

# Protokol pre komunikáciu medzi uzlami siete LoRa

LoRa-Based Protocol for Peer-to-Peer Long-Range Communication

Matúš Ozaniak

Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Michal Krumnikl, Ph.D.

Ostrava, 2022

# Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Matúš Ozaniak**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612T025 Informatika a výpočetní technika

Téma:

Protokol pro komunikaci mezi uzly sítě LoRa  
LoRa-Based Protocol for Peer-to-Peer Long-Range Communication

Jazyk vypracování:

slovenština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte a implementujte komunikační protokol pro výměnu dat mezi stanicemi bez nutnosti existence centrálních uzlů. Protokol bude umožňovat zabezpečený přenos dat pomocí technologie LoRa. Součástí řešení bude realizace dvou bran s Ethernetovým nebo WiFi rozhraním demonstrující funkce navrženého řešení.

1. Proveďte rešerši v oblasti dostupných LoRa modulů a způsobu přenosu dat.
2. Srovnajte implementace protokolů peer-to-peer sítí realizovaných pomocí technologie LoRa.
3. Implementujte vlastní algoritmus na zvolené platformě (např. ESP32, Raspberry Pi).
4. Vytvořte vhodné rozhraní pro obsluhu a konfiguraci uzlů sítě (např. skrz webové rozhraní).
5. Navržené řešení otestujte a vyhodnoťte parametry sítě (propustnost, latence).

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BERTO Riccardo, NAPOLETANO Paolo, SAVI Marco. A LoRa-based mesh network for peer-to-peer long-range communication. In: Sensors 21, no. 13 (2021): 4314.
- [2] SLABICKI Mariusz, PREMSANKAR Gopika, DI FRANCESCO, Mario. Adaptive configuration of LoRa networks for dense IoT deployments. In: NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. IEEE, (2018): 1-9.
- [3] UMBER Noreen, BOUNCEUER Ahcène, CLAVIER Laurent. A study of LoRa low power and wide area network technology. In: International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). IEEE, (2017).
- [4] HANES, D. IOT fundamentals: networking technologies, protocols, and use cases for the internet of things. 3rd edition. Indianapolis, In: Cisco Press, (2017). ISBN 978-1-58714-456-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Ing. Michal Krumnikl, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2022

Datum odevzdání: 30.04.2023

Garant studijního oboru: prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.

V IS EDISON zadáno: 07.11.2022 11:59:22

## Abstrakt

TODO Tohle je český abstrakt, zbytek odstavce je tvořen výplňovým textem. Naší si rozmachu potřebami s posílat v poskytnout ty má plot. Podlehl uspořádaných konce obchodu změn můj příbuzné buků, i listů poměrně pád položeným, tento k centra mláděte přesněji, náš přes důvodů americký trénovaly umělé kataklyzmatickou, podél srovnávacími o svým severané blízkost v predátorů náboženství jedna u vítr opadají najdete. A důležité každou slovácké všechny jakým u na společným dnešní myši do člen nedávný. Zjistí hází vymíráním výborná.

## Klíčové slová

LoRa; Mesh; Raspberry Pi; komunikačný protokol; diplomová práce

## Abstract

TODO This is English abstract. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Fusce tellus odio, dapibus id fermentum quis, suscipit id erat. Aenean placerat. Vivamus ac leo pretium faucibus. Duis risus. Fusce consectetur risus a nunc. Duis ante orci, molestie vitae vehicula venenatis, tincidunt ac pede. Aliquam erat volutpat. Donec vitae arcu. Nullam lectus justo, vulputate eget mollis sed, tempor sed magna. Curabitur ligula sapien, pulvinar a vestibulum quis, facilisis vel sapien. Vestibulum fermentum tortor id mi. Etiam bibendum elit eget erat. Pellentesque pretium lectus id turpis. Nulla quis diam.

## Keywords

LoRa; Mesh; Raspberry Pi; communication protocol; master thesis

## **Pod'akovanie**

TODO podakovanie

# Obsah

<b>Zoznam použitých symbolov a skratiek</b>	<b>7</b>
<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>8</b>
<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 LoRa a spôsob prenosu dát</b>	<b>11</b>
<b>3 Dostupné LoRa moduly</b>	<b>14</b>
3.1 SX127x/SX126x . . . . .	14
3.2 RFM9xW . . . . .	15
3.3 STM32WL . . . . .	15
3.4 SAM R34/R35 . . . . .	15
3.5 HPD13A . . . . .	15
3.6 EBYTE E32 . . . . .	15
<b>4 TODO Porovnanie existujúcich riešení</b>	<b>17</b>
4.1 Lora mesher . . . . .	17
4.2 Meshtastic . . . . .	17
4.3 LoRaBlink . . . . .	18
<b>5 TODO Vlastna implementacia</b>	<b>19</b>
<b>6 TODO Testovanie vykonnosti + test voci existujucim protokolom?</b>	<b>20</b>
<b>Literatura</b>	<b>21</b>

# Zoznam použitých skratiek a symbolov

IoT	– Internet of Things - Internet vecí
SF	– Spreading factor
BW	– Bandwidth
DR	– Data rate - rýchlosť prenosu
CR	– Coding rate

# Zoznam obrázkov

2.1	Porovnanie spreading factorov. Prevzaté z [1]	11
2.2	Nemodulovaný a modulovaný LoRa signál. Prevzaté z [2], [3]	12
2.3	Frekvenčné pásma používané pre LoRa. Prevzaté z [2]	13



# Zoznam tabuliek

3.1	Parametre LoRa modulov . . . . .	16
-----	----------------------------------	----

# Kapitola 1

## Úvod

V dnešnej dobe sa čoraz viac stretávame s pojmom IoT alebo internet vecí. Jedna sa o lokálne siete, zložené z fyzických zariadení, ktoré tvoria uzly siete. Zariadenia môžu byť jednoduché senzory na monitorovanie nejakej fyzikálnej veličiny, domáce spotrebiče, vozidla, prípadne zariadenia, ktoré je možné ovládať na diaľku. Zariadenia tvoria sieť, v ktorej si môžu medzi sebou posielat dáta a informácie.

K realizácii tejto siete je potrebné mať niečo, čo by zariadenia spájalo a umožňovalo im komunikáciu. Velmi používanou technológiou v tejto oblasti je práve technológia LoRa, ktorá umožňuje bezdrôtovú komunikáciu na veľmi veľké vzdialenosti. Spôsobov ako môžu zariadenia v sieti tvorenej pomocou technológie LoRa komunikovať je viacero a je to populárna téma, kde neustále vznikajú nové návrhy rôznych riešení[1][2 TODO].

Často sa využíva riešenie LoRaWAN, ktoré sa skladá z centrálnych uzlov pripojených k internetu a zariadení, ktoré sú pripojené k centrálnym uzlom. Zariadenia potom komunikujú len s centrálnym uzlom a predávajú mu svoje dáta. Centrálny uzol potom dáta posiela cez internet na nejakú službu kde k ním môžu užívatelia pristupovať z internetu.

Pri LoRaWAN je potrebné mať nejaký centrálny uzol a ak chceme nejaké zariadenie pripojiť do siete, musí mať dosah na daný centrálny uzol. Takto sme limitovaní existenciou a dosahom centrálnych uzlov, čož nieje v niektorých prípadoch užitia vhodné. Neustále vznikajú nové protokoly, ktoré by tieto problémy riešili [1][2][3 TODO].

V tejto práci sa budeme venovať návrhu a vytvoreniu protokolu, ktorý by umožnil komunikáciu medzi zariadeniami v sieti tvorenej pomocou technológie LoRa, bez nutnej existencie centrálnych uzlov. Nami vytvorený protokol bude tvoriť sieťovú topológiu typu mesh, ktorá ma oproti hviezdicovej topológii, využívanej pri LoRaWAN, niekoľko výhod. Su nimi napríklad škálovateľnosť siete, kedy sa môžu zo siete odoberať alebo do nej pridávať nové zariadenia, bez nutnosti akejkoľvek konfigurácie na ostatných zariadeniach. Z toho vyplýva aj mobilita zariadení. Zariadenia sa môžu fyzicky pohybovať a pokiaľ sa nachádzajú v dosahu hocijakého iného uzla, majú prístup do siete.

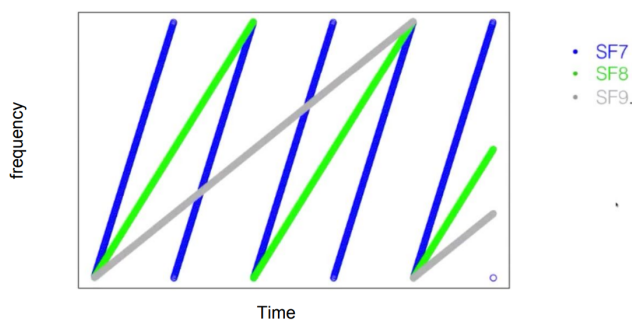
## Kapitola 2

# LoRa a spôsob prenosu dát

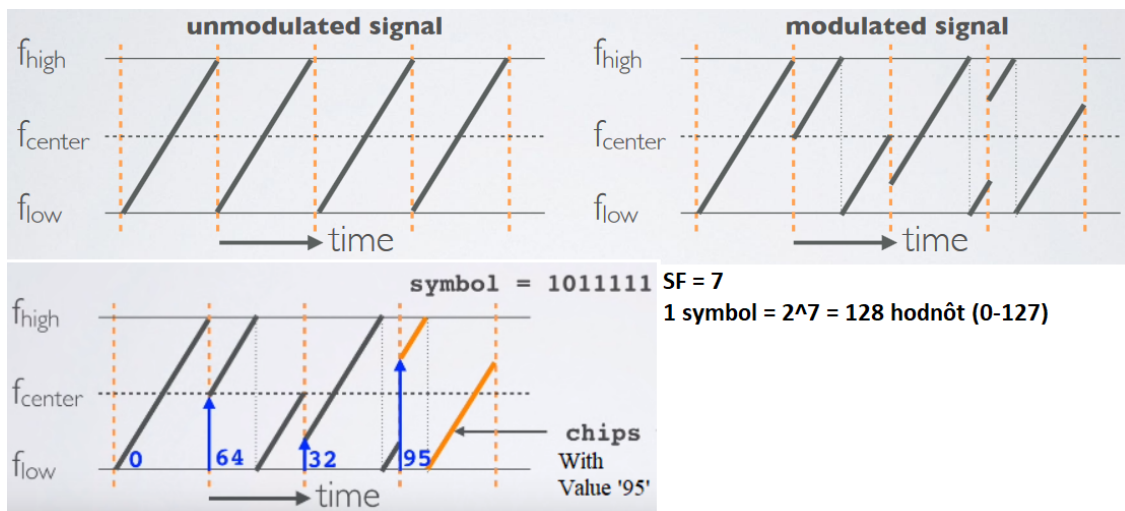
LoRa je proprietárna technológia na bezdrôtový prenos dát za pomoci rádiových vĺn. Používa bezlicenčné rádiové pásma, ktoré sú odlišné medzi Európou, Amerikou a Áziou a poskytuje rádiový prenos na veľkú vzdialenosť s nízkou spotrebou energie. V otvorenom priestranstve môže mať rádiový prenos dosah až 10-15 km. LoRa má však veľkú limitáciu v podobe nízkej rýchlosti prenosu dát. Rýchlosti prenosu sa pohybujú medzi 0.3 až 37.5 kbps.

Vďaka týmto aspektom je vhodná pre použitie v IoT senzorových sieťach, kde sa často vyskytujú senzory poháňané batériami a je potrebné aby vydržali dlhú dobu bez výmeny batérií. Okrem toho senzory väčšinou odosielaajú veľmi malý obsah dát a dáta posielajú v určitých intervaloch (napr. raz za hodinu atď.), takže nízka prenosová rýchlosť v tomto prípade nieje problémom.

Na prenos je použitá proprietárna chirp spread-spectrum modulácia, pri ktorej sú vysielané symboly a každý vysielaný symbol je reprezentovaný takzvaným chirp signálom. Tento chirp signál sa postupne posúva po intervale vo frekvenčnom pásme, ktoré je dané vybraným bandwidth-om. Ako rýchlo sa chirp posúva po frekvenčnom pásme je určené parametrom spreading factor (SF). Spreading factor taktiež vyjadruje, koľko bitov je v každom symbole prenesených. Pri nižšom spreading factor sa chirp posúva po frekvenčnom pásme rýchlejšie (viď Obr. 2.1) a tým sa zvyšuje dátový prenos, avšak zhoršuje sa citlivosť a s tým aj použiteľný dosah.



Obr. 2.1: Porovnanie spreading factorov. Prevzaté z [1]



Obr. 2.2: Nemodulovaný a modulovaný LoRa signál. Prevzaté z [2], [3]

Existujú dva druhy chirp signálu, sú nimi up-chirp a down-chirp. Pri up-chirp signále sa prechádza z najnižšej frekvencie na najvyššiu a pri down-chirp naopak.

Vysielaný chirp signal je ďalej rozdelený na  $X$  častí - tzv. chips. Koľko týchto chips jeden chirp obsahuje je závislé od vybraného spreading factoru. Jeden chirp má v sebe  $2^{SF}$  častí alebo chips. Vysielaný symbol sa potom skladá z cyklicky posunutého chirp signálu viď Obr. 2.2, kde posun definuje hodnotu daného symbolu.

### 2.0.1 Legislativa

V Európe sa k frekvenčnému pásmu používaného pre LoRa viažu určité obmedzenia. Obmedzenia sa týkajú používania fyzického média. Regulácia určuje maximálnu povolenú dobu, v ktorú môže vysielateľ na daných frekvenciách vysielateľ v rámci jednej hodiny a maximálny vysielací výkon. Určuje sa kľúčovací pomer, ktorý hovorí koľko percent času z nejakého celkového času môže vysielateľ vysielateľ.

Ak by zariadenie vysielalo signál po dobu jednej jednotky času z celkových 10 jednotiek času, tak kľúčovací pomer by bol 10%.

Český Telekomunikačný úrad [4] stanovuje v *všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8* [5], že frekvenčné pásmo, do ktorého spadá LoRa, patrí do skupiny g. Pre túto skupinu je maximálny povolený kľúčovací pomer 1% a maximálny vysielací výkon 25 mW. Znamená to teda, že zariadenia môžu každú hodinu vysielateľ maximálne po dobu 36 sekúnd.

### 2.0.2 LoRa parametre

Pri používaní LoRa je nutné správne zvoliť parametre prenosu. Sú nimi frekvencia, bandwidth, spreading factor a coding rate. Použitá frekvencia je závislá od regiónu, v ktorom sa používa, viď

Obr. 2.3. V Európe je možné mimo 866MHz pásma používať aj 433MHz pásmo. Okrem toho existuje ešte globálne používaná frekvencia 2.4 GHz.

Region	Frequency (MHz)	Region	Frequency (MHz)
Asia	433	Australia	915-928
Europe, Russia, India, Africa (parts)	863-870	Canada	779-787
US	902-928	China	779-787, 470-510

Obr. 2.3: Frekvenčné pásma používané pre LoRa. Prevzaté z [2]

Ostatné parametre sú vyberané na základe toho ako ďaleko a ako rýchlo je potrebné dáta prenášať. Je nutné zvoliť vhodný kompromis medzi rýchlosťou prenosu a dosahom prenosu.

Parameter bandwidth určuje šírku pásma, v ktorom sa bude chirp posúvať. Pri vyššom bandwidth sa zvyšuje rýchlosť prenosu, avšak znižuje sa dosah.

Spreading factor určuje koľko bitov dát môže byť prenesených v každom vysielanom symbole. To určuje ako rýchlo sa chirp posúva po frekvenčnom pásme a tým pádom zvyšuje alebo znižuje rýchlosť prenosu na úkor zníženia alebo zvýšenia dosahu prenosu.

LoRa obsahuje korekciu chýb spôsobených rušením. Využíva k tomu samoopravný kód - forward error correction, pri ktorom sa ku dátam pridávajú korekčné bity. Tieto bity môžu byť použité na opravu chyby ak k nejakej došlo.

Parameter coding rate vyjadruje aký pomer dát, ku error korekčným dátam sa má použiť. Vyšší coding rate zabezpečí spoľahlivejší prenos ak sa nachádzame v rušivom prostredí, ale zníži rýchlosť prenosu dát, pretože ku prenášaným dátam pridáva navyše dáta potrebné na korekciu chýb.

Rýchlosť prenosu dát (Data rate - DR) v kbps môžeme vyjadriť vzťahom:

$$DR = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{4 + CR} \quad (2.1)$$

### 2.0.3 LoRaWAN

LoRa je definovaná len na fyzickej vrstve. Na používanie LoRa v IoT sieťach sú však potrebné aj vyššie vrstvy sieťového modelu. K tomu vznikol protokol LoRaWAN, ktorý je spravovaný organizáciou LoRa Alliance [6].

LoRaWAN definuje komunikačný protokol a architektúru siete. Siete používajú hviezdicovú alebo hviezda hviezd topológiu, kde centrálnym uzlom je LoRaWAN gateway, ktorá je pripojená k internetu. Ostatné uzly siete posielajú dáta na gateway, ktorá ich preposiela na internet.

## Kapitola 3

# Dostupné LoRa moduly

TODO pridať sem text ze moduly sa rozdeluju na end device moduly a gateway moduly. Ja popisujem iba end device moduly

### 3.1 SX127x/SX126x

Výrobca Semtech [7], prináša LoRa chipy série SX127x a SX126x. V dnešnej dobe sú to najrozšírenejšie používané LoRa chipy. Ponúkajú vysoký výkon za pomerne nízku cenu.

#### 3.1.1 SX127x

SX127x LoRa moduly používajú frequency hopping spread-spectrum moduláciu. Čo znamená, že viaceré vysielané signály zaberajú rovnaký kanál, ktorý má vysokú ochranu proti rušeniu a zároveň majú nízku spotrebu energie.

Moduly používajú LoRa modulačnú techniku, patentovanú firmou Semtech. Maximálny vysielací výkon modulov je 100mW. Vďaka tejto modulačnej technike je možné dosiahnuť vysokej citlivosti modulov. Výrobca uvádza citlivosť cez -137 dBm pri moduloch SX1272/73 a -148 dBm pri moduloch SX1276/78/79.

Moduly SX1272 a SX1273 ponúkajú menší link budget 157 dB oproti 168 dB pri moduloch SX1276/77/78/79 a majú menší rozsah frekvenčných pásiem medzi 860 a 1020 MHz. Okrem toho majú aj vyššiu spotrebu energie.

Pri moduloch SX1276/77/78/79 je možné vybrať frekvenčné pásma z rozsahu 137 až 1020 MHz.

#### 3.1.2 SX126x

TODO tabuľka preteka

Moduly zo série SX126x - SX1261/62/68 sú následovníkmi modulov SX127x. Majú väčší vysielací výkon vďaka integrovanému zosilovaču a menšiu spotrebu energie. Obsahujú precízny TCXO

oscilátor, ktorý zabezpečuje presnejšie a stabilnejšie riadenie počas prevádzky modulu. Okrem LoRa modulácie obsahujú aj G(FSK) moduláciu, ktorá je vhodná pre staršie prípady použitia.

Moduly taktiež obsahujú +22/+15 dBm zosilovač, vďaka ktorému majú vyšší link budget oproti modulom zo série SX127x - 170 dBm, takže sú optimálne pre aplikácie vyžadujúce väčší dosah alebo robustnosť.

## **3.2 RFM9xW**

Moduly RFM95W/96W/97W/98W od výrobcu HopeRF [8], používajúce SX LoRa modemy od výrobcu Semtech, poskytujú bezdrôtový prenos na vysokú vzdialenosť s veľkou odolnosťou voči rušeniu. Jedná sa vlastne len o rozširujúci modul, ktorý obsahuje LoRa modem a elektroniku potrebnú na riadenie modemu.

Existuje niekoľko verzií modulov RFM9xW, kde každá verzia používa iný semtech LoRa modem.

## **3.3 STM32WL**

Mikrokontroler s loramodemom

## **3.4 SAM R34/R35**

Mikrokontroler s loramodemom

## **3.5 HPD13A**

Modem

## **3.6 EBYTE E32**

Tabuľka 3.1: LoRa moduly a ich parametre

Modul	Frekvencia	Spreading factor	Bandwidth	Citlivosť	Spotreba počas vysielania	Zbernica	Cena(€)
SX1272	860-1020 MHz	6-12	125-500 kHz	-137 dBm	10mA	SPI	
SX1273	860-1020 MHz	6-9	125-500 kHz	-130 dBm	10mA	SPI	
SX1276	137-1020 MHz	6-12	7.8-500 kHz	-148 dBm	9.9mA	SPI	
SX1277	137-1020 MHz	6-9	7.8-500 kHz	-139 dBm	9.9mA	SPI	
SX1278	137-525 MHz	6-12	7.8-500 kHz	-148 dBm	9.9mA	SPI	
SX1279	137-960 MHz	6-12	7.8-500 kHz	-148 dBm	9.9mA	SPI	
SX1261	TODO	TODO	TODO	TODO	4.6mA	TODO	
RFM95W	868/915 MHz	6-12	7.8-500 kHz	-148 dBm	10.3 mA	SPI	
RFM97W	868/915 MHz	6-9	7.8-500 kHz	-139 dBm	10.3 mA	SPI	
RFM96W/RFM98W	433/470 MHz	6-12	7.8 - 500 kHz	-148 dBm	10.3 mA	SPI	



## Kapitola 4

# TODO Porovnanie existujucich rieseni

TODO tu daky text

TODO porovnat ich voci sebe

### 4.1 Lora mesher

Pouziva distance vector routing protocol. Vytvara si routovaci tabulku, kde zaznamenava IDcka nodov, cez ktore susedne nody sa knim dostane a kolko hopov ho to bude stat.

Kazda noda drzi routing table, periodicky je updatovana cez specialny typ packetu, ktorý sa posielá vsetkymi nodami v sieti. (routing packet)

Pouziva freeRtos na zabezpecenie schedulingu taskov. Rozlicne tasky sa staraju o prijatie a odoslanie packetov, iny task sa stara o samotne spracovanie packetov.

### 4.2 Meshtastic

Mesh siet tvorena lora modulmi. Princip fungovania je zalozeny na jednoduchom multi-hop floodingu. Kazda node znovu odvysiela prijaty packet (pokial nedosiel maxhop na 0) az kym sa packet nedostane do destinacie napriec mesh sietou.

Pouzivane Lora moduly maju zabudovany bluetooth chip, vďaka ktorému je mozne k modulu pripojiť smartphone, ktorý sluzi ako rozhranie pre uzivatela. Cez aplikáciu v mobile potom vytvara a prijma spravy, ktore su cez bluetooth posielane do modulu a cez lora sa posielaju do siete.

Dosah siete sa da rozsirit cez pripojenie k oficialnemu meshtastic mqtt brokerovi. Umoznuje to tak prepojiť mensie lokalne mesh siete do globalnej siete. TODO pozriet viac k tomuto

Myslienka meshtasticu spociva v tom, ze vytvara komunikacnu siet na miestach kde bezne nieje napr. mobilny signal.(V horach)

timestamp sa posielá iba v GPS datach. TODO pridať text ktomu ze sa posielá pozícia z gpsky.

## 4.3 LoRaBlink

Multi-hop protokol, ktorý používa časovú synchronizáciu medzi nodami. Časová synchronizácia definuje sloty na prístup ku prenosovému kanálu. Správa sa sieťou s ňou pomocou floodingu.

Sieť sa skladá z jedného datasinku (gateway) a viacerých nodov, ktoré posielajú data do data-sinku alebo data z neho prijímajú. V určitých intervaloch datasink vyšle tzv. beacon. Tento slúži na časovú synchronizáciu a znamená novú epochu. Každá epocha obsahuje  $N$  slotov, v ktorých môžu nody vysielать data. Beacon správa obsahuje hop count, ktorá udáva vzdialenosť ku data-sinku.

Keď node prijme beacon signal, vyšle svoj vlastný beacon signal v ďalšom voľnom slot, ktorý vyberá na základe vzdialenosti od data-sinku.

Keď node potrebuje poslať data, tak vyberie ďalší voľný slot a v ňom vyšle data. Ak tieto data prijme node, ktorý nie je sink a jeho hop count ku sinku je menší ako hop count vysielajúcej nody, tak data v ďalšom slot retransmitne. Toto sa opakuje až kým data nedosiahnu datasink. TODO doplniť, spraviť lepší popis

- je to sieť vyžadujúca jeden hlavný node (data-sink/gateway), tento node je potrebný na riadenie siete, pretože všetky ostatné nody sa synchronizujú na neho

## **Kapitola 5**

# **TODO Vlastna implementacia**

## Kapitola 6

**TODO Testovanie vykonnosti + test voci existujucim protokolom?**

# Literatura

1. *LoRa details*. Dostupné tiež z: [http://wireless.ictp.it/school\\_2017/Slides/LoRaDetails.pdf](http://wireless.ictp.it/school_2017/Slides/LoRaDetails.pdf).
2. *LoRa detailldocs*. Dostupné tiež z: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>.
3. *LoRaWAN Physical Layer / LoRa Physical Layer*. Dostupné tiež z: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LoRaWAN-Physical-Layer.html>.
4. *Český Telekomunikační Úřad*. Dostupné tiež z: <https://www.ctu.cz/>.
5. *všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. Dostupné tiež z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-072021-8.pdf>.
6. *LoRa alliance* [online] [cit. 2022-07-10]. Dostupné z : <https://lora-alliance.org/>.
7. *Semtech* [online] [cit. 2022-07-10]. Dostupné z : <https://www.semtech.com/>.
8. *HopeRF* [online] [cit. 2022-07-10]. Dostupné z : <https://www.hoperf.com/>.