASTAVENÍ APLIKACE | 27 |
| 6.2.2 | SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ | 27 |
| 6.3 | F-TESTER | 28 |
| 6.3.1 | PARAMETRY A NASTAVENÍ APLIKACE | 28 |
| 6.3.2 | SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ | 28 |
| 6.4 | ZHODOCENÍ POROVNÁNÍ MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ..... | 29 |
| 7 | ROZSÁHLEJŠÍ TESTY S F-TESTEREM..... | 30 |
| 7.1 | UDP MĚŘENÍ..... | 30 |
| 7.2 | TCP PARAMETRY..... | 31 |
| 8 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ F-TESTERU..... | 36 |
| 8.1 | DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ | 36 |
| 8.1.1 | TCP MĚŘENÍ V RÁMCÍ 24 HODIN..... | 36 |
| 8.1.2 | TCP MĚŘENÍ V RÁMCÍ 7 DNÍ..... | 39 |
| 9 | ZÁVĚR | 42 |
| 10 | POUŽITÉ ODKAZY..... | 44 |

SEZNAM UVEDENÝCH ZKRATEK

ACK - Acknowledgement
AM - Acknowledge mode
ARQ – Automatic Repeat Request
BBR - Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time
BLER - Block error rate
CC - Country Code
CCITT - International Telegraph and Telephone Consultative Committee
CWND (Congestion Window)
ČTÚ – Český telekomunikační ústav
DL – downlink
eNB – eNodeB
EPC - Evolved Packet Core
E-UTRAN - Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
GPRS – General Packet Radio Service
GSM – Global System for Mobil Communications
HSS - Home Subscriber Server
ICCID - Integrated Circuit Card Identifier
ICMP - Internet Control Message Protocol
IMEI - International Mobile Equipment Identity
IMSI - International Mobile Subscriber Identity
IP – Internet Protocol
IPv4 – Internet Protocol version 4
IPv6 – Internet Protocol version 6
ISDN - Integrated Services Digital Network
LTE – Long Term Evolution
MAC - Medium Access Control
Mbit/s - Megabit per second
MCC - Mobile Country Code
ME - Mobile Equipment
MME - Mobily Management Entity
MNC - Mobile Network Code
MS - mobile station
MSIN - Mobile Subscriber Identification Number
MSISDN - MS international ISDN numbers
MSS - Maximum Segment Size
MT - Mobile Termination
MTU - Maximum Transmission Unit
NACK - Negative-acknowledgement
NDC - National Destination Code
NGA - Next Generation Access
NTP – Network Timing Protocol
OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI - Open System Interconnection

PDCP - Packet Data Convergence Protocol
PDU-Protocol Data Unit
PGW - Packet Data Network Gateway
PHY – Physical layer
QoS – Quality of Service
RLC - Radio Link Control
RTT - Round-Trip Time
RWND - Receiver Window
SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDU-Service Data Unit
SGW - Serving Gateway
SIM - Subscriber Identity Module
TCP - Transmission Control Protocol
TE - Terminal Equipment
TM - transparent mode
UDP - User Datagram Protocol
UE – User Equipment
UICC - Universal Integrated Circuit Card
UL – MIMO – Up Link Multiple Antenna transmission – Multiple Input, Multiple Output
UL – uplink
UM - Unacknowledged mode
UMTS - Universal Telecommunications System
USIM - User Service Identity Module

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| TABULKA 1 - PRŮMĚRNÉ HODNOTY DL PROPUSTNOSTI..... | 36 |
| TABULKA 2 - PRŮMĚRNÉ HODNOTY UL PROPUSTNOSTI | 38 |
| TABULKA 3 - PROCENTUÁLNÍ ODCHYLKY V RÁMCI 24 HODIN | 39 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| OBRÁZEK 1 - ARCHITEKTURA LTE SÍTĚ [3]..... | 4 |
| OBRÁZEK 2 - PROTOKOLY PRO PŘENOS UŽIVATELSKÝCH DAT [4] | 5 |
| OBRÁZEK 3 - SKLADBA DATOVÝCH JEDNOTEK [5]..... | 6 |
| OBRÁZEK 4 - ROZHRANÍ UŽIVATELSKÉHO ZAŘÍZENÍ A SÍTÍ [5] | 7 |
| OBRÁZEK 5 - FUNKČNÍ MODEL PRO UŽIVATELSKÉ ZAŘÍZENÍ..... | 8 |
| OBRÁZEK 6 - STRUKTURA IMSI..... | 9 |
| OBRÁZEK 7 - URČENÁ MÍSTA MĚŘENÍ V LTE ARCHITEKTUŘE..... | 13 |
| OBRÁZEK 8 - KOMUNIKACE MEZI VRSTVAMI | 18 |
| OBRÁZEK 9 - ARCHITEKTURA PROTOKOLŮ PRO LTE [11] | 19 |
| OBRÁZEK 10 - UKÁZKA VÝSLEDKU Z MĚŘENÍ POMOCÍ NETMETRU | 26 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|--|----|
| GRAF 1 - POROVNÁNÍ TCP A UDP ZÁHLAVÍ | 22 |
| GRAF 2 - PROCENTUÁLNÍ ODCHYLKY PŘI POUŽITÍ APLIKACE OOKLA | 25 |
| GRAF 3 - PROCENTUÁLNÍ ODCHYLKY PŘI POUŽITÍ APLIKACE NETMETR | 27 |
| GRAF 4 - PROCENTUÁLNÍ ODCHYLKY PŘI POUŽITÍ APLIKACE F-TESTER | 29 |
| GRAF 5 - POROVNÁNÍ PROCENTUÁLNÍCH ODCHYLEK VYBRANÝCH APLIKACÍ | 29 |
| GRAF 6 - PROCENTUÁLNÍ ODCHYLKA PRO TCP A UDP PROTOKOL | 30 |
| GRAF 7 - PROPUSTNOST V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI TCP OKNA | 31 |
| GRAF 8 - PROPUSTNOST V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI MSS | 32 |
| GRAF 9 - PROPUSTNOST V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ | 33 |
| GRAF 10 - PROPUSTNOST V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ S OMEZENÝM MSS | 33 |
| GRAF 11 - PROPUSTNOST V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ S OMEZENOU VELIKOSTÍ OKNA NA 64 KB | 34 |
| GRAF 12 - PROPUSTNOST V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ S OMEZENOU VELIKOSTÍ OKNA NA 8 KB | 34 |
| GRAF 13 - POROVNÁNÍ PRŮMĚRNÉ PROPUSTNOSTI V SESTUPNÉM SMĚRU BĚHEM 24 HODIN | 37 |
| GRAF 14 - POROVNÁNÍ PRŮMĚRNÉ PROPUSTNOSTI V VZESTUPNÉM SMĚRU BĚHEM 24 HODIN | 38 |
| GRAF 15 - POROVNÁNÍ PROCENTUÁLNÍCH ODCHYLEK PRO PRVNÍ DOWNLINK TEST | 40 |
| GRAF 16 - POROVNÁNÍ PROCENTUÁLNÍCH ODCHYLEK PRO DRUHÝ DOWNLINK TEST | 40 |
| GRAF 17 - POROVNÁNÍ PROCENTUÁLNÍCH ODCHYLEK PRO PRVNÍ UPLINK TEST | 41 |
| GRAF 18 - POROVNÁNÍ PROCENTUÁLNÍCH ODCHYLEK PRO DRUHÝ UPLINK TEST | 41 |

1 ÚVOD

Mobilní telefony jsou dnes pro mnoho lidí nedílnou součástí života. To dává impuls pro stálé vylepšování bezdrátových sítí, které tak procházejí rychlým rozvojem. S přibývajícím počtem uživatelů telekomunikační sítě rostou i nároky na parametry bezdrátové technologie. Mezi hlavní požadavky uživatele mobilního zařízení, který využívá telekomunikačních, zejména datových služeb je připojení kdekoliv a kdykoliv. V poslední době se dost lidí zaměřuje na rychlost připojení. Lidé přirozeně vnímají, že někde mají připojení pomalejší a někde rychlejší. Někteří si dokonce všímají i závislosti rychlosti na dané použité technologii. Pokud se hovoří o připojení k internetu s určitou rychlostí, teoreticky se nám jako uživatelům nabízí připojení s danou šířkou pásma, které umožňuje určitou potenciální rychlost. Avšak v rámci praktickému fungování celé sítě dochází k ovlivnění několika dalšími faktory. Jedním z nejvýznamnějších je propustnost.

Telekomunikační odvětví definuje svůj vývoj na základě generací. Začínalo se první generací (1G) dnes máme již pátou (5G). Každá generace je popsána standardem, kde jsou specifikované požadavky pro danou technologii. Vývoj nastává jak ve směru použité technologie, využívající frekvence či šířky pásma, tak i ve zmiňované propustnosti. Rozvoj napříč generacemi je enormní, například u propustnosti se dostáváme od jednotek kbps až po jednotky Gbps.

Propustnost je tak jednou z klíčových podmínek, která musí být splněna, aby nedoházelo ke zhoršování kvality služby. Pro Českou republiku stanovuje Český telekomunikační úřad základní parametry kvality poskytování služeb v internetové síti, včetně manipulace spojené s ověřováním a měřením. Mezi stěžejní parametry pro sledování kvality služby spadá přenosová rychlost směrem od uživatele, rychlost směrem k uživateli, zpoždění paketu mezi uživatelem a měřícím serverem a ztrátovost. Cílem stanovení těchto požadavků je zejména sjednocení vnímání kvality služby a její ověřování. [1] Důležitým úkolem je však prokázat danou propustnost i u koncového uživatele. Existuje již několik společností navrhující platformy pro uživatele, kde mohou svou aktuální propustnost změřit. Aplikace pro měření propustnosti mají sloužit koncovým uživatelům pro zjištění informací, porovnání kvality a možnosti využít tato měření například pro reklamaci. V dnešní době je již mnoho technologií pro zjištění síťových parametrů. Na výběr máme z velké škály možností od online aplikací zdarma, přes softwarové programy instalované do počítače, po fyzické síťové analyzátoři. Otázkou však je, jak moc jsou výsledky z těchto aplikací porovnatelné s hodnotami, které vidí v síti operátor.

1.1 CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je nalézt místo v telekomunikační síti, které je spravováno operátorem a lze z něj získat data o propustnosti. Dále tato data ze sítě porovnat s výsledky od koncového uživatele.

1. Nalezení vhodného měřicího místa v síti operátora
2. Vybrání vhodného měřicího nástroje na straně uživatele
3. Ve vybraných místech provést měření
4. Úprava dat do porovnatelné podoby
5. Porovnání dat z daných míst měření
6. Zjištění podobnosti dat s presumpcí nejmenších odchylek

1.2 STRUKTURA PRÁCE

Diplomová práce je rozdělena do devíti hlavních kapitol. V úvodní kapitole je uvedení do problematiky a definování cíle práce. V následující kapitole je v rámci teoretického rozboru popsána telekomunikační síť od páteřní sítě, přes přístupovou až po koncového uživatele. Také jsou zde uvedeny možnosti zařízení, které slouží pro měření parametrů mobilní sítě, zejména propustnosti. Poté, co je v druhé kapitole obecný popis sítě, je třetí kapitola zaměřena již na konkrétní místa v síti, kde je měření prováděno. Tato dvě zvolená místa mají svoje příslušné vrstvy a použité protokoly, které jsou v dané kapitole více rozvedeny. Další kapitola je zaměřena na konkrétní metodiku, kde dochází k očištění dat tak, aby zvolená místa mohla být porovnána. Pro aplikaci metodiky je nutné získat data ze strany operátora i uživatele. Pátá kapitola je tudíž zaměřená čistě na získání dat na straně operátora. Šestá kapitola je zaměřena na výběr vhodného zařízení na straně uživatele. Na základě této kapitoly je vybráno příslušné zařízení a v kapitole 7 jsou vyobrazeny výsledky s rozsáhlejším měřením zaměřené i na UDP testování. Předposlední kapitola obsahuje dlouhodobější testy s použitím vhodného měřicího přístroje. V závěru práce je shrnuty výsledky měření.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

V rámci teoretického rozboru jsou popsány důležité oblasti, na kterých je vypracování diplomové práce založeno. Jedná se zejména o problematiku měření přenosových parametrů telekomunikačních sítí, měření v mobilních sítích a v neposlední řadě analýza nástrojů a HW vybavení, která jsou v dané oblasti využívána.

2.1 VALIDACE MOBILNÍ SÍŤ

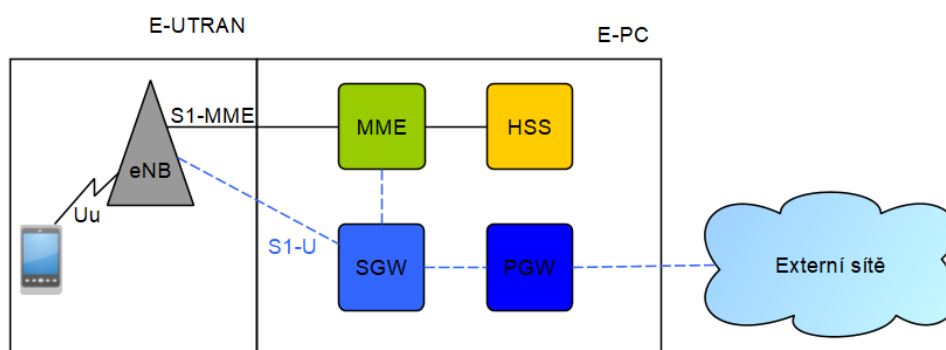
Samotná telekomunikační síť se skládá z několika částí a její chování je ovlivněno i vnějšími vlivy. Na území České republiky dohlíží na funkčnost sítě Český telekomunikační úřad. Jedná se o ústřední orgán státní správy, který má na starost několik služeb v elektronických komunikacích. Mezi takové služby patří například kontrola cen v oblasti elektronických komunikací, správa rádiových kmitočtů, zabezpečení harmonizace využívání rádiového spektra a další.[2] Zásadní pravomoc, kterou má ČTÚ je řízení datového provozu a parametrů měření kvality. Abychom mohli ověřit chování sítě na obou stranách, jak uživatele, tak operátora, je potřeba následovat určité parametry zvolené právě ČTÚ. Řada výstupů totiž nedává validní výsledky, proto je třeba řídit se dle stanovení ČTÚ. Pro všechny druhy telekomunikačních sítí, od pevných přes bezdrátové až po jiné sítě elektronických komunikací je vytvořen jednotný postup pro měření parametrů sítě dle Českého telekomunikačního ústavu. ČTÚ má zvolenou metodiku pro měření parametrů sítě na transportní vrstvě OSI modelu. Jedná se konkrétně o měření s využitím TCP protokolu. Výsledkem dané metodiky jsou datové parametry, které mají vliv na kvalitu a efektivitu datového přenosu. Mezi tyto parametry patří rychlost ve směru downlink, rychlost ve směru uplink, zpoždění rámců, rozptyl zpoždění rámců a ztrátovost. [1]

2.2 MOBILNÍ SÍŤ

S postupným rozvojem mobilních sítí se vyvíjí i architektura daných sítí. V dnešní době má velké zastoupení technologie LTE. Proto jsem se více zaměřila na architekturu této sítě.

Telekomunikační síť se skládá z páteřní a přístupové. Přístupová síť propojuje uživatele s uzly operátora. Páteřní síť poskytuje několik služeb uživatelům, kteří jsou přes přístupovou část připojeni.

Uživatelské zařízení je se základnovou stanicí eNB propojeno pomocí bezdrátového rozhraní Uu. Propojení do páteřní sítě nebo až do externí sítě se dále dělí na přenos uživatelských dat a přenos signalizace. Signalizace je na obrázku vyznačena plně černě a přenos samotných uživatelských dat přerušovaně modře.



Obrázek 1 - Architektura LTE sítě [3]

2.2.1 PÁTEŘNÍ ČÁST

U technologie LTE se řídicí část sítě nazývá Evolved Packet Core a přístupová síť je E-UTRAN. Tyto dvě části sítě se obecně nazývají Evolved Packet System. Název Packet System značí způsob přenosu dat, kde se používá pouze přepojování paketů a již se nepoužívá přepojování okruhů. U sítě GSM se využívalo právě pouze přepojování okruhů. U sítě GPRS a UMTS se používalo přepojování okruhů pro přenos hlasu a zpráv, zatímco přepojování paketů na přenos dat. Dnes se přestalo používat přepojování okruhů a zůstalo se u přepojování paketů. Přepojování paketů je realizováno tak, že se data rozdělí do menších bloků a na základě určitého algoritmu jsou přenášeny do cíle, kde jsou opět sestaveny do původní podoby. [3] Pro přenos samotných uživatelských dat jsou důležité bloky SGW a PGW. Tyto dva prvky pracují s uživatelskými daty a mají za úkol přenos IP rámců od uživatele až po externí síť. Hlavním úkolem Serving gateway je směrování uživatelských IP paketů. Dále také má za úkol řízení a ukládání parametrů UE jako parametry daných IP paketů a informace o směrování v síti. PGW spravuje IP adresy, pod to spadá i přidělování příslušných IP adres jednotlivým uživatelům. Naopak pro tok signalizace jsou

důležité prvky MME a HSS. MME se zaměřuje na řízení a zabezpečení sítě. HSS je databáze, která uchovává informace o daných uživateli.

2.2.2 PŘÍSTUPOVÁ ČÁST

V rádiové části sítě E-UTRAN se nachází jednotky eNodeB. Jedná se o základnové stanice, které mají za úkol spravovat rádiové zdroje, jako je řízení rádiových příjmů, řízení mobility připojení a přidělování zdrojů jak pro downlink, tak pro uplink. Další důležitou funkcí, kterou eNB mají za úkol provádět, je komprese záhlaví IP a šifrování toku uživatelských dat.

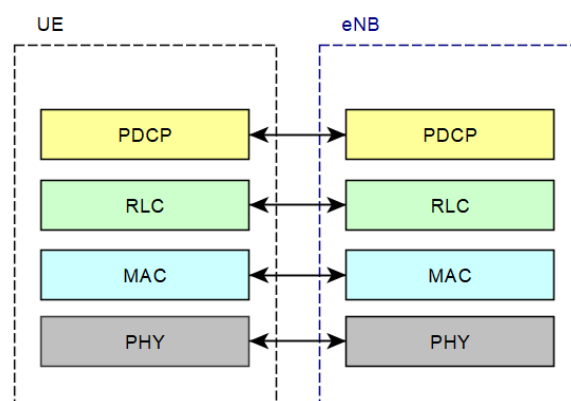
V rádiové části dochází k přenosu uživatelských dat a k přenosu signalizace.

2.2.2.1 PŘENOS UŽIVATELSKÝCH DAT

Přenos uživatelských dat nebo takzvaných bearers (nosné) se také nazývá user plane a může být buď default nebo dedicated. Default je přenos, který je vytvořen automaticky při připojení uživatele. Je to základní nosná služba, která má většinou nižší kvalitu, protože nemá danou kvalitu více specifikovanou. Dedicated user plane je přenos uživatelských dat se specifickým požadavkem na kvalitu služby QoS. Zde se jedná například o aplikace pro streamování videa. Základním měřítkem pro kvalitu služby je bitová chybovost BER.

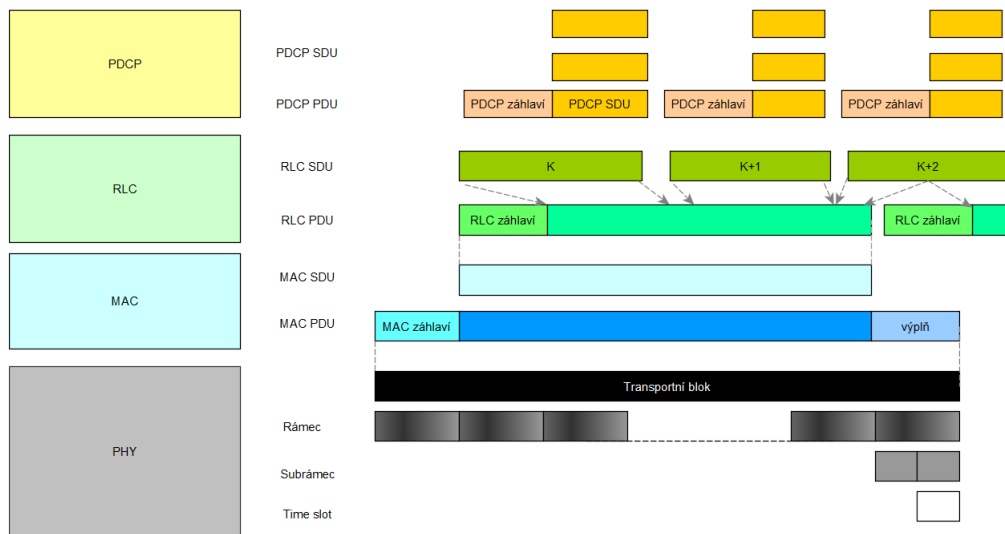
Hlavními úkoly user plane jsou komprese záhlaví, šifrování a oprava chyb.

Protokoly využívané v daném módu jsou PDCP, RLC, MAC a PHY.



Obrázek 2 - Protokoly pro přenos uživatelských dat [4]

PDCP, RLC a MAC jsou protokoly používané na druhé vrstvě - vrstvě spojové. [5]



Obrázek 3 - Skladba datových jednotek [5]

PDCP je zkratka pro Packet Data Convergetion Protocol. Skládá se z hlavičky a datového bloku.

Tok dat probíhá tak, že vrstva IP odešle IP pakety (PDCP SDU) do vrstvy PDCP, kde tato vrstva provádí kompresi záhlaví a přidává vlastní záhlaví, tím vytvoří protokolovou datovou jednotku PDU. Hlavní funkcí této vrstvy je obecně zabezpečení dat. Konkrétně se jedná o ochranu a ověření integrity, šifrování a dešifrování uživatelských dat a přenos těchto dat.

Další funkce je prováděna přes RLC vrstvu. Tento protokol má za úkol zejména segmentaci dat a opravu chyb pomocí ARQ. Vytvořené RLC PDU na dané vrstvě se dále pošle do vrstvy MAC.

MAC vrstva upraví RLC SDU tak, že přidá MAC záhlaví a padding-výplň. Hlavní funkcí této vrstvy je mapování mezi logickými a transportními kanály, multiplexování a demultiplexování MAC SDU, oprava chyb a výběr přepravního formátu.

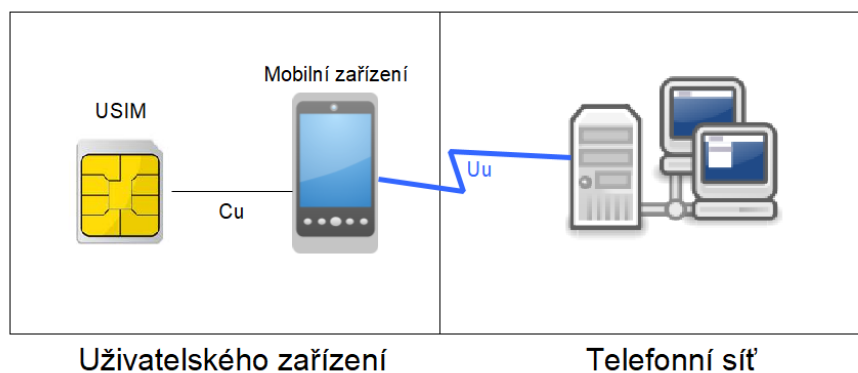
Transportní blok na fyzické vrstvě je MAC PDU, který se rozdělí na dané sloty subrámece. Doba trvání jednoho rámce pro přenos dat na fyzické vrstvě je 10 ms. Jeden rámeček má deset subrámečků po jedné sekundě a daný subrámeček dále dva timesloty. Zdrojový blok je zdrojový blok dat, který je přiřazen jednomu uživateli. Jedná se o komunikační prostředek pro komunikaci v LTE, kde počet daných zdrojových bloků závisí na šířce kanálu. Fyzická vrstva přenáší všechny informace z transportních kanálů přes vzduchové rozhraní, řídí výkon a vyhledává buňky pro účely předání a počáteční synchronizaci. Služba LTE umožňuje více uživatelům sdílet jedno frekvenční pásmo,

jedná se tedy o metodu vícenásobného přístupu. Mezi základní metody patří přístup časového dělení, kde každý uživatel má svůj časový slot. Další metodou je přístup frekvenčního dělení, kde uživatelé mohou komunikovat ve stejný čas, ale na různých frekvencích. Přístup kódového dělení umožňuje uživatelům využívat stejný časový slot i stejnou frekvenci za použití jiného kódování. V LTE se zejména využívají metody přístupu s ortogonální frekvencí nebo frekvenčním dělením s jednou nosnou. Pro downlink se používá kombinace časového frekvenčního dělení OFDMA. Nevýhodou použití ortogonální frekvence je velká spotřeba energie, která by při uplinku způsobila rychlé vybití telefonu, proto se používá SC-FDMA.

2.2.3 UŽIVATELSKÉ ZAŘÍZENÍ

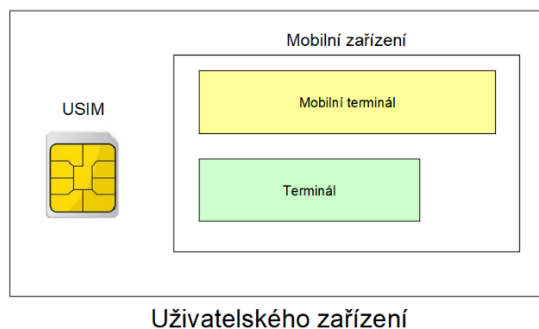
Dalším důležitým prvkem telekomunikační sítě je uživatelský terminál. UE je uživatelské zařízení které musí splňovat určité požadavky, zejména agregaci nosných, duální konektivitu, UL-MIMO a další.

Uživatelské zařízení je propojovacím zařízením, které slouží uživateli pro přístup do sítě. Rozhraní mezi sítí a uživatelským terminálem je rádiové rozhraní. Uživatelské zařízení se skládá z identifikační karty USIM a mobilního zařízení, ME. Doména ME může být dále rozdělena do několika složek, které ukazují konektivitu mezi funkčními skupinami, které mohou být implementovány do jednoho nebo více hardwarových zařízení. Mezi USIM a ME je referenční bod označován zkratkou Cu a mezi celým UE a rádiovou přístupovou sítí je referenční bod značen Uu. Referenční body jsou definovány mezi doménami, skupinami fyzických entit.



Obrázek 4 - Rozhraní uživatelského zařízení a sítě [5]

USIM je samostatná inteligentní karta zahrnující data a funkce, které jsou důležité pro jednoznačnou identifikaci. USIM je spojeno s daným uživatelským zařízením a umožňuje tak identifikaci uživatele bez ohledu na mobilní zařízení. Toto zařízení se skládá z terminálu TE a mobilního terminálu MT. Úkolem mobilního zařízení je rádiový přenos a podpora aplikací. Konkrétněji TE obsahuje aplikace typu end-to-end, příkladem takové aplikace je notebook připojený k mobilnímu telefonu. Naopak zařízení MT vykonává rádiový přenos a funkce s ním související. [6]



Obrázek 5 - Funkční model pro uživatelské zařízení

2.2.3.1 POŽADAVKY NA UE

Požadavky na hlasové služby zůstávají stejné jako u 3G sítí. Dochází k vylepšení služeb pro bezdrátovou komunikaci, aby se splnila přenosová rychlost 4G technologie, která dosahuje až 100 Mbps. Tato technologie má také vylepšené vlastnosti v oblasti kapacity a využití rádiových prostředků.

Agregace nosných je nejjednodušším způsobem, jak zvýšit kapacitu. Jedna agregovaná šířka pásma kanálu je dána šířkou pásma, ve kterém lze přijímat i vysílat. Jedná se o slučování nosných, kde může být agregováno maximálně pět komponent nosných. Každá komponenta může mít šířku pásma 1,4, 3, 5, 10, 15 nebo 20 MHz. Při použití maximálního povoleného počtu komponent a největší šířky pásma nám vyjde maximální šířka pásma 100 MHz. Počet agregovaných nosných se může lišit v závislosti na směru rychlosti a frekvenci (UL nebo DL). [7]

Pro zefektivnění využití rádiových prostředků využívá technologie 4G systém UL-MIMO. Jedná se o multi-anténní telekomunikační systém pro vzestupný směr telekomunikační sítě s více vstupy a výstupy. Použití více vstupů a výstupů nám umožní využívat více datových toků současně. Využívají se různé referenční signály, ale čas a frekvence zůstávají stejné.

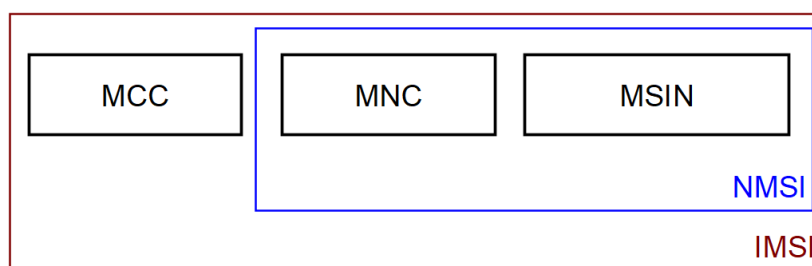
2.2.3.2 PARAMETRY UE PRO MĚŘENÍ V PŘÍSTUPOVÉ SÍTI

Měření v přístupové síti je konkrétně prováděno monitorováním daného čísla připojeného k základnové stanici. V tomto případě nelze informace dohledat zpětně, ale musí se spustit dané monitorování na základě určitých parametrů. Konkrétně se jedná o IMSI číslo přidělené k dané SIM kartě.

Mobilní zařízení má mnoho identifikačních čísel a označení. Mezi hlavní identifikátory zařízení patří ICCID, IMEI, MSISDN a IMSI. ICCID je identifikátor daného přístupového modulu, který nalezneme na zadní straně karty. Jedná se o takové sériové číslo SIM, které obsahuje 19 až 20 číslic. [8] IMEI je číslo mobilního zařízení, které je jedinečné pro každé zařízení. Neplatné se stává po nahlášení odcizení či ztrátě. [9] Dle MSISDN zjistíme, zda je telefonní číslo mobilního uživatele aktivní nebo ne. Toto číslo využíváme při volání daného účastníka. CC je kód země a pro Českou republiku je toto číslo 420. Národní mobilní číslo se skládá z národního kódu místa určení (NDC) a čísla účastníka (SN). [9]

2.2.3.2.1 IMSI

IMSI je mezinárodní mobilní účastnická jednotka, která je přiřazena každému účastníkovi v systému GSM. Definuje účastníka včetně země a mobilní sítě. Jedná se o identifikátor spjatý s fyzickým modulem, proto se po výměně SIM změní i číslo IMSI. Toto číslo je v sítích velice důležité, jelikož slouží pro přenos signalizace a zasílání zpráv.



Obrázek 6 - Struktura IMSI

IMSI se skládá ze tří částí MCC, MNC a MSIN. MCC je trojmístný mobilní kód země. Toto číslo je dáno mezinárodním poradním výborem CCITT. Pro Českou republiku je to číslo 230. MNC je kód identifikující mobilní síť. Délka tohoto kódu může obsahovat dvě nebo tři číslice. Každý operátor ve své zemi má svůj jedinečný přidělený kód. V České republice máme tři provozovatele mobilní

sítě. Pro T-Mobile je kód 01, pro O2 se jedná o kód 02 a pro Vodafone je kód 03. [10]
Identifikační číslo mobilního účastníka (MSIN) identifikuje daného účastníka v rámci GSM sítě.
MNC a MSIN nám udává národní identitu mobilního účastníka. [9]

Dle daného IMSI čísla jsem dostala přidělené referenční číslo, které bylo nutné pro sledování v přístupové rádiové části. Důležité pro sledování čísla není pouze informace o kartě, ale také o základnové stanici, ke které jsem připojena. Měření jsem prováděla z jednoho místa, kde jsem byla připojena k jedné základnové stanici. Ta byla po dobu měření monitorována. Pro monitorování jsem si zvolila vždy časový okamžik, kdy jsem prováděla testy měření rychlosti. Monitorování v přístupové síti je každou sekundu ve směru sestupném i vzestupném.

2.3 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VÝKONU SÍTĚ

Důležité informace pro posouzení výkonu sítě jsou šířka pásma a propustnost. Nejdůležitější věc používanou k měření výkonu je rychlost a pro její měření využíváme právě tyto dvě veličiny. Šířka pásma říká, kolik dat lze teoreticky přenést v daném okamžiku od zdroje. Pro nás je důležitější definice propustnosti, která je praktickým měřítkem skutečného doručování paketů. Data, která se skutečně v daný čas přenesou, jsou totiž vhodnějším ukazatelem než data, která by se přenesla pouze teoreticky.

Pro vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí je dle ČTÚ zvoleno šest klíčových parametrů. Mezi tyto hlavní parametry patří rychlost ve směru downstream, rychlost ve směru upstream, zpoždění ve smyčce, přesná pozice měřicího terminálu, přesný čas měření a posledním parametrem je identifikace a typ přístupové technologie s uvedením konkrétního kmitočtového pásma. Některé parametry jsou přímo poskytovány měřicím terminálem, nebo je použit interní GPS modul. Parametry, které jsou v síti měřeny, jsou první tři ze šesti klíčových parametrů. Rychlost se měří na vrstvě čtvrté pomocí TCP protokolu a zpoždění na třetí vrstvě pomocí ICMP protokolu. [11]

Jelikož v reálném provozu sítě dochází k různým výpadkům a působení šumů, je nutné zohlednit nejen propustnost a zpoždění, ale také chybovost. V telekomunikačních sítích se jedná konkrétně o bitovou chybovost BER. Jedná se o poměr špatně přenesených bitů k celkovému počtu všech přenesených bitů.

2.3.1 PROPUSTNOST SÍŤE

Propustnost (anglicky throughput) nám udává, kolik dat bylo přeneseno ze zdroje za jednotku času. Měří se kolik paketů v daném časovém rámci dorazí úspěšně ze zdroje do cíle, jednotkou jsou bity za sekundu. Použití měření propustnosti je důležité pro řešení problémů, jelikož nízká propustnost značí problém jako je ztrátovost paketů. Ztracení paketů vede ke špatnému či pomalému výkonu sítě. Další parametry, které mohou ovlivňovat nízkou propustnost je latence a jitter. Latence je doba, kterou potřebuje daný paket k odeslání se od zdroje do cíle. Pro měření latence se často využívá nástroj ping. Jedná se o program využívající ICMP protokol, který je zapouzdřený do IP protokolů. Jedná se o protokol pro zjištění dosažitelnosti a poskytuje informace o jednoduchých problémech s doručováním paketů. Informuje hostitele o maximálním omezení velikosti, času platnosti paketu a dosažitelnosti cíle. [12] Špatná latence je většinou ovlivněna velkým počtem uživatelů. Jitter je rozdíl ve zpoždění paketu. Pro maximalizaci propustnosti sítě je třeba minimalizace latence.

2.3.2 SOFTWAREOVÉ ZAŘÍZENÍ

Protokoly čtvrté vrstvy (TCP a UDP) jsou využívány v aplikacích pro měření výkonu sítě. Takové aplikace jsou známé jako speedtesty, jejich úkolem je měření parametrů sítě. Tyto nástroje nám umožní dost přesně měřit přenos dat ve směru upstream a downstream, které získáváme od poskytovatele služeb.

Na trhu máme na výběr z několika možných měřících nástrojů pro zjištění dané propustnosti, kde každý má svoji metodiku pro změření hodnoty propustnosti. Většina online testovacích nástrojů funguje na bázi zjištění polohy klienta a nalezení nejbližšího testovací serveru. Speedtest vyšle na server jednoduchý signál a ten reaguje, tím se měří zpoždění ve smyčce. Poté začne proces stahování, nahrávání a následné vyhodnocení změřených hodnot.

2.3.3 HARDWAROVÉ ZAŘÍZENÍ

Oproti běžně dostupným softwarovým nástrojům máme na výběr i hardwarové síťové analyzátoři, které pro měření propustností obsahují daný příslušný software. Příkladem je

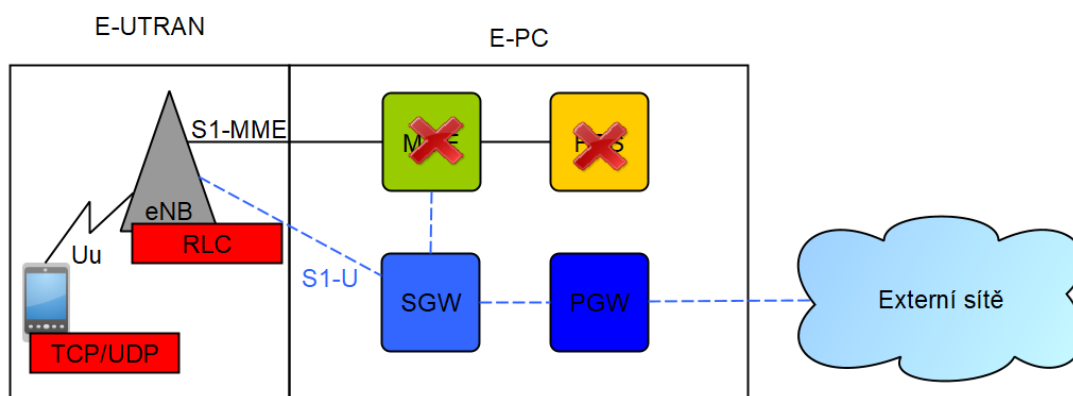
zařízení od zahraniční firmy EXFO, která se specializuje na testování, monitorování a analytická řešení pro operátory pevných a mobilních sítí. Tato firma nabízí testovací zařízení pomocí dvou portů s testovací rychlostí až 10 Gbps. [13] Další firma nabízející analyzátoři síťových parametrů je česká společnost FlukeNetworks. Zde můžeme najít přístroj na měření s rychlostí pro testování až 1 000 Mbps. [14] Pro využití testovací rychlosti, která dosahuje až 10 Gbps, lze použít měřicí nástroj F-Tester. [15] Některá tato zařízení umožňují i virtuální přístup. Při použití virtuálního přístupu je nutné provádět měření s vhodným SW i HW vybavením. To znamená, že je potřeba mít osobní počítač ve vhodné kondici, to znamená dostatečný HW, bez virů a bez zbytečných aplikací, které mohou zatěžovat výkonnostní stránku počítače.

2.3.4 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ V RÁMCI MĚŘENÍ DP

Pro měření propustnosti sítě jsem porovnávala výsledky ze dvou různých online testovacích zařízení - Ookla, Netmetr a jeden virtuální měřicí přístroj F-Tester. Ookla je jeden z nejznámějších a celosvětově nejpoužívanějších online testů. [16] NetMetr je měřicí nástroj pod záštitou Českého telekomunikačního úřadu. [17] F-Tester spravuje ČVUT, konkrétně fakulta elektrotechnická. [18]

3 NALEZENÍ VHODNÉHO MĚŘÍČÍHO MÍSTA

Zde využijeme obrázek z teoretického úvodu pro popis LTE architektury pro konkrétní ukázkou, kde měření probíhá. Z teoretického úvodu víme, že plně černě je znázorněn tok signalizace. Pro nás je z hlediska propustnosti důležitá spíše přerušovaná modrá, kde je tok samotných dat. Z obrázku lze vidět, že pro měření je možnost ještě využít SGW a PGW. Z těchto dvou prvků páteřní sítě nelze získat data obsahující informaci o aktuální rychlosti připojení, ale pouze o rychlosti, která je maximálně dostupná. To samozřejmě neudává, kolik dat je reálně využíváno. Ze sítě operátora nám zbývá poslední prvek, a to je základnová stanice. Zde lze provést obecné monitorování, kde můžeme nalézt informace o délce bufferu RLC, zpoždění paketu, kód ukazatele kvality služby, identifikační číslo základnové stanice a mnoho dalších. Pro daná měření jsou nejdůležitější data, čas a propustnost pro daný směr.



Obrázek 7 - Určená místa měření v LTE architektuře

Ze strany měření operátora se jedná o vrstvu druhou (spojovou). Konkrétně o využití RLC protokolu. Na straně uživatele se využije čtvrtá vrstva. Při měření na transportní vrstvě byl využíván zejména protokol TCP. Stejně důležitým protokolem této vrstvy je protokol UDP.

3.1 RLC PROTOKOL

RLC je protokol pro přenos dat přes rádiové rozhraní k uživatelskému terminálu. Daná sub vrstva může pracovat ve třech různých módech: Acknowledge mode, Unacknowledge mode a transparent mode.

U transparentního módu se přenáší pouze data. Tento přenos negarantuje obdržení dat, jelikož tento mód pro přenos nepoužívá části jako hlavičku, segmentaci nebo opravu. PDU pro data transparentního módu se skládá pouze z datového pole a neobsahuje žádné záhlaví RLC.

Unacknowledge mode obsahuje navíc hlavičku a data segmentuje. Využívá se hlavně pro real-time aplikace, jako je sledování živého vysílání a další služby, které vyžadují stálou komunikaci.

Poslední mód (AM) data segmentuje i opravuje. Pro opravu chyb využívá ARQ. Tato oprava chyb spočívá ve vyžádání si znovu poslání dat při chybném obdržení. Jedná se tedy o potvrzovací mód pro přenos dat, který se využívá pro nonreal-time aplikace jako je zasílání e-mailu nebo stahování. Pokud je RLC v AM, je hlavním úkolem oprava chyb prostřednictvím ARQ, zřetězení, segmentace a opětovném sestavení RLC SDU, re-segmentace RLC PDU, sekvenční doručování PDU vyšších vrstev, duplicitní detekce, obnovení chyb a obnovení RLC.

3.2 TRANSPORTNÍ PROTOKOLY

Na straně operátora máme na výběr pouze jeden protokol. U uživatele můžeme využívat dvou různých transportních protokolů.

3.2.1 TCP PROTOKOL

TCP protokol je definován jako přenosový protokol orientovaný na připojení. Poskytuje komplexní spolehlivé služby, plně duplexní komunikaci a služby zaměřené na posloupnost bajtů. Přenosový protokol orientovaný na připojení naváže spojení, pomocí daného protokolu přenesou data a pak ukončí spojení. Komplexní spolehlivé služby nám definují, že přenos probíhá pouze mezi dvěma koncovými body a data jsou v pořádku. To znamená, že nedojde k žádné chybě, ztrátě či zdvojení dat. Důležitá je také správa časového limitu a opakovaného přenosu, řízení

provozu a přetížení. Duplexní komunikace umožňuje komunikaci v obou směrech zároveň. To znamená, že oba konce mohou odesílat data kdykoliv, protože jsou vybaveny vyrovnávací pamětí pro odesílání a dočasné uložení dat. Služby jsou zaměřené na proud a posloupnost bajtů proudících do nebo z procesu. TCP považuje data předaná aplikací za řadu nestrukturovaných bajtových toků a nepozná jejich význam. TCP je spolehlivý protokol, protože při detekci chyb zasílá poškozené rámce znovu a tím zajišťuje, že všechny segmenty musí být přijaty a potvrzeny před tím, než je přenos považován za dokončený. TCP rozdělí zprávu na několik menších segmentů, které očísluje a na přijímací straně opět seskupí podle čísel do původní zprávy. [19]

3.2.1.1 PARAMETRY TCP

Velikost propustnosti se dá ovlivnit mnoha parametry v síti. Mezi takové parametry patří zejména velikost TCP okna, MSS a počet datových toků.

3.2.1.1.1 VELIKOST OKNA

Velikost okna označuje velikost vyrovnávací paměti pro příjem. Okno TCP je maximální počet bajtů, které lze odeslat před přijetím ACK. ACK značí správně doručená data bez chyb či ztrát. Při chybném doručení se vyšle NACK. Každé zařízení udržuje vyrovnávací paměť všech dat do doby přijetí paketu ACK. Po obdržení ACK odstraní data z vyrovnávací paměti. Nulová hodnota okna značí plnou vyrovnávací paměť. Standardní maximální hodnota jednoho okna je 64 kB. Tato hodnota vychází z toho, že velikost okna je 16 bit číslo, tedy maximální podoba je 1111 1111 1111 1111, což je 65 536 B a to je 64 kB. Pro dosažení větší velikosti je třeba škálovatelnost okna. Škálovatelnost okna je bitové posunutí měřítko okna, na kterém se obě strany musí dohodnout během třicestného handshaku. Příliš vysoká velikost okna nepříznivě ovlivňuje využití paměti serverů. Okno by mělo být vhodně nastaveno dle parametrů sítě pro dosažení co nejlepšího výkonu. [20]

3.2.1.1.2 ALGORITMY PRO ŘÍZENÍ PŘETÍŽENÍ

Velikost okna je spjatá s CCA (algoritmem pro řízení zahlcení sítě). Každý algoritmus nastavuje jinou velikost okna. Přetížení, zahlcení sítě snižuje kvalitu služeb a má za důsledek zpoždění,

ztrátu paketů nebo blokování nových připojení. Zvýšení přetížení nastane při opakovaném zaslání paketů. Přetížení lze kontrolovat pomocí redukce oken. F-Tester nabízí výběr ze tří algoritmů - BBR, Reno a Cubic.

BBR je algoritmus, který reaguje na skutečné přetížení, a ne na samotnou ztrátu paketů. Má podobnou propustnost jako Cubic, ale výrazně nižší zpoždění způsobené samotnými uživateli. Jako nosná informace je zde brán vývoj zpoždění a podle toho upravuje přenos dat. Tím pádem má BBR mnohem efektivnější přenos, ale přenosová rychlost je velice kolísavá.

Reno a Cubic používají ztrátu paketů k detekci přetížení sítě. Pro řízení toku provozu používá TCP koncept oken. Pro tento koncept se využívá $rwnd$ (okno příjemce) a $cwnd$ (okno přetížení). Okno příjemce inzeruje množství dat, která může cílová strana přijmout a uložit do vyrovnávací paměti. Tím pádem se jedná o množství dat, které může odesílatel odeslat bez čekání na ACK. Množství volného místa je inzerováno v každém paketu ACK. Druhé okno (okno přetížení) je proměnná stavu TCP, která omezuje množství dat, které může TCP odeslat do sítě před přijetím ACK.

Algoritmus Reno využívá posuvné okno s automatickým zvýšením. Při detekci přetížení klesne hodnota $cwnd$ na polovinu a znovu vyšle paket. Algoritmus má dvě fáze. V první fázi se jedná o pomalý start s využitím tří duplikátů ACK. V této fázi se exponenciálně zvyšuje okno $cwnd$, dokud nenastane přetížení. Přetížení nastane v době, kdy se hodnota $cwnd$ zvýší až na hodnotu prahu. Cílem první fáze je rychlé získání dostupné šířky pásma. Fáze dvě nastane po dosažení hodnoty prahu a poté začnou hodnoty lineárně narůstat, to znamená jeden paket za každý RTT. Cílem druhé fáze je prozkoumání dostupné šířky a zamezení přetížení. [21]

Algoritmus Cubic používá také okno přetížení, ale jedná se zde o funkci kubickou. To znamená, že od poslední ztráty paketu využívá vlastnosti kubické funkce. Při ztrátě paketu dojde ke zmenšení velikosti okna. Nejprve máme zadané hodnoty maxima a minima okna. Maximum okna je nastaveno jako inflexní bod kubické funkce, který řídí nárůst. Aktualizace okna najde hodnotu S_{max} , která značí konstantu mezi maximem a minimem okna. Tato hodnota se stává minimem po aktualizaci okna kvůli ztraceným datům. Pokud okno přeroste hodnotu maxima, musí být nalezeno nové maximum okna. [22]

Algoritmus BBR můžeme najít v Linuxu, ale obecně více zařízení využívá nativně spíše Cubic, proto je tento algoritmus nevhodnější forma.

3.2.1.1.3 MSS

Maximální velikost segmentu TCP je největší datový segment, který může TCP paket vyslat najednou. Hodnota MSS se odvíjí od MTU. Maximální přenosová jednotka je maximální velikost IP paketu. Pokud paket překročí velikost MTU dochází k fragmentaci. Protokol IP kontroluje velikost každého paketu a rozhoduje o dané fragmentaci dat. Fragmentace vede ke snížení výkonu. Obvyklá hodnota MTU je 1 500 bajtů, z čehož vychází maximální hodnota MSS 1 460 bajtů, protože IP záhlaví je tvořeno z 20 bajtů stejně jako TCP záhlaví. Na rozdíl od MTU u MSS po překročení maximální hodnoty nedochází k fragmentaci, ale rovnou k zahazení paketu. Tato maximální hodnota je vyjednána při navázání spojení obou stran.

3.2.1.1.4 POČET PARALELNÍCH DATOVÝCH TOKŮ

TCP bere sekvenci bitu jako datový tok. TCP je spolehlivý protokol, sekvence bajtů musí být na obou stranách stejná. Pokud příjemce a odesílatel nemají stejnou sekvenci bajtů, musí znovu dojít k poslání poškozených segmentů pro rekonstrukci původního datového toku.

Jestli počet paralelních datových toků ovlivní propustnost, závisí na použitých ostatních parametrech. Při vhodném nastavení parametrů jako je MSS, RTT či velikosti okna nemusí ovlivňovat počet paralelních toků výslednou propustnost.

Velikost okna je ovlivněna vybraným algoritmem pro řízení přetížení. Algoritmus se snaží rovnoměrně vyvážit všechny datové toky, které má dostupné, pokud jeden tok nestačí pro danou šířku pásma. Příkladem může být algoritmus Reno, který snižuje velikost okna při detekci ztraceného paketu. Zmenšení okna vede ke snížení propustnosti jednoho toku. V tomto případě větší množství toků zvýší i danou propustnost. [23]

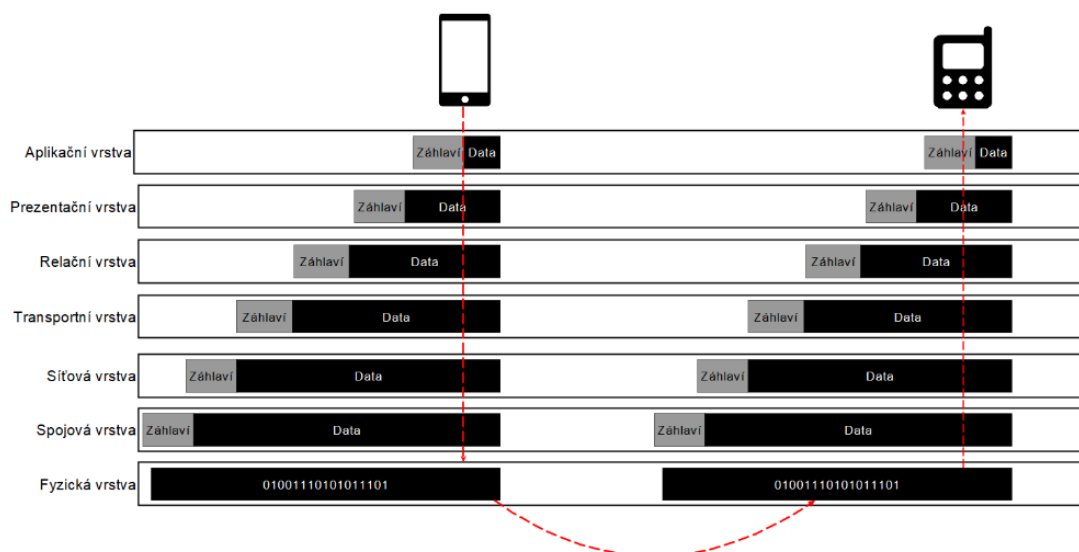
RTT je hodnota zpoždění ve smyčce. Jedná se o součet doby, než signál dojde od zdroje k cíli a doby, než dorazí ACK od cíle ke zdroji. Tím, že zdroj vysílá pakety k cíli, odhaduje tak dostupnou šířku pásma pomocí právě získané hodnoty zpoždění ve smyčce. RTT je ovlivněn mnoha dalšími parametry jako je povaha přenosového média, fyzická vzdálenost a počet uzlů mezi zdrojem a cílem, množství provozu a další.

3.2.2 UDP PROTOKOL

UDP protokol je opakem spolehlivého protokolu. User Datagram Protocol nevyžaduje spolehlivý přenos dat. UDP je považován za protokol bez připojení, protože nevyžaduje vytvoření virtuálního obvodu před přenosem dat. Poskytuje čísla portů pro rozlišení požadavků a dále poskytuje kontrolu součtu ověření, že data dorazila neporušená. Protokol detekuje, že data jsou porušená, ale přenos neopakuje, proto některé pakety mohou být ztraceny nebo přijaty v jiném pořadí. UDP funguje na principu zapouzdření dat do paketu a přidáním vlastního záhlaví (zdroje a cílové porty). Pakety UDP jsou dále zapouzdřeny do IP protokolu a odeslány na místo určení. UDP protokol se více hodí pro síťové aplikace a aplikace, které vyžadují rychlý a efektivní přenos (například hry). [24]

3.3 KOMUNIKACE MEZI VRSTVAMI

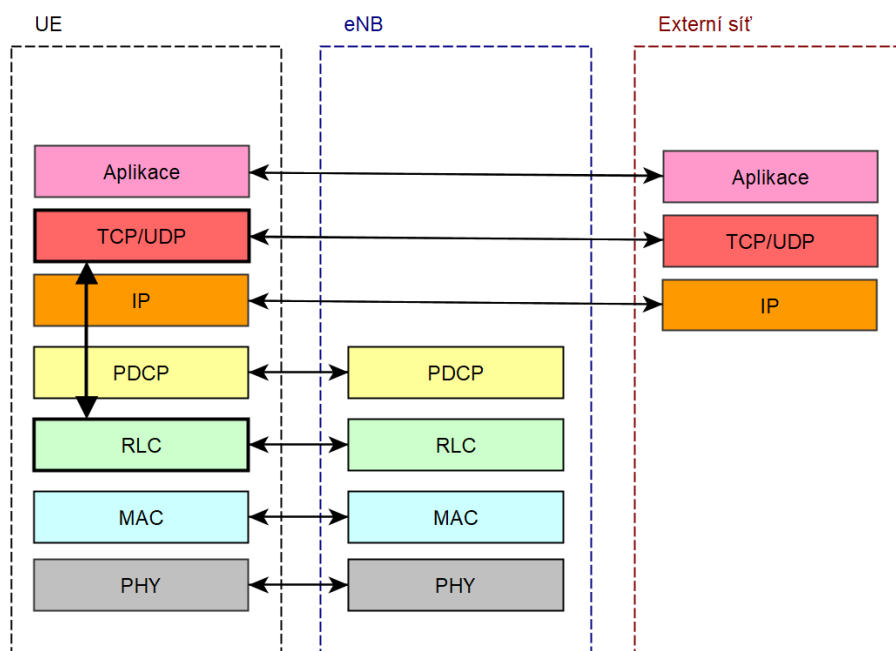
Každá vrstva má svojí jedinečnou protokolovou jednotku. Aplikační datová jednotka po přidání záhlaví prezentační vrstvy tvoří prezentační protokolovou datovou jednotku. Postupným přidáváním záhlaví vznikne rámec a fyzická vrstva utvořená z několika bitů. Komunikace v nejnižší vrstvě probíhá přímo prostřednictvím fyzického média bit po bitu. [21]



Obrázek 8 - Komunikace mezi vrstvami

3.3.1 KOMUNIKACE MEZI RLC A TCP

Entity RLC zpracovávají datové jednotky protokolu (RLC PDU nebo bloky). Bloky RLC mohou přenášet uživatelská data jako například TCP segmenty. Datové jednotky se skládají vždy z dat vyšší vrstvy a záhlaví dané vrstvy, proto budou hodnoty RLC PDU vždy větší než hodnoty segmentu, TCP PDU. Čím nižší vrstva je, tím více hlaviček má a tím by rychlost měla být větší.



Obrázek 9 - Architektura protokolů pro LTE [11]

Zatímco v řídicí rovině RRC protokol zapisuje signalační zprávy, které jsou vyměňovány mezi eNB a UE, na straně uživatelské roviny dochází ke zpracování dat pomocí TCP, UDP a IP protokoly. Proces zapouzdření dat začíná na transportní vrstvě. Dle požadované aplikace se vybere daný protokol transportní vrstvy. Transportní protokol vezme data a zapouzdří je přidáním příslušné hlavičky. TCP nebo UDP dále předává své segmenty nebo pakety dolů do internetové vrstvy, kde dochází ke zpracování protokolem IP. Tento protokol opět přidá příslušné záhlaví, čímž dostáváme datagramy. Rozdíl mezi SDU na transportní vrstvě a RLC SDU je definován třemi záhlavími. TCP záhlaví má minimální velikost 20 bajtů oproti tomu UDP pouze 8 bajtů. IP záhlaví má velikost definovanou stejně jako TCP záhlaví, minimálně 20 bajtů. [26]

4 METODIKA PRO MĚŘENÍ VÝKONU SÍTĚ

Cílem práce je analyzovat infrastrukturu sítě za účelem definování míst, ve kterých lze získat relevantní údaje porovnatelné s měřením z uživatelského terminálu. V předchozí kapitole jsme tato dvě místa definovali a dále je nutné je porovnat. Na straně operátora se jedná o základnovou stanici, kde dochází k vytěžování dat. Díky tomuto prvku je nejvhodnější zvolit stacionární měření. Snaha je, mít síť v konzistentním stavu. Stacionární měření je druh měření, které je prováděno na jednom stejném místě po celou dobu. Výsledky existují tedy z jednoho místa, ale jsou prováděna v různých časových okamžicích během dne či týdne.

Výstupní informace od operátora, která se dále využívá pro aplikaci metodiky, je rychlost ve směru Downlink a Uplink RLC vrstvy. Na straně uživatele se jedná o rychlosti uplink a downlink s využitím protokolu TCP nebo UDP.

Pro srovnání dat propustností vytažených ze dvou různých částí sítě potřebujeme nejdříve aplikace pro měření propustnosti v dané části. U koncového uživatele máme na výběr z mnoha volně dostupných aplikací, které lze jednoduše spustit dá se říct jedním kliknutím. U operátora to jen jedním stiskem není.

Po získání dat na straně operátora i na straně uživatele je třeba tato data porovnat. Pro porovnání je nutné nejdřív data uživatele normovat tak, aby byly ve stavu, kdy je možnost porovnání provést. Data tudíž musí být na základě teoretického rozboru upraveny o záhlaví spjaté se zapouzdřováním v rámci OSI modelu vrstev. Po zohlednění tohoto záhlaví chceme dostat co nejmenší rozdíl hodnot mezi uživatelem a operátorem. Tabulky s konkrétními hodnotami jsou uvedeny v příloze. Pro vhodné vyobrazení odchylek byl zvolen typ krabicového diagramu, boxplot. Jedná se o druh vyobrazení na základě kvartilů. Kvartily rozdělí data do čtyř částí, kde druhý kvartil značí medián. Medián je pro nás vhodný ukazatel průměrné hodnoty z nasbíraných dat.

4.1 POSTUP METODIKY

Po teoretickém výběru daných míst pro měření je třeba příslušná data získat a porovnat.

1. Získání dat na straně operátora: Nastavení sledování průtoku dat, shromažďování a výsledné vyexportování
2. Získání dat na straně uživatele: Aplikace a zařízení, které na bázi TCP či UDP získají potřebná data
3. Normalizace dat: Ze znalosti teoretického úvodu upravení dat a jejich následné porovnání
4. Výběr vhodného měřicího přístroje podle výsledků
 - a. Provedení více druhů testů vybraného přístroje
 - b. Ověření pomocí validačních delších měření
5. Shrnutí obsahující porovnání dat od operátora a uživatele

4.2 APLIKACE METODIKY

Pro porovnání výstupních dat rychlostí od operátora a uživatele je nutné nejprve data upravit dle teoretické znalosti záhlaví na daných vrstvách. Mezi druhou a čtvrtou vrstvou dochází k zapouzdřování dat, zde je nutné zohlednit typ protokolu který je danou vrstvou využíván. Vliv velikost záhlaví je samozřejmě ovlivněn i celkovou velikostí přenášených dat.

4.2.1 SROVNÁNÍ TCP A UDP

Pro porovnání dat mezi výsledky operátora a uživatele je třeba jednu z hodnot normovat dle předpokladů z teoretického rozboru. Hodnoty použitého záhlaví v procentuálním vyjádření byly vypočítány ze vztahu (4.1)

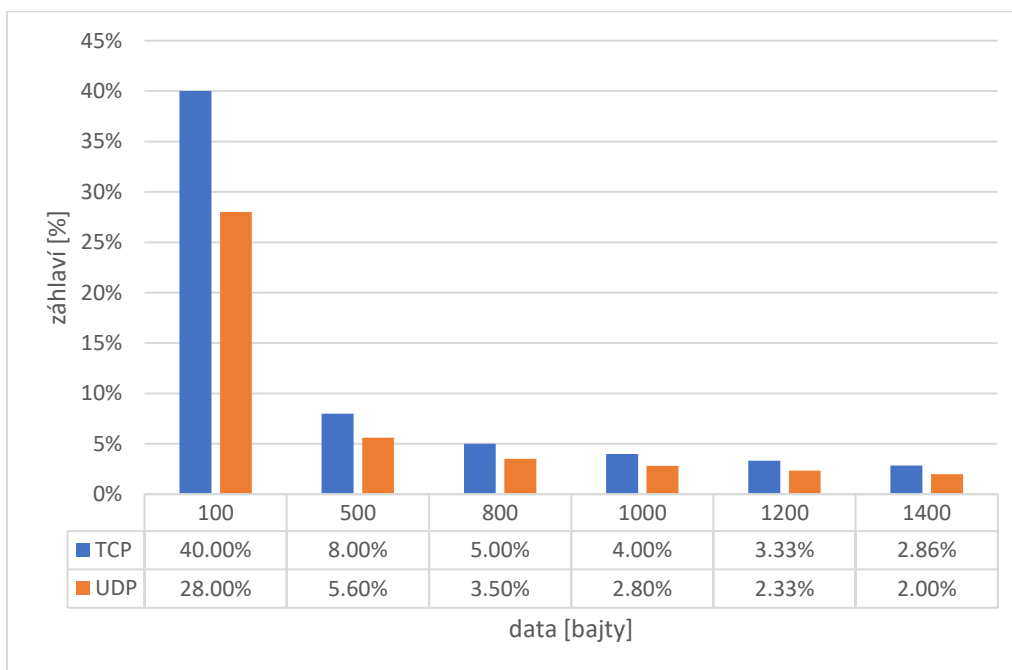
$$O_{L4-L2} = \frac{O_{L3} + O_{L4}}{P_{L4}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

kde O_{L4-L2} je záhlaví mezi čtvrtou a druhou vrstvou [%], O_{L3} záhlaví přidané třetí vrstvou [B], O_{L4} záhlaví přidané čtvrtou vrstvou [B] a P_{L4} payload čtvrté vrstvy [B].

Velikost záhlaví je ovlivněno použitým protokolem. Na třetí vrstvě záleží na verzi použité IP protokolu. Pro IPv4 se jedná o 20 bajtů a pro IPv6 o 40 bajtů [27].

Protokol UDP přidá své 8 bajtové záhlaví, přidá poté IP své 20 bajtové. TCP protokol je mnohem složitější než UDP. To lze pozorovat na velikosti záhlaví. Oproti pouhým 8 bajtům, které přidává na čtvrté vrstvě protokol UDP, má protokol TCP velikost záhlaví 20 bajtů.

Pro názornější zobrazení můžeme ve sloupcovém grafu vidět porovnání procentuálního záhlaví TCP a UDP v závislosti na velikosti přenášených dat.



Graf 1 - Porovnání TCP a UDP záhlaví

5 ZÍSKÁNÍ DAT NA STRANĚ OPERÁTORA

První krok, jak začít monitorovat data na straně uživatele byl popsán v druhé kapitole Parametry UE pro měření v přístupové síti. V této kapitole bylo zmíněno právě IMSI číslo, které je potřeba pro detailnější sledování toku dat na straně uživatele. Jako uživatel, který nemá přístup do sítě, se nedostanete k příslušnému IMSI číslu. Operátor, který má přístup k síťovým prvkům si na základě telefonního čísla dohledá dané IMSI. Dále je nutné dané IMSI přiřadit do MME na seznam sledovaných IMSI. Jedná se o vytvoření příkazů, které se z MME posílají do daných eNB. V příkazu je definováno, aby při detekování daného IMSI čísla začali tok dat monitorovat a nahrávat. Daná eNB sbírá data pro zmíněné IMSI a každou hodinu je ukládá. Z každé eNB jde report do ústředního serveru. V našem konkrétním případě se jedná o server umístěn v datovém a logistickém centru Vodafone ve Středoklukách. Dohledový systém nad tímto serverem je U2020.

Daný software umožňuje výběr dat, které lze u daného účastníka sledovat. Na výběr máme několik druhů monitorování jako RSRP/RSRQ monitorování, BLER monitorování, VQI monitorování a mnoho další. RSRP měří intenzitu signálu, RSRQ kvalitu signálu, BLER řeší poměr chybových bloků k celkovému počtu bloků a VQI se zabývá kvalitou hlasu. Sledovat se dá i kompletní signalizace. Pro měření byl použit User Common Monitoring, jedná se o obecné monitorování, kde lze nalézt informace o délce bufferu RLC, zpoždění paketu, kód ukazatele kvality služby, identifikační číslo základnové stanice a mnoho dalších. Nejstěžejnější data pro moje měření byla čas a propustnost pro daný směr. Čas je zde snímán po vteřinách.

Výstupem monitoringu na straně operátora je RLC Throughput. Jedná se o propustnost ve směru uplink i downlink získaná z rádiové části základnové stanice, konkrétně z RLC vrstvy. Rychlost je uvedena pro každou sekundu v daný čas v jednotkách bps. Čas je synchronizován dle protokolu NTP. Jedná se o protokol určen právě pro synchronizaci vnitřních hodin hardwarových zařízení pro sjednocení času. Přesnost časové synchronizace je v řádech milisekund. Jedná se o hierarchický systém, kde každá úroveň je definovaná číslem vrstvy, konkrétně se jedná o stratum. Primárním serverům je přiřazeno stratum 1. Se zvyšujícím počtem klesá přesnost a stabilita systémových hodin. Maximální hodnota, stratum 16, značí, že nedochází k synchronizaci serveru.[29]

6 VÝBĚR VHODNÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA STRANĚ UŽIVATELE

Jak bylo zmíněno v kapitole pro nalezení vhodného měřicího místa, na straně uživatele máme obecně větší benevolenci a možnosti pro měření než na straně operátora. Uživatel má na výběr dostat data pomocí TCP nebo UDP protokolu. To souvisí s použitým nástrojem, kterým měření uživatel bude provádět. Je tedy nutné zvolit takové zařízení, které nám určí co nejpřesnější výsledky pro srovnání.

Konkrétní tabulky nalezneme v příloze. Tabulky obsahují dané naměřené hodnoty propustnosti v Mbps pro směr downlink i uplink. Tabulka je doplněná o data obsahující normované hodnoty rychlostí naměřených pomocí aplikací – v tabulce vyznačeno hvězdičkou u dané aplikace. Normované hodnoty jsou takové hodnoty propustnosti doplněné o příslušné záhlaví. Pro vybrané tři zařízení jsem provedla náhodných pět testů. Výsledky těchto testů jsem dále upravila dle nejmenší průměrné odchylky. Výsledné normované hodnoty jsem porovnávala s hodnotami od operátora. A na základě toho jsem vybrala nejvhodnější nástroj pro další měření.

Pro porovnání jsem se orientovala podle odchylky ze vztahu

$$\sigma = \frac{TP_{op}}{^*TP_{UE}} - 1 \quad (6.1)$$

kde σ značí odchylku propustnosti operátora od propustnosti uživatele, TP_{op} je naměřená propustnost v síti operátora [Mbps] a $^*TP_{UE}$ značí normovanou propustnost změřená uživatelem [Mbps].

Normovanou propustnost jsem určila dle vztahu

$$^*TP_{UE} = TP_{UE} \cdot (100 + O_{L4-L2}) \quad (6.2)$$

kde TP_{UE} je hodnota propustnosti naměřená na stran uživatele [Mbps] a O_{L4-L2} je záhlaví vypočteno dle vztahu (4.1).

Dále jsem pracovala s odchylkou σ vyjádřenou v procentech. Cílem této kapitoly je najít měřicí přístroj s nejmenší odchylkou σ .

6.1 OOKLA

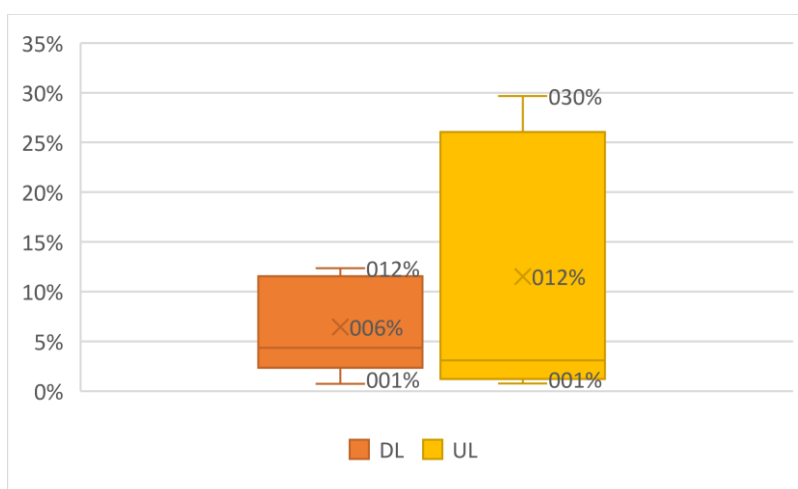
Ookla je prvním zdrojem zabývajícím se aplikací pro měření rychlosti připojení, který jsem porovnávala s daty vytažených z přístupové sítě. Ookla nabízí testování iniciované uživatelem. To znamená, že místo a čas zahájení testu si volí člověk sám. U tohoto testu nemám přesnější informace o časových intervalech, kdy dané měření probíhalo. V historii testu je uveden čas zahájení s přesností pouze na minuty. Při testování jsem si všimla, že každý test trvá pokaždé jinak dlouho dobu. Nejen, že nevím přesně, kdy měření bylo provedeno, ale ani jak dlouho trvalo. Tyto hodnoty se od hodnot ze sítě mohou velice lišit. [28]

6.1.1 PARAMETRY A NASTAVENÍ APLIKACE

Měření bylo provedeno celkem pětkrát v úterý 31.3.2020. Parametry ovlivňující propustnost nejsou uvedeny ani se nedají změnit. Pomocí analýzy záchytu komunikace je patrné, že aplikace Ookla používá hodnotu MSS 1 400 bajtů a velikost TCP okna 32 kB.

6.1.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Kompletní tabulku obsahující naměřené hodnoty lze najít v přílohách. Výsledné odchylky jsou velice kolísavé, dosahují procentuálních odchylkám blížící se až k 30 %, což je poměrně velké číslo. Najdeme i malou odchylku, která byla necelé jedno procento. Průměrná odchylka pro downlink je 6,43 % a pro uplink 11,53 %. Průměrná procentuální odchylka během těchto pěti měření byla 8,98 %.



Graf 2 - Procentuální odchylky při použití aplikace Ookla

6.2 NETMETR

Další aplikace zvolená pro měření a porovnání je NetMetr. Měření bylo prováděno 31. 3. 2020. Aplikace ve výchozím nastavení přenáší data mezi uživatelem a serverem přes TCP port. Je vidět, že měření opět probíhá na čtvrté vrstvě a hodnoty by měly být menší než hodnoty naměřené ze sítě. Měření probíhá v sedmi fázích. První je inicializace, dále předběžný test sestupného směru, test latence, downlink test, předběžný test pro vzestupný směr, test uplink a poslední fáze je dokončení [30]. V detailech testu vidíme přesný čas, kdy test začal. V detailech jde vyčíst mnoho dalších informací týkajících se měření. Selekcí jsem dostal pro nás důležitá data. Obecně je ale dobře, že jako uživatel máte přístup k podrobnějším informacím.

| | |
|----------------------|----------------------|
| Test time | 31. 3. 2020 23:12:29 |
| Timezone | UTC+2h |
| Download speed | 25 Mbit/s |
| Upload speed | 24 Mbit/s |
| Speed test duration | 46 s |
| External IP | 46.135.8.116 |
| IP network (AS) | 16019 |
| IP network name | VODAFONE-CZ-AS, CZ |
| Time offset download | 30 s |
| Duration download | 5 s |
| Time offset upload | 41 s |
| Duration upload | 5.1 s |

Obrázek 10 - Ukázka výsledku z měření pomocí Netmetru

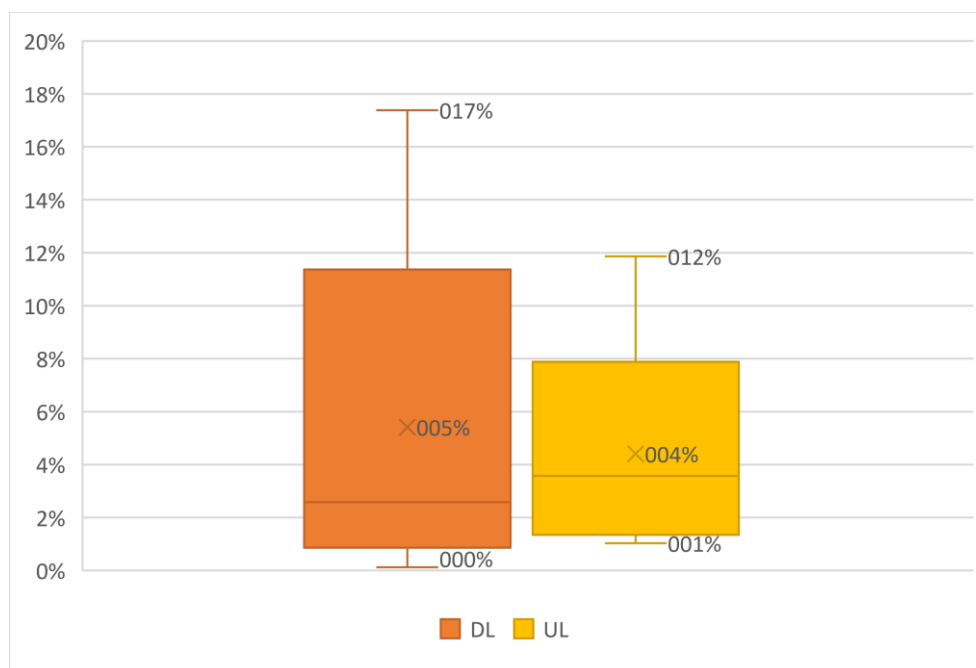
V detailech měření sice vidíme začátek testů, jedná se ale o časovou značku, která značí, kdy byl test poprvé domluven s měřicím serverem. Tím pádem neodpovídá přesně okamžiku, kdy bylo měření propustnosti linky zahájeno. Nicméně už máme bližší časové okamžiky, se kterými lze pracovat. Kvůli přesnějším hodnotám času získáváme také přesnější hodnoty pro porovnávání. Netmetr neumí přímo změřit rychlost, protože od operačního systému dostává pouze určitou velikost dat s tím, že nelze zjistit, jak dlouho se tato data přijímala. Jedná se vždy o průměr hodnot za daný časový okamžik.

6.2.1 PARAMETRY A NASTAVENÍ APLIKACE

Měření bylo prováděno 31.3.2020. Synchronizace času je dle NTP protokolu. Netmetr využívá výchozí nastavení Debianu. Použit je algoritmus TCP Cubic, maximální velikost TCP okna. Konkrétně se jedná o velikost 32 kB. Velikost MTU je 1500, tím pádem MSS je 1460. Pro měření se používají 3 paralelní spojení. Velikost TCP okna je 32 kB, kde tato hodnota byla zjištěna ze záchytu aplikace Wireshark.

6.2.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V detailech testu jsem viděla že test trval většinou 4 až 5 sekund, což je časový okamžik pro průměrovanou hodnotu. Těchto 4 až 5 sekund jsem brala i z dat z přístupové sítě. Sice máme přesnější časové údaje, než jsme měli u předešlé aplikace. Lze vidět, že nedosahujeme ani tak velkých procentuálních odchylek jako v předešlém příkladu. Ale stále dosahujeme k procentuálním odchylkám až kolem 18 %. Pro downlink je průměrná odchylka 5,41 % a pro uplink 4,41 %. Celková odchylka činí tomto měření 4,91 %.



Graf 3 - Procentuální odchylky při použití aplikace Netmetr

6.3 F-TESTER

Třetí nástroj pro měření rychlosti, jsem použila zařízení F-Tester. Tento fyzický analyzátor využívá síťové vrstvy pro měření pomocí iperf.

6.3.1 PARAMETRY A NASTAVENÍ APLIKACE

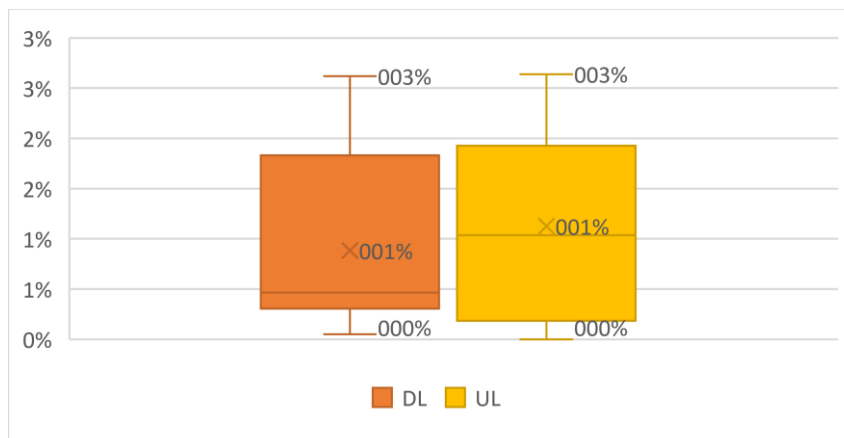
Testy byly provedeny dne 3.4.2020. F-Tester využívá pro synchronizaci času také NTP protokol. Pro testování propustnosti jsem využila základní testovací scénář na bázi TCP. Jak bylo zmíněno výsledná velikost propustnosti se dá ovlivnit mnoha parametry jako jsou velikost TCP okna, MSS a počet datových toků. NGA Basic test využívá těchto vhodně nastavených parametrů pro linky s minimální chybovostí. Pro měření je využit algoritmus TCP Cubic, velikost TCP okna 128 kB, maximální velikost segmentu 1 400 bajtů a jsou použity tři paralelní datové toky.

Celý scénář trvá 330 sekund a dělí se na další tři testy. První test trvá 90 sekund a testuje síť pouze v sestupném směru. Druhý test trvá také 90 sekund. Začíná po prvním testu, ale s 10 sekundovým zpožděním, tedy začátek testu je ve stejné sekundě od začátku. Jedná se o test ve směru vzestupném, kde se i mimo jiné simuluje nahrávání dat na server. Třetí test trvá také 90 sekund a stejně jako druhý začíná chvíli po skončení předchozího testu měření tedy probíhá od 200 do 290 sekund základního scénáře. Hodnoty se ve všech testech snímají po jedné sekundě. Tato hodnota se dá upravit, ale v mém případě je jedna vteřina ideální, protože monitorování z přístupové sítě je také prováděno každou sekundu. V tomto testu se měří současně směr sestupný i vzestupný a dochází tak k testování obousměrného zatížení sítě. V každém testu získáme vždy tři hodnoty propustnosti a to minimální, maximální a průměrnou. [31]

6.3.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Provedené testy byly ze dne 3.4.2020. Oproti předchozím aplikacím získáváme sice tři hodnoty propustnosti, ale pro porovnání budeme využívat pouze hodnotu průměrnou. Testů sice bylo provedeno pět, stejně jako při použití přechodných aplikací, zde máme ale dvakrát více hodnot, jelikož v každém testu se provádějí dva testy pro downlink i uplink. Celková průměrná

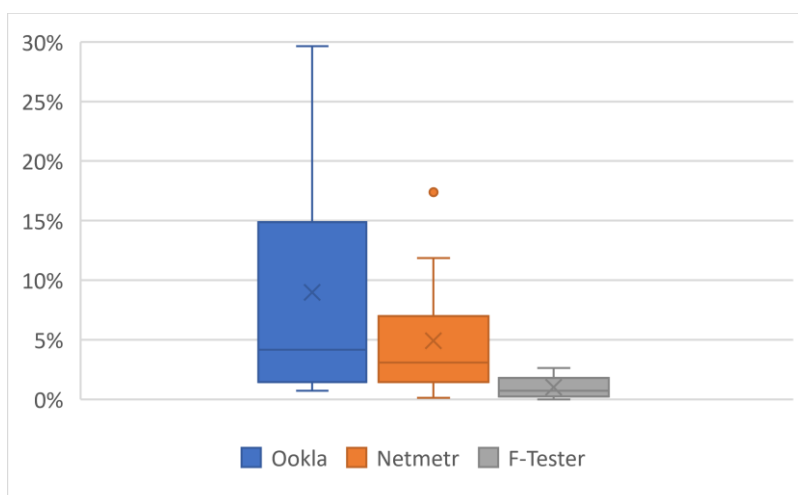
procentuální odchylka zde byla pouze 1,01 %. Konkrétní průměrná odchylka pro downlink byla 0,88 % a pro uplink 1,13 %.



Graf 4 - Procentuální odchylky při použití aplikace F-Tester

6.4 ZHODOCENÍ POROVNÁNÍ MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ

S ohledem na možnosti testovaných aplikací a jejich výstupů byla vybrána měřicí platforma F-Tester, která byla použita pro další měření. Z boxplotového grafu je zřejmé, že přístroj F-Tester dosahuje nejmenších procentuálních odlišností od hodnot naměřených v síti, proto je nejvhodnější formou pro více měření.



Graf 5 - Porovnání procentuálních odchylek vybraných aplikací

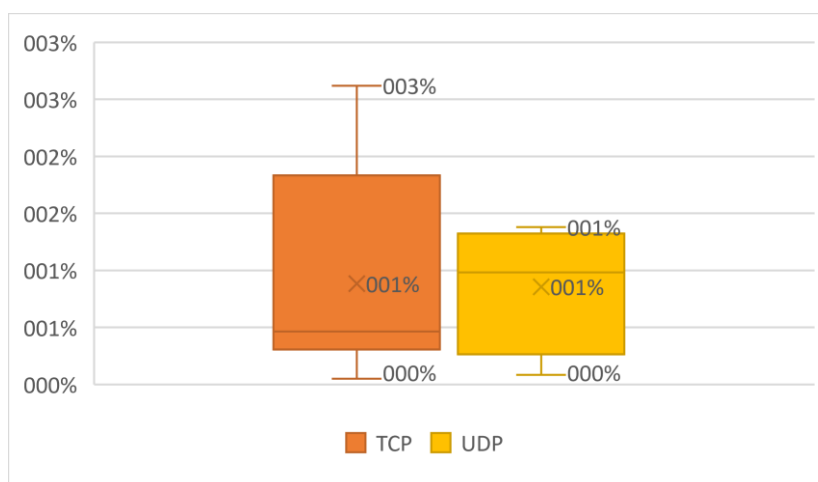
7 ROZSÁHLEJŠÍ TESTY S F-TESTEREM

Nejen, že použitím F-Testeru získáváme nejmenší procentuální odchylky od hodnot operátora. Jedná se o zařízení, kde na rozdíl od ostatních lze testovat dle uživatelsky vytvořených scénářů. Pomocí zákaznických testů, které lze vytvořit s vlastními parametry můžeme vidět jak dané parametry nebo použité protokoly mají vliv na celkovou propustnost. Také lze udělat test UDP při použití platformy iperf.

7.1 UDP MĚŘENÍ

Na stránce F-Testeru jsem si vytvořila uživatelské testy pro testování pomocí iperf UDP protokolu. Test byl proveden 6.5.2020. V nastavení byl počet paralelních streamů roven 3. Nebyl nastaven limit pro přenos dat. A rychlost byla nastavena 10Gbps. Pro daný test jsem měla zvolena data o velikosti 1400 bajtů, tím pádem jsem použila navýšení o 2 %. Na základě těchto parametrů jsem provedla čtyři testy ve směru downlink. Tabulka s naměřenými hodnotami je uvedena v přílohách. Průměrná odchylka hodnot naměřených pomocí UDP testu na uživatelské straně 0,86 %.

Pokud porovnáme procentuální odchylky ve směru downlink naměřené F-Testerem jak s použitím TCP, tak UDP, lze vidět, že menších odchylek dosahujeme při použití protokolu UDP. To se dalo předpokládat, jelikož TCP protokol je ovlivněn mnoha dalšími parametry.



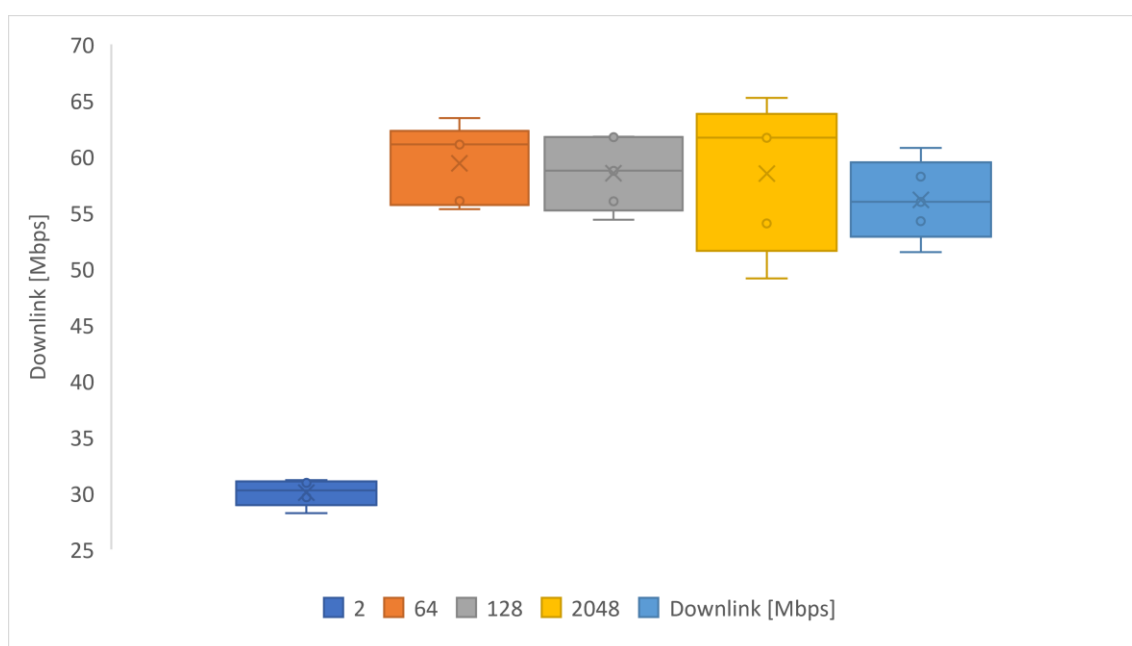
Graf 6 - Procentuální odchylka pro TCP a UDP protokol

7.2 TCP PARAMETRY

Uvedené parametry v třetí kapitole Parametry TCP, jsou schopny ovlivňovat celkovou propustnost jsem aplikovala při měření pomocí F-Testeru. Pro názornou ukázkou jsem provedla pár měření, jaké tyto parametry mají vliv na propustnost. Tabulky s hodnotami jsou uvedeny v příloze a zde jsou použity samotné boxploty.

7.2.1.1 VELIKOST OKNA

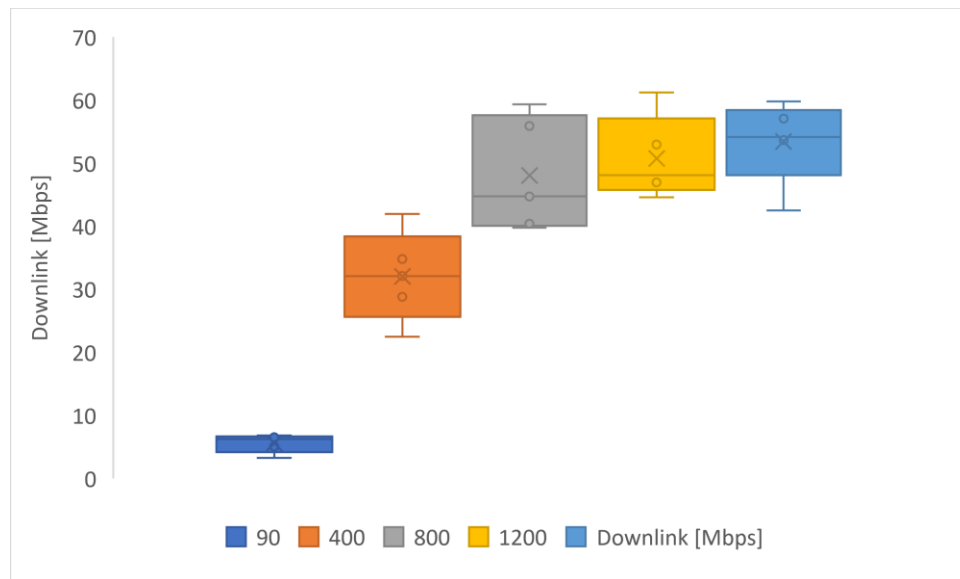
Z měření je vidět, že hodnota maximálního okna (64 kB) je postačující, někdy jsou ale o něco lepší výsledky se 128 kB.



Graf 7 - Propustnost v závislosti na velikosti TCP okna

7.2.1.2 MSS

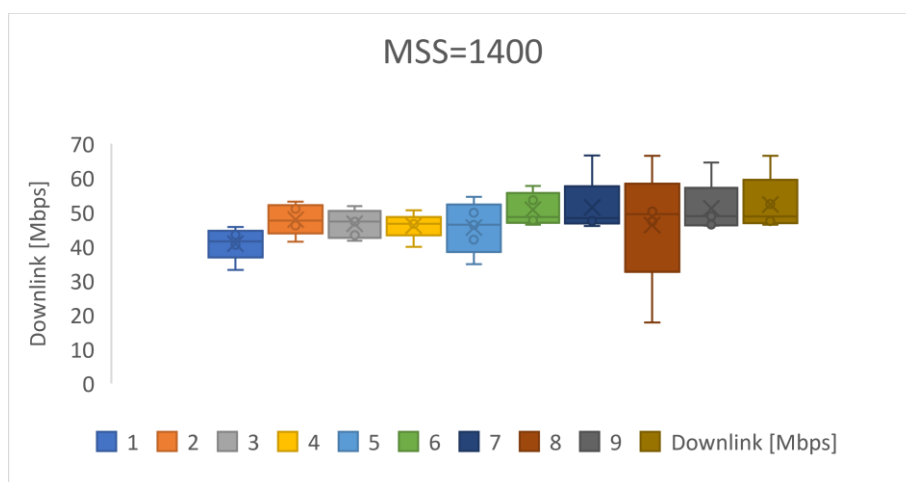
Rozsah hodnot pro velikost MSS je v F-Testeru od 40 do 1 460 bajtů. Pro hodnoty menší, než je 90 bajtů, se měření neprovedla. Hodnoty větší než 90 bajtů už poslouží k měření propustnosti, ale jedná se o poměrně neefektivní formu. [23]



Graf 8 - Propustnost v závislosti na velikosti MSS

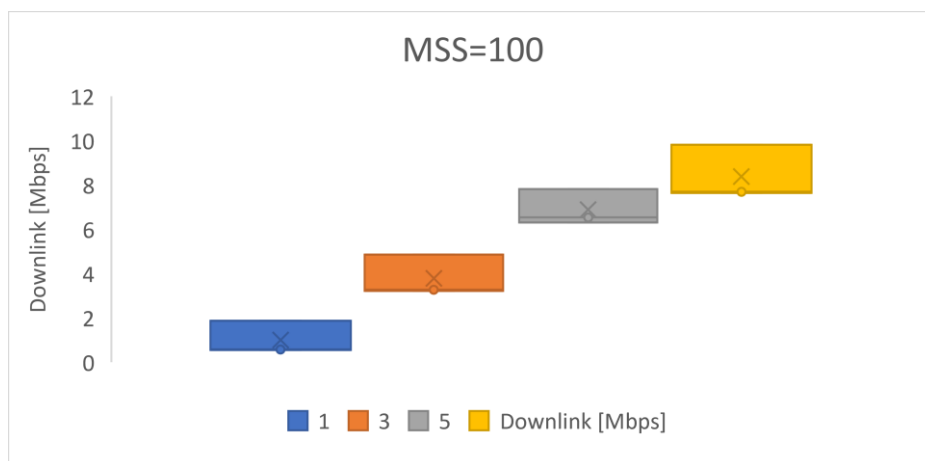
7.2.1.3 POČET PARALELNÍCH DATOVÝCH TOKŮ

Vliv maximální hodnoty segmentu na počet toků jsem si zkusila proměřit pomocí F-Testeru. Vytvořila jsem si vlastní scénář, který se skládal z deseti dílčích testů. V každém testu jsem zachovala stejné hodnoty, jaké jsou nastaveny v NGA Basic. Typ algoritmu je Cubic, velikost okna 128 kB a velikost MSS 1 400 bajtů. Každý z deseti testů obsahoval tyto hodnoty, trval 60 sekund a měnil se v něm počet datových toků. Měření podle tohoto scénáře jsem provedla pětkrát. Výsledkem je, že hodnoty celkové propustnosti se tolik neliší.



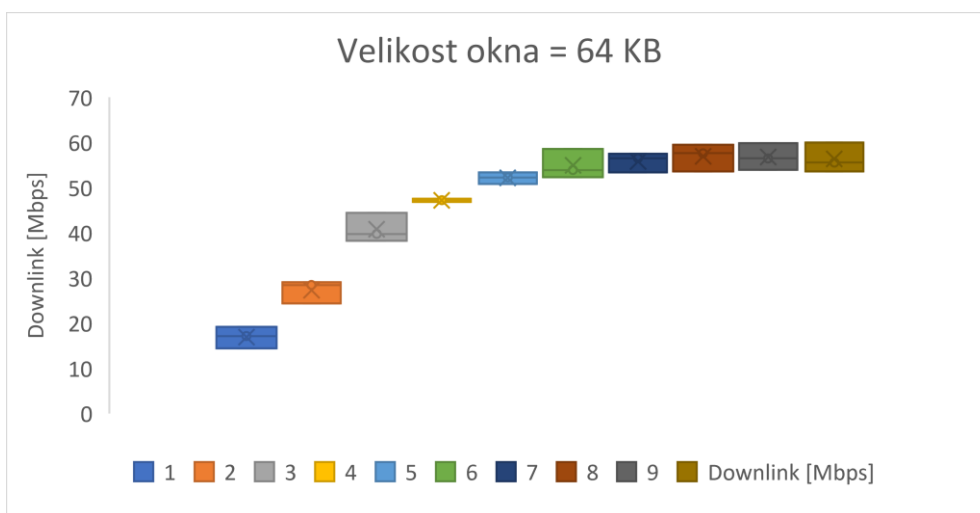
Graf 9 - Propustnost v závislosti na počtu datových toků

Větší rozdíly můžeme vidět při změně velikosti MSS. Pokud zmenšíme hodnotu maximální velikosti segmentu, snížíme tím propustnost a vidíme rozdíl použití více toků.



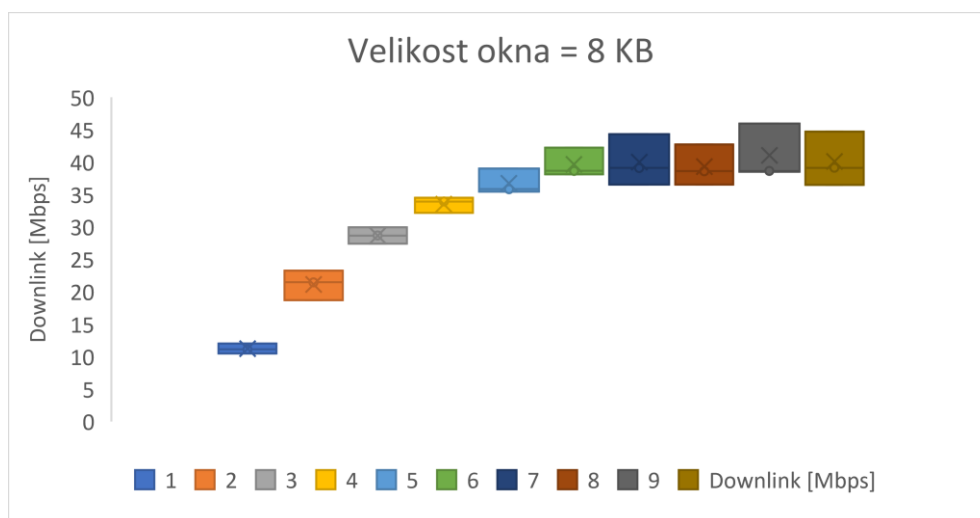
Graf 10 - Propustnost v závislosti na počtu datových toků s omezeným MSS

Pokud ponechám MSS o velikosti 1 400 bitu a změním velikost TCP okna na 64 kB jde vidět, že počet streamu opět ovlivní výslednou propustnost při použití do pěti paralelních toků. Z tabulky vyplývá, že při použití pěti a více toků, se už hodnoty celkové propustnosti neliší.



Graf 11 - Propustnost v závislosti na počtu datových toků s omezenou velikostí okna na 64 kB

Jestliže nastavíme hodnotu velikosti okna stanovenou pro Windows XP 8 kB, lze vidět podobný případ jako u použití okna 64 kB, kde má největší vliv na propustnost prvních pět toků. Celkově se snížila menším oknem i výsledná propustnost.



Graf 12 - Propustnost v závislosti na počtu datových toků s omezenou velikostí okna na 8 kB

Jak lze vidět, větší počet streamů může kladně ovlivňovat rychlost při nevhodně zvolených ostatních parametrech sítě. Pro vhodně nastavené parametry sítě může být dostačující i pouze jediný datový tok, ale to může být dobré jen pro určitý druh technologie. Pro zefektivnění je použito více toků. Velký počet toků může mít ale nakonec i negativní vliv na celkovou propustnost, jelikož v každém toku máme přidané záhlaví. Velký počet záhlaví může vést k poklesu reálné celkové propustnosti. Obecně je daná propustnost závislá na mnoha faktorech, jak na výše uvedených parametrech sítě, tak dokonce i na výkonosti zařízení. Pokud je počítač velice vytížený, nebo obsahuje nějaký malware, který odebírá výkon danému zařízení, ovlivňuje tím i síťové aspekty. Nejen vytíženost počítače, ale například i samotná vytíženost sítě ovlivňuje celkovou propustnost.

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ F-TESTERU

Z kapitoly 6 vyšel F-Tester jako zařízení, který naměřilo nejmenší procentuální odchylky od hodnot operátora.

8.1 DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ

Pro co nejpřesnější výsledek je nutná reprodukovatelnost. Nejprve jsem se zaměřila na několik měření v rámci jednoho dne v různě zvolené časy. Poté jsem ve vybrané časy prováděla měření vždy ve stejný čas po dobu 7 dní. Pro porovnání jsem udělala i několik měření pomocí UDP protokolu. Pro tato měření jsem opět využila test NGA Basic s danými parametry. Výsledné hodnoty z daného testu jsem opět normovala dle metodiky a v tabulce označila příslušný sloupec symbolem *.

8.1.1 TCP MĚŘENÍ V RÁMCI 24 HODIN

Během 24 hodin jsem celkově provedla 15 testů v náhodně zvolený čas v průběhu dne. Měření probíhalo od 10 hodin dopoledne 08. 04. 2020 do druhého dne stejného času. V příloze můžeme najít kompletní tabulky, kde jsou porovnané minimální, průměrné i maximální hodnoty mezi výsledky z měření F-Testeru a z reportu monitorování na RLC vrstvě.

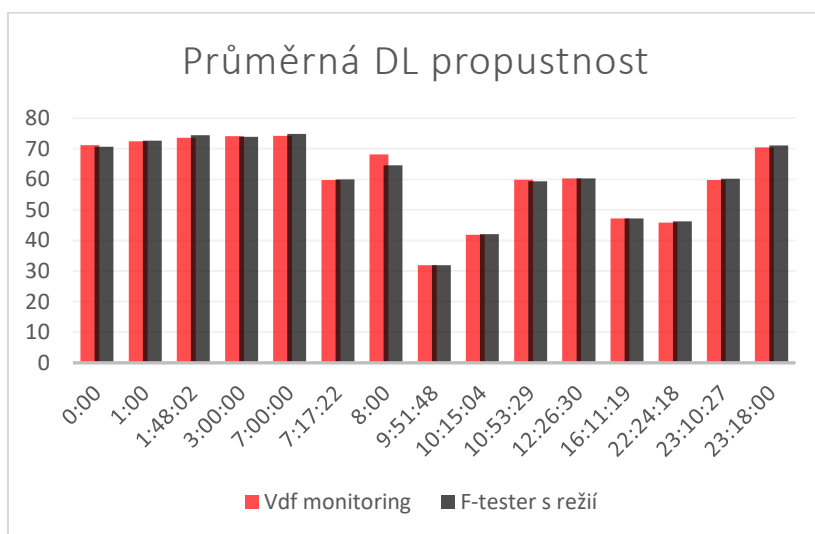
Zatímco hlasové hovory byly symetrické pro směr vzestupný i sestupný, u datových služeb je tomu jinak. Je zde využita asymetrická technologie, která odděluje směry do dvou samostatných kanálů. Že se jedná o asymetrickou technologii, vyplývá z grafů naměřených průměrných rychlostí pro dané směry. U hodnot DL propustnosti se dostává až přes 70 Mbps, pro UL nepřekročíme 50 Mbps. Je tomu tak, že dnes jsou vysokorychlostní připojení navržena tak, aby poskytovala mnohem lepší rychlost stahování než nahrávání. To je zapříčiněno tím, že obecně víc osob využívá spíš směr sestupný. Do tohoto směru nespadá pouze samotné stahování, ale například i prohlížení webových stránek nebo multimediálních souborů, kde k stahování dochází. Méně využívané je nahrávání. Proto má UL omezenější rychlost než DL.

V rámci technologie 4G je stanovena rychlost 100 Mbps. Takové rychlosti nelze téměř nikdy dosáhnout, protože je síť ovlivněna několika parametry, jak bylo zmíněno v kapitole 3.4.1 Parametry v nastavení F-Testeru. Z 24 hodinového měření jsem pouze v šesti časech (od 23:18 do 7:00) naměřila hodnoty pro DL větší než 70 Mbps. V ostatní časy byla propustnost pod touto hodnotou. Průměrná procentuální odchylka pro DL v rámci těchto 24 hodin byla 0,89 %.

Tabulka 1 - Průměrné hodnoty DL propustnosti

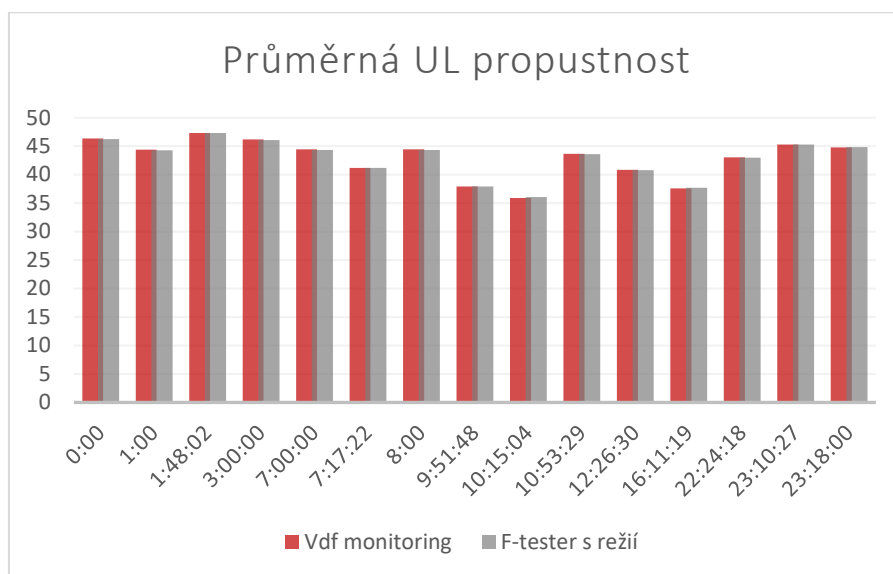
| čas | Vdf [Mbps] | F-Tester [Mbps] | *F-Tester [Mbps] | % odchylky |
|----------|------------|-----------------|------------------|------------|
| 0:00 | 71,15 | 68,68 | 70,64 | 0,72 % |
| 1:00 | 72,45 | 70,57 | 72,59 | 0,19 % |
| 1:48:02 | 73,58 | 72,38 | 74,45 | 1,17 % |
| 3:00:00 | 74,05 | 71,86 | 73,92 | 0,18 % |
| 7:00:00 | 74,15 | 72,7 | 74,78 | 0,84 % |
| 7:17:22 | 59,78 | 58,35 | 60,02 | 0,40 % |
| 8:00 | 68,1 | 62,74 | 64,53 | 5,53 % |
| 9:51:48 | 31,88 | 31,01 | 31,90 | 0,05 % |
| 10:15:04 | 41,81 | 40,93 | 42,10 | 0,69 % |
| 10:53:29 | 59,87 | 57,72 | 59,37 | 0,84 % |
| 12:26:30 | 60,27 | 58,64 | 60,32 | 0,08 % |
| 16:11:19 | 47,25 | 45,85 | 47,16 | 0,19 % |
| 22:24:18 | 45,86 | 44,97 | 46,26 | 0,86 % |
| 23:10:27 | 59,73 | 58,52 | 60,19 | 0,77 % |
| 23:18:00 | 70,43 | 69,09 | 71,07 | 0,89 % |

V grafu jsou vyneseny hodnoty z prvního měření propustnosti. Jedná se o průměrnou hodnotu propustnosti ve směru sestupném. Červeně vyznačené jsou zde hodnoty naměřené v síti operátora a černě hodnoty naměřené pomocí měřáku F-Tester a dále normované.



Graf 13 - Porovnání průměrné propustnosti v sestupném směru během 24 hodin

Pro graf ve směru vzestupném je pro hodnoty měřené F-Testerem využívaná barva šedá.



Graf 14 - Porovnání průměrné propustnosti v vzestupném směru během 24 hodin

Z grafu lze vidět, že hodnoty při měření pro vzestupný směr mají menší odchylky než pro směr sestupný. V tabulce hodnot procentuálních odchylek je vidět, že hodnoty jsou opravdu menší. Průměrná procentuální odchylka pro vzestupný směr je pouze 0,17 %.

Tabulka 2 - Průměrné hodnoty UL propustnosti

| čas | Vdf [Mbps] | F-Tester [Mbps] | *F-Tester [Mbps] | % odchylky |
|----------|------------|-----------------|------------------|------------|
| 0:00:00 | 46,35 | 44,96 | 46,25 | 0,23 % |
| 1:00:00 | 44,42 | 43,07 | 44,30 | 0,27 % |
| 1:48:02 | 47,31 | 45,99 | 47,31 | 0,01 % |
| 3:00:00 | 46,17 | 44,80 | 46,08 | 0,19 % |
| 7:00:00 | 44,46 | 43,13 | 44,36 | 0,22 % |
| 7:17:22 | 41,18 | 40,07 | 41,22 | 0,09 % |
| 8:00:00 | 44,44 | 43,13 | 44,36 | 0,17 % |
| 9:51:48 | 37,92 | 36,90 | 37,96 | 0,09 % |
| 10:15:04 | 35,92 | 35,06 | 36,06 | 0,40 % |
| 10:53:29 | 43,69 | 42,39 | 43,60 | 0,20 % |
| 12:26:30 | 40,83 | 39,64 | 40,77 | 0,14 % |
| 16:11:19 | 37,61 | 36,64 | 37,69 | 0,21 % |
| 22:24:18 | 43,03 | 41,78 | 42,97 | 0,13 % |
| 23:10:27 | 45,32 | 44,02 | 45,28 | 0,09 % |
| 23:18:00 | 44,80 | 43,62 | 44,87 | 0,15 % |

8.1.2 TCP MĚŘENÍ V RÁMCI 7 DNÍ

Pro měření po dobu celých 7 dní jsem zvolila hodnoty: 0:15, 4:00, 8:00, 12:00, 16:00 a 20:00. Měření jsem prováděla stejným způsobem jako měření v rámci 24 hodin. Monitorování na straně operátora bylo spouštěno vždy na 24 hodin, od půlnoci do půlnoci. Jednalo se o dny 21. 04. 2020 až 27. 04. 2020. Opět jsem se zaměřila na průměrné hodnoty rychlostí v rámci NGA Basic měření. V předchozím měření vyšly největší odchylky v 8:00, stejně tomu bylo i během tohoto měření. Níže uvedená tabulka je rozdělena do třech částí. V první části je průměr všech odchylek v rámci týdenního měření pro daný čas. Druhá část obsahuje pouze hodnoty z pracovních dnů, kdy měření probíhalo. Ve třetí části jsou hodnoty pouze ze soboty a neděle.

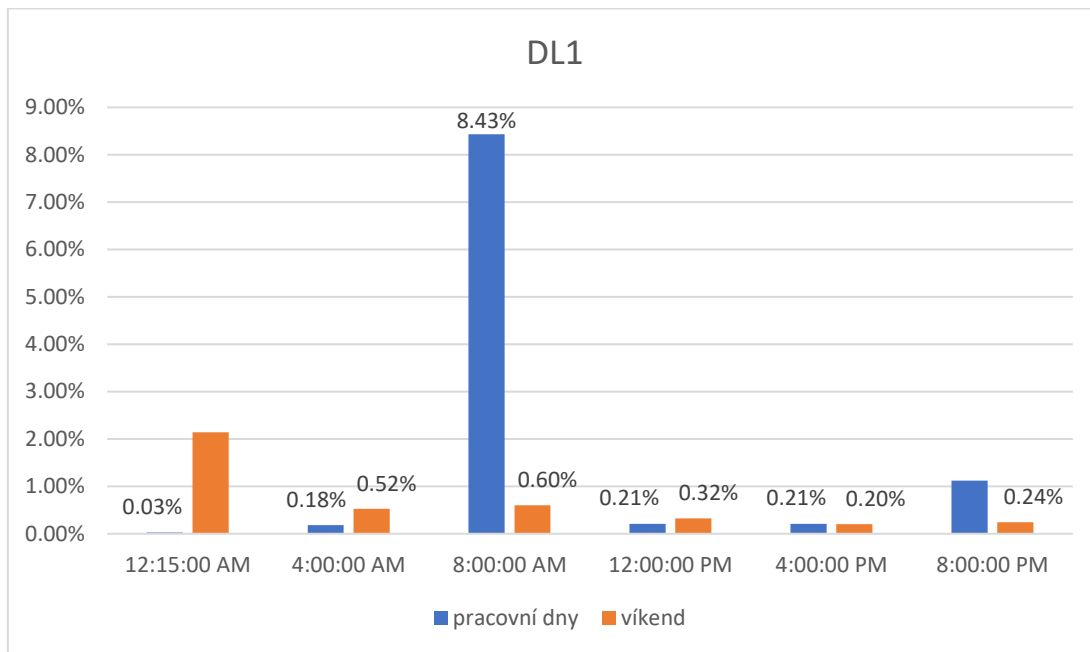
Pokud se podíváme na tabulky všech odchylek měření, jak pro směr vzestupný, tak i pro směr sestupný a nehledě na to, jestli se jedná o všední nebo pracovní den, průměrná procentuální odchylka byla naměřena 0,9 %. Pokud bychom se zaměřili pouze na všední dny, přesáhne tato odchylka jedno procento a dostáváme se na průměrnou odchylku 1,12 %. Naopak o víkendu je odchylka pouze 0,56 %.

Tabulka 3 - Procentuální odchylky v rámci 24 hodin

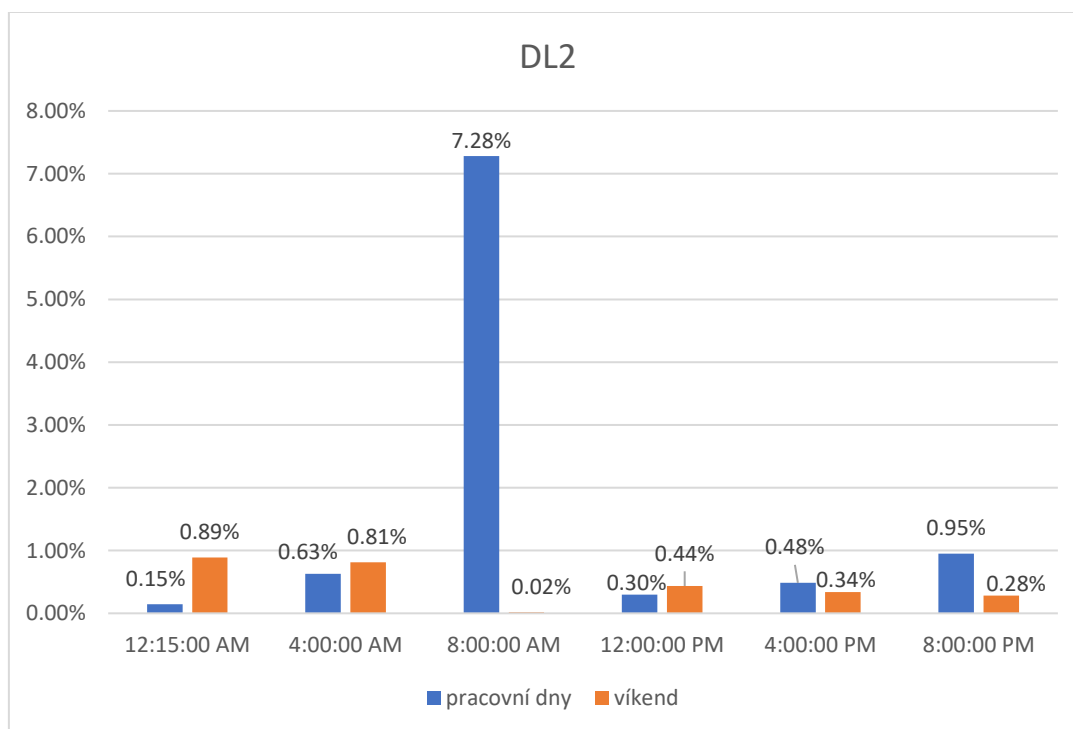
| | čas | 0:15:00 | 4:00:00 | 8:00:00 | 12:00:00 | 16:00:00 | 20:00:00 |
|--------------|------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| pracovní dny | průměr DL1 | 0,03 % | 0,18 % | 8,43 % | 0,21 % | 0,21 % | 1,12 % |
| | průměr UL1 | 0,25 % | 0,44 % | 0,01 % | 0,42 % | 0,49 % | 0,34 % |
| | průměr DL2 | 0,15 % | 0,63 % | 7,28 % | 0,30 % | 0,48 % | 0,95 % |
| | průměr UL2 | 0,88 % | 0,66 % | 1,15 % | 0,86 % | 0,62 % | 0,80 % |
| víkendy | průměr DL1 | 2,14 % | 0,52 % | 0,60 % | 0,32 % | 0,20 % | 0,24 % |
| | průměr UL1 | 0,20 % | 0,51 % | 0,26 % | 0,21 % | 0,20 % | 0,54 % |
| | průměr DL2 | 0,89 % | 0,81 % | 0,02 % | 0,44 % | 0,34 % | 0,28 % |
| | průměr UL2 | 0,98 % | 0,47 % | 0,90 % | 0,85 % | 0,93 % | 0,52 % |

Procentuální odchylky jsou vyjádřeny mezi daty získanými od operátora a upravenými hodnotami z měření pomocí F-Testeru. Upravené znamená, že výslednou rychlost v Mbps jsem zvětšila o 2,86 %. Toto procento nám značí dané TCP a IP záhlaví, jak již bylo řečeno v teoretickém rozboru. Dále je hodnota upravena o RTT. Dle exportu CSV z F-Testeru lze zjistit i hodnoty RTT, které také ovlivňují výslednou rychlost. Rozdíl hodnot rychlosti bez RTT a s RTT se liší většinou o setiny Mbps. Rozdíl mezi hodnotou bez RTT a s RTT je většinou 0,01 %, maximální rozdíl v naměřených hodnotách byl 1,57 %. Oproti hodnotě bez RTT je rozdíl menší o 0,13 %.

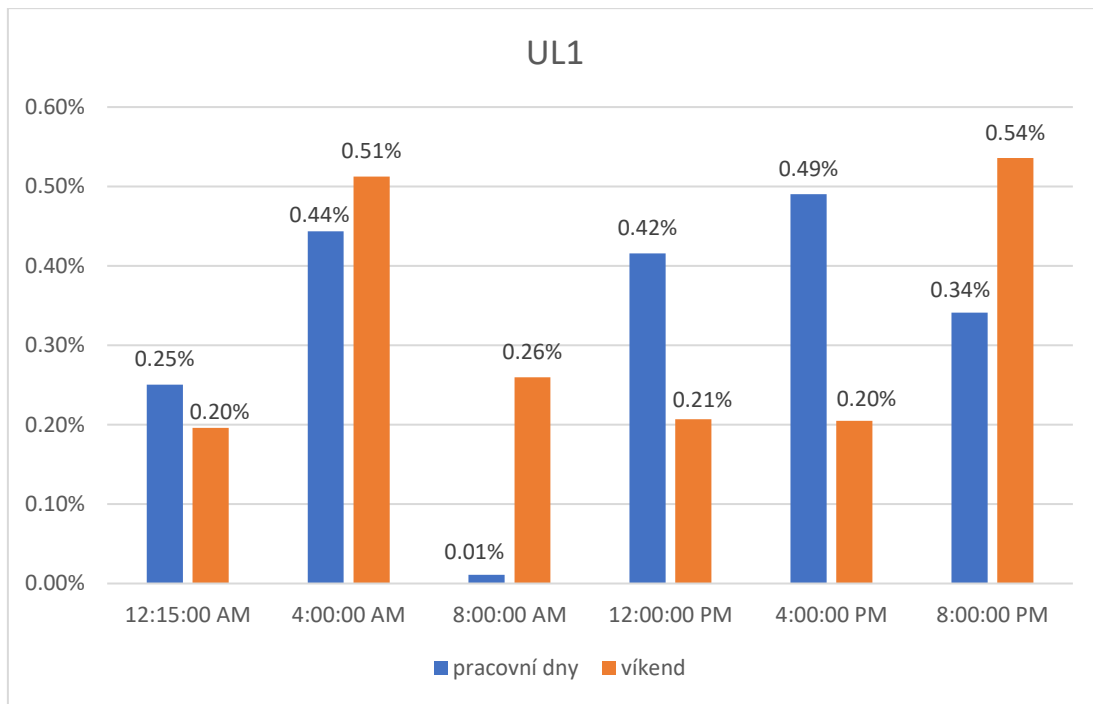
Následují čtyři grafy, ve kterých jsou porovnané odchylky naměřené v daný čas o víkendu a ve všední dny. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole při použití NGA Basic dochází ke třem testům s výslednými čtyřmi hodnotami propustnosti v daném směru. Pro směr downlink lze pozorovat mnohem větší rozdíly odchylek mezi všedními dny a víkendy.



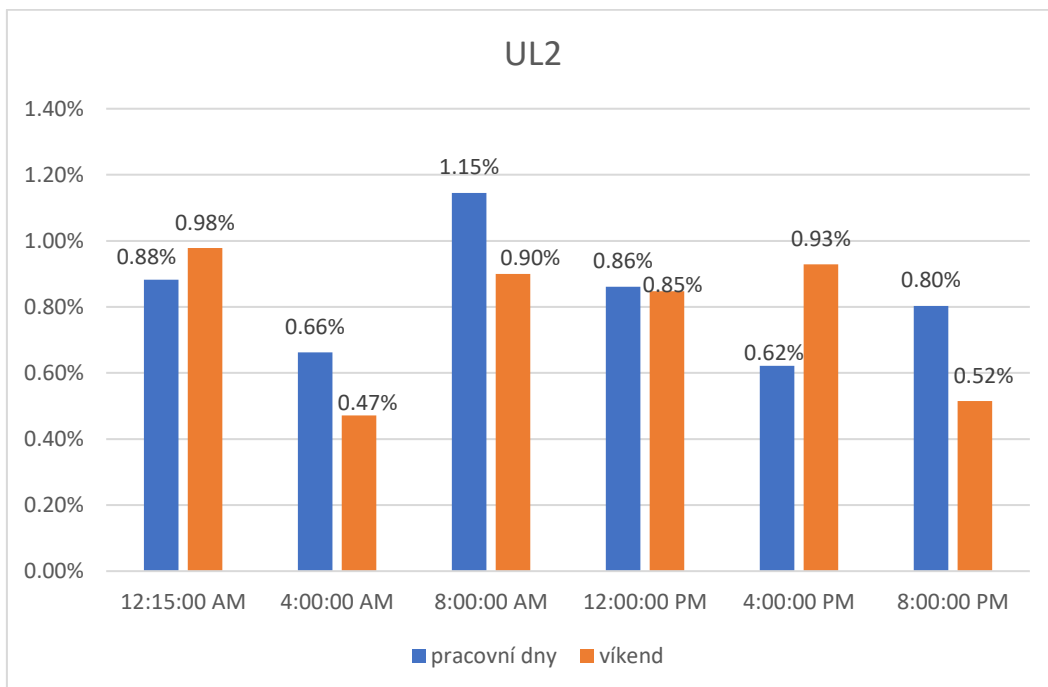
Graf 15 - Porovnání procentuálních odchylek pro první downlink test



Graf 16 - Porovnání procentuálních odchylek pro druhý downlink test



Graf 17 - Porovnání procentuálních odchylek pro první uplink test



Graf 18 - Porovnání procentuálních odchylek pro druhý uplink test

9 ZÁVĚR

Obsahem diplomové práce byla analýza mobilní sítě, definování míst v síti pro měření, provedení měření v daných místech a porovnání přenosových rychlostí. Analýza mobilní sítě byla popsána v kapitole teoretického rozboru. Jednalo se o popis architektury telekomunikační sítě při použití technologie čtvrté generace. V teoretickém rozboru jsem se nezaměřila pouze na místa, kde lze v síti měřit, ale také na zařízení, která lze pro měření použít. V další kapitole jsem se již zaměřila na daná místa, která byla využita pro měření a následné porovnání výsledků. Jako nejvhodnější volba na straně operátora bylo zvoleno měřicí místo v základnové stanici, konkrétně na druhé vrstvě využívající RLC protokol. Na straně uživatele byla zvolena vrstva čtvrtá, neboť na čtvrté vrstvě pracují zařízení, které uživatel pro své měření využívá. Uživatel má na výběr z několika dostupných aplikací, které využívají protokoly dané čtvrté vrstvy. Aplikace, které jsou využívány koncovými uživateli, používají služby v transportní vrstvě zahrnující datový tok orientovaný na spolehlivost, řízení toku, připojení a další. Protokoly fungující na této vrstvě jsou TCP a UDP.

Postup metodiky je nalezení vhodného měřicího místa jak na straně operátora, tak na straně uživatele. Získání dat na straně operátora bylo dosaženo pomocí dohledového systému nad základnovými stanicemi. V daném exportu dat byly hodnoty RLC propustnosti ve směru downlink i ve směru uplink. Hodnoty byly snímány po sekundách a vyjádřeny v jednotkách bps. Na straně uživatele se jednalo o hodnoty propustnosti z transportní vrstvy. Uživatel má na výběr z velké škály zařízení pro měření parametrů TCP/IP sítě.

V kapitole Výběr vhodného měřicího systému na straně uživatele jsem zvolila tři zařízení (dvě softwarové aplikace a jedno hardwarové zařízení) se kterými jsem provedla pět měření. Výsledné naměřené hodnoty jsem upravila na bázi teoretické znalosti velikosti záhlaví a poté porovnála. Pro nejpoužívanější online nástroj na měření rychlosti Ookla byla průměrná odchylka měření 8,98 %. Pro Netmetr, měřicí software pod záštitou ČTÚ byla průměrná odchylka 4,91 %. Pro zařízení F-Tester však byla průměrná odchylka 1,01 %. Tím se jednalo o nejmenší naměřenou odchylkou a zařízení F-Tester bylo použito na další testování.

Nejen, že použitím F-Testeru dosahujeme nejmenších odchylek, ale také se jedná o zařízení umožňující měnit parametry testování nebo druh použitého protokolu. Proto je v kapitole Rozsáhlejší testy s F-Testerem provedeno několik testů, kde je znázorněno jak parametry jako maximální velikost segmentu, počet paralelních toků, velikost TCP okna či vybraný algoritmus ovlivňují výsledný tok. Obecně je TCP protokol robustní, spolehlivý a zaručuje, že data jsou přijímána přesně tak, jak byla odeslána. Autokorekce a regulace paketů má za následek

spolehlivost, která opravuje ztracené pakety. Konkrétní ztracené pakety a obecně celkové množství přijatých paketů má vliv na výslednou propustnost. Oproti tomu UDP je nespolehlivý protokol, a proto se předpokládá, že by odchylky měly být menší než při použití TCP protokolu. F-Testerem jsem naměřila procentuální odchylku ve směru downlink pro TCP 0,88 % a ve stejném směru s použitým UDP protokolem 0,86 % a tím jsem předpoklad ověřila.

Předposlední kapitola je zaměřena na získání co nejvíce validních informací za využití dlouhodobého měření. Nejprve bylo zvoleno několik měření (konkrétně patnáct). V průběhu 24 hodin byly provedena měření za využití F-Testeru, kde bylo dosaženo průměrné odchylky 0,89 %. Dále bylo provedeno týdenní měření s výslednou odchylkou 0,9 %. Pokud bychom týdenní výsledky rozdělili na pracovní a nepracovní dny, lze vidět že v pracovních dnech nastávají větší odchylky. Pro pracovní dny je průměrná odchylka 1,12 % a pro víkend pouze 0,56 %. Z daných výsledků je patrné, že síť je v pracovní dny mnohem více zatížená a ovlivněna rušivými vlivy než v nepracovní dny.

Pokud vezmeme v potaz všechna měření pomocí F-Testeru za využití TCP protokolu dostáváme průměrnou odchylku 0,93 %. Práce byla zaměřena na výběr vhodného nástroje za předpokladu dosažení nejmenších odchylek, aby byla data od uživatele porovnatelná s operátorem, což je důležité pro obě strany. Využitím F-Testeru nepřesahuje rozdíl jedno procento, a tak se dané zařízení jeví jako vhodný ukazatel pro porovnání propustnosti. Jelikož právě výsledné naměřené hodnoty pomocí F-Testeru jsou nejvíce srovnatelné s hodnotami propustnosti získané u operátora.

10 POUŽITÉ ODKAZY

- [1] *merenidatovychparametrusitipomocitcpprotokoluverze2.0.pdf* [online]. [vid. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/937/soubory/merenidatovychparametrusitipomocitcpprotokoluverze2.0.pdf>
- [2] *Působnost ČTÚ | Český telekomunikační úřad* [online]. [vid. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/pusobnost-ctu>
- [3] *The Evolved Packet Core* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [4] *ts_136300v081200p.pdf* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08.12.00_60/ts_136300v081200p.pdf
- [5] *LTE Layers Data Flow - Tutorialspoint* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_layers_data_flow.htm#
- [6] *ts_123101v080000p.pdf* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123100_123199/123101/08.00.00_60/ts_123101v080000p.pdf
- [7] *LTE-Advanced* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
- [8] *tr_131900v030000p.pdf* [online]. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/131900_131999/131900/03.00.00_60/tr_131900v030000p.pdf
- [9] *ts_123003v031400p.pdf* [online]. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123000_123099/123003/03.14.00_60/ts_123003v031400p.pdf
- [10] *Most up to date list of MCC and MNC codes: mobile country codes – mobile network codes* [online]. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.mcc-mnc.com/>
- [11] *metodikamerenidatovychparametruvmobilnichsitichv2.1.pdf* [online]. [vid. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/186507/soubory/metodikamerenidatovychparametruvmobilnichsitichv2.1.pdf>
- [12] POSTEL, J. *Internet Control Message Protocol* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc792>
- [13] EXFO. *LTB-2 rackmount modular mainframe | Product. EXFO* [online]. [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.exfo.com/en/products/field-network-testing/modular-test-platforms/ltb-2/>
- [14] *OneTouch™ AT Network Assistant | FLUKETESTERY.CZ - Měření optických sítí* [online]. [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://fluketestery.cz/produkty/onetouch-at-network-assistant-vlastnosti.html>

- [15] *Varianty a SW rozšíření – F-Tester NGA* [online]. [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://f-tester.fel.cvut.cz/popis-produktu/varianty-a-sw-rozsireni>
- [16] Speedtest by Ookla - The Global Broadband Speed Test. *Speedtest.net* [online]. [vid. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.speedtest.net/>
- [17] *Úvod – NetMetr* [online]. [vid. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.netmetr.cz/cs/>
- [18] *F-Tester NGA – Testování datových sítí efektivně, spolehlivě a cíleně* [online]. [vid. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://f-tester.fel.cvut.cz/>
- [19] *TCP IP Overview - Huawei* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100092155>
- [20] *Optimizing network throughput* [online]. 24. říjen 2014 [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: www.ibm.com/support/knowledgecenter/ss8ktr_1.6.0/com.ibm.replsvc.doc/doc/rlscg-optimizing-network-thruput.html
- [21] CHENGNIAN LONG, BIN ZHAO, XINPING GUAN a JUN YANG. TCP East: a novel usable window size estimate scheme for TCP faster recovery. In: *Proceedings. 2004 12th IEEE International Conference on Networks (ICON 2004) (IEEE Cat. No.04EX955): Proceedings. 2004 12th IEEE International Conference on Networks (ICON 2004) (IEEE Cat. No.04EX955)* [online]. 2004, s. 720–724 roč.2. ISSN 1531-2216. Dostupné z: doi:10.1109/ICON.2004.1409270
- [22] HA, Sangtae, Injong RHEE a Lisong XU. CUBIC: a new TCP-friendly high-speed TCP variant. *ACM SIGOPS Operating Systems Review* [online]. 2008, **42**(5), 64–74. ISSN 0163-5980. Dostupné z: doi:10.1145/1400097.1400105
- [23] *Geoff Huston - potaroo.net* [online]. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.potaroo.net/ispcol/2004-07/2004-07-isp.htm>
- [24] What is UDP (User Datagram Protocol)? - Definition from WhatIs.com. *SearchNetworking* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/UDP-User-Datagram-Protocol>
- [25] *Encapsulation of PDUs* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://erg.abdn.ac.uk/users/gorry/course/intro-pages/encapsulation.html>
- [26] *ts_136323v110200p.pdf* [online]. [vid. 2020-05-08]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136323/11.02.00_60/ts_136323v110200p.pdf
- [27] NARAYAN, Shaneel a Yhi SHI. TCP/UDP network performance analysis of windows operating systems with IPv4 and IPv6. In: *2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems: 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems* [online]. 2010, s. V2-219-V2-222. Dostupné z: doi:10.1109/ICSPS.2010.5555285
- [28] *Speedtest by Ookla - The Global Broadband Speed Test* [online]. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.speedtest.net/>

- [29] BURBANK, Jack, <> David Mills a <> William Kasch. *Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification* [online]. [vid. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc5905>
- [30] FETTE, I. a A. MELNIKOV. *The WebSocket Protocol* [online]. RFC6455. B.m.: RFC Editor. 2011 [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: [doi:10.17487/rfc6455](https://doi.org/10.17487/rfc6455)
- [31] *Dokumentace – F-Tester NGA* [online]. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://f-tester.fel.cvut.cz/technicka-podpora/dokumentace>

PŘÍLOHY

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| TABULKA 4 - POROVNÁNÍ RYCHLOSTÍ OD OPERÁTORA S APLIKACÍ OOKLA..... | 2 |
| TABULKA 5 - POROVNÁNÍ RYCHLOSTÍ OD OPERÁTORA S APLIKACÍ NETMETR | 2 |
| TABULKA 6 - POROVNÁNÍ RYCHLOSTÍ OD OPERÁTORA S F-TESTEREM..... | 3 |
| TABULKA 7 - POROVNÁNÍ RYCHLOSTÍ OD OPERÁTORA S F-TESTEREM ZA VYUŽITÍ UDP PROTOKOLU | 3 |
| TABULKA 8 - VELIKOST PROPUSTNOSTI V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ PŘI MSS=1400 | 4 |
| TABULKA 9 -VELIKOST PROPUSTNOSTI V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ S OMEZENÝM MSS NA 100 | 4 |
| TABULKA 10 - VELIKOST PROPUSTNOSTI V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ S OMEZENOU VELIKOSTÍ OKNA NA 64 KB..... | 4 |
| TABULKA 11 - VELIKOST PROPUSTNOSTI V ZÁVISLOSTI NA POČTU DATOVÝCH TOKŮ S OMEZENOU VELIKOSTÍ OKNA NA 8 KB..... | 5 |
| TABULKA 12 - TEST 1. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 5 |
| TABULKA 13 - TEST 2. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 5 |
| TABULKA 14 - TEST 3. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 6 |
| TABULKA 15 - TEST 4. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 6 |
| TABULKA 16 - TEST 5. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 6 |
| TABULKA 17 - TEST 6. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 7 |
| TABULKA 18 - TEST 7. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 7 |
| TABULKA 19 - TEST 8. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 7 |
| TABULKA 20 - TEST 9. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 8 |
| TABULKA 21 - TEST 10. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 8 |
| TABULKA 22 - TEST 11. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 8 |
| TABULKA 23 - TEST 12. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 9 |
| TABULKA 24 - TEST 13. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 9 |
| TABULKA 25 - TEST 14. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 9 |
| TABULKA 26 - TEST 15. V RÁMCI 24HODINOVÉHO MĚŘENÍ | 10 |
| TABULKA 27 - TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ HODNOTY PROPUSTNOSTI V SESTUPNÉM SMĚRU..... | 10 |
| TABULKA 28 - TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ HODNOTY PROPUSTNOSTI PRO VZESTUPNÝ SMĚR | 11 |
| TABULKA 29 - TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ HODNOTY PROPUSTNOSTI V SESTUPNÉM SMĚRU (DRUHÉ MĚŘENÍ V RÁMCI NGA BASIC TESTU)..... | 11 |
| TABULKA 30 - TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ HODNOTY PROPUSTNOSTI PRO VZESTUPNÝ SMĚR (DRUHÉ MĚŘENÍ V RÁMCI NGA BASIC TESTU)..... | 12 |
| TABULKA 31 - POROVNANÉ HODNOTY DL PROPUSTNOSTI OD OPERÁTORA, NAMĚŘENÁ F-TESTEREM BEZ A SE ZAPOČÍTANÉM RTT..... | 12 |
| TABULKA 32 - POROVNANÉ HODNOTY UL PROPUSTNOSTI OD OPERÁTORA, NAMĚŘENÁ F-TESTEREM BEZ A SE ZAPOČÍTANÉM RTT | 13 |
| TABULKA 33 - POROVNANÉ HODNOTY DL PROPUSTNOSTI OD OPERÁTORA, NAMĚŘENÁ F-TESTEREM BEZ A SE ZAPOČÍTANÉM RTT..... | 13 |
| TABULKA 34 - POROVNANÉ HODNOTY UL PROPUSTNOSTI OD OPERÁTORA, NAMĚŘENÁ F-TESTEREM BEZ A SE ZAPOČÍTANÉM RTT | 14 |

Tabulka 4 - Porovnání rychlostí od operátora s aplikací Ookla

| TEST | směr | VDF[Mbps] | Ookla [Mbps] | *Ookla [Mbps] | % odchylky |
|------|------|-----------|--------------|---------------|------------|
| 1 | DL | 7,57 | 6,55 | 6,74 | 12,36 % |
| | UL | 14,26 | 14,10 | 14,50 | 1,68 % |
| 2 | DL | 8,16 | 7,63 | 7,85 | 3,97 % |
| | UL | 23,01 | 31,80 | 32,71 | 29,65 % |
| 3 | DL | 26,20 | 23,00 | 23,66 | 10,75 % |
| | UL | 34,31 | 33,10 | 34,05 | 0,77 % |
| 4 | DL | 22,26 | 21,80 | 22,42 | 0,73 % |
| | UL | 22,33 | 22,40 | 23,04 | 3,08 % |
| 5 | DL | 27,35 | 27,80 | 28,60 | 4,35 % |
| | UL | 20,18 | 25,30 | 26,02 | 22,45 % |

Tabulka 5 - Porovnání rychlostí od operátora s aplikací Netmetr

| TEST | směr | VDF[Mbps] | Netmetr [Mbps] | *Netmetr [Mbps] | % odchylky |
|------|------|-----------|----------------|-----------------|------------|
| 1 | DL | 4,52 | 4,40 | 4,53 | 0,13 % |
| | UL | 25,10 | 24,00 | 24,69 | 1,68 % |
| 2 | DL | 3,26 | 2,70 | 2,78 | 17,38 % |
| | UL | 9,78 | 8,50 | 8,74 | 11,86 % |
| 3 | DL | 10,45 | 10,00 | 10,29 | 1,59 % |
| | UL | 24,94 | 24,00 | 24,69 | 1,03 % |
| 4 | DL | 26,01 | 24,00 | 24,69 | 5,36 % |
| | UL | 34,20 | 32,00 | 32,92 | 3,90 % |
| 5 | DL | 26,38 | 25,00 | 25,72 | 2,59 % |
| | UL | 25,57 | 24,00 | 24,69 | 3,58 % |

Tabulka 6 - Porovnání rychlostí od operátora s F-Testerem

| test | směr | VDF[Mbps] | F-Tester [Mbps] | *F-Tester [Mbps] | % odchylky |
|------|------|-----------|-----------------|------------------|------------|
| 1 | DL | 31,74 | 31,01 | 31,90 | 0,49 % |
| | UL | 37,09 | 36,90 | 37,96 | 2,28 % |
| | DL | 29,33 | 29,13 | 29,96 | 2,11 % |
| | UL | 14,08 | 13,85 | 14,25 | 1,17 % |
| 2 | DL | 41,37 | 40,93 | 42,10 | 1,74 % |
| | UL | 35,11 | 35,06 | 36,06 | 2,64 % |
| | DL | 37,36 | 37,30 | 38,37 | 2,62 % |
| | UL | 16,22 | 16,06 | 16,52 | 1,81 % |
| 3 | DL | 70,10 | 68,45 | 70,41 | 0,44 % |
| | UL | 39,92 | 38,74 | 39,85 | 0,19 % |
| | DL | 53,55 | 52,09 | 53,58 | 0,05 % |
| | UL | 24,17 | 23,26 | 23,93 | 1,01 % |
| 4 | DL | 69,73 | 68,15 | 70,10 | 0,53 % |
| | UL | 39,94 | 38,76 | 39,87 | 0,17 % |
| | DL | 53,94 | 52,64 | 54,15 | 0,38 % |
| | UL | 24,44 | 23,51 | 24,18 | 1,06 % |
| 5 | DL | 49,53 | 47,96 | 49,33 | 0,39 % |
| | UL | 35,63 | 34,64 | 35,63 | 0,00 % |
| | DL | 49,22 | 47,81 | 49,18 | 0,08 % |
| | UL | 22,21 | 21,39 | 22,00 | 0,93 % |

Tabulka 7 - Porovnání rychlostí od operátora s F-Testerem za využití UDP protokolu

| Test | Vdf TP [Mbps] | F-Tester [Mbps] | *F-Tester [Mbps] | % odchylka |
|------|---------------|-----------------|------------------|------------|
| 1 | 73,35 | 71,34 | 72,77 | 0,80 % |
| 2 | 54,70 | 54,26 | 55,35 | 1,16 % |
| 3 | 50,84 | 49,80 | 50,80 | 0,08 % |
| 4 | 44,32 | 42,86 | 43,72 | 1,38 % |

Tabulka 8 - Velikost propustnosti v závislosti na počtu datových toků při MSS=1400

| počet toků | F-Tester 1 [Mbps] | F-Tester 2 [Mbps] | F-Tester 3 [Mbps] | F-Tester 4 [Mbps] | F-Tester 5 [Mbps] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 41,51 | 40,53 | 33,12 | 45,64 | 43,42 |
| 2 | 50,99 | 47,59 | 46,15 | 53,06 | 41,42 |
| 3 | 48,92 | 41,66 | 47,26 | 51,80 | 43,26 |
| 4 | 46,53 | 46,63 | 46,60 | 50,57 | 39,90 |
| 5 | 34,81 | 54,52 | 46,34 | 49,89 | 42,02 |
| 6 | 57,71 | 53,49 | 47,59 | 48,57 | 46,31 |
| 7 | 66,60 | 45,96 | 47,41 | 48,35 | 48,52 |
| 8 | 66,50 | 17,79 | 47,34 | 49,43 | 50,21 |
| 9 | 64,51 | 46,04 | 46,36 | 49,70 | 48,84 |
| 10 | 66,47 | 52,35 | 47,39 | 48,82 | 46,32 |

Tabulka 9 - Velikost propustnosti v závislosti na počtu datových toků s omezeným MSS na 100

| počet toků | F-Tester 1 [Mbps] | F-Tester 2 [Mbps] | F-Tester 3 [Mbps] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0,56 | 1,87 | 0,58 |
| 3 | 3,27 | 4,86 | 3,22 |
| 5 | 6,31 | 7,81 | 6,53 |
| 10 | 7,63 | 9,81 | 7,69 |

Tabulka 10 - Velikost propustnosti v závislosti na počtu datových toků s omezenou velikostí okna na 64 KB

| počet toků | F-Tester 1 [Mbps] | F-Tester 2 [Mbps] | F-Tester 3 [Mbps] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 14,36 | 19,12 | 17,12 |
| 2 | 24,35 | 28,41 | 29,05 |
| 3 | 38,20 | 39,70 | 44,39 |
| 4 | 46,77 | 47,22 | 47,53 |
| 5 | 52,23 | 50,78 | 53,37 |
| 6 | 52,29 | 53,87 | 58,52 |
| 7 | 57,43 | 53,32 | 56,48 |
| 8 | 59,44 | 53,58 | 57,58 |
| 9 | 59,84 | 53,88 | 56,44 |
| 10 | 59,96 | 53,53 | 55,52 |

Tabulka 11 - Velikost propustnosti v závislosti na počtu datových toků s omezenou velikostí okna na 8 KB

| počet toků | F-Tester 1 [Mbps] | F-Tester 2 [Mbps] | F-Tester 3 [Mbps] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 11,11 | 10,49 | 12,00 |
| 2 | 18,68 | 21,45 | 23,25 |
| 3 | 27,40 | 28,66 | 29,92 |
| 4 | 32,14 | 33,89 | 34,46 |
| 5 | 38,98 | 35,40 | 35,80 |
| 6 | 38,63 | 42,21 | 38,10 |
| 7 | 39,08 | 44,27 | 36,53 |
| 8 | 36,50 | 42,70 | 38,59 |
| 9 | 38,47 | 45,94 | 38,60 |
| 10 | 36,47 | 44,69 | 39,11 |

Tabulka 12 - Test 1. v rámci 24hodinového měření

| TEST 1 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 19,51 | 59,87 | 73,37 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 18,00 | 57,72 | 72,95 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 29,11 | 43,69 | 47,23 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 25,52 | 42,39 | 46,68 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 26,29 | 55,48 | 72,86 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 17,45 | 53,40 | 70,10 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 1,91 | 19,62 | 29,57 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 2,32 | 18,76 | 27,55 |

Tabulka 13 - Test 2. v rámci 24hodinového měření

| TEST 2 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 32,76 | 60,27 | 81,88 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 23,53 | 58,64 | 80,73 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 13,28 | 40,83 | 46,35 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 16,75 | 39,64 | 46,11 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 13,12 | 37,08 | 54,47 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 11,85 | 35,84 | 53,66 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 0,71 | 19,83 | 37,21 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 1,03 | 18,85 | 32,97 |

Tabulka 14 - Test 3. v rámci 24hodinového měření

| TEST 3 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 4,91 | 47,25 | 58,65 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 11,34 | 45,85 | 57,67 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 10,22 | 37,61 | 44,84 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 16,99 | 36,64 | 43,82 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 4,91 | 44,61 | 57,90 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 10,85 | 43,28 | 56,60 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 1,48 | 18,00 | 25,90 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 4,90 | 17,24 | 27,31 |

Tabulka 15 - Test 4. v rámci 24hodinového měření

| TEST 4 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 5,73 | 45,86 | 67,10 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 3,29 | 44,97 | 64,12 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 18,78 | 43,03 | 46,39 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 7,72 | 41,78 | 46,66 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 19,04 | 41,72 | 52,09 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 15,04 | 40,09 | 49,10 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 5,71 | 18,07 | 27,21 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 7,73 | 17,32 | 24,21 |

Tabulka 16 - Test 5. v rámci 24hodinového měření

| TEST 5 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 1,23 | 59,73 | 78,33 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 1,10 | 58,52 | 96,27 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 10,56 | 45,32 | 47,78 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 14,94 | 44,02 | 47,73 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 0,07 | 52,22 | 74,87 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 0,00 | 50,68 | 73,02 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 0,13 | 18,33 | 29,82 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 0,00 | 17,45 | 28,84 |

Tabulka 17 - Test 6. v rámci 24hodinového měření

| TEST 6 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 24,88 | 70,43 | 81,54 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 8,53 | 69,09 | 93,73 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 16,90 | 44,8 | 47,68 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 26,98 | 43,62 | 46,88 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 11,01 | 56,63 | 81,07 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 0,75 | 54,54 | 78,53 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 0,22 | 18,40 | 32,29 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 0,00 | 17,44 | 28,61 |

Tabulka 18 - Test 7. v rámci 24hodinového měření

| TEST 7 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 43,95 | 71,15 | 82,29 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 24,54 | 68,68 | 79,95 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 42,05 | 46,35 | 47,89 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 40,94 | 44,96 | 47,41 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 22,10 | 58,98 | 72,24 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 15,00 | 57,47 | 97,46 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 3,59 | 23,00 | 30,93 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 3,09 | 22,09 | 30,40 |

Tabulka 19 - Test 8. v rámci 24hodinového měření

| TEST 8 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 29,24 | 72,45 | 83,14 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 25,57 | 70,57 | 90,29 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 22,38 | 44,42 | 47,77 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 19,06 | 43,07 | 47,35 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 20,93 | 57,89 | 75,4 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 14,80 | 55,68 | 74,08 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 3,41 | 20,75 | 29,53 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 2,06 | 19,60 | 29,89 |

Tabulka 20 - Test 9. v rámci 24hodinového měření

| TEST 9 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 21,58 | 73,58 | 84,19 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 13,55 | 72,38 | 122,60 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 21,97 | 47,31 | 49,43 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 19,84 | 45,99 | 49,97 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 15,03 | 58,31 | 81,89 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 19,87 | 56,37 | 76,86 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 1,04 | 20,22 | 29,87 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 2,83 | 19,44 | 30,65 |

Tabulka 21 - Test 10. v rámci 24hodinového měření

| TEST 10 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 0,10 | 74,05 | 75,38 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 0,00 | 71,86 | 82,48 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 22,95 | 46,17 | 47,79 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 22,40 | 44,80 | 47,67 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 11,83 | 55,94 | 74,26 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 5,29 | 53,83 | 71,32 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 0,61 | 21,41 | 32,87 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 1,03 | 20,46 | 32,19 |

Tabulka 22 - Test 11. v rámci 24hodinového měření

| TEST 11 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 17,4 | 74,15 | 82,46 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 28,08 | 72,70 | 85,63 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 0,07 | 44,46 | 47,80 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 4,64 | 43,13 | 46,91 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 4,34 | 58,38 | 82,87 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 10,52 | 57,26 | 106,93 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 0,71 | 23,71 | 42,99 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 3,09 | 22,51 | 35,80 |

Tabulka 23 - Test 12. v rámci 24hodinového měření

| TEST 12 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 6,38 | 59,78 | 71,99 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 23,19 | 58,35 | 71,13 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 8,56 | 41,18 | 47,7 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 3,86 | 40,07 | 47,12 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 6,25 | 53,64 | 65,41 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 22,75 | 52,69 | 70,13 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 2,79 | 23,24 | 42,46 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 5,41 | 22,26 | 35,81 |

Tabulka 24 - Test 13. v rámci 24hodinového měření

| TEST 13 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 8,35 | 68,10 | 79,54 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 8,07 | 62,74 | 82,33 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 26,00 | 44,44 | 47,80 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 31,17 | 43,13 | 47,90 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 7,39 | 57,19 | 75,84 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 8,65 | 51,85 | 123,44 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 8,39 | 22,25 | 42,22 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 3,09 | 21,38 | 28,61 |

Tabulka 25 - Test 14. v rámci 24hodinového měření

| TEST 14 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 10,60 | 31,88 | 50,64 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 10,97 | 31,01 | 49,89 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 11,52 | 37,92 | 44,28 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 9,76 | 36,90 | 43,07 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-290 | 10,26 | 30,04 | 47,96 |
| F-Tester | Downlink | 201-290 | 9,18 | 29,13 | 42,48 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 1,98 | 14,43 | 23,79 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 2,06 | 13,85 | 22,66 |

Tabulka 26 - Test 15. v rámci 24hodinového měření

| TEST 15 | Throughput | Čas (0-330 s) | Minimum [Mbps] | Průměr [Mbps] | Maximum [Mbps] |
|----------------|------------|------------------|----------------|---------------|----------------|
| Vdf monitoring | Downlink | 1-90 | 2,28 | 41,81 | 53,49 |
| F-Tester | Downlink | 1-90 | 8,15 | 40,93 | 51,61 |
| Vdf monitoring | Uplink | 101-189 | 5,16 | 35,92 | 42,47 |
| F-Tester | Uplink | 101-189 | 5,93 | 35,06 | 42,77 |
| Vdf monitoring | Downlink | 201-289 | 8,56 | 38,63 | 61,46 |
| F-Tester | Downlink | 201-289 | 4,48 | 37,30 | 58,74 |
| Vdf monitoring | Uplink | 201-289 | 1,60 | 16,79 | 30,44 |
| F-Tester | Uplink | 201-289 | 1,03 | 16,06 | 29,09 |

Tabulka 27 - Týdenní průměrné hodnoty propustnosti v sestupném směru

| DL1 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 49,59 | 67,75 | 40,51 | 58,85 | 57,40 | 34,46 |
| | F-Tester [Mbps] | 48,59 | 66,23 | 35,51 | 57,37 | 55,88 | 33,46 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 57,25 | 69,58 | 46,85 | 18,94 | 39,14 | 54,92 |
| | F-Tester [Mbps] | 55,65 | 68,56 | 41,64 | 18,48 | 38,14 | 53,50 |
| středa | Vdf [Mbps] | 39,09 | 70,11 | 57,01 | 39,98 | 43,94 | 58,63 |
| | F-Tester [Mbps] | 38,04 | 68,69 | 55,39 | 38,85 | 42,93 | 57,00 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 54,61 | 69,80 | 60,34 | 55,60 | 62,87 | 49,79 |
| | F-Tester [Mbps] | 53,08 | 68,56 | 54,82 | 53,28 | 61,39 | 46,40 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 55,34 | 65,63 | 71,32 | 57,77 | 39,86 | 56,32 |
| | F-Tester [Mbps] | 53,67 | 63,51 | 61,53 | 56,61 | 39,37 | 55,04 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 61,17 | 70,41 | 54,63 | 60,80 | 31,46 | 51,91 |
| | F-Tester [Mbps] | 60,15 | 68,8 | 53,19 | 59,04 | 30,46 | 50,92 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 36,11 | 68,91 | 55,80 | 39,11 | 46,08 | 44,52 |
| | F-Tester [Mbps] | 33,12 | 67,22 | 54,65 | 38,15 | 44,85 | 42,94 |

Tabulka 28 - Týdenní průměrné hodnoty propustnosti pro vzestupný směr

| UL1 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 39,79 | 40,35 | 34,98 | 37,77 | 36,57 | 29,19 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,08 | 39,55 | 33,96 | 36,74 | 35,59 | 28,38 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 38,59 | 40,00 | 35,01 | 30,09 | 35,66 | 38,43 |
| | F-Tester [Mbps] | 37,53 | 39,03 | 33,95 | 29,49 | 34,73 | 37,60 |
| středa | Vdf [Mbps] | 37,08 | 41,70 | 37,89 | 36,55 | 34,65 | 39,12 |
| | F-Tester [Mbps] | 36,08 | 40,89 | 36,94 | 35,53 | 33,77 | 38,41 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 40,47 | 40,94 | 36,60 | 35,82 | 35,74 | 33,92 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,34 | 39,88 | 35,59 | 34,87 | 35,08 | 32,96 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 40,37 | 40,65 | 37,65 | 37,11 | 37,12 | 35,86 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,28 | 39,51 | 36,64 | 36,48 | 36,41 | 34,89 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 40,38 | 42,64 | 37,16 | 40,13 | 38,85 | 39,68 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,35 | 41,62 | 36,32 | 39,01 | 37,91 | 38,79 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 38,33 | 40,65 | 38,86 | 35,99 | 38,14 | 36,63 |
| | F-Tester [Mbps] | 37,31 | 39,76 | 37,78 | 35,14 | 37,09 | 35,80 |

Tabulka 29 - Týdenní průměrné hodnoty propustnosti v sestupném směru (druhé měření v rámci NGA Basic testu)

| DL2 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 47,28 | 54,47 | 39,71 | 47,87 | 46,74 | 30,89 |
| | F-Tester [Mbps] | 46,39 | 53,31 | 34,8 | 46,39 | 45,13 | 29,87 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 50,36 | 53,35 | 42,53 | 21,11 | 39,77 | 51,23 |
| | F-Tester [Mbps] | 49,14 | 52,52 | 37,46 | 20,53 | 38,34 | 48,83 |
| středa | Vdf [Mbps] | 40,15 | 58,44 | 52,26 | 38,19 | 43,81 | 55,67 |
| | F-Tester [Mbps] | 38,82 | 57,25 | 51,22 | 36,95 | 42,85 | 54,66 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 49,52 | 55,10 | 52,16 | 45,10 | 47,15 | 49,83 |
| | F-Tester [Mbps] | 47,63 | 53,75 | 46,41 | 43,43 | 46,27 | 46,39 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 50,56 | 57,27 | 56,93 | 52,54 | 45,21 | 55,46 |
| | F-Tester [Mbps] | 49,15 | 55,32 | 51,20 | 51,70 | 44,49 | 53,95 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 52,36 | 60,71 | 53,09 | 55,06 | 34,67 | 28,80 |
| | F-Tester [Mbps] | 50,58 | 59,21 | 51,42 | 53,38 | 33,58 | 27,94 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 44,07 | 58,53 | 52,55 | 37,02 | 53,23 | 42,90 |
| | F-Tester [Mbps] | 42,17 | 57,50 | 51,13 | 35,60 | 51,29 | 41,24 |

Tabulka 30 - Týdenní průměrné hodnoty propustnosti pro vzestupný směr (druhé měření v rámci NGA Basic testu)

| UL2 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 21,67 | 23,13 | 18,34 | 21,71 | 21,76 | 14,83 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,10 | 22,39 | 17,61 | 20,95 | 20,97 | 14,27 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 22,68 | 24,27 | 18,16 | 11,48 | 19,02 | 21,56 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,86 | 23,44 | 17,41 | 11,05 | 18,34 | 20,82 |
| středa | Vdf [Mbps] | 19,86 | 25,23 | 22,71 | 18,53 | 20,13 | 23,84 |
| | F-Tester [Mbps] | 19,06 | 24,46 | 21,91 | 17,80 | 19,37 | 23,16 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 22,64 | 23,86 | 20,18 | 18,54 | 19,22 | 21,52 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,73 | 22,97 | 19,40 | 17,75 | 18,67 | 20,68 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 21,96 | 23,90 | 23,54 | 22,75 | 20,79 | 23,46 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,11 | 23,00 | 22,63 | 22,15 | 20,15 | 22,59 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 23,29 | 26,80 | 23,54 | 23,35 | 17,25 | 15,45 |
| | F-Tester [Mbps] | 22,44 | 25,89 | 22,72 | 22,49 | 16,66 | 14,92 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 20,36 | 25,26 | 23,51 | 17,46 | 23,10 | 20,40 |
| | F-Tester [Mbps] | 19,58 | 24,47 | 22,61 | 16,84 | 22,19 | 19,76 |

Tabulka 31 - Porovnané hodnoty DL propustnosti od operátora, naměřená F-Testerem bez a se započítaným RTT

| DL1 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 49,59 | 67,75 | 40,51 | 58,85 | 57,40 | 34,46 |
| | F-Tester [Mbps] | 48,59 | 66,23 | 35,51 | 57,37 | 55,88 | 33,46 |
| | F-Tester s RTT | 48,67 | 66,30 | 35,62 | 57,45 | 55,96 | 33,58 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 57,25 | 69,58 | 46,85 | 18,94 | 39,14 | 54,92 |
| | F-Tester [Mbps] | 55,65 | 68,56 | 41,64 | 18,48 | 38,14 | 53,50 |
| | F-Tester s RTT | 55,79 | 68,63 | 41,75 | 18,70 | 38,24 | 53,58 |
| středa | Vdf [Mbps] | 39,09 | 70,11 | 57,01 | 39,98 | 43,94 | 58,63 |
| | F-Tester [Mbps] | 38,04 | 68,69 | 55,39 | 38,85 | 42,93 | 57,00 |
| | F-Tester s RTT | 38,14 | 68,76 | 55,46 | 38,96 | 43,04 | 57,07 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 54,61 | 69,80 | 60,34 | 55,60 | 62,87 | 49,79 |
| | F-Tester [Mbps] | 53,08 | 68,56 | 54,82 | 53,28 | 61,39 | 46,40 |
| | F-Tester s RTT | 53,91 | 68,63 | 54,90 | 53,36 | 61,47 | 46,48 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 55,34 | 65,63 | 71,32 | 57,77 | 39,86 | 56,32 |
| | F-Tester [Mbps] | 53,67 | 63,51 | 61,53 | 56,61 | 39,37 | 55,04 |
| | F-Tester s RTT | 53,75 | 63,58 | 61,60 | 56,69 | 39,47 | 55,12 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 61,17 | 70,41 | 54,63 | 60,80 | 31,46 | 51,91 |
| | F-Tester [Mbps] | 60,15 | 68,80 | 53,19 | 59,04 | 30,46 | 50,92 |
| | F-Tester s RTT | 60,22 | 68,86 | 53,28 | 59,11 | 30,61 | 51,00 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 36,11 | 68,91 | 55,80 | 39,11 | 46,08 | 44,52 |
| | F-Tester [Mbps] | 33,12 | 67,22 | 54,65 | 38,15 | 44,85 | 42,94 |
| | F-Tester s RTT | 33,30 | 67,30 | 54,70 | 38,30 | 44,90 | 43,00 |

Tabulka 32 - Porovnané hodnoty UL propustnosti od operátora, naměřená F-Testerem bez a se započítaném RTT

| UL1 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 39,79 | 40,35 | 34,98 | 37,77 | 36,57 | 29,19 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,08 | 39,55 | 33,96 | 36,74 | 35,59 | 28,38 |
| | F-Tester s RTT | 39,09 | 39,55 | 33,96 | 36,74 | 35,59 | 28,38 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 38,59 | 40,00 | 35,01 | 30,09 | 35,66 | 38,43 |
| | F-Tester [Mbps] | 37,53 | 39,03 | 33,95 | 29,49 | 34,73 | 37,60 |
| | F-Tester s RTT | 37,53 | 39,04 | 33,95 | 29,49 | 34,73 | 37,60 |
| středa | Vdf [Mbps] | 37,08 | 41,70 | 37,89 | 36,55 | 34,65 | 39,12 |
| | F-Tester [Mbps] | 36,08 | 40,89 | 36,94 | 35,53 | 33,77 | 38,41 |
| | F-Tester s RTT | 36,08 | 40,89 | 36,94 | 35,53 | 33,78 | 38,43 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 40,47 | 40,94 | 36,60 | 35,82 | 35,74 | 33,92 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,34 | 39,88 | 35,59 | 34,87 | 35,08 | 32,96 |
| | F-Tester s RTT | 39,35 | 39,89 | 35,60 | 34,87 | 35,09 | 32,96 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 40,37 | 40,65 | 37,65 | 37,11 | 37,12 | 35,86 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,28 | 39,51 | 36,64 | 36,48 | 36,41 | 34,89 |
| | F-Tester s RTT | 39,29 | 39,51 | 36,64 | 36,48 | 36,42 | 34,89 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 40,38 | 42,64 | 37,16 | 40,13 | 38,85 | 39,68 |
| | F-Tester [Mbps] | 39,35 | 41,62 | 36,32 | 39,01 | 37,91 | 38,79 |
| | F-Tester s RTT | 39,35 | 41,63 | 36,32 | 39,01 | 37,91 | 38,79 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 38,33 | 40,65 | 38,86 | 35,99 | 38,14 | 36,63 |
| | F-Tester [Mbps] | 37,31 | 39,76 | 37,78 | 35,14 | 37,09 | 35,80 |
| | F-Tester s RTT | 37,32 | 39,76 | 37,78 | 35,14 | 37,09 | 35,80 |

Tabulka 33 - Porovnané hodnoty DL propustnosti od operátora, naměřená F-Testerem bez a se započítaném RTT

| DL2 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 47,28 | 54,47 | 39,71 | 47,87 | 46,74 | 30,89 |
| | F-Tester [Mbps] | 46,39 | 53,31 | 34,80 | 46,39 | 45,13 | 29,87 |
| | F-Tester s RTT | 46,49 | 53,40 | 34,93 | 46,49 | 45,23 | 30,01 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 50,36 | 53,35 | 42,53 | 21,11 | 39,77 | 51,23 |
| | F-Tester [Mbps] | 49,14 | 52,52 | 37,46 | 20,53 | 38,34 | 48,83 |
| | F-Tester s RTT | 49,23 | 52,61 | 37,61 | 20,74 | 38,45 | 48,92 |
| středa | Vdf [Mbps] | 40,15 | 58,44 | 52,26 | 38,19 | 43,81 | 55,67 |
| | F-Tester [Mbps] | 38,82 | 57,25 | 51,22 | 36,95 | 42,85 | 54,66 |
| | F-Tester s RTT | 38,93 | 57,33 | 51,31 | 37,07 | 42,96 | 54,73 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 49,52 | 55,10 | 52,16 | 45,10 | 47,15 | 49,83 |
| | F-Tester [Mbps] | 47,63 | 53,75 | 46,41 | 43,43 | 46,27 | 46,39 |
| | F-Tester s RTT | 47,72 | 53,83 | 46,51 | 43,54 | 46,38 | 46,49 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 50,56 | 57,27 | 56,93 | 52,54 | 45,21 | 55,46 |
| | F-Tester [Mbps] | 49,15 | 55,32 | 51,20 | 51,70 | 44,49 | 53,95 |
| | F-Tester s RTT | 49,25 | 55,41 | 51,29 | 51,79 | 44,59 | 54,04 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 52,36 | 60,71 | 53,09 | 55,06 | 34,67 | 28,80 |
| | F-Tester [Mbps] | 50,58 | 59,21 | 51,42 | 53,38 | 33,58 | 27,94 |
| | F-Tester s RTT | 50,67 | 59,29 | 51,51 | 53,47 | 33,71 | 28,09 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 44,07 | 58,53 | 52,55 | 37,02 | 53,23 | 42,90 |
| | F-Tester [Mbps] | 42,17 | 57,50 | 51,13 | 35,60 | 51,29 | 41,24 |
| | F-Tester s RTT | 42,29 | 57,58 | 51,22 | 35,72 | 51,38 | 41,35 |

Tabulka 34 - Porovnané hodnoty UL propustnosti od operátora, naměřená F-Testerem bez a se započítaném RTT

| UL2 | | 0:15 | 4:00 | 8:00 | 12:00 | 16:00 | 20:00 |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pondělí | Vdf [Mbps] | 21,67 | 23,13 | 18,34 | 21,71 | 21,76 | 14,83 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,10 | 22,39 | 17,61 | 20,95 | 20,97 | 14,27 |
| | F-Tester s RTT | 21,10 | 22,39 | 17,61 | 20,95 | 20,97 | 14,27 |
| úterý | Vdf [Mbps] | 22,68 | 24,27 | 18,16 | 11,48 | 19,02 | 21,56 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,86 | 23,44 | 17,41 | 11,05 | 18,34 | 20,82 |
| | F-Tester s RTT | 21,86 | 23,45 | 17,41 | 11,05 | 18,35 | 20,82 |
| středa | Vdf [Mbps] | 19,86 | 25,23 | 22,71 | 18,53 | 20,13 | 23,84 |
| | F-Tester [Mbps] | 19,06 | 24,46 | 21,91 | 17,80 | 19,37 | 23,16 |
| | F-Tester s RTT | 19,06 | 24,46 | 21,91 | 17,80 | 19,37 | 23,13 |
| čtvrtek | Vdf [Mbps] | 22,64 | 23,86 | 20,18 | 18,54 | 19,22 | 21,52 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,73 | 22,97 | 19,40 | 17,75 | 18,67 | 20,68 |
| | F-Tester s RTT | 21,74 | 22,97 | 19,40 | 17,75 | 18,67 | 20,68 |
| pátek | Vdf [Mbps] | 21,96 | 23,90 | 23,54 | 22,75 | 20,79 | 23,46 |
| | F-Tester [Mbps] | 21,11 | 23,00 | 22,63 | 22,15 | 20,15 | 22,59 |
| | F-Tester s RTT | 21,12 | 23,00 | 22,63 | 22,15 | 20,15 | 22,59 |
| sobota | Vdf [Mbps] | 23,29 | 26,80 | 23,54 | 23,35 | 17,25 | 15,45 |
| | F-Tester [Mbps] | 22,44 | 25,89 | 22,72 | 22,49 | 16,66 | 14,92 |
| | F-Tester s RTT | 22,44 | 25,89 | 22,72 | 22,50 | 16,66 | 14,92 |
| neděle | Vdf [Mbps] | 20,36 | 25,26 | 23,51 | 17,46 | 23,10 | 20,40 |
| | F-Tester [Mbps] | 19,58 | 24,47 | 22,61 | 16,84 | 22,19 | 19,76 |
| | F-Tester s RTT | 19,58 | 24,48 | 22,61 | 16,84 | 22,19 | 19,76 |