

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

Zoznam použitých symbolov a skratiek	7
Zoznam obrázkov	8
Zoznam tabuliek	9
1 Úvod	10
2 LoRa a spôsob prenosu dát	11
2.1 Legislativa	12
2.2 LoRa parametre	13
2.3 LoRaWAN	13
3 Dostupné LoRa moduly	15
3.1 SX127x/SX126x	15
3.2 RFM9xW	16
3.3 Moduly a zariadenia použité v tejto práci	17
4 Existujúce riešenia	18
4.1 Lora mesher	18
4.2 Meshtastic	19
4.3 LoRaBlink	19
4.4 Pymesh	20
4.5 Synchronous LoRa Mesh	20
4.6 Porovnanie voči nášmu riešeniu	21
5 TODO Vlastna implementacia	22
6 TODO Testovanie vykonnosti + test voci existujucim protokolom?	23
Literatura	24

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 [3]	11
2.2	Nemodulovaný a modulovaný LoRa signál. Prevzaté z [4], [5]	12
4.1	Schéma Synchronous Lora Mesh. Prevzaté z [14]	21

Zoznam tabuliek

2.1	Frekvenčné pásma používané pre LoRa	13
3.1	Parametre Semtech modemov	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.

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, a hviezdicovou topológiou, čož nieje v niektorých prípadoch užitia vhodné. Neustále vznikajú nové protokoly, ktoré by tieto problémy riešili, napríklad za použitia mesh topológií (napr. Meshtastic [1], LoRaMesher [2]).

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 hocikákeho iného uzla, majú prístup do siete.

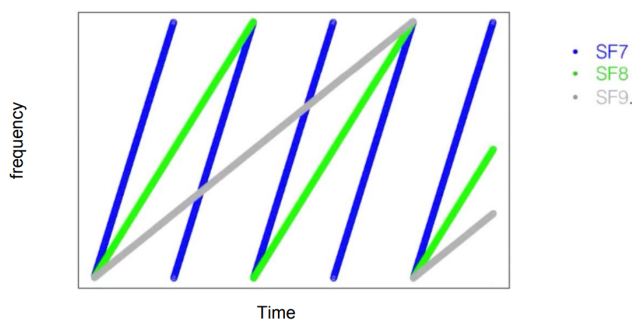
Kapitola 2

LoRa a spôsob prenosu dát

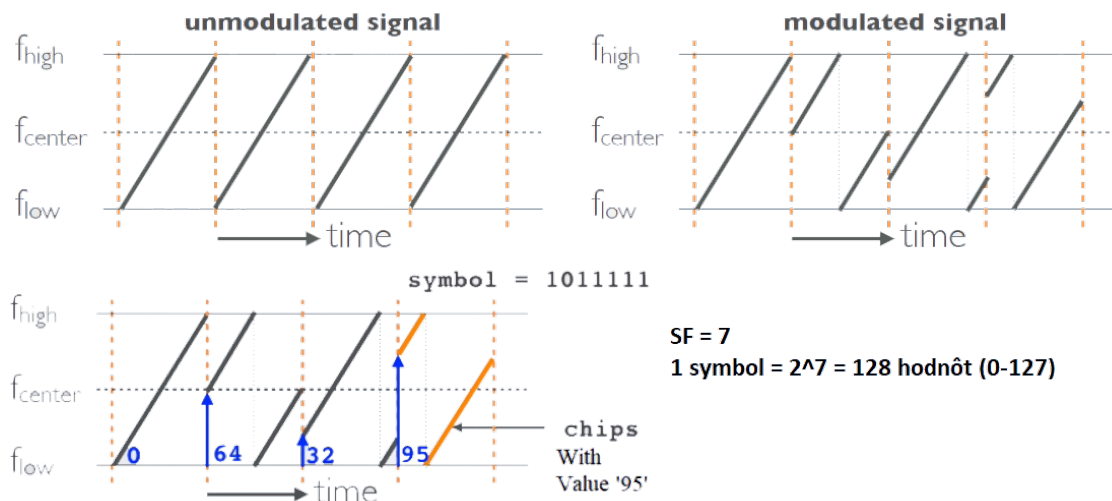
LoRa je proprietárna technológia na bezdrôtový prenos dát za pomoci rádiových vĺn. Používa bezlicenčné rádiové pásma, ktoré sú odlišné medzi Európou, Amerikou a Áziou a poskytuje rádiový prenos na veľkú vzdialenosť s nízkou spotrebou energie. V otvorenom priestranstve môže mať rádiový prenos dosah až 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 [3]



Obr. 2.2: Nemodulovaný a modulovaný LoRa signál. Prevzaté z [4], [5]

Existujú dva druhy chirp signálov, 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 závisle od vybraného spreading factoru. Jeden chirp ma 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.

2.1 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 vyselať v rámci jednej hodiny a maximálny vysielací výkon, akým môžeme signal vyselať. Určuje sa kľúčovací pomer, ktorý hovorí koľko percent času z nejakého celkového času môže vysielateľ vyselať.

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

Český Telekomunikačný úrad [6] stanovuje vo všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8 [7], 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 (14 dBm). Znamená to teda, že zariadenia môžu každú hodinu vyselať maximálne po dobu 36 sekúnd. Pre pásmo 869,40–869,65 MHz je ale udelená výnimka, ktorá umožňuje vyselať s kľúčovacím pomerom 10 % a maximálnym vysielacím výkonom 500 mW (27 dBm).

2.2 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, vid Tabuľka 2.1. V Európe je možné mimo 866 MHz pásma používať aj 433 MHz pásmo. Okrem toho existuje ešte globálne používaná frekvencia 2,4 GHz.

Tabuľka 2.1: Frekvenčné pásma používané pre LoRa

Region	Frekvencia (MHz)
Ázia	433
Európa, Rusko, India, Afrika	863–870
Severná Amerika	902–928
Austrália	915–928
Kanada	779–787
Čína	779–787, 470–510

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 bandwidthe 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:

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

2.3 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 [8].

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

LoRaWAN definuje tri triedy zariadení, ktoré sa v sieti vyskytujú. Sú nimi triedy A, B a C, kde do triedy A spadajú zariadenia väčšinou poháňané batériami, ktoré po odvysielaní svojich dát otvárajú dve prijímacie okna, v ktorých čakajú na príjem dát z gateway. Trieda B je rozšírením triedy A. Zariadenia v tejto triede môžu otvárať dodatočné prijímacie okna v naplánovaných časových intervaloch. Zariadenia z triedy C môžu prijímať neustále. Z tohto dôvodu majú vyššiu spotrebu energie a zvyčajne sú pripojené k stálemu napájaniu.

TODO tu este daky text na vyplnenie strany

Kapitola 3

Dostupné LoRa moduly

Pri práci s LoRa technológiou máme na výber z rôznych modulov od rôznych výrobcov. Moduly môžeme rozdeliť podľa použitia na moduly pre koncové zariadenia a moduly pre gateway. Moduly pre koncové zariadenia obvykle dokážu prijímať a odosielať iba na jednom kanále (kombinácia LoRa parametrov – BW, SF a frekvencia) súčasne a majú nízku spotrebu energie. Moduly pre gateway dokážu prijímať a odosielať na viacerých kanáloch súčasne a majú vyššiu spotrebu energie.

V tejto časti sa budeme zaoberať dostupnými modulmi pre koncové zariadenia. Keďže je technológia LoRa patentovaná výrobcom Semtech [9], tak všetky dostupné LoRa chipy su od tohto výrobcu a moduly od iných výrobcov sú založené na používaní týchto chipov.

3.1 SX127x/SX126x

Výrobca Semtech [9], prináša LoRa chipy série SX127x a SX126x. Ponúkajú vysoký výkon za pomerne nízku cenu a ako sme už spomínali, ostatné LoRa moduly implementujú tieto chipy – modemy a rozširujú ich o ďalšiu funkcionálnosť.

3.1.1 SX127x

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

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

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

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

3.1.2 SX126x

Modemy zo série SX126x - SX1261/62/68 sú následovníkmi modemov SX127x. Majú väčší vysielací výkon vďaka integrovanému zosilovaču a menšiu spotrebu energie. Obsahujú precízny TCXO oscilátor, ktorý zabezpečuje presnejšie a stabilnejšie riadenie počas prevádzky modemu. Okrem LoRa modulácie obsahujú aj G(FSK) moduláciu, ktorá je vhodná pre staršie prípady použitia.

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

Tabuľka 3.1: Parametre Semtech modemov

Modem	Frekvencia	SF	BW (kHz)	Citlivosť	Spotreba ⁰	Rozhranie	Výkon ¹	Cena ²
SX1272	860–1020 MHz	6–12	125–500	-137 dBm	11,2 mA	SPI	20 dbm	9€
SX1273	860–1020 MHz	6–9	125–500	-130 dBm	11,2 mA	SPI	20 dbm	7€
SX1276	137–1020 MHz	6–12	7,8–500	-148 dBm	12 mA	SPI	20 dbm	10€
SX1277	137–1020 MHz	6–9	7,8–500	-139 dBm	12 mA	SPI	20 dbm	7€
SX1278	137–525 MHz	6–12	7,8–500	-148 dBm	12 mA	SPI	20 dbm	8€
SX1279	137–960 MHz	6–12	7,8–500	-148 dBm	12 mA	SPI, UART	20 dbm	11€
SX1261	150–690 MHz	5–12	7,80–500	-125 dBm	8 mA	SPI	15 dbm	7€
SX1262	150–690 MHz	5–12	7,80–500	-125 dBm	8 mA	SPI	22 dbm	8€
SX1268	410–810 MHz	5–12	7,80–500	-148 dBm	4.6 mA	SPI	22 dbm	7€

3.2 RFM9xW

Moduly RFM95W/96W/98W od výrobcu HopeRF [10] implementujú SX LoRa modemy od výrobcu Semtech. Jedná sa o jednoduchý modul, ktorý obsahuje všetku riadiacu elektroniku potrebnú na riadenie Semtech LoRa modemu. Okrem riadiacej elektroniky obsahuje modul aj zosilovač signálu (+14 dBm), ktorý zvyšuje dosah bezdrôtového prenosu.

Existuje niekoľko verzií modulov RFM9xW, kde každá verzia používa iný semtech LoRa modem a zdieľa parametre daného modemu.

⁰Spotreba počas prijímania (mA)

¹Maximálny vysielací výkon

²Cena platná ku Q4 2022

3.3 Moduly a zariadenia použité v tejto práci

Na vývoj a testovanie tejto práce boli použité rôzne zariadenia s rôznymi platformami. Na simulovanie jednoduchých koncových zariadení, ktoré môžu predstavovať napríklad nejaký senzor, boli použité mikrokontroléry TTGO od výrobcu LILYGO [11].

Okrem mikrokontrolérov TTGO boli použité aj mikrokontroléry Raspberry Pi Pico a mikropočítač Raspberry Pi. Všetky mikrokontroléry môžu byť rozšírené o batériu a byť mobilné.

3.3.1 TTGO LoRa32

Mikrokontrolér založený na module ESP32. Obsahuje Wi-Fi a bluetooth. Používa SX1276 LoRa modem. Dá sa prepnúť do úsporného režimu, ktorý znižuje spotrebu mikrokontroléru na 0,6 mA. Mikrokontrolér obsahuje aj display, ktorý je pripojený cez I2C rozhranie.

3.3.2 TTGO T-Beam

Tento mikrokontrolér je taktiež založený na module ESP32 a používa SX1276 LoRa modem. Okrem Wi-Fi a bluetooth obsahuje aj GPS modul. V režime spánku má spotrebu 0,2 mA.

3.3.3 Raspberry Pi Pico

Mikrokontrolér založený na dvoj-jadrovom Arm procesore. Existuje verzia s Wi-Fi modulom. Na programovanie sa využíva microPython. V tejto práci boli mikrokontroléry použité spolu s RFM96W modulmi pre prácu s LoRa.

3.3.4 Raspberry Pi 3?4? TODO

Na rozdiel od predchádzajúcich mikrokontrolérov má tento mikropočítač oveľa väčší výkon a pamäť. Z toho dôvodu bude na tomto zariadení pridaná možnosť monitorovania a zachytávania správ v LoRa sieti. Zariadenie obsahuje ethernetový port, ktorý môže slúžiť na pevné pripojenie do internetovej siete. Pre prácu s LoRa bude použitý RFM96W modul.

Kapitola 4

Existujúce riešenia

Téma mesh sietí je v tejto dobe veľmi aktuálna a vývojári sa snažia vytvoriť rôzne riešenia, ktoré by boli vhodné pre rôzne účely. Existujú rozvinuté projekty ako napríklad Meshtastic, ktorý sa snaží vytvoriť rozsiahlu decentralizovanú mesh sieť za použitia lacných zariadení.

Ďalším zaujímavým projektom je Armachat [12], ktorý ponúka možnosť komunikácie v prípade nedostupnosti ostatných sietí, napríklad po nejakej prírodnej alebo inej katastrofe. Súčasťou projektu Armachat sú dostupné návrhy plošných spojov, ktoré implementujú Raspberry Pi Pico mikrokontroléry, RFMx LoRa moduly, display a ďalšie vymoženosti. Výsledkom poskladania týchto plošných spojov je malé mobilné zariadenie s klávesnicou a displejom, ktoré sa dá použiť na komunikáciu prostredníctvom LoRa siete. Originálny projekt avšak zatiaľ nepodporuje využívanie mesh topológie (rozpracovaná verzia, ktorá využíva protokol Meshtastic), existujú však forky projektu, ktoré sú o meshe rozšírené.

TODO porovnať ich vreci seba, až na konci

4.1 Lora mesher

LoRaMesher [2] je knižnica, ktorú je možné použiť na komunikáciu cez LoRa mesh sieť.

Na smerovanie v sieti sa používa distance vector routing protocol. Tento protokol vyberá cestu, kadiaľ pôjde správa od odosielateľa k príjemcovi, na základe najlepšej cesty. Najlepšiu cestu definuje ako cestu s najmenším počtom hopov – preskokov medzi uzlami v mesh sieti.

K realizácii distance vector smerovania je potrebné mať smerovaciu tabuľku, ktorá obsahuje informácie o ID uzlov, cez ktoré susedné uzly sa dajú dosiahnuť a koľko preskokov bude potrebných na dosiahnutie týchto uzlov. Smerovacia tabuľka je periodicky aktualizovaná cez špeciálny typ správ, ktoré sú odosielané všetkými uzlami v sieti. Túto smerovaciu tabuľku si drží každý uzol v sieti.

LoRaMesher používa FreeRTOS, čo je operačný systém reálneho času. Takéto operačné systémy garantujú dokončenie úloh v určitom čase. FreeRTOS je použitý na zabezpečenie plánovania úloh.

Rozličné úlohy sa starajú o prijatie a odoslanie packetov, iné úlohy sa starajú o samotne spracovanie prijatých packetov.

LoRaMesher dokáže nájsť novo vytvorené uzly v sieti vďaka smerovaciemu protokolu. Pri odoslaní správ čaká na prijatie ACK správy, ktorá potvrdzuje, že správa bola prijatá a tým zaisťuje spoľahlivosť. Správy väčšie ako 222 bajtov rozdeľuje na viacero správ, ktoré pošle postupne.

4.2 Meshtastic

Meshtastic [1] vytvára mesh sieť za použitia lacných mikrokontrolérov s LoRa modulmi. Myšlienka tohto projektu spočíva v tom, že vytvára komunikačnú sieť na miestach kde neexistuje spoľahlivá infraštruktúra na bezdrôtovú komunikáciu (napr. v horách).

Posielanie správ v sieti je založené na jednoduchom multi-hop floodingu. Každý uzol znovu odvysiela packet, ktorý prijal (pokiaľ nedošiel počet preskokov na 0), až kým sa packet nedostane do určenej destinácie naprieč mesh sieťou. Prenášane správy su šifrované.

Používané zariadenia s LoRa modulmi majú zabudovaný bluetooth chip, vďaka ktorému je možné sa k zariadeniu pripojiť cez smartphone, ktorý slúži ako rozhranie pre užívateľa. Cez aplikáciu v smartphone môže používateľ vytvárať a prijímať správy. Správy sa cez bluetooth prenášajú zo smartphone do zariadenia a odošlu sa cez LoRa do siete.

Meshtastic poskytuje možnosť pripojenia sa k oficiálnemu meshtastic mqtt brokerovi. Toto umožňuje prepojiť malé lokálne mesh siete do väčšej globálnej siete a tak rozšíriť dosah siete.

4.3 LoRaBlink

Multi-hop protokol, ktorý požíva časovú synchronizáciu medzi uzlami. Časová synchronizácia definuje sloty, v ktorých môže uzol pristupovať ku prenosovému médiu a vysielat svoje dáta. Správy sa sieťou šíria pomocou multi-hop floodingu.

Sieť sa skladá z jedného datasinku (gateway) a viacerých uzlov. Uzly siete posielajú data do datasinku alebo data z neho prijímajú. V určitých intervaloch datasink vyšle tzv. beacon signál. Tento signál slúži na časovú synchronizáciu medzi uzlami a značí začiatok novej epochy. Každá epocha obsahuje N slotov, v ktorých môžu uzly vysielat data. Beacon správa obsahuje hop count, ktorá udáva vzdialenosť ku datasinku. Keď nejaký uzol prijme beacon signál, vyšle svoj vlastný beacon signál v ďalšom voľnom slote, ktorý vyberá na základe vzdialenosti od datasinku (hop count).

Keď uzol potrebuje poslať nejaké data, tak vyberie najskorší voľný slot a v nom vysielat data. Ak tieto data prijme uzol, ktorý nieje datasink a hop count daného uzlu ku sinku je menší ako hop count vysielajúceho uzlu, tak data v ďalšom slote znovu prepošle. Toto sa opakuje, až kým data nedosiahnu datasink.

Takto tvorená sieť avšak vyžaduje existenciu nejakého hlavného uzlu (datasinku), ktorý je potrebný na riadenie siete prostredníctvom časovej synchronizácie.

4.4 Pymesh

Pymesh je súčasťou Pycom [13] ekosystému. Tento ekosystém je určený na vývoj IoT systémov. Ponúka rôzne zariadenia, ktoré su určené na použitie s týmto ekosystémom. Zariadenia WiFi, bluetooth a LoRa. Zariadenia je možné rozšíriť o rôzne moduly so senzormi, ktoré rozširujú ich schopnosti.

PyMesh sieť sa skladá z uzlov, ktoré môžu vystupovať v roli gateway alebo bežného uzla. Uzly typu gateway su označované ako Border Routers a prepájajú LoRa sieť s internetom. Uzly v sieti môžu komunikovať ad-hoc. V sieti môže dôjsť k situácii kedy bude chcieť viacero uzlov vyslať v rovnakom čase a došlo by tak ku kolíziám. Aby sa zabránilo takýmto situáciám, je použitá metóda Listen Before Talk, pri ktorej sa pred vysielaním signálu overí, či nie je v sieti už niekto iný, kto by vysielal. Pokiaľ je, tak sa signál vyšle neskôr.

PyMesh je primárne určený na použitie s Pycom zariadeniami a použitie na inom zariadení by vyžadovalo väčšie úpravy zdrojového kódu.

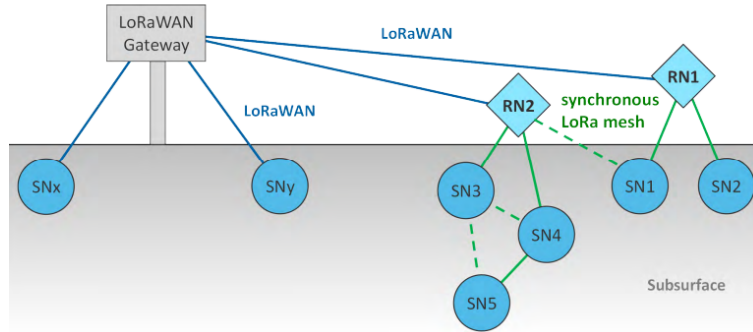
4.5 Synchronous LoRa Mesh

Tento projekt[14] vznikol z potreby získavania real-time dát z podzemných kanalizácií. Tieto dáta sú potrebné k monitorovaniu a predikciám kritických situácií akými sú napríklad záplavy.

LoRaWan však nema moc veľký dosah do podzemia. Z toho dôvodu by bolo potrebné v podzemných priestoroch implementovať LoRaWan gateway-e, ktoré su ale energeticky náročné, drahé a vyžadujú pevné pripojenie do elektrickej a prípadne aj internetovej siete. Okrem toho, by museli byť všetky ostatné uzly v podzemnej sieti v dosahu gateway a pri väčšej podzemnej sieti by teda bolo potrebné implementovať viacero LoRaWan gateway.

Tento projekt sa snaží vyriešiť tieto problémy. Prináša protokol, ktorý rozširuje LoRaWan o tzv. repeater uzly (RN) vid' Obr. 4.1. Tieto uzly sa vyskytujú na povrchu a preposielajú dáta z podzemných monitorovacích uzlov (sensor node - SN) do LoRaWan siete. Monitorovacie uzly pod zemou tvoria mesh sieť a RN plní funkciu riadiaceho uzlu pre podzemnú mesh sieť. Komunikácia medzi RN a SN je synchronizovaná pomocou presného časovania, čo umožňuje koordináciu zmeny stavov SN z režimu spánku do normálneho režimu v čase, kedy potrebuje SN prijímať a odosielať dáta. Komunikácia sa cez uzly šíri multi-hop prístupom, za použitia smerovacej tabuľky.

Protokol používa na riadenie komunikácie metódu TDMA. RN priradí každej SN časový slot, v ktorom SN môže vyslať alebo prijať dáta. Monitorovacie uzly su väčšinu času v režime spánku, zobudia sa len v ich určenom časovom slote a vďaka tomu maju tieto uzly nízku spotrebu energie.



Obr. 4.1: Schéma Synchronous Lora Mesh. Prevzaté z [14]

Novo pripojený uzol do siete musí čakať na periodicky beacon, vysielaný RN uzlom. Všetky uzly si držia v sebe smerovaciu tabuľku. Po pripojení nového uzla sa sieťou sa propaguje správa na aktualizovanie smerovacej tabuľky.

4.6 Porovnanie voči nášmu riešeniu

Niektoré zo spomenutých riešení využívajú smerovacie tabuľky na efektívnejší prenos dát v rámci siete. Smerovacie tabuľky sú však limitáciou pokiaľ chceme dosiahnuť mobility uzlov. V tom prípade je potrebné zabezpečiť dostatočne časté aktualizácie smerovacích tabuliek.

Niektoré spomenuté riešenia limitujú komunikáciu medzi uzlami na vyhradené časové okná, mimo ktoré su uzly v úspornom režime.

Protokol navrhnutý v tejto práci nebude využívať žiadne smerovacie tabuľky. Vďaka tomu dosiahneme mobility uzlov bez potreby periodických aktualizácií smerovacích tabuliek. Protokol nebude používať žiadnu časovú synchronizáciu ani časové okná vyhradené na komunikáciu, uzly siete tak budú môcť prijímať a odosielať dáta hocikedy.

Funkcionalita navrhnutého protokolu bude podobná ako projekt Meshtastic, kedy sa správa v sieti preposiela až kým nedorazí do destinácie. Správa sa odošle a uzol, ktorý túto správu prijal ako posledný ju prepošle ďalej. Toto sa opakuje na ďalších uzloch až kým sa správa nedostane do destinácie alebo kým správe nedojde hoplimit.

Ak nieje destinácia v dosahu, tak o správu prideme. Tento problém vyriešime tak, že odosielateľ si bude odoslané správy ukladať a v prípade, že sa nepodarí správu doručiť, môže ju opätovne odoslať niekedy neskôr.

Navrhnutý protokol nieje závislý na žiadnych špeciálnych uzloch typu gateway, prípadne riadiacich uzloch. Každý uzol v sieti môže byť primitívnym uzlom, ktorý bude prijímať a preposielať dáta. Vďaka tomu môžu byť uzly realizované prostredníctvom lacných a malých zariadení.

Kapitola 5

TODO Vlastna implementacia

Kapitola 6

TODO Testovanie vykonnosti + test voci existujucim protokolom?

Literatura

1. *Meshtastic*. Dostupné tiež z: <https://meshtastic.org/>.
2. *LoRaMesher*. Dostupné tiež z: <https://github.com/LoRaMesher/LoRaMesher>.
3. *LoRa details*. Dostupné tiež z: http://wireless.ictp.it/school_2017/Slides/LoRaDetails.pdf.
4. *LoRa detailldocs*. Dostupné tiež z: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>.
5. *LoRaWAN Physical Layer / LoRa Physical Layer*. Dostupné tiež z: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LoRaWAN-Physical-Layer.html>.
6. *Český Telekomunikační Úřad*. Dostupné tiež z: <https://www.ctu.cz/>.
7. *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>.
8. *LoRa alliance* [online] [cit. 2022-07-10]. Dostupné z : <https://lora-alliance.org/>.
9. *Semtech* [online] [cit. 2022-07-10]. Dostupné z : <https://www.semtech.com/>.
10. *HopeRF* [online] [cit. 2022-07-10]. Dostupné z : <https://www.hoperf.com/>.
11. *LILYGO*. Dostupné tiež z: <http://www.lilygo.cn/>.
12. *Armachat*. Dostupné tiež z: <https://github.com/bobricius/armachat>.
13. *Pycom*. Dostupné tiež z: <https://docs.pycom.io/>.
14. *Synchronous LoRa Mesh Network to Monitor Processes in Underground Infrastructure*. Dostupné tiež z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8703036&tag=1>.