



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Stanovení limitů výpadků síťového rozhraní
znemožňujících další zpracování dat**

**Determination of limits for network interface
drop-outs which prevent further data processing**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Robert Bešťák, Ph.D.

Lukáš Vávra

Praha 2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vávra** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **474257**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Stanovení limitů výpadků síťového rozhraní znemožňujících další zpracování dat

Název bakalářské práce anglicky:

Determination of limits for network interface drop-outs which prevent further data processing

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je stanovit kvantitativní ukazatele pro vyřazení záznamů signalizačních dat v mobilní síti z dalšího zpracování. Výpadky záznamů na předávacím rozhraní jsou důsledkem jeho přirozené nestability. Jedná se o stanovení míry a okolností výpadků (čas, území, skupiny SIM, atd.), které představují zásadní zkrácení následných datových analýz.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Martin Sauter. From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. Wiley. 2017.
- [2] Bernhard H. Walke. Mobile Radio Networks: Networking, Protocols and Traffic Performance, 2nd Edition. Wiley. 2002.
- [3] B. Baesens. Analytics in a Big Data World: The Essential Guide to Data Science and its Applications, Wiley. 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Robert Bešťák, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **16.09.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.01.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2022**

Ing. Robert Bešťák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských prací.

V Praze dne 5.1.2021

.....

Lukáš Vávra

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Robertu Bešťákovi, Ph.D. a Bc. Jiřímu Hylmarovi, MBA za dodání datových sad, ochotu, trpělivost, cenné rady a zpětnou vazbu, které mi poskytli během psaní této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou výpadku na rádiovém rozhraní mobilní sítě. V této práci jsou popsány základní principy mobilních sítí, jejich struktura, parametry jednotlivých generací mobilních sítí a metody používané v mobilních sítích. Dále je zkoumáno, jaké mobilní terminály jsou nejvíce náchylné k ovlivnění výpadkem na síťovém rozhraní, který následně znemožňuje další zpracování dat v navazujících analýzách.

Klíčová slova

Celulární mobilní síť, buňka mobilní sítě, mobilní terminál, síťové rozhraní, signalizační zprávy, statistický programovací jazyk R

Abstract

The aim of this bachelor thesis is an analysis of a radio network interface drop-out. In this thesis, basic principles of mobile networks, their structure, parameters of particular generations of mobile networks and methods utilized in mobile networks are described. Furthermore, it is investigated which mobile terminals are most prone to being impacted by a drop-out at the radio network interface, which prevents further data processing in subsequent analyses.

Key words

Cellular mobile network, mobile network cell, mobile terminal, network interface, signaling messages, statistical programming language R

Obsah

Seznam obrázků	1
Seznam tabulek.....	2
Seznam použitých zkratk.....	3
Seznam použitých funkcí	5
1 Úvod.....	6
2 Celulární mobilní síť.....	7
2.1. Tvar buňky	8
2.2. Sektorizace	8
2.3. Clustery	9
2.4. Rozdělení buněk podle velikosti	10
2.5. Topologie celulárních sítí.....	10
2.6. Signalizace v mobilní síti	11
2.7. Základní principy využívané v mobilních sítích	12
2.7.1. Metody vícenásobného přístupu.....	12
2.7.1.1. Metoda TDMA	12
2.7.1.2. Metoda FDMA	12
2.7.1.3. Metoda CDMA.....	12
2.7.1.4. Metoda OFDMA	12
2.7.2. Duplexní spojení	13
2.7.2.1. Spojení TDD	13
2.7.2.2. Spojení FDD.....	13
2.7.3. Digitální modulace signálu.....	14
2.7.3.1. Modulace ASK.....	14
2.7.3.2. Modulace FSK.....	14
2.7.3.3. Modulace PSK.....	14
2.7.3.4. Modulace QAM.....	15
2.8. Generace mobilních sítí.....	16
2.8.1. Mobilní síť první generace (1G)	16
2.8.2. Mobilní síť druhé generace (2G).....	16
2.8.3. Technologie mezi 2G a 3G.....	17
2.8.4. Mobilní síť třetí generace (3G)	17
2.8.5. Mobilní síť čtvrté generace (4G).....	18
2.8.6. Mobilní síť páté generace (5G).....	19
3 Mobilní terminál.....	20
3.1. SIM karta.....	20
3.1.1. Identifikátor IMSI	20
3.1.2. Identifikátor MSISDN	21
4 Zpracování velkých datových objemů.....	22
4.1. Nutnost velkého výpočetního výkonu	22
4.2. Jazyk R	23
5 Charakteristika datových sad	24
5.1. Struktura obdržených datových sad	24
5.2. Identifikační řetězec buňky	25
5.3. Klasifikace buněk a uživatelů dle mobility	25
5.3.1. Klasifikace buněk	26

5.3.2.	Klasifikace uživatelů	26
6	Příprava datových sad k analýze	27
6.1.	Rozšiřování datové sady	27
6.2.	Další úpravy datové sady	27
7	Analýza	29
7.1.	Časový průběh výkyvu	29
7.1.1.	Začátek výkyvu	30
7.1.2.	Regenerace po výkyvu	31
7.2.	Analýza výkyvu z hlediska metody výběru vzorků	31
7.2.1.	Začátek výkyvu	33
7.2.2.	Regenerace po výkyvu	34
7.3.	Analýza výkyvu z hlediska mobility	35
7.3.1.	Změna zaznamenané mobility při výkyvu	35
7.3.1.1.	Změna mobility na úrovni základnových stanic	35
7.3.1.2.	Změna mobility na úrovni buněk	37
7.3.2.	Vliv mobility na přiřazení signifikantních buněk	38
7.3.2.1.	Vliv mobility na přiřazení ranní buňky	40
7.3.2.2.	Vliv mobility na přiřazení denní buňky	41
7.3.2.3.	Vliv mobility na přiřazení večerní buňky	42
7.3.2.4.	Vliv mobility na přiřazení domovské buňky	43
7.4.	Analýza výkyvu z geografického hlediska	44
7.4.1.	Vliv geografického hlediska na přiřazení ranní buňky	48
7.4.2.	Vliv geografického hlediska na přiřazení denní buňky	49
7.4.3.	Vliv geografického hlediska na přiřazení večerní buňky	49
7.4.4.	Vliv geografického hlediska na přiřazení domovské buňky	49
7.5.	Analýza výkyvu z hlediska použitých mobilních sítí	50
7.5.1.	Struktura využívání mobilních technologií	50
7.5.2.	Vliv použitých mobilních technologií na ovlivnění výpadkem	52
7.5.2.1.	Vliv použitých mobilních technologií na ranní buňku	55
7.5.2.2.	Vliv použitých mobilních technologií na denní buňku	56
7.5.2.3.	Vliv použitých mobilních technologií na večerní buňku	57
7.5.2.4.	Vliv použitých mobilních technologií na domovskou buňku	58
7.6.	Shrnutí poznatků z provedených analýz	59
8	Závěr	60
	Seznam použité literatury	61
	Příloha A	64

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Celulární mobilní síť.....	7
Obrázek 2 - Ilustrace nepoužitelnosti kruhového tvaru buněk.....	8
Obrázek 3 - Plochy tvarů v kruhu.....	8
Obrázek 4 - Sektorizace.....	9
Obrázek 5 - Clustery.....	9
Obrázek 6 - Topologie mobilních sítí.....	11
Obrázek 7 - Metody vícenásobného přístupu.....	13
Obrázek 8 - Typy duplexního spojení.....	13
Obrázek 9 - Digitální modulace.....	15
Obrázek 10 - 16-QAM [14].....	15
Obrázek 11 - Struktura IMSI.....	21
Obrázek 12 - Struktura MSISDN.....	21
Obrázek 13 - Rádiové rozhraní.....	24
Obrázek 14 - Struktura záznamu.....	24
Obrázek 15 - Časový průběh výkyvu.....	30
Obrázek 16 - Časový průběh výkyvu zvláště pro hlavní a doplňující datovou sadu.....	33
Obrázek 17 - Změna mobility na úrovni základnových stanic.....	36
Obrázek 18 - Změna mobility na úrovni buněk.....	38
Obrázek 19 - Závislost výkyvu na mobilitě – ranní buňka.....	40
Obrázek 20 - Závislost výkyvu na mobilitě – denní buňka.....	41
Obrázek 21 - Závislost výkyvu na mobilitě – večerní buňka.....	42
Obrázek 22 - Závislost výkyvu na mobilitě – domovská buňka.....	43
Obrázek 23 - Počet technologií využitých během dne.....	50
Obrázek 24 - Průběh vývoje využití druhů mobilních technologií.....	51
Obrázek 25 - Rozložení využívání mobilních technologií.....	52
Obrázek 26 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – ranní buňka.....	55
Obrázek 27 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – denní buňka.....	56
Obrázek 28 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – večerní buňka.....	57
Obrázek 29 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – domovská buňka.....	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Frekvenční pásma pro 2G.....	17
Tabulka 2 - Frekvenční pásma pro 3G.....	18
Tabulka 3 - Frekvenční pásma pro 4G.....	19
Tabulka 4 - Časový průběh výkyvu.....	29
Tabulka 5 - Časový průběh výkyvu – změny ve dnech výkyvu.....	31
Tabulka 6 - Časový průběh výkyvu zvlášť pro hlavní a doplňující datovou sadu.....	32
Tabulka 7 - Výsledky analýzy výkyvu zvlášť pro hlavní a doplňující datovou sadu.....	34
Tabulka 8 - Regenerace po výkyvu – večerní buňka.....	34
Tabulka 9 - Regenerace po výkyvu – ranní buňka.....	35
Tabulka 10 - Změna mobility na úrovni základnových stanic.....	36
Tabulka 11 - Změna mobility na úrovni buněk.....	37
Tabulka 12 - Procentuální úspěšnost přiřazení buněk v závislosti na mobilitě.....	39
Tabulka 13 - Závislost výkyvu na mobilitě – ranní buňka.....	41
Tabulka 14 - Závislost výkyvu na mobilitě – denní buňka.....	42
Tabulka 15 - Závislost výkyvu na mobilitě – večerní buňka.....	43
Tabulka 16 - Závislost výkyvu na mobilitě – domovská buňka.....	44
Tabulka 17 - Výkyv z geografického hlediska – ranní buňka.....	45
Tabulka 18 - Výkyv z geografického hlediska – denní buňka.....	46
Tabulka 19 - Výkyv z geografického hlediska – večerní buňka.....	47
Tabulka 20 - Výkyv z geografického hlediska – domovská buňka.....	48
Tabulka 21 - Počet přiřazených buněk v závislosti na mobilní technologii 1.....	53
Tabulka 22 - Počet přiřazených buněk v závislosti na mobilní technologii 2.....	54
Tabulka 23 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – ranní buňka.....	55
Tabulka 24 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – denní buňka.....	56
Tabulka 25 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – večerní buňka.....	57
Tabulka 26 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – domovská buňka.....	58

Seznam použitých zkratek

1G	1. generace
2G	2. generace
3G	3. generace
4G	4. generace
5G	5. generace
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ASK	Amplitude Shift Keying
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CC	Country Code
CDMA	Code Division Multiple Access
CoMP	Cooperative MultiPoint
ČVUT	České vysoké učení technické
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eMBB	Enhanced Mobile BroadBand
eNB	Evolved Node B
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FSK	Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum-Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HLR	Home Location Register
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IDE	Integrated Development Environment
IMEI	Integrated Mobile Station Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity

IoT	Internet of Things
LTE	Long Term Evolution
MCC	Mobile Country Code
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communication
MNC	Mobile Network Code
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MSIN	Mobile Subscriber Identification Number
MSISDN	Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network Number
MT	Mobile Terminal
NB	Node B
NDC	National Destination Number
NMSI	National Mobile Subscriber Identity
NMTS	Nordic Mobile Telephone System
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PSK	Phase Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephony Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Services
SN	Subscriber Number
TACS	Total Access Communication System
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
uRLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication
VLR	Visitor Location Register
VŠB	Vysoká škola báňská
VŠE	Vysoká škola ekonomická
WDCMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Seznam použitých funkcí

<code>as.data.frame()</code>	Konvertuje proměnnou na objekt typu datový rámeček.
<code>as.character()</code>	Konvertuje proměnnou na textový řetězec.
<code>as.numeric()</code>	Konvertuje proměnnou na číselnou hodnotu.
<code>c()</code>	Vytvoří proměnnou typu vector.
<code>cbind()</code>	Spojí datové rámce vedle sebe.
<code>data.frame()</code>	Vytvoří datový rámeček.
<code>data.table()</code>	Vytvoří datový rámeček (alternativní metoda).
<code>distGeo()</code>	Vypočítá vzdálenost mezi dvěma body podle jejich souřadnic.
<code>fread()</code>	Načte datový rámeček z uložště.
<code>geom_bar()</code>	Vytvoří sloupcový diagram.
<code>geom_line()</code>	Vytvoří graf, kde zobrazované body jsou spojeny křivkou.
<code>geom_point()</code>	Vytvoří graf, kde jsou hodnoty zobrazeny pomocí bodů.
<code>ggplot()</code>	Vytvoří základ grafu, který je poté upřesňován dalšími funkcemi.
<code>grep()</code>	Vrátí souřadnice prvků obsahujících daný textový řetězec.
<code>gsub()</code>	Nahradí danou část textového řetězce jiným textovým řetězcem.
<code>is.na()</code>	Zjistí, zdali je proměnná typu NA.
<code>lapply()</code>	Provede funkci v parametru na každý objekt v listu.
<code>list()</code>	Vytvoří list.
<code>median()</code>	Vypočítá medián souboru číselných hodnot.
<code>merge()</code>	Spojí datové rámce na základě společných sloupců.
<code>names()</code>	Zjistí jména sloupců datového rámce.
<code>nrow()</code>	Zjistí počet řádků datového rámce.
<code>order()</code>	Seřadí prvky souborů podle zadaných parametrů.
<code>paste0()</code>	Spojí více textových řetězců do jednoho bez přidání mezery.
<code>rbind()</code>	Spojí datové rámce pod sebe.
<code>sapply()</code>	Provede danou funkci na každý objekt v listu pro určený typ výstupu.
<code>subset()</code>	Vytvoří datový rámeček odebráním určitých sloupců.
<code>substr()</code>	Nahradí, nebo extrahuje část textového řetězce.
<code>sum()</code>	Zjistí součet souboru číselných hodnot.
<code>table()</code>	Zjistí tabulku četností výskytů hodnot v souboru.
<code>transpose()</code>	Transponuje datový rámeček, či jiný objekt.
<code>unique()</code>	Vrátí všechny hodnoty, které se v souboru vyskytují aspoň jednou.
<code>which()</code>	Zjistí souřadnice prvků souboru podle zadaného parametru.
<code>which.max()</code>	Zjistí souřadnice prvku s nejvyšší hodnotou.

1 Úvod

Člověk v dnešní době využívá v mnohem větší míře elektronických komunikačních zařízení, než tomu bylo v minulých desetiletích. Pro člověka se tato komunikační zařízení stala neodmyslitelnou součástí každodenního života. Jelikož se tato zařízení objevují a mají využití téměř ve všech odvětvích lidské činnosti, je zřejmé, že se počet těchto zařízení i jejich uživatelů bude neustále zvyšovat.

Příkladem takového komunikačního zařízení je mobilní terminál, elektronické zařízení, které prošlo od svého uvedení na trh v minulém století enormním vývojem. Ze zařízení, které sloužilo pouze k volání, se stal multifunkční přístroj nabízející široké množství služeb, které ovšem potřebují ke svému správnému fungování síťové připojení.

Velké množství komunikačních zařízení je jeden z důvodů, proč je nemyslitelné se obejít bez bezdrátových sítí, které jsou využívány nejen přímo zařízeními, která slouží k mezilidské komunikaci, nýbrž jsou i využívány autonomními zařízeními ke komunikaci mezi sebou, např. v oblasti IoT. Zmíněný rychlý vývoj těchto zařízení a nové služby, které nabízejí, kladou vysoké nároky na technologie bezdrátových sítí, které mimo jiné musí reagovat na stále se zvyšující přenášený datový objem a musí být tak schopné zajistit adekvátní přenosovou rychlost.

V této práci jsou vysvětleny základy fungování celulárních mobilních sítí, jejich struktura, principy využívané v těchto sítích a jsou zde popsány parametry všech doposud vyvinutých generací mobilních sítí. Zmíněné sítě ovšem nejsou bezchybné a objevují se v nich občasné výpadky. Práce se zabývá právě analýzou výpadku na předávacím rozhraní a jeho vlivem na další zpracování dat ze signalizačních zpráv mobilních terminálů.

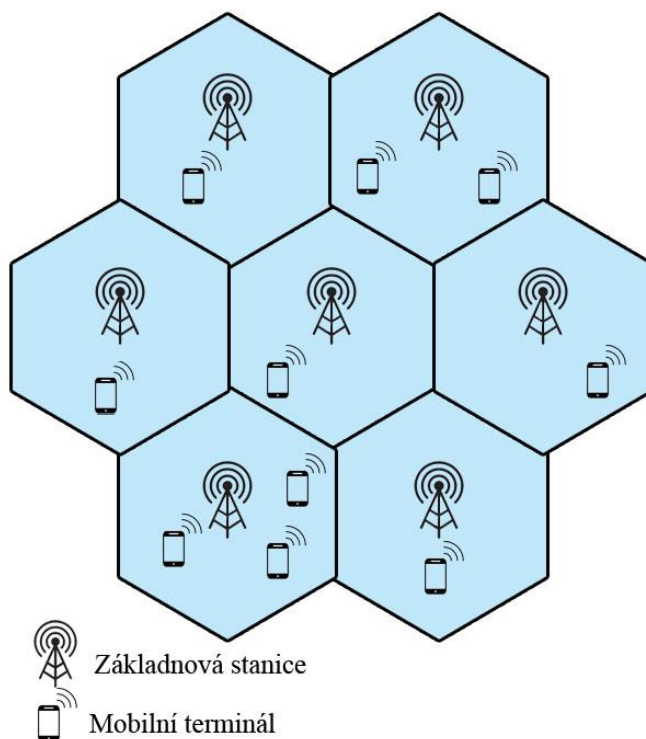
Analyzované datové sady jsou založeny na záznamech ze signalizačních dat z rádiového rozhraní mobilní sítě. Tyto datové sady pocházejí ze společného projektu více univerzit, (konkrétně ČVUT, VŠB – Technické univerzity Ostrava a VŠE), který se právě analýzou dat z rádiového rozhraní zabývá. Je nutné zmínit, že obdržené datové sady se záznamy signalizačních dat již byly pro účel této práce předzpracovány v předešlých částech výše zmíněného projektu.

Cílem této práce, která je dílčí částí této spolupráce výše zmíněných univerzit, je nalézt vzorec v obdržených datových sadách, který by objasňoval původ neúplných nebo případně chybných záznamů, které limitují následné zpracování dat pro další účely, například klasifikaci uživatelů mobilních terminálů podle jejich mobility ve zkoumaných dnech.

2 Celulární mobilní síť

K propojení moderních komunikačních zařízení jsou využívány tzv. mobilní sítě. V těchto sítích není koncový terminál vázaný na pevnou přípojku, a může se tedy volně pohybovat. Základním principem fungování těchto sítí, který umožňuje kvalitní pokrytí obsluhovaného území, je rozdělení daného území na dílčí oblasti, tzv. buňky. Z rozdělení území na buňky (anglicky *cells*) je odvozen název buňkové, případně celulární mobilní sítě [1], [2].

Základním prvkem struktury celulárních mobilních sítí jsou systémy vysílačů a přijímačů, tzv. základnové stanice, ke kterým se připojují uživatelské terminály (*mobile station* neboli *mobile terminal*, MS, reps. MT) [3]. Pro základnovou stanici se v souvislostech se sítěmi 2. generace užívá zkratka BTS (*base transceiver station*). V 3. generaci mobilních sítí se základnová stanice označuje písmeny NB (*node B*) a ve 4. generaci mobilních sítí je pro základnovou stanici zaveden pojem eNB (*evolved node B*) [2].

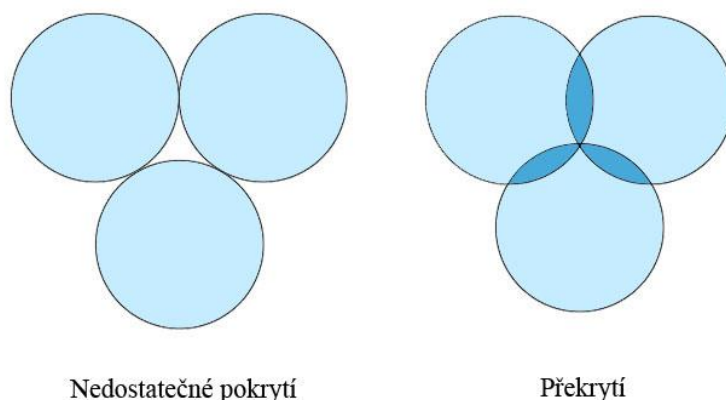


Obrázek 1 - Celulární mobilní síť.

Na obrázku 1 je zobrazena struktura základní celulární mobilní sítě. Ve středu každé buňky sítě se nachází základnová stanice, která obsluhuje mobilní terminály vyskytující se na území této buňky. Základnové stanice jsou mezi sebou propojeny nejčastěji optickými vlákny, anebo pomocí elektromagnetických vln a slouží jako zprostředkovatelé spojení mezi mobilními terminály ať už v té samé buňce, nebo mezi terminály nacházejícími se v různých buňkách [4].

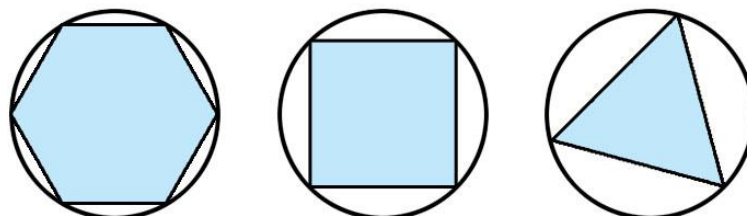
2.1. Tvar buňky

Při výběru tvaru buňky přichází z důvodu charakteristiky všesměrových antén jako první v úvahu tvar kruhu. Kruhy je ovšem nemožné zcela pokrýt obsluhovanou oblast bez toho, aniž by se plochy buněk překrývaly. Příklad je ilustrován na obrázku 2.



Obrázek 2 - Ilustrace nepoužitelnosti kruhového tvaru buněk.

Je tedy nutné použít jiný tvar buňky, a to takový, který má vlastnost teselace, tedy schopnost vyplnění plochy bez překryvu a bez mezer. V úvahu připadají tři možnosti: rovnostranný trojúhelník, čtverec a pravidelný šestiúhelník. Při rozhodování, který tvar je nejvhodnější, se berou v potaz plochy jednotlivých útvarů vzhledem z ploše kruhu [5].

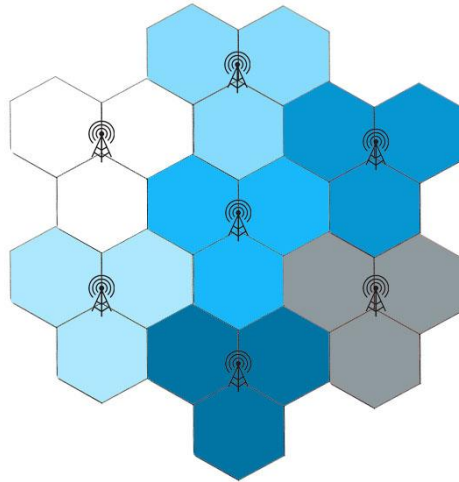


Obrázek 3 - Plochy tvarů v kruhu.

Jelikož pokrývá šestiúhelník největší plochu z kruhu (83 %), jak je vidět na obrázku 3, je tedy jako tvar buňky mobilní sítě používán právě šestiúhelník. Čtverec pokrývá 64 % kruhu a trojúhelník jen 41 %. Vypočtené hodnoty byly převzaty z [5].

2.2. Sektorizace

Pokud by byla struktura z obrázku 1 využívána k pokrytí rozsáhlé oblasti, znamenalo by to nutnost velkého množství základnových stanic, a tedy i velkých finančních nákladů při jejich výstavbě. Tento problém řeší koncept sektorizace, díky němuž je možné výrazně zredukovat počet potřebných základnových stanic [1].

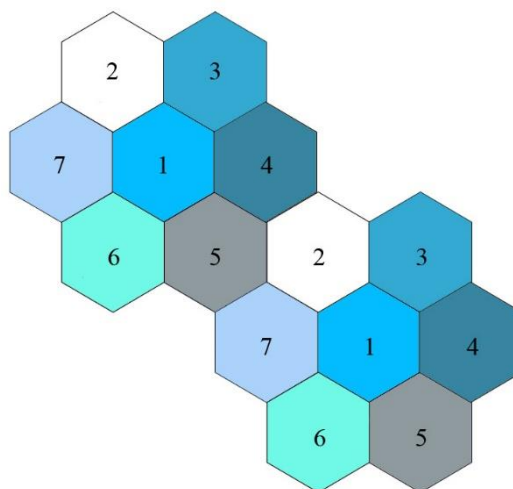


Obrázek 4 - Sektorizace.

Princip sektorizace je ilustrován na obrázku 4. Namísto umístění základnové stanice se všesměrovou anténou do středu každé buňky lze umístit základnovou stanici na hranici jednotlivých buněk a na ní implementovat pro každou buňku směrovou anténu. Jedna základnová stanice je potom schopna obsluhovat více buněk, a proto je možné výrazně snížit počet základnových stanic. Toto sdružení více buněk pod jednu základnovou stanici se nazývá sektor [1]. Je vhodné zmínit, že na jedné základnové stanici se nemusí vyskytovat pouze anténa jedné technologie, nýbrž je možné a obvyklé, že se na jedné základnové stanici vyskytují antény více generací mobilních sítí (GSM, UMTS, LTE atd.)

2.3. Clustery

Mobilní síť smí působit pouze v relativně malé části frekvenčního spektra. Není tedy možné, aby každá buňka využívala unikátní frekvenční spektrum. Z tohoto důvodu byl vyvinut v sítích druhé generace koncept opakovaného využívání frekvencí (*frequency reuse*), který tento problém řeší [5]. Princip je vyjádřen na obrázku 5.



Obrázek 5 - Clustery.

Každé buňce ze skupiny buněk jsou přiděleny komunikační kanály, které jsou odlišné od kanálů využívaných v ostatních buňkách skupiny. Tato skupina buněk, kde každá z buněk má alokovanou unikátní sadu kanálů, se nazývá cluster. V clusteru tedy nemůže docházet k mezikanálové interferenci, jelikož se v něm nevyskytují kanály se shodnými frekvencemi [6].

Cluster je základním prvkem při opakovaném využívání frekvencí. Při dodržení podmínek dostatečné vzdálenosti k omezení interference lze cluster i s v něm využívanými kanály duplikovat, a tak pokrýt dané území [5].

V sítích 3. generace a vyšších se nevyužívá slučování buněk do clusterů na základě *frequency reuse*, nýbrž je slučování buněk do clusterů založeno na přidělení unikátní kódové sekvence každé buňce clusteru.

2.4. Rozdělení buněk podle velikosti

Jednotlivé buňky jsou rozlišovány podle velikosti na několik druhů. Nejmenším druhem buňky je takzvaná femtobuňka. Femtobuňka pokrývá plochu o poloměru v řádech maximálně několika metrů a využívá v místech se zhoršenou propagací signálu, jako jsou například kanceláře. Buňky o poloměru v řádech několika desítek metrů jsou nazývány pikobuňky. Využívají se na úrovni pokrytí budovy. Větší poloměr v řádu stovek metrů mají mikrobunčky, které jsou určeny primárně pro pomaleji se pohybující uživatele (například chodci nebo řidiči v pomalém provozu) v městské aglomeraci a hustě osídlených oblastech. Dalším typem jsou makrobunčky. Makrobunčky jsou buňky o poloměru několika kilometrů, které se používají v řídké osídlených oblastech. Posledním typem jsou satelitní buňky, které poskytují spojení v místech, kde není terestriální pokrytí možno zavést. Kvalita pokrytí satelitních buněk je závislá na poloze družice vysílající a přijímající signál [1].

2.5. Topologie celulárních sítí

Aby bylo umožněno uživatelům komunikovat mezi sebou a využívat služby mobilních sítí, i když se nacházejí v rozdílných buňkách, byl vyvinut systém propojení jednotlivých buněk. Tato architektura se skládá z těchto hlavních komponentů [5]:

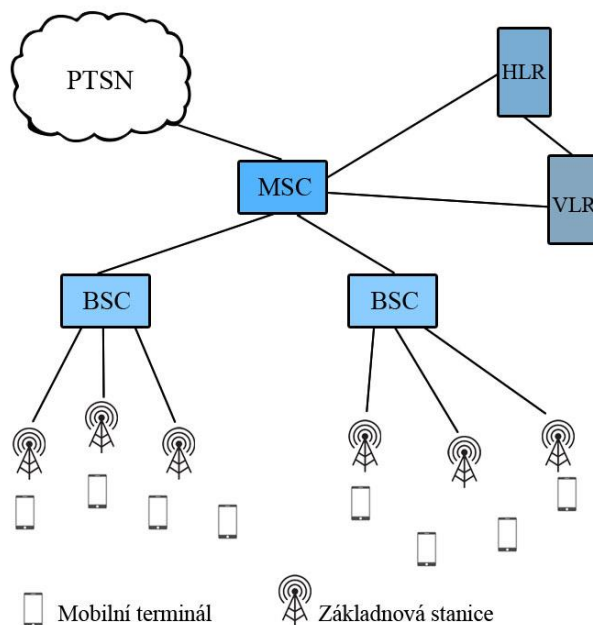
- z veřejné telefonní sítě (*public switched telephony network*, PSTN),
- z ústředny mobilní telefonní sítě (*mobile switching center*, MSC),
- z ovladačů základnových stanic (*base station controller*, BSC),
- ze základnových stanic (*base transceiver station*, BTS) a
- z mobilních terminálů (*mobile terminal* neboli *mobile station*, MT, resp. MS).

Veřejná telefonní síť (PSTN) je struktura zahrnující všechny telefonní sítě po celém světě. Zahrnuje jak síť sloužící ke komunikaci na lokální úrovni, tak i síť zajišťující propojení zařízení na velmi velké vzdálenosti [7].

Ústředny mobilních telefonních sítí (MSC) zajišťují připojení koncových uživatelů do veřejné telefonní sítě [5]. K MSC jsou také připojeny dva registry uživatelů, a to domovský registr (*home location register*, HLR) a návštěvnický registr (*visitor location register*, VLR). První jmenovaný obsahuje centrální databázi všech zařízení a informací o nich, jako např. identifikační kódy IMSI nebo MSISDN atd. Zatímco registr HLR je centrální a různé

MSC ho tedy sdílí, ke každé ústředně MSC náleží vlastní registr VLR, který obsahuje pouze informace o uživateli patřících v daném momentu k příslušné MSC. Data uložená v tomto registru jsou tedy jen dočasná a aktualizují se pokaždé, když dané zařízení opustí zónu své MSC [8].

Ovladače základnových sítí (BSC) ovládají a sdružují několik BTS z důvodu efektivnější komunikace [5]. Funkce základnových stanic (BTS) a mobilních terminálů (MS) byla objasněna v předchozích sekcích kapitoly 2. Obrázek 6 znázorňuje schéma topologie mobilních sítí.



Obrázek 6 - Topologie mobilních sítí.

2.6. Signalizace v mobilní síti

Hlavním úkolem signalizace v mobilní síti je vyměňování informací mezi entitami mobilní sítě za účelem zajištění vysoké kvality a fungování komunikace v mobilní síti. Signalizace funguje na základě posílání signalizačních zpráv mezi entitami mobilní sítě. Tyto zprávy obsahují informace, které jsou využívány jak ke správě sítě jako takové, tak i k vytváření, udržování a následně i ukončení spojení mezi zařízeními v mobilní síti. Neslouží tedy přímo ke komunikaci koncových uživatelů mobilní sítě. Tyto zprávy jsou mezi zařízeními posílány pravidelně neohledně na aktivitu uživatele daného zařízení. Běžný uživatel nemá k těmto zprávám přístup [3].

Signalizace v telekomunikaci se dělí účastnickou signalizací a síťovou. Účastnická signalizace probíhá mezi mobilním terminálem a základnovou stanicí, tedy na účastnickém okruhu, zatímco síťová signalizace probíhá mezi samotnými základnovými stanicemi [3].

2.7. Základní principy využívané v mobilních sítích

Během vývoje mobilních sítí vznikly metody, jak uspokojit potřeby velkého množství uživatelů a zajistit tak dostatečnou kvalitu připojení k síti a zároveň zvládat čím dál větší datový tok. Některé z těchto metod jsou popsány v této kapitole.

2.7.1. Metody vícenásobného přístupu

Jelikož v jedné buňce náleží velké množství mobilních terminálů k té samé základnové stanici, je nezbytně nutné zajistit možnost připojení více terminálů k dané základnové stanici v jeden časový okamžik. Aby se zabránilo kolizím při přenosu, a tedy i ztrátám přenášené informace, byly vyvinuty tzv. metody vícenásobného přístupu (angl. *multiple access*), které umožňují více terminálům využívat funkce základnové stanice simultánně [5].

2.7.1.1. Metoda TDMA

Vícenásobný přístup časovým dělením (*time division multiple access*, TDMA) je první z metod vícenásobného přístupu. Při využívání této metody více zařízení sdílí jednu nosnou frekvenci. Každému zařízení je ovšem přiděleno časové okno, ve kterém může vysílat informaci. Mimo toto okno daný terminál nemá povoleno nic vysílat, jelikož by docházelo ke kolizi s jinými terminály. Po ukončení vysílání informace je vysílací okno přidělené zmíněnému terminálu uvolněno a následně může být přiděleno jinému terminálu, který o něj zažádá [5], [9]. Princip je zobrazen na obrázku 7.

2.7.1.2. Metoda FDMA

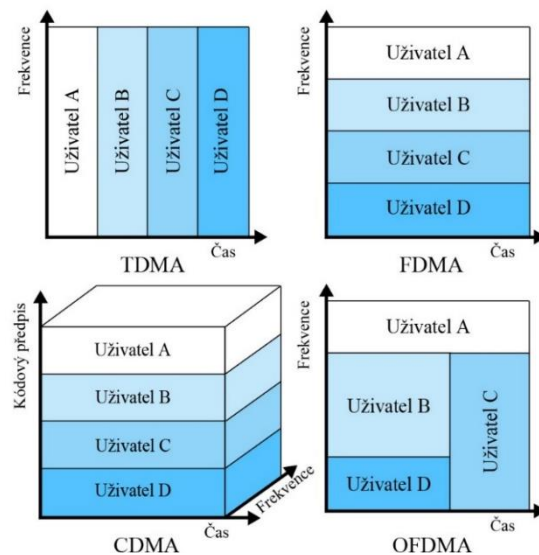
Při aplikaci vícenásobného přístupu frekvenčním dělením (*frequency division multiple access*, FDMA) je rozděleno využívané frekvenční pásmo na více kanálů, jež jsou přiděleny terminálům. Terminály tedy vysílají simultánně, k přenosu informaci ovšem využívají jiných nosných frekvencí. Analogicky k metodě TDMA dojde po ukončení vysílání uvolnění kanálu a ten může být přidělen jinému terminálu [5], [9]. Princip je ilustrován na obrázku 7.

2.7.1.3. Metoda CDMA

Vícenásobný přístup kódovým dělením (*code division multiple access*, CDMA) přiděluje každému kanálu unikátní kódový předpis. Na straně přijímače je informace rozkódována a původce zprávy rozpoznán na základě znalosti daného kódového předpisu. Není tedy nutné rozdělovat frekvenční pásmo na další kanály ani vytvářet časové sloty. Více terminálů může vysílat simultánně přes celé frekvenční pásmo [1], [5], [9]. Obrázek 7 graficky přibližuje tuto metodu.

2.7.1.4. Metoda OFDMA

Metoda OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*) je kombinací metod TDMA a FDMA a je to v dnešní době nejčastěji využívaný způsob vícenásobného přístupu. Dostupné zdroje pro přenos jsou rozděleny do několika kanálů a zároveň jsou vytvořena i časová okna pro přenos [1], [10]. Princip je ilustrován na obrázku 7.



Obrázek 7 - Metody vícenásobného přístupu.

2.7.2. Duplexní spojení

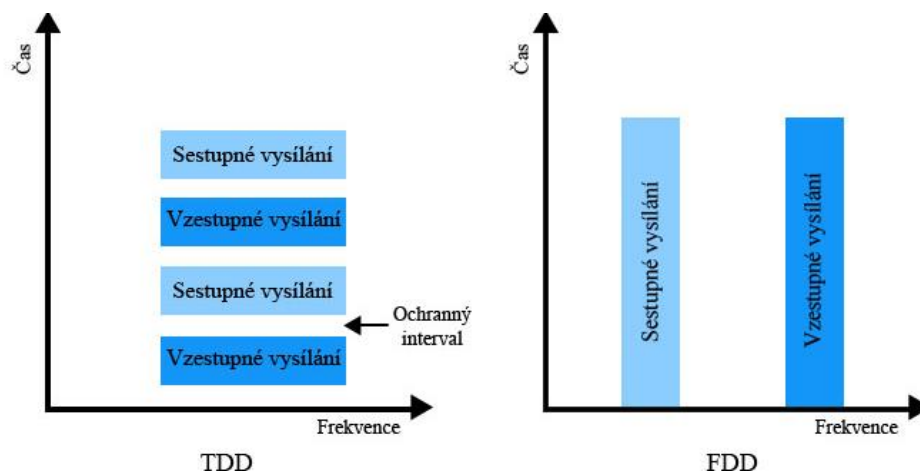
Komunikace v mobilních sítích by nemohla efektivně fungovat bez tzv. duplexního spojení. Jedná se o spojení dvou zařízení, při kterém spolu zařízení komunikují současně.

2.7.2.1. Spojení TDD

V případě duplexního spojení s časovým dělením (*time division duplex*, TDD) je využívána tatáž nosná frekvence jak pro vzestupné, tedy uplink vysílání (tj. od terminálu k základnové stanici), tak i pro sestupné, tedy downlink vysílání (tj. od základnové stanice k terminálu). Ovšem spojení je rozděleno na časová okna, která jsou přiřazena vždy pouze jednomu směru přenosu [11]. To znamená, že v jeden okamžik může vysílat pouze jedno zařízení. Princip je zobrazen na obrázku 8.

2.7.2.2. Spojení FDD

Druhým způsobem duplexního spojení je spojení s frekvenčním dělením (*frequency division duplex*, FDD). U této metody se využívají různé nosné frekvence pro uplink a downlink [11]. Princip je opět zobrazen na obrázku 8.



Obrázek 8 - Typy duplexního spojení.

2.7.3. Digitální modulace signálu

Modulace je proces konvertování dat do takové formy signálu, který je optimalizovaný k přenosu prostředím. Dochází k použití přenášených dat jako modulačního signálu, který je modulován na nosnou vlnu a ovlivňuje nějakou z jejích vlastností (amplitudu, frekvenci, anebo fázi).

Modulovaná nosná vlna má většinou mnohem vyšší frekvenci než přenášená data, a to z několika důvodů. Při vyšších frekvencích nedochází k takovým útlumům jako na frekvencích nižších. Vyšší frekvence zároveň umožňují konstruovat menší antény, jelikož velikost antény je závislá na vlnové délce přijímaného signálu, což by bez modulace vedlo k enormním velikostem antén. Zároveň je vlna o vyšší frekvenci schopna pojmout větší množství energie [5], [12].

Modulační techniky mohou být rozděleny na dvě základní kategorie: na analogové a digitální. Nicméně analogové se v dnešní době v mobilních sítích již nepoužívají, zcela je nahradily modulace digitální, které svými vlastnostmi umožňují mnohem vyšší přenosovou rychlost. Digitální modulační technikou se rozumí modulace diskrétního signálu na nosnou vlnu o vysoké frekvenci [13].

2.7.3.1. Modulace ASK

První z technik digitální modulace je klíčování amplitudou (*amplitude shift keying*, ASK). Jedná se o nejjednodušší digitální modulaci. Amplituda nosné vlny se mění v závislosti na hodnotách přenášených bitů. Často je použit princip takový, že nulové hodnotě bitu odpovídá nulová amplituda nosné vlny a jednotková hodnota bitu amplitudu vlny nezmenšuje ani nezvětšuje. Mohou být ovšem použity i jiné poměry změn amplitudy nosné vlny [5], [13]. Princip ASK je vyjádřen na obrázku 9.

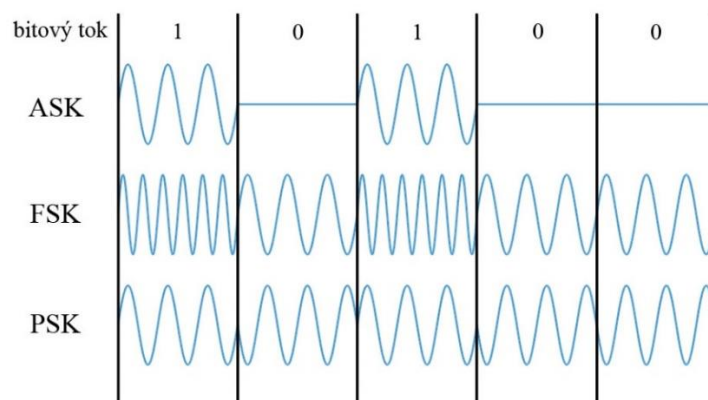
2.7.3.2. Modulace FSK

Dalším typem digitální modulace je klíčování frekvencí (*frequency shift keying*, FSK). V tomto případě rozdílné hodnoty bitů ovlivňují frekvenci nosné vlny. Pro bit s hodnotou 0 je přiřazena jiná frekvence nosné vlny než pro bit s hodnotou 1 [5], [13]. Obrázek 9 zobrazuje princip této modulace.

Speciální variantou FSK je *Gaussian minimum-shift keying* (GMSK). Tato modulace je využívána v sítích 2G [5].

2.7.3.3. Modulace PSK

Klíčování fází (*phase shift keying*, PSK) je typem digitální modulace, který ovlivňuje a mění fázi nosné vlny podle hodnoty bitu přenášených dat. Pro nulový bit se mění fáze frekvence na jinou hodnotu než v případě bitu s hodnotou 1 [5], [13]. Tímto způsobem se dají kódovat nejen samotné bity, ale i skupiny bitů. Vznikají tak např. modulace QPSK, 8-PSK apod. Princip základní modulace PSK je opět zobrazen na obrázku 9.

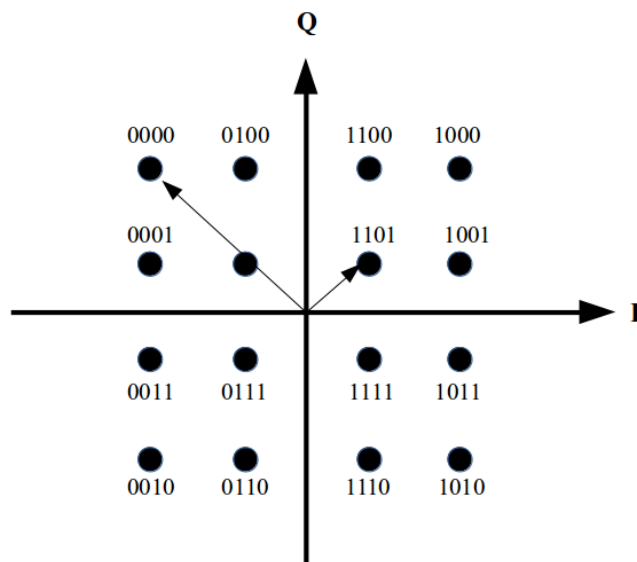


Obrázek 9 - Digitální modulace.

2.7.3.4. Modulace QAM

Kombinací modulací ASK a PSK vzniká tzv. kvadrurní amplitudová modulace (*quadrature amplitude modulation*, QAM). Touto modulací se kódují větší skupiny bitů, čímž lze docílit větší přenosové rychlosti než u jiných druhů modulace.

Modulace QAM jsou popsány konstelačními diagramy, tj. diagramy, ve kterých jsou zobrazeny stavy QAM modulace. Vzdálenost stavu od středu konstelačního diagramu určuje velikost amplitudy nosné vlny a úhel odklonu stavu od osy I určuje fázi nosné vlny. Každý stav modulace je přiřazen k určité skupině bitů, a tudíž má každá skupina bitů určené unikátní parametry nosné vlny [14].



Obrázek 10 - 16-QAM [14].

V příkladu na obrázku 10 jsou kódovány skupiny 4 bitů, dohromady se v diagramu nachází 16 stavů, a proto se jedná o modulaci 16-QAM.

2.8. Generace mobilních sítí

Od počátku vývoje technologií zajišťujících mobilní komunikaci se neustále objevovaly a objevují nové a vyšší požadavky na tyto technologie. Technologie mobilních sítí proto procházely a stále procházejí neustálým intenzivním vývojem a vznikly tak různé generace mobilních technologií. Každá z generací mobilních sítí zastupuje koncepty a technologie, které v době svého vzniku znamenaly velký pokrok a umožnily vznik nových, do té doby neznámých služeb.

2.8.1. Mobilní síť první generace (1G)

V technologiích předcházejících technologiím první generace se spoléhalo na základnové stanice se silnými vysílači, které se snažily o přenos signálu do co největší vzdálenosti. Tato vzdálenost se pohybovala až kolem 50 mil, tj. zhruba 80 km. Zároveň bylo pouze malé množství kanálů, tudíž pravděpodobnost obsazenosti sítě, a tedy nemožnosti uskutečnit hovor byla relativní vysoká [5].

Revoluční změnou, která se objevila v první generaci, bylo zavedení buňkového konceptu sítě, který tento problém řešil. První generace mobilních sítí byly uvedeny do provozu na přelomu 70. a 80. let 20. století [15]. Systémy první generace ještě používaly méně vyspělé analogové modulace a pracovaly ve frekvenčním pásmu v okolí 800 MHz a 900 MHz. Co se týče metody vícenásobného přístupu, byl používán princip frekvenčního dělení FDMA [16]. Tyto systémy se využívaly výhradně pro přenos hlasu.

Mezi nejpopulárnější systémy řazené do první generaci patří [5]:

- *Nordic Mobile Telephone System* (NMTS), který se začal používat v roce 1981 ve Skandinávii, a nakonec se rozšířil do více než 30 zemí. Využíval frekvenční pásma kolem 450 MHz a následně i kolem 900 MHz.
- *Advanced Mobile Phone System* (AMPS) vyvinutý v USA, který pracoval v pásmu v rozmezí 824 and 894 MHz.
- *Total Access Communication System* (TACS), který byl původem z Velké Británie a byl založen na standardech AMPS.

2.8.2. Mobilní síť druhé generace (2G)

Na počátku 90. let 20. století se začaly objevovat sítě splňující požadavky standardů druhé generace mobilních sítí. Nástup druhé generace znamenal revoluci v mobilní komunikaci. Technologie první generace využíval pouze omezený počet lidí, zatímco technologie druhé generace jsou dodnes využívány stovkami milionů uživatelů po celém světě. Z nichž nejznámější je *Global System for Mobile Communication* (GSM), která stále zůstává nejvyužívanější technologií mezi uživateli mobilních sítí [1], [5], [17].

GSM jako první nastavil společný standard pro bezdrátovou komunikaci v Evropě a díky svému úspěchu se rozšířil do celého světa. Jako první standard na světě představil službu *short message services* (SMS) nebo hlasovou schránku. Standard GSM také zahrnuje služby jako e-mail, tedy přístup k elektronické poště, dále bankovní a informační služby. V této generaci byl také představen roaming, tedy možnost používání jednoho mobilního terminálu v sítích více států [1], [3].

Vícenásobný přístup je v GSM založen na metodě TDMA a přenosová rychlost se pohybuje kolem 14.4 kbps. V druhé generaci mobilních sítí je využívána digitální modulace GMSK [17].

Co se týče frekvenčního spektra, GSM využívá dvě pásma o šířce 25 MHz, která jsou dále rozdělena do 125 kanálů. Pro uplinkové spojení se využívá pásmo 890-915 MHz a pro downlinkové spojení pásmo 935-960 MHz [17].

Z důvodu velkého úspěchu GSM se stalo zjevným, že kapacity tohoto systému nemohou uspokojit zvyšující se zájem o tuto technologii, a proto byla pro GSM alokována další dvě pásma o velikosti 75 MHz. Tato pásma se nacházejí na frekvencích 1710-1785 MHz pro uplink a 1805-1880 MHz pro downlink [17]. Frekvenční pásma jsou shrnuta v tabulce 1.

Typ pásma	Pásmo pro uplink	Pásmo pro downlink
GSM 900	890 – 915 MHz	935 – 960 MHz
GSM 1800	1710 – 1785 MHz	1805 – 1880 MHz

Tabulka 1 - Frekvenční pásma pro 2G.

2.8.3. Technologie mezi 2G a 3G

Se stoupajícím zájmem o technologie GSM a o služby orientované na vyšší datové toky naráželi uživatelé na limitovanou přenosovou rychlost pouze 14.4 kbps. Výraznější zvýšení přenosové rychlosti nabízely až technologie jako např. *High Speed Circuit Switched Data* (HSCSD), *General Packet Radio Service* (GPRS) nebo *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE). Tyto technologie ovšem nesplňovaly požadavky na síť třetí generace, proto jsou někdy označovány jako technologie 2.5G pro GPRS, případně 2.75G pro EDGE [1].

HSCSD dokázalo zvýšit přenosovou rychlost na 115 kbps, zatímco technologie GPRS zvýšila přenosovou rychlost až na 171 kbps. V GPRS se na rozdíl od HSCSD začalo využívat konceptu *packet switching*, kdy jsou posílána data rozdělena do paketů, které jsou pak sítí navigovány k příjemci různými cestami nezávisle na sobě podle stavu a vytížení sítě [1], [17].

K dalšímu zvýšení přenosové rychlosti došlo v technologii EDGE, a to až na hodnotu kolem 400 kbps. Novinkou zakomponovanou do EDGE byl také systém kódování 8-PSK, který je až třikrát účinnější než GMSK [1], [17].

2.8.4. Mobilní síť třetí generace (3G)

Za nejúspěšnější technologii, která splňuje specifikace třetí generace mobilních sítí, se považuje *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS). Ta začala být implementována na začátku 21. století a nabídla uživatelům množství nových služeb a možností. Nabídla například přístup k prohlížení internetových stránek, sledování živého videopřenosu nebo připojení se k více službám najednou. Uživatel mohl například stahovat složku z uložiště během sledování videa na internetu apod [1], [3], [5].

Přenosová rychlost se v 3G sítích pohybuje přes 2 Mbps (pro nepohyblivé zařízení). Pro pomalu se pohybující zařízení musí síť třetí generace zaručit přenosovou rychlost minimálně 384 kbps a pro rychle se pohybující zařízení alespoň 144 kbps. Metoda

vícenásobného přístupu časovým dělením (TDMA) byla v sítích třetí generace nahrazena metodou *wideband code division multiple access* (WDCMA), pokročilejší metodou CDMA, která podporuje jak duplexní přístup TDD, tak i duplexní přístup FDD [3].

Využívané frekvenční spektrum UMTS je vyjádřeno tabulkou 2 [3]. Tabulka uvádí kmitočtová pásma pro Evropu, v USA se pásma liší. UMTS využívající FDD má výrazně širší pásma, jelikož metoda FDD je ve třetí generaci sítí upřednostňována před metodou TDD.

Typ pásma	Pásmo pro uplink	Pásmo pro downlink
UMTS – TDD	1900 – 1920 MHz	2010 – 2025 MHz
UMTS – FDD	1920 – 1980 MHz	2110 – 2170 MHz
UMTS – satelit	1980 – 2010 MHz	2170 – 2200 MHz

Tabulka 2 - Frekvenční pásma pro 3G.

Na UMTS navazuje technologie *High-speed Downlink Packet Access* (HSDPA). Tato technologie vylepšuje parametry připojení od základnové stanice k uživateli. Tento upgrade v sobě zahrnoval nové koncepty jako například adaptivní modulace a kódování, kdy se volí typ modulace na základě vzdálenosti zařízení od základnové stanice (větší vzdálenost určuje jednodušší kódování) nebo rychlé plánování datových přenosů, kdy základnová stanice sleduje požadavky všech připojených zařízení a dynamicky poskytuje nejvyšší kvalitní kanál zařízením s nejnáročnějšími požadavky. Dále je zde využíván vylepšený koncept přeposílání chybných paketů, tzv. *hybrid automatic repeat request* (HARQ). Analogicky vznikla i technologie *High-speed Uplink Packet Access* (HSUPA), která vylepšuje parametry připojení od mobilního terminálu k základnové stanici [1].

2.8.5. Mobilní sítě čtvrté generace (4G)

Sítě čtvrté generace reagují na nové nároky uživatelů a čím dál větších datových přenosů. Jde o sítě praktikující koncept *packet switching* založený na IP protokolu. Sítě mohou být implementovány technologiemi *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) a *Long Term Evolution* (LTE), respektive LTE-Advanced, jelikož samotná verze LTE ještě nesplňuje kompletně požadavky na síť 4G. Ovšem často se pro technologii LTE-Advanced používá pouze zkratka LTE. Nutno také podotknout, že technologie WiMAX v konkurenci LTE neuspěla a postupně se od ní upouští [1], [5], [17].

4G nabízí rychlost datového přenosu až 1 Gbps pro nepohybující se zařízení a až 100 Mbps pro pohybuující se zařízení. Využívá komplexních modulací až do 64-QAM v závislosti na vzdálenosti terminálu od základnové stanice. Pro vícenásobný přístup je použita metoda *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA) [1], [17].

Co se týče nových konceptů, ve čtvrté generaci mobilních sítí se objevuje např. *multiple input multiple output* (MIMO) – paralelní přenos signálu k terminálu z více antén nebo princip *cooperative multipoint* (CoMP) [1].

V tabulce 3 podle [24] jsou shrnuta pásma, která jsou využívána pro technologie 4G. Je využíváno pět dvojic pásem, a to 800, 900, 1800, 2100 a 2600MHz. Ovšem pásmo kolem 900 MHz je stále primárně využíváno pro technologie GSM a pásmo kolem 2100 MHz se stále primárně používá pro UMTS.

Typ pásma	Pásmo pro uplink	Pásmo pro downlink
LTE 800 (FDD)	832 – 862 MHz	791 – 821 MHz
LTE 900	882 – 885 MHz	927 – 930 MHz
LTE 1800 (FDD)	1710 – 1785 MHz	1805 – 1880 MHz
LTE 2100 (FDD)	1920 – 1980 MHz	2110 – 2170 MHz
LTE 2600 (FDD)	2500 – 2570 MHz	2620 – 2690 MHz
LTE 2600 (TDD)	2570 – 2595 MHz	2595 – 2620 MHz

Tabulka 3 - Frekvenční pásma pro 4G.

2.8.6. Mobilní sítě páté generace (5G)

V dnešní době jsme na počátku implementace sítí 5G. Ty plynule navazují na předchozí generaci a mají vyšší přenosovou rychlost (až 10 Gbps), nižší latenci (1 ms mezi koncovými zařízeními) a větší přenosovou kapacitu. Počítá se v nich s modulacemi až do hodnoty 256-QAM [5].

Je vyžadováno, aby sítě 5G dokázaly poskytnout dostatečné zdroje pro následující koncepty komunikace [18]:

- *massive machine type communication* (mMTC), ve které bude v síti připojeno velké množství autonomních zařízení, např. IoT, chytré budovy atd.
- *enhanced mobile broadband* (eMBB), při kterém je důležitá konstantní vysoká přenosová rychlost, např. streamování videa atd.
- *ultra-reliable and low-latency communication* (uRLLC), kde je kladen velký důraz na spolehlivost a rychlou odezvu, např. autonomní vozidla atd.

3 Mobilní terminál

Velkým vývojem kromě mobilních sítí prošly i mobilní terminály, tedy zařízení, která jsou dnes vlastněna miliardami uživatelů. Na počátku 80. let minulého století, kdy první mobilní terminály vznikaly, bylo obtížné sestavit všechny elektrické komponenty tak, aby samotné zařízení bylo přenosné. Od té doby se ale vývoj elektronických součástek velmi posunul a jejich rozměry již nejsou tím limitujícím faktorem. Dnes velikost mobilních terminálů převážně ovlivňují požadované rozměry prvků uživatelského rozhraní, jako je např. displej, popř. klávesnice [17].

Dříve se mobilní terminály používaly převážně k uskutečňování hovorů a s příchodem GSM k posílání SMS zpráv. Od té doby se mobilní terminály vyvinuly v univerzální multifunkční zařízení s mnoha různými funkcemi a komponenty jako např. fotoaparát, navigace apod. [17].

Každý mobilní terminál má přiřazené své vlastní identifikační číslo, které se nazývá *international mobile station equipment identity* (IMEI). Toto číslo je unikátní pro každé zařízení, slouží tedy k jednoznačné identifikaci daného zařízení v síti [19].

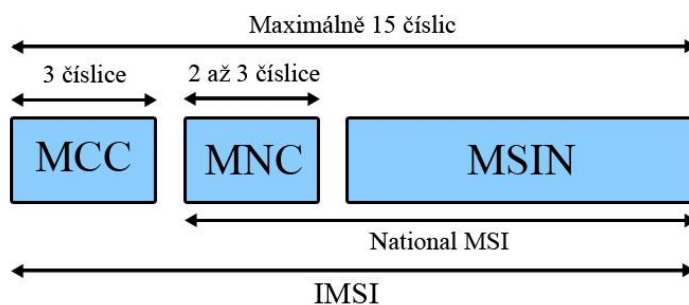
3.1. SIM karta

Důležitým prvkem, bez kterého by nebylo možné, aby mobilní zařízení mohlo komunikovat s jinými zařízeními přes mobilní síť, je tzv. SIM karta (SIM je zkratka pro *subscriber identity module*). Tato karta obsahuje veškeré nezbytné informace o uživateli daného terminálu, bez kterých by nebylo možné se k síti připojit [17].

3.1.1. Identifikátor IMSI

Nejdůležitější informací, která je uložena v každé SIM kartě, je *international mobile subscriber identity* (IMSI). IMSI je unikátní číslo používané pro připojení k mobilní síti a jednoznačně identifikuje každého uživatele zmíněných sítí. Nutné je zmínit, že toto číslo neodpovídá telefonnímu číslu. IMSI je uživateli mobilního terminálu neznámé.

IMSI je až 15 číslic dlouhé a skládá se ze tří částí. První tři číslice označují tzv. *mobile country code* (MCC), který identifikuje zemi původu uživatele. Například České republice je přiřazeno číslo MCC 230. Další dvě až tři číslice označují tzv. *mobile network code* (MNC). MNC jednoznačně identifikuje mobilního operátora, k jehož síti se daný uživatel připojuje. Poslední část je pojmenovaná *mobile subscriber identification number* (MSIN). MSIN slouží jako identifikátor samotného uživatele. Spojením MNC a MSIN vzniká část pojmenovaná *national mobile subscriber identity* (NMSI). Tato struktura identifikátoru IMSI je znázorněna na obrázku 11.



Obrázek 11 - Struktura IMSI.

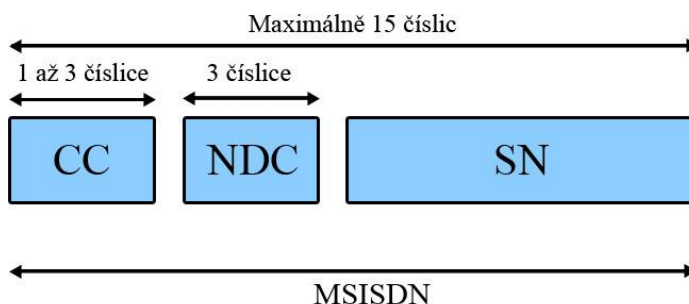
3.1.2. Identifikátor MSISDN

Druhým důležitým číslem pro identifikaci uživatele je tzv. MSISDN (*mobile subscriber integrated services digital network number*). MSISDN je laicky nazýváno telefonní číslo a je známo každému uživateli. Toto číslo slouží jako identifikátor uživatele veřejné telefonní sítě [17].

MSISDN může mít až 15 číslic a skládá se z následujících částí [17]:

- *country code* (CC) – sekvence 1 až 3 číslic, která identifikuje národní telefonní síť. Např. České republice bylo přiděleno číslo 420, Slovensko používá 421, pro USA je zavedeno číslo 1 atd.,
- *national destination code* (NDC) – toto číslo určuje konkrétního mobilního operátora. Skládá se většinou ze 3 číslic,
- *subscriber number* (SN) – tato skupina číslic určuje konkrétního uživatele dané sítě. V České republice se skládá tato část z 6 číslic.

Obrázek 12 zobrazuje výše zmíněnou strukturu MSISDN.



Obrázek 12 - Struktura MSISDN.

IMSI i MSISDN každého uživatele jsou uloženy v registru HLR. Na rozdíl od IMSI, které je pevně vázané k SIM kartě, lze číslo MSISDN přesouvat ze SIM karty na jinou SIM kartu, případně ho měnit. Zároveň je možné mít více čísel MSISDN vázaných k jedné SIM kartě. Z těchto důvodů je mnohem praktičtější používat číslo IMSI jako jednoznačný identifikátor uživatele mobilní sítě [17], [27].

4 Zpracování velkých datových objemů

Každý den vzniká nepředstavitelné množství dat. Například Google denně zpracovává přes 24 petabajtů dat, což je zhruba tisíckrát víc dat, než obsahují všechny tištěné publikace v knihovně amerického Kongresu dohromady. Každou sekundu je na servery služby YouTube nahrána přibližně jedna hodina videozáznamu [22]. Nárůst dat je tak velký, že podle [23] bylo kolem 90 % dat vytvořeno v posledních dvou letech. Víceméně ve všech odvětvích lidské činnosti, ve kterých jsou používány informační technologie, se generují objemy dat, které přesahují nejen schopnosti zpracování obyčejnými počítači, ale hlavně přesahují hranice lidské představitivosti. Pro tyto velké datové objemy se ujal anglický název „big data“.

Na tato data se přestalo pohlížet jako na něco statického, na něco, co pouze zabírá místo. Z velkých datových objemů se stala významná komodita, protože se zjistilo, že velké datové objemy mají potenciál obsahovat skryté informace, které mohou mít velkou hodnotu. Analýzou těchto dat mohou být např. objeveny skryté vzorce chování uživatelů všemožných služeb, např. sociálních sítí, internetových obchodů apod. a je tedy možné cílit tak na ně podle toho doporučené příspěvky, respektive produkty. Data mohou skrývat vzorce chování na burze a předvídat tak vývoj na finančním trhu, mohou pomoci v prevenci nebo detekci trestných činů jako např. praní peněz, neplacení daní nebo mohou být i použity jako prevence terorismu. Z výsledků analýzy zdravotních záznamů mnoha pacientů lze předpovědět počínající chorobu u na první pohled zdravého pacienta ještě dříve, než je detekovatelná lékařskými metodami, zahájit tak léčbu včas a zvýšit tak šanci na uzdravení. A dalších aplikací analýzy velkých datových objemů je dnes už nepočítaně.

4.1. Nutnost velkého výpočetního výkonu

S velkými datovými objemy přichází i požadavek na velký výpočetní výkon zařízení, která big data zpracovávají. Obyčejná zařízení jako osobní počítače nejsou schopna výpočty provést v uspokojivé době z důvodu právě relativně nízkého výpočetního výkonu.

Jelikož je tato práce součástí spolupráce více univerzit, konkrétně ČVUT, VŠB – Technické Univerzity Ostrava a VŠE, bylo možné ke zpracování dat využít serverů superpočítačového centra při VŠB – Technické univerzitě Ostrava. Tyto servery disponují mnohonásobně větším výpočetním výkonem než obyčejný osobní počítač, a velmi výrazně tedy zkrátily dobu prováděných výpočtů a analýz.

Přestože vývoj výpočetní techniky, který reaguje na potřebu analyzovat čím dál větší datové objemy, je velmi rychlý, v některých případech je nemožné zpracovat všechny dostupné záznamy v přijatelné době. V těchto případech může být východiskem vybrání vzorku záznamů z daných datových sad a analyzovat pouze je a z výsledku extrapolovat závěr pro celou datovou sadu. Statistickými metodami bylo potvrzeno, že nejpřesnějších výsledků je dosahováno v případech, kdy jsou vzorky záznamů voleny náhodně [22]. K tomuto došlo i při volbě datových sad k analýze v této práci, kdy byla také použita navzorkovaná datová sada, viz kapitola 5.1.

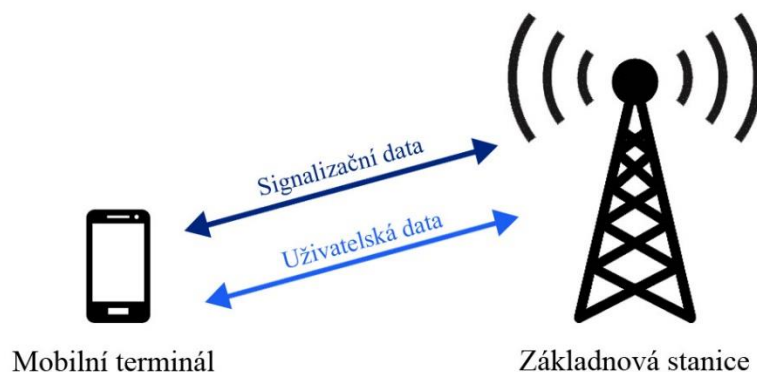
4.2. Jazyk R

Veškerá úprava dat a jejich následná analýza popsané v následujících kapitolách byly zpracovány v programu RStudio, což je nejznámější vývojové prostředí (*integrated development environment*, IDE) pro jazyk R [25]. Jazyk R je jedním z nejpoužívanějších jazyků určených pro statistické zpracování velkých datových objemů. Byl představen v roce 1993 a obsahuje v základní verzi mnoho funkcí nejen ke statistickému zpracování dat, ale i k následné grafické vizualizaci. Zároveň je možné si stáhnout a bezplatně využívat široké spektrum dodatečných knihoven obsahujících funkce pro různé účely, např. pro propracovanější vizualizace, pro strojové učení apod. [26]

V této práci byly využity funkce ze systémové knihovny sdružující základní funkce jazyka R. Dále byly použity i funkce z knihoven, které nepatří do balíčku Systémových knihoven. Konkrétně jde o knihovny *data.table*, *ggplot2* a *geosphere*. Význam všech použitých funkcí je vysvětlen v Seznamu použitých funkcí.

5 Charakteristika datových sad

Datové sady obdržené pro účely analýzy v této práci jsou založeny na záznamech signalizačních zpráv na rádiovém rozhraní. Tyto signalizační zprávy, jejichž princip je popsán v kapitole 2.6., pocházejí z uživatelského okruhu (*subscriber loop*). Jde tedy o signalizační zprávy, které vysílá mobilní terminál směrem k základnové stanici. Tento proces je naznačen na obrázku 13.



Obrázek 13 - Rádiové rozhraní.

Záznamy v datových sadách jsou na signalizačních zprávách na rádiovém rozhraní založeny, ovšem přímo tyto zprávy neobsahují. Datové sady byly totiž již předzpracovány pro tuto práci v rámci jiné části projektu zmiňované spolupráce univerzit ČVUT, VŠB a VŠE. Tato práce tedy již pracuje s upravenými datovými sadami.

5.1. Struktura obdržených datových sad

V obdržených datových sadách odpovídá jeden záznam jedné SIM kartě náležející k určitému mobilnímu terminálu v daný den. Záznamy obsahují datum, kdy byly pořízeny, jednoznačný jednosměrně kódovaný identifikátor SIM karty (nejedná se o IMSI ani o MSISDN) a dále informace o lokalizaci SIM karty během dne, ze kterého záznam pochází. Tyto lokalizační informace jsou zaznamenávány ve formě identifikačního řetězce buňky, jehož struktura je popsána v kapitole 5.2. Struktura záznamu v používaných datových sadách je nastíněna na obrázku 14.



Obrázek 14 - Struktura záznamu.

Tyto sady obsahují řádově miliony záznamů pro každý den. Pro tuto práci ovšem nebyly poskytnuty plné datové sady, nýbrž sady, které vznikly náhodným vybráním 100 000

záznamů z těchto plných datových sad. I přes redukováný počet záznamů jsou tyto méně obsáhlé datové sady pro analýzu v této práci dostačující.

Pro tuto práci byly poskytnuty datové sady z 15 po sobě jdoucích dnů, během kterých došlo k výpadku předávacím rozhraní sítě. Jde o období z druhé poloviny roku 2019, ve kterém se nevyskytují žádné svátky, ani žádný jinak neobvyklý den. Prvním, osmým a patnáctým dnem tohoto období je neděle.

Konkrétně byly pro každý den poskytnuty dvě datové sady. Obě datové sady obsahují záznamy se stejnou strukturou obsahující stejné parametry. Tyto záznamy ovšem byly do jednotlivých datových sad přiřazeny na základě lehce odlišné metody. Na první typ datové sady bude v práci odkazováno jako na hlavní datovou sadu a na druhý typ jako na doplňující datovou sadu.

Celkem tedy tato práce operuje s 30 datovými sadami, kdy každá z nich má 100 000 záznamů. Celkový objem zpracovávaných datových sad je přes 500 MB.

5.2. Identifikační řetězec buňky

V projektu meziuniverzitní spolupráce ČVUT, VŠB – Technické univerzity Ostrava a VŠE, ze kterého tato práce čerpá, byl také definován pojem identifikační řetězec buňky. Identifikační řetězec buňky je unikátní kód, který jednoznačně identifikuje buňku celulární mobilní sítě v České republice. Skládá se z několika částí.

Formát tohoto identifikátoru vypadá následovně:

AAABBBCDEE

První tři znaky (v příkladu označené jako AAA) charakterizují geografickou oblast, kde se buňka nachází. Pro tuto část řetězce se vždy používají velká písmena. Následující tři znaky (označené jako BBB) jednoznačně identifikují vysílací stanici v zóně dané prvními třemi znaky. Tyto znaky se vždy vyjadřují malými písmeny. Těchto šest znaků dohromady tvoří jednoznačný identifikátor základnové stanice v mobilní síti v České republice. Následující znak, označený v příkladu jako C, označuje velikost buňky a použitou technologii mobilních sítí v této buňce. Pro vyjádření znaku C se vždy používá číslice. Znak D identifikuje použité frekvenční pásmo dané technologie. Pro znak D se také vždy používá číslice. Poslední znaky řetězce, znaky EE, unikátně určují konkrétní směrový vysílač základnové stanice, a tedy i konkrétní buňku mobilní sítě.

Příkladem může být identifikační řetězec *ZLIads51AA*. V tomto řetězci znaky *ZLI* označují region, v tomto případě Zlín. Znaky *ads* identifikují vysílací stanici v regionu Zlín a dohromady řetězec *ZLIads* jednoznačně identifikuje základnovou stanici na území České republiky. Kombinace číslic *51* znamená technologii LTE ve frekvenčním pásmu 800 MHz a poslední písmena řetězce *AA* určují vysílač na identifikované základnové stanici.

5.3. Klasifikace buněk a uživatelů dle mobility

Klasifikace buněk a klasifikace uživatelů dle mobility byly také převzaty z projektu meziuniverzitní spolupráce ČVUT, VŠB – Technické univerzity Ostrava a VŠE, jehož je tato práce dílčí částí.

Mobilní terminál neustále komunikuje pomocí signalizačních zpráv s nejbližší základnovou stanicí (princip signalizačních zpráv je popsán v kapitole 2.6.) Ta mu totiž poskytuje nekvalitnější připojení k síti. Tato komunikace probíhá, i když uživatel terminálu není nijak aktivní. Pokud se uživatel pohybuje mezi místy, která jsou od sebe dostatečně vzdálená, nastane moment, kdy opustí oblast pokrytí zmíněnou základnovou stanicí. Jinými slovy, opustí oblast své buňky a dostane se do buňky sousední. V této chvíli dojde k přepojení terminálu k základnové stanici obsluhující buňku, do které právě vstoupil, a odpojení od původní základnové stanice, protože buňka, ve které se nově nachází, mu poskytne lepší signál. Z tohoto vyplývá, že se uživatel během dne může nacházet v různých buňkách a v každé buňce může strávit různou dobu [1].

5.3.1. Klasifikace buněk

Podle manuálu z [21], který vznikl pro zmíněný meziuniverzitní projekt, je denní cyklus rozdělen na různé časové úseky. Vznikají tak časová okna, ve kterých se jednotlivě vyhodnocuje doba výskytu uživatele. Mezi tato časová okna patří ranní časové okno (od 00:00:00 do 04:59:59), denní časové okno (od 05:00:00 do 18:59:59) a večerní časové okno (od 19:00:00 do 23:59:59).

V každém časovém okně se může uživatel nacházet ve vícero buňkách a strávit tam různý čas. Na základě doby strávené v jednotlivých buňkách je uživateli vyhodnocena pro každé časové okno buňka, ve které strávil nejdelší čas, tedy buňka, ve které má nejvíce záznamů. Vzorkovací interval mezi záznamy je obvykle 30 minut (pro 4G síť je kratší a nepravidelný). Údaje o vzorkovacím intervalu i klasifikace buněk byly převzaty z [21].

Každému uživateli jsou tedy přiřazeny podle [21] následující signifikantní buňky:

- ranní buňka – buňka, ve které má nejvíce záznamů mezi 00:00:00 do 04:59:59,
- denní buňka – buňka, ve které má nejvíce záznamů mezi 05:00:00 do 18:59:59,
- večerní buňka – buňka, ve které má nejvíce záznamů mezi 19:00:00 do 23:59:59 a
- domovská buňka (stanice pobytu v denním cyklu) – při určování této buňky se berou v potaz ranní a večerní časové okno. Určí se takové buňky, ve kterých měl uživatel aspoň jeden záznam v obou časových oknech a z nich se následně vybere taková buňka, kde strávil uživatel nejvíce času neboli, kde měl nejvíce záznamů.

5.3.2. Klasifikace uživatelů

Ze záznamů lokací výskytů uživatelů lze podle opět manuálu [21] roztrždit také jednotlivé uživatele do několika základních skupin podle jejich mobility:

- hospodář nevyjíždějící – uživatel, který během denního cyklu neopustil svou buňku. Jinými slovy, všechny záznamy o jeho lokaci pochází z jedné základnové stanice,
- hospodář vyjíždějící – uživatel, který opustil svou stanicí pobytu, má tedy alespoň jeden záznam o lokaci z jiné než své domovské buňky. To ovšem nutně neznamená, že musí být jeho denní buňka rozdílná od domovské,
- nomád – uživatel, který dokončil denní cyklus v jiném časovém okně, než ho začal.

Orientační poměry těchto kategorií podle [21] jsou následující: 80 % hospodáři, 17% nomádi, 3 % ostatní. Co se týče kategorie hospodář, orientační poměr je: 70 % hospodář vyjíždějící, 24 % hospodář nevyjíždějící, 6 % jiné.

6 Příprava datových sad k analýze

Poskytnuté datové sady obsahují velké množství informací. Některé informace jsou ovšem společně zapouzdřeny v jednom původním parametru, nebo jsou vyjádřeny jiným způsobem, který je nevhodný pro následující analýzu. Tato kapitola se zabývá úpravou datových sad do takové formy, aby byly datové sady vhodně připraveny k analýze.

6.1. Rozšiřování datové sady

Jako příklad lze opět uvést identifikační řetězec buňky popsany v kapitole 5.2. Tento parametr v sobě obsahuje geografickou informaci (region, kde se buňka nachází), identifikuje základnovou stanici, ke které buňka náleží, informace o technologii mobilní sítě použité v dané buňce a také obsahuje klasifikaci buňky z hlediska rozměrů. Tyto informace je nutné z důvodu následné efektivnější analýzy vypreparovat a vytvořit z nich samostatné parametry, které budou připojeny k původním záznamům. Tento proces je nazýván počestěným výrazem „parsování“.

Pro tento účel byla v jazyku R vyvinuta funkce ***F.parser()***, kterou lze najít v Příloze A jako kód ***bap01.R***. Tato funkce vyžaduje jako vstupní parametr datovou sadu, se kterou bude pracovat. V této funkci, která je konkrétně nastavena pro práci s poskytnutými datovými sadami, jsou dále definovány parametry neboli sloupce, na kterých bude proveden proces „parsování“ a dále také definovány informace, které jsou vypreparovávány, a jejich pozice v identifikačním řetězci. Samotný proces „parsování“ je vykonáván dvěma for cykly. V poslední části této funkce je prováděna úprava jmen nových sloupců tak, aby odpovídala požadavkům práce. Ve funkci ***F.parser()*** byly použity následující funkce: ***list()***, ***apply()***, ***substr()***, ***cbind()*** a ***paste0()***.

6.2. Další úpravy datové sady

Pro účely projektu, kterého je tato práce součástí, bylo vyžadováno v nyní již rozšířené datové sadě nahradit hodnoty parsovaných parametrů, které jsou většinou textového typu, hodnotami číselnými, což vede k optimalizaci výpočetního výkonu, a tedy k rychlejšímu zpracování dat. K tomuto účelu byly použity externí databáze, které obsahují informace o korespondenci textového identifikátoru s příslušným identifikátorem číselným. Pro tyto úpravy byly vyvinuty v jazyku R následující funkce: ***F.nettyp_join()***, ***F.sitespzd_join()***, ***F.sit_nam_loc_join()*** a ***F.distances()***.

První z těchto funkcí je funkce ***F.nettyp_join()***. Tato funkce plní úkol přiřazení číselné hodnoty k danému záznamu podle typu mobilní technologie, ke které byl mobilní terminál připojen. Funkce požaduje jako vstupní parametr upravovanou datovou sadu, ve které vybere pomocí funkce ***grep()*** sloupce s parametry, u kterých bude provedena náhrada. Konkrétně jde o parsované sloupce, které obsahují kombinace znaků C a D identifikačního řetězce buňky popsany v kapitole 5.2. V těchto sloupcích jsou tyto kombinace nahrazeny jednociferným číselným identifikátorem. Toto nahrazení je provedeno kombinací funkcí ***merge()*** a ***subset()***, které jsou vloženy do for cyklu. Tuto funkci lze najít v Příloze A jako kód ***bap02.R***. Ve funkci ***F.nettyp_join()*** byly použity následující funkce: ***data.frame()***, ***data.table()***, ***grep()***, ***substr()***, ***merge()*** a ***subset()***.

Funkce *F.sitespzd_join()* pracuje se sloupcem, který obsahuje parsované znaky AAA z identifikačního řetězce buňky popsáno v kapitole 5.2. V tomto sloupci jsou znaky AAA nahrazeny číselným identifikátorem z externí databáze. Tato funkce požaduje na vstupu upravovanou datovou sadu a zmíněnou externí databázi. Obdobně jako v předchozí funkci jsou nejprve funkcí *grep()* vybrány sloupce, kde dojde k náhradě, a následně je nahrazení realizováno kombinací funkcí *merge()* a *subset()* opět uložených ve for cyklu. Tuto funkci lze najít v Příloze A jako kód *bap03.R*. Ve funkci *F.sitespzd_join()* byly použity následující funkce: *merge()*, *subset()* a *grep()*.

Funkce *F.sit_nam_loc_join()* nahrazuje obsah sloupce s textovými identifikátory vysílače, tedy posloupnost znaků AAA a BBB podle kapitoly 5.2., unikátními číselnými identifikátory převzatými z externí databáze. Zároveň tato funkce ke každému vysílači přiřadí jeho souřadnice. Tato funkce pracuje na podobném principu jako funkce předchozí. Nejprve jsou vybrány dotyčné sloupce funkcí *grep()*, následně jsou identifikátory v daných sloupcích nahrazeny identifikátory z databáze, ze které jsou také přidány souřadnice do datové sady. Toto je opět realizováno funkcemi *merge()* a *subset()* ve for cyklu. Tuto funkci lze najít v Příloze A jako kód *bap04.R*. Ve funkci *F.sit_nam_loc_join()* byly použity následující funkce: *merge()*, *subset()* a *grep()*.

Poslední funkcí vyvinutou pro počáteční úpravy datové sady je funkce *F.distances()*. Tato funkce má za úkol vypočítat vzdálenosti mezi jednotlivými základnovými stanicemi, ze kterých daný mobilní terminál přijímal signál během dne. Tato funkce požaduje jako vstupní parametr pouze upravovanou datovou sadu, na kterou již byla aplikována funkce *F.sit_nam_loc_join()*, a tedy obsahující souřadnice základnových stanic. Funkce načte upravované sloupce a jejich souřadnice z datové sady a pomocí funkce *distGeo()* vypočítá a uloží vzdálenost mezi základnovými stanicemi. Tuto funkci lze najít v Příloze A jako kód *bap05.R*. Ve funkci *F.distances()* byly použity následující funkce: *paste0()* a *distGeo()*.

Výsledkem aplikace funkcí z kapitol 6.1 a 6.2. je rozšířená datová sada, která bude využívána dalších částech zmiňovaného projektu, pod který tato práce spadá.

7 Analýza

Tato kapitola obsahuje výstupy analýzy obdržených datových sad záznamů na rádiovém rozhraní mobilní sítě z období, kdy došlo na tomto rozhraní k výkyvu. Zároveň je v této kapitole hledán vzorec, který by objasňoval, jaká skupina mobilních terminálů je k ovlivnění výkyvem na rádiovém rozhraní nej náchylnější.

Je nutné zmínit, že výkyv se týká pouze exportu signalizačních dat ze síťového rozhraní. Nejde o výpadek signalizačních dat, ani dat uživatelských. Běžný uživatel tedy tento výkyv nemohl zaregistrovat.

7.1. Časový průběh výkyvu

Pro tuto práci byly poskytnuty datové sady z 15 po sobě jdoucích dní. Jak již bylo zmíněno dříve, první, osmý a patnáctý den zkoumaného období jsou neděle a toto zkoumané období neobsahuje žádné státní svátky, ani případně jinak významné dny. Pro zjištění časového průběhu výkyvu byly použity oba typy datových sad (hlavní datová sada i doplňující datová sada), tedy celkem 200 000 záznamů pro každý den.

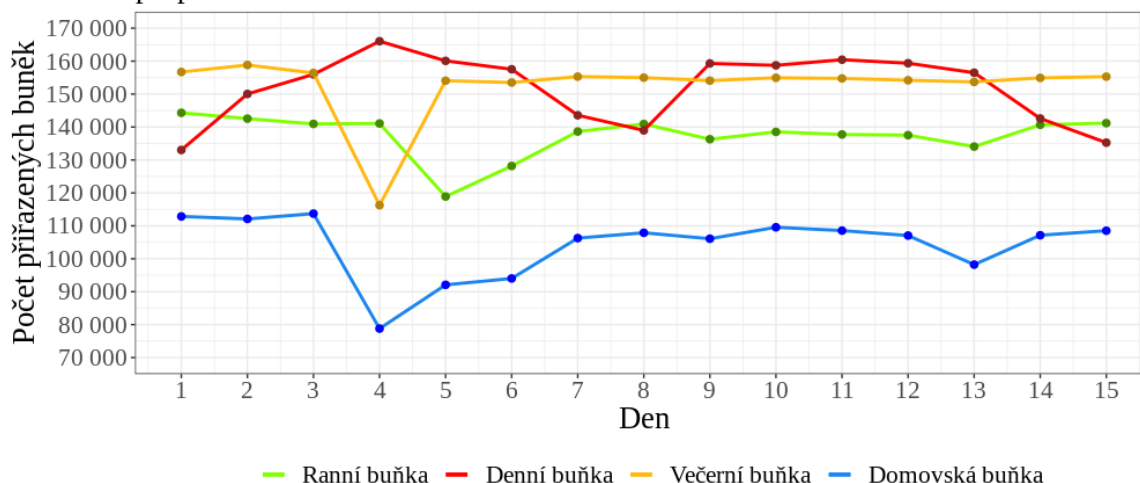
Každé SIM kartě byla každý den přiřazována ranní, denní, večerní a domovská buňka podle klasifikace z kapitoly 5.3.1. Tyto hodnoty byly vyneseny do tabulky 4. Tato tabulka obsahuje záznamy všech mobilních terminálů napříč použitými technologiemi. Konkrétní vliv jednotlivých technologií na ovlivnění výkyvem bude zkoumán v kapitole 7.5. Z tabulky 4 lze vyčíst, že ve velkém množství případů se přiřazení dané signifikantní buňky SIM kartě nevydaří. Úspěšnost přiřazení signifikantní buňky se pohybovala mezi 39 % (přiřazení domovské buňky čtvrtý den) a 83 % (přiřazení denní buňky čtvrtý den). Oranžovou barvou jsou zvýrazněny hodnoty ze dne, kdy lze pozorovat výraznější změny (den výkyvu).

-	Počet SIM karet s přiřazenou signifikantní buňkou z původního počtu 200 000 SIM karet			
Den	Ranní buňka	Denní buňka	Večerní buňka	Domovská buňka
1	144 314	133 024	156 708	112 850
2	142 549	150 039	158 827	112 088
3	140 942	155 978	156 408	113 705
4	141 069	166 048	116 262	78 801
5	118 889	160 086	154 058	92 087
6	128 174	157 542	153 505	94 022
7	138 630	143 564	155 307	106 269
8	140 920	138 975	154 993	107 883
9	136 291	159 303	154 078	106 082
10	138 519	158 723	154 946	109 563
11	137 739	160 437	154 748	108 548
12	137 528	159 367	154 196	107 048
13	134 050	156 484	153 693	98 219
14	140 665	142 583	154 927	107 148
15	141 181	135 249	155 294	108 514

Tabulka 4 - Časový průběh výkyvu.

Záznamy z tabulky 4 o přiřazení signifikantních buněk SIM kartám byly vyneseny do grafu na obrázku 15. Kód, který generuje tento graf je uveden v Příloze A jako kód *bap06.R*. V první části kódu dojde ve for cyklu k zjištění počtu úspěšně přiřazených jednotlivých signifikantních buněk SIM kartám pro každý den. To je provedeno pomocí funkcí *nrow()* a *sum()* a nástrojem porovnávání hodnot textového řetězce. Druhá část kódu provádí vykreslení grafu pomocí funkce *ggplot()* a jejich podfunkcí *geom_line()* a *geom_point()*.

Vývoj počtu úspěšně přiřazených signifikantních buněk při počtu 200 000 SIM karet



Obrázek 15 - Časový průběh výkyvu.

7.1.1. Začátek výkyvu

Z grafu na obrázku 15 lze vysledovat výraznou anomálii počínající čtvrtým dnem zkoumaného období. Čtvrtý den rapidně poklesne úspěšnost zaznamenání večerní buňky, konkrétně z 156 408 záznamů z třetího dne na 116 262 záznamů ve dni čtvrtém. To je pokles o 26 %.

Podobný pokles můžeme sledovat také u úspěšnosti zaznamenávání domovské buňky. Také zde rapidně klesne počet úspěšně přiřazených buněk. Zde byl pokles o z 113 705 záznamů na 78 801 záznamů, tedy o 31 %.

Z grafu je také zjevné, že pátý den došlo k výraznějšímu poklesu úspěšnosti určení ranní buňky. Čtvrtý den bylo určeno 141 069 buněk, zatímco den pátý jen 118 889. Došlo k poklesu o 16 %.

Co se týče úspěšnosti určování denní buňky, ta na první pohled nijak nekoreluje s žádnou z ostatních křivek. Dokonce je pozorován nárůst přiřazených buněk v den výkyvu. Vliv přiřazování denní buňky na zkoumaný původ výkyvu nelze určit bez další podrobnější analýzy. Všechny výše zmíněné hodnoty vázající se k výkyvu jsou v tabulce 4 označeny oranžově a jsou také shrnuty v tabulce 5 i s uvedením procentuálních změn.

Typ buňky	Hodnota před výkyvem	Hodnota po výkyvu	Rozdíl hodnot	Procentuální změna
Ranní buňka	141 069	118 889	-22 180	-16 %
Denní buňka	155 978	166 048	10 070	6 %
Večerní buňka	156 408	116 262	-40 146	-26 %
Domovská buňka	113 705	78 801	-34 904	-31 %

Tabulka 5 - Časový průběh výkyvu – změny ve dnech výkyvu.

Z těchto údajů lze vydedukovat, že k výpadku na rádiovém rozhraní mobilní sítě došlo v průběhu čtvrtého dne. Lze takto soudit z toho, že úspěšnost přiřazení ranní buňky se čtvrtý den víceméně nelišila od trendu dní předchozích, zatímco večer, tedy při určování večerní buňky, již došlo k rapidnímu poklesu úspěšnosti přiřazení. Na pokles úspěšnosti večerní buňky navázal rapidní pokles určení ranní buňky následující, tedy pátý den zkoumaného období.

7.1.2. Regenerace po výkyvu

Úspěšnost přiřazení večerní buňky se po dni výpadku (čtvrtý den) opět vrátila na přibližně původní úroveň ihned následující, pátý den, kde setrvala až do konce zkoumaného období. Odlišný průběh můžeme pozorovat u určování ranní a domovské buňky. Jejich úspěšnosti přiřazení se ve zkoumaném období nikdy úplně nevrátily na původní hodnoty. Ovšem od sedmého dne (třetího dne od výkyvu) je pozorován přibližně konstantní průběh s hodnotami blízcími se hodnotám před výkyvem. Pro tyto dvě zkoumané křivky si lze také všimnout menšího výkyvu třináctý den. Tento výkyv ovšem nebude předmětem analýzy v této práci. Opět je třeba také zmínit, že křivka denní buňky opět nekoreluje se žádnou z ostatních křivek.

7.2. Analýza výkyvu z hlediska metody výběru vzorků

Tato kapitola zkoumá, zdali lze vypořádat určitou závislost výpadku na výběru vzorků do datové sady (zdali jde o SIM kartu z hlavní datové sady, nebo o SIM kartu z doplňující datové sady). Je analyzována zvlášť hlavní datová sada a zvlášť datová sada doplňující. Následně jsou výsledky zkoumání porovnávány a je hledána možná větší náchylnost k ovlivnění výpadkem u jedné z těchto sad.

Pro tuto analýzu byly vybrány ke zkoumání záznamy ranních a večerních buněk. Tyto buňky byly zvoleny na základě závěrů kapitoly 7.1. Z této kapitoly je zjevné, že právě tyto buňky jsou výrazně ovlivněny výkyvem, což se projeví u večerní buňky rapidním poklesem úspěšně přiřazených večerních buněk při čtvrtém dni zkoumaného období. Zároveň se výkyv projeví výrazným poklesem úspěšnosti přiřazení ranních buněk pátý den zkoumaného období.

Četnosti úspěšných přiřazení buněk na 100 000 SIM karet jsou zaznamenány v tabulce 6. V tabulce jsou zároveň oranžovou barvou zvýrazněny hodnoty ze dnů, jež byly ovlivněny zkoumaným výkyvem.

-	Počet SIM karet s přiřazenou signifikantní buňkou z původního počtu 100 000 SIM karet			
-	SIM z hlavní datové sady		SIM z vedlejší datové sady	
Den	Ranní buňka	Večerní buňka	Ranní buňka	Večerní buňka
1	91 685	96 280	52 629	60 428
2	90 547	95 765	52 002	63 062
3	90 531	95 507	50 411	60 901
4	90 913	67 950	50 156	48 312
5	76 815	94 872	42 074	59 186
6	85 251	94 805	42 923	58 700
7	89 016	95 358	49 614	59 949
8	90 050	96 176	50 870	58 817
9	88 733	95 306	47 558	58 772
10	89 437	95 099	49 082	59 847
11	89 695	95 269	48 044	59 479
12	89 826	94 969	47 702	59 227
13	89 010	94 734	45 040	58 959
14	90 183	95 223	50 482	59 704
15	90 232	95 893	50 949	59 401

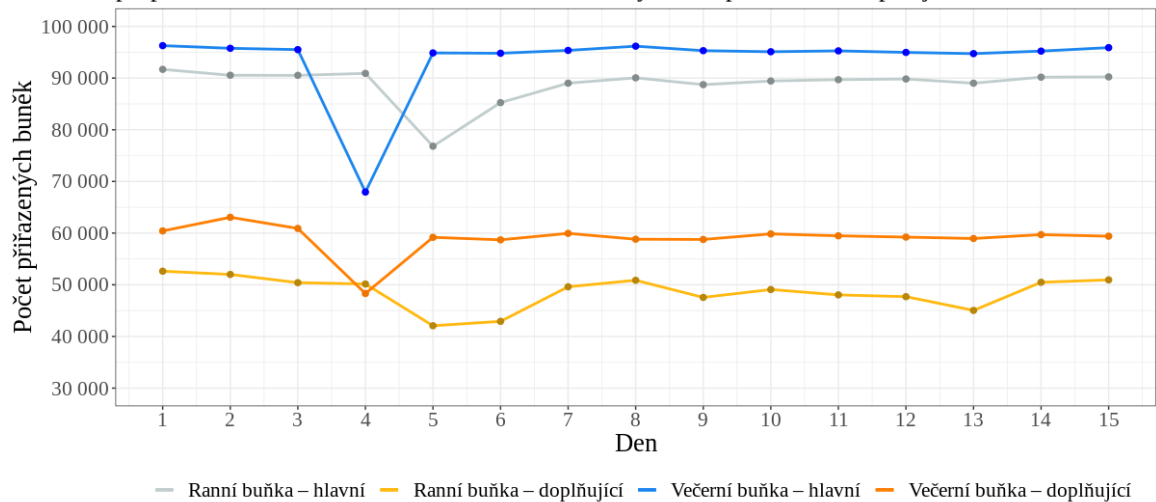
Tabulka 6 - Časový průběh výkyvu zvláště pro hlavní a doplňující datovou sadu.

Nasbíraná data byla také vynesena do grafu. Kód, který toto vykreslení provádí je k dispozici k nahlédnutí v Příloze A jako kód **bap07.R**. Tento kód je sestaven ze tří základních částí, 2 for cyklů a části vykreslení pomocí funkce **ggplot()**.

For cykly zapisují do datového rámce jednotlivé četnosti úspěšně přiřazených buněk (večerních i ranních). První for cyklus pracuje s daty z hlavní datové sady a druhý for cyklus zpracovává data doplňující datové sady. Jsou zde použity stejné principy jako v kódu z Přílohy A **bap06.R**, tedy kombinace funkcí **sum()** a **nrow()**. Tyto cykly pracují nezávisle na sobě, a vytvoří tedy dva různé datové rámce. Pro účely efektivnějšího vykreslení v následující části jsou tyto datové rámce spojeny do jednoho. Toto je provedeno funkcí **cbind()**.

Poslední částí tohoto kódu je samotné vykreslení grafu pro všechny čtyři buňky – ranní buňku pro hlavní datovou sadu, večerní buňku pro hlavní datovou sadu, ranní buňku pro doplňující datovou sadu a večerní buňku doplňující datovou sadu. Vykreslení je provedeno funkcí **ggplot()** a kombinací jejich příbuzných funkcí **geom_line()** a **geom_point()**. Tento graf je vykreslen do obrázku 16.

Vývoj počtu úspěšně přiřazených signifikantních buněk při počtu 100 000 SIM karet - ranní a večerní buňky zvlášť pro hlavní a doplňující datovou sadu



Obrázek 16 - Časový průběh výkyvu zvlášť pro hlavní a doplňující datovou sadu.

Z grafu na obrázku 16 a ze zaznamenaných dat v tabulce 6 je opět patrný stejný výkyv jako v kapitole 7.1. Pro ranní buňky při analýze jak pro SIM karty z hlavní datové sady, tak pro SIM karty z doplňující datové sady se výkyv opět nachází až v záznamech pátého dne. Pro večerní buňky obou typů SIM karet lze pozorovat výkyv čtvrtý den, což odpovídá závěrům analýzy z předchozí kapitoly.

Také je zjevné, že je úspěšnost přiřazení obou typů buněk SIM kartám z doplňující datové sady výrazně nižší, než je tomu u SIM karet z hlavní datové sady. Tento rozdíl se pohybuje během celého sledovaného období mezi 30 % a 40 %.

7.2.1. Začátek výkyvu

Při bližším pohledu do tabulky 6 je vidno, že počet SIM karet z hlavní datové sady s úspěšně zaznamenanou ranní buňkou poklesl pátý den sledovaného období o 14 098. Konkrétně šlo o pokles z hodnoty 90 913 SIM karet se zaznamenanou buňkou na hodnotu 76 815. Tento pokles v procentuálním vyjádření činí 16 %. Podobný pokles lze vysledovat i u přiřazování buněk SIM karet z doplňující datové sady. Zde došlo k poklesu z hodnoty 50 156 na hodnotu 42 074. Rozdíl tedy činil 8 082 úspěšně zaznamenaných buněk, tedy 16 %.

U hodnot úspěšného přiřazení večerní buňky SIM kartám z hlavní datové sady došlo čtvrtý den k poklesu o 27 557 úspěšně zaznamenaných buněk (pokles byl z 95 507 při třetím dnu na 67 950 při dnu čtvrtém). V tomto případě jde o pokles o 29 %. U SIM karet z doplňující datové sady došlo k poklesu o 12 589 úspěšně zaznamenaných buněk (zaznamenaný pokles byl z 60 901 zaznamenaných buněk při třetím dnu na 48 312 při dnu čtvrtém). V tomto případě jde o pokles o 21 %. Výše popsané číselné hodnoty jsou shrnuty v tabulce 7.

Typ buňky	Hodnota před výkyvem	Hodnota při výkyvu	Rozdíl hodnot	Procentuální změna
Ranní buňka – hlavní sada	90 913	76 815	-14 098	-16 %
Ranní buňka – doplňující sada	50 156	42 074	-8 082	-16 %
Večerní buňka – hlavní sada	95 507	67 950	-27 557	-29 %
Večerní buňka – doplňující sada	60 901	48 312	-12 589	-21 %

Tabulka 7 - Výsledky analýzy výkyvu zvlášť pro hlavní a doplňující datovou sadu.

Z porovnání procentuálních změn lze vyvodit fakt, že SIM karty z hlavní datové sady jsou o 8 % náchylnější k tomu být ovlivněny zkoumaným výkyvem při přiřazování večerní buňky než SIM karty z doplňující datové sady. Toto ovšem neplatí při porovnávání změn u ranní buňky. Zde jsou procentuální změny shodné a obě dvě skupiny SIM karet tedy reagují na výkyv stejně.

7.2.2. Regenerace po výkyvu

Co se týče návratu po výkyvu do původního stavu, tedy do stavu, kdy se úspěšnost přiřazení buněk vrátí na hodnoty před výkyvem, je z grafu na obrázku 16 patrné, že u večerní buňky dojde k návratu na původní hodnoty hned následující den (pátý den) po dni, kdy byla spatřena výchylnka (čtvrtý den). Číselné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.

Typ buňky	Hodnota den před výkyvem (3. den)	Hodnota den po výkyvu (5.den)	Rozdíl dnu před výkyvem a dnem po výkyvu
Večerní buňka – hlavní sada	95 507	94 872	-635
Večerní buňka – doplňující sada	60 901	59 186	-1 715

Tabulka 8 - Regenerace po výkyvu – večerní buňka.

Z tabulky 8 je patrné, že rozdíly úspěšně zaznamenaných večerních buněk se liší pouze o malou hodnotu v porovnání s celkovými hodnotami zaznamenaných večerních buněk. V procentuálním vyjádření nepřekročí rozdíly 3 % (u večerní buňky SIM karty z doplňující datové sady činí rozdíl 2.8 %). Lze tedy uvažovat, že detekce večerních buněk se vrátila den po výpadku na hodnoty před výpadkem.

O detekci ranních buněk toto říct nelze. Z grafu na obrázku 16 lze soudit, že regenerace na původní hodnoty trvá více než jeden den. Číselné hodnoty popisující návrat do původního stavu jsou vyjádřeny v tabulce 9. Je zároveň nutné brát v potaz, že sice k výkyvu došlo již čtvrtý den, ale u přiřazení ranní buňky se projevil až pátý den.

Typ buňky	Hodnota před výkyvem (4.den)	Hodnota den po výkyvu (6.den)	Hodnota 2 dny po výkyvu (7. den)	Rozdíl dnu před výkyvem a 2 dny po výkyvu
Ranní buňka – hlavní sada	90 913	85 251	89 016	-1 897
Ranní buňka – doplňující sada	50 156	42 923	49 614	-542

Tabulka 9 - Regenerace po výkyvu – ranní buňka.

Rozdíl mezi hodnotami dne před výkyvem a 2 dnech po výkyvu nepřesahuje 3 % (u večerní buňky pro SIM karty z hlavní datové sady jde konkrétně o 2.1 %). Lze tedy uvažovat, že se hodnoty pro detekci večerních buněk vrátily k hodnotám před výpadkem za 2 dny.

7.3. Analýza výkyvu z hlediska mobility

V této kapitole je zkoumáno, jak se mění zaznamenaná mobilita mobilních terminálů během výpadku a jaký vliv tyto změny mají na správnou detekci a určení signifikantních buněk pro každou SIM kartu. Analyzovány jsou spojené datové sady (hlavní a doplňující) SIM karet během 15 dnů mapujících výpadek. Tyto datové sady tedy obsahují 200 000 záznamů (každá z těchto datových sad obsahuje 100 000 záznamů SIM karet z hlavní datové sady a 100 000 záznamů SIM karet z doplňující datové sady).

7.3.1. Změna zaznamenané mobility při výkyvu

V této kapitole jsou analyzovány změny zaznamenané mobility jak na úrovni základnových stanic, tak na úrovni samotných buněk mobilní sítě. Analyzuje se změna mobility v období od 2. do 6. dne zkoumaného období. Všechny tyto dny byly pracovní, lze tedy vyloučit změnu mobility z důvodu rozdílné mobility SIM karet během víkendu.

7.3.1.1. Změna mobility na úrovni základnových stanic

Z datových sad lze zjistit, ke kolika základnovým stanicím se každý mobilní terminál během dne připojil. Rozmezí počtu základnových stanic, ke kterým se jednotlivý mobilní terminál připojil, se pohybuje od jednotek až po hodnoty nad tisíc základnových stanic.

Jelikož je rozmezí tohoto parametru široké a hodnoty pro četnost navštívených základnových stanic se velmi liší, byly jednotlivé četnosti navštívených základnových stanic jedním mobilním terminálem rozřazeny do kategorií:

- Kategorie 1 – do této kategorie se řadí záznamy SIM karet, které se během zkoumaného dne připojily k právě jedné základnové stanici. Jde o mobilní terminály, které během dne nevykazovaly žádnou, nebo případně velmi malou mobilitu.
- Kategorie 2 – sem byly zařazeny záznamy mobilních terminálů, které se připojily ke 2 až 4 základnovým stanicím během zkoumaného dne. Tyto SIM karty tedy vykazovaly vyšší mobilitu než SIM karty z Kategorie 1.
- Kategorie 3 – do této kategorie patří záznamy mobilních terminálů připojivších se k 5 až 9 základnovým stanicím během zkoumaného dne. Mobilita těchto SIM karet náležejících k těmto záznamům byla tedy opět vyšší než u předchozích dvou kategorií.

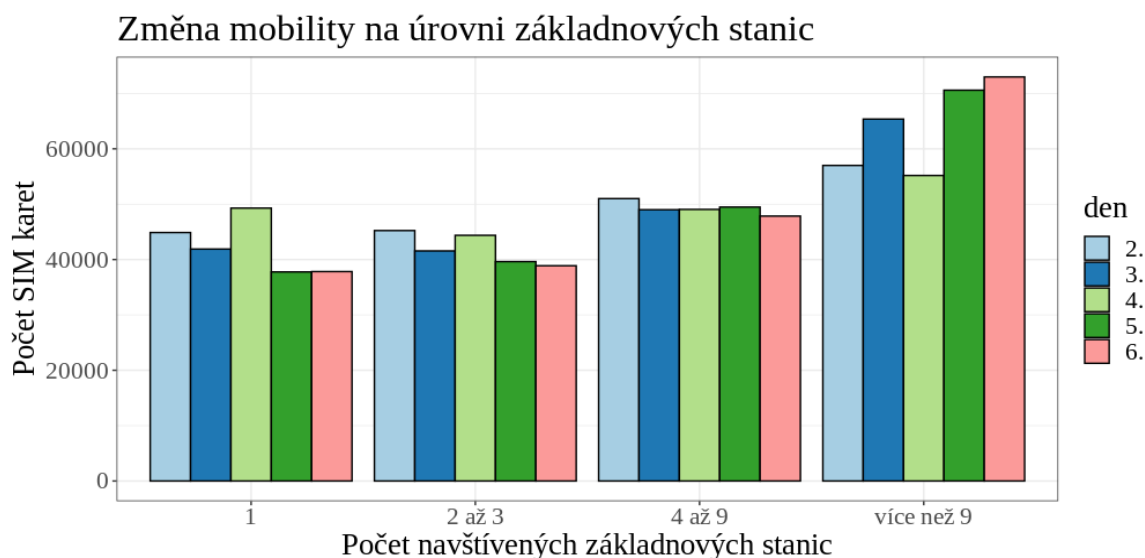
- Kategorie 4 – sem se řadí záznamy mobilních terminálů s vysokou mobilitou. Jde o záznamy SIM karet, které během zkoumaného dne navštívily zónu více než 9 základnových stanic.

V datových sadách se také objevily záznamy obsahující informaci, že se určitý mobilní terminál nepřipojil v daný den k žádné základnové stanici, přestože má v datové sadě svůj záznam. Tyto záznamy byly vyhodnoceny jako neprůkazné a pro následné vizualizace nebyly uvažovány. V následujících analýzách je na ně odkazováno jako na „neprůkazné záznamy“. Tabulka 10 zobrazuje změnu zaznamenané mobility ve zkoumaných dnech.

Den	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Neprůkazné záznamy
2.	44 881	45 238	51 009	57 000	1 872
3.	41 896	41 564	49 003	65 374	2 163
4.	49 291	44 379	49 057	55 185	2 088
5.	37 766	39 629	49 481	70 594	2 530
6.	37 830	38 882	47 851	72 989	2 448

Tabulka 10 - Změna mobility na úrovni základnových stanic.

Na základě tabulky 10 byl vygenerován graf na obrázku 17, který slouží k lepší představě o změnách mobility na úrovni základnových stanic během výkyvu. Graf byl vygenerován kódem, který je uveden v Příloze A jako kód **bap08.R**. V tomto kódu jsou nejdříve vypočítány četnosti pro jednotlivé počty navštívených stanic pomocí funkce *sum()* a logických operací jazyka R. Tyto četnosti jsou následně uloženy do datového rámce, který je vykreslen pomocí funkce *ggplot()* a její příbuznou funkcí *geom_bar()*.



Obrázek 17 - Změna mobility na úrovni základnových stanic.

Z grafu na obrázku 17 je patrné, že v den výkyvu (čtvrtý den) došlo k určitým změnám v záznamech mobility oproti dnu před výkyvem, tedy dnu třetímu. V den výkyvu došlo k nárůstu počtu SIM karet v Kategorii 1. Jde o kategorii pro mobilní terminály s nízkou mobilitou, kde je terminál zaznamenan právě jednou základnovou stanicí během dne. Nárůst v této kategorii činil 7 395 záznamů. Šlo o nárůst z 41 896 záznamů na hodnotu

49 291 záznamů. V následujících dnech došlo k zpětnému poklesu v této kategorii. Hodnoty v dnech po výkyvu byly dokonce o více jak 4 tisíce menší než před výkyvem.

Zároveň v den výkyvu došlo k většímu poklesu počtu SIM karet v Kategorii 4. Pokles činil 10 189 záznamů. Šlo o pokles z 65 374 záznamů na hodnotu 55 185. Po výkyvu došlo opět ke zpětnému nárůstu dokonce na hodnoty o více jak 5 tisíc vyšší než před výkyvem.

Tento nárůst mobilních terminálů s nízkou mobilitou a pokles mobilních terminálů s vysokou mobilitou potvrzuje domněnku, že během čtvrtého dne došlo k výpadku, kdy určité mobilní terminály přestaly být zaznamenávané, což způsobilo údajný pokles mobility. Tento pokles nejspíš nebyl způsobem samotným poklesem mobility terminálů, nýbrž šlo pravděpodobně o výpadek na rádiovém rozhraní, který ovlivnil export dat, ze kterých plyne údajná snížená mobilita během čtvrtého dne.

7.3.1.2. Změna mobility na úrovni buněk

Analogickým způsobem k analýze v kapitole 7.3.1.1. byla zkoumána změna mobility na úrovni buněk mobilní sítě. Z datových sad bylo zjištěno, v kolika buňkách se jednotlivé mobilní terminály nacházely. Tyto hodnoty se pohybují opět od jednotek navštívených buněk až po nižší řády tisíců navštívených buněk. Z tohoto důvodu byly opět SIM karty rozřazeny do následujících kategorií:

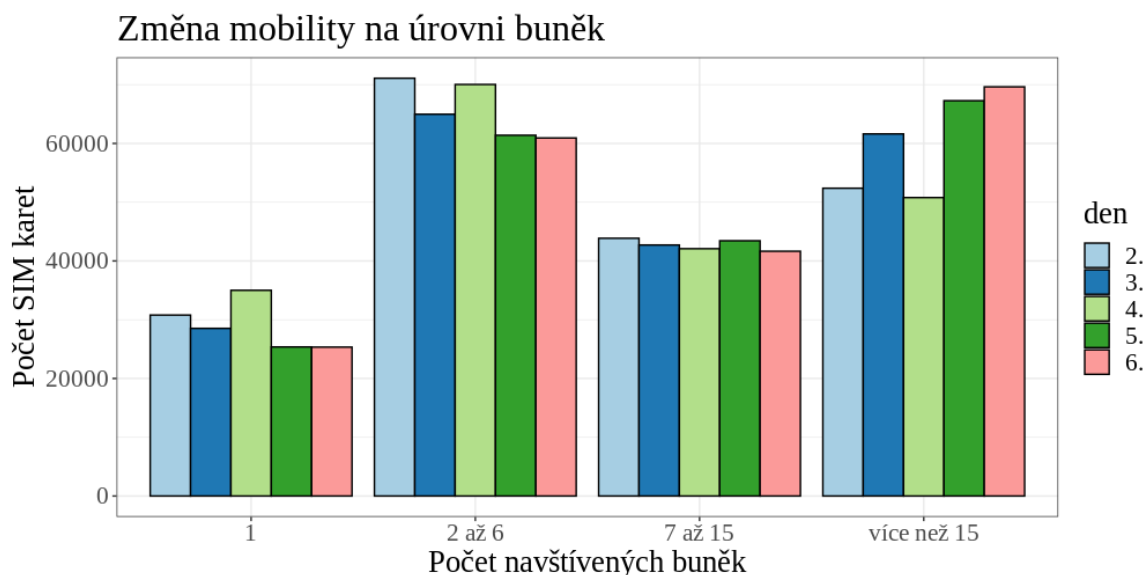
- Kategorie 1 – do této kategorie se řadí záznamy mobilních terminálů, které se během zkoumaného dne připojily k právě 1 buňce. Jde o mobilní terminály se SIM kartami, které během dne nevykazovaly žádnou, nebo případně velmi malou mobilitu.
- Kategorie 2 – sem byly zařazeny záznamy terminálů, které se připojily ke 2 až 6 buňkám během dne. Tyto SIM karty vykazovaly vyšší mobilitu než SIM karty z Kategorie 1.
- Kategorie 3 – do této kategorie patří záznamy mobilních terminálů připojivších se k 7 až 15 buňkám během zkoumaného dne. Mobilita těchto SIM karet náležejících k těmto záznamům byla tedy opět vyšší než u předchozích dvou kategorií.
- Kategorie 4 – sem se řadí záznamy SIM karet s vysokou mobilitou. Jde o záznamy SIM karet, které během zkoumaného dne navštívily více než 15 buněk mobilní sítě.

V datových sadách se opět objeví záznamy, kdy se určitý mobilní terminál nepřipojil k žádné buňce. Tyto záznamy tedy byly vyřazeny z analýzy v této kapitole jako neprůkazné. V tabulce 11 je na ně odkazováno jako na „neprůkazné záznamy“. Tabulka 11 shrnuje četnosti SIM karet náležejících do daných kategorií během zkoumaných dnů.

Den	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Neprůkazné záznamy
2.	30 793	71 096	43 861	52 378	1 872
3.	28 528	64 971	42 716	61 622	2 163
4.	35 008	70 032	42 088	50 784	2 088
5.	25 368	61 392	43 439	67 271	2 530
6.	25 338	60 929	41 654	69 631	2 448

Tabulka 11 - Změna mobility na úrovni buněk.

K efektivnější analýze byl opět vykreslen graf, který je na obrázku 18. K vykreslení byl použit totožný kód (Příloha A, kód *bap08.R*) jako k vykreslení grafu na obrázku 17. Pouze byly upraveny vstupní parametry kódu a změněny názvy os grafu a jeho titulek.



Obrázek 18 - Změna mobility na úrovni buněk.

Graf na obrázku 18 je podobný grafu na obrázku 17 a lze z něj vysledovat totožné závěry o změnách mobility terminálů mobilních sítí. Opět došlo k nárůstu SIM karet zařazených do Kategorie 1. Nárůst činil 6 480 SIM karet, konkrétně šlo o nárůst z 28 528 SIM karet na 35 008 SIM karet. Hodnoty následující den opět poklesly na nižší hodnoty, než byly před výkyvem.

Stejně jako u zkoumání změn mobility vztažené k základnovým stanicím došlo k také poklesu SIM karet v Kategorii 4, konkrétně o 10 838. Šlo o pokles z 61 622 na 50 784 SIM karet. Den po výkyvu došlo opět k nárůstu na hodnoty vyšší, než byly den před výkyvem.

Výsledky analýzy mobility SIM karet z pohledu buněk přesně kopírují výsledky analýzy mobility z pohledu základnových stanic. Toto souhlasí s domněnkou, že k výkyvu došlo během čtvrtého zkoumaného dne.

7.3.2. Vliv mobility na přiřazení signifikantních buněk

V této kapitole je zkoumáno, jak se mění úspěšnost přiřazení signifikantní buňky SIM kartě na základě její mobility. Mobilita je odvozena od počtu základnových stanic, ke kterým se daný mobilní terminál ve zkoumaný den připojil.

Analýzu by bylo možné provést i pro mobilitu založenou na základě navštívených buněk mobilní sítě, ale předchozí kapitola ukázala analogicky stejné výsledky změny mobility jak pro základnové stanice, tak pro buňky. Z tohoto důvodu byla vybrána pouze jedna varianta, a to analýza založená na mobilitě odvozené od základnových stanic.

SIM karty byly rozděleny podle mobility do stejných kategorií jako v kapitole 7.3.1.1. Kategorie 1 obsahuje SIM karty s nejnižší mobilitou a Kategorie 4 naopak SIM karty, které podle záznamů vykazovaly nejvyšší mobilitu.

Pro každý typ signifikantní buňky byla zkoumána úspěšnost přiřazení v závislosti na kategoriích ve zkoumaném období. Tato úspěšnost byla zaznamenána v procentech, jelikož se počty SIM karet v jednotlivých kategoriích liší. Číselné hodnoty vyjádřené jinak, než procentuálně by nebyly vypovídající. Tabulka 12 obsahuje veškeré procentuální hodnoty zaznamenané v této analýze. Dny výkyvu jsou v tabulce označeny oranžovou barvou.

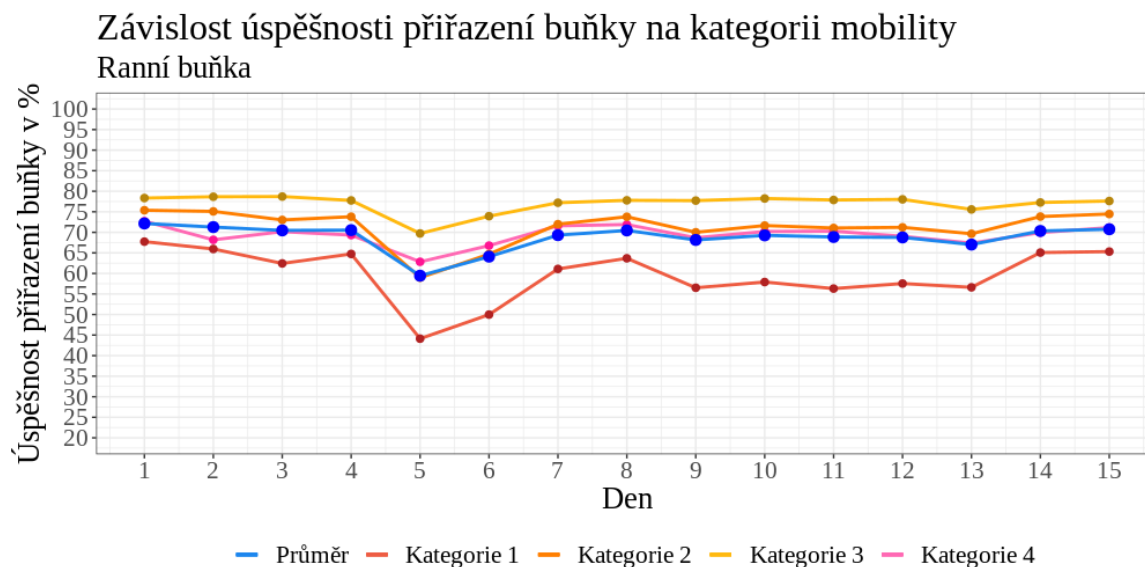
Den	Ranní buňka					Denní buňka				
	Kategorie					Kategorie				
	Průměr	1	2	3	4	Průměr	1	2	3	4
1	72.2	67.7	75.4	78.3	72.7	66.5	29.3	78.4	87.7	87.7
2	71.3	65.9	75.1	78.7	68.2	75.0	31.3	81.0	91.9	92.1
3	70.5	62.4	73.0	78.7	70.2	78.0	34.6	81.5	93.4	94.6
4	70.5	64.7	73.8	77.8	69.3	83.0	64.5	85.8	93.0	91.6
5	59.4	44.1	59.0	69.7	62.8	80.0	46.6	81.9	92.2	91.2
6	64.1	50.0	64.7	73.9	66.8	78.8	42.0	81.4	91.6	90.6
7	69.3	61.1	72.0	77.2	71.6	71.8	34.1	78.7	89.1	91.2
8	70.5	63.7	73.8	77.8	71.9	69.5	33.4	78.9	87.9	88.6
9	68.1	56.5	70.0	77.7	68.7	79.7	39.0	82.5	92.8	94.1
10	69.3	57.9	71.6	78.2	70.2	79.4	37.7	82.3	93.2	94.7
11	68.9	56.3	71.1	77.9	70.3	80.2	39.4	83.0	93.1	94.7
12	68.8	57.5	71.2	78.0	69.0	79.7	38.6	82.4	93.2	93.9
13	67.0	56.6	69.6	75.6	67.4	78.2	38.1	81.5	91.9	91.7
14	70.3	65.1	73.8	77.3	69.9	71.3	32.6	79.8	89.7	91.9
15	70.8	65.3	74.5	77.6	71.2	67.6	31.5	78.7	87.3	86.2
Den	Večerní buňka					Domovská buňka				
	Kategorie					Kategorie				
	Průměr	1	2	3	4	Průměr	1	2	3	4
1	78.4	72.8	81.4	84.8	80.7	56.4	61.1	64.3	61.1	40.7
2	79.4	70.6	81.7	85.9	81.3	56.0	57.0	61.8	63.1	46.2
3	78.2	68.0	80.4	86.3	79.9	56.9	55.3	62.8	65.9	49.2
4	58.1	35.4	55.1	69.3	73.2	39.4	24.8	41.0	51.2	42.1
5	77.0	63.6	78.5	85.7	80.0	46.0	37.7	50.3	57.6	41.7
6	76.8	63.6	77.5	85.0	80.3	47.0	42.7	53.8	57.6	40.2
7	77.7	68.9	80.3	85.0	81.2	53.1	53.6	60.3	59.2	44.2
8	77.5	69.9	80.8	84.9	80.1	53.9	56.6	62.7	60.5	39.6
9	77.0	64.2	78.8	85.2	79.6	53.0	48.6	59.2	63.3	46.0
10	77.5	64.6	79.7	85.7	80.2	54.8	49.5	61.0	64.5	48.8
11	77.4	64.9	78.9	85.8	79.8	54.3	49.5	60.4	64.2	47.9
12	77.1	64.4	79.1	85.6	79.3	53.5	49.5	60.3	64.0	45.8
13	76.8	64.7	78.4	84.3	79.8	49.1	48.5	57.7	57.8	39.9
14	77.5	69.9	80.4	84.6	80.0	53.6	56.2	60.9	58.6	42.7
15	77.8	71.8	81.0	85.0	79.5	54.4	58.5	63.3	60.2	38.8

Tabulka 12 - Procentuální úspěšnost přiřazení buněk v závislosti na mobilitě.

Na základě dat z tabulky 12 byly také vykresleny grafy pro každou zkoumanou buňku zvlášť. Tyto grafy byly vygenerovány kódem, který je k nalezení v Příloze A jako kód **bap09.R**. Tento kód zpracovává graf pro domovskou buňku. Pro vykreslení grafů pro jiné buňky je nutné změnit parametry uvnitř for cyklu tak, aby se do vytvářeného datového rámce zapisovaly hodnoty pro jinou vybranou buňku. V každém běhu for cyklu jsou vybrány záznamy splňující kritéria jednotlivých kategorií. Z těchto záznamů je pro každou kategorii vypočítána úspěšnost záznamů, která je následně zaznamenána do tvořeného datového rámce. Výsledný datový rámec je vykreslen funkcí **ggplot()** a jejich příbuznými funkcemi **geom_point()** a **geom_line()**. Výsledkem jsou grafy na obrázcích 19, 20, 21 a 22, tedy pro ranní, denní, večerní a domovskou buňku.

7.3.2.1. Vliv mobility na přiřazení ranní buňky

Z grafu na obrázku 19 je patrné, že úspěšnost zaznamenání ranní buňky u SIM karet s nízkou mobilitou (Kategorie 1) je viditelně nižší než u ostatních kategorií. Ve zkoumaném období je tento parametr pro Kategorii 1 průměrně o 9.1 % nižší než průměr všech kategorií. Úspěšnost určení ranní buňky pro SIM karty s velmi vysokou mobilitou, tedy z Kategorie 4, je ve všech případech nižší než stejný parametr pro Kategorie 2 a 3. Hodnota tohoto parametru pro Kategorii 4 se pohybuje ve zkoumaných dnech blízko hodnoty průměru.



Obrázek 19 - Závislost výkyvu na mobilitě – ranní buňka.

Jak již bylo dříve zmíněno, pro ranní buňku je, co se týče výkyvu, signifikantní pátý den. Je uvažováno, že k výkyvu došlo až během čtvrtého dne, tudíž ranní buňka čtvrtý den byla ještě zaznamenána bezchybně. Pátý den došlo u Kategorie 1 k propadu z 64.7 % na 44.1 %, tedy k propadu o 20.6 %. U ostatních kategorií se výkyv projevil také. Projev výkyvu ale u nich nebyl tak výrazný jako u Kategorie 1. Poklesy u těchto kategorií se pohybují v rozmezí 6 % až 15 %. Zmíněné hodnoty jsou shrnuty v tabulce 13.

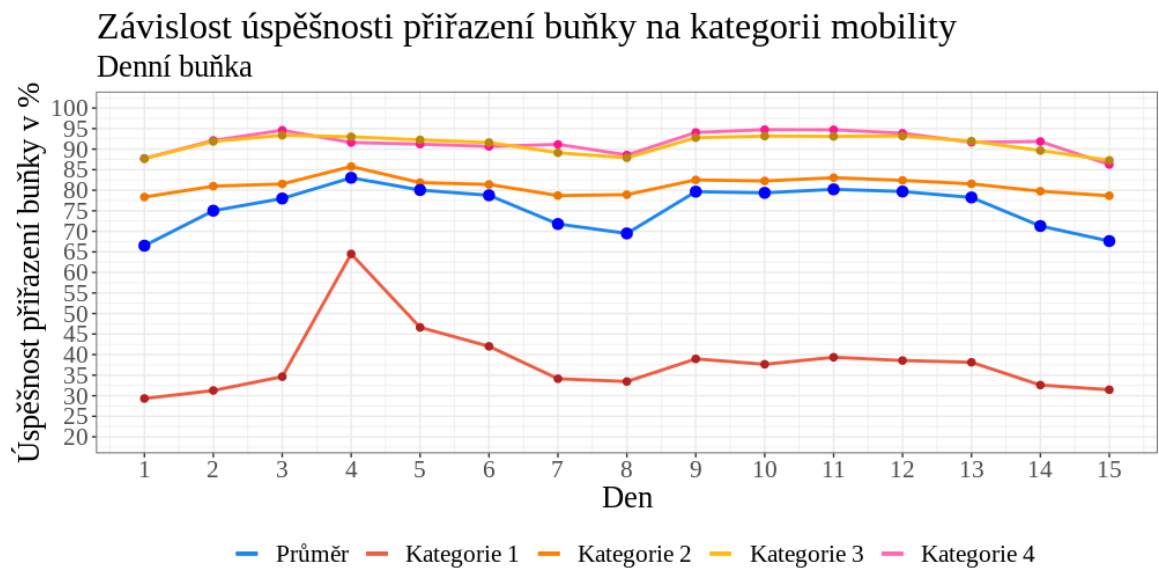
Kategorie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl
Průměr	70.5 %	59.4 %	-11.1 %
Kategorie 1	64.7 %	44.1 %	-20.6 %
Kategorie 2	73.8 %	59.0 %	-14.8 %
Kategorie 3	77.8 %	69.7 %	-8.0 %
Kategorie 4	69.3 %	62.8 %	-6.5 %

Tabulka 13 - Závislost výkyvu na mobilitě – ranní buňka.

Z těchto hodnot je patrné, že negativní ovlivnění úspěšnosti zaznamenávání ranní buňky vlivem výkyvu roste s klesající mobilitou SIM karet. Jinak řečeno, SIM karty s nízkou mobilitou jsou ovlivněny více než SIM karty s mobilitou vysokou. Úspěšnost zaznamenání ranní buňky v případě nízké mobility při výkyvu klesá strměji.

7.3.2.2. Vliv mobility na přiřazení denní buňky

Graf na obrázku 20 mapuje úspěšnost přiřazení denní buňky ve zkoumaném období v závislosti na kategoriích mobility, do kterých byly SIM karty rozřazeny. Opět jako v předchozí kapitole je úspěšnost přiřazení buňky SIM kartám z Kategorie 1, kategorie sdružující SIM karty s nízkou mobilitou, znatelně nižší než u ostatních kategorií. Od průměru všech SIM karet se během zkoumaného období liší o průměrně 37.7 %. Ostatní kategorie se pohybují nad průměrem.



Obrázek 20 - Závislost výkyvu na mobilitě – denní buňka.

V grafu na obrázku 20 je viditelné, že v den výkyvu (čtvrtý den) nedošlo k poklesu úspěšnosti určení denní buňky, nýbrž došlo k nárůstu o 29.9 % (z 34.6 % třetí den na 64.5 % čtvrtý den). Toto je přímý opak toho, co je pozorovatelné u všech ostatních buněk. Ostatní kategorie SIM karet zaznamenaly pouze lehké změny v porovnání s Kategorií 1. Tyto změny jsou shrnuty v tabulce 14.

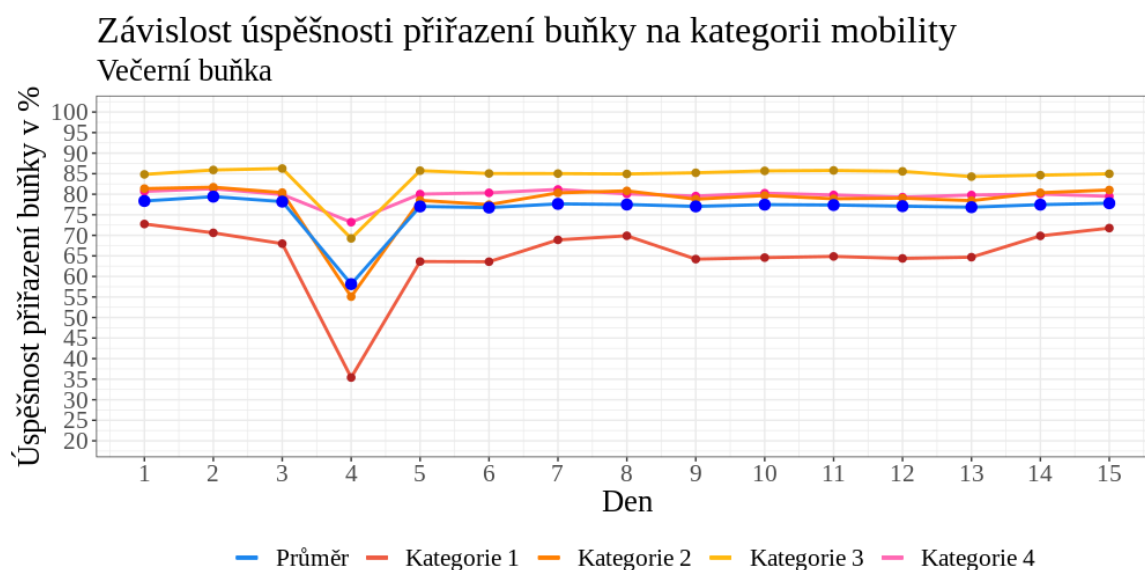
Kategorie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl
Průměr	78.0 %	83.0 %	5.0 %
Kategorie 1	34.6 %	64.5 %	29.9 %
Kategorie 2	81.5 %	85.8 %	4.3 %
Kategorie 3	93.4 %	93.0 %	-0.4 %
Kategorie 4	94.6 %	91.6 %	-3.0 %

Tabulka 14 - Závislost výkyvu na mobilitě – denní buňka.

Dalo by se říct, že při určování denní buňky jsou výkyvem ovlivněny pouze SIM karty, které neprokazují žádnou, nebo případně velmi malou mobilitu (Kategorie 1 zahrnuje SIM karty, které se přes den připojily právě k jedné základnové stanici). SIM karty s větší mobilitou se zdají výpadkem neovlivněny, co se týče určování jejich denní buňky. Hodnoty procentuálních změn, které byly pozorovány během výkyvu u všech kategorií mimo Kategorie 1, se nijak nevymykají hodnotám změn ve ostatních dnech.

7.3.2.3. Vliv mobility na přiřazení večerní buňky

Další určovanou buňkou je večerní buňka. Závislost jejího určování na zavedených kategoriích SIM karet zobrazuje graf na obrázku 21. Opět je zde patrné, že určování večerní buňky pro Kategorii 1 má průměrně nižší úspěšnost než pro ostatní kategorie. Konkrétně se hodnoty úspěšnosti určení večerní buňky liší v průměru o 11.1 % od průměrné hodnoty všech SIM karet.



Obrázek 21 - Závislost výkyvu na mobilitě – večerní buňka.

Pro večerní buňku je, co se týče výkyvu, signifikantní čtvrtý den. Nejmarkantnější je výkyv opět vidět u SIM karet z Kategorie 1, kde se výkyv projevil poklesem o 32.6 % (z 68.0 % třetí den na 35.4 % čtvrtý den). Naopak k nejmenšímu procentuálnímu propadu došlo u SIM karet s vysokou mobilitou (SIM karet z Kategorie 4). Zde byl propad pouze o 6.7 %. Šlo o propad z 79.9 % na 73.2 %. U SIM karet z Kategorii 2 a došlo k propadu o 25.3 %, resp. 17.0 %. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tabulce 13.

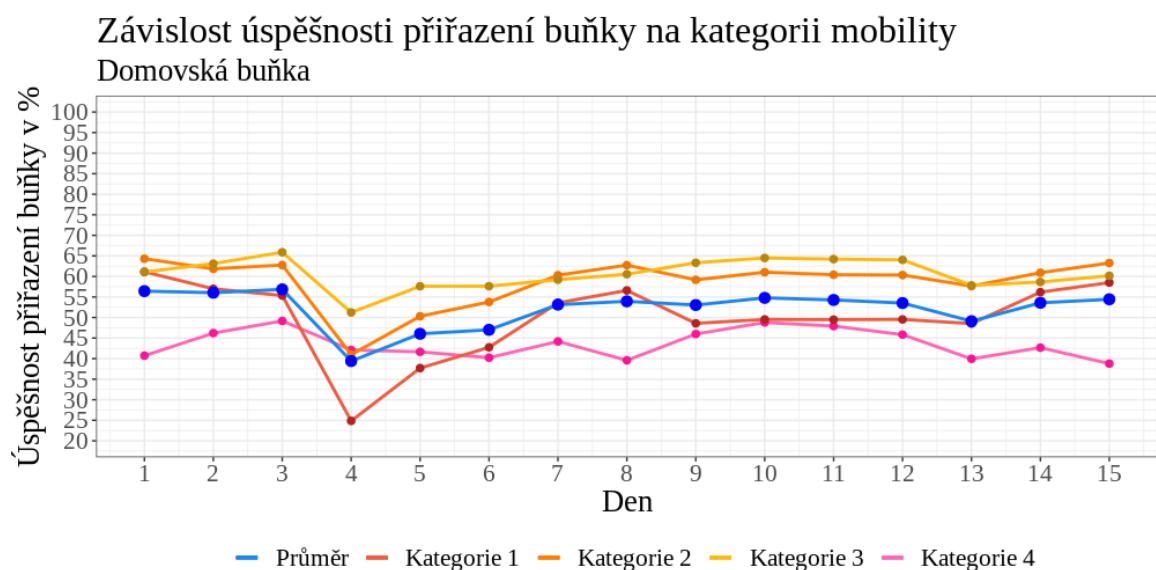
Kategorie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl
Průměr	78.2 %	58.1 %	-20.1 %
Kategorie 1	68.0 %	35.4 %	-32.6 %
Kategorie 2	80.4 %	55.1 %	-25.3 %
Kategorie 3	86.3 %	69.3 %	-17.0 %
Kategorie 4	79.9 %	73.2 %	-6.7 %

Tabulka 15 - Závislost výkyvu na mobilitě – večerní buňka.

Výkyv se u všech kategorií při identifikaci večerní buňky projevuje poklesem, což je stejné jako u ostatních buněk mimo buňky denní. Opět jako u ranní buňky platí, že SIM karty s nízkou mobilitou jsou ovlivněny více než SIM karty s vysokou mobilitou.

7.3.2.4. Vliv mobility na přiřazení domovské buňky

Domovská buňka je ze všech buněk přiřazována s nejnižší úspěšností. Ve zkoumaném období tato úspěšnost nepřesáhla 70 %. Toto lze mimo jiného vyčíst z grafu na obrázku 22. V případě domovské buňky má až na dny kolem výkyvu nejnižší úspěšnost určení Kategorie 4, tedy SIM karty s nevyšší mobilitou. Tento parametr pro Kategorii 4 se v průměru liší od průměru všech SIM karet o 8.5 %. Hodnoty úspěšnosti určení domovské buňky pro Kategorie 2 a 3 se po celé období pohybují nad průměrnou hodnotou. U Kategorie 1 je vývoj křivky velmi nekonzistentní a je hodně ovlivněn sledovaným výkyvem.



Obrázek 22 - Závislost výkyvu na mobilitě – domovská buňka.

V případě domovské buňky je pro výkyv opět sledován čtvrtý den, při kterém dochází ke značným poklesům u všech křivek zobrazených v grafu na obrázku 22. Nejrapidnější pokles je patrný u Kategorie 1. Pokles pro tuto kategorii činí 30.5 %. Došlo k poklesu z 55.3 % na 24.8 %. K nejmenšímu poklesu došlo u Kategorie 4. Tato kategorie se SIM kartami prokazujícími nejvyšší mobilitu zaznamenala pokles pouze o 7.1 %, a to konkrétně z 49.2 % na hodnotu 42.1 %. K poklesu došlo i u Kategorií 2 a 3, kde hodnoty úspěšnosti zaznamenání domovské buňky pokles o 21.8 %, resp. o 14.7 %.

Kategorie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl
Průměr	56.9 %	39.4 %	-17.5 %
Kategorie 1	55.3 %	24.8 %	-30.5 %
Kategorie 2	62.8 %	41.0 %	-21.8 %
Kategorie 3	65.9 %	51.2 %	-14.7 %
Kategorie 4	49.2 %	42.1 %	-7.1 %

Tabulka 16 - Závislost výkyvu na mobilitě – domovská buňka.

Zmíněné hodnoty poklesů jsou zaznamenány v tabulce 16. I pro domovskou buňku platí trend, že k většímu poklesu dochází u kategorií se SIM kartami s nízkou mobilitou. Jediná buňka, která se tomuto pravidlu vymyká je denní buňka, kde je možné vysledovat opačný trend.

7.4. Analýza výkyvu z geografického hlediska

Další pohledem na výkyv může být jeho zkoumání z geografického hlediska. Česká republika je rozdělena pro již několikrát zmíněný projekt meziuniverzitní spolupráce na 190 regionů. Každý z těchto regionů má svůj jednoznačný identifikátor, který odpovídá znakům AAA z řetězce identifikátoru buňky popsáno v kapitole 5.2. Cílem analýzy v této kapitole je zjistit, zdalipak nejsou některé ze zmíněných 190 regionů viditelně náchylnější k tomu být ovlivněny výkyvem na rádiovém rozhraní.

Analyzovány byly opět pouze dny, které bezprostředně mapují výpadek. Pro denní buňku jde o rozdíl mezi čtvrtým a pátým dnem zkoumaného období a pro ostatní buňky, jmenovitě denní, večerní a domovskou buňku, je důležitý rozdíl mezi třetím a čtvrtým pozorovaným dnem. Hodnoty počtů zaznamenání zmíněných buněk v jednotlivých regionech v signifikantních dnech, rozdíl mezi těmito dny a rozdíl vyjádřený jako procentuální změna byly zaznamenány pro každou buňku zvlášť. Hodnoty pro ranní buňku jsou v tabulce 17, pro denní buňku v tabulce 18, večerní buňka je zaznamenána v tabulce 19 a domovská buňka v tabulce 20.

Tyto tabulky byly vygenerovány pomocí kódu z Přílohy A **bap10.R**. Po načtení datových sad z ovlivněných dnů dojde k vypreparování informace o regionu z identifikačního řetězce buňky. Tento proces je nazýván „parsování“, jak bylo zmíněno v kapitole 6.1. V této kapitole je také popsána funkce **F.parser()**, kterou byl kód z Přílohy A **bap10.R** inspirován. Také je v něm použita jako hlavní část funkce **substr()**, pomocí které dojde k procesu „parsování“. V druhé části kódu je pomocí funkce **table()** spočtena četnost přiřazených daných buněk v každém regionu.

Jelikož je regionů 190, v některých z nich byl přiřazen malý počet buněk řádu desítek, či stovek. Tyto hodnoty jsou malé oproti hodnotám v jiných buňkách a mohou proto být málo průkazné. Z tohoto důvodu byly vzniklé tabulky vyfiltrovány tak, že obsahují pouze záznamy takových regionů, ve kterých došlo v den před výkyvem přiřazení minimálně 900 zkoumaných buněk. Zmíněné tabulky 17 až 20 pro jednotlivé buňky se nacházejí na následujících stránkách.

Region	Den 4	Den 5	Rozdíl	Rozdíl v %	Region	Den 4	De n 5	Rozdíl	Rozdíl v %
A01	2 288	2 310	22	1.0	LOU	930	890	-40	-4.3
A02	1 181	1 122	-59	-5.0	MBO	2 407	2 059	-348	-14.5
A03	1 327	1 121	-206	-15.5	MEL	1 321	1 161	-160	-12.1
A04	2 218	1 916	-302	-13.6	MOS	1 044	853	-191	-18.3
A05	1 623	1 433	-190	-11.7	NCH	1 306	1 105	-201	-15.4
A06	1 963	1 670	-293	-14.9	NOJ	2 066	1 772	-294	-14.2
A08	1 641	1 572	-69	-4.2	NYM	1 245	1 041	-204	-16.4
A09	1 236	1 114	-122	-9.9	OJH	1 022	827	-195	-19.1
A10	1 638	1 449	-189	-11.5	OLC	3 425	2 705	-720	-21.0
A11	997	917	-80	-8.0	OPV	2 206	1 860	-346	-15.7
BER	1 162	1 011	-151	-13.0	P03	1 072	920	-152	-14.2
BLK	1 059	867	-192	-18.1	PAR	1 910	1 595	-315	-16.5
BNS	1 417	1 181	-236	-16.7	PBR	1 066	940	-126	-11.8
BRE	1 705	1 576	-129	-7.6	PHV	2 962	2 406	-556	-18.8
BRU	1 090	885	-205	-18.8	PHZ	2 361	1 854	-507	-21.5
BST	1 538	1 418	-120	-7.8	PRS	1 248	966	-282	-22.6
BVE	2 883	2 483	-400	-13.9	PRV	1 469	1 233	-236	-16.1
CBU	1 921	1 575	-346	-18.0	RKN	1 239	1 073	-166	-13.4
CHB	1 431	1 182	-249	-17.4	SEM	913	732	-181	-19.8
CHO	1 216	1 133	-83	-6.8	SUM	1 487	1 190	-297	-20.0
CHR	938	781	-157	-16.7	SVT	1 482	1 180	-302	-20.4
CLP	1 088	949	-139	-12.8	TAB	958	827	-131	-13.7
DEC	1 340	914	-426	-31.8	TCH	1 536	1 410	-126	-8.2
FMI	2 350	2 086	-264	-11.2	TEP	1 196	900	-296	-24.7
HBR	1 009	879	-130	-12.9	TRB	1 080	913	-167	-15.5
HKR	2 243	1 851	-392	-17.5	TRU	1 538	1 330	-208	-13.5
HOD	1 406	1 112	-294	-20.9	UHR	1 441	1 200	-241	-16.7
JIC	927	843	-84	-9.1	UOR	1 781	1 584	-197	-11.1
JIH	1 381	1 126	-255	-18.5	UST	1 510	1 292	-218	-14.4
KAR	3 584	3 110	-474	-13.2	VSE	2 038	1 699	-339	-16.6
KLD	1 881	1 500	-381	-20.3	VYS	916	821	-95	-10.4
KRO	1 159	944	-215	-18.6	XXA	3 463	2 480	-983	-28.4
KVR	1 535	1 182	-353	-23.0	ZDR	1 413	1 174	-239	-16.9
LIB	2 102	1 681	-421	-20.0	ZLI	2 536	2 020	-516	-20.3
LIT	1 123	966	-157	-14.0	ZNO	1 206	1 072	-134	-11.1

Tabulka 17 - Výkyv z geografického hlediska – ranni buňka.

Region	Den 3	Den 4	Rozdíl	Rozdíl v %	Region	Den 3	Den 4	Rozdíl	Rozdíl v %
A01	4 838	4 875	37	0.8	LIB	2 606	2 601	-5	-0.2
A02	1 310	1 437	127	9.7	LIT	1 089	1 233	144	13.2
A03	1 078	1 164	86	8.0	MBO	2 525	2 820	295	11.7
A04	2 446	2 714	268	11.0	MEL	1 080	1 207	127	11.8
A05	2 031	1 987	-44	-2.2	MOS	1 322	1 427	105	7.9
A06	2 557	2 468	-89	-3.5	NCH	1 945	1 923	-22	-1.1
A07	934	1 066	132	14.1	NOJ	1 845	1 962	117	6.3
A08	1 982	2 064	82	4.1	NYM	1 157	1 335	178	15.4
A09	1 059	1 237	178	16.8	OLC	3 040	3 464	424	13.9
A10	1 489	1 677	188	12.6	OMO	972	1 103	131	13.5
A11	953	1 036	83	8.7	OPV	2 119	2 292	173	8.2
BER	982	1 209	227	23.1	P03	1 494	1 553	59	3.9
BLK	949	1 017	68	7.2	PAR	1 926	2 022	96	5.0
BNS	1 186	1 449	263	22.2	PBR	985	1 070	85	8.6
BRE	4 760	4 013	-747	-15.7	PHV	2 750	3 428	678	24.7
BRU	1 257	1 306	49	3.9	PHZ	2 007	2 149	142	7.1
BST	2 280	2 330	50	2.2	PRS	957	1 212	255	26.6
BVE	2 369	2 895	526	22.2	PRV	1 306	1 611	305	23.4
CBU	1 947	2 120	173	8.9	RKN	1 230	1 327	97	7.9
CHB	2 987	2 886	-101	-3.4	SUM	1 190	1 351	161	13.5
CHO	1 766	1 729	-37	-2.1	SVT	1 239	1 464	225	18.2
CKR	1 326	1 172	-154	-11.6	TCH	3 529	2 947	-582	-16.5
CLP	982	1 043	61	6.2	TEP	1 242	1 310	68	5.5
DEC	1 716	1 908	192	11.2	TRB	918	1 058	140	15.3
DOM	1 782	1 738	-44	-2.5	TRU	1 431	1 618	187	13.1
FMI	3 307	3 151	-156	-4.7	UHR	1 599	1 670	71	4.4
HKR	2 167	2 355	188	8.7	UOR	1 770	1 922	152	8.6
HOD	1 473	1 599	126	8.6	UST	3 242	2 643	-599	-18.5
JES	1 006	1 095	89	8.8	VSE	2 042	2 161	119	5.8
JIH	1 265	1 520	255	20.2	XXA	4 481	4 701	220	4.9
KAR	5 286	5 144	-142	-2.7	ZDR	1 198	1 462	264	22.0
KLD	1 558	1 808	250	16.0	ZLI	2 463	2 659	196	8.0
KLT	962	1 074	112	11.6	ZNO	1 485	1 433	-52	-3.5
KVR	1 553	1 811	258	16.6					

Tabulka 18 - Výkyv z geografického hlediska – denní buňka.

Region	Den 3	Den 4	Rozdíl	Rozdíl %	Region	Den 3	Den 4	Rozdíl	Rozdíl %
A01	3 618	3 176	-442	-12.2	LIT	1158	883	-275	-23.7
A02	1 290	1 102	-188	-14.6	LOU	988	730	-258	-26.1
A03	1 330	1 141	-189	-14.2	MBO	2503	1 981	-522	-20.9
A04	2 262	1 711	-551	-24.4	MEL	1343	980	-363	-27.0
A05	1 876	1 387	-489	-26.1	MOS	1138	803	-335	-29.4
A06	2 379	1 838	-541	-22.7	NCH	1554	1 196	-358	-23.0
A07	903	658	-245	-27.1	NOJ	2240	1 667	-573	-25.6
A08	1 825	1 414	-411	-22.5	NYM	1392	1 080	-312	-22.4
A09	1 205	933	-272	-22.6	OJH	1089	806	-283	-26.0
A10	1 755	1 614	-141	-8.0	OLC	3502	2 544	-958	-27.4
A11	1 086	821	-265	-24.4	OPV	2344	1 811	-533	-22.7
A13	949	674	-275	-29.0	P03	1203	862	-341	-28.3
BER	1 325	950	-375	-28.3	PAR	2139	1 463	-676	-31.6
BLK	1 083	803	-280	-25.9	PBR	1208	803	-405	-33.5
BNS	1 429	1 061	-368	-25.8	PHV	3270	2 480	-790	-24.2
BRE	2 568	1 952	-616	-24.0	PHZ	2542	1 876	-666	-26.2
BRU	1 257	967	-290	-23.1	PLS	959	713	-246	-25.7
BST	1 790	1 424	-366	-20.4	PRS	1216	889	-327	-26.9
BVE	3 139	2 414	-725	-23.1	PRV	1596	1 131	-465	-29.1
CBU	2 102	1 456	-646	-30.7	RKN	1366	1 045	-321	-23.5
CHB	1 807	1 499	-308	-17.0	SEM	958	664	-294	-30.7
CHO	1 388	1 101	-287	-20.7	SUM	1513	1 073	-440	-29.1
CHR	988	691	-297	-30.1	SVT	1508	1 093	-415	-27.5
CLP	1 115	822	-293	-26.3	TAB	991	708	-283	-28.6
DEC	1 352	1 042	-310	-22.9	TCH	1937	1 554	-383	-19.8
DOM	1 126	903	-223	-19.8	TEP	1310	872	-438	-33.4
FMI	2 734	2 104	-630	-23.0	TRB	1169	790	-379	-32.4
HBR	1 063	797	-266	-25.0	TRU	1702	1 252	-450	-26.4
HKR	2 394	1 683	-711	-29.7	UHR	1562	1 180	-382	-24.5
HOD	1 511	1 117	-394	-26.1	UOR	2035	1 419	-616	-30.3
JIC	1 046	710	-336	-32.1	UST	1841	1 328	-513	-27.9
JIH	1 411	1 133	-278	-19.7	VSE	2298	1 563	-735	-32.0
KAR	4 233	3 390	-843	-19.9	VYS	1056	712	-344	-32.6
KLD	2 006	1 479	-527	-26.3	XXA	3917	2 442	-1 475	-37.7
KLT	953	706	-247	-25.9	ZDR	1567	1 112	-455	-29.0
KRO	1 195	879	-316	-26.4	ZLI	2747	1 930	-817	-29.7
KVR	1 624	1 193	-431	-26.5	ZNO	1380	1 022	-358	-25.9
LIB	2 358	1 801	-557	-23.6					

Tabulka 19 - Výkyv z geografického hlediska – večerní buňka.

Region	Den 3	Den 4	Rozdíl	Rozdíl %	Region	Den 3	Den 4	Rozdíl	Rozdíl %
A01	1 450	1 059	-391	-27.0	MEL	1 075	754	-321	-29.9
A03	983	788	-195	-19.8	NCH	996	725	-271	-27.2
A04	1 767	1 241	-526	-29.8	NOJ	1 777	1 190	-587	-33.0
A05	1 273	888	-385	-30.2	NYM	1 033	717	-316	-30.6
A06	1 556	1 099	-457	-29.4	OLC	2 611	1 879	-732	-28.0
A08	1 334	909	-425	-31.9	OPV	1 836	1 366	-470	-25.6
A10	1 405	928	-477	-34.0	PAR	1 684	1 121	-563	-33.4
BER	992	633	-359	-36.2	PBR	982	641	-341	-34.7
BNS	1 001	704	-297	-29.7	PHV	2 321	1 527	-794	-34.2
BRU	958	648	-310	-32.4	PHZ	1 793	1 217	-576	-32.1
BST	1 160	914	-246	-21.2	PRS	983	664	-319	-32.5
BVE	2 302	1 588	-714	-31.0	PRV	1 296	854	-442	-34.1
CBU	1 633	1 070	-563	-34.5	RKN	1 051	759	-292	-27.8
CHB	1 086	783	-303	-27.9	SUM	1 219	866	-353	-29.0
CHO	931	712	-219	-23.5	SVT	1 229	890	-339	-27.6
DEC	970	671	-299	-30.8	TEP	983	628	-355	-36.1
FMI	1 883	1 346	-537	-28.5	TRB	938	627	-311	-33.2
HKR	1 878	1 277	-601	-32.0	TRU	1 385	942	-443	-32.0
HOD	1 162	815	-347	-29.9	UHR	1 156	864	-292	-25.3
JIH	1 053	750	-303	-28.8	UOR	1 651	1 054	-597	-36.2
KAR	2 872	2 112	-760	-26.5	UST	969	678	-291	-30.0
KLD	1 558	1 104	-454	-29.1	VSE	1 918	1 249	-669	-34.9
KRO	1 000	715	-285	-28.5	XXA	2 725	1 554	-1 171	-43.0
KVR	1 234	825	-409	-33.1	ZDR	1 241	814	-427	-34.4
LIB	1 647	1 203	-444	-27.0	ZLI	2 241	1 536	-705	-31.5
MBO	1 858	1 345	-513	-27.6	ZNO	1 013	682	-331	-32.7

Tabulka 20 - Výkyv z geografického hlediska – domovská buňka.

7.4.1. Vliv geografického hlediska na přiřazení ranní buňky

V tabulce 17, která obsahuje hodnoty pro přiřazení ranní buňky, se vyskytuje 70 regionů. To jsou regiony, které splnily zmíněnou podmínku, že v den před výkyvem (v případě ranní buňky jde o čtvrtý den zkoumaného období) v nich byla minimálně 900 SIM kartám přiřazena ranní buňka.

Téměř u všech regionů došlo pátý den (první den, kdy je možné pozorovat výpadek u ranní buňky) k poklesu počtu SIM karet s přiřazenou buňkou. Medián rozdílů mezi čtvrtým a pátým dnem pro těchto 70 regionů při četnosti přiřazení ranní buňky činí -15.4 %. Pouze jediný region dosáhl přírůstku, a to region A01 o 1.0 %. Rozdíly mezi zkoumanými dny se v procentech pohybovaly od -31.8 % do právě 1.0 %. Nejhuře zasaženými regiony byly regiony DEC, XXA, TEP, KVR, PRS seřazené od regionu s největším poklesem. Tyto regiony jsou v tabulce barevně odlišeny červeně. Naopak regiony, kde se výpadek projevil nejméně, jsou zvýrazněny zeleně. Jmenovitě jde o regiony A01, A08, A02, CHO a BRE. Tyto regiony jsou seřazeny postupně od regionu s nejmenším projevem výpadku.

7.4.2. Vliv geografického hlediska na přiřazení denní buňky

Tabulka 18 obsahuje hodnoty četností SIM karet s přiřazenou denní buňkou podle regionů. V tomto a ve všech následujících případech je porovnáván třetí den se čtvrtým, protože pro tyto buňky jsou to dny, kdy je výkyv pozorovatelný nejlépe. Tato tabulka také zobrazuje pouze případy regionů, ve kterých byla v den před výkyvem přiřazena minimálně 900 SIM kartám denní buňka. V případě denní buňky jde o 67 regionů.

U převážné části regionů došlo k nárůstu počtu SIM karet se zaznamenanými buňkami, což je opět opakem toho, co je pozorováno u všech ostatních typů signifikantních buněk. Změny se pohybují v rozmezí -18.5 % a 26.6 %. Medián změny mezi třetím a čtvrtým dnem je v tomto případě 8.4 %. Mezi regiony s největší kladnou procentuální změnou v počtu zaznamenaných ranních buněk jsou regiony PRS, PHV, PRV, BER a BVE. Tyto regiony jsou seřazeny sestupně od největšího procentuálního přírůstku. Na opačném konci tabulky jsou regiony UST, TCH, BRE, CKR a FMI seřazeny od největšího propadu vzestupně. Obě skupiny regionů s extrémními hodnotami jsou vyznačeny barevně v tabulce 18.

7.4.3. Vliv geografického hlediska na přiřazení večerní buňky

Hodnoty četnosti SIM karet s přiřazenou večerní buňkou během třetího a čtvrtého dne jsou zaznamenány v tabulce 19. Kritérium pro více jak 900 SIM karet s přiřazenou večerní buňkou splnilo 75 regionů.

U úspěšnosti přiřazování večerní buňky došlo k poklesu u všech regionů. Medián změny mezi třetím a čtvrtým dnem pro určování večerní buňky -26.0 %, což je v absolutní hodnotě mnohem větší změna než u předchozích buněk. Mezi výpadkem nejvíce postižené regiony patří XXA, PBR, TEP, VYS a TRB (opět seřazeny od nejvyššího propadu), kde nejvíce postižený region z nich, XXA, zaznamenal propad o celých 37.7 %. Naopak nejméně ovlivněné regiony jsou A10, A01, A03, A02 a CHB (seřazeny od nejmenšího propadu). Region A10 zaznamenal propad pouze o 8.0 %. Všechny zmíněné regiony jsou také vyznačeny barevně v tabulce 19.

7.4.4. Vliv geografického hlediska na přiřazení domovské buňky

V tabulce 20 se nacházejí pro jednotlivé regiony celkové počty SIM karet, kterým byla úspěšně přiřazena domovská buňka během dnů mapující výkyv (třetí a čtvrtý den). V případě domovské buňky splňuje limit 900 a více SIM karet s přiřazenou buňkou jen 52 regionů.

Opět jako u večerní buňky došlo čtvrtý den ke zřetelnému propadu počtu SIM karet se zaznamenanou buňkou. Medián změny činí dokonce -30.2 %. Rozmezí změn počtu SIM karet se zaznamenanou buňkou je od -43.0 % do -19.8 %. Regiony s největším výpadkem jsou XXA, BER, UOR, TEP a VSE (seřazeny od regionu s nejvyšším propadem). Na druhé straně regiony s nejnižším propadem jsou A03, BST, CHO, UHR a OPA. Tyto regiony jsou opět barevně zvýrazněny v korespondující tabulce 20.

7.5. Analýza výkyvu z hlediska použitých mobilních sítí

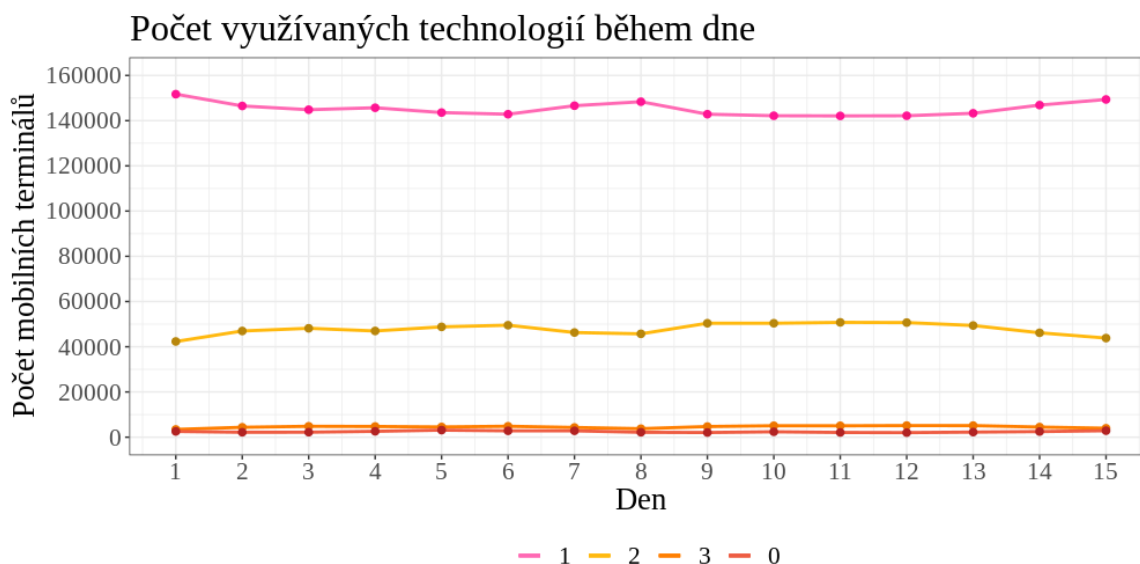
Dalším hlediskem, ze kterého je na výkyv nahlíženo, je hledisko použitých mobilních sítí různých generací a k nim vázajících se mobilních technologií. V kapitole 2.8. byly popsány všechny generace mobilních sítí, ke kterým se mohl mobilní terminál v minulosti připojit nebo ke kterým se může připojit v současnosti.

Z poskytnutých datových sad lze vyčíst, že mobilní terminály v České republice využívají technologie tří generací mobilních sítí. Používají sítě technologie GSM, což je nejznámější technologie druhé generace mobilních sítí. Dále používají technologie UMTS, tedy technologii třetí generace mobilních sítí a také využívají technologii LTE ve více různých frekvenčních pásmech (LTE800, LTE1800, LTE2100 a LTE2600). Tyto technologie LTE se řadí mezi technologie čtvrté generace mobilních sítí. Technologie 5G podle datových sad nebyly ve zkoumaném období využívány.

Ve zkoumaném období je analyzováno, zdali je nějaká z využívaných mobilních síťových technologií viditelně náchylnější k tomu být ovlivněna výkyvem.

7.5.1. Struktura využívání mobilních technologií

Na základě datových sad bylo zjištěno, že mobilní terminály se během dne mohou připojovat k sítím různých mobilních technologií. K tomu závěru se došlo z faktu, že některé SIM karty mají ve zkoumaných dnech přiřazené signifikantní buňky, kde se technologie v nich použité od sebe navzájem liší. Jak je vidět v grafu na obrázku 23, většina mobilních terminálů má po celý den přiřazené buňky, které implementují stejnou technologii. Najde se ale nezanedbatelné množství SIM karet, které mají přiřazené buňky různých technologií během dne.

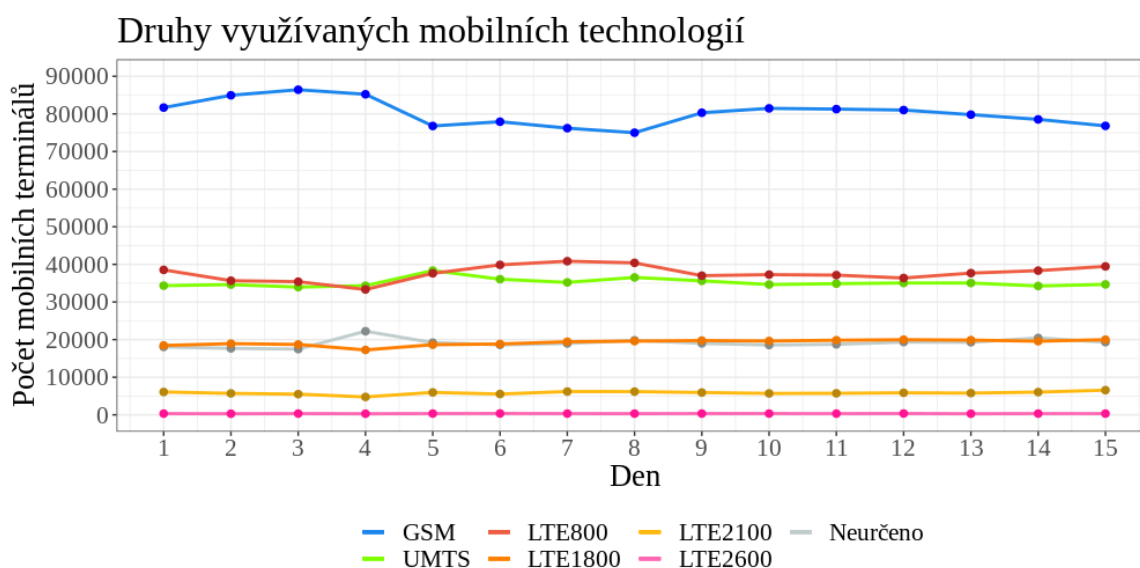


Obrázek 23 - Počet technologií využitých během dne.

Nejvíce SIM karet má přiřazené buňky právě jedné technologie. Množství těchto SIM karet se pohybuje ve většině dní ve zkoumaném období mezi 140 000 a 150 000. Následují SIM karty s přiřazenými buňkami právě dvou technologií. Těch je možné ve zkoumaném období

mezi 40 000 a 50 000. Objevují se ale i SIM karty, které mají přiřazené 3 technologie. Jejich počet ovšem nepřesáhne 10 000. U některých záznamů nebyla určena ani jedna buňka, a proto nelze určit ani kolik technologií během zkoumaných dní využili. Těchto záznamů je ale zanedbatelně.

Z důvodu zkoumání rozložení využívání technologií byl u mobilních terminálů určen parametr nazvaný dominantní technologie daného mobilního terminálu pro daný den. Jde o technologii, která se nejčastěji vyskytuje u terminálu přiřazených buněk. Není to zcela přesná metoda určení využívaných technologií, ovšem pro nastínění rozložení využití technologií je to metoda dostačující. Na základě této metody vznikl graf na obrázku 23, který zobrazuje průběh počtu mobilních terminálů používajících danou dominantní technologii ve zkoumaném období.



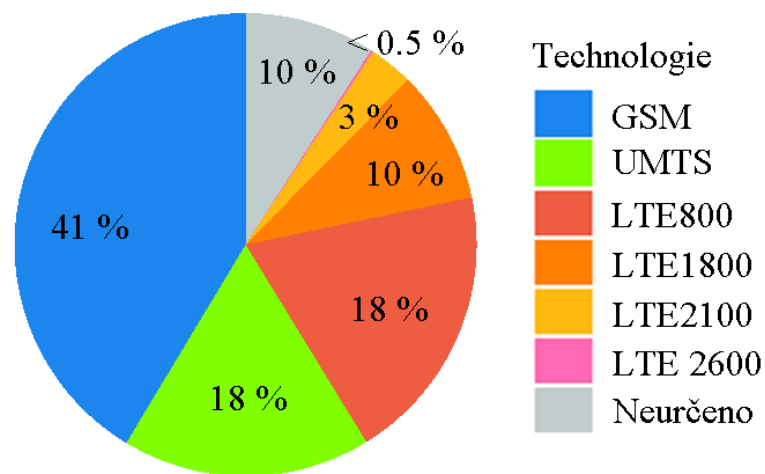
Obrázek 24 - Průběh vývoje využití druhů mobilních technologií.

Je patrné, že nejvíce využívanou technologií je technologie GSM následovaná technologiemi UMTS a LTE800. Některé technologie si drží převážně konstantní počet (LTE1800, LTE2100, LTE2600). Jiné technologie jako GSM, UMTS a LTE800 se zdají, že reagují na výkyv změnou svých počtů. V tomto grafu ovšem nejsou změny tak markantní. Více detailně se tímto ovlivněním výkyvem bude zabývat následující kapitola, kde nebude použit ke zkoumání výkyvu nepřesný parametr dominantní technologie, který slouží zejména a pouze k vyjádření přibližného rozložení využití mobilních technologií mezi mobilními terminály. Nutno také podotknout, že u značného množství terminálů se dominantní buňka nepovedla určit, a to z důvodu takového, že mobilní terminály měly např. přiřazené více technologií se stejným počtem výskytů (např. ranní buňka – GSM, denní buňka – UMTS, večerní buňka – nezaznamenáno).

Dva výše zmíněné grafy na obrázcích 23 a 24 byly vygenerovány kódem z Přílohy A **bap11.R**. Pro přípravu dat k vykreslení byly použity funkce **F.parser()** a **F.nettyp_join()** z kapitol 6.1., resp. 6.2., díky kterým došlo k vypreparování části identifikačního řetězce, která identifikuje v buňce použitou technologii a jejímu nahrazení vhodnějším identifikátorem. Tyto funkce jsou uloženy ve for cyklu, aby byl tento proces zopakován pro datové sady všech zkoumaných dní. Tento for cyklus obsahuje i vnořený for cyklus, ve

kterém dochází k zaznamenání výstupních parametrů (počet mobilních terminálů s daným počtem použitých technologií během dne a počet terminálů s využívající danou technologii jako dominantní v daný den) pomocí funkce *unique()*, logických operátorů jazyka R v kombinaci s funkcí *which()* a vytvořenou funkcí *getmode()*. Výstupem jsou dva datové rámce pro tyto dva parametry, které jsou následně vykreslovány funkcí *ggplot()* a funkcemi jí příbuznými.

Dále bylo vykresleno orientační rozložení využití mobilních technologií mezi mobilními terminály na základě parametru dominantní buňky. K tomu byl použit kód z Přílohy A *bap12.R*. V první části kódu dochází k úpravě formátu dat tak, aby byl vhodný k vykreslení. Druhá část kódu je samotné vykreslení do koláčového grafu opět pomocí funkce *ggplot()*. Výsledný koláčový graf je zobrazen na obrázku 25.



Obrázek 25 - Rozložení využívání mobilních technologií

Na obrázku je vykreslen koláčový graf pro třetí den zkoumaného období. Tento den je dnem před výpadkem. Jak již bylo zmíněno dříve, tento graf obsahuje pouze orientační informace o rozložení využívání mobilních technologií, aby bylo získáno jakési povědomí o tomto rozložení.

Nejvyužívanější technologií je GSM (technologie sítě 2G). Tu mělo třetí zkoumaný den jako svou dominantní technologii přibližně 41 % mobilních terminálů. GSM technologii následují technologie LTE800 a UMTS s 18 %. Asi 10 % terminálů využilo technologii LTE1800. LTE2100 využila jako dominantní technologii asi 3 % terminálů. Neurčeno zůstalo 10 % terminálů a technologie LTE2600 nepřekročí 0.5 %.

7.5.2. Vliv použitých mobilních technologií na ovlivnění výpadkem

V této kapitole je zkoumáno, jak konkrétně závisí ovlivnění výkyvem na použité mobilní technologii, ke které jsou mobilní terminály připojeny. Tato závislost je zkoumána zvlášť pro jednotlivé signifikantní buňky a použity jsou datové sady se 200 000 záznamy mobilních terminálů. Počty úspěšně přiřazených buněk jsou uvedeny v tabulkách 21 a 22. V této tabulce jsou oranžovou barvou zvýrazněny dny výkyvu.

Den	Ranní buňka						
	Technologie						
	GSM	UMTS	LTE800	LTE1800	LTE2100	LTE2600	Neurčeno
1	54 476	27 907	38 302	17 933	5 373	323	55 686
2	55 178	27 982	37 350	17 140	4 612	287	57 451
3	53 677	27 597	37 268	17 485	4 564	351	59 058
4	54 116	28 039	38 149	16 600	3 849	316	58 931
5	36 564	31 058	33 536	14 046	3 435	250	81 111
6	42 551	28 822	37 441	15 761	3 303	296	71 826
7	46 890	29 322	40 482	17 409	4 215	312	61 370
8	47 190	29 900	39 517	18 656	5 329	328	59 080
9	47 239	28 511	37 660	17 963	4 560	358	63 709
10	48 433	28 468	38 686	18 075	4 476	381	61 481
11	47 476	28 489	38 390	18 547	4 460	377	62 261
12	47 947	28 302	37 597	18 553	4 737	392	62 472
13	47 733	27 716	37 521	16 781	3 998	301	65 950
14	50 524	28 568	38 818	17 888	4 555	312	59 335
15	50 038	28 543	39 107	17 932	5 222	339	59 304
Den	Denní buňka						
	Technologie						
	GSM	UMTS	LTE800	LTE1800	LTE 2100	LTE 2600	Neurčeno
1	59 027	22 660	28 435	15 235	7 252	415	66 976
2	66 387	27 129	27 540	19 771	8 693	519	49 961
3	71 452	27 398	28 597	19 548	8 452	531	44 022
4	75 888	29 934	27 925	21 864	9 851	586	33 952
5	67 002	30 550	31 754	20 844	9 384	552	39 914
6	65 550	29 185	32 491	20 771	8 978	567	42 458
7	60 142	24 859	31 223	18 348	8 562	430	56 436
8	57 448	24 746	31 114	17 267	7 957	443	61 025
9	68 171	29 321	30 981	21 384	8 946	500	40 697
10	68 995	28 304	30 899	21 003	9 014	508	41 277
11	69 666	28 784	31 202	21 104	9 160	521	39 563
12	69 112	28 904	30 339	21 257	9 176	579	40 633
13	66 162	28 324	30 670	21 586	9 197	545	43 516
14	61 097	24 138	29 749	18 578	8 587	434	57 417
15	56 233	22 988	29 347	17 885	8 376	420	65 515

Tabulka 21 - Počet přiřazených buněk v závislosti na mobilní technologii 1.

Večerní buňka							
Technologie							
Den	GSM	UMTS	LTE800	LTE1800	LTE2100	LTE2600	Neurčeno
1	61 776	30 174	31 197	22 012	11 048	501	43 292
2	64 236	29 851	31 120	22 275	10 812	533	41 173
3	63 294	30 265	30 196	21 618	10 491	544	43 592
4	40 037	28 883	23 736	15 379	7 836	391	83 738
5	55 116	33 049	32 841	21 790	10 725	537	45 942
6	56 316	30 537	33 868	21 491	10 735	558	46 495
7	55 668	30 529	34 228	22 834	11 477	571	44 693
8	55 585	31 633	32 760	23 054	11 451	510	45 007
9	57 271	30 420	31 552	23 020	11 262	553	45 922
10	58 272	30 136	31 526	23 162	11 248	602	45 054
11	58 291	30 078	31 434	23 233	11 159	553	45 252
12	58 689	30 675	30 657	22 601	11 052	522	45 804
13	58 175	30 033	31 746	22 402	10 838	499	46 307
14	58 165	29 872	32 472	22 543	11 306	569	45 073
15	58 639	30 182	31 667	22 789	11 467	550	45 274
Domovská buňka							
Technologie							
Den	GSM	UMTS	LTE800	LTE1800	LTE 2100	LTE 2600	Neurčeno
1	43 055	22 622	26 989	14 386	5 518	280	87 150
2	41 249	22 275	28 634	14 654	4 994	282	87 912
3	41 121	22 895	29 204	15 057	5 108	320	86 295
4	22 888	22 333	20 231	9 488	3 632	229	121 199
5	26 838	25 224	23 849	11 718	4 214	244	107 913
6	30 969	22 061	24 411	12 093	4 238	250	105 978
7	35 356	23 364	27 268	14 343	5 650	288	93 731
8	36 701	23 866	27 144	14 554	5 308	310	92 117
9	35 011	22 747	28 314	14 727	4 968	315	93 918
10	36 269	23 262	29 426	15 176	5 092	338	90 437
11	35 905	23 051	28 993	15 312	4 933	354	91 452
12	36 122	22 959	27 922	14 670	5 052	323	92 952
13	34 991	21 315	23 997	12 825	4 819	272	101 781
14	38 142	22 828	25 854	14 358	5 649	317	92 852
15	39 904	22 931	25 200	14 152	5 999	328	91 749

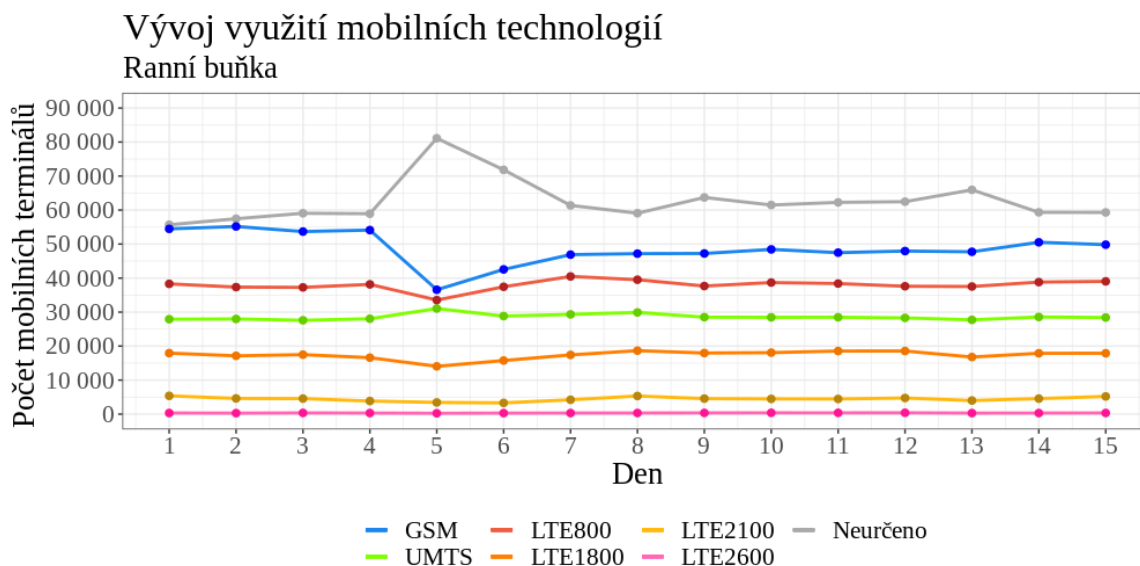
Tabulka 22 - Počet přiřazených buněk v závislosti na mobilní technologii 2.

Na základě dat z těchto tabulek byly vygenerovány grafy časových průběhů vývoje počtu mobilních terminálů připojených k jednotlivým technologiím během zkoumaného období. Tyto grafy jsou na obrázcích 26 až 29. Pro vygenerování grafů byl použit kód z Přílohy A *bap13.R*. V tomto kódu jsou opět použity funkce *F.parser()* a *F.nettypid_join()* z kapitol 6.1. a 6.2. Tyto funkce jsou uvnitř for cyklu, aby byly použity postupně na všech 15 datových sad. Dále je zde použita funkce *table()* k zjištění četností jednotlivých výskytů

mobilních terminálů s danou technologií. Na konec jsou grafy vykresleny funkcí *ggplot()* a jejími příbuznými funkcemi.

7.5.2.1. Vliv použitých mobilních technologií na ranní buňku

První buňkou, u které bude zkoumán vliv výkyvu z pohledu různých mobilních sítí, ke kterým byly mobilní terminály připojeny, je ranní buňka. Průběh změny využitých technologií je zaznamenán na obrázku 26.



Obrázek 26 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – ranní buňka.

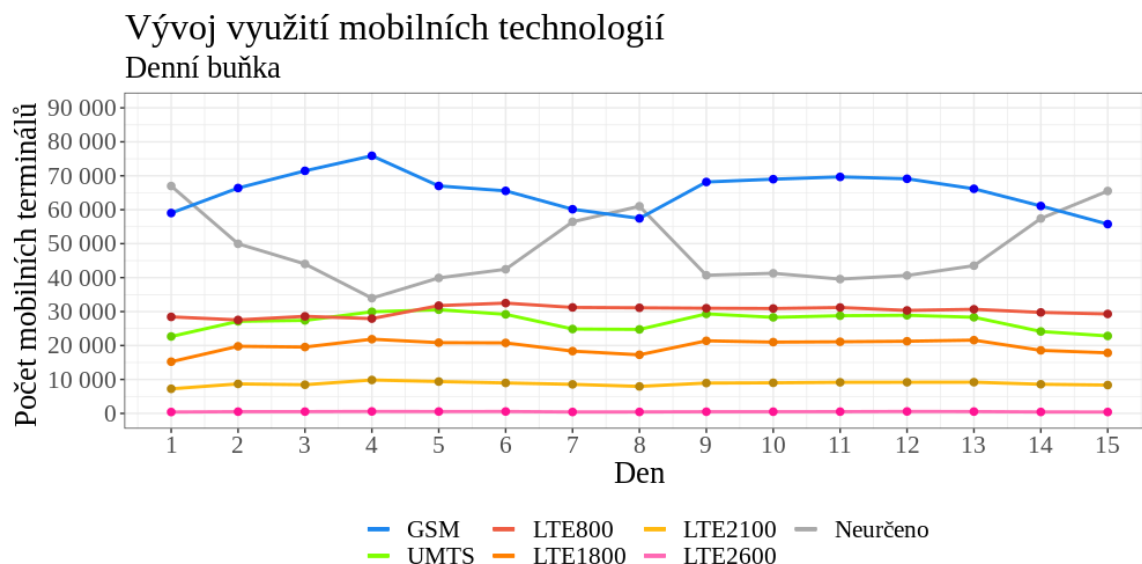
Z grafu na obrázku 26 je zřejmé, že nejvíce výpadkem ovlivněná technologie u ranní buňky je GSM. Zde došlo pátý den k propadu z 54 116 na 36 564 mobilních terminálů s technologií GSM. To činí propad o 17 552, tedy o 32 %. U ostatních technologií buď došlo k propadu, který nebyl tak znatelný (LTE800, LTE1800, LTE2100 a LTE2600), anebo v případě technologie UMTS došlo k nárůstu. Číselné a procentuální hodnoty změn četností mobilních terminálů se zaznamenanou ranní buňkou pro jednotlivé technologie během výkyvu jsou shrnuty v tabulce 23.

Technologie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl	Rozdíl v %
GSM	54 116	36 564	-17 552	-32 %
UMTS	28 039	31 058	3 109	11 %
LTE800	38 149	33 536	-4 613	-12 %
LTE1800	16 600	14 046	-2 554	-15 %
LTE2100	3 849	3 435	-414	-11 %
LTE2600	316	250	-66	-21 %
Neurčeno	58 931	88 111	29 180	50 %

Tabulka 23 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – ranní buňka.

7.5.2.2. Vliv použitých mobilních technologií na denní buňku

Druhou zkoumanou buňkou je denní buňka. Průběh křivek denní buňky zobrazených na obrázku 27 opět nijak nekoreluje s žádnými křivkami zaznamenanými u jiných buněk. Graf ukazuje, že nejčastěji využívanou mobilní technologií, souzeno podle počtu přiřazených denních buněk, je technologie GSM. Zároveň je opět tato technologie, co se týče zaznamenaných buněk, nejméně konzistentní a jsou u ní vidět největší změny v porovnání s ostatními technologiemi.



Obrázek 27 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – denní buňka.

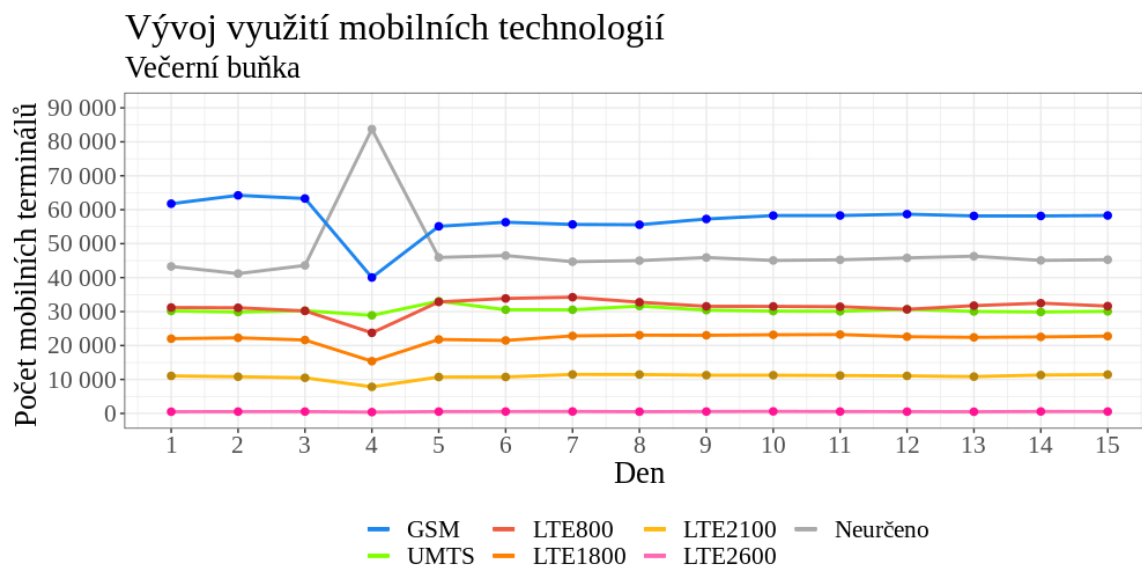
Graf na obrázku 27 vyjadřuje fakt, že v době výkyvu došlo k navýšení počtu zaznamenaných buněk technologie GSM. Navýšení proběhlo z hodnoty 71 452 na 75 888 terminálů se zaznamenanou denní buňkou typu GSM. U ostatních typů technologií nelze pozorovat velké ovlivnění výkyvem během čtvrtého dne. Největší procentuální změna byla zaznamenána u technologie LTE2100, a to 17 %. Tuto technologii používá oproti technologii GSM mnohem méně lidí, a proto není na první pohled tato změna příliš viditelná. Číselné a procentuální hodnoty změn četností mobilních terminálů se zaznamenanou denní buňkou pro jednotlivé technologie během výkyvu jsou shrnuty v tabulce 24.

Technologie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl	Rozdíl v %
GSM	71 452	75 888	4 346	6 %
UMTS	27 398	29 934	2 536	9 %
LTE800	28 597	27 925	-627	-2 %
LTE1800	19 548	21 864	2 316	12 %
LTE2100	8 452	9 851	1 399	17 %
LTE2600	531	586	55	10 %
Neurčeno	44 022	33 952	-10 070	-23 %

Tabulka 24 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – denní buňka.

7.5.2.3. Vliv použitých mobilních technologií na večerní buňku

V grafu na obrázku 28 je zaznamenán průběh změn v počtu mobilních terminálů s přiřazenými večerními buňkami ve zkoumaném období. Graf potvrzuje fakt, že nevyužívanější technologií mobilních sítí je technologie druhé generace – GSM.



Obrázek 28 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – večerní buňka.

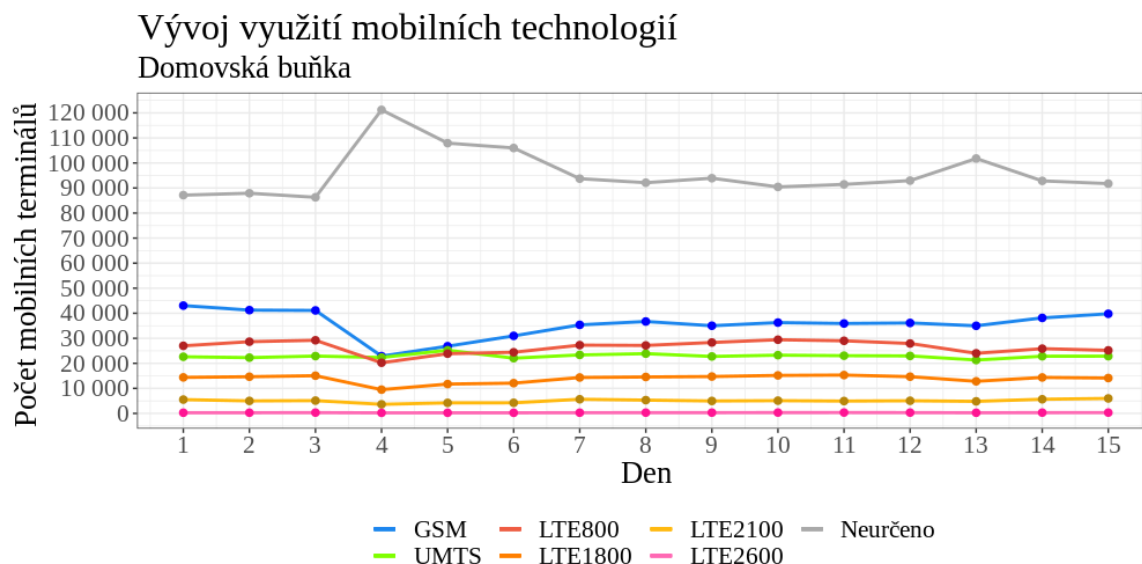
Technologie GSM je tedy nejvyužívanější, zároveň u ní dochází ale také k největšímu ovlivnění výpadkem. Třetí den je večerní buňka přiřazena 63 294 terminálům, zatímco následující den pouze 40 037 má přiřazenou večerní buňku. Došlo tedy k propadu o 23 257 terminálů, tj. propad o 37 %. U ostatních sledovaných technologií také došlo k propadu, propad ovšem nebyl tak znatelný jako v případě právě technologie GSM, jelikož tyto technologie jsou využívány v menší míře než právě technologie GSM. Z těchto ostatních technologií zaznamenala největší procentuální propad technologie LTE1800. Veškeré hodnoty změn počtu terminálů v období výkyvu jsou zaznamenány v tabulce 25.

Technologie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl	Rozdíl v %
GSM	63 294	40 037	-23 257	-37 %
UMTS	30 265	28 883	-1 382	-5 %
LTE800	30 196	23 736	-6 460	-21 %
LTE1800	21 618	15 379	-6 239	-29 %
LTE2100	10 491	7 836	-2 655	-25 %
LTE2600	544	391	-153	-28 %
Neurčeno	43 592	83 738	40 146	92 %

Tabulka 25 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – večerní buňka.

7.5.2.4. Vliv použitých mobilních technologií na domovskou buňku

Poslední analyzovaná buňka je buňka domovská. Průběh změn počtu terminálů s přiřazenou domovskou buňkou je vidět na grafu na obrázku 29. Na něm je možné pozorovat velký propad v přiřazování technologie GSM, která má opět nejvíce terminálů ve sledovaném období. V počtu terminálů je následována technologiemi LTE800 a UMTS.



Obrázek 29 - Závislost vlivu výkyvu na technologii mobilní sítě – domovská buňka.

U technologie GSM došlo čtvrtý den k poklesu přiřazených večerních buněk o celých 44 %. Došlo k poklesu z 41 121 mobilních terminálů se zaznamenanou domovskou buňkou na počet 22 888. Rozdíl je tedy 18 233 terminálů. Ostatní technologie také zaznamenaly pokles, kde největší z nich byl u LTE1800, a to o 37 %. Tuto technologii využívá ovšem méně lidí, proto není tento pokles tak znatelný, co se týče absolutního rozdílu v počtu terminálů se zaznamenanou domovskou buňkou. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 26.

Technologie	Hodnota den před výkyvu	Hodnota v den výkyvu	Rozdíl	Rozdíl v %
GSM	41 121	22 888	-18 233	-44 %
UMTS	22 895	22 333	-562	-2 %
LTE800	29 204	20 231	-8 973	-31 %
LTE1800	15 057	9 488	-5 569	-37 %
LTE2100	5 108	3 632	-1 476	-29 %
LTE2600	320	229	-91	-28 %
Neurčeno	86 295	121 199	34 904	40 %

Tabulka 26 - Závislost výkyvu na technologii mobilní sítě – domovská buňka.

7.6. Shrnutí poznatků z provedených analýz

Z analyzovaných dat je zřejmé, že během zkoumaného období došlo k určitému výkyvu v přiřazování signifikantních buněk mobilní sítě. K tomuto výkyvu došlo s nejvyšší pravděpodobností v průběhu čtvrtého analyzovaného dne. Čtvrtý den nevykazují hodnoty žádné změny u přiřazování ranních buněk. Ovšem u večerních buněk čtvrtý den je evidentní velký pokles v počtu těchto přiřazených buněk. Ten pokles je znatelný i při určování domovské buňky, u které čtvrtý den došlo také k výraznému poklesu. Tyto poklesy jsou následovány poklesem určení ranních buněk pátého zkoumaného dne. Během pátého dne u večerní buňky nastává regenerace, tedy návrat na původní hodnoty. U buňky domovské a ranní trvá tento proces regenerace delší dobu. Tyto závěry byly vyvozeny v kapitole 7.1.

Dá se říci, že metoda výběru záznamů SIM karet do datové sady, tedy parametr, zdali má SIM karta pochází z hlavní datové sady, či z doplňující datové sady, nemá vliv na výkyv. Sice je patrné z obrázku 16, že přiřazování signifikantních buněk je úspěšnější u SIM karet z hlavní datové sady, ale co se týče procentuálních změn během výkyvu, obě skupiny SIM karet vykazovaly velmi podobné změny (až na procentuální rozdíl ve večerní buňce). Tento závěr pochází z kapitoly 7.2.

SIM karty byly také v této práci rozděleny do kategorií podle mobility. Bylo vyzkoumáno, že během výkyvu došlo k nárůstu SIM karet s nízkou mobilitou a poklesu počtu SIM karet s vysokou mobilitou. Toto mohlo být způsobeno faktem, že během dne výkyvu došlo k omezení zaznamenávání buněk, ke kterým se mobilní terminál připojil, a z tohoto důvodu se SIM karty mohou jevit jako méně mobilní. Změnu mobility popisuje kapitola 7.3.

Ze zkoumání vlivu kategorií mobility SIM karet vyplývá, že SIM karty z kategorie pro malou mobilitu byly ovlivněny výpadkem ve větší míře než SIM karty s vyšší mobilitou, a to v některých případech až o 10 %. Tento závěr pochází také z kapitoly 7.3.

Zkoumáno bylo také, ve kterých regionech docházelo k největším změnám během výkyvu. Z tohoto zkoumání lze vyvodit, že některé regiony jsou náchylnější k výkyvu. Jde zejména o region s identifikátorem XXA. Na opačné straně regiony, které byly ovlivněny nejméně, jsou regiony A01 a A03. Toto bylo vyvozeno v kapitole 7.4.

Nejčastěji využívanou technologií během zkoumaného dne byla jednoznačně technologie GSM, následovaná technologiemi UMTS, LTE800 a dalšími technologiemi rodiny LTE.

GSM byla nejenom nejčastěji používanou technologií ve zkoumaném časovém intervalu, ale také technologií nejnáchylnější k ovlivnění výkyvem, a to jak z hlediska absolutních čísel, tak zejména i z hlediska procentuálních poklesů, kdy právě propady u technologie GSM byly vždy minimálně o vyšší jednotky procent vyšší než u ostatních technologií. Toto lze pozorovat v analýzách z kapitoly 7.5.

8 Závěr

Tato práce se zabývala analýzou výkyvu na rádiovém rozhraní mobilní sítě. Analýza byla provedena na datových sadách, které byly založeny na signalizačních zprávách, jež byly vyměňovány mezi mobilními terminály a základnovými stanicemi. Cílem práce bylo zjistit, které mobilní terminály jsou k ovlivnění výkyvem na rádiovém rozhraní nejvíce náchylné.

V první části této práce byly vysvětleny základní principy celulárních mobilních sítí, jako např. systém buněk, sektorizace, princip clusterů apod. V této části byla také popsána topologie mobilních sítí, tedy ze kterých entit se mobilní síť skládá a jakým způsobem v ní probíhá vyměňování signalizačních zpráv. Dále byly vysvětleny základní metody používané v mobilních technologiích – metody vícenásobného přístupu, metody duplexního spojení a druhy digitální modulace. Následně byly shrnuty parametry různých generací mobilních sítí, a to od první generace až po pátou generaci, tzv. 5G.

Poté byly v následujících kapitolách vysvětleny funkce mobilního terminálu, zejména z pohledu jednoznačné identifikace pomocí identifikátorů, které se váží ke kartě SIM. Šlo o identifikátory IMSI a MSISDN.

Jelikož v této práci byly analyzovány velké datové objemy, byl představen termín big data. Také byly shrnuty základní přístupy k analýze velkých datových objemů. Dále bylo v této kapitole popsáno prostředí, ve kterém byla data analyzována, a jazyk R, který byl k těmto účelům použit.

Na tuto kapitolu navazovala kapitola, kde byly charakterizovány datové sady a vysvětlena jejich struktura. Bylo zmíněno, že datové sady byly již pro účely této práce předzpracovány. Zároveň zde byly objasněny způsoby klasifikace typů uživatelů a buněk podle zmíněných regulí projektu, jehož součástí je i tato práce. Také zde byl definován identifikační řetězec buňky, se kterým se dále pracuje v části analýzy datových sad.

Dále byly popsány metody předzpracování dat, které byly v analýze použity. Na tuto kapitolu navazovala analytická část. V analytické části byl zkoumán samotný výkyv, který bylo možné odhalit v datových sadách. Nejdříve byl zobrazen časový průběh zkoumaného období, na kterém byl výkyv detekován. Následně byl výkyv analyzován z několika hledisek, konkrétně z hlediska typu datových sad, z hlediska mobility SIM karet, z geografického hlediska a v poslední části také z hlediska použité mobilní technologie. V každé části této analýzy byl výkyv zobrazen v grafu časového průběhu výkyvu, nebo byl výkyv analyzován z tabulek s daty korespondujícími s daným typem analýzy. Poznatky z výsledků jednotlivých částí analýz jsou shrnuty v kapitole 7.6. Nejdůležitějšími poznatky analýzy jsou zjištění, že k výkyvu nejnáchylnějšími mobilními terminály jsou mobilní terminály s malou mobilitou a terminály využívající technologii GSM, tedy technologii druhé generace mobilních sítí.

Seznam použité literatury

- [1] BEČVÁŘ, Zdeněk, Pavel MACH a Ivan PRAVDA. *Mobilní sítě*. V Praze: České vysoké učení technické, [2013]. ISBN 978-80-01-05305-8.
- [2] DOSTÁLEK, Libor. *Mobilní sítě a jejich bezpečnost*. V Českých Budějovicích: Ústav aplikované informatiky, Přírodovědecká fakulta Jihočeské univerzity, 2016. ISBN 978-80-7394-606-7.
- [3] BEŠŤÁK, Robert, Ivan PRAVDA a Jiří VODRÁŽKA. *Principle of telecommunication systems and networks*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03612-9.
- [4] RACITI, Robert C. *Cellular Technology* [online]. Nova Southeastern University, 1995 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20130715020839/http://scis.nova.edu/~raciti/cellular.html>
- [5] IBE, Oliver C. *Fundamentals of data communication networks*. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-43625-6
- [6] Wajih A. Abu-Al-Saud. EE 499: *Wireless & Mobile Communications (082): Lecture 3: Frequency Reuse Concepts*, [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://faculty.kfupm.edu.sa/EE/wajih/files/EE%20499,%20Lecture%2003.pdf>
- [7] JOHNSON, Cameron. *What Is PSTN and How Does It Work?*. [online]. [cit. 2020-10-02] Dostupné z: <https://www.nextiva.com/blog/what-is-pstn.html>
- [8] BABU BOLLINI Dinaker, Nuka MALLIKHARJUMA RAO a Muniratham Naidu MANNAVA. *Measurement of Mobile Switching Centres Throughput in GSM Network Integrating Sliding Window Algorithm with a Single Server Finite Queuing Model*. [online] Journal of Computer Networks and Communications. 2016. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309143343_Measurement_of_Mobile_Switching_Centres_Throughput_in_GSM_Network_Integrating_Sliding_Window_Algorithm_with_a_Single_Server_Finite_Queueing_Model
- [9] BUCZKOWSKI, Mateusz. *What Multiple Access schemes are used in Wireless Systems?* [online]. 5.4.2018 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.grandmetric.com/2018/04/05/multiple-access-methods/>

- [10] AHMADI, Sassan. 9.5 Multiple access schemes. In: *LTE-Advanced: A practical systems approach to understanding 3GPP LTE releases 10 and 11 radio access technologies*. [online] Oxford: Academic Press, 2014. Communication engineering. ISBN 978-0-12-405162-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/orthogonal-frequency-division-multiple-access>
- [11] RAZLIGHI, Mohsen Mohammadkhani, ZLATANOV Nikola a Petar POPOVSKI. *Dynamic Time-Frequency Division Duplex*. v.3. Cornell Univerisity. [online]. 30.1.2020 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1909.03058>
- [12] *Modulation Methods*. Rohm. [online]. [cit. 2020-10-03]. Dostupné z: <https://www.rohm.com/electronics-basics/wireless/modulation-methods>
- [13] BHARATI Subrato, Mohammad ATIKUR RAHMAN a Prajoy PODDER. *Implementation of ASK, FSK and PSK with BER vs. SNR comparison over AWGN channel*. . [online]. [cit. 2020-10-03]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2002/2002.03601.pdf>
- [14] SAUTER Martin. *An Introduction to QAM Modulation for LTE*. [online]. [cit. 2020-10-03]. Dostupné z: <https://blog.wirelessmoves.com/2016/10/an-introduction-qam-modulation-for-lte.html>
- [15] KALRA, Bharti a D K CHAUHAN. *A Comparative Study of Mobile Wireless Communication Network: 1G to 5G*. International Journal of Computer Science and Information Technology Research. (2014). Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318673817_A_Comparative_Study_of_Mobile_Wireless_Communication_Network_1G_to_5G
- [16] HEINDL, Eduard. *Mobile Network: E-Business Technology* [online]. [cit. 2020-10-03]. No.232493. Dostupné z: <https://webuser.hs-furtwangen.de/~heindl/ebte-09ss/Mobile-network.pdf>
- [17] SAUTER, Martin. *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017. ISBN 9781119346906
- [18] POPOVSKI Petar, Kasper F. TRILLINGSGAARD, Osvaldo SIMEONE a Giuseppe Durisi. *5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View*. [online]. in IEEE Access, vol. 6, pp. 55765-55779, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872781. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8476595>
- [19] BIDASAIRA Gaurav. *IMEI vs IMSI Number: What You Need to Know About Them*. [online]. [cit. 2020-10-03]. Dostupné z: <https://www.guidingtech.com/imei-vs-imsi-number/>

- [20] ETSI. *GSM Technical Specification: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Numbering, addressing and identification (GSM 03.03)*. Březen 1996. [online]. [cit. 2020-10-03] Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/03/0303/05.00.00_60/gsmts_0303v050000p.pdf
- [21] VOŽŇÁK M., J. Hylmar, R. Beš'ák, D. Blagodárný, M. Hájek, J. Hendrych, L. Orčík a J. Růžička. *Referenční manuál zpracování lokalizačních dat mobilních operátorů pro plánování města*. 8.5.2020. [online]. [cit. 2020-10-04]. Dostupné z: https://intpol-pro-s3e-vs-b-com-danter.s3-eu-west-1.amazonaws.com/dancor-manual/dancor_manual_web.html
- [22] MAYER-SCHÖNBERGER, Viktor a Kenneth CUKIER. *Big Data*. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-4119-9.
- [23] BAESENS, Bart. *Analytics in a big data world: the essential guide to data science and its applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, [2014]. ISBN 9781118892701.
- [24] RYŠÁNEK, F. *PÁSMO LTE/UMTS/EDGE/GSM POUŽÍVANÁ V ČESKÉ REPUBLICE*. Průmyslové počítače a komunikace: Průmyslové systémy [online]. 2016 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/pasma-lteumtsedgegsm-pouzivana-v-ceske-republice-1379>
- [25] WICKHAM, Hadley a Garrett GROLEMUND. *R for data science: import, tidy, transform, visualize and model data*. Sebastopol: O'Reilly Media, [2017]. ISBN 978-1-4919-1039-9
- [26] *What is R?*. [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.r-project.org/about.html>
- [27] MENDELEZ, Steven. *The Difference Between IMSI and MSISDN*. [online]. [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: <https://www.techwalla.com/articles/the-difference-between-imsi-and-msisdn>

Příloha A

Příloha A se nachází na CD, které je přiložené k tištěné verzi této práce. Tato příloha obsahuje všechny kódy použité a zmíněné v této práci.