

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

Plánování a provoz sítí LPWAN/LPN pro aplikace v IoT

LPWAN/LPN planning and operation in IoT

květen 2016

Bakalant:

Lukáš Gregora

Vedoucí práce:

Ing. Bc. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 27. 5. 2016

.....

Podpis bakalanta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lukáš Gregora**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Síťové a informační technologie

Název tématu: **Plánování a provoz sítí LPWAN/LPN pro aplikace v IoT**

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte problematiku provozu a plánování LPWAN/LPN (Low-Power Wide-Area Network/Low-Power Network) sítí pro aplikace v internetu věcí (IoT). Zaměřte se na šíření signálu a rozmístění síťových prvků zejména uvnitř budov. Prostudujte možnost využití volně šiřitelných SW pro plánování těchto sítí. Sestavte základní metodiku pro návrh LPWAN/LPN sítí s ohledem na budování i provoz těchto typů sítí. Zaměřte se zejména na technologie LoRa, Sigfox, IQRF.

Seznam odborné literatury:

- [1] Lee, I.: Handbook of Research on Telecommunications Planning and Management for Business. IGI Global, 3/2009. 1212 pages. ISBN: 978-1-60566-195-7.
- [2] Materiály k problematice dostupné na <http://www.lora-alliance.org> [on-line].
- [3] Materiály k problematice dostupné na <http://www.sigfox.com> [on-line].
- [4] Materiály k problematice dostupné na <http://www.iqrf.org> [on-line].

Vedoucí: Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 21. 12. 2015

Anotace:

Tato bakalářská práce pojednává o konceptu LPWAN sítí pro aplikaci v IoT. Cílem práce je prozkoumat technologie šíření signálu LPWAN sítí, obzvláště se zaměřením na šíření signálu uvnitř budov. V řešení se rozebírá technika přímo rozprostřeného spektra a technika úzkopásmového šíření signálu, které patří mezi klíčové při požadavku na velký rozsah pokrytí a nízkou spotřebu energie. Mezi hlavní provozovatele LPWAN sítí patří technologie Sigfox s technologickým konceptem úzkopásmového šíření a Lora s konceptem přímo rozprostřeného spektra, které jsou v práci popisovány. Šíření signálu uvnitř budov závisí na rozložení prostředí, počtu překážek v cestě elektromagnetické vlny a jejich vlastnostech. Pro různé situace byly vytvořeny modely, které se dělí na empirické a deterministické. V praktické části této práce je rozpracováno měření útlumu signálu technologie LoRa v panelovém obytném domě se šesti podlažími. Výsledky z měření byly graficky zpracovány v závěru práce. Hlavním přínosem této práce je seznámení s možnostmi šíření signálu LPWAN sítí na základě technologických vlastností a modelů šíření, dále pak měření a samotné výsledky znázorňující útlum signálu LoRa při průchodu budovou.

Klíčová slova:

LPWAN, Lora, Sigfox, IQRF, šíření signálu, plánování sítě

Summary:

This bachelor thesis discusses a concept of LPWANs (Low Power Wide Area Networks) for application in IoT. The purpose of this work is to examine a signal propagation technique in LPWANs with an emphasis on indoor signal propagation. As a part of this work Direct Sequence Spread Spectrum and Ultra-Narrow Band techniques are taken account as key solutions for long-range signal coverage and low power consumption. Among platforms operating LPWANs, there is Sigfox with the technology of Ultra-Narrow Band spreading technique and LoRa with the Direct Sequence Spread Spectrum technique, both discussed in this thesis. Indoor signal propagation relays on a building layout, number of obstacles which electromagnetic waves have to deal with and characteristics of those obstacles. Propagation models for various situations were established; they are divided into empirical and deterministic models. In a practical part of this work, signal loss measurement of the LoRa technology is provided. The experiment took place in a prefab with six floors and seven entrances. The results of this measurement are graphically described in the end of this work. The main contribution of this bachelor thesis is an introduction of LPWAN signal propagation possibilities based on technology characteristics and propagation models. Also the signal loss measurement and its results cover a valuable part of this work.

Index Terms:

LPWAN, Lora, Sigfox, IQRF, signal propagation, network planning

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Bc. Lukáši Vojtěchovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Můj dík patří také Elektrotechnické fakultě Českého vysokého učení technického v Praze za zapůjčení zařízení pro měření sítě LoRa a správci domu v ulici Chvatěrubská v Praze za umožnění přístupu do prostor budovy využitých k měření.

V Praze dne 27. 5. 2016

.....
Podpis bakalanta

Obsah

Úvod.....	8
1. Koncept IoT a jeho vývoj	10
2. Komunikační technologie pro aplikaci IoT.....	11
2.1. Mobilní sítě 3G a LTE.....	11
2.2. Bezdrátové sítě LAN – WLAN	12
2.3. Technologie sítě LPWAN.....	12
2.3.1. UNB (Ultra-narrowband)	13
2.3.2. DSSS (Direct sequence spread spectrum)	14
2.3.3. Topologie LPWAN sítě	15
2.3.4. Řízení přístupu k médiu	16
2.4. Bezlicenční pásma.....	17
3. Software pro plánování LPWAN sítí	18
3.1. Komerční software.....	18
3.2. Volně dostupný software.....	20
4. Využití LPWAN sítí	21
5. Šíření radiového signálu	22
5.1. Šíření signálu uvnitř budov	23
5.2. Modely šíření	25
5.2.1. Šíření volným prostorem	25
5.2.2. Empirický model „One Slope“	25
5.2.3. Empirický model „Dual Slope“	26
5.2.4. Multi-wall model	26
5.2.5. Multi-wall-and-floor model	27
6. Specifikace LPWAN sítí	28
6.1. Technologie Sigfox.....	28
6.2. Platforma IQRF.....	29
6.3. Technologie LoRa.....	29
6.3.1. LoRa	29
6.3.2. LoRaWAN.....	30

6.3.2.1.	Třídy sítě LoraWAN	32
6.3.2.2.	Komunikace zařízení třídy A.....	33
6.3.2.3.	Fyzická vrstva technologie LoRa	34
6.3.2.4.	Kontrola dostupnosti kanálu.....	36
6.3.2.5.	Formát uplink a downlink zprávy.....	36
6.3.2.6.	Připojení zařízení do sítě.....	39
7.	Měření útlumu signálu technologie LoRa.....	41
7.1.	Použité pomůcky k měření	42
7.1.1.	Raspberry Pi 2, model B V1.1	43
7.1.2.	Koncentrátor WiMOD iC880A s čipem SX1301	44
7.1.3.	LoRa vysílač a přijímač IMST iU880A	45
7.2.	Postup měření.....	46
7.2.1.	Měřicí pracoviště	46
7.2.2.	Zapojení měřících zařízení	48
7.2.3.	Nastavení měřících zařízení.....	51
7.2.3.2.	Koncentrátor WiMOD iC880A s čipem SX1301	52
7.3.	Zpracování výsledků měření	52
	Závěr	54
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek	56
	Reference.....	57
	Přílohy.....	60

Úvod

Díky technologickému pokroku došlo v poslední době k vývoji drobných zařízení, mezi která patří senzory, aktuátory či mikrokontrolery. Tato zařízení jsou zařazena do sítě s vyhovujícími parametry pro jejich komunikaci a tím tvoří koncept sítě, kterou nazýváme Internet of Things (IoT). Jedná se o způsob propojení velkého množství každodenních předmětů do globální sítě unikátně adresovaných objektů, založené na standardních komunikačních protokolech. Mezi každodenní předměty řadíme zařízení M2M (Machine to Machine), technologie, která umožňuje vzájemnou komunikaci mezi elektronickými zařízeními obdobného typu. Propojením těchto zařízení do sensorových a aktuátorových sítí obohacujeme síť o možnost informace samostatně získávat, ovládat fyzické systémy a získané informace dále předávat v rámci sítě, již ne pouze zařízením stejných schopností. IoT představuje koncept umožňující samostatnou interakci s fyzickým světem včetně schopností přizpůsobení se jeho změnám. Tento koncept není primárně určen pro komunikaci lidí, lze jej charakterizovat jako síť, kdy většinu jejích uživatelů představují samostatné stroje. Součástí cíle konceptu IoT je připojení co největšího počtu zařízení do sítě a jejich dlouhá energetická soběstačnost zvyšující jejich výhodnost, kdy zařízení mohou být umístěna do obtížněji dostupných oblastí. Z předchozího tvrzení lze soudit, že mezi klíčové provozní požadavky takové sítě se řadí pokrytí rozsáhlého území, možnost připojení obrovského počtu zařízení a umožnění komunikace všem těmito zařízeními, nízké pořizovací náklady nových zařízení a v neposlední řadě také energeticky úsporný provoz.

Dosavadní dostupné koncepty sítí, jako např. mobilní síť GSM či LTE nebo síť Wifi, jsou primárně koncipovány pro přenos většího množství dat bez nutnosti ohledu na spotřebu energie a jsou určeny převážně pro komunikaci člověka. Technologie jako Bluetooth nebo Zigbee již vyhovují v oblasti M2M komunikace, nicméně jejich rozsah pokrytí a spotřeba energie vyžadují, aby zařízení byla umístěna v krátké vzdálenosti od přijímačů a pravidelně dobíjena. LPWAN (tzv. Low-Power Wide-Area Network) síť, jakožto nadějná technologie pro provozování konceptu IoT, splňuje požadavky rozsáhlého pokrytí území, připojení velkého počtu zařízení a úsporný provoz těchto zařízení. IoT patří k trendům moderní doby a tvoří bod zájmu mnoha poskytovatelů telekomunikačních služeb. S rostoucím zájmem o novou technologii se znalost konceptu IoT a LPWAN sítí stává populárnější. Tato práce se specializuje na plánování LPWAN sítí, metody šíření signálu v těchto sítích se zaměřením na šíření signálu uvnitř budov a vlastnostmi komunikačních kanálů těchto sítí. Práce pojednává o základních empirických modelech šíření elektromagnetických vln uvnitř budov a představen bude software pro plánování LPWAN sítí.

Druhá část práce se zabývá konkrétními technologiemi provozovanými na sítích LPWAN, představeny budou koncepty Sigfox, IQRF a LoRa. Součástí práce je měření útlumu signálu sítě LoRa v panelovém obytném domě v Praze, při kterém bylo spojení realizováno

pomocí jednoho vysílače a jednoho přijímače. Měření bylo provedeno ve dvou etapách, jednou s přijímačem umístěným ve sklepení budovy a podruhé s přijímačem umístěným na střeše budovy. Celý postup je detailně rozpracován a výsledky měření jsou graficky znázorněny.

1. Koncept IoT a jeho vývoj

Vývoj IoT je definován několika důležitými faktory. Prvním faktorem jsou pořizovací ceny senzorů, které tvoří zásadní část IoT sítě. Ceny těchto zařízení se během posledního desetiletí výrazně snížily a do budoucna lze předpokládat další pokles cen. Zároveň bylo zaznamenáno zvýšení investic do technologií IoT, do výzkumu v této oblasti a rostoucí množství firem zabývajících se touto technologií [1]. Základním faktorem pro umožnění realizace IoT je dostatečná internetová konektivita – vzhledem ke zvyšujícím se investicím do IoT lze v následujících letech počítat s nárůstem instalovaných zařízení. IoT implikuje požadavek na vznik nových architektur a společných standardů přesně určujících požadavky na IoT komunikaci a IoT řešení. Standardy, se kterými se počítá v dalším vývoji, odpovídají standardům M2M komunikace. V rámci návrhu budoucích architektur a standardů IoT je nezbytné zohlednit již existující řešení a otázku zpětné kompatibility.

S předpokládaným nárůstem zařízení připojovaných do sítě je třeba provést řadu proměn technologických infrastruktur, minimalizovat množství přenášených dat a zajistit dostatečnou kapacitu sítě pro jejich přenos. V roce 2020 lze celosvětově očekávat až 50 bilionů připojených zařízení [2]. S přibývajícím počtem senzorů a zařízení monitorujících lidskou činnost vyvstává otázka nalezení kompromisu mezi získáváním dat a ochranou osobních údajů. Mezi silné faktory ovlivňující realizaci IoT patří tedy také zabezpečení síťové komunikace mezi připojenými zařízeními.

V neposlední řadě hraje důležitou roli při plánování sítí IoT energetická spotřeba jednotlivých zařízení a jejich soběstačnost. Se spotřebou energie souvisí výkon jednotlivých zařízení a mezi výkonnostně nejomezenější zařízení patří právě koncové senzory. Závislost zařízení na dodání energie z externího zdroje značně omezuje možnosti umístění těchto zařízení. V rámci návrhu komunikačních protokolů a architektur sítě je třeba požadavek na snížení energetické náročnosti zohledňovat. Z hlediska samostatných zařízení je třeba uvažovat o možnosti znovuzískání energie (energy harvesting) či provoz zařízení za co neměší spotřeby energie a její uchování pro dlouhodobý provoz.

2. Komunikační technologie pro aplikaci IoT

V příštích několika letech lze očekávat připojení velkého množství zařízení s požadavkem na mobilitu, nízkou spotřebu energie a nízkou pořizovací cenu. V konceptu IoT tato zařízení pokrývají oblasti automobilového průmyslu a dopravy, zdravotnictví, životního prostředí a mnoho dalších. Dle pole působení těchto zařízení a jejich požadavků lze předpokládat, že dosavadní koncept mobilních sítí a bezdrátové sítě s krátkým dosahem nebudou nejlepší volbou pro připojení těchto zařízení.

2.1. Mobilní sítě 3G a LTE

GSM mobilní sítě jsou určeny primárně pro využívání člověkem, nikoliv samostatnými přístroji. Operují na vzdálenosti několika kilometrů a umožňují přenos velkého množství dat, jsou tedy vhodné pro přenos hlasu či videa. Problém nastává v pořizovací ceně modemů, kdy cena modemu roste s modernizací technologie (od GPRS po LTE modemy). Celková cena pořizovací ceny infrastruktury sítě je velmi vysoká. Základové stanice musí být blíže u sebe, aby spolehlivě pokryly území, což zvyšuje jejich počet a tedy také cenu celého systému. Spotřeba energie je značně vysoká a zařízení nevydrží dlouho v provozu na jedno nabití, nebo musí disponovat pevným připojením do elektrické sítě. Pro koncept IoT není ani zapotřebí přenosu velkého množství dat a tak 3G ani samotné LTE sítě nejsou nejvhodnějším řešením pro realizaci sítě IoT.

Mnoho mobilních operátorů však stále uvažuje o začlenění M2M komunikace do sítě LTE. V poslední době byla představena technologie LTE, kde by cena zařízení byla srovnatelná s technologií EGPRS [2]. Zároveň by bylo standardizováno zvýšení pokrytí, které je vyžadováno pro M2M komunikaci. Nový model LTE, tzv. LTE-M je určený právě pro M2M úzkopásmovou komunikaci. Nový systém by vycházel z původního LTE systému a navíc by zahrnoval nízkou cenu zařízení, vysoké pokrytí území, dlouhou výdrž baterie a velkou kapacitu. Pro tuto technologii může být užíván jeden GSM kanál (200 kHz) a může být také použito spektrum existujícího širokopásmého LTE, což je jedním z důvodů k využití již stávajícího konceptu pro technologii M2M komunikace [3]. Koncept LTE-M je zpětně kompatibilní s již provozovaným LTE a proto je možné využít stejný hardware, sdílené spektrum a doposud instalované základnové stanice a tím zvýšit celkovou kapacitu systému. LTE-M se bude moci připojit do jádra sítě LTE, což umožní služby jako ověření v síti, zabezpečení, sledování přenosu, a další. V konceptu LTE-M je každý kanál složen z 12 složek nosných, kdy každá složka je vzdálena 15 kHz. Provoz konceptu LTE-M bude probíhat v licencovaných pásmech [3].

technologie	Sigfox	LoRa	Clean slate	NB LTE-M Rel. 13	LTE-M Rel. 12/13	EC-GSM Rel. 13	5G (targets)
venkovní dosah	< 13 km	< 11 km	< 15 km	< 15 km	< 11 km	< 15 km	< 15 km
spektrum [MHz]	bezlicenční 900	bezlicenční 900	licenční 7 – 900	licenční 7 - 900	licenční 7 - 900	licenční 8 - 900	licenční 7 - 900
šířka pásma	100 Hz	< 500 kHz	200 kHz	200 kHz nebo sdíleno	4, MHz nebo sdíleno	2,4 MHz nebo sdíleno	sdíleno
rychlost přenosu	< 100 b/s	< 10 kb/s	< 50 kb/s	< 150 kb/s	< 1 Mb/s	10 kb/s	< 1 Mb/s
životnost baterie	> 10 let	> 10 let	> 10 let	> 10 let	> 10 let	> 10 let	> 10 let
dostupnost	již dostupné	již dostupní	2016	2016	2016	2016	po roce 2020

Tabulka 2-1 Přehled plánovaných služeb pro koncept IoT [3]

2.2. Bezdrátové sítě LAN – WLAN

LAN sítě obsahují technologie jako Zigbee, Bluetooth či WIFI, které nabízejí vysoký přenos dat, ale jsou navrženy pro přenos na krátkou vzdálenost [4]. Ve městě netvoří krátká vzdálenost příliš velký problém, protože WIFI sítě jsou přítomné téměř v každé budově. Problém však nastává ve spotřebě energie a rozsahu pokrytí v méně obydlených oblastech. Koncept IoT vyžaduje rozsáhlé pokrytí velkého území – sítě napříč městy a státy, LAN technologie uspokojivě poslouží, jedná-li se o pokrytí uvnitř budov. Mnoho zařízení nemá možnost neustálého přísunu energie (ať už ze sítě či energy harvestingem), což také vyřazuje tento koncept z možnosti použití.

2.3. Technologie sítě LPWAN

Mnoho zařízení vyžaduje umístění na obtížně dostupných místech (např. pod zemí či vbudování uvnitř konstrukcí budov). Tento požadavek nevyhovuje technologickým možnostem mobilních sítí, které jsou určené pro lidské uživatele. Pro podporu M2M komunikace byly navrženy různé systémy jako Zigbee, Bluetooth, RFID a další, tyto technologie však nemohou poskytnout dlouhý dosah a tedy nedisponují dostatečným pokrytím území za nízkých cenových nákladů [5]. Aby bylo vyhověno požadavkům technologie IoT, byl navržen koncept sítě LPWAN (tzv. Low-Power Wide-Area Networks).

LPWAN síť tvoří střední cestu mezi mobilními sítěmi s velkým dosahem a lokálními bezdrátovými sítěmi WLAN. Mezi základní výhody nabízené LPWAN sítěmi patří nízká spotřeba energie, která umožní provoz zařízení po dobu několika let na jedno nabití, optimalizovaný přenos dat pro přenos datových bloků, malé množství základnových stanic pro pokrytí velkého území, snadná instalace a rozmístění na krátké i větší vzdálenosti [5]. Díky schopnosti LPWAN síť nabídnout nízkou cenu koncových zařízení, vysokou energetickou výdrž a rozsáhlé pokrytí lze k roku 2020 předpokládat až několik bilionů připojených zařízení [2].

Pro zajištění rozsáhlého pokrytí území je použito technologie úzkopásmového přenosu signálu (UNB – ultra-narrowband) a techniky přímo rozprostřeného spektra (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum). Pro potřeby nízké spotřeby energie jsou LPWAN síť strukturovány do topologie hvězdy a je použito metody náhodného přístupu k zařízením.

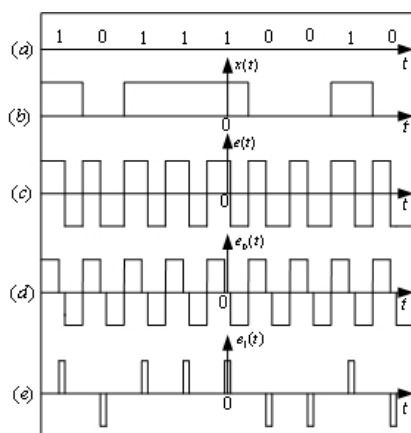
2.3.1. UNB (Ultra-narrowband)

UNB (úzkopásmová) technologie je použita pro komunikaci mezi zařízeními na dlouhou vzdálenost. Úzkopásmová technologie je žádána z důvodu snížení pořizovací ceny hlavně na straně zařízení. Úzké pásmo nevyžaduje příliš drahé radiofrekvenční součástky, k úsporám dochází také při konstrukci média, protože není vyžadován přenos velkého množství dat. Zlepšuje se dosahová vzdálenost díky schopnosti koncentrovat přenášený výkon do úzkého pásma.

Typická procedura UNB modulace se skládá ze dvou částí: fázová modulace se skokovým posunem a filtrace signálu přes UNB filtr. Při fázové modulaci je fáze nosné vlny skokově měněna a reprezentuje hodnoty digitální 0 a 1. Pro technologii UNB můžeme použít modulace VMSK (very maximum sideband keying), 3PSK (pulse position phase shift keying) či modulaci MCM (missing cycle modulation) nazývanou též 3PRK (pulse position phase reversal shift keying). Díky vlastnostem fázové modulace se spektrální hustota výkonu modulovaného signálu skládá z vyšší diskrétní složky a nižší kontinuální složky. Všechny potřebné informace jsou obsažené v postranním pásmu diskrétní složky [5].

Dále začíná svou funkci plnit UNB filtr s nulovým nebo negativním skupinovým zpožděním, který odstraní všechny ostatní postranní pásma a harmonické a zachová pouze jediné postranní pásmo. Díky UNB filtru obsahuje výstupní signál pouze jedinou frekvenci vyžadující přenosovou šířku pásma v řádu několika Hz. Výkon šumu je tímto velmi omezen, proto také citlivost přijímače UNB signálu může být velmi nízká. Filtry na radiofrekvenční úrovni

jsou poměrně složité a musí být ručně laděny. V současné době je složitost UNB filtrů překážkou k masivnímu nasazení UNB produktů. [5]



Obrázek 2-1 Příklad principu funkce VMSK modulace [9]

2.3.2. DSSS (Direct sequence spread spectrum)

DSSS (technika přímého rozpustného pásma) byla doposud značně využívána v komerčních bezdrátových komunikačních systémech, jako jsou například mobilní sítě 3G [5]. V DSSS je tok přenášených informací rozdělen do malých částí a každá z těchto částí je přidělena frekvenčnímu kanálu napříč celým pásmem. V další fázi přenosu je signál přenášející užitečnou informaci přenásoben pseudonáhodnou sekvencí hodnot 1 a -1 na vyšší frekvenci, než je původní signál (tento signál je také nazýván jako chipping code) - jedná se o umělé zavedení redundance (nadbytečnosti). Tato sekvence bitů je poté modulována na nosný signál a přenášena. Chipping code pomáhá signálu odolávat rušení a umožňuje obnovení dat porušených při přenosu [6]. Přenášená data jsou navíc chráněna, protože bez znalosti mechanismu vytváření pseudonáhodné sekvence je obtížné přenášená data demodulovat.

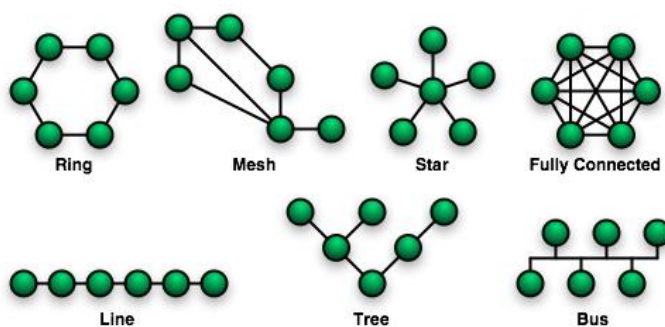
Rychlost násobících pulzů za sekundu (chips per second) je označována jako „chip rate“, rychlost přenosu symbolů za sekundu je označována jako „symbol rate“. Chip rate je zpravidla vyšší než symbol rate, protože jeden symbol bývá reprezentován několika pulzy. Na základě následujícího vzorce (1) je poté vypočítán faktor šíření (SF – spreading factor), který udává míru rozprostření signálu při přenosu.

$$SF = \frac{\text{chip rate}}{\text{symbol rate}} \quad (1)$$

DSSS přijímače jsou schopny úspěšně detekovat užitečný signál i u signálu s nízkým odstupem od šumu, což je velice výhodné pro LPWAN sítě. Této vlastnosti lze docílit vygenerováním dlouhé sekvence – např. práh citlivosti DSSS přijímače klesne o 3 dB, pokud se délka pseudonáhodného kódu dvojnásobně zvýší. DSSS systémy pro LPWAN sítě se snaží vždy zvětšit délku pseudonáhodného kódu, aby co nejvíce snížily práh citlivosti přijímače a tím zvýšily dosah komunikačního kanálu. Generování delšího kódu však přináší složitější výpočetní algoritmy, větší náročnost a tedy i vyšší požadavky na hardwarové vybavení zařízení. I přes tuto překážku zůstává DSSS nadějnou technologií pro plánování LPWAN systémů. [5]

2.3.3. Topologie LPWAN sítě

V bezdrátových sítích hraje topologické uspořádání sítě důležitou roli ve výkonu. Existuje několik různých topologií aplikovaných v bezdrátové senzorové síti: smíšená topologie (mesh topology), stromová topologie (tree topology) či řetězová topologie (chain topology). Ve všech těchto topologiích slouží koncová zařízení také jako přepínače (routery), zprostředkovávají připojení dalším zařízením a tedy zvýšení pokrytí území. Vzhledem k tomu, že dostatečné pokrytí u LPWAN sítí je zajištěno technologií UNB či DSSS, zajímá nás v tuto chvíli hlavně nízká pořizovací cena a nízká spotřeba energie. Z toho hlediska se jako nejlepší topologie jeví topologie hvězda, která má pouze jeden přístupový bod zprostředkovávající připojení, ke kterému jsou všechny zařízení dané sítě připojeny. Přímá komunikace mezi koncovým zařízením a přístupovým bodem snižuje možné zpoždění celého systému. V hvězdicové topologii není třeba organizačních paketů pro zajištění správného směrování v propojovacích zařízeních, což pomáhá snižovat spotřebu energie koncových zařízení. Z hlediska spolehlivosti doručení zprávy se hvězdicová topologie nevyrovná např. smíšené (mesh) topologii, ale je spolehlivější než např. stromová či řetězová topologie, navíc disponuje jednoduchostí na sestavení a přidání jednotlivých zařízení.



Obrázek 2-2 Přehled síťových topologií [11]

2.3.4. Řízení přístupu k médiu

Přístup ke kanálu hraje velice důležitou roli v oblasti LPWAN sítí z důvodu velkého počtu zařízení, které vyžadují připojení do sítě. V bezdrátových sítích existují dvě hlavní metody sdíleného přístupu k médiu: metoda s řízeným přístupem k médiu a metoda s náhodným přístupem k médiu.

Metoda s řízeným přístupem vyžaduje rozdělení kanálů do různých dimenzí, což přináší řadu výhod jako např. snížení kolize při přenosu nebo větší spolehlivost. Nevýhodou této metody je neschopnost zajistit připojení pro velký počet zařízení z důvodu limitovaného počtu kanálů. Tento problém je z hlediska předpokladu návrhu LPWAN sítí zásadní [5].

Naproti metodě s řízeným přístupem k médiu stojí metoda s náhodným přístupem, ve které zařízení bojují o přístup ke sdílenému médiu podle své potřeby. Vzhledem k tomu, že požadavek na přístup a objem přenášených dat záleží na potřebách zařízení, je třeba zajistit rezervní kapacitu pro případ potřeby připojení velkého množství zařízení ve stejný okamžik. V metodě s náhodným přístupem není vyžadována synchronizace, není nutné neustále přenášet synchronizační signál a zařízení, která nevyžadují komunikaci, mohou setrvávat v úsporném režimu, což napomáhá ke snížení spotřeby energie.

Metoda s náhodným přístupem k médiu čelí však také svým úskalím, mezi které patří přeslechy, odposlechy nečinných zařízení, kolize a mnoho dalších. Jedním z možných řešení těchto problémů je použití protokolu CSMA/CA (Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance), který dokáže na bázi rozeznání nosné vlny snížit pravděpodobnost kolize dvou signálů. V extrémních situacích však ani tento protokol nepracuje správně. Na dlouhých vzdálenostech mezi koncovými zařízeními může dojít ke ztrátě velkého množství informací a signál nemusí být koncovým zařízením detekován. [5] Překážkou pro tento mechanismus je také požadavek na velké množství připojovaných zařízení. Z důvodu masivních požadavků na přístup ke kanálu jsou CSMA protokoly neefektivní.

Naproti CSMA protokolům stojí protokoly ALOHA. Tato metoda nijak nekontroluje stav přenosového média a nedívá se, zda zrovna někdo vysílá. Potřebuje-li nějaké zařízení vyslat zprávu, zprávu vyšle nezávisle na vytíženosti média a vyčkává na potvrzující zprávu, která musí být doručena do určitého časového limitu. Pokud není kontrolní zpráva doručena, vysílá se informace znovu a celý proces se opakuje. Metoda nevyžaduje řídicí stanici, koncová zařízení rozhodují o zahájení vysílání dle odhadu provozu sítě. Tato metoda však funguje pouze do určitého zatížení sítě, poté je síť zahlcena opakovaným zasíláním zpráv. DSSS technologie umožňuje identifikovat a rozlišit příchozí signály od většího množství zařízení a to na základě specificky generované posloupnosti, kdy na základě klíče, podle kterého byl signál modulován je nyní také demodulován. Díky nepřítomnosti požadavků o vysílání (RTS – request to send) a potvrzení o dostupnosti kanálu (CTS – clear to send) je dosaženo snížení energetické náročnosti provozu celého systému.

2.4. Bezlicenční pásma

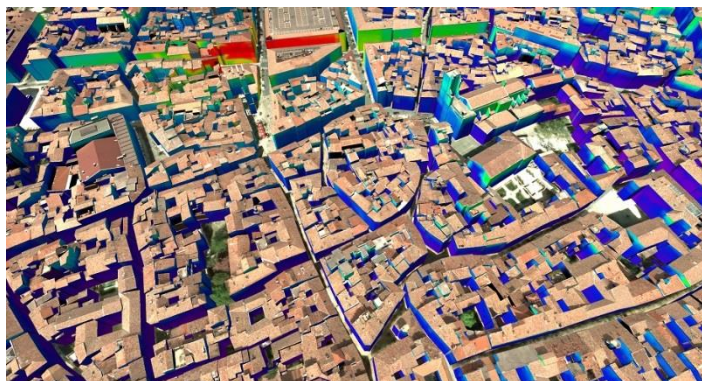
Jedná se o volná pásma, v nichž je dovozen provoz bez licenčních poplatků, není však zaručena garance proti rušení. SRD (tzv. short range devices) zařízení jsou radiové přijímače, které komunikují jednosměrně či obousměrně a poskytují služby jakožto automatizace domácností, bezdrátové alarmy, čipové vstupy a další. Pro SRD zařízení musí být pečlivě vybrána frekvence z množiny bezlicenčních frekvencí (globálně: 13,56 MHz, 40 MHz, 433 MHz, 2,4 GHz, 5,8GHz; v Evropě, USA, Kanadě, Austrálii a Novém Zelandu: 868 MHz a 915 MHz). Pro systémy, které nevyžadují vysoký výkon a naopak využijí širší komunikační rozsah, lépe poslouží frekvenční pásma pod 1 GHz. Jejich větší přenosový dosah snižuje energetickou náročnost na přenos.

Jedna z možností globálního užití je frekvenční pásmo 433 MHz. Možná šířka pásma na této frekvenci je méně než 2 MHz a použití pro zvuk, video, audio a konstantní přenos dat není povolen. Protož je toto pásmo více využito např. pro čipové vstupy do budov. Frekvenční pásma okolo 868 MHz (pro Evropu) a 915MHz (pro USA) slouží pro provozování konceptu LPWAN sítí a jsou provozovány v závislosti na ustanoveních ETSI (Evropského telekomunikačního institutu) v Evropu a FCC (Vládního úřadu pro komunikaci) v USA.

3. Software pro plánování LPWAN sítí

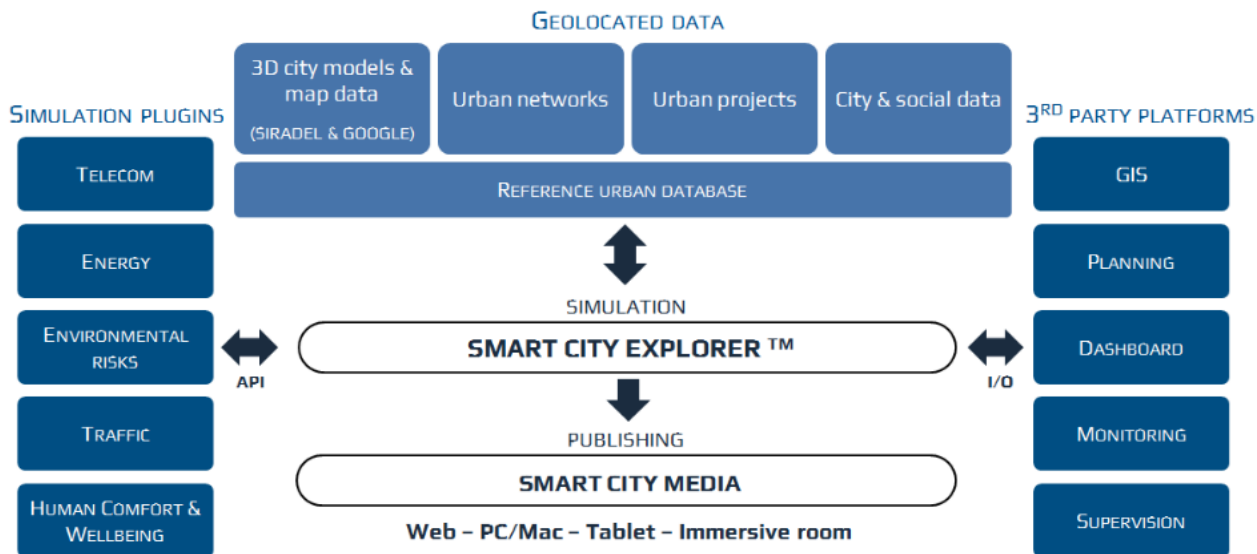
3.1. Komerční software

Koncept LPWAN sítí se stává stále populárnějším, což zvyšuje zájem jednak firem sestavujících hardware pro zařízení této technologie, ale také firem vytvářejících software pro plánování a správu těchto sítí. Jedním ze softwaru, který je schopen simulovat bezdrátové LPWAN sítě pro aplikace IoT je komerční platforma „S_IoT“ od společnosti Siradel. Plánování je založeno na bázi 3D vizualizace prostředí pomocí aplikace „Smart City Explorer“ a „Volcano“, která modeluje 3D technologii šíření vln.



Obrázek 3-1 Celkové působení elektromagnetického pole ve městě Nîmes, ve Francii. [12]

Smart City Explorer je simulační a vizualizační platforma, orientována ve 3D prostředí a připravena pro optimalizování městských síťových infrastruktur či plánování nových městských sítí. Umožňuje importovat a zobrazit data plánovaného území a poté nakonfigurovat klíčové komponenty plánované infrastruktury (telefonní sítě, senzorové sítě, veřejného osvětlení, dopravy a dalších). Územní data dané oblasti jsou získávány z databází nebo v rámci spolupráce s jinými společnostmi (např. mapové podklady od společnosti Google) a mohou být dodatečně editována. Aplikace umožňuje připojení dalších simulačních softwarů do platformy. Smart City Explorer dokáže zobrazit další georeferenční data jako jsou městské projekty nebo populace a na základě těchto dat asistovat při plánování městské sítě.



Obrázek 3-2 Schéma funkcí aplikace Smart City Explorer [12]

Volcano je software pro modelování šíření vln, založený na bázi plánování a sledování trasy paprsku, který je využíván více než 100 mobilními operátory v 50 zemích světa [7]. Software je používán pro plánování sítí na rozsáhlém území, jako je např. pokrytí celého státu signálem pro mobilní telefony. Dále je využíván pro plánování sítí v silně zastavěné infrastruktuře. Díky 3D modelu šíření paprsku je schopen simulovat pokrytí několika podlažních budov.

S_IoT nabízí možnost importovat data z externích zdrojů nebo je exportovat. Díky aplikaci Smart City Explorer není vyžadována detailní znalost plánované oblasti, aplikace umožňuje výpočet modulací a plánování pro různá prostředí (nezastavěná území, zastavěná území či plánování sítí uvnitř budov). Data jsou následně odeslána a snadno dostupná z cloudového úložiště.

3.2. Volně dostupný software

Mezi volně šířitelné simulační nástroje můžeme řadit např. software TOSSIM, síťový simulační nástroj NS-2 či simulační program Castalia, který pracuje na základě programu Omnet++. Omnet++ je simulační prostředí, založené na komponentách C++, primárně určené pro návrhy a stavby síťových simulací. Zahrnuje simulace kabelových i bezdrátových komunikačních sítí, on-chip sítí a dalších. Svoji specializaci uplatňuje na sensorové sítě a dále je využíván pro návrhy bezdrátových ad-hoc sítí, internetových protokolů, výkonových modelů či optických sítí. Omnet++ poskytuje vývojové prostředí založené na bázi Eclipse a obsahuje silnou podporu grafického rozhraní.

Simulátor Castalia, který je založen na platformě Omnet++, slouží primárně pro simulaci bezdrátových sítí a obecně sítí s nízkou energetickou spotřebou. Castalia je využívána na testování protokolů pro bezdrátové kanály a dále pro radiové modely s reálným chováním uzlů zaměřené na přístup k radiovému spojení. Simulátor disponuje modelem pro časové změny ztrát na trase, modelováním fyzických procesů, kalkulací, úrovně výkonu přijatého signálu či celkovým vysílacím modelem založeným na empiricky měřených datech. Slouží především pro ověření algoritmů, před jejich implementací do sensorové sítě. [8]

4. Využití LPWAN sítí

LPWAN sítě mohou být využity pro širokou škálu služeb, mezi které patří monitorování infrastruktury, zdravotnictví, bezpečnost, monitorování a řízení dopravy a kontrola distribuce zboží. Všechny tyto služby vyžadují rozsáhlé pokrytí území a velice nízkou spotřebu energie. Mezi další požadavky patří připojení senzorů monitorující vnější, vnitřní či podzemní prostory.

Senzory napojené na LPWAN sítě mohou monitorovat infrastrukturu shromažďování dat o zásobách či průtoku vody, elektřiny, oleje, nebo plynu. Naměřené informace jsou odesílány do sítě a následně vyhodnocovány. V dnešním světě hrají tyto suroviny důležitou roli a proto je jejich monitorování žádané.

Monitorování dopravy umožní předcházet kritickým dopravním podmínkám, jako jsou zásadní kvalitativní nedostatky na povrchu vozovek, dopravní zácpy, monitorování veřejné dopravy a další. LPWAN sítě umožňují přímou interakci mezi informačními systémy a jednotlivými vozidly. Senzory ve vozidle sbírají informace na základě pohybu vozidla, ty jsou odeslány a vyhodnoceny a společně s dalšími užitečnými informacemi se vrací zpět k řidiči.

LPWAN sítě umožňují evidenci distribuovaného materiálu, aniž by musel být aktivně kontrolován personalistou. Pomocí senzorů přidaných do balíků zboží kontrolovat distribuční řetězce a zjišťovat kvalitu jejich služeb.

LPWAN sítě disponují zabezpečenou komunikací pro senzory a nouzové systémy, které v případě potřeby vysílají kritickou informaci při vloupání či pokusu o odcizení majetku. Tato informace je zaslána přímo majitelům budov nebo bezpečnostním agenturám, které zajistí zabezpečení daného objektu.

Senzory pomáhají také ve zdravotnictví, kde lze, díky rozsáhlému pokrytí a nízké spotřebě energie, neustále monitorovat stav pacientů, přestože se pohybují na různých místech. Na základně získaných a vyhodnocených informací lze pacientům zajistit individuální a nejvíce vyhovující péči.

5. Šíření radiového signálu

Šíření radiového signálu popisuje chování radiových vln při jejich cestě mezi jednotlivými body. Elektromagnetické vlny jsou ovlivněny odrazy, lomem, ohybem, pohlcením, polarizací či rozptylem. Šíření vln je ovlivněno vodní párou obsaženou ve vzduchu, ionizací atmosféry způsobené sluncem, tvarem zemského povrchu či překážkami stojícími v cestě šíření.

Typ vlny	Frekvence	Vlnová délka	Využití
Velmi dlouhé (VLF)	3 – 30 kHz	10 – 100 km	Navigační soustavy pro leteckou a námořní dopravu
Dlouhé (LF)	30 – 300 kHz	1 – 10 km	Radiokomunikace, meteorologie, rozhlas na dlouhých vlnách
Střední (MF)	300 – 3000 kHz	100 – 1000 m	Radionavigace, sdělovací služby
Krátké (HF)	3 – 30 MHz	10 – 100 m	Radiokomunikace na střední a velké vzdálenosti, rozhlasové vysílání
Veliké krátké (VHF)	30 – 300 MHz	1 – 10 m	Rozhlas VHF, televize, sanitní služba, hasiči, policie, dopravní pohotovost, družicové spojení
Ultra krátké (UHF)	300 – 3000 MHz	10 – 100 cm	Televize, radiokomunikace na krátkou vzdálenost, radionavigace
Centimetrové (SHF)	3 – 30 GHz	1 – 10 cm	Pro radioreléové spoje, radiolokátory, spojení s družicemi
Milimetrové (EHF)	30 – 300 GHz	1 – 10 mm	Přistávací a říční lokátory, výškoměry, telekomunikace na optických vláknech

Tabulka 5-1 Frekvenční spektrum vhodné pro radiovou komunikaci

Vlna, využívající ke svému šíření odrazů od zemského povrchu, se nazývá povrchová vlna. Jedná se převážně o vlny ve frekvenčním pásmu 30 – 3 000 kHz, které při své cestě narážejí do povrchu země a mohou se šířit za horizont. Protože zemský povrch není dokonalým vodičem, je útlum těchto vln vysoký. Vlny tohoto typu jsou využívány zpravidla pro časové signály nebo pro vojenskou komunikaci.

Vlny, šířené napřímo ve volném prostoru, se šíří cestou přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Na tyto vlny nepůsobí zemský povrch ani ionosféra a jsou zpravidla využívány pro šíření na velmi vysokých frekvencích (VHF), používaných pro šíření rádia či TV signálu z lokálního vysílače.

Ionosférické prostorové vlny využívají ke svému šíření odrazu, popř. ohybu ve vrstvách ionosféry. Ionosféra se dělí do několika vrstev, z nichž vrstva F2 je nejvýznamnější pro šíření vln na dlouhé vzdálenosti. Útlum ionosférických vln závisí na průchodu jednotlivými vrstvami atmosféry, které jsou ovlivňovány činností slunce. Z důvodu neustálých změn ionosféry dochází často ke změně cesty vlny, přestože vlna cestuje mezi neměnicími se body. Ionosférické vlny jsou běžně používány pro vlny vysokých frekvencí (HF), občasně pro vlny středních frekvencí (MF).

Troposférické vlny jsou ovlivňovány odlišnými indexy lomu, které nastávají v troposféře, blízko nad zemským povrchem. Šíření troposférických vln je závislé na okolních podmínkách (teplota, vlhko, déšť). Jedná se o vlny na velmi vysokých frekvencích (VHF), ultravysokých frekvencích (UHF) a super vysokých frekvencích (SHF).

Radiové vlny na různých frekvencích se šíří na základě jejich vlastností a působení okolních podmínek (např. počasí), podrobná znalost problematiky proto napomáhá při výběru frekvence pro požadovanou službu. Krom výše uvedených kategorií existuje mnoho bezdrátových systémů, které nezapadají do těchto kategorií. Mnoho mobilních komunikačních systémů, jako např. Wifi či mobilní sítě, potřebuje mít své modely šíření vypočítané pro šíření ve vysoce urbanizovaných oblastech nebo uvnitř budov. Tyto modely využívají, krom šíření volným vzduchem, různých odrazů a lomů.

5.1. Šíření signálu uvnitř budov

Růst v bezdrátové komunikaci zapříčinil vznik nových aplikací pro osobní užití frekvencí, dochází k celosvětovému rozvoji osobních komunikačních systémů. Důležitou součástí pro správnou implementaci komunikačního systému je bezdrátová komunikace uvnitř budov. Toto zahrnuje situace od jednotlivců pohybujících se ve svých domovech, přes větší množství zájemců o připojení ve firemních kancelářích, továrnách, nemocnicích a dalších. Šíření elektromagnetické vlny ve vnitřním prostředí není ovlivňováno přírodními podmínkami, jako je sníh, déšť, mlha či teplotní změny, ale je naopak náchylnější na rušení z důvodu odrazu, ohybu a rozptylu radiových vln díky členěnému prostoru uvnitř budovy. Každá budova je svým rozložením specifická, ať už jde o použitý stavební materiál, uspořádání místností, počet podlaží či velikost oken. Významnou roli hraje také pohyb osob uvnitř budovy. V neposlední řadě hraje důležitou roli v šíření paprsku volba nosné frekvence, útlum signálu roste se zvyšující se frekvencí. Vlny s milimetrovými vlnovými délkami mnohdy neprostoupí skrz běžné stavební materiály typu cihla nebo panel. [9]

Běžný koncept radiového komunikačního systému uvnitř budovy se skládá z přijímače umístěného fixně na určitém místě a komunikujícího s dalšími mobilními či fixně umístěnými zařízeními. Odrazy, ohyby a rozptyly paprsku zapříčiňují, že signál často dorazí k přijímači více

cestami, což způsobuje jeho narušení. Pokud je však dobře odhadnuto vícecestné šíření, vysílače mohou být rozmístěny tak, aby dosáhly co nejlepšího výkonu. K navržení rozmístění vysílačů je potřeba modelů šíření, které se dělí na následující modely:

- Empirické modely
- Deterministické modely
- Semi-deterministické modely – založené na empirických modelech s přidanými deterministickými aspekty.

Statistické (empirické) modely byly dříve navrženy pro vícecestné šíření paprsků při venkovním šíření, nyní jsou používány pro modelování radiového signálu uvnitř budov. Vychází z rozsáhlých měření, na základě kterých jsou získávány parametry používané pro další modelování šíření. Výhodou statistických modelů je výpočetní nenáročnost a jejich zobecnění. Vytvoření statistického modelu nezáleží na rozložení a specifických detailech pokrývaného území, což nevyžaduje čas věnovaný k detailnímu průzkumu dané pokrývané oblasti. Statistické modely jsou populární volbou pro vypracování modelu pro standardní rozložení prostoru, pro který je možno volit z parametrů získaných při dřívějších měřeních podobných prostředí. Nevýhodou statistického modelu je, že není schopen poskytnout detailní chování kanálu ve specifickém rozložení pokrývané oblasti, ale poskytuje pouze odhad ztráty signálu na jeho trase.

Naproti tomu, site-specific (deterministické) modely jsou založeny na teorii šíření elektromagnetických vln. Nezávisí na parametrech získaných v předchozích měřeních, ale vychází z podrobných informací o členění pokrývaného místa. Vlastnosti šíření elektromagnetických vln by mohly být přesně určeny obtížnými výpočty Maxvellových rovnic s údaji o geometrii budovy. Na takové výpočty však není dostatečná výpočetní technika, proto je využíváno jiných metod [9]. Modely využívají metody sledování paprsku, kdy zkoumají hlavně vícecestné šíření paprsku, z toho důvodu jsou také výpočetně náročnější než statistické modely. Zkoumají útlum signálu a časový rozdíl mezi signálem cestujícím na přímou vzdálenost a signálem odraženým. Koncept vychází z předpokladu, že radiové vlny na vysokých frekvencích mají stejné chování jako paprsky, proto lze modelovat šíření signálu jakožto šíření paprsku. Paprsky jsou vyslány z místa radiového vysílače a na základě znalosti teorie lomu a odrazu se zkoumá jejich interakce s prostředím. Uvedená metoda lze aplikovat za předpokladu, že objekty přicházející do kontaktu s paprskem jsou větší než jeho vlnová délka. [10]

5.2. Modely šíření

Následující modely šíření vychází z útlumu signálu po cestě šíření. Modely vycházejí z šíření v prostředí mikrobuněk a pikobuněk.

5.2.1. Šíření volným prostorem

Jedná se o nejjednodušší situaci v šíření signálu, kdy útlum závisí na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Překážky po cestě nejsou v tomto modelu zohledňovány. Výkon signálu na straně přijímače je vypočítán z následující rovnice (2) [11]:

$$P_p(d) = P_v + G_v + G_p - L_F, \quad (2)$$

kde $P_p(d)$ je úroveň přijatého signálu v závislosti na vzdálenosti d vysílače od přijímače, P_v je výkon vysílače, G_v zisk antény vysílače, G_p zisk antény přijímače a L_F útlum signálu ve volném prostředí, který se vypočítá dle následujícího vztahu (3) [11]:

$$L_F = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda}\right) \quad (3)$$

5.2.2. Empirický model „One Slope“

V tomto modelu je útlum signálu určen v závislosti na logaritmu vzdálenosti přijímače od vysílače a indexu útlumu n . Typické hodnoty pro n jsou 2 pro šíření volným prostorem a 3 pro šíření v budovách [12]. Model je definován dle následující rovnice (4) [11]:

$$L_{OS} = L_0 + 10n \cdot \log(d), \quad (4)$$

Kde L_0 reprezentuje útlum ve volném prostředí ve vzdálenosti 1 metr, d je vzdálenost vysílače od přijímače a n je index útlumu.

5.2.3. Empirický model „Dual Slope“

Útlum signálu v mikrobuňkách se liší v závislosti na velikosti rozsahu, proto byl zaveden dual-slope model počítající se dvěma útlumovými sklony [13]. Dual-slope model je definován dle následujících vztahů (5) a (6) [11]:

$$L_{DS1}(d) = L_0 + 10n_1 \cdot \log(d), \quad d < d_{Br} \quad (5)$$

$$L_{DS2}(d) = L_0 + L_{DS1}(d_{Br}) + 10n_2 \cdot \log\left(\frac{d}{d_{Br}}\right), \quad d > d_{Br} \quad (6)$$

Kde n_1 reprezentuje útlumový index před bodem zlomu, n_2 útlumový index za bodem zlomu, d_{Br} je vzdálenost bodu zlomu a L_0 je útlum volným prostorem na vzdálenosti 1 metr.

5.2.4. Multi-wall model

Multi-wall model se zaměřuje speciálně na šíření signálu uvnitř budov, který definuje útlum signálu při šíření uvnitř budovy jako útlum ve volném prostranství s přidáním útlumem zdí a podlaží při šíření signálu napřímo.

$$L_{MW} = L_F + L_C + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1} - b\right]} \cdot L_f, \quad (7) [11]$$

L_F = útlum při šíření volným prostorem definovaný v kap. 7.2.1,

L_C = konstantní ztráty,

I = počet různých typů zdí

k_{wi} = počet zdí typu i , kterými vlna prochází

L_{wi} = útlum zdi typu i

k_f = počet podlaží, kterými signál prochází

b = empirický parametr

L_f = útlum mezi přilehlými podlažími.

5.2.5. Multi-wall-and-floor model

Multi-wall-and-floor model předpokládá, že každá zeď, resp. podlaží, skrz kterou prochází vlna, má odlišný útlum. Model je definován vztahem [11]:

$$L_{MWF} = L_{OS} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{k_{w1}} L_{w_{ik}} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{k_{fj}} L_{f_{jk}}, \quad (8)$$

L_{OS} = útlum daný modelem one-slope, definovaný v kap. 7.2.2

I = počet různých typů zdí

k_{wi} = počet zdí typu i , kterými vlna prochází

L_{wik} = ztráty způsobené průchodem k -té zdi typu i

J = počet různých typů podlaží

k_{fj} = počet podlaží typu j , kterými vlna prochází

L_{fjk} = ztráty způsobené průchodem k -tého podlaží typu j

6. Specifikace LPWAN sítí

Na trhu se vyskytuje několik firem nabízejících služby provozované na konceptu LPWAN sítí. Mezi nejhlavnější z nich patří LoRa, Sigfox a ke srovnání bude přidána také technologie IQRF, která byla vyvinuta v České republice skupinou IQRF Alliance. Všechny uvedené technologie pracují v bezlicenčním pásmu s rozdílnými modulacemi, propustností a dalšími parametry. Největší pozornost bude věnována technologii LoRa, která byla použita pro měření v praktické části této práce.

6.1. Technologie Sigfox

Sigfox je koncept LPWAN sítě, v současné době instalovaný v západní Evropě, San Franciscu a v testovacím provozu v Jižní Americe a Asii. Síť se zaměřuje na provoz zařízení s nízkou spotřebou energie, což umožňuje zařízením dlouhodobý provoz bez nutnosti doplňování energie. Při provozu sítě se počítá s občasným posíláním zpráv o malém množství dat, síť není vhodná pro přenos velkých datových objemů (multimédia, permanentní vysílání). Technologie umožňuje obousměrnou komunikaci, která je vždy iniciována koncovým zařízením. Síť je koncipována do topologie hvězdy.

Koncept používá modulaci UNB (Ultra-Narrow Band), která umožňuje provoz sítě s velkou kapacitou. Provoz probíhá na frekvencích bezlicenčního pásma (868 MHz pro Evropu a 902 MHz v USA). Každé zařízení vysílá signál v dostupném frekvenčním pásmu, který je detekován přijímací stanicí. Zprávy jsou následně přeposílány do webové aplikace a přístupné pomocí aplikací Sigfox. Každá zpráva je zabezpečena hash mechanismem a identifikována osobním klíčem, který je unikátní pro koncové zařízení.

Zařízení sítě Sigfox umožňují vyslat 12 bajtů v jedné zprávě, časová značka a identifikační číslo zařízení jsou řazeny zvlášť. Na zařízení se, dle evropské regulace pro bezlicenční pásma, vztahuje duty-cycle 1%, kdy každé zařízení může vysílat po dobu 1% vysílací hodiny. Jelikož vyslání jedné zprávy může trvat až 6 sekund, je povoleno, společně s omezením duty-cycle, vyslat maximálně 6 zpráv za 1 hodinu, tedy 144 zpráv denně. Ve zpětném kanále umožňuje síť vyslat 4 zprávy denně, každou s 8 bajty datového obsahu.

Pro připojení do sítě je třeba vlastnit vysílací zařízení kompatibilní s technologií Sigfox, platné povolení o připojení do sítě a nacházet se v pokrytém území. Cena modemového čipu se pohybuje řádově v jednotkách euro [14]. Dosah sítě je stanoven na 3 – 10 km v zastavěných oblastech a 30 – 50 km ve volném prostoru. Propustnost činí 100 b/s [15]. V prosinci roku 2016 je plánované pokrytí ČR na 95% území a 85% obyvatel [14].

6.2. Platforma IQRF

IQRF je platforma pro bezdrátově připojená zařízení s nízkou přenosovou rychlostí, malým objemem přenášených dat a nízkou spotřebou energie. Síť pokrývá signálem území o rozloze desítek až stovek metrů a slouží hlavně k přenosu naměřených dat od senzorů, dále k řízení systémů a automatizaci budov a měst. Komunikuje s jakýmkoliv elektrickým zařízením, které potřebuje zajistit bezdrátový přenos dat.

IQRF pracuje na konceptu paketově orientované komunikace v „mesh“ topologii sítě, kde jsou přenášená data doručována pomocí routování a předávání přes další zařízení zapojené do sítě. Tento koncept zvětšuje dosah sítě, její rozlehlost a schopnost nalezení náhradní cesty v případě přerušení vedení; až 240 hopů může být zařazeno v jedné síti. Sítě mohou být dále řetězeny a díky řetězení nabízí platforma nelimitované množství připojených zařízení [16]. I v případě routování si zařízení dokážou udržet nízkou spotřebu energie [16]. Vysílání probíhá v bezlicenčním frekvenčním pásmu 868 MHz, 916 MHz nebo 433 MHz. Výhodou IQRF je komplexní zajištění sítě od jedné firmy – dodání hardwarových prvků (vysílače, směrovače, přístupové body a další příslušenství), softwaru, protokolů, služeb a podpory. Získané informace mohou být uloženy na cloudovém úložišti. Pro implementaci sítě není vyžadováno žádných speciálních radiofrekvenčních přídavek, vývojářské kity jsou levné a software pro správu sítě je dodáván zdarma. Díky těmto parametrům si koncept sítě drží nízkou implementační a provozní cenu.

6.3. Technologie LoRa

6.3.1. LoRa

Název LoRa vyjadřuje zkratku pro Long Range, v překladu dlouhý dosah nebo rozsáhlé pokrytí. Rozsáhlé pokrytí je jeden z klíčových faktorů požadovaných po této technologii. Jedná se o bezdrátový systém, který zajistí spojení mezi senzorovými zařízeními a základnami, které přijímají jejich data. Bezdrátové spojení může dosáhnout citlivosti až -137 dBm, které napomáhá tzv. chirp modulace použitá na fyzické vrstvě této technologie. Jedná se o modulaci, která používá sinusovou křivku, jejíž okamžitá frekvence v čase lineárně vstoupá (Upchirp) nebo klesá (Downchirp). Rozprostřené spektrum této modulace využívá k vysílání signálu celou přidělenou šířku pásma a modulace je používána pro situace, kde se požadavky na pokrytí a přenosovou rychlost zásadně liší (v našem případě vysoké požadavky na rozsah pokrytí, avšak malé požadavky na přenosovou rychlost).

Technologie je provozována v bezlicenčním frekvenčním pásmu, jehož celosvětově uznávané hodnoty jsou 868 MHz pro Evropu, 915 MHz pro Severní Ameriku a 433 MHz pro Asii. Použití nižších frekvencí, než jsou frekvence v ISM pásmu – 2,4 GHz či 5,8 GHz, umožňuje lepší pokrytí, speciálně s překážkami uvnitř budov. Vzhledem k použití nízkých přenosových rychlostí (řádově jednotky až desítky kb/s) a nízkým požadavkům na přenos dat jsou pro přenos použity úzká pásma. Síť LoRa disponuje těmito šířkami pásma: 7,8 kHz; 10,4 kHz; 15,6 kHz; 20,8 kHz; 31,2 kHz; 41,7 kHz; 62,5 kHz; 125 kHz; 250 kHz a 500 kHz [17]. Šířka pásma je volena na základě množství přenášených dat a podmínek bezdrátového spojení.

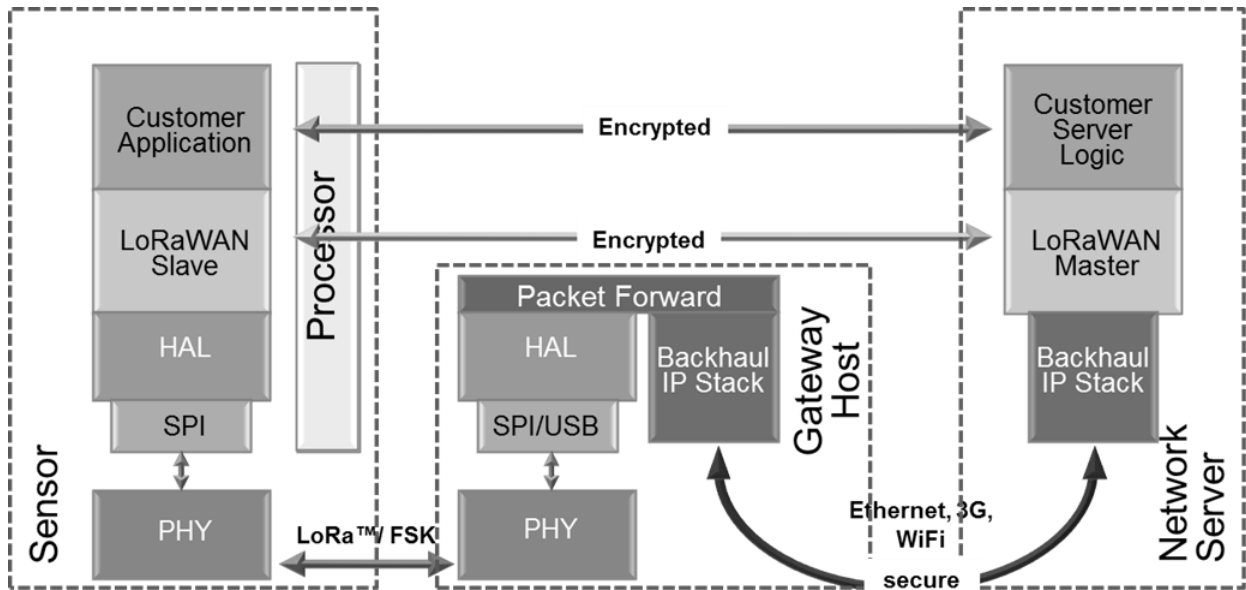
6.3.2. LoRaWAN

LoRaWAN označuje protokol na MAC vrstvě zajišťující připojení velkého množství zařízení, dlouhý dosah a nízkou spotřebu energie u koncových zařízení; obecně zajišťuje síť pro připojení LoRa senzorů. Jedná se o LPWAN standard, který je založen na technologii LoRa a využívá její vlastnosti a dále zlepšuje životnost baterií a kvalitu služby pro LoRa senzory. Protokol LoRaWAN zajišťuje přenos v obou směrech (od koncového zařízení – senzoru k přijímači – gateway a také od přijímače ke koncovému zařízení), čímž umožňuje spolehlivé doručení zpráv s potvrzením; přenos dat od senzoru k přijímači, tedy směr uplink, se však považuje za dominantní. Dále umožňuje šifrování dat pro zabezpečení, multicastové vysílání či vzdálenou aktivaci koncového zařízení [18].

Sítě LoRaWAN jsou obvykle hvězdicové topologie, ve kterých koncová zařízení – senzory vysílají své informace k přijímači, který je posléze předává dál na centrální webový server. Přijímače jsou připojeny k webovým serverům prostřednictvím IP síťového připojení, zatímco senzory používají zpravidla single-hop komunikaci, tedy senzory komunikují přímo s přijímači bez přítomnosti dalšího pomocného zařízení pro přenos dat.

Komunikace mezi koncovými zařízeními a přijímačem je rozdělena do odlišných frekvenčních kanálů s rozdílnými přenosovými rychlostmi. V zájmu snížení spotřeby energie a zvýšení kapacity sítě umožňuje Lora přizpůsobení přenosové rychlosti pro každé zařízení individuálně dle potřeby. Senzory mohou kdykoliv vysílat na jakémkoliv dostupném kanále s libovolnou přenosovou rychlostí za dodržení těchto podmínek:

- Koncové zařízení mění kanál v pseudonáhodném pořadí pro každé vysílání. Výsledná frekvenční odlišnost činí systém odolnější vůči rušením.
- Koncové zařízení respektuje maximální vysílací cyklus (duty cycle) vzhledem k používanému kanálu a místním nařízením.
- Koncové zařízení respektuje maximální povolenou dobu vysílání v souvislém čase vzhledem k používanému kanálu a místním nařízením.

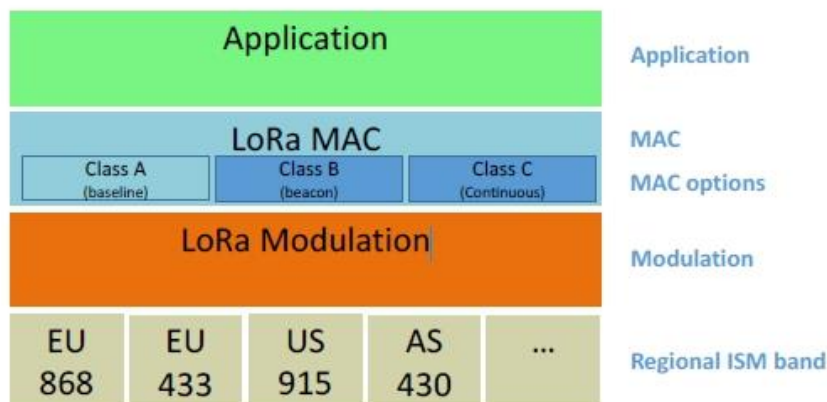


- *Customer Application* – použití senzoru, shromáždění dat
- *LoRaWAN Slave* – řízená jednotka senzoru pro komunikaci s přijímačem a zpracování kontrolních zpráv
- *HAL* – rozhraní zprostředkovávající komunikaci mezi softwarem a hardwarem zařízení
- *SPI/USB* – připojení zařízení přes sériový nebo USB port k fyzické vrstvě
- *PHY* – fyzická vrstva zařízení
- *Packet Forward* – software pro přeposílání přijatých paketů na webový server
- *Backhaul IP Stack* – zprostředkování připojení do sítě internet pomocí IP protokolu
- *LoRaWAN Master* – kontrolní jednotka příjmu zpráv a vysílání potvrzení k senzoru
- *Customer Server Logic* – aplikace na serveru umožňující přístup k uloženým datům
- *Spojení je šifrováno na úrovni několika vrstev (šifrování na aplikační vrstvě, šifrování na síťové vrstvě).*

Obrázek 6-1 Schéma přenosu dat od senzoru na webový server [28]

6.3.2.1. Třídy sítě LoraWAN

Síť Lora se dělí celkem do tří tříd, označených A, B a C. Každé zařízení musí disponovat alespoň kompatibilitou se třídou A, dále může nabízet rozšíření implementace o třídy B a C. Všechny tři třídy umožňují komunikaci zařízení oběma směry, tedy od koncového zařízení k přijímači a od přijímače ke koncovému zařízení.



Obrázek 6-2 Přehled vrstev technologie LoRa [20]

Zařízení třídy A umožňují obousměrnou komunikaci vždy, když jsou odesílána data od koncového zařízení směrem k přijímači. Po odeslání dat je otevřen kanál pro zaslání dvou krátkých zpráv od přijímače ke koncovému zařízení. Frekvence přenosu závisí na vysílacích potřebách koncového zařízení. Tato komunikační třída disponuje nejnižší spotřebou energie u koncových zařízení a je vhodná pro systémy, kde koncovým zařízením postačí přijetí zprávy ze serveru po odeslání vlastních dat. Jakákoliv další komunikace ze serveru směrem k zařízení musí vyčkat na další vyslání dat.

Zařízení třídy B otevírají komunikační kanál pro příjem zpráv ze serveru v pravidelných časových intervalech. Toto pravidelné naslouchání je přidáno navíc ke způsobu komunikace, který již umožňuje zařízení třídy A. Aby zařízení věděla, kdy mají očekávat zprávy ze serveru, udržují časovou synchronizaci s přijímačem. Díky tomu server ví, kdy je zařízení připraveno přijímat.

Oproti dvěma předchozím třídám zařízení třídy C nabízí neustálou připravenost pro příjem zpráv ze serveru. Jediný okamžik, kdy není možné přijímat zprávy ze serveru je při odesílání dat z koncového zařízení. Zařízení této třídy vyžadují větší spotřebu energie ve srovnání s předchozími, nabízí však nejrychlejší odezvu při požadavku o komunikaci ze serveru.

6.3.2.2. Komunikace zařízení třídy A

Obousměrná komunikace probíhá na bázi vyslání dat směrem k bráně (gateway) a následném otevření dvou přijímacích oken pro komunikaci ze serveru ke koncovému zařízení, prostřednictvím brány. Otevření prvního přijímacího okna je načasováno vždy krátce po ukončení vysílání od koncového zařízení a po uběhnutí prodlevy, která je pro první okno v evropském bezlicenčním pásmu EU 863 – 870MHz doporučena na dobu 1 sekunda. Prostor pro přijímací okno je definován časem, kdy zařízení nevysílá. První přijímací okno využívá stejný frekvenční kanál, který byl využit při vysílání a rychlost přenosu dat, která je funkcí rychlosti použité při vysílání. Zpravidla bývá rychlost přenosu dat ve směru od přijímače stejná jako ve směru k přijímači.

Druhé přijímací okno je otevíráno po uzavření prvního okna a po uběhnutí časové prodlevy, jejíž doporučená hodnota činí dobu 2 sekundy (1 sekunda pro první přijímací okno + 1 sekunda pro druhé přijímací okno). Pro příjem dat je zde používána fixně nastavená frekvence a rychlost přenosu dat. Frekvence a rychlost přenosu dat mohou být nastaveny prostřednictvím MAC příkazů. Výchozí hodnoty pro MAC příkazy v evropském bezlicenčním pásmu EU 863 – 870MHz stanovují frekvenci 869,525 MHz a rychlost přenosu dat DR0 (datarate), disponující spreading faktorem SF12 a šířkou pásma 125 kHz. Jednotlivé možnosti DR (datarate) budou rozebrány v další kapitole.

Přijímací okno koncového zařízení musí být otevřeno dostatečně dlouho, aby bylo zařízení schopno zachytit alespoň preambuli přijímané zprávy. Preambule zprávy vyslané od brány směrem ke koncovému zařízení obsahuje 8 symbolů. Koncové zařízení vyžaduje příjem alespoň 5 symbolů, aby mohlo dojít k synchronizaci, proto je třeba dosáhnout překryvu alespoň 5 symbolů přijímané preambule a otevřeného přijímacího okna. Brána zahajuje vysílání preambule zpětné zprávy 1 sekundu (s nepřesností ± 20 mikrosekund) po přijetí celé zprávy od koncového zařízení [19]. Nastavení jednotné časové prodlevy slouží ke snížení spotřeby energie koncového zařízení, které se po ukončení relace přijímacích oken uvede do režimu spánku, pokud není potřeba dalšího vysílání. Je-li v průběhu otevření přijímacího okna zachycena preambule přijímaného rámce, přijímač zůstane aktivní po dobu nutnou k přijetí celého datového rámce. Přijme-li koncové zařízení celou zprávu po dobu otevření prvního přijímacího okna a zpráva je určena pro toto zařízení, druhé vysílací okno se neotevírá.

Pokud server vyžaduje komunikaci se zařízením, musí vždy iniciovat vysílání ve zprávě poslané do jednoho ze dvou přijímacích oken v předchozí komunikaci. Koncové zařízení nesmí vyslat další zprávu, dokud neobdrží potvrzovací zprávu od brány, nebo nevyprší-li relace obou přijímacích oken.

6.3.2.3. Fyzická vrstva technologie LoRa

Využití bezlicenčního pásma a jeho alokace je v Evropě definována Evropským telekomunikačním institutem ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Jednotlivé kanály frekvenčního pásma mohou být volně distribuovány provozovatelem sítě. V každém koncovém zařízení, provozovaném ve frekvenčním pásmu EU868MHz, by měly být implementovány kanály na frekvencích 868,10 MHz; 868,30 MHz; 868,50 MHz, s šířkou pásma 125 kHz, rychlostí datového přenosu 0,3 – 5 kb/s a duty cyclem menším než 1%. Na těchto kanálech by měla každá brána v základním nastavení naslouchat. Kanály zajišťují minimální společný překryv mezi spektrem kanálů koncových zařízení a spektrem kanálů bran a měly by být neměnné.

Koncová zařízení pracující ve frekvenčním pásmu EU868MHz by měla být schopna provozu na frekvencích 863 – 870 MHz a měla by umožňovat práci s parametry alespoň pro 16 různých kanálů. Parametry kanálu obsahují frekvenci, které kanál náleží a mód, pomocí kterého lze na daném kanále vysílat.

Následující tabulka popisuje jednotlivé přenosové módy s jejich modulacemi, SF (spreading faktorem), šířkou pásma a přenosovou rychlostí.

DataRate (Mód vysílání)	Modulace	Faktor šíření (SF)	Šířka pásma [kHz]	Orientační datový tok [bit/s]
0	LoRa	SF 12	125	250
1	LoRa	SF 11	125	440
2	LoRa	SF 10	125	980
3	LoRa	SF 9	125	1760
4	LoRa	SF 8	125	3125
5	LoRa	SF 7	125	5470
6	LoRa	SF 7	250	11000
7	FSK: 50 kb/s			50000

Tabulka 6-1 Přehled vysílacích režimů technologie LoRa [20]

Zařízení umožňují vysílat na několika výkonnostních úrovních, jak je uvedeno v další tabulce.

Mód	Vysílací výkon [dBm]
0	20
1	14
2	11
3	8
4	5
5	2

Tabulka 6-2 Přehled povolených vysílacích výkonů technologie LoRa [20]

MAC vrstva zajišťuje propojení mezi linkovou a fyzickou vrstvou, zajišťuje přístup linkové vrstvy ke sdílenému fyzickému přenosovému médiu. MAC vrstva technologie LoRa zajišťuje následující služby:

- K serveru, na který jsou odesílána data, je možné připojit neomezený počet bran, které nadále odesílají data na server prostřednictvím IP technologie.
- Komunikace probíhá s fixními, ale také s mobilními senzory (koncovými zařízeními). Lora nevyžaduje, aby koncová zařízení komunikovala pouze s danou, dopředu nadefinovanou bránou.
- Mezi koncovými zařízeními a branami je umožněna buď jednosměrná komunikace (uplink), nebo komunikace oběma směry (uplink a downlink).
- Na požadavek lze aktivovat potvrzení přijetí zprávy zpět vysílači, tato služba však není povinná.
- Možnost přizpůsobení vysílacího výkonu a rychlosti přenosu dat každého koncového zařízení separátně (ADR – adaptive data rate) za účelem zvýšení kapacity sítě a snížení spotřeby energie.
- Rychlá a předem definovatelná odezva koncových zařízení na požadavky od serveru a bran. Rychlost odezvy se odvíjí v závislosti na použitém typu komunikace.
- Nízká a předem odhadnutelná spotřeba energie díky použití hvězdicové topologie, kde si koncová zařízení neposílají data prostřednictvím jeden druhého.

6.3.2.4. Kontrola dostupnosti kanálu

Evropský telekomunikační institut ETSI stanovuje pravidla o přístupu ke sdílenému fyzickému médiu a v rámci těchto pravidel stanovuje maximální vysílací dobu nebo časovou prodlevu mezi opakováním vysílání. V rámci pravidel institutu ETSI je možné využít duty-cycle kontrolu, nebo LBT AFA (Listen Before Talk Adaptive Frequency Agility). Adaptive Frequency Agility je technika, při které zařízení soustavně monitorují jejich okolní prostředí a zaznamenávají, které kanály jsou používány. Na základě této informace volí, na kterém kanále se bude vysílat. Tato technika se běžně kombinuje s technikou Listen Before Talk, kdy zařízení nejdříve naslouchají na kanále, na kterém chtějí vysílat, vyhodnocují, zda je kanál volný a poté, pokud kanál volný je, zahájí vysílání. Kontrola duty-cycle je definována jako hodnota vyjadřující procentuální podíl z vysílací periody, kdy je zařízení aktivní.

Technologie LoRaWAN uplatňuje pro kontrolu dostupnosti kanálu techniku duty-cycle. Po každé, když je vyslán datový rámec v daném pásmu, zaznamená se doba vysílání a doba přenosu zprávy. Na základě těchto informací a na základě stanovené hodnoty duty-cycle pro daný sub-kanál je dle následujícího vzorce vypočítána doba, po kterou nesmí být na daném sub-kanále znovu vysíláno.

$$\text{čas [s]} = \frac{\text{doba trvání přenosu rámce [s]}}{\text{duty-cycle pro daný kanál [\%]}} - \text{doba trvání přenosu rámce [s]} \quad (9)$$

V době, kdy zařízení z důvodu kontroly duty-cycle nesmí vysílat na daném sub-kanále, může vysílat na sub-kanále jiném, pokud by nebyl žádný sub-kanál dostupný, zařízení musí počkat na jeho uvolnění.

6.3.2.5. Formát uplink a downlink zprávy

Uplink zprávy jsou vysílány koncovými zařízeními na server prostřednictvím jednoho nebo více přijímačů. Zprávy na fyzické vrstvě se skládají z preambule, hlavičky zprávy (PHDR), hlavičky CRC (PHDR_CRC), přenášených dat (PHYPayload) a CRC, zajišťující správnost doručených dat. Pole obsahující hlavičku zprávy, hlavičku CRC a CRC jsou přidány automaticky vysílačem v koncovém zařízení.

Downlink zprávy jsou vysílány ze serveru konkrétnímu koncovému zařízení prostřednictvím jedné brány. Stejně jako uplink zprávy mají definovanou pevnou strukturu,

kteřá obsahuje preambuli, hlavičku zprávy (PHDR), hlavičku CRC (PHDR_CRC) a vlastní data (PHYPayload), neobsahují však pole s CRC kódem.

Pole PHYPayload (na úrovni MAC vrstvy), obsažené v každé Uplink a Downlink zprávě, disponuje také pevně definovanou strukturou, která obsahuje MAC hlavičku (MHDR), datový obsah (MAC Payload) a MIC (message integrity code – ověření věrohodnosti a správnosti zprávy). MAC hlavička nese údaje o typu zprávy. Technologie LoRaWAN umožňuje 6 různých typů zpráv:

- Join request (požadavek o připojení do sítě – použito při módu over-the-air activation)
- Join accept (potvrzení o připojení do sítě - použito při módu over-the-air activation)
- Unconfirmed data up (odeslání dat od koncového zařízení k bráně bez požadavku o potvrzení)
- Unconfirmed data down (příjem dat od brány bez požadavku o potvrzení)
- Confirmed data up (odeslání dat od koncového zařízení k bráně s požadavkem o potvrzení)
- Confirmed data down (příjem dat od gateway s požadavkem o potvrzení)

Datová zpráva umožňuje jak přenos MAC příkazů (nesou provozní informace pro zařízení a informace o typu zprávy), tak přenos aplikačních dat společně v jedné zprávě.

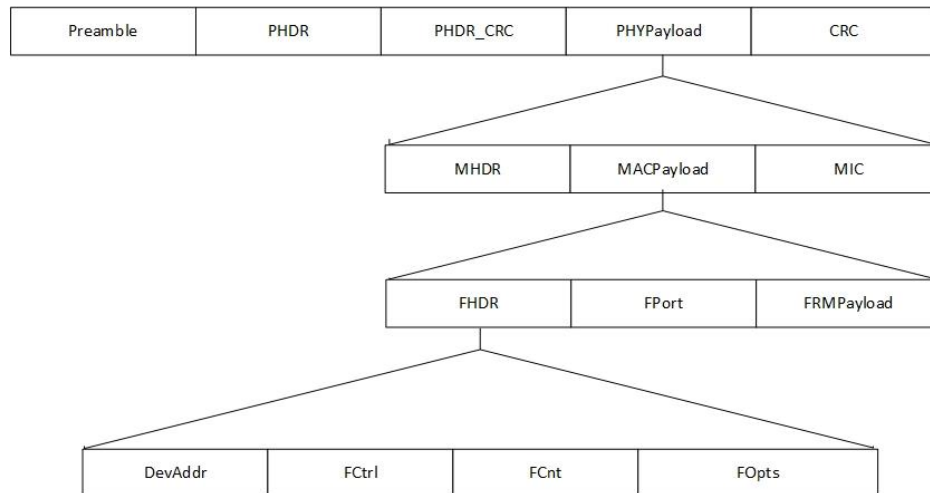
Pole MAC Payload, jinak nazýváno také jako datový rámec, obsahuje hlavičku datového rámce (FHDR), dále volitelné pole FPort, které indikuje, jaká data jsou přenášena. Pokud zpráva obsahuje datový obsah, pole FPort nesmí být prázdné. V případě, že jsou obsaženy pouze MAC příkazy, je hodnota FPort nastavena na 0, hodnoty 1 – 233 jsou pak použity pro aplikační účely a hodnoty 224 – 225 rezervovány pro budoucí rozšíření. Dále je v poli MAC Payload obsaženo volitelné pole pro vlastní aplikační data (FRMPayload). Maximální množství dat, které je možné přepravovat v MAC Payloadu jedné zprávy je uvedeno v tabulce níže. Přesná kapacita pro datový obsah se může lišit v závislosti na počtu MAC příkazů.

DataRate	Maximální velikost pole MACPayload (byte)
0	59
1	59
2	59
3	123
4	230
5	230
6	230
7	230
8 - 15	nedefinováno

Hlavička datového rámce (FHDR) obsahuje adresu koncového zařízení (DevAddr), dále pole FCtrl, FCnt a FOpts. Pole FCtrl nastavuje ADR (Adaptive Data Rate), které umožní přizpůsobit přenosovou rychlost nejlepším požadavkům sítě, čímž lze zvýšit životnost baterie a kapacitu sítě. Pokud je koncové zařízení pomocí ADR vyzváno k použití vyšší přenosové rychlosti, než je výchozí pro toto zařízení, je třeba, aby bylo neustále kontrolováno, že síť stále přijímá zprávy od tohoto zařízení. Tato kontrola je prováděna pomocí funkcí ADR_ACK_CNT (address acknowledgement counter), která čísluje každou nově odeslanou zprávu a ADR_ACK_LIMIT, která stanovuje, jaké maximální hodnoty může ADR_ACK_CNT dosáhnout. Je-li této hodnoty dosaženo a není-li mezitím přijata žádná odpověď, nastaví se v poli FCtrl bit ADRACKReq vyžadující odpověď od brány v čase stanoveném funkcí ADR_ACK_DELAY. V případě, že downlink rámec v pořádku dorazí, ADR_ACK_CNT je resetován. V případě potřeby zaslání potvrzovací zprávy, umožňuje FCtrl nastavení bitu ACK a zpráva je nadále považována za potvrzení. V případě, že ACK zpráva nedorazí, když je vyžadována, koncové zařízení opakuje vysílání. V případě dosažení maximálně stanoveného počtu opakování se zařízení pokusí o snížení přenosové rychlosti a zvýšení faktoru šíření. Nedostane-li žádnou odezvu z koncového zařízení při vysílacím směru od brány, je koncové zařízení považováno za nedostupné, dokud samo nevyšle zprávu.

Frame Pending bit (FPending) je nastaven v případě, že brána potřebuje předat koncovému zařízení více informací. Zpráva s takto nastaveným bitem je přijata koncovým zařízením v jednom z přijímacích oken a bit určuje požadavek na co nejrychlejší vyslání další zprávy z koncového zařízení směrem k bráně a možnost další komunikace ve směru od brány ke koncovému zařízení.

Pole FOpts uchovává MAC příkazy, jsou-li zadány. MAC příkazy nesou informaci o parametrech spojení, nebo tyto parametr mění.



Obrázek 6-3 Struktura datové zprávy ve směru uplink, pro downlink bez pole CRC

6.3.2.6. Připojení zařízení do sítě

Zařízení mohou být připojena do sítě na dálku (OTAA – Over-The-Air-Activation), kdy musí dojít k nastavení identifikačních hodnot zařízení a poté k jeho aktivaci, nebo přímým připojením (ABP – Activation by Personalization), kdy nastavení identifikačních hodnot a aktivace proběhnou v jednom kroku. Poté, co je zařízení aktivováno pomocí OTAA, nese v sobě následující identifikační informace.

- Adresa zařízení (DevAddr – device address), skládající se z 32 bitů, identifikuje zařízení v síti a současně oznamuje, do které sítě zařízení patří.
- Aplikační identifikátor (AppEUI – application identifier) identifikuje poskytovatele aplikace, popř. majitele koncového zařízení.
- Identifikátor zařízení (DevEUI – device identifier) slouží jako unikátní globální identifikátor koncového zařízení.
- Síťový relační klíč (NwkSKey – network session key) je užit koncovým zařízením i serverem a slouží ke kalkulaci a ověření MIC kódu všech datových zpráv, aby zajistil jejich věrohodnost. Souží k šifrování a dešifrování dat MAC zpráv.
- Aplikační relační klíč (AppSKey – application session key) je užit koncovým zařízením i serverem a slouží k šifrování a dešifrování dat aplikačních zpráv. Slouží také ke kalkulaci přibližné úrovně MIC kódu, který má být uložen v datovém obsahu aplikačních zpráv.

Před tím, než může být zařízení připojeno do sítě, je třeba, aby mělo definovanou jedinečnou adresu (DevAddr), nastavený aplikační identifikátor (AppEUI) a aplikační klíč (AppKey – application key). AppKey je aplikační klíč podle specifikace AES-128, který je dodán koncovému zařízení od majitele aplikace. Pokaždé, když se zařízení připojí do sítě

prostřednictvím OTAA, AppKey odvodí síťový relační klíč (NwkSKey) a aplikační relační klíč (AppSKey), specifické pro konkrétní koncové zařízení a sloužící k ověření síťové komunikace a šifrování aplikačních dat. Samotné připojení proběhne, na žádost koncového zařízení, vysláním požadavku o připojení (join request) a potvrzením o připojení (join accept). Je-li žádost o připojení do sítě neúspěšná, není koncovému zařízení odeslána žádná zpráva.

V případě přímého připojení (Activation by Personalization) jsou v zařízení již při startu definovány parametry: adresa zařízení (DevAddr), aplikační relační klíč (AppSKey) a síťový relační klíč (NwkSKey), identifikátor zařízení (DevEUI), aplikační identifikátor (AppEUI) a aplikační klíč (AppKey) v zařízení uloženy nejsou.

Každé zařízení by mělo obsahovat originální aplikační relační a síťový relační klíč. Klíče by neměly být generovány na základně veřejně dostupných informací, jako je např. adresa koncového zařízení. [20]

7. Měření útlumu signálu technologie LoRa

Součástí této práce byl návrh a provedení měření LPWAN sítě LoRa v panelovém domě typu BP 70 OS, na sídlišti v Praze – Čimicích. Pro měření bylo použito konceptu sítě LoRaWAN, vytvořené mezi vysílacím koncovým zařízením a základnou – LoRa gateway. Zařízení používána pro měření byla zapůjčena od fakulty elektrotechnické, ČVUT v Praze. Měření bylo prováděno v panelovém domě se šesti nadzemními podlažími a sedmi oddělenými vchody. Na každém nadzemním podlaží se nachází tři bytové jednotky. Vysílač v podobě USB přípojky byl připojen k notebooku a tímto způsobem mobilní. Signál byl postupně vysílán z každého ze šesti nadzemních podlaží, vždy ze stejné pozice na schodišti, dále z úrovně ulice, od vchodových dveří a ze sklepení v každém vchodě. Každý vchod zahrnoval osm vysílacích pozic.



Obrázek 7-1 Foto měřeného panelového domu v Praze Čimicích

Měření bylo prováděno na základě vyslání deseti zpráv z každého vysílacího místa, které obsahovaly originální identifikační číslo základny, na které byla zpráva přijata, originální identifikační číslo koncového zařízení, z kterého byla zpráva vyslána, datum a čas přijetí, výpis datového obsahu v podobě zakódovaných a nezakódovaných dat, frekvenci, na které vysílání probíhalo, typ vysílání zahrnující informaci o šířce frekvenčního pásma a rychlosti přenosu dat (bit rate), úroveň přijatého signálu (RSSI) a úroveň odstupe signálu od šumu (SNR). Zprávy přijaté na LoRa gateway byly následně ihned přeposílány na server The Things Network, kde

byly ukládány a pod příslušným identifikačním číslem vysílacího zařízení dohledávány. Jednotlivé zprávy byly z vysílacího zařízení odesílány v intervalu deseti sekund a na každém vysílacím místě byl zadáván nový datový obsah. Rozdíl v obsažených datech napomáhal k identifikaci vysílacího místa při vyhodnocování výsledků.

7.1. Použité pomůcky k měření

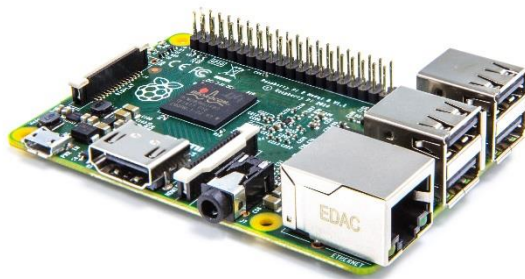
Pro provedení měření bylo použito těchto pomůcek

1. 2x počítač (notebook)
2. Raspberry Pi 2, model B V1.1
3. Koncentrátor WiMOD iC880A s čipem SX1301
4. USB připojitelný LoRa vysílač a přijímač IMST iU880A
5. Mobilní telefon Samsung Galaxy Ace s připojením k internetu
6. Wifi Router Belkin, model F6D4230-4 v1
7. USB kabel
8. 2x UTP kabel s koncovkou RJ-45
9. 3x napájecí zdroj



Obrázek 7-2 Zařízení použitá k měření

7.1.1. Raspberry Pi 2, model B V1.1



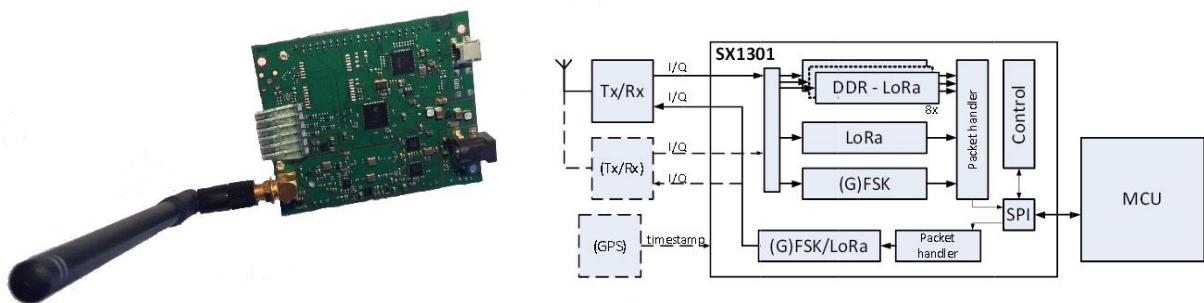
Obrázek 7-3 Raspberry Pi 2, model B V1.1

Raspberry Pi je počítač malých rozměrů, který umožňuje připojení ovládacích rozhraní (klávesnice, myš), zobrazovacích zařízení (monitor či TV), paměťových úložišť, nebo je možné samotné zařízení připojit do sítě prostřednictvím Ethernetu. Zařízení je schopno vykonávat procesy stejného typu jako desktopový počítač, úměrné svému hardwarovému vybavení.

- Procesor 900MHz quad-core ARM Cortex-A7
- RAM 1GB
- 4x USB port
- 40 GPIO pinů
- HDMI port
- Ethernetový port
- Kombinovaný 3,5mm audio jack a video
- Kamerové rozhraní (CSI)
- Zobrazovací rozhraní (DSI)
- Slot na micro SD kartu
- 3D grafické jádro VideoCore IV

Na zařízení je spuštěn operační systém Raspbian GNU/Linux 8 (jessie) [21].

7.1.2. Koncentrátor WiMOD iC880A s čipem SX1301



Obrázek 7-4 Koncentrátor WiMOD iC880A a schéma čipu SX1301

iC880A je multikanálový vysílač/přijímač operující ve frekvenčním pásmu 868 MHz a navržený pro příjem několika paketů zároveň užívající různé faktory šíření na různých frekvenčních kanálech. Koncentrátor potřebuje pro svoji činnost hostující systém, kterým je např. PC a ke kterému může být připojen prostřednictvím USB nebo SPI. Zařízení umožňuje demodulaci na 10 paralelních demodulačních cestách IF0 až IF9, z nichž devět slouží k demodulaci LoRa signálu a jedna slouží k demodulaci FSK signálu.

Demodulační kanály IF0 až IF7 disponují fixně nastavenou šířkou pásma 125 kHz, frekvence každého kanálu může být zvlášť konfigurována. Na každém kanále lze přijímat signál s libovolným faktorem šíření a bitovou rychlostí, zařízení umožňuje příjem několika paketů zároveň, maximálně však 8, které mohou být vyslány s odlišným faktorem šíření a bitovou rychlostí. Kanály jsou zamýšleny pro obsluhu masivních sítí hvězdicové topologie obsahujících desetitisíce vysílačů zařízení. Každé zařízení může vysílat s libovolným faktorem šíření a bitovou rychlostí a využít libovolný kanál. Čip SX1301 kontinuálně skenuje daných 8 kanálů a reaguje na případný příjem preamble přicházející datové zprávy.

Kanál IF8 a operuje na jakékoliv z povolených frekvencí. Šířka pásma tohoto kanálu může být nastavena na 125, 250, nebo 500 kHz, faktor šíření a bitová rychlost mohou být konfigurovány na jakékoliv z dostupných hodnot. Tento kanál však přijme pouze zprávy odpovídající předem nakonfigurovanému vysílacímu módu (faktor šíření a bitová rychlost). Kanál slouží převážně k vysokorychlostní komunikaci s dalšími přístupovými bránami nebo jinou infrastrukturou sítě.

Kanál IF9 je připojen na GFSK demodulátor. Šířka pásma a bitová rychlost mohou být přizpůsobeny, demodulátor umožňuje vysokou úroveň nastavitelnosti. Kanál umožňuje demodulaci FSK nebo GFSK signálu.

Zařízení je napájeno napětím 5V , umožňuje vysílací výkon do 20 dBm a nabízí pokrytí do 15 km na přímou viditelnost. Pro určení polohy může být připojen GPS přijímač. Citlivost zařízení je v rozsahu od -120 dBm do -137 dBm v závislosti na použité šířce pásma a faktoru šíření, pro kanály IF0 až IF7 se citlivost pohybuje v rozmezí -126 až -137 dBm v závislosti na faktoru šíření. [22]

7.1.3. LoRa vysílač a přijímač IMST iU880A



Obrázek 7-5 LoRa vysílač a přijímač IMST iU880A

IMST iU880A je USB připojitelný vysílač umožňující vysílání LoRa nebo LoRaWAN paketů v závislosti na implementovaném firmwaru v zařízení. Zařízení je ovládáno prostřednictvím rozhraní WiMOD LoRaWAN EndNode Studio pro LoRaWAN nebo WiMOD LR Studio pro LoRa. Zařízení komunikuje s hostujícím PC pomocí virtuálního sériového portu, instalovaném na USB portu. Zařízení je napájeno z USB napětím 5V, jeho maximální vysílací výkon činí 20 dBm.

Při použití technologie LoRa a studia WiMOD LR Studio nabízí zařízení:

- nastavení radiového vysílání (volba frekvenčního pásma, volba nosné frekvence, šířky pásma a faktoru šíření)
- integrovaný test radiového spojení mezi dvěma zařízeními pomocí měření ztrátovosti paketů
- vyslání nebo příjem paketů
- detekování paketů pro monitoring komunikace mezi dalšími WiMOD LR zařízeními, kdy zařízení zaznamenává všechny přijaté zprávy
- použití sensorových aplikací s předem nakonfigurovanými testovacími hodnotami
- časovou synchronizaci s PC

Při použití technologie LoRaWAN a studia WiMOD LoRaWAN EndNodeStudio nabízí zařízení

- nastavení rádiového vysílání (volba frekvenčního pásma, vysílacího výkonu a vysílacího módu obsahujícího faktor šíření, šířku pásma a bitovou rychlost)
- přímou aktivaci zařízení (ABP – Activation by Personalization)
- aktivaci zařízení na dálku (OTAA – Over the Air Activation)
- kódování a kontrola důvěryhodnosti zprávy
- vysílání MAC příkazů nebo aplikačních dat
- vysílání dat bez požadavku potvrzení
- vysílání dat s požadavkem o potvrzení
- pravidelné vysílání zprávy s daným datovým obsahem v závislosti na předem nastaveném časovém intervalu
- příjem dat, zahrnující potvrzovací zprávy nebo požadavky brány o další komunikaci
- přizpůsobení datového toku (ADR – Adaptive Data Rate)
- duty-cycle kontrolu
- provoz v režimu komunikační třídy A nebo C
- nastavení pracovního módu (aplikační, uživatelský)
- vícepásmové vysílání
- časovou synchronizaci s PC

7.2. Postup měření

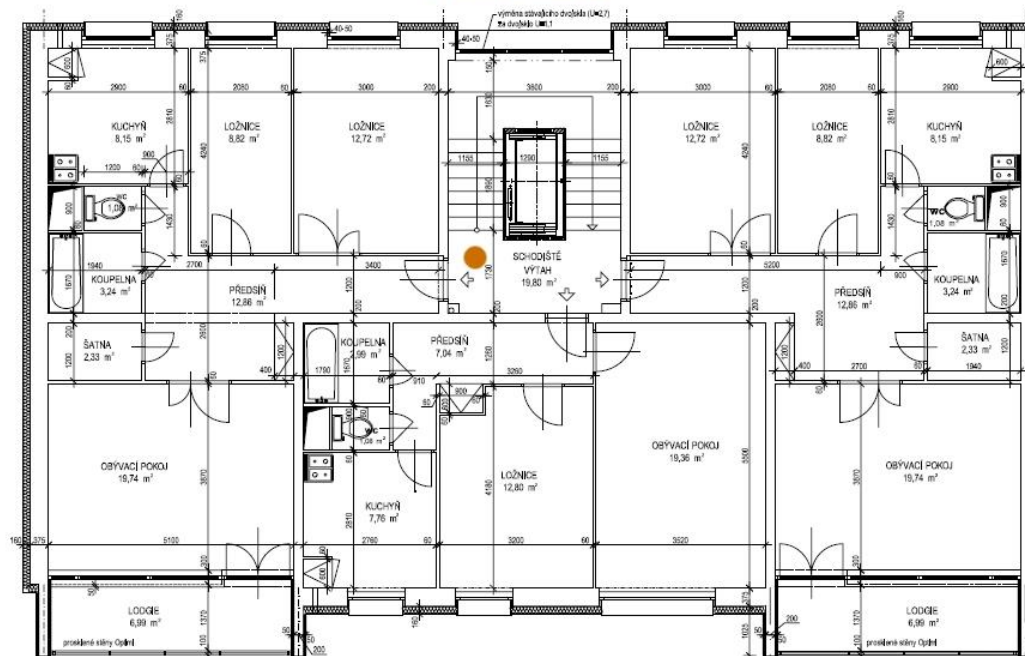
7.2.1. Měřicí pracoviště

Měření probíhalo ve dvou etapách. V první etapě byl přijímač WiMOD iC880A umístěn ve sklepních prostorách vprostřed celé budovy, ve druhé etapě byl přijímač umístěn na střeše, opět v prostřední části budovy, jak je uvedeno na obrázku.



Obrázek 7-6 Podélný řez budovy se znázorněnými vysílacími a přijímacími místy

Vysílací místo



Obrázek 7-7 Detail podlaží vchodového bloku se zakresleným vysílacím místem

Vysílací místo se nacházelo na každém podlaží v sedmi vchodech, zahrnující sklepení a prostor u vchodových dveří. V domě se tedy vysílalo z 56 různých míst. Z každého vysílacího místa bylo odesláno 10 zpráv.

Přijímač byl připojen k Raspberry Pi prostřednictvím GPIO pinů. Zařízení Raspberry Pi pak bylo připojeno do sítě Internet, kudy přeposílalo přijaté pakety na server `croft.thethings.girovito.nl`. Pakety odeslané na server byly následně dostupné pomocí aplikace The Things Network, na adrese:

https://thethingsnetwork.org/api/v0.1/nodes/{node_eui}, v případě našeho zařízení se jednalo o `node_eui 02033610`.

Brána odesílala na server v pravidelném intervalu 30 sekund zprávy o svém statusu a počtu přeposlaných paketů. Zprávy o statusu brány bylo možné dohledat pomocí aplikace na serveru The Things Network, na adrese

https://thethingsnetwork.org/api/v0.1/gateways/{gateway_eui}, v případě našeho zařízení se jednalo o `gateway_eui 0203360000000001`.


```
[{"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":0,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:12:31.603Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0}, {"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":1,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:12:01.744Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0}, {"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":0,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:11:33.188Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0}, {"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":1,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:11:02.981Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0}, {"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":0,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:10:33.169Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0}, {"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":0,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:10:03.287Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0}, {"longitude":14.39316,"eui":"0203360000000001","datagramssent":0,"rxok":0,"rxforwarded":0,"rxcount":0,"ackratio":0,"time":"2016-04-26T09:09:31.731Z","latitude":50.10274,"altitude":298,"datagramsreceived":0},
```

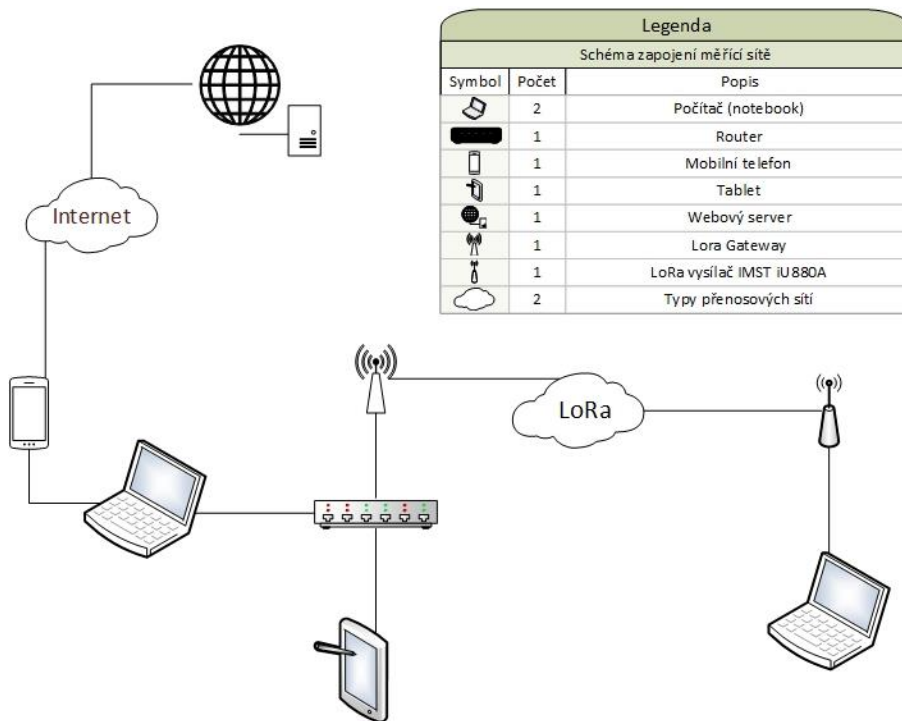
Obrázek 7-8 Pravidelně odesílané informace o stavu brány

7.2.2. Zapojení měřicích zařízení

Zařízení WiMOD iC880A, připojené na Raspberry Pi, umožňuje přeposílat pakety na server, pro tuto službu vyžaduje připojení k internetu. Pro záruku připojení k internetu na všech potřebných místech bylo použito připojení k internetu prostřednictvím datových služeb mobilního telefonu. Internetové připojení bylo pomocí počítače sdíleno do vytvořené lokální sítě, do které bylo zároveň připojeno zařízení WiMOD iC880A prostřednictvím Raspberry Pi a použitím ethernetového kabelu. Raspberry Pi komunikuje s kontrolním počítačem přes protokol SSH, proto bylo třeba, aby byla obě zařízení, Raspberry Pi a PC 1 (notebook), připojena do stejné lokální sítě. Router Belkin byl nastaven do režimu Acces Point a připojen ethernetovým kabelem k PC 1. Na PC 1 byla spuštěna služba DHCP a tento počítač byl zodpovědný (také jakožto poskytovatel připojení k internetu) za přidělení IP adres ostatním zařízením. Z důvodu obtížné fyzické dostupnosti zařízení v druhé etapě měření (střecha) byl pro ověřování přijatých dat použit tablet, připojený do vytvořené lokální sítě prostřednictvím Wifi.

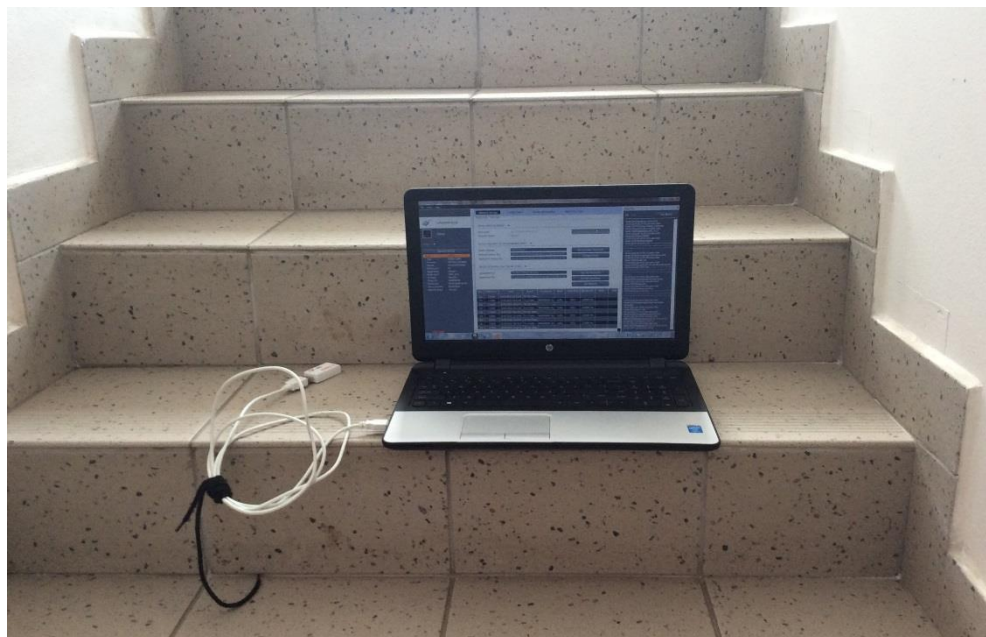


Obrázek 7-9 Měřicí pracoviště s koncentrátorem WiMOD iC880A pro příjem paketů



Obrázek 7-10 Schéma zapojení stanoviště pro příjem paketů

PC 2 (notebook) sloužil jako hostující zařízení pro vysílač IMST iU880A, které bylo připojeno prostřednictvím USB kabelu. Prodlužovací USB kabel byl použit pro lepší nasměrování vysílacího zařízení, jelikož toto zařízení nedisponovalo přidavnou externí anténou.



Obrázek 7-11 Měřicí stanoviště s IMST iU880A pro vysílání paketů

7.2.3. Nastavení měřicích zařízení

7.2.3.1. LoRa vysílač a přijímač IMST iU880A

Zařízení ISMT iU880A bylo konfigurováno prostřednictvím studia WiMOD LoRaWAN EndNodeStudio. Vysílací výkon byl nastaven na maximální hodnotu 20 dBm. Vysílací mód byl, za účelem lepšího pokrytí signálu, nastaven na hodnotu DR (data rate) = 0, tedy faktor šíření 12, šířka pásma 125 kHz, přenosová rychlost 250 b/s. Zvoleno bylo evropské bezlicenční pásmo EU 868 MHz. Zařízení bylo aktivováno pomocí ABP (Activation by Personalization), adresa zařízení, síťový relační klíč a aplikační relační klíč byly již přednastaveny. Datový obsah zpráv sloužil k identifikaci vysílacího místa při vyhodnocení a s vysílacím místem se měnil jeho obsah, velikost datového obsahu činila 18 bajtů. Na každém vysílacím místě bylo vysláno 10 zpráv bez požadavku o potvrzení. Záznam o odeslaných zprávách byl ukládán do textového souboru.

No.	COM Port	Time	Event	Frequency	Mod	Data Rate	Bandwidth	RSSI	SNR
1	COM3	26.04.2016 11:...	Tx U-Dat...	868100000...	LoRa	SF9	125000 Hz		
2	COM3	26.04.2016 11:...	Rx No-Da...						

Obrázek 7-12 WiMOD LoRaWAN EndNodeStudio - správa provozu sítě

7.2.3.2. Koncentrátor WiMOD iC880A s čipem SX1301

Koncentrátor je připojený na Raspberry Pi a všechny parametry se tedy u přijímací brány nastavují přes komunikační protokol SSH, přes který probíhá komunikace s Raspberry Pi. Zařízení Raspberry Pi provozuje operační systém Linux. Konfigurace brány je zaznamenána v konfiguračních souborech v paměti Raspberry Pi a změnou zápisu v těchto souborech lze zařízení konfigurovat.

Základní parametry byly již nastaveny od předchozího uživatele na fakultě elektrotechnické a pro potřeby měření bylo třeba spustit program poly packet forwarder (poly_pkt_fwd), který navázal spojení s koncentrátorem a započal skenování frekvenčního pásma. Po navázání kontaktu s koncentrátorem navázal spojení s předem nadefinovaným serverem, na který přeposílal přijaté pakety. Zprávy o stavu brány byly posílány na server v intervalu 30 sekund. Vždy, když přijímač zaznamenal LoRa paket, byl tento stav oznámen na obrazovce.

7.3. Zpracování výsledků měření

Každý paket přijatý bránou a přeposlaný na webový server v sobě nesl identifikátor přijímacího zařízení, identifikátor vysílacího zařízení, čas přijetí paketu, datový obsah, frekvenci, na které byl paket přijat, datarate, s kterým byl paket vyslán (faktor šíření a šířka pásma), RSSI (indikátor síly přijímaného signálu) a SNR (odstup signálu od šumu). Přijaté pakety byly následně přehledně zpracovány v programu Microsoft Excel.

gateway_eui	node_eui	time	Payload	frequency	datarate	rsi	snr
203360000000001	2033610	2016-05-10T14:12:37.248Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwQC	868.1	SF12BW125	-123	-17.2
203360000000001	2033610	2016-05-10T14:15:48.97Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwQE	868.1	SF12BW125	-123	-19.2
203360000000001	2033610	2016-05-10T14:18:56.744Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwQF	868.1	SF12BW125	-123	-16.5
203360000000001	2033610	2016-05-10T14:47:07.081Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwUF	868.1	SF12BW125	-123	-16.8
203360000000001	2033610	2016-05-10T15:27:05.243Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwID	868.3	SF12BW125	-121	-14.8
203360000000001	2033610	2016-05-10T15:31:33.185Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwIF	868.1	SF12BW125	-120	-12.2
203360000000001	2033610	2016-05-10T15:50:55.879Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwEF	868.5	SF12BW125	-120	-20.8
203360000000001	2033610	2016-05-10T15:55:13.079Z	AAECAwQFBgclCQoLDA0ODwEH	868.5	SF12BW125	-121	-10

Obrázek 7-13 Pakety přijaté na server The Things Network

Pro výpočet pokrytí domu signálem sloužila hodnota RSSI, která se pohybovala v intervalu od -89 do -123. RSSI indikuje „úroveň“ přijatého signálu, ale nereprezentuje úroveň přijatého výkonu. Pro správnost výsledků bylo třeba zahrnout do výpočtů také pakety, které byly vyslány, ale při přenosu byly ztraceny. K realizaci výpočtu bylo třeba nejprve upravit hodnoty RSSI přijatých paketů na kladné hodnoty s počátkem v 1 (pro paket s nejnižší

hodnotou RSSI -123). Pro hodnotu RSSI každého přijatého paketu byla provedena následující úprava:

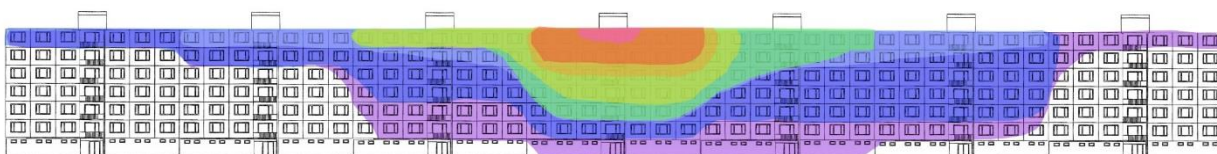
$$S_i = RSSI_i + |MIN(RSSI) - 1| \quad (10)$$

S_i vyjadřuje úroveň přijatého signálu v přepočítaných hodnotách. Po uvedené úpravě bylo možné počítat s nepřijatými pakety jako s pakety, jejichž RSSI nabylo hodnoty 0. Pro každé vysílací místo byl spočten aritmetický průměr přijatých paketů zahrnující též nepřijaté pakety, tedy pakety, jejichž S_i mělo hodnotu 0. Průměr byl vždy počítán z deseti vzorků, protože z každého vysílacího místa bylo vysláno 10 vzorků.

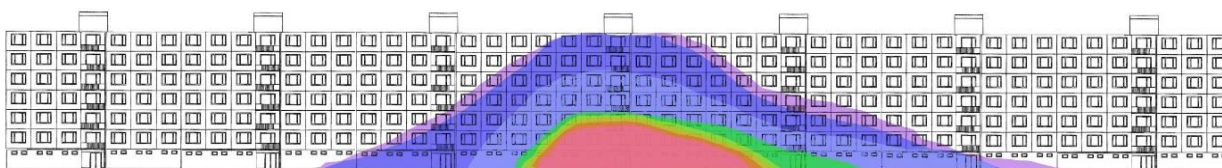
Pro potřeby dalšího výpočtu byla změřena referenční hodnota RSSI na přímou vzdálenost 5 metrů od vysílacího zařízení k přijímacímu. Měření bylo provedeno v chodbě široké 1,5 metru a hodnota RSSI činila -83, resp. $S = 41$. Referenční hodnota činila nadále hodnotu 100% a s touto referenční hodnotou byly porovnávány průměrné hodnoty relativní změny přijaté úrovně signálu z ostatních vysílacích míst. Na základě poměru průměrné hodnoty přijatého signálu a hodnoty referenčního signálu byly údaje barevně zobrazovány dle následující tabulky.

Relativní změna přijaté úrovně signálu [% z referenčního signálu]	Zakreslená barva
0 - 4	černá
5 - 9	tmavě modrá
10 - 14	modrá
15 - 19	zelená
20 - 24	žlutá
25 - 29	oranžová
30 - 34	červená
35 - 100	červená

Tabulka 7-1 Referenční tabulka pro grafické zobrazení šíření signálu



Obrázek 7-14 Vizualizace výsledků měření s přijímačem umístěným na střeše budovy.



Obrázek 7-15 Vizualizace výsledku měření s přijímačem umístěným ve sklepení budovy.

Závěr

Tato práce se zabývala plánováním a provozem LPWAN sítí, které jsou zamýšleny jako sítě pro koncept senzorových sítí IoT. Byly zhodnoceny provozní požadavky konceptu IoT, kterými jsou: rozsáhlé pokrytí území, možnost připojit až miliardy zařízení, nízké pořizovací a provozní náklady, nízká spotřeba energie a tedy dlouhá životnost baterie. Byly porovnány technologie mobilních sítí 3G a LTE, lokální sítě LAN a sítě LPWAN vzhledem k požadavkům konceptu IoT. Požadavkům nejvíce vyhovuje síť LPWAN, ve které se pro šíření signálu používá technologie úzkopásmového vysílání (UNB – ultra-narrowband), kdy pro přenos signálu postačí pásmo o šířce řádu několika Hz. Dále se používá technologie přímo rozpustného spektra (DSSS - direct sequence spread spectrum), která rozprostírá přenášený signál mezi náhodně generované hodnoty. Obě techniky nabízí dlouhý dosah pokrytí za co nejnižší spotřeby energie. Konečné rozhodnutí o používaných technologiích pro sítě LPWAN ještě není stanoveno, uvažuje se o používání obou technologií a tak je tato otázka otevřena dalšímu výzkumu.

Konkurenci síti LPWAN tvoří nově síť LTE-M, která by měla vycházet z již provozované mobilní sítě LTE, ale oproti ní by splňovat požadavky stanovené konceptem IoT. Do budoucna se pro senzorové sítě uvažuje také o síti 5G. V tuto chvíli je sváděn boj mezi technologiemi LPWAN sítí a sítěmi LTE mobilních operátorů o provoz sítě IoT.

Na poli působení LPWAN sítí se setkávají dva velcí rivalové. Na jedné straně stojí technologie Sigfox s technikou fyzické vrstvy UNB, na druhé straně technologie LoRa s technikou fyzické vrstvy DSSS. Obě technologie nabízí rozsáhlé pokrytí území a zároveň nízkou spotřebu energie. Technologie dokáží detekovat i velice slabý signál s nízkým odstupem od šumu, DSSS díky vygenerování dlouhé sekvence hodnot, UNB zařazením UNB filtru. Obě řešení s sebou však přináší také svá úskalí. Generování dlouhé sekvence pro DSSS techniku je výpočetně a tedy i časově velice náročné, na druhé straně UNB filtry jsou konfiguračně náročné a vyžadují ruční ladění. Otázka převažující vůdčí technologie je tedy stále otevřena, v tuto chvíli jsou oba koncepty, Lora i Sigfox, provozovány.

Práce se zabývala šířením signálu LPWAN sítí se zaměřením na šíření uvnitř budov. V průběhu práce byly představeny některé empirické modely pro výpočet šíření signálu jak ve volném prostředí, tak uvnitř budov. Za zmínění stojí mult-wall-and-floor model, který pracuje při výpočtu s parametry s jednotlivými parametry stěny a podlaží, kterými vlna prochází, přestože se parametry mohou lišit.

Praktická část této práce se věnovala měření útlumu signálu LoRa v panelovém obytném domě v Praze. K měření bylo použito zařízení IMST iU880A, která pakety vysílalo a zařízení WiMOD iC880A s čipem SX1301, které pakety přijímalo. Vysílací zařízení bylo nastaveno na maximální možný výkon 20 dBm a data rate 0 s faktorem šíření 12, šířkou pásma

125 kHz a bitovou rychlostí 250 b/s. Zařízení i přes nastavení svého nejvyššího možného a povoleného vysílacího výkonu nedokázalo vyslat dostatečný signál, který by prorazil všechny překážky a dorazil do nejvzdálenějšího bodu budovy od přijímače. Technologie LoRa uvádí maximální dosah své sítě 15 – 20 km, který se však v zastavěných oblastech a při průchodu překážkami výrazně snižuje.

Pro dosažení lepšího dosahu bylo zkoušeno pro vysílání paketů použít zařízení SX1272, které, na rozdíl od IMST iU880A, disponuje možností připojení externí antény. Zařízení se však z technických důvodů nepodařil uvést do spolehlivého provozu.

Při snaze o kontaktování firem poskytujících software pro plánování LPWAN sítí (Siradel, Forsk) nebylo dosaženo úspěchu, firmy nereagovaly na žádosti o zpřístupnění svého softwaru zdarma, za účelem výzkumu pro bakalářskou práci. Z důvodu neumožnění vytvoření modelu sítě vychází metodika pro návrh LPWAN/LPN sítě, po dohodě s vedoucím této práce, z provedení experimentu šíření signálu sítě LoRa. Z postupu měření a získaných výsledků se lze inspirovat pro plánování LPWAN sítí.

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Příklad principu funkce VMSK modulace [9].....	14
Obrázek 2-2 Přehled síťových topologií [11]	15
Obrázek 3-1 Celkové působení elektromagnetického pole ve městě Nimes, ve Francii. [12] .	18
Obrázek 3-2 Schéma funkcí aplikace Smart City Explorer [12]	19
Obrázek 6-1 Schéma přenosu dat od senzoru na webový server [28].....	31
Obrázek 6-2 Přehled vrstev technologie LoRa [20]	32
Obrázek 6-3 Struktura datové zprávy ve směru uplink, pro downlink bez pole CRC.....	39
Obrázek 7-1 Foto měřeného panelového domu v Praze Čimicích	41
Obrázek 7-2 Zařízení použitá k měření.....	42
Obrázek 7-3 Raspberry Pi 2, model B V1.1.....	43
Obrázek 7-4 Koncentrátor WiMOD iC880A a schéma čipu SX1301	44
Obrázek 7-5 LoRa vysílač a přijímač IMST iU880A.....	45
Obrázek 7-6 Podélný řez budovy se znázorněnými vysílacími a přijímacími místy	46
Obrázek 7-7 Detail podlaží vchodového bloku se zakresleným vysílacím místem	47
Obrázek 7-8 Pravidelně odesílané informace o stavu brány.....	48
Obrázek 7-9 Měřicí pracoviště s koncentrátorem WiMOD iC880A pro příjem paketů	49
Obrázek 7-10 Schéma zapojení stanoviště pro příjem paketů.....	49
Obrázek 7-11 Měřicí stanoviště s IMST iU880A pro vysílání paketů.....	50
Obrázek 7-12 WiMOD LoRaWAN EndNodeStudio - správa provozu sítě.....	51
Obrázek 7-13 Pakety přijaté na server The Things Network.....	52
Obrázek 7-15 Vizualizace výsledku měření s přijímačem umístěným ve sklepení budovy.....	53
Obrázek 7-14 Vizualizace výsledků měření s přijímačem umístěným na střeše budovy.....	53

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Přehled plánovaných služeb pro koncept IoT [3]	12
Tabulka 5-1 Frekvenční spektrum vhodné pro radiovou komunikaci.....	22
Tabulka 6-1 Přehled vysílacích režimů technologie LoRa [20]	34
Tabulka 6-2 Přehled povolených vysílacích výkonů technologie LoRa [20]	35
Tabulka 7-1 Referenční tabulka pro grafické zobrazení šíření signálu	53

Reference

- [1] J. Greenough, „Here are the four key elements that will make the Internet of Things an absolutely massive market,“ 3. 12. 2014. [Online]. Available: <http://www.businessinsider.com/four-elements-driving-iot-2014-10>.
- [2] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, A. Ghosh a B. Vejlgaard, „Narrowband LTE-M System for M2M Communication,“ IEEE, Arlington Heights, IL, USA, 2014.
- [3] Nokia, „Nokia Networks white paper,“ Nokia Solutions and Networks Oy, 2015.
- [4] D. Clark, K. Pogran a D. Reed, „An Introduction to Local Area Networks,“ IEEE, 1978.
- [5] X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang a P. Chatzimisios, „Low power wide area machine-to-machine networks: key techniques and prototype,“ IEEE, 2015.
- [6] M. Rouse, „Tech Target,“ Říjen 2007. [Online]. Available: <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/direct-sequence-spread-spectrum>. [Přístup získán 25. 1. 2016].
- [7] Siradel, „Volcano Propagation model,“ [Online]. Available: <http://www.siradel.com/wireless-3d-design/software/volcano-software/>. [Přístup získán 16. 2. 2016].
- [8] „Castalia,“ [Online]. Available: <https://castalia.forge.nicta.com.au/index.php/en/>. [Přístup získán 18. 5. 2016].
- [9] V. N. T. W. K. Tam, „Propagation modelling for indor wireless communication,“ IEEE, Melbourne, 1995.
- [10] A. h. L. Kaveh Pahlavan, v *Wireless Information Network*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, pp. 263 - 265.
- [11] I. Forkel a M. Salzmann, „Radio Propagation Modelling and its Application for 3G Mobile Network Simulation,“ Aachen University of Technology, Aachen, 2001.

- [12] J. B. Andersen, T. S. Rappaport a S. Yoshida, „Propagation Measurements and Models for Wireless Communication Channels,“ IEEE, 1995.
- [13] M. Manninen a J. Lempiainen, Umts Radio Networ Planning, Optimization and QoS Management for Practical Engineering tasks, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [14] SimpleCell, „Technologie Sigfox,“ SimpleCell, [Online]. Available: http://www.simplecell.eu/pages/technologie_sigfox/. [Přístup získán 4. 2. 2016].
- [15] „Sigfox, technology v basis,“ RF Wireless World, [Online]. Available: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/SIGFOX-technology-basics.html>. [Přístup získán 7. 4. 2006].
- [16] IQRF, [Online]. Available: <http://iqrf.org/iqrfabout/why-iqrf>. [Přístup získán 18. 2. 2016].
- [17] I. Poole, „LoRa Physical Layer & RF Interface,“ Radio-Electronics.com, [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/rf-interface-physical-layer.php>. [Přístup získán 14. 3. 2016].
- [18] V. Prajzler, „LoRa, LoRaWAN and LORIoT.oi,“ LORIoT.oi, 1. 8. 2015. [Online]. Available: <https://www.loriot.io/lorawan.html>. [Přístup získán 5. 12. 2015].
- [19] C. Semtech, „Recommended SX1276 Setting for EU868 LoRaWAN Network Operation,“ Semtech, Camarillo, 2015.
- [20] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich a T. Kramp, „LoRaWAN Specification V1.0,“ LoRa Alliance, San Ramon, 2015.
- [21] Raspberry Pi, „Raspberry Pi 2 Model B,“ Raspberry Pi, [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/>. [Přístup získán 2. 4. 2016].
- [22] Semtech, „WiMOD iC880A Datasheet,“ Semtech, Kamp-Lintfort, 2014.
- [23] Z. Shi, J. Huang, Z. Zhang a Y. Sang, „Analyze and Comment on Spectral Efficiency of VMSK Modulation,“ v *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2006.
- [24] A. Harney a C. O'Mahony, „Understand wireless short-range devices for global license-free systems,“ Analog Devices, Inc., 7 Březen 2007. [Online]. Available: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276268&page_number=3. [Přístup získán 12. 2. 2016].

- [25] „Wikipedia,“ 14. Srpen 2015. [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Topologie_sítí#/media/File:NetworkTopologies.png. [Přístup získán 18. 2. 2016].
- [26] Siradel, „Siradel,“ [Online]. Available: <http://www.siradel.com>. [Přístup získán 15. 2. 2016].
- [27] I. Poole, „Radio Propagation,“ [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/radio-propagation/radio-propagation-overview-tutorial.php>. [Přístup získán 15. 4. 2016].
- [28] „LoRa Alliance,“ LoRa® Technology, [Online]. Available: <http://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>. [Přístup získán 8. 1. 2016].

Přílohy

Příloha 1 – Vypočítané průměrné hodnoty „úrovně“ přijatého signálu z jednotlivých vysílacích míst s přijímačem umístěným na střeše budovy

Vchod - patro	Průměr SNR	Průměr RSSI	S _i	Průměrná hodnota S _i se ztracenými pakety	Porovnání vzhledem k referenční hodnotě signálu [%]
350 - 6. patro	-15,4	-120	5	1,6	3,9
351 - 1. patro	-19,5	-121	3	0,3	0,7
351 - 2. patro	-18,4	-121	3	2,4	5,9
351 - 4. patro	-17,7	-120	4	2,5	6,1
351 - 5. patro	-10,7	-121	3	1,4	3,4
351 - 6. patro	-10,4	-119	3	4,1	10,0
352 - 1. patro	-18,0	-121	4	1	2,4
352 - 2. patro	-18,0	-120	3	2,5	6,1
352 - 3. patro	-18,3	-121	4	2,3	5,6
352 - 4. patro	-15,3	-120	4	3,2	7,8
352 - 5. patro	-15,8	-119	4	4,5	11,0
352 - 6. patro	-9,4	-118	9	6,5	15,9
352 - sklep	-6,8	-119	4	0,4	1,0
352 - vchod	-2,6	-120	4	0,4	1,0
353 - 1. patro	-12,4	-120	4	3,7	9,0
353 - 2. patro	-15,8	-117	10	6,8	16,6
353 - 3. patro	-9,4	-115	5	8,9	21,7
353 - 4. patro	-0,5	-115	15	9,2	22,4
353 - 5. patro	1,8	-111	4	13	31,7
353 - 6. patro	1,0	-93	34	31	75,6
353 - sklep	6,5	-120	3	1,9	4,6
353 - vchod	8,7	-121	3	1,6	3,9
354 - 1. patro	-17,9	-121	1	0,9	2,2
354 - 2. patro	-17,4	-120	4	1,3	3,2
354 - 3. patro	-13,8	-121	3	3,3	8,0
354 - 4. patro	-15,3	-121	3	0,3	0,7
354 - 5. patro	-16,9	-119	3	4,7	11,5
354 - 6. patro	-5,9	-115	11	8,2	20,0
354 - vchod	1,9	-121	3	1,3	3,2
355 - 4. patro	-16,2	-121	1	1,2	2,9
355 - 5. patro	-11,0	-121	4	2,8	6,8
355 - 6. patro	-5,6	-119	5	4,6	11,2
356 - 5. patro	-11,4	-120	5	3,4	8,3
356 - 6. patro	-9,0	-120	5	3,8	9,3
Ref. signal				41	-83,0

Příloha 2 – Vypočítané průměrné hodnoty „úrovně“ přijatého signálu z jednotlivých vysílacích míst s přijímačem umístěným ve sklepě budovy

Vchod - patro	Průměr SNR	Průměr RSSI	S _i	Průměrná hodnota S _i zahrnující ztracené pakety	Porovnání vyhledem k referenční hodnotě signálu [%]
351 - vchod	-11,8	-120	4	0,4	9,8
352 - 1. patro	-43,4	-120	3	3,7	9,0
352 - 2. patro	-12,6	-121	3	1,3	7,9
352 - sklep	8,9	-108	4	16,2	39,5
352 - vchod	-116,4	-116	6	7,6	18,5
353 - 1.patro	10,5	-92	33	32,3	78,8
353 - 2. patro	9,7	-106	13	18,1	44,1
353 - 3. patro	-0,5	-118	11	5,9	14,4
353 - 4. patro	0,0	-119	4	5,3	12,9
353 - 5. patro	-11,6	-120	4	1,9	9,3
353 - 6.patro		-121	3	1,2	7,3
353 - sklep	10,6	-91	35	32,9	80,2
353 - vchod	10,7	-90	31	34	82,9
354 - 1.patro	-12,8	-121	3	1,2	7,3
354 - sklep	-7,0	-120	4	3	9,1
354 - vchod	-14,2	-121	3	0,3	7,3
Ref. Signal		-83		41	