

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Využití licencované sítě NB-IoT pro bezpečnostně citlivé aplikace

Using the NB-IoT Licensed Network for
Security-Sensitive Applications

Lukáš Jarrah

Vedoucí: Ing.Bc. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Obor: Multimediální technika

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Květen 2019

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil své díky Ing.Bc. Lukáši Vojtěchovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky a ochotu při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat firemním kolegům v T-Mobile za nekončící vstřícnost, cenné rady a zapůjčení nezbytného měřicího vybavení, a to především Ing. Zdeňku Bumbálkovi a Ing. Davidu Šebestíkovi. V neposlední řadě děkuji Ing. Tomáši Hejdovi, Ph.D. za bezplatné poskytnutí použité L^AT_EXové šablony. Závěrem je třeba poděkovat mým přátelům a rodině za vytvoření příjemných podmínek pro tvorbu práce.

Prohlášení

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

V Praze, 17. května 2019

Lukáš Jarrah

Abstrakt

Prostředkem pro zajištění vhodné connectivity pro zařízení internetu věcí by mohly být licencované sítě mobilních operátorů. Tyto sítě jsou definovány určitými standardy umožňujícími usnadnění a sjednocení vývoje v celém světě. Teoretická část obsahuje technické porovnání sítí se zaměřením na licencované sítě pro internet věcí. V praktické části jsou provedena reálná měření vybraných provozních parametrů v licencované síti NB-IoT. Na základě naměřených dat je diskutována možnost využití této sítě pro bezpečnostně citlivé aplikace.

Klíčová slova: IoT, LPWAN, síť, NB-IoT, LTE-M, bezpečnost, aplikace, Python

Vedoucí: Ing.Bc. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
Katedra telekomunikací,
České vysoké učení technické v Praze,
Technická 2,
166 27 Praha

Abstract

Licensed networks owned by telecommunications providers could be the main tool for providing required connectivity for the Internet of Things devices. These networks are specified by given standards enabling simplifying and unification of global development. The theoretical part consists of a technical comparison of networks focusing on licensed networks for the Internet of Things. In the practical part, real measurements of selected parameters in the NB-IoT licensed network were conducted. Based on the measured data, the suitability of NB-IoT for security-sensitive applications is discussed.

Keywords: IoT, LPWAN, network, NB-IoT, LTE-M, security, application, Python

Obsah

Seznam zkratk	
Úvod	1
Část I	
Teoretická část	
1 Internet věcí	5
1.1 Definice	5
1.2 Využití Internetu věcí	5
1.3 Požadavky na IoT síť	6
1.3.1 Životnost baterie	6
1.3.2 Pokrytí	6
1.3.3 Cena zařízení	7
1.3.4 Cena infrastruktury	7
1.3.5 Podpora pro množství zařízení	7
2 Nelicencované sítě pro IoT	9
2.1 Síť krátkého dosahu	9
2.1.1 Wi-Fi	9
2.1.2 Bluetooth	10
2.2 Síť LPWAN	11
2.2.1 Sigfox	11
2.2.2 LoRaWAN	12
3 Licencované sítě pro IoT	13
3.1 Vlastnosti licencovaných IoT sítí	15
3.2 NB-IoT	16
3.2.1 Zúžení šířka pásma	16
3.2.2 Opakování zpráv	16
3.2.3 Prodloužení životnosti baterie	17
3.2.4 Zjednodušení zařízení	18
3.3 LTE-M	20
3.3.1 Využití frekvenčního spektra	20
3.3.2 Opakování zpráv	21
3.3.3 Další vlastnosti LTE-M	21
3.4 Porovnání NB-IoT a LTE-M	21
3.5 Stav IoT sítí v ČR	22
Část II	
Praktická část	
Úvod	27
4 Zprovoznění zařízení v síti NB-IoT	29
4.1 Výběr zařízení a jejich konfigurace	29
4.1.1 Měřicí kit s modulem	29
4.1.2 Konfigurace zařízení	29
4.2 Komunikace v síti	30
4.2.1 Registrace v síti	31
4.2.2 Testovací služba „Echo“	31
4.2.3 Testovací služba „Daytime“	32
5 Reálná měření provozních parametrů v síti NB-IoT	33
5.1 Zdůvodnění a záměr	33
5.2 Bezpečnostně citlivé aplikace	33
5.3 Průběh měření	34
5.3.1 Měřicí zařízení	34
5.3.2 Vlastnosti měřené sítě	35
5.3.3 Výběr lokalit	36
5.3.4 Příprava měřicího skriptu	41
5.4 Zpracování naměřených dat	42
5.4.1 Skript pro vyhodnocení	42
5.4.2 Problémy při měření	43
5.5 Statistické vyhodnocení měření	43
5.6 Výsledky měření a diskuze	52
5.7 Prostor pro navázání	53
6 Závěr	55
Literatura	57
Přílohy	
A CD	65
B Zadání práce	67

Obrázky

1.1 Trend vyhledávání pojmu "Internet of Things" na Google	6
3.1 Tržní podíl společností vyrábějící moduly pro licencované IoT sítě v roce 2018 [1]	14
3.2 Mapa světa se spuštěnými licencovanými IoT sítěmi (červenec 2018) [2]	14
3.3 Možnosti implementace NB-IoT ve stávající síti [3]	17
3.4 Grafické znázornění stavů pro energetickou úsporu v NB-IoT: (nahore), eDRX (dole) [2]	18
3.5 Rámcové využití frekvenčního spektra pro sítě LTE (5 MHz), LTE-M (6 bloků, 1 MHz) a NB-IoT (1 blok, 180 KHz)	20
4.1 Blokový diagram měřicího kitu EVK-R4 pro modul R410M [4] ...	30
5.1 Fotografie vývojového kitu EVK-R4 s modulem N211	35
5.2 Mapa venkovního pokrytí pilotní sítě NB-IoT od T-Mobile v Praze [5]	36
5.3 Mapa okolí lokality I. s vyznačenou měřenou budovou (oranžově) a základnovými stanicemi (modře) ..	37
5.4 Fotografie měřicího stanoviště I.	38
5.5 Mapa okolí lokality II. s vyznačenou měřenou budovou (oranžově) a základnovými stanicemi (modře)	39
5.6 Mapa okolí lokality III. s vyznačenou měřenou budovou (oranžově) a nejbližší základnovou stanicí (modře)	39
5.7 Fotografie měřicího stanoviště III.1 a III.2	40
5.8 Fotografie měřicího stanoviště III.3	40
5.9 Ukázka GUI programu M-Center se spuštěným měřícím skriptem v terminálu	42
5.10 Graf závislosti latence krátké zprávy na úrovni síly signálu RSRP	44
5.11 Graf závislosti latence delší zprávy na úrovni síly signálu RSRP	45
5.12 Graf závislosti procentuální úspěšnosti doručení zprávy na úrovni síly signálu RSRP	46
5.13 Graf závislosti průměrné přenosové rychlosti sítě na úrovni síly signálu RSRP	46
5.14 Naměřené hodnoty latence krátké zprávy během dne na lokalitě I. s vyšší úrovní přijatého signálu	47
5.15 Naměřené hodnoty latence krátké zprávy během dne na lokalitě III. pro různé hodnoty signálu	47
5.16 Naměřené hodnoty latence krátké zprávy během dne na dvou lokalitách s nižší úrovní přijatého signálu ...	48
5.17 Přiblížený graf naměřených hodnot latence krátké zprávy během dne na dvou lokalitách s nižší úrovní přijatého signálu	48
5.18 Naměřené hodnoty latence delší zprávy během dne na lokalitě II. pro různé hodnoty signálu	49
5.19 Graf závislosti celkového počtu nedoručených zpráv na denní hodině během všech měření	49
5.20 Naměřené hodnoty rychlosti přenosu UL i DL během dne pro měřicí stanoviště III.1 s vyšší úrovní přijatého signálu, RSRP: -78 dBm	50
5.21 Naměřené hodnoty rychlosti přenosu UL i DL během dne pro měřicí stanoviště I.2 s nízkou úrovní přijatého signálu, RSRP: -128 dBm	50
5.22 Naměřené hodnoty rychlosti přenosu UL během dne pro lokalitu II. pro různé hodnoty signálu	51
5.23 Naměřené hodnoty rychlosti přenosu DL během dne pro lokalitu II. pro různé hodnoty signálu	51

Tabulky

3.1 Technické porovnání vybraných parametrů NB-IoT a LTE-M [6] ..	22
4.1 Nastavení rozhraní UART pro modul R410M	30
4.2 Série příkazů skriptu „Initialization“ s popisem a příklady odpovědí	31
4.3 Série příkazů služby „Echo“ s popisem a příklady odpovědí	32
4.4 Série příkazů služby „Daytime“ s popisem a příklady odpovědí	32
5.1 Nastavení rozhraní UART pro modul N211	35
5.2 Nastavení přechodu mezi CE úrovněmi v NB-IoT síti T-Mobile.	36
5.3 Latence menší zprávy o velikosti 8 bajtů	44
5.4 Latence větší zprávy o velikosti 1400 bajtů	45
5.5 Průměrné přenosové rychlosti sítě na MAC vrstvě v obou směrech...	45



Seznam zkratek

- CDMA** Kódový multiplex, Code Division Multiple Access.
- CE** Úrovně vylepšeného pokrytí, Coverage Enhancement Levels.
- COM** Hardwarové rozhraní pro sériový port, Communication Port.
- eDRX** Extended Discontinuous Reception.
- GNSS** Globální družicový satelitní systém, Global Navigation Satellite System.
- GPRS** General Packet Radio Service.
- GSM** Globální systém pro mobilní komunikaci, Groupe Spécial Mobile.
- GUI** Grafické uživatelské rozhraní, Graphical User Interface.
- IoT** Internet věcí, Internet of Things.
- ISM** Pásmo ISM, Industrial, Scientific and Medical band.
- LAN** Lokální síť, Local Area Network.
- LPWAN** Low-power Wide-area Network.
- LTE** Technologie pro mobilní vysokorychlostní datové sítě, Long Term Evolution.
- MAC** Medium Access Control.
- MCL** Maximální celkové ztráty přenosu, Maximum Coupling Loss.
- MIMO** Multiple-input Multiple-output.
- MTC** Machine-type Communication.
- PRB** Physical Resource Block.
- PSD** Power Spectral Density.
- PSM** Stav energetické úspory, Power Saving Mode.

QoS Kvalita služby, Quality of Service.

RSRP Síla přijatého signálu, Reference Signal Received Power.

RTT Délka zpoždění, Round-Trip Time.

TAU Tracking Area Update.

TCP Transmission Control Protocol.

UART Univerzální asynchronní sériové rozhraní, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.

UDP User Datagram Protocol.

UNB Ultra Narrowband Modulation.

VoIP Přenos hlasu přes IP, Voice over Internet Protocol.



Úvod

Internet věcí je důsledkem technologického vývoje posledních let, který umožnil připojení k internetu obrovskému množství zařízení, u kterých byla síťová konektivita dříve nemyslitelná. V první kapitole se snaží autor definovat pojem internet věcí a popsat hlavní síťové požadavky přístrojů, které jsou bezdrátově připojeny k internetu.

Druhá kapitola seznamuje čtenáře s nelicencovanými sítěmi pro internet věcí, které operují v bezplatných frekvenčních pásmech a stály u zrodu internetu věcí. V této části jsou představeny běžné sítě krátkého dosahu jako Wi-Fi či Bluetooth i energeticky úsporné sítě LPWAN.

Hlavním tématem práce jsou sítě licencované, které jsou popsány v třetí kapitole. Licencované sítě provozují operátoři, kteří na budování infrastruktury a provoz vynakládají značné částky, proto je od těchto sítí očekávána velká kvalita a spolehlivost. V této části jsou analyzovány vlastnosti sítí a čtenář je seznámen s nejrozšířenějšími licencovanými sítěmi NB-IoT a LTE-M. Jsou zde diskutovány parametry, funkce či geografické rozšíření obou sítí a shrnuty hlavní rozdíly mezi nimi.

Praktická část této práce se týká reálných měření v licencované síti NB-IoT v České republice. Čtvrtá kapitola seznamuje s výběrem měřicího zařízení a jeho konfigurace. Tato část dále obsahuje ukázkou registrace zařízení a komunikaci v síti prostřednictvím vybraných testovacích služeb.

V poslední páté kapitole autor provádí měření vybraných provozních parametrů sítě. Jsou zde popsány průběhy měření, výběr lokalit a očekávané vlastnosti měřené sítě. Dále kapitola obsahuje komentář autora k vytvořeným měřícím a vyhodnocovacím skriptům. Významné části této práce jsou vhodná prezentace naměřených výsledků, diskuze nad nimi a zhodnocení možnosti využití sítě NB-IoT pro bezpečnostně citlivé aplikace. Na závěr autor navrhuje několik způsobů, jak se dá na tuto problematiku dále navázat v rámci budoucího zkoumání.



Část I

Teoretická část

Kapitola 1

Internet věcí

Úvodní kapitola definuje pojem Internet věcí (IoT) a popisuje vlastnosti tohoto trendu. Ačkoliv různá IoT zařízení vyžadují od sítě odlišné funkce, některé požadavky jsou všem aplikacím společné. Hlavní specifika sítí pro IoT jsou popsána v této části.

1.1 Definice

Internet věcí (IoT, Internet of Things) je trend v oblasti komunikace předmětů běžného použití mezi sebou nebo s člověkem. Je to označení pro síť fyzických zařízení vybavených elektronikou, senzory a síťovou konektivitou, která umožňuje těmto zařízením vyměňovat si data. Tato zařízení jsou jednoznačně identifikovatelná v síti pomocí unikátního sériového čísla a jsou schopna pracovat v existující infrastruktuře internetu [7]. Přes internet (např. pomocí vzdáleného webového prohlížeče) pak mohou být ovládána, aktualizována, čtena jejich data apod.

Komunikace mezi stroji není úplná novinka. Již v 90. letech spolu staré modemy komunikovaly pomocí telefonní linky vydáváním různě vysokých tónů, čímž si předávaly informace z jednoho počítače na jiný [8]. Dnes funguje mnoho zařízení jako dálkově ovládané spotřebiče (topení, osvětlení), kamery, meteostanice, zatím však nespolečně spolupracují pod jednou technologií a společným protokolem. Institucí zajišťujících vývoj a standardizaci těchto zařízení je mnoho a jsou velmi roztržštěné [9, 10]. Všechny standardy musí dbát na bezpečnost a zamezit úniku dat či ovládnutí systému nepovolaným uživatelem.

Všechna tato zařízení generují značné množství dat, které je třeba automaticky zpracovat, uložit, efektivně vyhodnotit a následně využít [11].

Obrázek 1.1 znázorňuje četnost hledání pojmu "Internet of Things" ve vyhledávači Google. Tento trend je na značném vzestupu přibližně od roku 2013.

1.2 Využití Internetu věcí

S neustálým zvyšováním výpočetního výkonu je možné přidávat datovou konektivitu do množství zařízení, u kterých to dříve bylo nemyslitelné. Chytré



Obrázek 1.1: Trend vyhledávání pojmu "Internet of Things" na Google

spolupracující zařízení mohou například fungovat jako komplexní zabezpečovací systém [12]. Taková konektivita se označuje zkratkou MTC (Machine-type communication) a vyžaduje spolehlivou bezdrátovou konektivitu pro velké množství zařízení [13], příklady zařízení najdeme v katalogích výrobců [2, 14].

1.3 Požadavky na IoT síť

Typické IoT zařízení automaticky v delších časových intervalech odesílá nízké množství dat bez důrazu na zpoždění, ale např. v odlehlé oblasti bez dosahu mobilního signálu. Výrobci zařízení a správci infrastruktury tedy musí čelit určitým požadavkům, které se liší od jiných používaných sítí (Bluetooth, WiFi, klasických mobilních sítí apod.) [15, 2].

1.3.1 Životnost baterie

Dlouhá životnost baterie je jedním z klíčových požadavků na IoT zařízení. Mnohá zařízení jsou napájena pouze z interní baterie, protože nemají neustálý přístup k síťovému zdroji. Tyto přístroje jsou umístěny v nepřístupných oblastech, kde je jakákoliv manuální údržba časově a finančně náročná a tedy častější výměna baterie nepřipadá v úvahu. Cílem je, aby baterie o kapacitě 5 Wh vydržela v provozu alespoň 10 let pro nejjednodušší zařízení na hraně pokrytí [15, 16].

1.3.2 Pokrytí

Často jsou koncové přístroje umístěny v místech, kam signály běžných sítí pronikají jen s obtížemi. Takové se mohou nacházet v odlehlých oblastech, hlubokých lesích, údolích, ale i pod zemí, ve sklepech nebo silně zarušené městské zástavbě plné silných zdí.

Po IoT sítích je požadováno, aby poskytly o 20 dB vylepšený dosah signálu uvnitř budov oproti GPRS (General Packet Radio Service), což odpovídá hodnotě 164 dB MCL (Maximum Coupling Loss) [16]. Hodnota 164 dB MCL dává smysl pouze při uvažované rychlosti průchodu dat, proto je ve specifikacích uvedena minimální rychlost přenosu dat 160 b/s [6].

■ 1.3.3 Cena zařízení

Výrobci si jsou vědomi toho, že pro masovou výrobu je nutné, aby tato zařízení byla co nejlevnější. Typické specifikace pro výpočty a simulace uvažují 40 IoT zařízení v každé domácnosti [6], což pro všeobecnou adaptaci vyžaduje nízkou cenu jednotlivých koncových zařízení. Znatelný podíl na ceně zařízení má právě síťový modul pro bezdrátovou konektivitu.

■ 1.3.4 Cena infrastruktury

Poskytovatelé síťové IoT konektivity se pro snižování nákladů snaží maximálně využít stávající infrastrukturu, např. vysílat z již postavených mobilních vysílačů, použít volná kmitočtová spektra apod.

■ 1.3.5 Podpora pro množství zařízení

Podle předpovědí může být v budoucnu počet MTC zařízení i desetkrát větší, než je v současné době používaných mobilních telefonů, proto je nutné uvažovat dostatečnou kapacitu budoucích sítí [16]. Zmiňované množství 40 přístrojů/domácnost lze také odhadnout na počet 60 000 zařízení/km² v centru velkoměsta [6].

Kapitola 2

Nelicencované sítě pro IoT

Nelicencované bezdrátové sítě jsou součástí radio-frekvenčního spektra (pásmo ISM), které je bez poplatků volně k dispozici, pokud uživatelé a jejich zařízení dodržují určité podmínky. Mezi požadavky zajišťující bezproblémové vysílání bez vzájemného rušení patří limitování vyzářovacího výkonu, doby přenosu či dynamický výběr frekvencí. Nelicencované spektrum je decentralizované a nemá žádné centrální řízení [17]. Uživatelé tedy nemají žádnou garanci, že po připojení mnoha zařízení nebude docházet k vzájemnému rušení signálů (které může běžný uživatel pocítit např. při plánování vlastního Wi-Fi vysílače v přeplněné městské zástavbě). Vybudování nelicencované sítě je obvykle řádově levnější než investice do licencované sítě, protože odpadá nutnost platit poplatky za využívání spektra.

Mezi nelicencované sítě patří sítě krátkého dosahu (Wi-Fi, Bluetooth, NFC, ZigBee [18] atd.) a LPWAN (Sigfox, LoRaWAN, DASH7 [19] atd.). V této kapitole budou detailněji popsány nelicencované sítě vhodné pro IoT.

2.1 Síť krátkého dosahu

Sítě krátkého dosahu, jak název napovídá, jsou určeny pro lokální přenosy dat do vzdálenosti desítek až stovek metrů. Tyto sítě umožnily obyčejným lidem přenášet data mezi svými zařízeními bez nutnosti velkých investic do budování infrastruktury. Sítě krátkého dosahu běžně vyžadují nastavení přístupových stanic, správu autentizace nebo zabezpečení, do jisté míry jsou tyto požadavky zajišťovány samotnými výrobci. Zařízení v těchto sítích obvykle fungují po celém světě, jelikož využívají globální standardy.

2.1.1 Wi-Fi

Sít Wi-Fi je bezdrátovým rozšířením LAN protokolu IEEE 802.11. Wi-Fi začala operovat v pásmu 2,4 GHz na nezávislých kanálech širokých 5 MHz, které se mohou navzájem rušit a tím zpomalovat. Později byla přidána podpora vysílání i v pásmu 5,8 GHz na širších kanálech 20 MHz. Přenos dat probíhá prostřednictvím zapouzdřených ethernetových rámců. Standard 802.11g z roku 2003 má teoretickou rychlost 54 Mb/s, s využitím technologie

MIMO¹ dosahují novější standardy maximálních² rychlostí 600 Mb/s v pásmu 2,4 GHz a 1300 Mb/s v pásmu 5,8 GHz [21].

Typická Wi-Fi síť obsahuje přístupový bod AP (Access Point), který řídí komunikaci mezi připojenými zařízeními, poskytuje služby a zajišťuje připojení k internetu. Pokrytí sítě je závislé na výkonech antén přístupového bodu i zařízení, překážkách a zarušení prostředí, běžně se maximální dosah signálu Wi-Fi pohybuje v rozmezí 10 - 100 m.

Velké přenosové rychlosti a dosah signálu vyžadují značné nároky na výkon koncových zařízení v porovnání s jinými sítěmi pro IoT. V poslední době se však někteří výrobci zaměřili na vývoj energeticky efektivních Wi-Fi čipů, které nabízí významné zlepšení v oblasti spotřeby a dají se použít i pro oblast IoT. Připojení IoT zařízení prostřednictvím Wi-Fi umožňuje snadnou, rychlou a levnou integraci do existující infrastruktury s využitím již zavedených standardů a protokolů [22].

2.1.2 Bluetooth

Standard Bluetooth, který vznikl v roce 1994, využívá nelicencované pásmo 2,4 GHz společně s Wi-Fi. Je určen pro přenos malého množství dat přibližnou reálnou rychlostí do 2 Mb/s v závislosti na konkrétní verzi³. Aby nedocházelo k vzájemnému rušení s dalšími zařízeními v daném pásmu (především s Wi-Fi), Bluetooth používá technologii Frequency-hopping, jejíž princip spočívá v přeskokování mezi frekvencemi širokými 1 MHz, ke kterému dochází 1600x za sekundu. Dosah Bluetooth signálu je v závislosti na vysílací třídě v rozmezí jednotek až desítek metrů bez překážek. Třídy výkonu jednotlivých zařízení definují maximální povolený výkon v rozsahu 1 - 100 mW [23]. Bluetooth je typicky využíván pro přenos hlasu či hudby v autech, bezdrátových sluchátkách a mikrofonech, ale přenosová rychlost umožňuje posílání menšího množství dat, čehož využívají některá IoT zařízení.

Od roku 2017 se na trhu objevují zařízení podporující Bluetooth verzi 5.0 (např. mobilní telefony Samsung Galaxy S8, iPhone 8 či iPhone X), která uvádí až čtyřnásobný dosah oproti předchozím verzím. Toho je dosaženo adaptivní volbou přenosové rychlosti mezi 2 Mb/s, 1 Mb/s, 500 kb/s a 125 kb/s, s nižšími rychlostmi roste dosah signálu, což je příznivý krok k IoT zařízením. Dále se zvětšily přenášené datové pakety. Pro využití všech výhod verze 5.0, je nutné, aby obě komunikující zařízení podporovala Bluetooth 5.0. Telefon s touto verzí však může komunikovat i se staršími zařízeními disponující nižšími verzemi [24, 25].

¹Technologie MIMO zvyšuje bitovou propustnost díky využití více vysílačích a přijímacích antén, které jsou na sobě nezávislé

²Pro 802.11g je reálná rychlost 20 Mb/s, s využitím MIMO jsou typické přenosové rychlosti 100 Mb/s v pásmu 2,4 GHz a 200 Mb/s v pásmu 5,8 GHz [20]

³Bluetooth od verze 3.0 dosahuje teoretické rychlosti až 24 Mb/s. Přes Bluetooth je navázáno spojení mezi zařízeními a samotný přenos dat probíhá pomocí Wi-Fi.

2.2 Sítě LPWAN

Bezdrátové sítě LPWAN (Low-power Wide-area Network) jsou specializované pro IoT s minimálními nároky na energii a zároveň s dostatečným dosahem. Toho je docíleno přenosem malých velikostí dat v delších časových intervalech. Krátké zprávy mají typicky velikost nižších desítek bajtů, do kterých se musí vejít odesílaná data i s hlavičkou nezbytnou k správnému doručení. Tyto zprávy mohou obsahovat např. stav teploměru, aktuální souřadnice senzoru nebo hodnotu s odečtem vodoměru. Hlavička zpráv obvykle obsahuje nejjednodušší protokoly, které nevyžadují složitý (a dražší) hardware koncového zařízení. Obvykle je využívána hvězdicová topologie sítě, jejíž jádro je připojené k síti operátora, ale není zajištěna žádná pravidelná synchronizace se sítí [26].

2.2.1 Sigfox

Sigfox je francouzská společnost založená v roce 2009, která prostřednictvím svých partnerských operátorů v jednotlivých státech buduje globální síť [26]. V České republice je jejím partnerem firma SimpleCell pokrývající 94 % území v lednu 2019. Sigfox umožňuje snadný mezinárodní roaming, zařízení fungující v jedné zemi bude komunikovat se sítěmi ve všech dalších státech se Sigfox pokrytím bez jakýchkoliv poplatků za roaming⁴ [27].

Síť Sigfox slouží pro přenos malého množství dat na velké vzdálenosti. Pro komunikaci využívá frekvence v rozhlasovém pásmu ISM⁵ a technologii UNB (Ultra Narrowband Modulation), která vyžaduje minimum vyzařované energie ve velmi úzkém pásmu. Na venkově mají vysílače dosah 20 - 30 km, ve městech do 10 km a uvnitř budov se dosah snižuje. Signál ale dobře prochází zdmi, což je vhodné např. pro panelákové šachty, hluboké sklepy či podzemní potrubí [8].

ISM pásmo částečně omezuje probíhající komunikaci, aby nebylo zarušeno množstvím zařízení jedné technologie. Proto Sigfox limituje pro každé zařízení až 140 uplink zpráv (6 zpráv za hodinu) denně o objemu 12 bajtů a 4 downlink zprávy o velikosti 8 bajtů. Ke každé zprávě se ještě přidává hlavička 14 bajtů [28]. Není zajištěna žádná synchronizace mezi zařízeními a sítí, proto je každá zpráva odeslána třikrát na třech různých frekvencích⁶ a základnová stanice neustále monitoruje celé spektrum pro příchozí zprávy. Maximální rychlost uplink přenosu je 0,1 kb/s v Evropě a 0,6 kb/s v USA, pro downlink je i v Evropě umožněno 0,6 kb/s [29].

Prakticky tedy Sigfox slouží pouze pro jednosměrnou komunikaci, případně pro občasné potvrzení ze strany serveru. Je vhodný pro řídkou komunikaci a velmi krátké zprávy, které téměř neumožňují např. aktualizaci firmwaru

⁴Roaming je poskytování telekomunikačních služeb pro stejné zařízení i v jiné zemi bez změny předplatného

⁵V Evropě Sigfox používá pásmo 100 Hz na frekvencích 868-869 MHz, v USA je vyhrazeno širší pásmo 600 Hz na frekvencích 902-928 MHz

⁶Technologie Frequency-hopping, kterou využívá i např. Bluetooth

zařízení.

■ 2.2.2 LoRaWAN

LoRaWAN je síť, kterou využívá technologie LoRa. Vznikla v roce 2012 ve Francii a operuje také v pásmu ISM⁷. Využívá rozprostřené spektrum s vysíláním krátkých kmitočtově rozlitaných impulsů. Lora používá technologii CDMA pro multiplexování signálu z více zařízení na jedné frekvenci. Tím je docíleno vyšší kapacity kanálu a dynamické úpravě přenosových rychlostí v závislosti na vzdálenosti od vysílače, šumu, překážkách atd. Maximální rychlost přenosu se tedy pohybuje v rozsahu 0,3 - 11 kb/s, což je znatelně více než Sigfox.

LoRa umožňuje obousměrnou komunikaci, takže není problém vyžadovat potvrzovací zprávy ze strany serveru. Zařízení nejsou synchronizovaná a vysílají zprávy dle potřeby k nejbližším základnovým stanicím. Ty data zkontrolují a následně odešlou přes páteřní síť až k aplikačnímu serveru. LoRaWAN také stanovuje limit na maximální množství přenesených zpráv z jednoho zařízení, který je zhruba 12 zpráv během jedné hodiny [30, 31].

Na rozdíl od Sigfoxu není v současné době žádný globální standard pro mezinárodní roaming, ten funguje pouze na bázi domluvy mezi jednotlivými operátory a je spíše ve fázi testů [32, 33]. Vysílače mají nižší dosah než Sigfox (maximálně 10 km ve volném prostoru) a v České republice nekompletní pokrytí, proto je LoRa více využívána jako náhrada Wi-Fi s vlastností lokální sítě s větším dosahem, výdrží a menší přenosovými rychlostmi.

⁷LoRaWAN využívá pásmo 0,3 - 50.0 kHz v okolí kmitočtů 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz (v Evropě) a 915 MHz (v Severní Americe)

Kapitola 3

Licencované sítě pro IoT

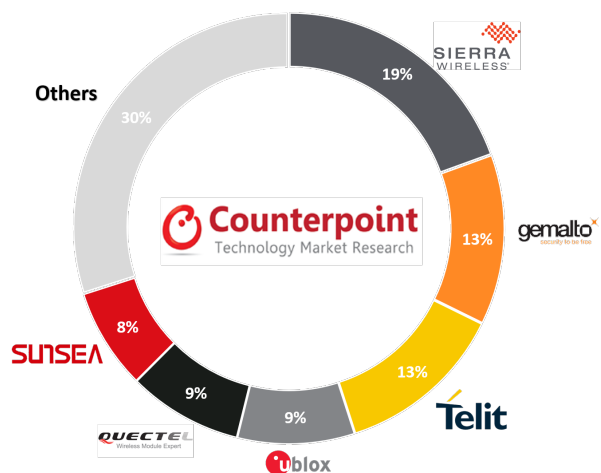
Následující kapitola se zabývá licencovanými sítěmi pro IoT, především jejich rozdíly ve srovnání se sítěmi LPWAN z předchozí kapitoly. Tato část obsahuje detailnější popis rozšířených sítí NB-IoT a LTE-M, analýzu jejich vlastností, porovnání a shrnutí stavu IoT sítí v České republice.

Licencované sítě využívají frekvence, které může využívat pouze jejich vlastník. Jednotlivé státy provádí aukce kmitočtů, ve kterých si mobilní operátoři na určitou dobu zakoupí část¹ frekvenčního spektra. Operátor rozděluje zdroje jednotlivým účastníkům dle svého uvážení, nicméně podmínky aukce mu mohou nakazovat např. vybudování dostatečného pokrytí sítě i v odloučených lokalitách či poskytnutí své sítě pro využití některými státními službami. Zavázání se k plnění podmínek aukce a vysoké ceny kmitočtového spektra motivují operátory k značným investicím do sítě, udržování její kvality a pravidelné údržbě [6, s. 328]. Autor nabyt po osobních rozhovorech s odborníky dojem, že se potencionální zákazníci (výrobci přístrojů, senzorů, správci objektů, pojišťovny apod.) spíše přiklání k licencovaným sítím z důvodu větší důvěry v její dlouhodobou funkčnost [35].

Se spouštěním licencovaných IoT sítí prudce roste i počet zařízení v těchto sítích. Nedávný průzkum odhaduje 5 miliard připojených IoT zařízení v licencovaných sítích v letech 2019 - 2025. Z diagramu 3.1 je zjevné, že na výrobě modulů pro licencované IoT sítě se aktuálně podílí mnoho společností. Vývoj těchto přístrojů je tedy poměrně roztržštěný bez nějaké výrazně dominantní firmy [1].

NB-IoT a LTE-M jsou v současné době dvě nejrozšířenější technologie pro licencované IoT sítě. Dle firmy Qualcomm, která vyrábí moduly a čipy pro tyto sítě, na konci roku 2018 více než 50 operátorů ve světě podporovalo alespoň jednu z těchto technologií. Zatímco LTE-M je populární především v Severní Americe, ve zbytku světa mírně převládá podpora NB-IoT [36, 37]. Stav licencovaných sítí ve světě je vidět na obrázku 3.2. Největší rozšíření NB-IoT je v Číně, která masivně investuje do všech oblastí IoT [38, 39].

¹Typicky si operátor zakoupí pásma o šířkách 10 MHz, 15 MHz nebo 20 MHz [34]



Obrázek 3.1: Tržní podíl společností vyrábějící moduly pro licencované IoT sítě v roce 2018 [1]



Obrázek 3.2: Mapa světa se spuštěnými licencovanými IoT sítěmi (červenec 2018) [2]

3.1 Vlastnosti licencovaných IoT sítí

Nutnost značných výdajů za výstavbu sítě a zakoupení frekvenčních pásem garantuje jistou trvanlivost a spolehlivost dané sítě. Licencované IoT sítě jsou založeny na globálních standardech, které zajišťují dlouhodobou funkčnost po celém světě a snadnější integraci nových funkcí. Nelicencované sítě jako Sigfox či LoRaWAN měly v posledních letech velkou výhodu v rychlejší integraci a vývoji oproti licencovaným sítím, u kterých je třeba sladění a shoda v celém průmyslovém odvětví. S dokončováním licencovaných standardů se tyto rozdíly ve vývoji zmenšují. Někteří operátoři při zavádění IoT sítí využívají hybridní kombinaci licencovaných i nelicencovaných LPWAN sítí s výhodami obou technologií [1].

Jelikož by se operátorům nevyplatil nákup frekvencí určených pouze pro IoT sítě, poskytovatelé se pro IoT snaží využít malou část svého již zakoupeného spektra využívaného mobilními sítěmi. Dále jsou použity již postavené vysílače a infrastruktura pro mobilní sítě, spuštění sítí pro IoT je po technické stránce obvykle realizováno pouze softwarovými úpravami bez nutnosti obměny hardwaru, což znatelně snižuje náklady na výstavbu. V případě, že se operátor rozhodne své sítě využít i pro IoT, celosvětová dostupnost mobilních sítí umožní dostatečné pokrytí [6, s. 344].

V licencovaných sítích dochází k interferenci pouze mezi vlastními zařízeními, protože operátor sám rozděluje své prostředky. Zahlcení sítě se může poskytovatel vyhnout přiřazením nižší priority některým přístrojům, které nepotřebují okamžitou dostupnost sítě a mohou odeslat připravená data v době, kdy bude síť volnější, např. v noci [40, s. 366].

Na rozdíl od LPWAN sítí se zařízení po registraci pravidelně synchronizuje se sítí v nastavitelných časových intervalech, tím potvrzuje svojí dostupnost a zjišťuje kvalitu signálu. Při nižší kvalitě signálu může anténa přístroje pracovat s vyšším výkonem a odeslané zprávy jsou vícekrát opakovány pro spolehlivé doručení. Zařízení po odeslání zpráv obvykle čeká na potvrzující zprávu ze strany serveru. Z těchto důvodů není snadné zákazníkovi garantovat přesnou výdrž baterie, protože energetická spotřeba se může prudce měnit v závislosti na vzdálenosti od základnové stanice či kvalitě signálu, oproti pevně danému počtu vyslaných zpráv např. u Sigfoxu [6, s. 348].

V současné době není u licencovaných sítí vyřešený problém mezinárodního roamingu. Každé zařízení má vlastní SIM kartu, případně eSIM², která funguje pouze v síti poskytovatele. Operátoři nemají mezi sebou domluvené poplatky za přenos dat v IoT sítích, navíc je třeba řešit otázky spojené s chováním modulu v cizí síti, např. četnost vysílání zpráv s vazbou na úsporu energie zařízení [42]. V červnu 2018 proběhlo první úspěšné testování mezinárodního roamingu mezi Deutsche Telekom a Vodafone, další roamingové dohody ale musí vzniknout přímo mezi konkrétními operátory [36, 43].

²eSIM karta má funkce klasické SIM karty, ale jedná se o samostatný čip zabudovaný do základní desky zařízení. Odpadá u ní nutnost vkládání SIM karty do příslušného slotu, což odstraňuje některé problémy (poškození SIM karty, rozměry apod.) [41]

3.2 NB-IoT

V roce 2016 organizace 3GPP schválila standard Narrowband IoT (NB-IoT), který má hlavní myšlenku využít úzkou část licencovaného pásma stávajících mobilních sítí pro IoT zařízení. Oproti běžným sítím operátorů je v síti NB-IoT kladen důraz na pokrytí, kapacitu sítě a energetickou náročnost, na druhou stranu není nutné vyžadovat vysoké přenosové rychlosti nebo minimální latenci³ typickou pro síť LTE (více o požadavcích na IoT síť v kapitole 1.3) [6, s. 219–220].

NB-IoT dle specifikací poskytuje až o 20 dB vylepšený dosah signálu oproti GPRS. V síti je podporována obousměrná komunikace s latencí jednotek sekund, maximální přenosová rychlost v základním režimu je udávána 20 kb/s pro uplink i downlink [6, s. 291][44]. NB-IoT se tedy dá přirovnat k zjednodušené LTE síti, ve které je energetická úspora a maximální pokrytí dosaženo několika způsoby, z nichž nejdůležitější budou popsány v této části.

3.2.1 Zúžení šířka pásma

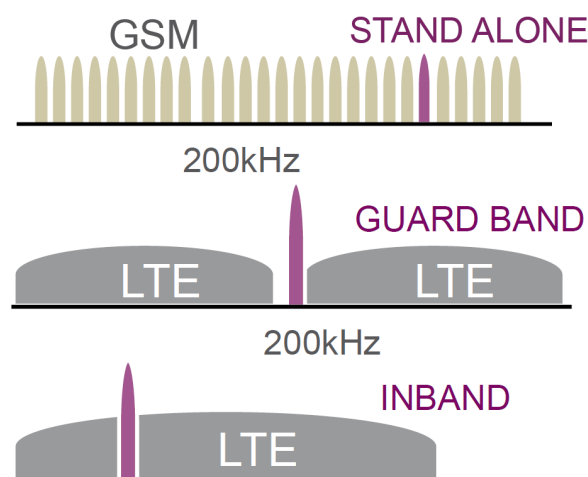
Síť NB-IoT využívá úzké pásmo o šířce 180 KHz⁴, které je přidělené pouze pro zařízení NB-IoT. Na obrázku 3.3 jsou uvedeny možnosti implementace NB-IoT uvnitř existujícího LTE pásma (Inband), v ochranném LTE pásmu (Guard band) nebo na samostatné frekvenci vedle GSM pásem (Stand alone). S hardwarovými úpravami základnové stanice je možné nastavit na vysílačích vyšší vyzařovací výkon v úzkém pásmu, což zlepšuje dosah signálu [18]. Tato technologie zesiluje výkonovou hustotu PSD (Power Spectral Density Boosting) a využívá se pro zvýšení vysílacího výkonu v úzkém frekvenčním pásmu, ačkoliv celkový vysílací výkon zůstane zachován [45].

3.2.2 Opakování zpráv

Jelikož sítě pro IoT nekladou vysoké nároky na přenosové rychlosti a latenci, je možné využít opakování zpráv pro dosažení lepšího pokrytí. Pro stanovení počtu opakování zpráv slouží tři CE úrovně, které podle kvality signálu upravují počet opakování každé zprávy. Zařízení blíže k vysílači zprávu neopakují a tím šetří baterii, vzdálenější přístroje zprávu obdrží za cenu vyššího zpoždění i v lokalitách, kam by běžný signál mobilní sítě už nedosáhl. Zvýšením počtu opakování je samozřejmě snížena přenosová rychlost [6, s. 221]. Obecně platí, že zdvojnásobení počtu zpráv znamená zvýšení pokrytí o 3 dB [46].

³Latencí se v informatice označuje reakční doba či zpoždění na určitý požadavek (např. doba od odeslání do doručení zprávy)

⁴Bylo zvoleno pásmo 180 KHz, protože to je šířka pásma jednoho bloku v LTE. Někdy je uváděna šířka 200 KHz, zahrnující i postranní ochrannou rezervu



Obrázek 3.3: Možnosti implementace NB-IoT ve stávající síti [3]

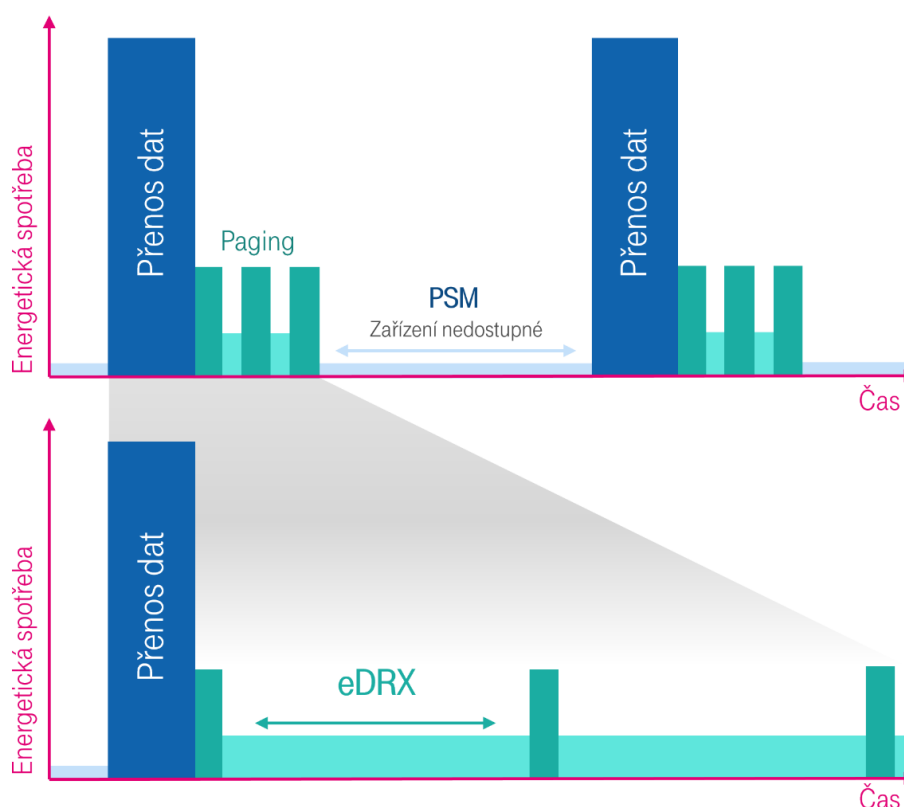
3.2.3 Prodloužení životnosti baterie

Po většinu času jsou běžně IoT zařízení nečinná a občasným vysláním krátkých zpráv. Životnost baterie tedy závisí především na tom, jak se zařízení chová v těchto nečinných časech mezi přenosem zpráv. Běžné telefony se v mobilní síti ohlašují (stav „paging“) a kontrolují stav pravidelně v intervalu několika sekund, což způsobuje značnou spotřebu energie [47].

Pokud mezi zařízeními a stanicí v síti NB-IoT nedojde po určitou dobu k přenosu dat, dojde k ukončení „paging“ stavu a přechodu do stavu PSM (Power Saving Mode). V tomto stavu se přístroj přestane ohlašovat, je ze strany serveru nedostupný, zůstává registrovaný v síti a ponechá si zapnutý pouze jednoduchý lokální oscilátor, aby zařízení vědělo, kdy se z tohoto stavu opět probudí. Dobu, po kterou zařízení zůstává v nedostupném módu, určuje TAU časovač (Tracking Area Update timer). V tomto stavu je vypnutý přijímač, přístroj spotřebovává minimální množství energie a probuzení ze stavu může být iniciováno pouze zařízením v případě uplink zprávy ze senzoru nebo po uplynutí TAU intervalu, který může být až 1 rok. Mód je vhodný pro aplikace jako chytré měření prostředí či kontrola obsazenosti parkovacího místa, kde je spouštěčem činnosti senzor přístroje nebo časovač.

Aby zařízení nebylo nedostupné ze strany serveru příliš dlouhou dobu, byl prodloužen interval mezi synchronizačními „paging“ zprávami za cenu mírného zvýšení energetické spotřeby. Tento interval se nazývá eDRX (Extended Discontinuous Reception), jeho hodnota je v rozmezí jednotek sekund až 3 hodin [6, s. 221, 276–277][48]. Po uplynutí intervalu eDRX dojde k monitorující „paging“ zprávě a případnému datovému přenosu. Příklady aplikací založených na funkci eDRX jsou dálkové spouštění topení nebo vzdálené ovládání inteligentní energetické sítě, při kterých přichází impuls k činnosti ze strany serveru.

Na diagramu 3.4 jsou graficky znázorněny stavy pro prodloužení životnosti baterie. Pro maximální energetickou úsporu je ideální, aby po odeslání uplink



Obrázek 3.4: Grafické znázornění stavů pro energetickou úsporu v NB-IoT: (nahore), eDRX (dole) [2]

zprávy ihned přišla případná downlink zpráva (odpověď serveru, potvrzení doručení apod.), některé IoT aplikace ovšem takhle nefungují.

3.2.4 Zjednodušení zařízení

Maximální vysílací výkon zařízení je omezen na 14, 20 nebo 23 dBm a může se měnit v závislosti na aktuální kvalitě signálu. Nízké výkony umožňují zesilovač integrovat přímo na čip zpracovávající data, což představuje další úspory.

Pro snížení ceny i energetické spotřeby zařízení je vhodné využít procesory s nižším výkonem i pamětí. Datové bloky v NB-IoT mají menší velikost a jsou zpracovávány jednodušším konvolučním kódováním v porovnání s poměrně komplexním turbo kódováním využívaným v běžném LTE, které vyžaduje větší paměť i rychlost procesoru. Pro přenos malých dat není potřeba MIMO technologie ani složitější modulace. Zařízení pracuje v tzv. half-duplex režimu⁵, který neumožňuje v jeden okamžik data přijímat i odesílat, ale vyžaduje pouze

⁵Při half-duplex přenosu jsou využívány dvě frekvence, ale v každém okamžiku probíhá přenos pouze v jednom směru. Oproti tomu full-duplex používá pouze jednu frekvenci, obě zařízení mohou vysílat i přijímat současně, ale je zde nutnost složitější antény, duplexeru pro oddělení směrů přenosu a vyšší výpočetní výkonu [49].

jednu jednoduchou anténu [6, s. 220–221].

3.3 LTE-M

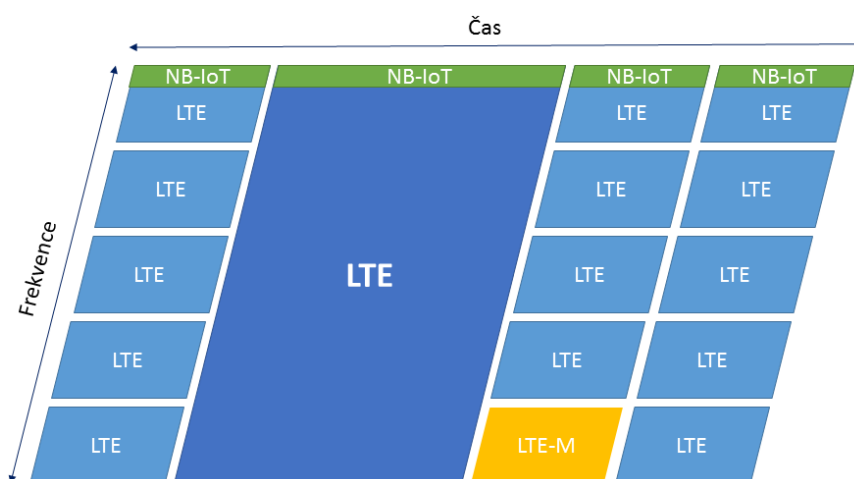
V roce 2016 organizace 3GPP schválila kromě NB-IoT i standard LTE-M. Ten je někdy označován také jako eMTC (enhanced Machine Type Communication) nebo LTE Cat-M1. Síť LTE-M dynamicky operuje v licencovaném LTE pásmu pro IoT zařízení. Oproti NB-IoT využívá větší šířku pásma, nejčastěji 1,08 MHz, což přináší výhody vyšší přenosové rychlosti, nižší latenci a další vlastnosti [50].

LTE-M se stejně jako jiné IoT sítě soustředí na udržení nízké ceny koncových zařízení, velkého dosahu a dlouhé výdrže baterie, ale uchovává si obrovskou kapacitu sítě s výkonem a funkcemi vhodnými pro jednoduché, ale i středně náročné aplikace, pro které nemusí být síť NB-IoT vhodná. Tyto dvě sítě fungují na podobných principech a nabízí mnoho společných funkcí. Tato část se bude zabývat především rozdíly mezi LTE-M a NB-IoT.

3.3.1 Využití frekvenčního spektra

Jedna z hlavních výhod LTE-M je, že může využívat stejné frekvence operátora, které slouží pro běžné LTE. Zdroje určené pro LTE mohou být podle potřeby dynamicky přidělovány pro LTE-M zákazníky. Pokud konkrétní aplikace nevyžaduje okamžitý přenos dat, je možné snadno plánovat přenos dat v LTE-M síti na denní dobu, kdy je dostatek volné kapacity v LTE pásmu (např. v noci). Tato možnost má za cíl snižovat vliv IoT zařízení na běžnou LTE síť a tedy náklady operátora na spektrum dedikované pouze pro IoT.

Běžná zařízení využívají LTE-M síť o šířce pásma 1,08 MHz, což je šířka šesti sousedních LTE bloků PRB po 180 KHz [6, s. 139][48].



Obrázek 3.5: Rámcové využití frekvenčního spektra pro sítě LTE (5 MHz), LTE-M (6 bloků, 1 MHz) a NB-IoT (1 blok, 180 KHz)

3.3.2 Opakování zpráv

LTE-M, podobně jako NB-IoT, pro zlepšení dosahu využívá opakované odeslání zpráv za cenu snížení latence a přenosové rychlosti. V síti jsou běžně podporovány dva CE režimy: CE mód A, který podporuje až 32 opakování zprávy, a CE mód B podporující až 2048 opakování. Především díky repetici zpráv je umožněno značné zlepšení dosahu proti GPRS, který by měl u LTE-M docílit téměř stejných hodnot pokrytí jako NB-IoT. Navíc není potřeba měnit hardwarové parametry sítě, ale stačí upravit techniku opakování v datových a řídicích kanálech [6, s. 138, 345–347]. Existují zdroje (např. [51]), které udávají dosah signálu LTE-M ještě lepší než u NB-IoT (20 dB), obvykle však tato srovnání nejsou dokázána v porovnatelných podmínkách,

CE mód A je určen především pro venkovní pokrytí a je vždy k dispozici v síti. Využívá modulace QPSK nebo 16QAM a při přenos dat probíhá najednou v 1 - 6 blocích PRB. Mód B je nezbytný pro vnitřní pokrytí těžko dostupných míst, není v síti povinný, ale pouze doporučený. Tento mód využívá pouze jednodušší modulaci QPSK, ale pro downlink vždy zabírá větší šířku 4 - 6 bloků PRB. Vývojář by měl během testovacího provozu bateriového zařízení vyzkoušet aplikaci v obou módech, protože reálná spotřeba v CE módu B pochopitelně narůstá, čímž je snížena životnost přístroje [6, s. 156, 181][52].

3.3.3 Další vlastnosti LTE-M

Jelikož má LTE-M oproti NB-IoT šestinásobnou šířku pásma, LTE-M podporuje vyšší rychlost přenosu (řádově stovky kb/s v obou směrech) a nižší latenci (desítky ms). Díky latenci srovnatelné s běžnou sítí LTE je v LTE-M podporována technologie VoIP (Voice over Internet Protocol) - přenos hlasu přes internet, což mohou využít například zabezpečovací systémy, komunikátor ve výtahu či chytré hodinky. Standard VoIP vyžaduje nepřetržité přenosové rychlosti minimálně 12 kb/s (pro základní kvalitu) a 24 kb/s (pro HD kvalitu) a pochopitelně nízkou latenci pro příjemnou komunikaci, což NB-IoT neposkytuje. VoIP je v LTE-M volitelná funkce, ale očekává se, že pro umožnění více typů aplikací bude operátory podporována [46].

LTE-M dále podporuje snadnější mobilitu koncového zařízení. Jelikož jsou v NB-IoT přístroje pravidelně uspávány (viz sekce 3.2.3), v případě přesunu k jiné základnové stanici dochází k energeticky náročnému vyhledání nových stanic. LTE-M se do takového stavu uspání nedostane, průběžně si monitoruje stav sítě a při přesunu přístroje k jiné základnové stanici dochází k dynamickému přesměrování [6, s. 196].

3.4 Porovnání NB-IoT a LTE-M

Tabulka 3.1 obsahuje orientační technické porovnání vybraných parametrů sítí NB-IoT a LTE-M. Očekává se, že síť NB-IoT bude díky největší jednoduchosti dosahovat nejdelší výdrže baterie, která by u zařízení odesílajících krátké jednoduché zprávy v intervalu 12 hodin mohla dosahovat až 10 let na hranici

	NB-IoT	LTE-M
Průměrná rychlost přenosu	DL: 20 kb/s UL: 20 kb/s	DL: 375 kb/s UL: 300 kb/s
Latence	<10 s	<50 ms CE mód A <1 s CE mód B
Zlepšení signálu proti LTE	+20 dB	+15 dB
Šířka pásma	180 kHz (1 PRB)	1080 kHz (6 PRBs)
Sdílení spektra s LTE	Nepodporováno	Dynamické sdílení
Mobilita	S komplikacemi	Podporována
Přenos hlasu	Ne	Ano, VoIP
Očekávaná cena modulu	<5 \$	>5 \$

Tabulka 3.1: Technické porovnání vybraných parametrů NB-IoT a LTE-M [6]

pokrytí sítě [6, s. 318][53]. Tato technologie je vhodná pro zařízení jako vzdálené kontrolní senzory, požární hlásiče, vodoměry či chytré měřicí zařízení, kterým postačí odesílání dat v delších intervalech, občasný monitoring pro příchozí downlink zprávy a uvolněné požadavky na latenci.

Vyšší přenosová rychlost u LTE-M umožňuje snadnější vzdálené aktualizace firmwaru zařízení. Takové aktualizace jsou nezbytné, protože operátor může měnit některé specifické služby v síti nebo mohou být vydány nové obrany proti vzdáleným útokům. Díky vyšší rychlosti společně s nízkou latencí je možné implementovat pro přenos dat pokročilé protokoly. U LTE-M je předpokládá použití běžných IP protokolů, které ale nejsou vhodné pro NB-IoT. Zabezpečení, garance doručení dat a zajištění určité QoS budou klíčovými problémy a výzvami pro celé odvětví IoT [54, 55].

Ačkoliv je možné udělat si představu o rozdílech mezi licencovanými IoT sítěmi podle porovnání v tabulce 3.1, bylo by vhodné demonstrovat rozdíly mezi nimi reálnými měřeními. V době psaní této práce je k dispozici několik veřejných studií (např. [53, 56]), které se věnují rozdílům mezi NB-IoT a LTE-M, tato porovnání nejsou natolik srovnatelné, aby poskytly jednoznačné výsledky. Často se jedná pouze o teoretické modely nebo počítačové simulace, které jsou navíc prováděny v rozdílných podmínkách či konfiguracích pro jednotlivé sítě. Aby bylo dosaženo skutečně vypovídajících výsledků, bylo by ideální provést množství měření v obou sítích ve stejných lokalitách, ve stejnou dobu, s podobným nastavením sítí poskytovatele, na shodných zařízeních s využitím společných protokolů. Samotní operátoři si přesnější měření pravděpodobně provádí sami, data z nich však nejsou veřejně publikována.

3.5 Stav IoT sítí v ČR

V současné době (březen 2019) je v České republice v provozu několik sítí pro IoT, které mají za cíl pokrýt celý stát. V roce 2016 byla spuštěna nelicencovaná síť Sigfox prostřednictvím partnera SimpleCell, která údajně pokrývá 94 %

území a 96 % populace (více o Sigfox v části 2.2.1).

Během roku 2017 Vodafone spustil první licencovanou síť NB-IoT s pokrytím téměř 100 % území a 94 % populace [57]. Zatím není možné zakoupení samotné SIM karty s NB-IoT konektivitou k okamžitému připojení. Pro využití sítě je třeba koupě koncového zařízení prostřednictvím společností, které spolupracují s Vodafone a nabízejí konkrétní produkty. Operátor plánuje prodávat SIM karty podporující NB-IoT i tradiční mobilní síť 2G, která má především výhodu globálního pokrytí. Zařízení by si podle potřeby samo rozhodlo, kterou síť v daném okamžiku využije [58].

NB-IoT poskytuje i T-Mobile, ačkoliv se zatím jedná pouze o pilotní provoz v několika městech (Praha, Brno, Mladá Boleslav a Beroun). Stejně jako u Vodafone není v tuto chvíli možné zakoupení samotné SIM karty, síť je ve spuštěných lokalitách testována pouze na zařízeních vybraných partnerů. T-Mobile ujišťuje, že jejich SIM karty bude možné používat v roamingu v sítích NB-IoT v rámci celé skupiny Deutsche Telekom, která již plně spustila NB-IoT v Rakousku, Chorvatsku a Nizozemí a přidává další státy [5].

Žádný operátor v České republice síť LTE-M dosud nespustil, na Slovensku ale poskytovatel Orange plánuje během prvního pololetí 2019 testovací provoz této sítě v několika městech [59, 60].



Část II

Praktická část

■ Úvod

Teoretická část obsahovala popis sítí pro IoT a rozdíly mezi nimi. V 4. kapitole praktické části je vysvětlen výběr zařízení pro fungování v licencované síti NB-IoT, jeho nastavení a příklady komunikace se serverem. Kapitola 5 popisuje provedení reálných měření provozních parametrů v síti NB-IoT pro bezpečnostně citlivé aplikace. Kapitola dále obsahuje popis hromadného zpracování naměřených dat, statistické vyhodnocení měření a diskuzi nad výsledky.

Kapitola 4

Zprovoznění zařízení v síti NB-IoT

Pro měření byla zvolena síť NB-IoT, jelikož v České republice není v provozu jiná LPWAN licencovaná síť. Tato část seznamuje se zařízením využívajícím NB-IoT a použitým softwarem. Dále je zde popsána konfigurace zařízení, registrace v síti a ukázka jednoduché komunikace v NB-IoT mezi vývojovým kitem a vzdáleným serverem. Ačkoliv je v této kapitole pro ukázkou zprovoznění použit modul SARA-R410M, reálná měření provozních parametrů sítě byla z technických důvodů provedena modulem SARA-N211 (více o změně zařízení v kapitole 5).

4.1 Výběr zařízení a jejich konfigurace

4.1.1 Měřící kit s modulem

Firma U-blox nabízí kompaktní modul SARA-R410M-02B, který podporuje síť NB-IoT i LTE-M a vysílá na všech celosvětově používaných frekvenčních pásmech používaných pro LTE. Modul má velikost 16 x 26 x 2,5 mm [61].

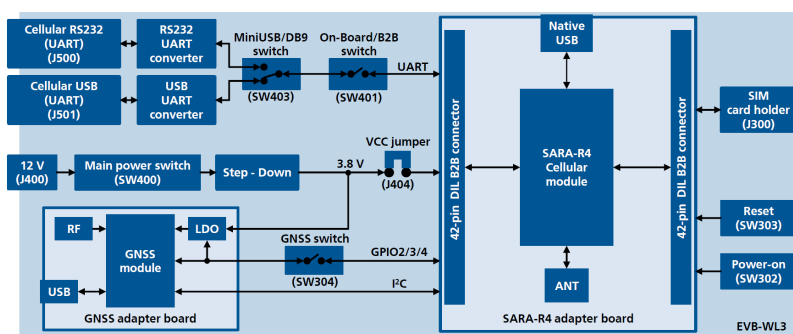
Pro snadnější seznámení a testování U-blox nabízí kompletní vývojový kit EVK-R4, který dodává s deskou obsahující modul SARA-R410M-02B. Dále kit obsahuje GNSS modul pro určení polohy, antény pro LTE i GPS, napájecí adaptér, kabel mini USB a sluchátka. Připojit se lze pomocí UART (sériový port RS-232 nebo mini USB) a mini USB vstupu přímo u modulu. Kit je nutné neustále napájet, jelikož neobsahuje slot na externí baterii [62].

Do kitu je vložena SIM karta, kvůli registraci a vysílání v síti NB-IoT. Autor použil SIM kartu od T-Mobile určenou přímo pro NB-IoT.

4.1.2 Konfigurace zařízení

Kit je připojen k notebooku kabelem USB přes UART, aby bylo možné odesílat do kitu konkrétní příkazy. Na stránkách výrobce je k dispozici ovladač¹, který by měl nastavit COM porty k viditelnosti připojeného kitu ve Windows. Některým počítačům s různými verzemi Windows tento ovladač z neznámých důvodů nefungoval a bylo nutné dohledávat na internetu jiné

¹Použitý ovladač ze stránek U-blox je SARA-R4 USB Windows Driver, verze 1.1, ze dne 25 července 2017



Obrazek 4.1: Blokový diagram měřicího kitu EVK-R4 pro modul R410M [4]

ovladače. Na operačním systému Linux s distribucí Linux Mint 19.1 se kit zprovoznit nepodařilo.

Komunikace mezi notebookem a kitem probíhá pomocí terminálu. Pro snadnější ovládání byl použit program M-Center 2.0.0, který poskytuje U-blox bezplatně na svých stránkách. M-Center obsahuje terminál pro psaní příkazů, jednoduché GUI s nejběžnějšími funkcemi a umožňuje spouštění upravitelných skriptů.

Po správném připojení jsou v PC viditelné dva COM porty, pro přístup nastavíme rozhraní UART podle tabulky 4.1, která je součástí jednoduchého manuálu [4].

Data rate	115 200 b/s
Data bits	8
Parity	None
Stop bits	1
Flow control	Hardware

Tabulka 4.1: Nastavení rozhraní UART pro modul R410M

4.2 Komunikace v síti

V této části je popsán způsob inicializace zařízení, registrace v síti a příklady komunikace mezi kitem a vzdáleným serverem prostřednictvím sítě NB-IoT. Pro tyto účely je využít testovací server přímo od U-blox, který bezplatně poskytuje jednoduché služby založené na protokolech UDP a TCP. První služba „Echo“ přijme odeslanou zprávu na serveru a beze změny ji pošle zpět na modul. Druhá funkce „Daytime“ na vyžádání ze strany modulu přečte čas serveru a pošle ho přímo na modul [63].

4.2.1 Registrace v síti

Po úspěšném připojení kitu s počítačem prostřednictvím UART je třeba zařízení inicializovat a registrovat v síti. Po spuštění programu M-Center je po kliknutí na „Set port“ zvolen první viditelný port (v tomto případě COM3) s nastavením dle tabulky 4.1. Potvrzení tlačítkem „Connect“ by mělo změnit status na „Connected“.

Tlačítko „Initialization“ spustí skript, který provede sérii příkazů uvedenou v tabulce 4.2. Odpovědi na tyto příkazy můžeme sledovat v AT terminálu nebo přímo v GUI programu.

Příkaz	Popis	Odpověď modulu
AT		
ATE0		
AT+CMEE=2	Povolí chybové kódy	OK
AT+CGMI	ID výrobce	u-blox
AT+CGMM	Model zařízení	SARA-R410M-02B
AT+CGMR	Verze FW	L0.0.00.00.05.06 [Feb 03 2018 13:00:41]
ATI9	Verze FW	L0.0.00.00.05.06,A.02.00
AT+CLCK="SC",2	Odemčení SIM karty	OK
AT+CPIN?	Zkontroluje zadání PIN	+CPIN: READY
AT+UPSV?	PSM mode	+CME ERROR: operation not supported
AT+CCLK?	Čas a datum modulu	+CCLK: "80/01/06,00:02:27+04"
AT+CGSN	Číslo IMEI	352753091711000
AT+COPS?	Přečte jméno operátora	+COPS: 1,0,"230 01",9
AT+CEREG=2	Registrace v síti	OK
AT+CEREG?	Ověří registraci v síti	+CEREG: 2,5,"FDE8","1E06FD5",9
AT+CEREG=0	Registrace v síti	OK
AT+CSQ	Síla signálu, kvalita	+CSQ: 31,99

Tabulka 4.2: Série příkazů skriptu „Initialization“ s popisem a příklady odpovědí

Pro odemknutí SIM karty může být třeba zadat PIN kód², výběr sítě a připojení k ní probíhá automaticky. Poté je zařízení úspěšně registrováno v síti a schopné komunikace přes NB-IoT.

4.2.2 Testovací služba „Echo“

První služba U-blox serveru „Echo“ pošle všechny obdržené UDP pakety zpět do modulu. V tabulce 4.3 je uvedena série příkazů [63].

²Pro zadání PIN kódu „0000“ slouží příkaz AT+CPIN="0000"

Příkaz	Odpověď modulu	Popis
AT+USOCR=17	+USOCR: 0 OK 0	Vytvoří UDP socket
AT+USOST=0,"195.34.89.241", 7,9,"TestJedna"	+USOST: 0,9 OK +UUSORF: 0,9	Uložení na server Echo zpráva ze serveru
AT+USORF=0,9	+USORF: 0,"195.34.89.241", 7,9,"TestJedna" OK	Čtení obdržené zprávy
AT+USOCL=0	OK	Zavření socketu

Tabulka 4.3: Série příkazů služby „Echo“ s popisem a příklady odpovědí

4.2.3 Testovací služba „Daytime“

Druhá služba U-blox serveru „Daytime“ pošle do modulu aktuální čas a datum ze serveru. V tabulce je uvedena série příkazů [63].

Příkaz	Odpověď modulu	Popis
AT+USOCR=17	+USOCR: 0 OK 0	Vytvoří UDP socket
AT+USOST=0,"195.34.89.241", 13,4,"Test"	+USOST: 0,4 OK +UUSORF: 0,26	Požadavek na server Daytime zpráva ze serveru
AT+USORF=0,26	+USORF: 0,"195.34.89.241",13, 26,"07 JAN 2019 13:12:40 CET" OK	Čtení doručené zprávy
AT+USOCL=0	OK	Zavření socketu

Tabulka 4.4: Série příkazů služby „Daytime“ s popisem a příklady odpovědí

Kapitola 5

Reálná měření provozních parametrů v síti NB-IoT

Předchozí kapitola obsahovala popis registrace a komunikace v síti NB-IoT. Tato kapitola se zabývá reálným měřením provozních parametrů pro bezpečnostně citlivé aplikace a následným vyhodnocením.

5.1 Zdůvodnění a záměr

V sekci 3.1 byly popsány výhody licencovaných sítí v porovnání s nelicencovanými. Tato práce má za cíl zaměřit se na vybrané parametry, které jsou charakteristické právě pro licencované sítě. Běžně jsou IoT zařízení malé přístroje s jednoduchým výpočetním výkonem, které se mohou stát cílem pro potencionálního útočníka, který by chtěl zaútočit na konkrétní zařízení. Pokud by došlo u koncového zařízení či celé sítě k úniku dat nebo vzdálené ovládnutí zařízení útočníkem, důvěra zákazníků v IoT řešení by prudce klesla [55]. Proto je třeba zákazníkovi garantovat určitou kvalitu služby sítě, která by měla být nepřetržitě dostupná kdekoli v síti operátora i v oblastech s nejnižší silou přijímaného signálu.

5.2 Bezpečnostně citlivé aplikace

V této praktické části se autor zaměřil na měření vybraných parametrů, které jsou důležité pro přenos bezpečnostně citlivých dat. Jedním z důležitých parametrů je latence, pro kterou bude dále v práci využívána zkratka RTT (Round-Trip Time). RTT udává čas, který uplyne od odeslání zprávy ze zařízení na server, kde je zpráva zpracována, odeslána zpět a přijata zařízením.

Další měřená vlastnost sítě je úspěšnost doručení zpráv (Success Rate) udávající poměr úspěšně doručených zpráv k odeslaným. Některé protokoly (např. TCP) kontrolují, zda jsou všechny pakety doručeny, a případně opakují vysílání. V síti NB-IoT se z důvodu nižších přenosových rychlostí neočekává budoucí využití těchto složitějších protokolů, proto je důležitý vysoký poměr Success Rate, který by se ideálně blížil k 100 %.

Ačkoliv vysoká přenosová rychlost není klíčový parametr pro IoT sítě v případě běžného přenosu krátkých zpráv, pro některé IoT aplikace se

jedná o důležitý parametr. Je pravděpodobné, že většina zařízení bude občas vyžadovat vzdálenou aktualizaci firmwaru (z důvodů bezpečnostních záplat či změny vlastností sítě) nebo ojedinělý nárazový přenos většího množství dat.

V neposlední řadě je vhodné zaměřit se na vlastnosti sítě během dne. Je možné, že se uvedené parametry sítě budou dle vytíženosti sítě měnit v závislosti na denní době. Pokud by tomu tak bylo, je vhodné aplikace nevyžadující okamžitý přenos dat plánovat tak, aby umožnily pozdržení zpráv na denní dobu, kdy bude síť nejspolehlivější.

Cílem této práce není sestavit bezpečnostního zařízení, ale otestovat hypotetické požadavky takového zařízení na měřenou síť. Jako první příklad bezpečnostně citlivé aplikace bylo zvoleno kouřové čidlo. Čidlo může být umístěno v běžných prostorech budov, ale i ve sklepech či osadách s velmi nízkým pokrytím běžným mobilním signálem bez přístupu k napájení ze sítě. Na takovém místě je čidlo několik let nepoužívané, ale občas server vyžaduje potvrzení funkčnosti přístroje v pravidelných (denních či týdenních) intervalech. Zařízení obsahuje senzor, který při detekci kouře okamžitě odešle několika bajtovou zprávu na server, ten zprávu zpracuje, upozorní uživatele (např. SMS zprávou) nebo záchranné složky, a odešle potvrzující zprávu zpět do přístroje. Takové upozornění musí být téměř okamžité a není možné dovolit si nedoručení zprávy např. z důvodu zahlcení sítě. Podobné chování by mohla vykazovat i další zařízení, např. záplavový senzor.

Druhý příklad bezpečnostně citlivé aplikace je infrazávora či senzor s jazýčkovým kontaktem, který by byl využit pro zabezpečení prostoru proti neoprávněnému přístupu. Tento senzor by se nacházel v odlehlých lokalitách či podzemí a v případě zaznamenání pohybu by neprodleně upozornil majitele nebo vykonal jinou dopředu zvolenou akci. Frekvence a velikost zpráv je podobná jako u kouřového čidla. Pokud je v daném místě dostatečná přenosová rychlost sítě, zařízení může být připojené k jednoduché kameře, která by odeslala v případě potřeby fotku s nízkým rozlišením na server. Zde by bylo možné zkontrolovat, zda se jedná o neoprávněný přístup nebo jde pouze o zatoulané zvíře či podobnou náhodnou událost.

5.3 Průběh měření

5.3.1 Měřící zařízení

V kapitole 4 bylo pro ukázkou zprovoznění a komunikaci v síti použit vývojový kit s modulem R410M. Před začátkem měření důležitých parametrů sítě tento modul přestal komunikovat a nepodařilo se jeho funkčnost obnovit. Bylo třeba narychlo sehnat jiný modul, který by také uměl pracovat v NB-IoT síti. Autor měl k dispozici také modul N211 [64] od stejné firmy, měření v této kapitole bylo tedy provedeno na něm.

SARA-N211 od firmy U-blox je modul vydaný v roce 2017. Tento modul podporuje NB-IoT, na rozdíl od R410M ale neumí pracovat v síti LTE-M, která pro tuto práci není vyžadována. Vývojový kit EVK-R4 byl tedy ponechán s vyměněnou deskou s modulem N211. Modul N211 nabízí podobné



Obrázek 5.1: Fotografie vývojového kitu EVK-R4 s modulem N211

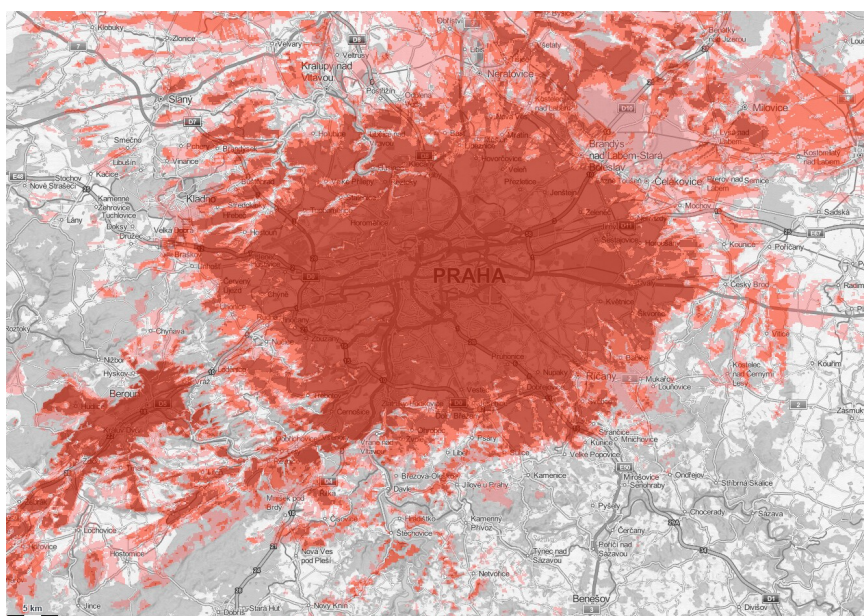
Data rate	9 600 b/s
Data bits	8
Parity	None
Stop bits	1
Flow control	None

Tabulka 5.1: Nastavení rozhraní UART pro modul N211

funkce jako R410M, některé příkazy mohou být upraveny či přejmenovány [65]. Fotka použitého vývojového kitu EVK-R4 s modulem N211 je na obrázku 5.1. Modul N211 používá odlišné nastavení rozhraní UART podle tabulky 5.1 [66]. Registrace v síti probíhá stejným postupem, který je uveden v části 4.2.1.

■ 5.3.2 Vlastnosti měřené sítě

Měření bylo prováděno v síti operátora T-Mobile, který pro potřeby této práce autorovi zapůjčil SIM kartu NB-IoT. V době měření (v první polovině roku 2019) byla síť NB-IoT spuštěna v testovacím režimu v Praze, Brně, Mladé Boleslavi a Berouně. Během pilotního provozu je v těchto městech pro NB-IoT využita pouze část základnových stanic dostupných pro běžné LTE. Mapa pokrytí sítě NB-IoT v Praze je na obrázku 5.2. T-Mobile využívá pro běžné LTE na frekvencích 800 MHz šířku 10 MHz s ochranným pásmem 0,5 MHz z každé strany. V tomto pásmu se nachází NB-IoT, která navíc využívá techniku PSD (viz 3.2.1) zesilující vysílací výkon o 6 dB oproti referenční hodnotě LTE [5]. Tabulka 5.2 obsahuje nastavení sítě pro přechod mezi třemi CE úrovněmi v závislosti na úrovni síly přijatého signálu RSRP.



Obrázek 5.2: Mapa venkovního pokrytí pilotní sítě NB-IoT od T-Mobile v Praze [5]

RSRP	CE úroveň
> -115 dBm	CE 0
-115 dBm až -125 dBm	CE 1
< -125 dBm	CE 2

Tabulka 5.2: Nastavení přechodu mezi CE úrovněmi v NB-IoT síti T-Mobile

5.3.3 Výběr lokalit

Všechna měření byla prováděna v Praze na třech vybraných lokalitách. Jedním z cílů práce je porovnat spolehlivost sítě v závislosti na kvalitě signálu. Z tohoto důvodu bylo v každé lokalitě provedeno více měření v rozdílných patrech budov, při stínění vývojového kitu apod. Aby bylo možné vyhodnotit, zda a jak se mění vlastnosti sítě na denní době, všechna měření probíhala po dobu 24 hodin.

Konkrétní měřené lokality byly zvoleny tak, aby měl v daných budovách autor několikadenní přístup nejen k běžně užívaným místům, ale i k místnostem pod zemí s možností napájení ze sítě, jelikož měřící kit nemá vlastní baterii a připojený notebook nevydrží bez napájení 24 hodin. Všechna měření probíhala během března 2019.

Lokalita I.

Lokalita I. je běžný šestipatrový panelový dům na adrese Chmelová 2816/13, Praha 10. Na obrázku 5.3 je možné vidět mapu lokality s vyznačenou měřenou



Obrázek 5.3: Mapa okolí lokality I. s vyznačenou měřenou budovou (oranžově) a základnovými stanicemi (modře)

budovou a nejbližšími základnovými stanicemi vysílající v síti NB-LoT. Zde probíhala 3 měření.

- Měření I.1: 2. nadzemní patro, pokoj běžného bytu s okny
- Měření I.2: stejné místo jako v měření I.1, ale s odpojenou externí anténou, což u kitu simuluje značný útlum přijatého signálu (cca 60 dB), viz obrázek 5.4a
- Měření I.3: 1. podzemní patro, sklep s malým oknem na úrovni povrchu ulice, viz obrázek 5.4b

■ Lokalita II.

Lokalita II. je sedmipatrová kancelářská budova na adrese 2144/1, Praha 4. Jedná se o sídlo společnosti T-Mobile. Mapa lokality je na obrázku 5.5. Přímo na střeše budovy se nacházejí vysílače, proto zde autor očekává velmi kvalitní signál. Jelikož patra v budově obsahují vnitřní antény pro zlepšení signálu, pro účely tohoto měření byl signál NB-LoT z těchto vnitřních antén na několik dní pozastaven a ponechán v provozu byl pouze vysílač na střeše budovy.

- Měření II.1: 3. nadzemní patro, běžná kancelář s okny
- Měření II.2: 1. podzemní patro, silně stíněná místnost bez oken za zavřenými mohutnými dveřmi a stěnami



(a) : Měřicí stanoviště I.2 (bez antény)

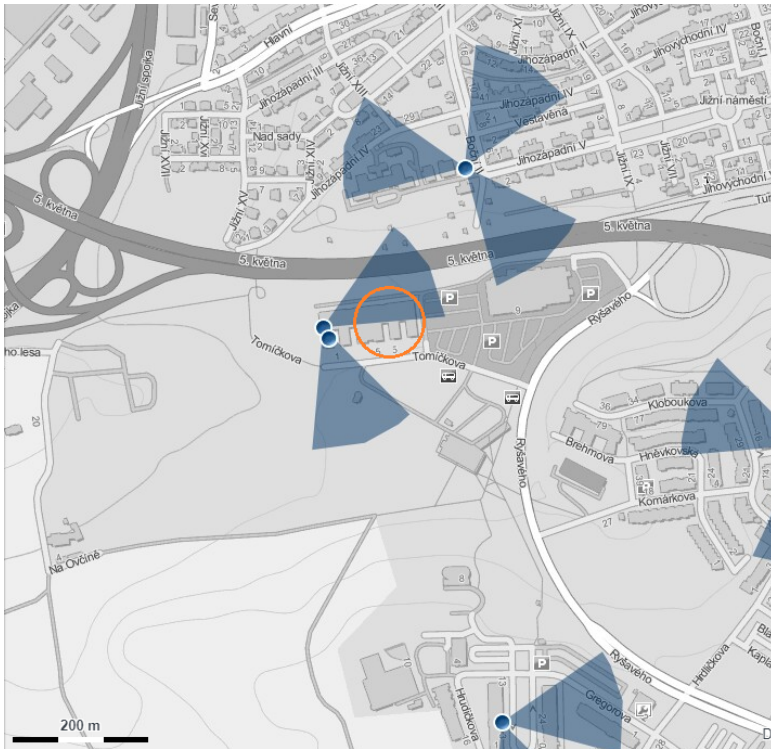
(b) : Měřicí stanoviště I.3

Obrázek 5.4: Fotografie měřicího stanoviště I

■ Lokalita III.

Lokalita III. je budova Fakulty elektrotechnické ČVUT na adrese Technická 1902/2, Praha 6. Mapa místa s vyznačeným nejbližším vysílačem je na obrázku 5.6. Zde probíhala 3 měření.

- Měření III.1: 3. nadzemní patro v místnosti A4-302, běžná kancelář s okny, viz obrázek 5.7a
- Měření III.2: 2. podzemní patro, technická místnost B3-s210 s malým oknem pod úrovní povrchu ulice, viz obrázek 5.7b
- Měření III.3: stejné místo jako v měření III.2, ale o několik metrů dále od okna, v kóji za zavřenými dveřmi, viz obrázek 5.8



Obrázek 5.5: Mapa okolí lokality II. s vyznačenou měřenou budovou (oranžově) a základnovými stanicemi (modře)



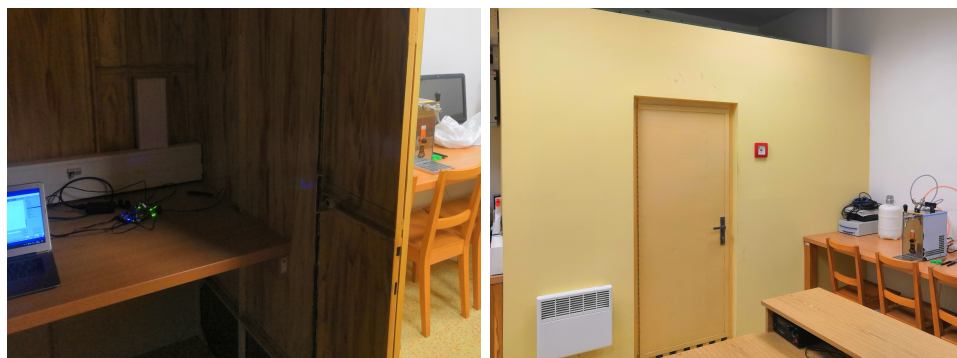
Obrázek 5.6: Mapa okolí lokality III. s vyznačenou měřenou budovou (oranžově) a nejbližší základnovou stanicí (modře)



(a) : Měřicí stanoviště III.1

(b) : Měřicí stanoviště III.2

Obrázek 5.7: Fotografie měřícího stanoviště III.1 a III.2



(a) : Pohled z kóje

(b) : Pohled na uzavřenou kóji

Obrázek 5.8: Fotografie měřícího stanoviště III.3

■ 5.3.4 Příprava měřícího skriptu

Pro měření trvající 24 hodin bylo třeba vytvořit skript, díky kterému měřící kit automaticky s intervalem jedné minuty odesílá zprávy na vzdálený server a čeká na odpovědi. Jako vzdálená adresa byl vybrán server patřící T-Mobile (IPv4 adresa: 80.250.24.26). Komunikaci s vlastním serverem je minimalizováno zpoždění zprávy po cestě, ke kterému by mohlo dojít v případě odesílání dat na jiné servery. Skript je následně spuštěn programem M-Center, přes který probíhá komunikace s vývojovým kitem. Ukázka spuštěného skriptu v terminálu programu M-Center je uvedena na obrázku 5.9. Celý skript trvající 24 hodin je součástí přílohy této práce (soubor *mcenter_24hours.atl*). Během jednoho měření je odesláno 1200 zpráv o velikosti 8 bajtů, 240 zpráv o velikosti 1400 bajtů a 288 požadavků s dotazem na aktuální stav sítě. Ve skriptu se opakuje několik klíčových příkazů [65]:

- AT+NPING="80.250.24.26",8,59000

Odeslání příkazu „ping“ o velikosti krátké zprávy 8 bajtů na cílovou adresu, přičemž hodnota „timeout“ je nastavena na 59 sekund. Po vypršení „timeout“ je zpráva zahozena a považována za nedoručenou. Příkaz „ping“ periodicky odesílá IP datagramy a očekává odezvu serveru. Při úspěšném obdržení odpovědi vypíše délku zpoždění RTT. Velikost zprávy 8 bajtů simuluje velmi malou zprávu o několika znacích, např. aktuální teplotu, stav senzoru (sepnuto či nesepnuto) apod.

- AT+NPING="80.250.24.26",1400,59000

Odeslání příkazu „ping“ o velikosti delší zprávy 1400 bajtů na cílovou adresu. 1400 bajtů simuluje větší datovou zprávu, která by se dala využít pro přenos většího množství dat, např. aktualizace softwaru zařízení, přenos části obrázku s velmi nízkým rozlišením z kamery apod.

- PAUSE 20

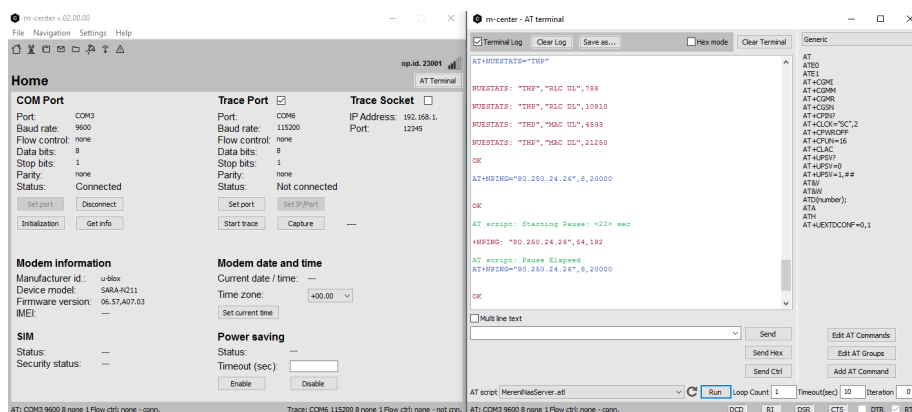
Pozastavení vykonání následujícího řádku skriptu o 60 sekund. Podle dokumentace programu M-Center by tento příkaz měl vložit pauzu dlouhou 20 sekund, ale z neznámých důvodů je zařízení pozastaveno na trojnásobnou dobu.

- AT+NUESTATS="CELL"

Výpis několik parametrů aktuálního stavu sítě, pro toto měření je důležitá především hodnota síly přijatého signálu RSRP.

- AT+NUESTATS="THP"

Výpis aktuální stav sítě z hlediska aktuálních přenosových rychlostí ve směrech uplink i downlink.



Obrázek 5.9: Ukázka GUI programu M-Center se spuštěným měřícím skriptem v terminálu

5.4 Zpracování naměřených dat

Jako výstup s naměřenými hodnotami slouží textový výpis z terminálu v M-Center, ukázka je na obrázku 5.9. Naměřená data v textovém formátu jsou součástí přílohy (soubory *loc_I_1.txt*, *loc_I_2.txt* apod.). Pro uživatele by bylo přívětivější prostředí nějaké online IoT platformy s grafickým prostředím, T-mobile ale v současné době takovou službu pro NB-IoT veřejně neposkytuje. Jeden z hlavních úkolů výrobců IoT přístrojů je vytvořit vlastní online platformu, kde může uživatel snadno a přehledně spravovat svá zařízení na jednom místě, vzdáleně je konfigurovat, číst jejich data nebo kontrolovat aktualizace.

5.4.1 Skript pro vyhodnocení

Aby bylo možné naměřená data v textovém formátu hromadně zpracovat a vyhodnotit, autor si naprogramoval vyhodnocovací skript v jazyce Python. Okomentovaný skript ve formátu *.py* pro Python 3.5 je v příloze (soubory *measurement.py*, *start.py*). Pro grafické znázornění byla doinstalována knihovna Matplotlib [67] a pro vhodnější reprezentaci dat knihovna NumPy [68]. Klíčové metody vyhodnocovacího skriptu jsou uvedeny níže:

- `load_script_texts(filepaths)`

Funkce z listu obsahujícího cesty k skriptovým naměřeným souborům načte data a odstraní bezvýznamné symboly a řádky.

- `load_data(script_texts, FILE_NAMES, START_TIMES)`

Funkce převede data z textového formátu do požadované struktury.

- `evaluate_data(measurements)`

Funkce statisticky vyhodnotí naměřená data.

- `print_data(measurements)`

Funkce do terminálu vypíše vybraná naměřená data pro každé měření.

- `plot_data(measurements)`

Funkce vykreslí vybraná naměřená data.

■ 5.4.2 Problémy při měření

Při měření se autor setkal s několika drobnými neočekávanými problémy. Dle výpisu z terminálu během měření v lokalitě III.1 po dobu 60 minut zařízení z neznámých důvodů nekomunikovalo se sítí. Po uplynutí této doby se zařízení samo automaticky restartovalo a komunikace v síti byla obnovena. Jelikož zaměstnanci T-Mobile v té době neevidovali žádný výpadek sítě, příčina problému zůstává neznáma.

Několikrát během měření odezva sítě na aktuální rychlost přenosu či RTT neobsahovala číselnou hodnotu, není tedy zřejmé, zda v tu dobu zpráva došla a v jakém stavu byla síť. Tyto nepřesnosti však nastaly pouze zhruba v 0,0003 % případů, autor se navíc domnívá, že na vině může být špatná komunikace mezi měřicím zařízením a notebookem.

■ 5.5 Statistické vyhodnocení měření

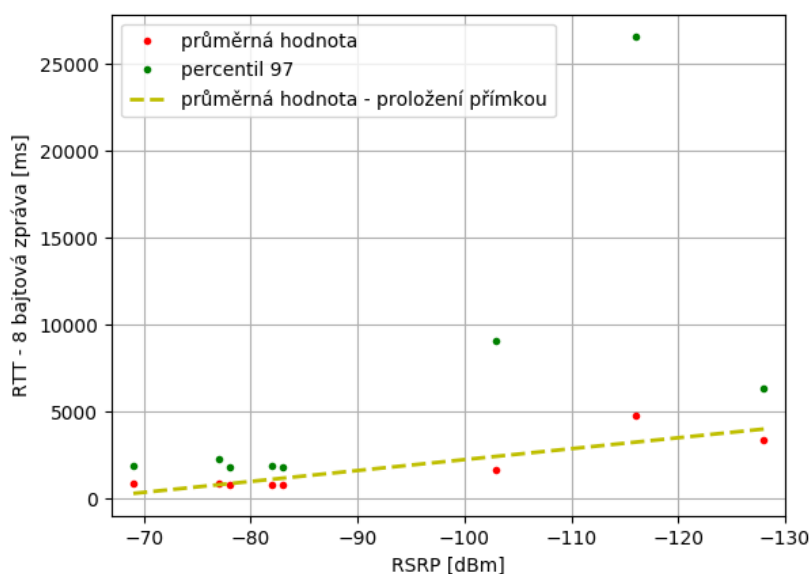
V této části se nachází grafy a tabulky s vyhodnocenými naměřenými daty. Hodnota „RSRP“, která je dále v práci uváděna v jednotkách dBm, byla určena jako průměr všech hodnot stavu sítě pro dané stanoviště, jelikož se během celodenních měření měnila jen minimálně. „Úspěšnost“ vyjadřuje procentuální podíl zpráv, které byly v zadaném časovém intervalu (59 sekund) doručeny na server a zpět do zařízení, viz příkaz `AT+NPING` v kapitole 5.3.4. Hodnota „RTT průměr“ je průměrné zpoždění všech doručených zpráv, nejsou v něm tedy započítány nedoručené zprávy. „RTT min“ udává nejnižší hodnotu latence během celého měření na konkrétním stanovišti. „RTT per 97“ a „RTT per 99“ udávají hodnotu RTT, při které 97 % (resp. 99 %) úspěšných zpráv dorazí v nižším čase.

Tabulka 5.3 a obsahuje hodnoty latence pro krátké 8 bajtové zprávy, graf 5.10 znázorňuje závislost latence na síle signálu RSRP. Autor podotýká, že kvůli nízkému počtu měřených lokalit je tento graf spíše orientační. Analogické znázornění naměřených dat i pro delší 1400 bajtové zprávy je v tabulce 5.4 a grafu 5.11.

Graf 5.12 porovnává úspěšnosti doručení zpráv v souvislosti s úrovní síly signálu RSRP pro krátké i delší zprávy. Dále byly měřeny přenosové rychlosti ve směru uplink i downlink. Tabulka 5.5 obsahuje hodnoty přenosové rychlosti na MAC vrstvě zprůměrované z celého měření. Graf 5.13 znázorňuje závislost průměrné přenosové rychlosti obou směrů na síle signálu RSRP. Vybraná data byla proložena aproximační přímkou pro znázornění trendu.

	Lokalita I.			Lokalita II.		Lokalita III.		
	I.1	I.2	I.3	II.1	II.2	III.1	III.2	III.3
RSRP [dBm]	-69	-128	-83	-77	-116	-78	-82	-103
Úspěšnost [%]	99,75	98,67	99,83	99,67	97,83	99,56	99,50	98,67
RTT průměr [ms]	856	3377	785	880	4818	817	819	1690
RTT min [ms]	173	326	147	180	269	170	189	177
RTT per 97 [ms]	1876	6332	1829	2294	26564	1830	1888	9120
RTT per 99 [ms]	8746	10046	1918	3089	39944	3512	3509	26720

Tabulka 5.3: Latence menší zprávy o velikosti 8 bajtů



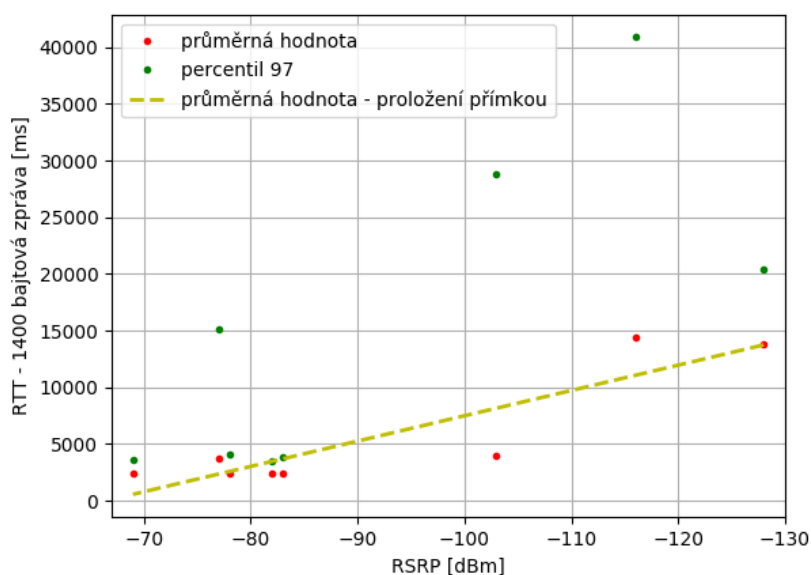
Obrázek 5.10: Graf závislosti latence krátké zprávy na úrovni síly signálu RSRP

Jedním z cílů této práce bylo zjistit, jak se mění parametry sítě v závislosti na denní době. Pro znázornění stavu sítě během dne bylo vybráno několik měřících stanovišť ve více lokalitách pro různé velikosti zpráv. Na grafech 5.14, 5.15 jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty latence pro 8 bajtové zprávy, graf 5.16 (přiblížený na 5.17) ukazuje hodnoty pro nižší kvalitu signálu a 5.18 znázorňuje 1400 bajtové zprávy. Obrázek 5.19 navíc ukazuje počet všech nedoručených zpráv (krátkých i dlouhých) pro každou denní hodinu během všech měření.

Vybrané grafy 5.20 a 5.21 porovnávají naměřené hodnoty přenosových rychlostí v síti na MAC vrstvě ve směrech uplink i downlink pro dvě lokality s velmi rozdílným pokrytím. Na 5.22 a 5.23 je porovnání UL a DL rychlostí dvou měřících stanovišť jedné lokality s různou kvalitou signálu. Tato měření stavu sítě byla prováděna s pětiminutovým intervalem. Některá z naměřených dat byla proložena aproximačními polynomy 4. stupně.

	Lokalita I.			Lokalita II.		Lokalita III.		
	I.1	I.2	I.3	II.1	II.2	III.1	III.2	III.3
RSRP [dBm]	-69	-128	-83	-77	-116	-78	-82	-103
Úspěšnost [%]	100,0	99,17	100,0	100,0	96,25	100,0	100,0	98,75
RTT průměr [ms]	2427	13826	2434	3709	14458	2381	2371	3967
RTT min [ms]	1611	2461	1557	1616	1763	1653	1572	1617
RTT per 97 [ms]	3654	20452	3789	15091	40880	4048	3451	28857
RTT per 99 [ms]	4068	45102	6462	16580	47668	5270	5952	37697

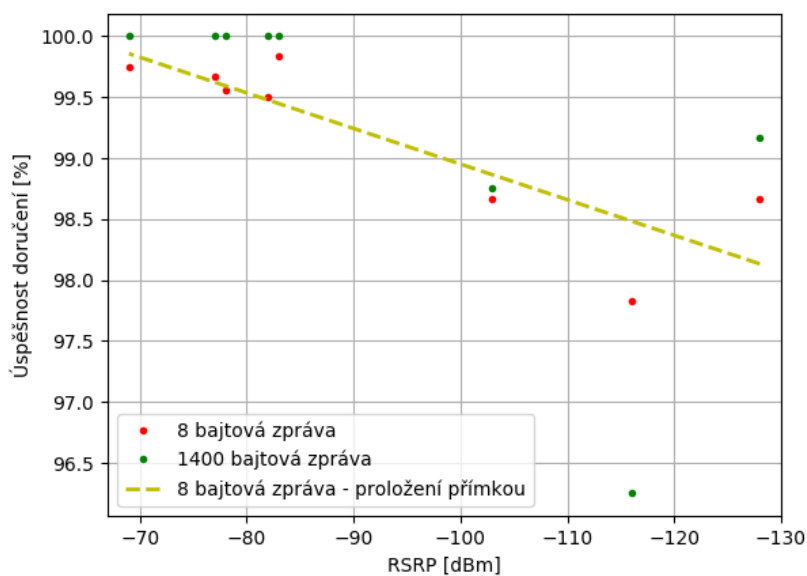
Tabulka 5.4: Latence větší zprávy o velikosti 1400 bajtů



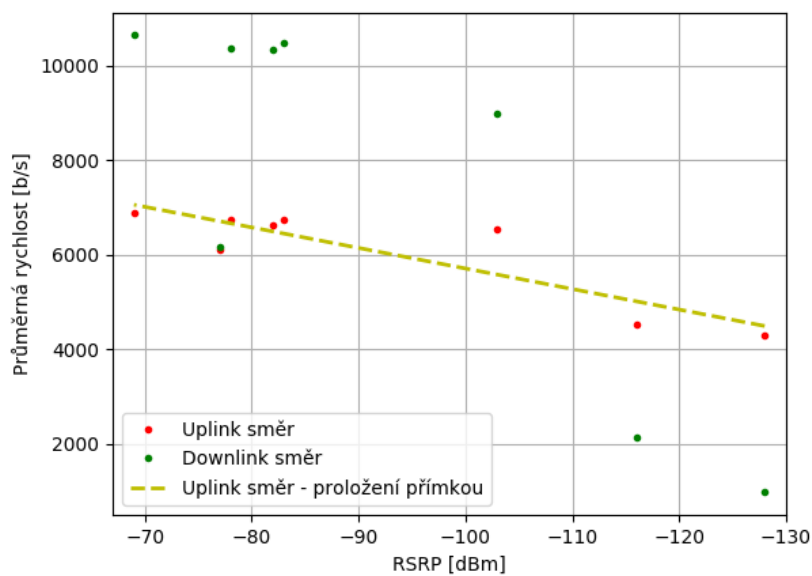
Obrázek 5.11: Graf závislosti latence delší zprávy na úrovni síly signálu RSRP

	Lokalita I.			Lokalita II.		Lokalita III.		
	I.1	I.2	I.3	II.1	II.2	III.1	III.2	III.3
RSRP [dBm]	-69	-128	-83	-77	-116	-78	-82	-103
Uplink [b/s]	6884	4302	6741	6097	4532	6755	6627	6536
Downlink [b/s]	10644	978	10488	6169	2140	10382	10347	8981

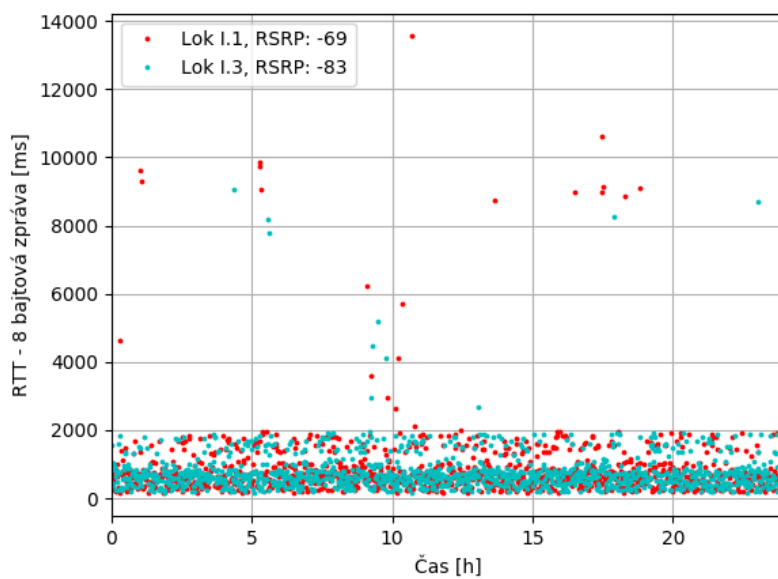
Tabulka 5.5: Průměrné přenosové rychlosti sítě na MAC vrstvě v obou směrech



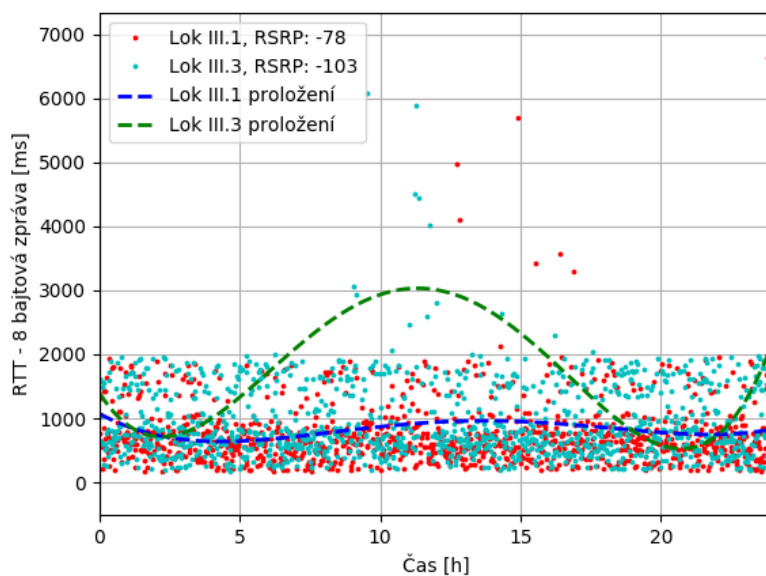
Obrázek 5.12: Graf závislosti procentuální úspěšnosti doručení zprávy na úrovni síly signálu RSRP



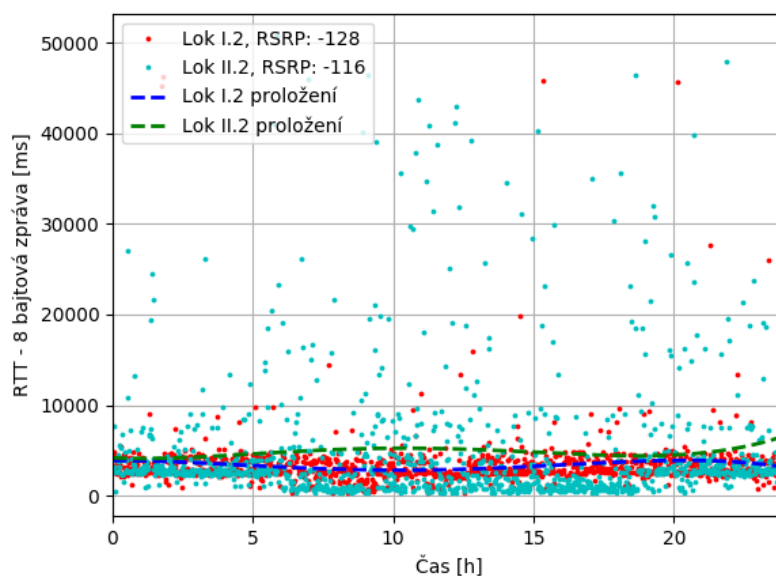
Obrázek 5.13: Graf závislosti průměrné přenosové rychlosti sítě na úrovni síly signálu RSRP



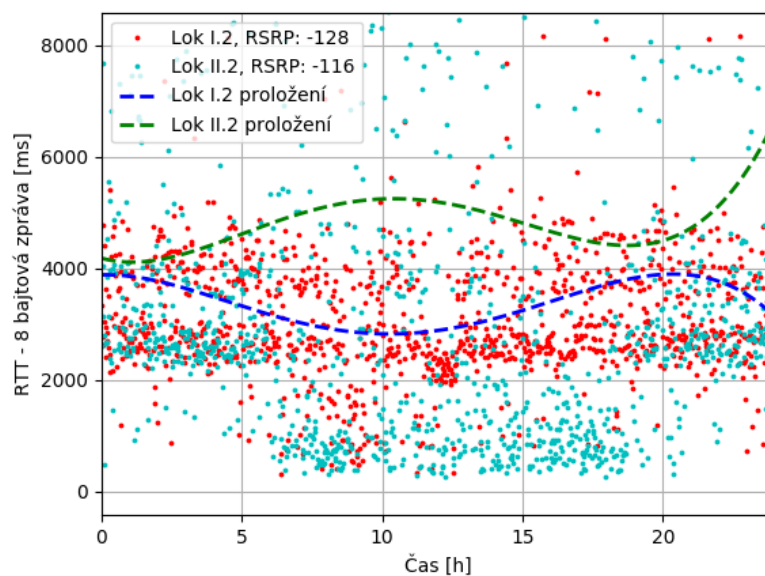
Obrázek 5.14: Naměřené hodnoty latence krátké zprávy během dne na lokalitě I. s vyšší úrovní přijatého signálu



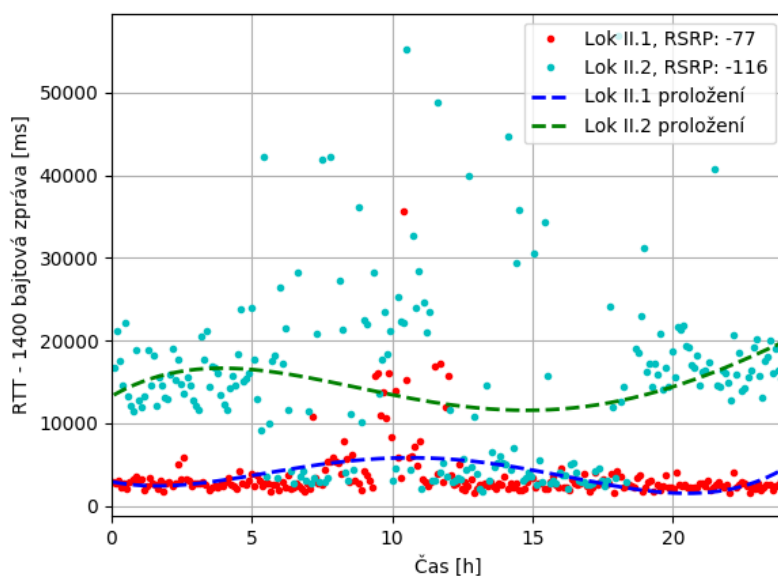
Obrázek 5.15: Naměřené hodnoty latence krátké zprávy během dne na lokalitě III. pro různé hodnoty signálu



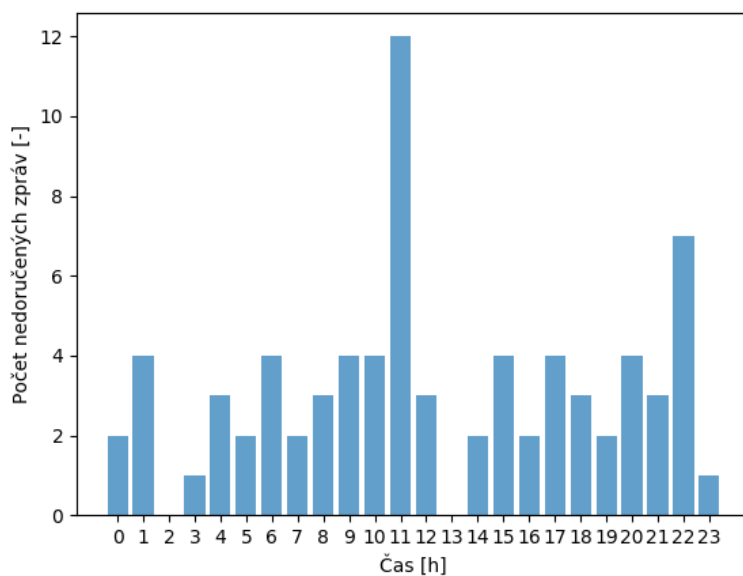
Obrázek 5.16: Naměřené hodnoty latence krátké zprávy během dne na dvou lokalitách s nižší úrovní přijatého signálu



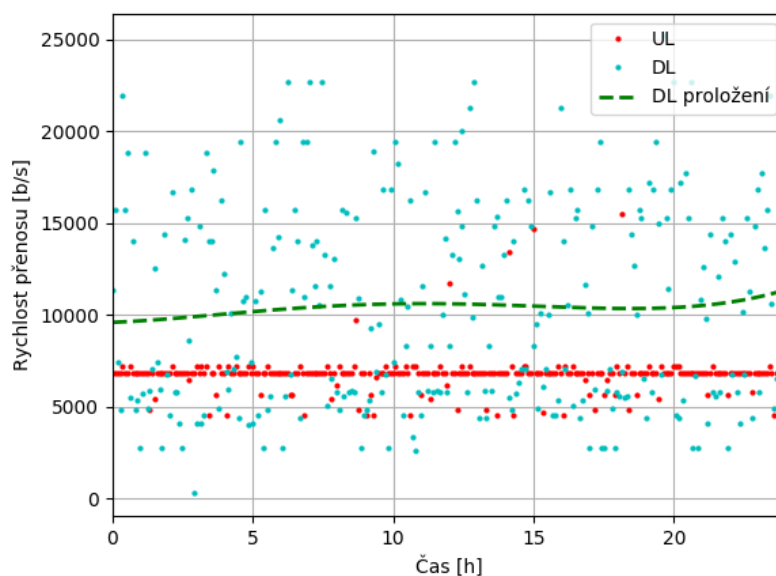
Obrázek 5.17: Přibližný graf naměřených hodnot latence krátké zprávy během dne na dvou lokalitách s nižší úrovní přijatého signálu signálu



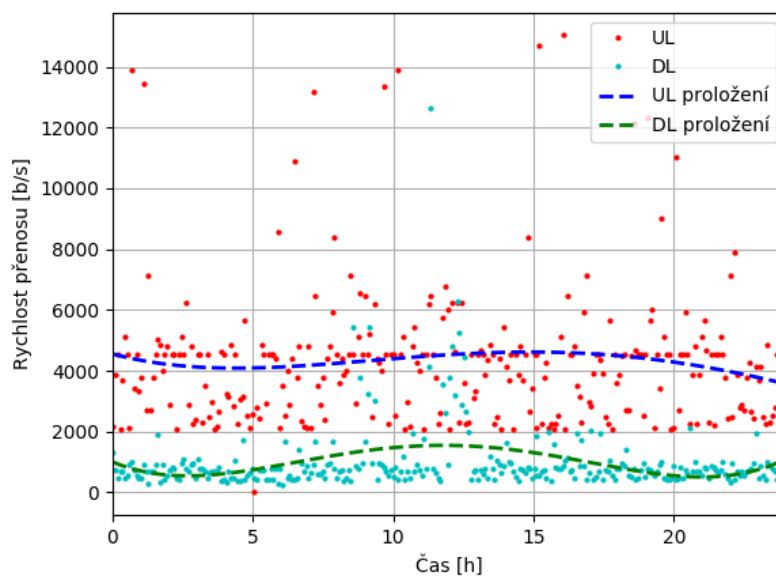
Obrázek 5.18: Naměřené hodnoty latence delší zprávy během dne na lokalitě II. pro různé hodnoty signálu



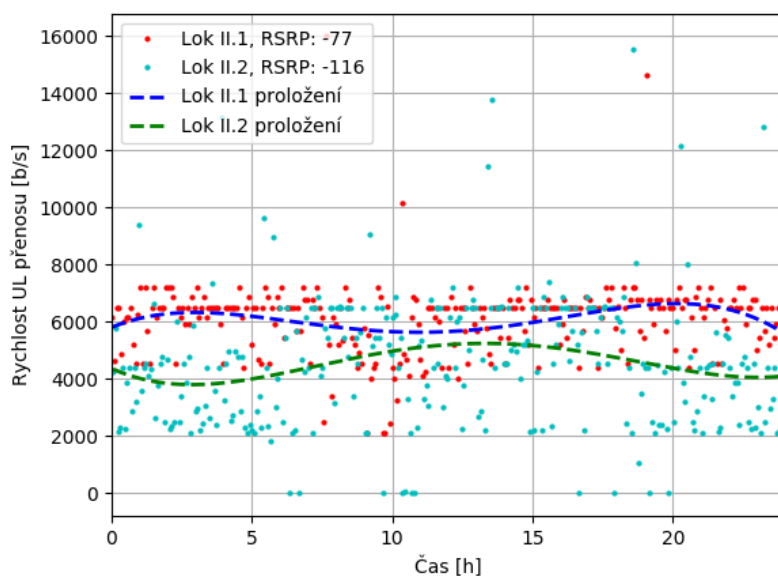
Obrázek 5.19: Graf závislosti celkového počtu nedoručených zpráv na denní hodině během všech měření



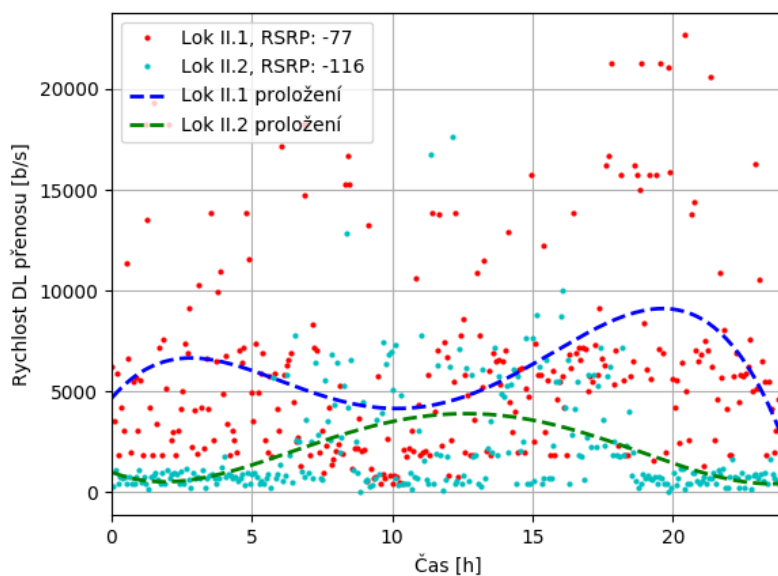
Obrázek 5.20: Naměřené hodnoty rychlosti přenosu UL i DL během dne pro měřicí stanoviště III.1 s vyšší úrovní přijatého signálu, RSRP: -78 dBm



Obrázek 5.21: Naměřené hodnoty rychlosti přenosu UL i DL během dne pro měřicí stanoviště I.2 s nízkou úrovní přijatého signálu, RSRP: -128 dBm



Obrázek 5.22: Naměřené hodnoty rychlosti přenosu UL během dne pro lokalitu II. pro různé hodnoty signálu



Obrázek 5.23: Naměřené hodnoty rychlosti přenosu DL během dne pro lokalitu II. pro různé hodnoty signálu

5.6 Výsledky měření a diskuze

Ačkoliv byly všechny vybrané lokality poměrně blízko vysílačů v oblastech s dobrým pokrytím sítě, díky měření pod zemí, v blízkosti tlumících překážek či odstraněním externí antény byly simulovány podmínky s nízkou úrovní přijatého signálu. Z tabulky 5.3 a grafu 5.10 pro krátké zprávy je zřejmé, že při poklesu síly signálu RSRP roste hodnota latence RTT. Pro místa s velmi kvalitním pokrytím ($RSRP \geq -83$ dBm) je průměrná hodnota RTT nižší než 1 s, horší pokrytí způsobuje průměrné zpoždění jednotek sekund.

I pro delší zprávy (tabulka 5.4 a graf 5.11) platí rostoucí trend závislosti latence na RSRP. Pro oblasti s kvalitním pokrytím ($RSRP \geq -103$ dBm) je průměrná hodnota RTT nižší než 4 sekundy, kromě měřicího stanoviště II.1. se navíc průměrné doby výrazně neliší od hodnot percentilu 97. Pro horší pokrytí u větších zpráv dochází k zřetelnějšímu průměrnému zpoždění, které dosahuje až 15 sekund.

Jeden z klíčových parametrů sítě je úspěšnost doručení zpráv, která je zobrazena na grafu 5.12. Pro krátké i delší zprávy platí, že s klesající kvalitou signálu klesá i úspěšnost doručení. Autor se pozastavil nad tím, že s výjimkou stanoviště II.2 dosahují úspěšnosti doručení větších zpráv lepších hodnot, než úspěšnost krátkých zpráv, ačkoliv průměrná doba RTT vykazuje opačný trend. Na každém stanovišti byl odeslán menší počet delších zpráv (240) než krátkých (1200), což by dle autora mohlo být jednou z příčin tohoto jevu. Při kvalitním pokrytí ($RSRP \geq -103$ dBm) je pro obě velikosti zpráv dosaženo vysoké úspěšnosti doručení větší než 99,5 %, pro malé zprávy je úspěšnost doručení přibližně 98 % i pro nízkou úroveň přijatého signálu. Pokud by pro konkrétní aplikaci byla vyžadována vyšší garance doručení, autor navrhuje odeslat zprávu několikrát s krátkou časovou prodlevou pro maximalizaci pravděpodobnosti úspěšného přenosu.

Z hodnot přenosových rychlostí v tabulce 5.5 a grafu 5.13 je zjevný mírný pokles rychlosti ve směru uplink (k serveru) při poklesu síly přijatého signálu RSRP. Průměrná rychlost v tomto směru je v rozsahu 4,3 - 7 kb/s. V opačném směru downlink (od serveru) dochází k větším změnám průměrných rychlostí. Ačkoliv pro stanoviště s kvalitním pokrytím ($RSRP \geq -103$ dBm) je downlink směr rychlejší než uplink, pro nižší sílu signálu průměrná downlink rychlost dramaticky klesá pod uplink hodnotu. Průměrná rychlost downlink se v měřeném rozsahu kvality signálu pohybuje v hrubém rozmezí 1 - 10 kb/s.

Dále byly zjišťovány vlastnosti sítě v závislosti na denní době. Měření na lokalitě I. (graf 5.14) s vysokou silou přijatého signálu ukazuje, že se během dne čas RTT téměř nemění pro obě měřicí stanoviště v různých dnech.

Na grafu 5.15 s daty RTT pro lokalitu III., kde bylo provedeno více měření, můžeme pozorovat rozdílné chování v odlišných podmínkách. Ačkoliv měřicí stanoviště III.1 s $RSRP = -78$ dBm během dne vykazovalo téměř konstantní hodnoty RTT, stanoviště III.3 s nižší úrovní přijatého signálu $RSRP = -103$ dBm zaznamenalo zřetelné zvýšení zpoždění RTT v poledních hodinách.

Grafy 5.16 a přiblížený 5.17 zachycují naměřené hodnoty RTT pro stanoviště

s nejnižšími úrovněmi přijatého signálu RSRP. V těchto hůře pokrytých lokalitách dochází k častějšímu výskytu vysokých hodnot RTT, po proložení a přiblížení není zjevný žádný společný trend závislosti RTT na denních hodinách.

Závislost latence delší zprávy na denní době pro dvě stanoviště na jedné lokalitě je zobrazena na grafu 5.18. Ani pro delší zprávu není zjevný nějaký trend.

Podle očekávání, stanoviště s vyššími úrovněmi přijatého signálu vykazují stálější hodnoty RTT, zatímco u míst s nižší silou signálu je možné sledovat větší kolísání. Jelikož se měřená NB-IoT síť nachází v ochranném pásmu běžného LTE, je částečně ovlivňována provozem v LTE, který může způsobovat během dne mírné výkyvy.

Graf 5.19 s počty nedoručených zpráv během dne také nevykazuje výrazný trend. Ačkoliv v čase 11:00 - 12:00 bylo nejvíce zpráv bez odezvy, v době 13:00 - 14:00 nezůstala žádná zpráva nedoručena.

Co se týče datové propustnosti, pro všechna stanoviště s vysokou úrovní přijatého signálu se rychlost uplink snaží držet na diskretních hladinách, viz graf 5.20. Oproti tomu se downlink rychlost poměrně rychle mění, ale během dne si zachovává stálou průměrnou hodnotu, jak je zjevné z proložení grafů polynomy. Na grafu 5.21 popisující stanoviště s nejhorším pokrytím zaznamenává i uplink rychlost znatelné výkyvy, ale bez výrazného trendu závislosti na denní době.

Grafy 5.22 a 5.23 porovnávají rychlosti přenosu na jedné lokalitě pro různé úrovně signálu pro uplink i downlink. Pro downlink směr jsou charakteristické znatelně větší výkyvy naměřené rychlosti během dne než pro uplink. Maximálních udávaných přenosových rychlostí 20 kb/s je během měření na dobře pokrytých místech pravidelně dosahováno [6, s. 291][44].

5.7 Prostor pro navázání

Tato práce představuje základní komunikaci v síti NB-IoT. Autor zde navrhuje několik způsobů, jak se dá na danou problematiku dále navázat.

- Všechny měřené lokality v této práci se neúmyslně nacházely poměrně blízko základnovým stanicím NB-IoT (řádově stovky metrů). Bylo by zajímavé sledovat chování zařízení, která komunikují na hraně pokrytí sítě ve vzdálenosti několika kilometrů od vysílacích stanic. Ve větší vzdálenosti u zařízení dochází k přechodu mezi CE úrovněmi, který může způsobovat odlišné chování.
- Použitý vývojový kit nabízí druhý COM port, který je určen pro diagnostiku. Program M-Center obsahuje funkce „trace“ a „capture“, které monitorují a zaznamenávají chování zařízení, tato data by bylo možné využít ke zkoumání, jak se přesně chová zařízení v různých podmínkách, během stavu PSM apod.

- Jeden ze způsobů, jak porovnat licencované sítě pro IoT, je využít jedno zařízení, které pracuje v sítích NB-IoT i LTE-M. Modul SARA-R410M-02B použitý v kapitole 4 umožňuje provoz v obou sítích, proto by bylo zajímavé měřit na identickém typu zařízení parametry obou sítí ve stejnou dobu. Takové měření z důvodu současné absence sítě LTE-M není možné v České republice, dalo by se však provést na Slovensku nebo v jiných státech, které provozují obě sítě. Tato měření by mohla využívat různé protokoly, přes IP i bez použití IP, které by byly porovnány z hlediska vhodnosti pro jednotlivé sítě.
- Vývojový kit EVK-R4 obsahuje také slot pro připojení digitálního multimetru pro měření reálné energetické spotřeby zařízení. Data z takového měření by pomohla při návrhu IoT zařízení pro optimalizaci energetické spotřeby.
- Jelikož licencované IoT sítě slibují kapacitu sítě pro obrovské množství zařízení, bylo by vhodné komunikovat v jedné síti mnoha (desítkami či stovkami) časově synchronizovaných zařízení ve stejnou dobu, a zjišťovat vliv počtu připojených zařízení na parametry sítě.
- Pro snadnější zpracování dat je vhodné vytvořit online IoT platformu, ve které by uživatel přehledně graficky viděl informace o svých zařízeních. V takovém prostředí by bylo možné číst data ze senzorů, konfigurovat automatické akce, vzdáleně aktualizovat software zařízení nebo odeslat příkazovou zprávu přímo na konkrétní zařízení.

Kapitola 6

Závěr

Rozvíjející se trend internetu věcí zaznamenává v posledních letech dramatický nárůst v počtu zařízení připojených k internetu. Aby poptávka po bezdrátové konektivitě byla v budoucnu uspokojena, je nutné plánovat vývoj a výstavbu sítí pro tato zařízení v dlouhodobém horizontu. Prostředkem pro zajištění dostatečné kapacity a požadovaných vlastností by mohly být právě licencované sítě. Vysoké ceny za vybudování a provoz těchto sítí motivují operátory k poskytnutí kvalitních služeb, které mohou využít především výrobci přístrojů a koncoví zákazníci. V současnosti je výroba těchto zařízení značně roztržštěná, zavedení standardů a budování globální infrastruktury by mohlo tento vývoj více sjednotit a usnadnit.

Jelikož jsou obě licencované sítě NB-IoT i LTE-M poměrně nové, neexistuje mnoho veřejně dostupných zdrojů, ve kterých by tyto sítě byly podrobně zkoumány a měřeny. Výrobci jsou nuceni při vývoji svých zařízení důvěřovat udávaným parametrům těchto sítí, které se mohou značně lišit od skutečných naměřených dat.

V praktické části bylo provedeno měření reálných parametrů pro bezpečnostně citlivé aplikace v síti NB-IoT, protože zajištění zabezpečení je jeden z nejdůležitějších úkolů internetu věcí. Vybranými technikami bylo v pilotním provozu sítě T-Mobile dosaženo simulace různé kvality pokrytí a stavu sítě. Průměrné zpoždění zprávy několika sekund s úspěšností doručení 98 % pro krátké zprávy i v místech se špatnou kvalitou sítě považuje autor za dostatečné pro bezpečnostně citlivé aplikace. Naměřené průměrné přenosové rychlosti v obou směrech mezi 1 - 10 kb/s jsou vhodné pro přenos menších datových balíčků či jednoduchých aktualizací, nejsou však určeny pro přenos hlasu, obrazu či videa.

Ačkoliv měření probíhala na více lokalitách a různých stanovištích, nebyla upozorována výrazná závislost parametrů sítě na denní době. Ve směru downlink je možné pozorovat větší výkyvy přenosových rychlostí během dne, zatímco ve směru uplink rychlosti nevykazují výrazné změny. Pro zařízení internetu věcí je očekáván větší provoz právě ve směru uplink.

V současnosti nejsou veřejně dostupné jednoduché nástroje pro měření kvality a parametrů sítě. Autor se seznámil s programovacím jazykem Python a vhodnými knihovnamí, aby bylo možné vytvořit skript pro hromadné zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Cílem této práce bylo shrnutí dostupných informací o licencovaných sítích, provedení reálných měření vybraných parametrů a využití těchto dat k plánování sítí pro internet věci. V poslední kapitole autor navrhuje několik možností, jak se dá na tuto problematiku dále navázat. Při přípravě práce autor získal mnoho zkušeností a podnětů od kolegů ze společnosti T-Mobile, které nepochybně zúžitkuje ve svém akademickém i profesním životě.



Literatura

- [1] S. Satyajit, “5 Billion IoT Cellular Module Will Ship Globally During 2019-2025. 4G, LTE Cat-M NB-IoT in Hyper-Growth - Counterpoint Research,” 2019. [Online]. Available: <https://www.counterpointresearch.com/5-billion-iot-cellular-module-will-ship-globally-2019-2025-4g-lte-cat-m-nb-iot-hyper-growth/>
- [2] Qualcomm, “Leading the LTE IoT evolution to connect the massive Internet of Things,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/leading-the-lte-iot-evolution-to-connect-the-massive-internet-of-things.pdf>
- [3] A. Ratilainen, “NB-IoT presentation for IETF LPWAN,” p. 12. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/meeting/97/materials/slides-97-lpwan-30-nb-iot-presentation-00>
- [4] U-blox, “EVK-R4 SARA-R4 series Cellular Evaluation Kits User Guide,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/EVK-R4_UserGuide_%28UBX-16029216%29.pdf
- [5] T.-M. t press, “T-Mobile rozšiřuje pokrytí sítě pro internet věcí,” 2018. [Online]. Available: <http://www.t-press.cz/cs/tiskove-materialy/tiskove-zpravy-t-mobile/t-mobile-rozsiruje-pokryti-site-pro-internet-veci.html>
- [6] J. Bergman, L. Olof, S. Marten, W. Y.-P. Eric, and S. Joachim, *Cellular Internet of Things*. Academic Press, 2018.
- [7] M. Burgess, “What is the Internet of Things? WIRED explains,” 2018. [Online]. Available: <https://www.wired.co.uk/article/internet-of-things-what-is-explained-iot>
- [8] T. Doseděl, “Boj o Evropu věcí: Která IoT síť nakonec zvítězí?” 2019. [Online]. Available: https://svetchytre.cz/a/pUxud/boj-o-evropu-veci-ktera-iot-sit-nakonec-zvitezi?fbclid=IwAR3VJH5R2s0q-7gzx2esMleL8Oysm4ykJXAPuZFGtQuo9sjnsdWTHEkd1_g
- [9] B. M. Frost Lindsay, Bees Duncan, “Avoid Another IoT Tower of Babel! - IEEE Internet of Things,” 2018. [Online]. Available: <https://iot.ieee.org/newsletter/september-2018/avoid-another-iot-tower-of-babel>

- [10] Iot-portal.cz, “Co je IoT?” [Online]. Available: <https://www.iot-portal.cz/co-je-iot/>
- [11] Moore Mike, “What is the IoT? Everything you need to know | TechRadar,” 2018. [Online]. Available: <https://www.techradar.com/news/what-is-the-iot-everything-you-need-to-know>
- [12] Forbes Insights with Intel IoT, “How The Internet Of Things Is Keeping Us Safe,” 2018. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/insights-inteliot/2018/10/11/how-the-internet-of-things-is-keeping-us-safe/#3d6964136220>
- [13] A. Høglund, J. Bergman, X. Lin, O. Liberg, A. Ratilainen, H. S. Razaghi, T. Tirronen, and E. A. Yavuz, “Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IOT,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 16–21, 2017. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8412470/>
- [14] GSMA, “3GPP Low Power wide Area Technologies,” GSMA, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>
- [15] 3GPP TS 22.368 version 14.0.1 Release 14, “Service requirements for Machine-Type Communications (MTC),” 3GPP, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>
- [16] P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. Navarro-Ortiz, and J. M. Lopez-Soler, “Narrowband IoT Data Transmission Procedures for Massive Machine-Type Communications,” *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 8–15, nov 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8120238/>
- [17] R. Bennett, “What’s the difference between Wi-Fi and unlicensed spectrum?” 2015. [Online]. Available: <http://hightechforum.org/whats-the-difference-between-wi-fi-and-unlicensed-spectrum/>
- [18] W. Yang, M. Wang, J. Zhang, J. Zou, M. Hua, T. Xia, and X. You, “Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 138–145, jun 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7934184/>
- [19] Haystack Technologies, “DASH7 IOT WIRELESS STACK.” [Online]. Available: http://haystacktechnologies.com/technology/#technology_DASH7
- [20] Mitchell Bradley, “Learn Exactly How Fast a Wi-Fi Network Can Move,” 2018. [Online]. Available: <https://www.lifewire.com/how-fast-is-a-wifi-network-816543>

- [21] Trčálek Antonín, “Všechno, co byste měli vědět o Wi-Fi,” 2012. [Online]. Available: <https://www.zive.cz/clanky/vsechno-co-byste-meli-vedet-o-wi-fi/sc-3-a-162796/default.aspx>
- [22] S. Tozlu and M. Senel, “Battery lifetime performance of Wi-Fi enabled sensors,” in *2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. IEEE, jan 2012, pp. 429–433. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6181000/>
- [23] Bluetooth Technology Website, “Our History,” 2017. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history>
- [24] Bluetooth, “Bluetooth Core Specification 5.0 FAQ,” Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: www.bluetooth.com/brand-guide
- [25] J. Cross, “Bluetooth 5 FAQ: Everything you need to know,” 2018. [Online]. Available: <https://www.macworld.com/article/3262664/hardware/bluetooth-5-faq-everything-you-need-to-know.html>
- [26] McClelland Calum, “IoT Connectivity - Comparing NB-IoT, LTE-M, LoRa, SigFox, and other LPWAN Technologies | IoT For All,” 2018. [Online]. Available: <https://www.iotforall.com/iot-connectivity-comparison-lora-sigfox-rpma-lpwan-technologies/>
- [27] Simplecell.eu, “Connecting Things.” [Online]. Available: <https://simplecell.eu/>
- [28] Sigfox, “Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT).” [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en>
- [29] E. notes, “SigFox for M2M IoT.” [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/sigfox/what-is-sigfox-basics-m2m-iot.php>
- [30] Prajzler Vit, “LoRa, LoRaWAN and LORIoT.io,” 2015. [Online]. Available: <https://www.loriot.io/lorawan.html>
- [31] The Things Network, “Limitations of LoRaWAN.” [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/limitations.html>
- [32] Anciaux Lionel, “LoRaWAN Roaming. State of deployments, Business Needs and Alternatives...,” 2018. [Online]. Available: <https://iotfactory.eu/lorawan-roaming-state-of-deployments-business-needs-and-alternatives/>
- [33] Orange Business Services, “Successful international roaming test between Orange and KPN LoRaWAN™ networks with Activity opens new horizons for IoT business applications,” 2018. [Online]. Available: <https://www.orange-business.com/en/press/international-lorawan-roaming-trial-success>

- [34] Wikipedia: The Free Encyclopedia, “List of LTE networks in Europe,” 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_LTE_networks_in_Europe
- [35] R. Hruška and P. Klusoň, “Huawei: Jak technologie umělé inteligence.” [Online]. Available: <https://studenttv.cz/video/130/huawei-jak-technologie-umele-intelligence/>
- [36] C. Henke, “7 Topics That IoT Device Manufacturers Need To Consider Before Using Cellular Narrowband,” 2018. [Online]. Available: <https://www.emnify.com/blog/7-topics-that-iot-device-manufacturers-need-to-consider-before-using-cellular-narrowband>
- [37] J. Morra, “Qualcomm Trying to Connect the Cellular Internet of Things | Electronic Design,” 2018. [Online]. Available: <https://www.electronicdesign.com/embedded-revolution/qualcomm-trying-connect-cellular-internet-things>
- [38] T. Rebbeck, “China’s operators roll out NB-IoT,” p. 3, 2018. [Online]. Available: <http://www.analysismason.com/Research/Content/Comments/China-IoT-benefits-RDME0-RDRP0/>
- [39] Flockett Anna, “China: NB-IoT forecasts strong growth in 2019,” 2018. [Online]. Available: <https://wireless.electronicspecifier.com/iot-1/china-nb-iot-forecasts-strong-growth-in-2019>
- [40] M. K. Weldon, *The Future X Network: A Bell Labs Perspective*. CRC Press, 2015.
- [41] Alza.cz, “Co je eSIM?” 2019. [Online]. Available: <https://www.alza.cz/esim>
- [42] R. Peška, “Vývoj zařízení je nutné přizpůsobit specifikům LTE a LTE-NB,” 2019. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/vyvoj-zarizeni-je-nutne-prizpusobit-lte-a-lte-nb.html>
- [43] N. Kirchhof, “GSMA announces completion of first European NB-IoT-Roaming-Trial,” 2018. [Online]. Available: <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/completion-of-first-european-nb-iot-roaming-trial-526404>
- [44] R. Ligeró, “Differences between NB-IOT and LTE-M,” 2018. [Online]. Available: <https://accent-systems.com/blog/differences-nb-iot-lte-m/>
- [45] P. Schaldenbrand, “What is a Power Spectral Density (PSD)?” 2016. [Online]. Available: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/What-is-a-Power-Spectral-Density-PSD/tap/360969>

- [46] B. E. Benhiba, A. A. Madi, and A. Addaim, “Comparative Study of The Various new Cellular IoT Technologies,” in *2018 International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*. IEEE, dec 2018, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8610508/>
- [47] Cisco.com, “eDRX Support on the MME,” Tech. Rep. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/asr_5000/21/MME/b_21_MME_Admin/b_21_MME_Admin_chapter_01111.pdf
- [48] N. Networks, “LTE-M-Optimizing LTE for the Internet of Things White Paper,” Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <https://novotech.com/docs/default-source/default-document-library/lte-m-optimizing-lte-for-the-internet-of-things.pdf?sfvrsn=0>
- [49] GeeksforGeeks, “Transmission Modes in Computer Networks (Simplex, Half-Duplex and Full-Duplex).” [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/transmission-modes-computer-networks/>
- [50] Halberd Bastion, “eMTC (LTE Cat-M1).” [Online]. Available: <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/emtc-lte-cat-m1>
- [51] Altair-Semi, “Coverage Analysis of LTE-M Category-M1,” Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://altair-semi.com/wp-content/uploads/2017/02/Coverage-Analysis-of-LTE-CAT-M1-White-Paper.pdf>
- [52] R. Peška, “LTE M v otázkách a odpovědích,” 2019. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/lte-m-v-otazkach-a-odpovedich.html>
- [53] M. E. Soussi, P. Zand, F. Pasveer, and G. Dolmans, “Evaluating the Performance of eMTC and NB-IoT for Smart City Applications,” Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1711.07268.pdf>
- [54] R. Peška, “LTE M a Nb IoT: výhody a nevýhody integrace,” 2019. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/lte-m-a-nb-iot-vyhody-a-nevyhody-integrace.html>
- [55] M. Voicu, “How Secure LTE Networks are Answering IoT Cybersecurity Challenges,” 2019. [Online]. Available: <https://www.telit.com/blog/how-secure-lte-networks-answer-iot-cybersecurity-challenges/>
- [56] M. Lauridsen, P. Mogensen, and S. Holst, “Coverage and Capacity Analysis of LTE-M and NB-IoT in a Rural Area,” vol. 20, pp. 1–6, 2016.
- [57] Vodafone.cz, “Vodafone dokončil pokrytí České republiky sítí pro internet věcí,” 2017. [Online]. Available: <https://www.vodafone.cz/o-vodafone/o-spolecnosti/pro-media/tiskove-zpravy/detail/vodafone-dokoncil-pokryti-ceske-republiky-siti-pro/>

- [58] Lupa.cz, “Vodafone v Česku spojí NB-IoT a mobilní konektivitu na jednu SIM kartu,” 2019. [Online]. Available: <https://www.lupa.cz/aktuality/vodafone-v-cesku-spoj-i-nb-iot-a-mobilni-konektivitu-na-jednu-sim-kartu/>
- [59] M. Menšík, “Orange rozšíří nízkoenergetickou síť LoRa pro internet věci o LTE-M,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mojandroid.sk/orange-rozsiri-nizkoenergeticku-siet-lora-pre-internet-veci-o-lte-m/>
- [60] J. Blackman, “Orange on LPWA: “If there’s no improvement in the radio, we’ll keep the same system”,” 2019. [Online]. Available: <https://enterpriseiotinsights.com/20190410/channels/news/orange-on-lpwa>
- [61] U-blox, “SARA-R4/N4 series.” [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/product/sara-r4n4-series>
- [62] U-blox, “EVK-R4.” [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/product/evk-r4>
- [63] U-blox, “Test server configuration Test server for cellular data modules Application Note,” Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/TestServerForSocketOperations_AppNote_%28UBX-14005690%29.pdf
- [64] U-blox, “SARA-N2 series Power-optimized NB-IoT (LTE Cat NB1) modules,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: www.u-blox.com
- [65] u-blox AG, “SARA-N2 Modules Power-optimized NB-IoT modules AT Commands Manual,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: www.u-blox.com
- [66] u-blox AG, “EVK-N2 SARA-N2 series Cellular Evaluation Kits User Guide,” Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: www.u-blox.com
- [67] Matplotlib, “Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.0.3 documentation.” [Online]. Available: <https://matplotlib.org/index.html>
- [68] NumPy, “Quickstart tutorial — NumPy v1.17.dev0 Manual.” [Online]. Available: <https://www.numpy.org/devdocs/user/quickstart.html>



Přílohy



Příloha A

CD

bp_nbiot_measurements.zip - Pracovní projekt vyhodnocovacího skriptu v jazyce Python obsahující soubory measurement.py a start.py

jarrah_lukas.pdf - Tato práce ve formátu PDF

jarrah_lukas.zip - Tato práce ve formátu L^AT_EX

loc_I_1.txt - Výstupy z terminálu pro jednotlivá měření ve formátu TXT

loc_I_2.txt

loc_I_3.txt

loc_II_1.txt

loc_II_2.txt

loc_III_1.txt

loc_III_2.txt

loc_III_3.txt

mcenter_24hours.atl - Použitý měřicí skript pro program M-Center

measurement.py - Okomentovaná deklaráce třídy v jazyce Python

start.py - Okomentovaný vyhodnocovací skript v jazyce Python

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jarrah** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **457416**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití licencované sítě NB-IoT pro bezpečnostně citlivé aplikace

Název bakalářské práce anglicky:

Using the NB-IoT Licensed Network for Security-Sensitive Applications

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte problematiku provozu a plánování sítí pro IoT se zaměřením na licencované sítě a diskutujte rozdíly mezi nimi. V praktické části proveďte reálná měření vybraných provozních parametrů u některé z typických bezpečnostně citlivých aplikací pro IoT v síti NB-IOT, a to zejména s důrazem na spolehlivost a zpoždění v doručení dat. Měření bude provedeno na zařízení U-Blox Evaluation Kit SARA-R410M.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Liberg, O., Sundberg, M., Wang, Y.-P. E., Bergman, J., & Sachs, J., Cellular Internet of things: Technologies, standards, and performance. Academic Press, 2017, 398 pages, ISBN: 978-0-12-812458-1
- [2] Weldon, M. K., The Future X Network: A Bell Labs Perspective. CRC Press, 2015, 472 pages, ISBN: 978-1-4987-5926-7
- [3] Lauridsen M., Kovacs I. Z., Mogensen P., Sorensen M. and Holst S., 'Coverage and Capacity Analysis of LTE-M and NB-IoT in a Rural Area', 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, 2016, pp. 1-5.
- [4] Materiály k problematice dostupné na <https://www.u-blox.com/en/product/evk-r4#tab-documentation-resources> [on-line]

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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