



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Low power wireless sensor network

Tomáš Hyhlík

Vedoucí: Ing. Bc. Marek Neruda, Ph.D
Školitel–specialista: Ing. Bc. Lukáš Vojtěch, Ph.D
Obor: Elektronika a komunikace
Studijní program: Elektronika
Říjen 2019

Poděkování **Prohlášení**

Abstrakt

Abstract

Klíčová slova:

Vedoucí: Ing. Bc. Marek Neruda, Ph.D

Keywords:

Title translation: Low power wireless
sensor network

Obsah

0.1 Seznam zkratek	1	3.4.3 Statusy	10
1 Introduction	2	3.4.4 Přidávání LoRaWAN zařízení do systému	11
2 Stanovení požadavků návrhu zařízení	4	3.4.5 Odesílání dat z koncových zařízení	12
2.1 Přístupové systémy	4	3.4.6 Potvrzení	12
2.2 Implementace IoT do přístupového systému firmy IMA	5	3.4.7 Dotaz na příznaky	12
3 Realizace zařízení	6	3.5 Komunikace přes USB	13
3.1 Výběr přenosové technologie	6	3.5.1 Log aplikace	13
3.2 Výběr komponent	6	3.5.2 Konfigurace systému	14
3.2.1 Microcontroller	6	3.6 Koncová zařízení	17
3.2.2 LoRa transceiver	7	3.6.1 Zpracování dat jednotlivých typů koncových zařízení	17
3.2.3 RS485 transceiver	7	3.6.2 Přidávání koncových zařízení ze serveru K4	19
3.3 Implementace LoRaWAN sítě ...	8	3.7 Využití non-volatile paměti gatewaye	19
3.4 Implementace komunikačního protokolu v síti IMA_RS485 pro komunikaci s control panelem	8	3.8 Zapojení	19
3.4.1 Syntaxe příkazů	10	3.9 Naprogramování	20
3.4.2 Adresace zařízení v síti	10	3.9.1 Zdrojové soubory projektu ...	20
		3.9.2 Nahrání programu do MCU .	21



Obrázky

2.1 Příklad architektury přístupového systému [10]	5
3.1 Vývojový kit NUCLEO-L073RZ [1]	7
3.2 LoRa transceiver RFM95w [3]	7
3.3 RS485 transceiver [7]	8
3.4 foto zapojení	20

Tabulky

3.1 Fyzické vlastnosti IMA_RS485 sítě	9
3.2 Syntaxe příkazu pro komunikaci v síti IMA_RS485	10
3.3 Příklad sekvence příkazů odesílaných mezi zařízením typu master a zařízením typu slave během předávání seznamu LoRaWAN device address koncových zařízení	11
3.4 Příklad dat příkazu "průchod" odeslaného z gatewaye na zařízení typu master, obsahující data z koncových zařízení	12
3.5 Nastavení USB terminálu	13
3.6 Defaultní konfigurace systému	17
3.7 Typy koncových zařízení	17
3.8 Pinout připojení externích periférií k procesoru	20

0.1 Seznam zkratek

AI	Artifical Intelligence
AppSKey	Application Session Key
CPU	Central Processing Unit
CR	Carriage Return
CRC	Cyclic Redundancy Check
HW	HardWare
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, scientific and medical
LAN	Local Area Network
LF	Line Feed
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LPWSN	Low Power Wireless Sensor Network
MCU	Micro Controller Unit
NwkSKey	Network Session Key
RF	Radio Frequency
WSN	Wireless Sensor Network
SF	Spreading Factor

Kapitola 1

Introduction

There is a big growth in demand and use cases of IoT applications including security, asset tracking, agriculture, smart metering, smart cities, and smart homes as well as the growth of IoT wireless technologies, which require long range, low power consumption, low data rate and low cost. For short-range IoT applications like smart homes is widely used Zigbee or Bluetooth which use ISM band 2.4 GHz. For long range applications is formed a new type of technologies called low power wide area network (LPWAN) [14], with range up to 10–15 km in rural areas and 2–5 km in urban areas [15] and can have one of the following topologies: star (centralized), star of stars (decentralized) and mesh (distributed) [11]. The very low power performance should allow sensor nodes very long battery life, even greater than 10 years. The low cost of HW is being reached by fully integrated transceivers and minimizing number of off-chip components [13]. Many new LPWAN wireless communication technologies appeared in recent years with licensed and unlicensed band. The most widely used unlicenced technologies are LoRa and SigFox, using ISM band, 915 or 868 MHz (depends on region) or 433 MHz. These ISM bands are limited to allow these technologies to transmit only up to hundreds of packets per device per day. The most widely used licensed technologies are based on LTE and these are NB-IoT and CAT-M.

The industry of IoT is growing due to its huge potential. Cisco study [12] says that IoT will be combined with other technologies such as artifical inteligence (AI), fog computing and blockchain. Such combination of technologies will provide greater value of investment for companies. The IoT security becomes one of the most relevant requirements. More organizations will become to cooperate with each other in solution development. More open standards, open architectures and regulations is to come in the future.

The WSN based IoT applications are being implemented in various architecture combinations. Article [16] includes design of hybrid (wired /

wireless) smart metering system for multiple farms with multiple LPWAN gateways where nodes are sensors and actuators and communicate via MQTT. As the future work there is said that it can also be used for monitoring grazing livestock by attachin nodes to its bodies and also the system is supposed to be used for studying the development of environmental algorithms for optimization of plants growth with use of environmental data and plant growth data. Another article [17] describes design of location measurement IoT application based on LoRa, where a LPWAN is established by LoRa receiver plugged into PC via USB port, so the sensor data are directly received and analyzed in PC. Article [18] icludes design of vehicle access control system based on Zigbee network which is connected through network coodrinator via RS232 to PC.

None of these mentioned articles describe implementation of WSN into any existing system. This article aims to extend access control system with IoT which could be useful for implementation of smart building applications such as controlling of lights, heating and so on and measuring temperature, humidity, CO₂ and so on.

Kapitola 2

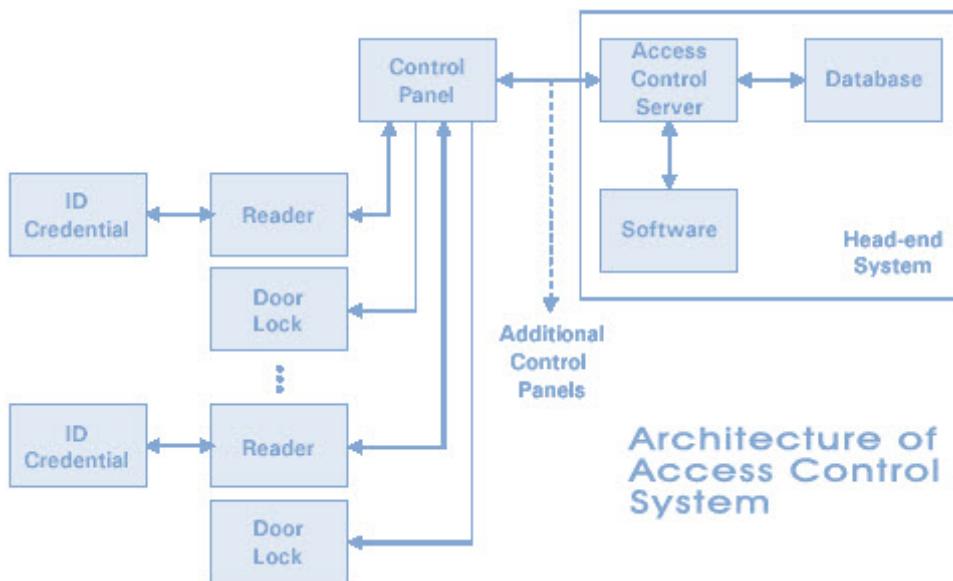
Stanovení požadavků návrhu zařízení

Účelem tohoto projektu je rozšířit přístupový systém firmy IMA o IoT, aby bylo možné snímat veličiny jako je teplota, vlhkost, atd. bezdrátovými senzory rozmístěnými po budově. Práce tedy zahrnuje návrh, realizace a otestování gateways, která shromažďuje data z bezdrátových koncových zařízení a přeposílá je na control panel přístupového systému. Předpokládá se, že koncová zařízení jsou senzory nebo aktuatory napájeny z baterie, tudíž pro jejich dlouhodobou životnost je kladen důraz na nízkou spotřebu vybrané bezdrátové technologie.

2.1 Přístupové systémy

Přístupové systémy jsou elektronické systémy řídící skrze síť přístup uživatelů do budov či objektů na základě ověření jejich identity [10]. V obrázku 2.1 je znázorněn příklad infrastruktury přístupového systému.

ID Credential je identifikátor uživatele, např. RFID tag, otisk prstu, QR kód atd. Reader slouží k sejmání dat identifikátoru uživatele a odeslání do control panelu Door lock slouží k ovládání přístupu uživatele do objektu. Control panel vytváří rozhranní mezi access control systémem a dvojicemi readerů a door locků. Obvykle vytváří síť například poRS485, kde jsou zapojeny jednotky až desítky těchto dvojic. V jednom systému může být jeden nebo více control panelů vytvářejících síť o jedné nebo více dvojicích reader a door lock. Control panel komunikuje s access control systémem například přes ethernet na bázi protokolu TCP/IP. Databáze obsahuje uživatelská ID. Na access control serveru je spuštěn software umožňující spravování databáze a komunikaci se všemi control panely systému. Prokáže-li se uživatel pomocí ID credential readeru, reader sejmí ID uživatele a odešle na control panel, který jej následně přepošle na access control server. Software access control vyhledá přijaté user ID v databázi a je-li nalezeno, pošle na odpovídající control panel příkaz k sepnutí odpovídajícího door locku.



Obrázek 2.1: Příklad architektury přístupového systému [10]

2.2 Implementace IoT do přístupového systému firmy IMA

V infrastruktuře přístupového systému v obr. 2.1 je reader nahrazen gateway a ID credential bezdrátovým senzorem. Gateway pak komunikuje s control panelem přes rozhranní RS485 s proprietárním sítovým protokolem navrženým ve firmě IMA. Stávající přístupový systém je navržen tak, že po spuštění připojeného readeru je mu ze serveru předán seznam offline RFID karet. Pro gateway to je seznam adres koncových zařízení senzorové sítě. V případě, že uživatel přiloží ID credential odpovídající některému ze seznamu offline karet, reader přepoše příkaz "průchod". Ekvivalentně to platí pro gateway. V případě že gateway přijme packet od koncového zařízení s daty ze senzorů a adresa koncového zařízení je obsažena v seznamu adres koncových zařízení, gateway odešle příkaz "průchod" obsahující adresu koncového zařízení a data koncového zařízení. Problém je ale v tom, že příkaz "průchod" má kapacitu na data koncového zařízení pouze 6 byte. Rozšíření vlastností tohoto protokolu by znamenalo mnoho komplikací, cílem je tedy implementace gatewaye tak, aniž by bylo nutné protokol rozšiřovat.

Kapitola 3

Realizace zařízení

3.1 Výběr přenosové technologie

Pro implementaci LPWSN je použita RF technologie LoRa se standardizovaným síťovým protokolem LoRaWAN, ale s požitím pouze jednoho kanálu. Tento způsob řešení se liší od standardu omezením na pouze jeden kanál a SF vysílání. Jedenokanálové řešení bylo zvoleno z toho důvodu, že plnohodnotný LoRa transceiver, který přijímá na všech osmi kanálech je příliš drahý (přibližně desetinásobná cena) a složitý k implementaci, zatímco v tomto projektu je kladen důraz na cenu a jednoduchost řešení.

Vybraná technologie používá topologii typu hvězda, tedy koncová zařízení komunikují přímo s gateway, zbytek času mohou být ve stavu nízké spotřeby, což má pozitivní vliv na životnost baterie. Koncová zařízení od různých výrobců jsou plně kompatibilní s cizí gateway, tudíž není problém je implementovat do tohoto systému. Je pouze třeba je překonfigurovat pro vysílání na jednom použitém kanále a SF.

3.2 Výběr komponent

3.2.1 Microcontroller

Pro toto zařízení je zvolen mikrocontroller STM32L073RZ se zaměřením na nízkou spotřebu, jelikož je levný, má dostačující vlastnosti a je dostupný ve formě vývojového kitu NUCLEO-L073RZ který byl použit pro vývoj zařízení. Mezi hlavní vlastnosti patří [1]:

- Architektura ARM Cortex-M0+ 32-bit RISC
- Interní Flash paměť 192 KB

- Interní SRAM paměť 20 KB
- Interní EEPROM paměť 6 KB
- Až 32 MHz CPU
- 2x SPI, 3x I2C, 4x USART, LIN, ADC

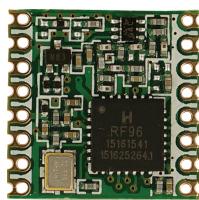
Pořizovací cena kitu přímo na stránce výrobce www.st.com je \$13 [1] [2].



Obrázek 3.1: Vývojový kit NUCLEO-L073RZ [1]

3.2.2 LoRa transceiver

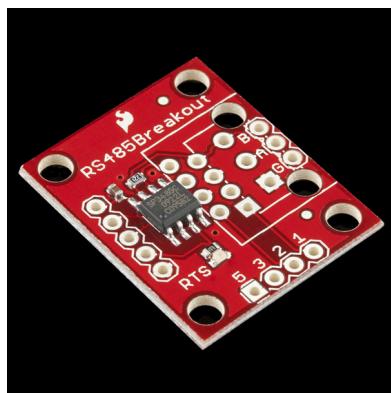
Lora transceiver čip doposud vyrábí pouze Semtech, pro použití v Evropském pásmu je určen typ SX1276. V tomto návrhu je použita deska RFM95w od firmy HopeRF s integrovaným čipem SX1276 [3]. Pro vývoj zařízení byl využit tento transceiver v tzv. Dragino LoRa Shield [4], který má stejně jako použitý vývojový kit, pinout kompatibilní s Arduino UNO. Pořizovací cena samotného transceiveru RFM95w je okolo \$7, cena Dragino Shieldu se pohybuje okolo \$22 na ebay.



Obrázek 3.2: LoRa transceiver RFM95w [3]

3.2.3 RS485 transceiver

SparkFun Transceiver Breakout - RS485 převádí rozhranní UART na RS485, pří vstupním napětí 3.3 V. A je dostupný za cenu okolo \$10 [7].



Obrázek 3.3: RS485 transceiver [7]

3.3 Implementace LoRaWAN sítě

Jednokanálové použití technologie LoRa umožňuje použít transceiver navržený pro koncová zařízení, kterým jsou pakety kontinuálně odposlouchávány na jednom nastaveném kanále a SF. Tyto dva parametry jsou nakonfigurovány na všech zařízeních v síti stejně.

Jak je popsáno v sekci 2.2, použitý protokol pro komunikaci s control panelem přístupového systému firmy IMA zajišťuje posílání dat z koncových zařízení příkazem "průchod", který má kapacitu na data z koncového zařízení pouze 6 B. Systém je proto navržen neobvyklým způsobem. Přijme-li gateway LoRaWAN paket, nejprve zkонтroluje zda zná adresu zařízení, pokud ano, přečte z paměti i typ zařízení, paket dešifruje a dekóduje payload, čímž získá konečné hodnoty senzorů, které pak dále pošle přes RS485 rozhraní na zařízení typu master.

LoRaWAN device address a typ každého zařízení v síti je uložena v EEPROM (non-volatile) paměti gatewaye a jsou nastavována na z access control serveru. Všechna zařízení v síti mají nastavené stejné šifrovací klíče a gateway je má uložené v EEPROM.

Pro tento projekt byla vyvinuta knihovna pro dekódování payloadu na základě dokumentů [8] [9].

3.4 Implementace komunikačního protokolu v síti IMA_RS485 pro komunikaci s control panelem

V tomto projektu je komunikace protokolu IMA_RS485 naprogramována v souborech rs485_protocol.h a rs485_protocol.c. Jedná se o kolizní protokol

■ ■ ■ 3.4. Implementace komunikačního protokolu v síti IMA_RS485 pro komunikaci s control panelem

v síti, kde je připojen jedno zařízení typu master, a jeden nebo více zařízení v typu slave.

Baud rate	9600
Data bits	8
Parity	none
Stop bits	1

Tabulka 3.1: Fyzické vlastnosti IMA_RS485 sítě

■ 3.4. Implementace komunikačního protokolu v síti IMA_RS485 pro komunikaci s control panelem

■ 3.4.1 Syntaxe příkazů

Komunikace v síti probíhá formou příkazů, které mají specifikovanou syntaxi v tabulce 3.2.

popis	adresa příjemce	adresa odesílatele	typ příkazu	délka dat	data	crc
počet bytů	1	1	1	2	délka dat	1

Tabulka 3.2: Syntaxe příkazu pro komunikaci v síti IMA_RS485

Typy příkazu jsou zadefinované konstanty s předponou CKP_CMD_ v souboru ./Inc/rs485_protocol.h. Příkazy odeslané zařízením typu master obsahují navíc synchronizační byte na začátku 0xAA. CRC je pro kontrolu XOR přes všechny předchozí byty v celém příkazu kromě synchronizačního bytu.

■ 3.4.2 Adresace zařízení v síti

Každé zařízení na této sběrnici má svoji adresu, která mu je nastavena externě. Zařízení typu master má adresu 0xFF, adresa pro všechny (broadcast) je 0x00 a zařízení v této síti můžou mít adresu libovolnou (kromě těchto dvou) nesmí zde však být připojena 2 zařízení s nastavenou stejnou adresou.

■ 3.4.3 Statusy

Zařízení typu slave má dva možné statusy v síti IMA_RS485, offline a online. Zařízení typu slave má povoleno odesílat příkaz "průchod" pouze má-li status online. Zařízení typu slave odesílá příkaz obsahující informaci o jeho statusu periodicky s typem příkazu 0x10 a jedním bytem dat označujícím status. Pro status online je tento byte 0x00 a pro status offline 0xEE. Tento příkaz je odesílán s intervalm 10 s, pokud zařízení má status offline a s intervalm 30 s, pokud má zařízení status online. Status zařízení mění pouze zařízení typu master odesláním příkazu s typem 0x41 pro přepnutí na status online a 0x42 pro přepnutí na status offline. Zařízení typu slave svůj status přepne samo pouze v případě, že má status online a zařízení typu master přestane odpovídat na příkaz průchod, jak je popsáno v sekci 3.4.5. Je-li zařízení spuštěno, je ve stavu offline a jelikož nemá povoleno odesílat příkaz "průchod", přijatá data z koncových zařízení jsou zahazována. Zařízení typu slave pouze odpovídá na příkazy od zařízení typu master a čeká na příkaz od zařízení typu master k přepnutí na status online.

■ 3.4.4 Přidávání LoRaWAN zařízení do systému

Pokud zařízení typu master příjme příkaz od zařízení typu slave oznamující že je ve stavu offline, nejprve tomuto zařízení pošle seznam LoRaWAN adres všech známých koncových zařízení a následně toto zařízení přepne do stavu online. Přijímání seznamu adres je realizováno sekvencí příkazů typu 0x8F.

Níže v tabulce 3.3 je příklad sekvence příkazů odesílaných mezi zařízením typu masterem a zařízením typu slavem během předávání seznamu LoRaWAN device address koncových zařízení, kde zařízení typu slave má adresu 0x10 a zařízení typu master standardně 0xFF. Jak již bylo řečeno, příkazy od zařízení typu master lze jednoduše odlišit tím, že vždy začínají bytem 0xAA.

příkaz	data
master: start	AA 10 FF 8F 02 00 00 00 62
slave: ACK	FF 10 06 02 00 8F 00 64
master: data	AA 10 FF 8F 21 00 01 B1 C4 12 00 00 00 00 00 B2 C4 12 00 00 00 00 00 B3 C4 12 00 00 00 00 00 B4 C4 12 00 00 00 00 00 44
slave: ACK	FF 10 06 02 00 8F 01 65
master: data	AA 10 FF 8F 19 00 02 B5 C4 12 00 00 00 00 00 B6 C4 12 00 00 00 00 00 F6 1F 01 26 00 00 00 00 B6
slave: ACK	FF 10 06 02 00 8F 02 66
master: konec	AA 10 FF 8F 04 00 03 FF 2A 57 E5
slave: ACK	FF 10 06 02 00 8F 03 67

Tabulka 3.3: Příklad sekvence příkazů odesílaných mezi zařízením typu master a zařízením typu slave během předávání seznamu LoRaWAN device address koncových zařízení

LoraWAN protokol používá 4-bytové adresy koncových zařízení. Adresy předávány touto sekvencí jsou dlouhé 8-bytové. První 4 byty je tedy LoRaWAN device address, pátý byte je typ zařízení a zbylé 3 byty jsou nevyužity, jejich použití je možné v případě změn či rozšiřování vlastností systému.

První Byte dat je counter paketu začínající od nuly, který označuje číslo odeslaného paketu v sekvenci. Na každý tento paket v sekvenci zařízení typu slave odpovídá ACK příkaz, který se liší od obyčejného ACK příkazu tím, že v datech paketu navíc obsahuje counter pakety v sekvenci. První příkaz této sekvence má délku dat 2 byty, které mají hodnotu 0x00 přičemž první je counter. Další příkazy hned za counter bytem obsahují několik osmibytových adres, jejichž počet je různý. Příkaz ukončující tuto sekvenci příkazů má délku 4 byty, což je tedy counter, 0xFF a 2 byty CRC přes všechny odeslané adresy (nepodstatné, tudíž ho nepoužívám).

■ 3.4. Implementace komunikačního protokolu v síti IMA_RS485 pro komunikaci s control panelem

■ 3.4.5 Odesílání dat z koncových zařízení

Jak je popsáno v sekci 2.2, tudíž data z koncových zařízení jsou odesílána příkazem "průchod", jehož typ je 0x10 a kapacita na data z koncového zařízení je pouze 6 B. První byte dat označuje typ průchodu, byl zvolen konstantní byte 0xD0. Dále následuje LoRaWAN adresa koncového zařízení od kterého byl paket přijat. Dále následují 4 byty dat ze senzoru, další 2 byty signalizující čas průchodu, což v tomto projektu není použito a tyto dva byty mají vždy hodnotu 0xFF. A nakonec jsou další 2 byty obsahující data ze senzoru.

Příklad příkazu: FF 1F 10 0D 00 D0 F6 1F 01 29 AD 0A 5A 27 FF FF DE 09 E1.

Data příkazu jsou níže rozepsána v tabulce 3.4.

typ průchodu	LoRaWAN device address	data (4B)	cas	data (2B)
D0	F6 1F 01 29	AD 0A 5A 27	FF FF	DE 09

Tabulka 3.4: Příklad dat příkazu "průchod" odeslaného z gatewaye na zarizení typu master, obsahující data z koncových zařízení

Zařízení typu master na příkaz "průchod" odpovídá příkazem ACK. Zařízení typu slave na tuto odpověď čeká standardně 3 sekundy, ale tento parametr je nastavitelný. Pokud v tomto timeoutu zařízení typu master neodpoví, zařízení typu slave příkaz "průchod" zopakuje přičemž změní typ příkazu na 0x20. Pokud zařízení typu master ani na třetí opakování neodpoví ACK, zařízení typu slave se přepne do stavu offline a vymaže frontu příkazů "průchod" k odeslání.

■ 3.4.6 Potvrzení

Zařízení typu slave odpovídá na každý příkaz od zařízení typu master ACK. Typ příkazu ACK je 0x06 a data příkazu obsahují jeden byte signalizující typ příkazu na který je právě odpovídáno potvrzením. Zařízení typu master odpovídá ACK se stejným typem příkazu 0x06, ale s žádnými daty příkazu.

■ 3.4.7 Dotaz na příznaky

Zařízení typu master se může zeptat s jak dlouhými adresami zařízení typu slave pracuje s typem příkazu 0x49. Zařízení typu slave na to odpovídá ACK s tím, že v datech příkazu je navíc byte 0x04. Zařízení typu master pak počítá s tím, že zařízení typu slave pracuje se 64-bit adresami (ve skutečnosti ale používá 32-bitové a zbylé 4 byty v příkazu průchod jsou pro data z koncového zařízení).

3.5 Komunikace přes USB

Gateway má implementovanou komunikaci přes USB, což má za účel konfiguraci systému a logování. K připojení přes USB lze použít PC s aplikací terminálu s nastavením viz tabulka 3.5.

Baud rate	115200
Data bits	8
Parity	none
Stop bits	1
Flow control	none

Tabulka 3.5: Nastavení USB terminálu

Při komunikaci jsou data standardně oddělována bytem CR (carriage return) 0x0D, ale je akceptována i sekvence CR LF (Line Feed), tedy 0x0D 0x0A.

3.5.1 Log aplikace

Gateway loguje informace o proběhlých událostech přes USB. Níže je příklad výpisu dat pro případ, že gateway přjala LoRaWAN paket z koncového zařízení v síti.

Nejprve jsou vypsána data týkající se LoRaWAN protokolu, zašifrovaný i dešifrovaný payload, typ zařízení a konečné informace dekódované z payloadu. Řádek začínající předponou "Tx -> RS-485:" obsahuje data odeslané k zařízení typu master přes RS485 síť a následující řádek začínající předponou "Rx -> RS-485:" obsahuje odpověď od zařízení typu master.

```
Rx -> LoRaWAN, pktCntr: 6
RSSI: -51, SNR: 9, length: 22

Message type: Unconfirmed Data Up
Packet rawData: "40F61F0128C0D62508D970CB071595D115BAC68F6663"
Device Address: "F61F0128"
FCnt: 9686
message (encrypted): "D970CB071595D115BA"
MHDR: 40; FCtrl: C0; FPort: 08; MIC: "C68F6663"
adaptive data rate: true; ack: false
message HEX (decrypted): "013566779600FFFFAF"

Sensor type: RHF1S001
temperature: 23.30 C, humidity: 52 %
period: 300 s, RSSI: -51 dBm, SNR: 9 dB, battery voltage: 3.2 V
Tx -> RS-485: "FF1F100D00D0F61F01281A0934CDFFF09202E"
```

```
Rx -> RS-485: "AA1FFF060000E6"
ACK
```

3.5.2 Konfigurace systému

Konfigurace gatewaye se provádí opět přes USB port. Je do ní vstoupeno odesláním příkazu "config", následuje vypsání současného stavu konfigurace a dále je vypsáno konfigurační menu, kde uživatel vybere jednotlivý bod menu zadáním jeho čísla na začátku řádku. Níže je zobrazen příklad výpisu po vstupu do konfigurace.

```
-----Entering configuration setup-----
```

```
System configuration:
```

```
*** LoRa channel:
channel: 0 (868.1 Mhz)
SF7
```

```
*** RS485 channel:
my address: 10
master address: FF
timeout: 3 s
```

```
*** LoRaWAN keys:
NwSKey: FD 90 0D 8C 70 9F 19 24 18 EC FD D4 28 0C AC 47
AppSKey: 68 9F D0 AC 7A 0F 95 58 B1 19 A0 16 17 F4 16 33
```

```
Config menu:
1 -> Config LoRa channel
2 -> Config RS485 channel
3 -> Config LoRaWAN protocol
4 -> Print all LoRaWAN devices
5 -> Erase all LoRaWAN devices
6 -> Restore to default configuration
7 -> Exit without save
8 -> Save and exit
```

Z konfigurace je možné vystoupit kdykoliv bez uložení změn příkazem "quit". Při vstoupení do konfigurace je pozastavena činnost gatewaye, komunikace s koncovými zařízeními LoRaWAN sítě a komunikace se zařízením typu master v síti RS485 nejsou aktivní. Jsou zde tedy 3 stavy konfigurace, přičemž je možné vždy jednotlivá nastavení přeskakovat odesláním "prázdného" příkazu "0x0D (v terminálu obvykle stačí stisknout Enter). Systém při konfiguraci vždy vypíše jaká data mají být zadána v jakém tvaru a zároveň současnou hodnotu měněného parametru. Zadaná data uživatelem jsou vždy zkонтrolována zda

splňují požadovaný tvar. Pokud ne, uživatel je o tom informován a vyzván k dalšímu pokusu. Po provedení konfigurace následuje vždy návrat zpět do hlavního menu. Pro uložení nové konfigurace je potřeba v menu vybrat "Save and exit", gateway pak následně vypíše které parametry byly změněny a provede restart.

■ Config LoRa channel

Konfigurace LoRa RF kanálu zahrnuje nastavení SF a frekvenční pásmo. Níže je příklad konfigurace.

```
LoRa channel configuration:
Enter SF number (7-12)
(current: 7)
8
SF8 set.

Enter LoRa channel number (0-7)
ch0 is 868.1 Mhz
ch1 is 868.3 Mhz
ch2 is 868.5 Mhz
ch3 is 867.1 Mhz
ch4 is 867.3 Mhz
ch5 is 867.5 Mhz
ch6 is 867.7 Mhz
ch7 is 869.0 Mhz
(current: 0)
1
channel 1 set.
```

■ Config RS485 channel

Konfigurace RS485 kanálu pro komunikaci se zařízením typu master zahrnuje nastavení adresy tohoto zařízení, adresa zařízení typu master a timeout, což je doba čekání na potvrzení od zařízení typu master po odeslání příkazu "průchod". Níže je příklad konfigurace.

```
RS485 channel configuration:
Enter address of this device, FF and 00 are reserved.
(current: 10)
11
Address of this device is set to: 11

Enter master address:
(current: FF)
FE
Master address is set to: FE

Enter timeout (seconds)
```

```
(current: 3)
5
timeout set to: 5 s
```

■ Config LoRaWAN protocol

Konfigurace LoRaWAN protokolu zahrnuje nastavení šifrovacích klíčů NwkSKey a AppSKey. Níže je příklad konfigurace.

```
LoRaWAN protocol configuration:
Enter NwkSKey (16 bytes in HEX)
(current: FD 90 0D 8C 70 9F 19 24 18 EC FD D4 28 0C AC 47)
11111112222222333333344444444
NwSKey set to: 11 11 11 11 22 22 22 22 33 33 33 33 44 44 44 44

Enter AppSKey (16 bytes in HEX)
(current: 68 9F D0 AC 7A 0F 95 58 B1 19 A0 16 17 F4 16 33)
11111112222222333333344444444
AppSKey set to: 11 11 11 11 22 22 22 22 33 33 33 33 44 44 44 44
```

■ Print all LoRaWAN devices

Vypíše všechna LoRaWAN zařízení uložená v paměti. Níže je příklad.

```
number.....0:
Device Address: B1 C4 12 00
Device Type: RH1S001
number.....1:
Device Address: B2 C4 12 00
Device Type: RH1S001
number.....2:
Device Address: B3 C4 12 00
Device Type: RH1S001
number.....3:
Device Address: B4 C4 12 00
Device Type: IMA_tempPress
number.....4:
Device Address: B5 C4 12 00
Device Type: IMA_tempPress
```

■ Restore default configuration

Po zvolení této možnosti je načtena defaultní konfigurace systému, která obsahuje hodnoty viz tabulka 3.6. Tyto defaultní hodnoty jsou nastaveny v programu a slouží především pro testovací účely.

popis	hodnota
RS485 myAddr	0x10
RS485 MasterAddr	0xFF
RS485 timeout	3
LoRa SF	SF7
LoRa channel	0 (868.1 Mhz)
NwSKey	FD 90 0D 8C 70 9F 19 24 18 EC FD D4 28 0C AC 47
AppSKey	68 9F D0 AC 7A 0F 95 58 B1 19 A0 16 17 F4 16 33

Tabulka 3.6: Defaultní konfigurace systému

3.6 Koncová zařízení

Jelikož používaný protokol ke komunikaci se zařízením typu master je omezen na pouhých 6 B na jeden paket, payload koncových zařízení je dekódován v gatewayi a v paketu odeslaném na zařízení typu master jsou pouze vybraná nejdůležitější data, která se vejdu do této velikosti. Prote společně s LoRaWAN device address koncového zařízení je v gatewayi uložen i typ zařízení zadefinován jedním bytem a na základě typu zařízení gateway rozpozná jak dekódovat payload.

Momentálně jsou podporovány dva typy koncových zařízení, dle potřeby je možné rozšířit FW gatewaye o další typy koncových zařízení.

Typ zařízení	Hodnota
RHF1S001	0x00
IMA_tempPress	0x01

Tabulka 3.7: Typy koncových zařízení

3.6.1 Zpracování dat jednotlivých typů koncových zařízení

Níže je popsáno pro jednotlivá podporovaná koncová zařízení jak jsou data uložena v datové struktuře, jak jsou data z této struktury zpracována a zobrazena a nakonec jak vybraná data jsou zapsána do výsledného bufferu o délce 6 B, který je odeslán na zařízení typu master příkazem "průchod".

RHF1S001

Senzor od firmy RisingHF měří teplotu a vlhkost.

```

1  /* RHF1S001 data structure */
2  typedef struct {
3      int16_t temperature;
4      uint8_t humidity;
5      uint16_t period;
6      int8_t rssi ;

```

```

7     int8_t snr;
8     uint8_t battery;
9 } RHF1S001_data_t;
10
11 /* Print the data from the structure */
12 printf("temperature: %d.%d C, ", RHF1S001_data.temperature / 100,
13     RHF1S001_data.temperature % 100);
14 printf("humidity: %d %%\n", RHF1S001_data.humidity);
15 printf("period: %d s, ", (int)RHF1S001_data.period);
16 printf("RSSI: %d dBm, ", RHF1S001_data.rssi);
17 printf("SNR: %d dB, ", RHF1S001_data.snr);
18 printf("battery voltage: %d.%d V\r\n", RHF1S001_data.battery/10,
19     RHF1S001_data.battery % 10);
20
21 /* Put the data into 6B long buffer, that is transmitted to the master */
22 buffer [0] = RHF1S001_data.temperature & 0xFF;
23 buffer [1] = RHF1S001_data.temperature >> 8;
24 buffer [2] = RHF1S001_data.humidity;
25 buffer [3] = RHF1S001_data.rssi;
26 buffer [4] = RHF1S001_data.snr;
27 buffer [5] = RHF1S001_data.battery;

```

IMA_tempPress

Senzor vytvořený ve firmě IMA, měřící teplotu a tlak.

```

1 /* IMA_tempPress data structure */
2 typedef struct {
3     int16_t temperature;
4     uint16_t pressure;
5     int8_t rssi ;
6     int8_t snr;
7 } IMA_tempPress_data_t;
8
9 /* print the data from the structure */
10 printf("temperature: %d.%d C, ", IMA_tempPress_data.temperature / 100,
11     IMA_tempPress_data.temperature % 100);
12 printf("pressure: %d.%d Pa\r\n", IMA_tempPress_data.pressure/10,
13     IMA_tempPress_data.pressure % 10);
14 printf("RSSI: %d dBm, SNR: %d dB\r\n", IMA_tempPress_data.rssi,
15     IMA_tempPress_data.snr);
16
17 /* Put the data into 6B long buffer, that is transmitted to the K4 server */
18 buffer [0] = IMA_tempPress_data.temperature & 0xFF;
19 buffer [1] = IMA_tempPress_data.temperature >> 8;
20 buffer [2] = IMA_tempPress_data.pressure & 0xFF;
21 buffer [3] = IMA_tempPress_data.pressure >> 8;
22 buffer [4] = IMA_tempPress_data.rssi;
23 buffer [5] = IMA_tempPress_data.snr;

```

3.6.2 Přidávání koncových zařízení ze serveru K4

Koncová zařízení síť se nastavují ze serveru K4 v podobě seznamu offline karet s délkou UID 8 B. LoRaWAN device address je dlouhá 4 B, jeden byte je navíc použit pro typ koncového zařízení, zbylé 3 byty jsou nuly. Jelikož typ zařízení je uložen v gatewayi i na K4 serveru. Při odesílání příkazu průchod se tedy už typ zařízení neposílá z důvodu datového omezení tohoto příkazu. Na serveru K4 se UID nastavuje jako dekadické číslo. Níže je příklad vytvoření výsledného čísla obsahující DevAddr a typ zařízení, které se zadává do K4 serveru.

Příklad

Pro případ, kde typ zařízení je 01 a DevAddr AABBCCDD (little endian) výsledné číslo v hexadecimální podobě je 01DDCCBBAA. Následně se překládá do decimalní podoby, výsledné číslo k zadání do K4 serveru je tedy 8016149418.

3.7 Využití non-volatile paměti gatewaye

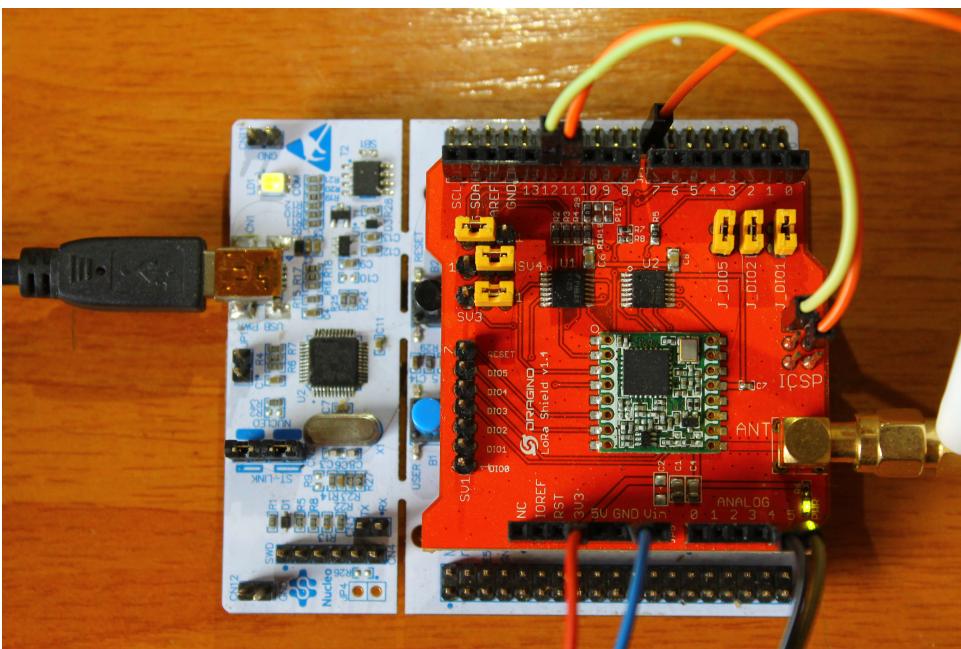
Konfigurace a adresy s typy všech koncových zařízení v LoRaWAN síti jsou uloženy v non-volatile paměti EEPROM gatewaye o kapacitě 6144 B. Paměť je tedy rozdělená tak, že od adresy 0 až po 6080 je prostor pro ukládání LoRaWAN zařízení a od 6080 až po 6144 je prostor pro ukládání konfigurace gatewaye.

Každé LoRaWAN zařízení v síti má v paměti uložené LoRaWAN device address (4 byty), typ zařízení (1 byte) a další 3 byty jsou rezervovány. Jedno koncové zařízení v paměti tedy zabírá 8 B, takže gateway má kapacitu paměti pro až 760 koncových zařízení.

3.8 Zapojení

LoRa shield [4] je nasazen přímo na vývojový kit Nukleo. Kit neobsahuje ISCP konektor, který je součástí pinoutu Arduino UNO a LoRa shield má SPI piny MISO a MOSI přivedeny právě na tento konektor. Musí být tedy propojeny externě viz obrázek 3.4. Jumpery na Dragino LoRa shieldu musí také být stejně jako v obrázku.

Pro komunikaci s LoRa transceiverem je tedy použito SPI1, pro komunikaci přes USB je použito USART2 a pro komunikaci přes RS485 je použito UART1.



Obrázek 3.4: foto zapojení

Periférie	Název pinu	Pin procesoru
RS485 transceiver	RX	PC1
	TX	PC0
	RTS	PB1
LoRa transceiver	CS	PB6
	CLK	PA5
	MISO	PA6
	MOSI	PA7
	RST	PC7
	DIO0	PA10

Tabulka 3.8: Pinout připojení externích periférií k procesoru

3.9 Naprogramování

K naprogramování MCU byla použita HAL knihovna a inicializační nástroj STM32CubeMX poskytnuté výrobcem, tedy ST Microelectronics. Zdrojové soubory programu byly vyvíjeny v textovém editoru VS-Code, ke komplikaci zdrojových souborů byl použit kompilátor arm-none-eabi-gcc a jako pomocný nástroj makefile skript.

3.9.1 Zdrojové soubory projektu

Pro šifrování LoRaWAN paketu byla použita knihovna AES-128, dostupná na githubu [5] a knihovna OpenPANA také dostupná z githubu [6]. Níže je

seznam zdrojových souborů.

Drivers	STM32 Drivers
Inc	Headers
aes.h	AES-128 library for LoRaWAN paket encryption
cmac.h	library for CMAC calculation in LoRaWAN protocol
LinkedList_ByteArray.h ..	Byte array linked list library for stacks
LoRaWAN_paket.h.....	LoRaWAN library for paket data decoding
stm32l0xx_hal_conf.h.....	HAL initialization of peripherals
ByteArray.h.....	Library for Byte array operations
LoRa.h	Library for interfacing LoRa transceiver
main.h	Main file
stm32l0xx_it.h	HAL initialization of peripherals
EEPROM.h.....	Library for eeprom operations
LoRa_sensors.h.....	Library for decoding data from payload
rs485_protocol.h	Library for RS485 IMA protocol
usb.h ...	Library for USB communication and system configuration
Src.....	Sources
aes.c	source file to the aes.h
aes.c	source file to the cmac.h
LinkedList_ByteArray.c	source file to the LinkedList_ByteArray.h
LoRaWAN_paket.c	source file to the LoRaWAN_paket.h
stm32l0xx_hal_msp.c	HAL source file
ByteArray.c	source file to the ByteArray.h
LoRa.c	source file to the LoRa.h
main.c	main source file
stm32l0xx_it.c	HAL source file
EEPROM.c	source file to the EEPROM.h
LoRa_sensors.c	source file to the LoRa_sensors.h
rs485_protocol.c	source file to the rs485_protocol.h
system_stm32l0xx.c	HAL source file
usb.h	source file to the usb.h

3.9.2 Nahrání programu do MCU

Výstupem komplikace je soubor s koncovkou .binary, který je nahrán do MCU. K tomuto nahrání není potřeba žádný speciální SW nebo HW. Stačí kit připojit k PC přes USB, v PC se kit zobrazí jako flash disk. Zkomplikovaný program s koncovkou .binary stačí překopírovat na toto zařízení. Po dobu kopírování souboru bliká na kitu LED1 červená/zelená. Jakmile kopírování skončí, program na kitu je spuštěn, případně je možné kit resetovat černým tlačítkem reset. Pro uvedení Gateweye do provozu je nutné se připojit k zařízení přes USB a nastavit všechny parametry viz sekce 3.5.2.

Literatura

- [1] *NUCLEO-L073RZ*. ST Microelectronics [Online]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l073rz.html> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [2] *NUCLEO-L073RZ* ARM Mbed. [Online]. Available: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L073RZ/> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [3] *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module*. HopeRF electronic. V1.0. [Online]. Available: http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield [Accessed: 20-Sep-2019].
- [4] *Lora Shield*. Dragino. [Online]. Available: http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield [Accessed: 20-Sep-2019].
- [5] *tiny-AES128-C* bitdust. [Online]. Available: <https://github.com/bitdust/tiny-AES128-C> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [6] *openpana*. OpenPANA. [Online]. Available: <https://github.com/OpenPANA/openpana> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [7] *SparkFun Transceiver Breakout - RS-485* Sparkfun. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10124> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [8] *LoRaWAN Specification*. LoRa Alliance. v1.1. Sparkfun. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-specification-v11> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [9] Robert Miller. *LoRa Security Building a Secure LoRa Solution*. MWR Labs Whitepaper. [Online]. Available: <https://labs.mwrinfosecurity.com/assets/BlogFiles/mwri-LoRa-security-guide-1.2-2016-03-22.pdf> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [10] [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/understanding-about-types-of-access-control-systems/> [Accessed: 9-Sep-2019].

- [11] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8678997> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [12] [Online]. Available: <https://blogs.cisco.com/innovation/the-internet-of-things-5-predictions-for-2018> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [13] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8711814> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [14] [Online]. Available: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405959517302953?token=1D12BD2186DD8FA9065DCE9301C63D4D2F67C3557C4677D06FCE5DBB92C96984BFCF132B6DD37ED892EAF> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [15] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7721743> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [16] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8323908> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [17] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8125884> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [18] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5453569> [Accessed: 9-Sep-2019].