



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Bezdrátová senzorová síť pro přístupový systém

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

todo: edit abstract The Wireless Sensor Network (WSN) plays an important role in the Internet of Things (IoT). It is very suitable for intelligent buildings providing a convenient way to collect sensor data and control electronic devices in the building and its surroundings. This paper proposes an extension of the existing access control system with WSN. Design of sensor nodes and gateway connected to the existing RS485 network is performed. The results of a long-term operation measurement in one university floor show the maximum number of sensor nodes simultaneously transmitting data in RS485 network is up to hundreds or thousands in dependence on used RS485 data rate and used reserve of data rate which prevent from malfunction of the access control system. The results prove the WSN can be effectively used in an existing RS485 infrastructure.

Klíčová slova: Access control system, LoRa, LPWAN, WSN.

Vedoucí: Ing. Bc. Marek Neruda, Ph.D

Abstract

The Wireless Sensor Network (WSN) plays an important role in the Internet of Things (IoT). It is very suitable for intelligent buildings providing a convenient way to collect sensor data and control electronic devices in the building and its surroundings. This paper proposes an extension of the existing access control system with WSN. Design of sensor nodes and gateway connected to the existing RS485 network is performed. The results of a long-term operation measurement in one university floor show the maximum number of sensor nodes simultaneously transmitting data in RS485 network is up to hundreds or thousands in dependence on used RS485 data rate and used reserve of data rate which prevent from malfunction of the access control system. The results prove the WSN can be effectively used in an existing RS485 infrastructure.

Keywords: Access control system, LoRa, LPWAN, WSN.

Title translation: Wireless sensor network for access control system

| Obsah | Practical part |
|--|--|
| 0.1 Seznam zkratek 1 | |
| 1 Úvod 3 | 4 Realizace zařízení 16 |
| Část I Theoretical part | |
| 2 Architektury přístupových systémů 7 | 4.1 Implementace WSN do přístupového systému 16 |
| 3 Výběr bezdrátové technologie pro senzorovou síť 9 | 4.2 Návrh WSN gatewaye 18 |
| 3.1 Kandidátní bezdrátové technologie 9 | 4.2.1 Sestavení HW k vytvoření prototypu gatewaye k testování .. 18 |
| 3.1.1 IQRF 9 | 4.2.2 Použité vývojové nástroje ... 19 |
| 3.1.2 Wireless M-Bus 10 | 4.2.3 Vývoj FW 20 |
| 3.1.3 LoRa 10 | 4.2.4 Log Gatewaye 24 |
| 3.1.4 Zigbee 11 | 4.2.5 Konfigurace gatewaye..... 24 |
| 3.1.5 BLE 11 | 4.2.6 Podpora koncových zařízení . 28 |
| 3.2 Vybraná přenosová technologie . 12 | 4.2.7 Přidávání koncových zařízení ze serveru řízení přístupu 29 |
| Část II | |
| | 5 Měření výsledky a diskuse 31 |
| | 6 Závěr 32 |
| | Literatura 33 |

Obrázky

Tabulky

| | |
|--|----|
| 3.1 Souhrn porovnání parametrů kandidátní bezdrátových technologií | 12 |
| 4.1 Vlastnosti mikrokontroléru STM32L073RZ [41] | 19 |
| 4.2 Pinout připojení periférií k mikrokontroléru | 20 |
| 4.3 Rozdělení aplikace na nezávislé podprogramy | 21 |
| 4.4 Dodatečné pomocné podprogramy | 21 |
| 4.5 Parametry sériové linky PC terminálu pro komunikaci s gatewayí | 23 |
| 4.6 Defaultní konfigurace systému .. | 28 |
| 4.7 Typy koncových zařízení | 28 |

0.1 Seznam zkratek

| | |
|----------------|--|
| AES | Advanced Encryption Standard |
| AI | Artifical Inteligence |
| AppSKey | Application Session Key |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| BLE | Bluetooth Low Energy |
| CMAC | Cipher-based message authentication code |
| CMSIS | Cortex Microcontroller Software Interface Standard |
| CPU | Central Processing Unit |
| CR | Carriage Return |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| FIFO | First In First Out |
| GPIO | General Purpose Input Output |
| HAL | Hardware Abstraction Layer |
| HW | HardWare |
| IDE | Integrated Development Environment |
| IoT | Internet of Things |
| ISM | Industrial, scientific and medical |
| IWDG | Independent Watchdog |
| LAN | Local Area Network |
| LBT | Listen Before Talk |
| LF | Line Feed |
| LPWAN | Low Power Wide Area Network |
| LPWSN | Low Power Wireless Sensor Network |
| MCU | Micro Controller Unit |
| NwkSKey | Network Session Key |
| PC | Personal Computer |
| PCB | Printed Circuit Board |

| | |
|-------------|---|
| RF | Radio Frequency |
| RTOS | Real Time Operating System |
| SDK | Software development kit |
| SF | Spreading Factor |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| UART | Universal Asynchronous Receiver Transmitter |
| WSN | Wireless Sensor Network |

Kapitola 1

Úvod

The demands and use cases of Internet of Things (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 are recently increased.

Short-range IoT applications like smart homes are broadly based on Zigbee or Bluetooth technologies that use the 2.4 GHz ISM band [1], [2]. Long-range IoT applications are typically based on a special kind of wireless technology called Low Power Wide Area Network (LPWAN) [1114]. Many LPWAN wireless communication technologies appeared during its evolution with unlicensed ISM band, e.g., LoRa and SigFox and licensed band, e.g., NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT) and Long Term Evolution-Machine Type Communication (LTE-M). The LPWAN technologies aim to have range up to 10–15 km in rural areas and 2–5 km in urban areas [1115] and can have one of the following topologies: star (centralized), star of stars (decentralized) and mesh (distributed) [1111]. Very low power consumption should allow sensor nodes a very long battery life, even greater than 10 years. The low cost of hardware (HW) is achieved by fully integrated transceivers and minimized number of off-chip components [1113].

The industry of IoT is growing because of its enormous potential. Cisco study [1112] says IoT will be combined with other technologies such as artificial intelligence (AI), fog computing and blockchain. Such a combination of technologies will provide greater value of investment for companies. IoT applications in smart cities require a scalable network coverage. This can be achieved by interconnection of multiple gateways as proposed in [8], where all gateways are connected to web server accessible via the Internet. It aims to manage urban street lighting and the implementation of smart metering is also considered as a future work. Similar application is proposed in paper

[1] which focuses on assisted real-time automatic meter reading (AMR) in cities, but the scalable range is established by mesh network topology. The IoT applications in a smart buildings concept can be proposed as shown in [2], where nodes exchange data with the cloud via a Wi-Fi router or Bluetooth gateway connected to the Internet. Similar application is proposed in [9] where nodes are controlled by a master node via Zigbee network that is connected to a PC via RS232. Basic smart metering systems can be proposed with a gateway connected to a PC where the data are processed as proposed in [10], [11] and [1117]. A long-range metering system can be established by multiple gateways connected to a network server from which data are obtained by the application server [13]. Similar network is proposed in Smart Farm application [1116] with the difference that nodes can also be connected to the gateway via RS485 which forms a hybrid wired /wireless system.

This paper proposes to extend the access control system to include a low power Wireless Sensor Network (WSN) which can be used for smart metering applications, smart building applications and the building surroundings which is related to smart city applications. The WSN gateway is connected by the same way as a card reader is connected in the access control system, therefore it also has to support the same protocol. This can lead to complications since the reader is meant to transmit a short packets with user ID when the user's credential is attached to it. The WSN gateway is designed and tested in access control system of one university floor. The results show the infrastructure of access control system can manage up to thousands sensor nodes in dependence on used RS485 data rate.

Část I

Theoretical part

Kapitola 2

Architektury přístupových systémů

Přístupové systémy jsou elektronické systémy řídící přístup uživatelů do omezených prostor v závislosti na jejich prokázané identitě. Obrázek 2.1 zobrazuje typickou architekturu přístupového systému, kde identifikátor (ID Credential) představuje prvek umožňující identifikovat uživatele, např. RFID tag, otisk prstu nebo QR kód.



Obrázek 2.1: Příklad architektury přístupového systému [1110]

Čtečka (Reader) slouží ke čtení dat z identifikátoru a v digitální podobě je odesílá k zařízení kontrolní panel (Control Panel). Zámek dveří (Door Lock) řídí fyzický přístup uživatelů do omezených prostor. Kontrolní panel tvoří rozhranní mezi serverem řízení přístupu (Access Control Server) a páry čteček a zámků dveří. kontrolní panely jsou obvykle připojeny k serveru řízení přístupu přes TCP/IP síť a páry čtečka a zámků dveří jsou obvykle připojeny ke kontrolnímu panelu přes RS485 síť. Databáze obsahuje všechna uživatelské

ID. Na serveru řízení přístupu je spuštěn Software (SW) spravující databázi a komunikující se všemi zařízeními typu Control Panel. Čtečka čte uživatelská ID z předložených identifikátorů a přeposílá je na kontrolní panel, který je dále přeposílá na server řízení přístupu. Access Control Software vyhledá obdržený uživatelský identifikátor v databázi a pokud je nalezen, pošle příkaz odpovídajícímu kontrolnímu panelu k přepnutí odpovídajícímu zámku dveří, čímž je uživateli udělen přístup do omezené oblasti [1110].

Kapitola 3

Výběr bezdrátové technologie pro senzorovou síť

Mezi hlavní požadavky na navrženou senzorovou síť pro tento vybraný případ patří jednoduchá napojitelnost na infrastrukturu jiného systému. Pro tento vybraný případ se konkrétně jedná o infrastrukturu již zavedeného přístupového systému v budovách několika podniků. Takto nainstalovaná senzorová síť by pak měla umožňovat bezdrátové měření veličin např. teplota, vlhkost, CO₂, pomocí koncových zařízení sítě, která vydrží několik let napájena z baterie při periodě měření několik minut rozmístěných v budově a jejím okolí.

Mezi hlavní kritéria pro vybranou bezdrátovou technologii pro tento případ patří nízká spotřeba energie koncových zařízení, nízká cena, jednoduchost implementace a možnost připojení koncových zařízení třetích stran. Pro jednoduchost implementace vybraná bezdrátová technologie tedy musí používat pouze bezlicenční pásmo ISM a musí umožňovat implementaci celé sítě bez závislosti na sítí třetích stran.

3.1 Kandidátní bezdrátové technologie

Níže jsou popsány dostupné bezdrátové technologie vyhovující stanoveným kritériím pro tento vybraný případ.

3.1.1 IQRF

IQRF je technologie podporována IQRF aliancí [20], která je jediným výrobcem IQRF transceiveru [19] za cenu v rozsahu \$15-20 za kus a k tomu poskytuje nástroje jako je SDK (Software Development Kit) [18] a IDE (Integrated Development Environment) [17]. Technologie IQRF bývá použita k realizaci sítí o topologii typu mesh nebo hvězdice. Jedna síť má jednoho

koordinátora, který slouží jako gateway a může obsahovat až 240 zařízení (včetně koordinátora). Pro požadavek vyššího počtu zařízení je efektivnější zřetězit více sítí, s jednotlivými koordinátory a různými RF kanály pro vyšší propustnost. Dosah na přímou viditelnost je až 500 m a velikost datového obsahu (payload) jednoho paketu může být až 64 B. Z hlediska kriérií pro tento vybraný případ je u této technologie nevýhodou nízký počet zařízení třetích stran dostupných na trhu. Většinou je tato technologie použita pro realizaci uživatelské sítě, kde gateway je použita jedna z dostupných od IQRF aliance a koncová zařízení sítě jsou vytvořena vývojáři s použitím transceiverů od IQRF aliance [21].

■ 3.1.2 Wireless M-Bus

Wireless M-Bus (Meter-Bus) je standard specifikovaný v evropské normě EN 13757 [22], popisující fyzickou, síťovou a aplikační vrstvu, původně navržen pro aplikace bezdrátového měření jako rozšíření průmyslové datové sběrnice M-Bus [23]. Po několika letech v průmyslu bezdrátových měřicích systémů se tato technologie rozšířila do oblasti průmyslu senzorových sítí. Komunikace koncových zařízení je rozdělena do několika módů v závislosti na orientaci komunikace a objemu vysílaných dat [24], [25]. Wireless M-Bus síť má hvězdicovou topologii o dosahu 500 m v pásmu 868 MHz. Komunikaci vždy zahajuje koncové zařízení, které koncentrátor obsluhuje. Transceivery vyrábí více různých firem za cenu okolo \$25-30 za kus.

■ 3.1.3 LoRa

LoRa (Long Range) je modulace navržena firmou Semtech. LoRaWAN je otevřený standardizovaný síťový protokol a systémová architektura navržen LoRa Aliancí definovný v LoRaWAN specifikaci [33] vytvářející MAC (media access control) vrstvu nad fyzickou vrstvou LoRa se zabezpečením přenášených dat. Síť má hvězdicovou topologii, kde komunikaci zahajuje koncové zařízení a koncentrátor ho obsluhuje. Pro nízkou spotřebu protokol umožňuje ludit SF (Spreading Factor) odpovídající přenosové rychlosti, pro regulaci dosahu, který je až 15-22 km mimo městskou část a 3-8 km ve městské části [33]. V některých oblastech některé firmy poskytují pokrytí LoRaWAN sítí a proto je tato technologie velmi populární. Na trhu je mnoho koncových zařízení i gatewayů s jejichž vzájemnou kompatibilitou není problém. Gateway přeposílá přijaté pakety s daty z koncových zařízení na server, kde je datový obsah (payload) zpracován na základě dokumentace od výrobce daného koncového zařízení. Semtech je jediným výrobcem integrovaných obvodů podporujících LoRa modulaci. Na trhu je dostupných mnoho transceiverů, které používají tento integrovaný obvod, některé dokonce obsahují implementovaný LoRaWAN protokol. Transceiver pro gateway má cenu okolo \$130 a umožňuje současně přijímat pakety od koncových zařízení na více kanálech a přenosových rychlostech. Je zde i

možnost udělat jednokanálovou gateway, která je schopna přijímat v jednu chvíli pouze na jednom kanále a jedné přenosové rychlosti s použitím transceiveru pro koncová zařízení za cenu okolo \$5-20. V takové síti pak musí být všechna koncová zařízení nakonfigurována na jednu konkrétní frekvenci a přenosovou rychlost.

3.1.4 Zigbee

Zigbee je specifikace navržena pro IoT aplikace, založena na standardu IEEE 802.15.4, vyvinuta Zigbee alliancí [29]. Technologii Zigbee podporuje topologie mesh a hvězdice, většinou je použita topologie mesh pro rozšíření dosahu sítě, který je mezi dvěma zařízeními do 300 m na přímou viditelnost a 75 až 100 m v budově [30]. Jedna síť může obsahovat až 65000 zařízení. Dostupné transceivery na trhu se pohybují okolo \$8–30 od více různých výrobců, taktéž je i na trhu dostupných mnoha Zigbee koncových zařízení.

3.1.5 BLE

BLE (Bluetooth Low Energy) je verze Bluetooth navržena pro minimální spotřebu energie, podporující topologie point-to-point, broadcast a mesh [31]. Dosah mezi dvěma zařízeními je až 100 m [32]. Dostupné transceivery na trhu se pohybují okolo \$5–20 od více různých výrobců. Stejně tak je i na trhu mnoho dostupných koncových zařízení, ale mnohdy jsou tato koncová zařízení kompatibilní pouze se zařízení v rámci jednoho výrobce, tudíž může být problém je implementovat do vlastní senzorové sítě.

3.2 Vybraná přenosová technologie

Tabulka 3.1 shrnuje vlastnosti zmíněných technologií.

| | IQRF | Wireless M-bus | LoRa | ZigBee | BLE |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|--|--|
| Topologie | mesh, star | star | star | mesh, star | Point-to-Point, Broadcast, Mesh |
| Max. velikost paketu | 64 B | 256 B | 256 B | 133 B | 20 B (Bluetooth 4.0), 251 B (Bluetooth 4.2) |
| Přenosová rychlosť | 19.2 kb/s | 32.768 – 100 kb/s | 0.3- 50kb/s | 250 kb/s | up to 1 Mb/s |
| Pásma (Evropa) | 868 MHz | 868 MHz | 868 MHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz |
| Dosah | 500 m (line of sight) | 500 m (line of sight) | 15-22 km suburban, 3-8 km urban | 300 m (line of sight), 75-100 m (indoor) | 100 m (class 1), 10 m (class 2), less than 10 m (class 3) |
| Zabezp. | AES-128 | AES-128 | AES-128 | AES-128 | AES-128 |
| Max. vysílací výkon | up to 8 mW | 0.16–20 mW | 24 mW | 1-100 mW | 100 mW (class 1), 5 mW (class 2), 1 mW (class 3) |

Tabulka 3.1: Souhrn porovnání parametrů kandidátní bezdrátových technologií

Pro tento vybraný případ byla vybrána technologie LoRa se standardizovaným sítovým protokolem LoRaWAN v jednokanálovém módu, jako je to používáno ve vývojových projektech [19], tudíž to není plně LoRaWAN kompatibilní. V jednokanálovém módu jsou všechna zařízení v síti nakonfigurována na jeden konkrétní kanál a přenosovou rychlosť. Výhoda použití této technologie v jednokanálovém módu je, že gateway může použít transceiver určen pro koncová zařízení, který je více jak desetkrát levnější a vyžaduje nižší výkon CPU než transceiver pro gateway, tudíž gateway v jednokanálovém módu je mnohem jednodušší a levnější řešení. LoRaWAN koncová zařízení třetích stran jsou plně kompatibilní s jakoukoliv LoRaWAN gateway pro daný region, tudíž mohou být implementovány do navrženého systému v tomto projektu, ale musí být překonfigurována ke komunikaci na zvoleném kanále a přenosové rychlosti. LoRaWAN síť má hvězdicovou topologii při dostatečném dosahu pro pokrytí budovy a jejím okolí, navíc dosah lze ladit parametrem SF. Pro tento vybraný případ je to vhodné, jelikož pravděpodobně všechna zařízení v síti budou senzory napájeny z

3.2. Vybraná přenosová technologie

baterie, a není předpokládáno, že by byly připojeny zařízení umožňující směrování paketů z důvodu spotřeby energie. LoRaWAN síť umožňuje koncovým zařízením po změření dat senzory ihned odeslat na gateway bez nutnosti čekání na potvrzení, tudíž se koncové zařízení může ihned přepnout do režimu spánku a tím eliminovat spotřebu energie. Případné občasné kolize mají za důsledek selhání doručení paketu, ale pro tento vybraný případ to není příliš závažný problém. Frekvenční ISM pásmo 868 MHz, které používá LoRa je limitováno na maximální dobu vysílání 1% času jedním zařízením a přenosová rychlosť této technologie patří mezi nejnižší z kandidátních technologií. Pro tento vybraný případ se předpokládá přenášení pouhých hodnot senzorů o velikosti několik jednotek až desítek bytů s intervalem několika minut až hodin, tudíž to pro tento vybraný případ vyhovuje. LoRaWAN protokol je zabezpečen šifrováním AES-128 na dva způsoby, a to zabezpečení aplikační pro nečitelnst přenášených dat a síťové pro zabránění útočníkům opakovat již přenesené pakety nebo odesílat falešné packety, tudíž je toto zabezpečení dostatečné.

Část II

Practical part

Kapitola 4

Realizace zařízení

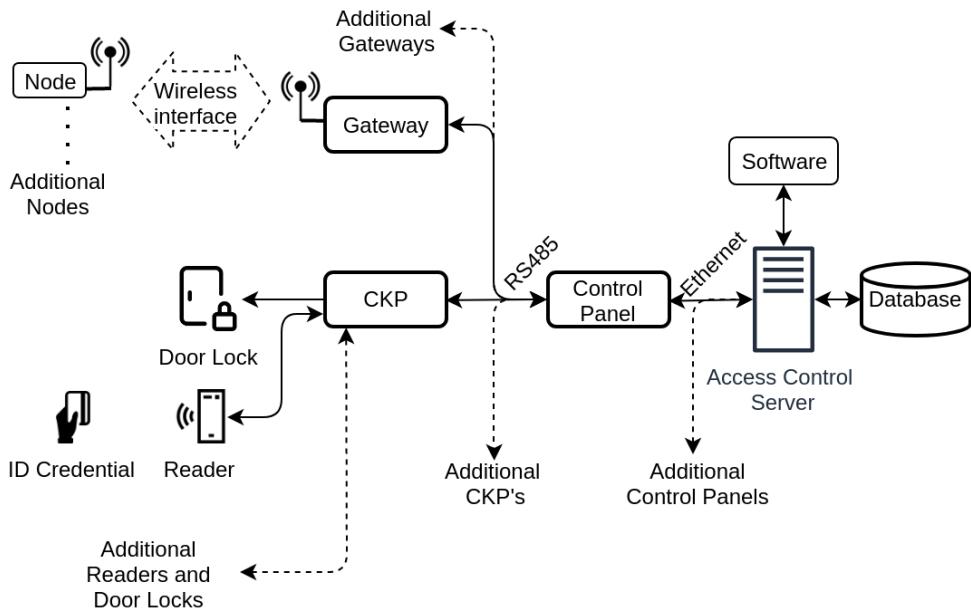
Tato kapitola popisuje kompletní návrh řešení rozšíření komerně používaného systému o senzorovou síť.

4.1 Implementace WSN do přístupového systému

Přístupový systém k rozšíření o WSN pro tento vybraný případ je vytvořen firmou IMA a je komerně distribuován. Jeho architektura se liší od všeobecné architektury zobrazené v blokovém schematu 2.1 přidáním zařízení CKP, tvořícího rozhranní mezi kontrolním panelem a čtečkou s dveřním zámkem. Přístupový systém má několik typů CKP zařízení podporujících různé typy čteček, dveřních zámků, závor, vrat apodobně, ale všechna tato CKP zařízení podporují CKP protokol v síti RS485 pro komunikaci s kontrolním panelem.

Rozšíření tohoto Přístupového systému o WSN je vytvořeno připojením WSN gatewaye ke kontrolnímu panelu přes RS485 síť stejně jako CKP zařízení. Názorná blokové schéma přístupového systému firmy IMA s implementací WSN gatewaye je zobrazeno v obrázku 4.1. V budovách, kde již je tento přístupový systém nainstalován je obvykle více kontrolních panelů, vždy jeden kontrolní panel pro několik dveří s CKP zařízeními propojenými sítí RS485. K jednomu přístupovému systému je možné připojit několik WSN gatewayí k libovolným kontrolním panelům v budově pro dosažení požadovaného pokrytí WSN.

WSN gateway tedy musí podporovat CKP protokol v síti RS485 navržen firmou IMA. Jedná se o kolizní protokol, kde všechna zařízení se řídí pravidlem LBT (Listen Before Talk), kolize jsou detekovány mechanismem kontroly integrity použitý v každé zprávě. V případě že zařízení přijme poškozený příkaz, vyžádá jeho opakování.



Obrázek 4.1: IMA access control system architecture with WSN extension

Přístupový systém firmy IMA funguje tak, že CKP zařízení získává seznam všech platných karet (ID Credentials) ze serveru řízení přístupu a na základě tohoto seznamu pak CKP zařízení provádí odpovídající akci po přiložení karty ke čtečce. Je-li ke čtečce přiložena karta, jejíž číslo není obsaženo v seznamu platných karet, CKP zařízení pouze signalizuje událost uživateli (např. červené bliknutí nebo pípnutí), ale zprávu o této události neodesílá na server řízení přístupu. Je-li ke čtečce přiložena karta, jejíž číslo je obsaženo v seznamu platných karet, CKP zařízení signalizuje událost uživateli (např. zelené bliknutí nebo pípnutí) a zprávu o této události odesílá na server řízení přístupu příkazem tzv. "průchod". Navržená gateway bere seznam platných karet jako seznam platných koncových zařízení senzorové sítě. Gateway pak zpracovává pakety pouze od zařízení z tohoto seznamu a ostatní ignoruje, tudíž v síti RS485 jsou přenášena pouze relevantní data. Data z koncových zařízení jsou odesílána na server řízení přístupu příkazem "průchod", který má fixní velikost a po přidání adresy koncového zařízení o velikosti 4 B zde už zbývá pouze 6 B pro data z koncového zařízení, což je velké omezení. LoRaWAN protokol používá paket, jehož samotná hlavička je o minimální velikosti 13 B. Různá LoRaWAN koncová zařízení používají různé velikosti datového obsahu (payloadu), takže není možné odesílat celý payload koncového zařízení přes síť RS485. Tento problém je řešen ta, že LoRaWAN pakety z koncových zařízení jsou dešifrovány přímo v gatewayi a konečné hodnoty senzorů jsou vypočítány z payloadu zařízení na základě dokumentace poskytnuté výrobcem [40]. Vybrané hodnoty jsou odeslány na server řízení přístupu skrze kontrolní panel.

4.2 Návrh WSN gatewaye

Jak již bylo zmířeno v předchozí sekci, gateway dešifruje pakety z koncových zařízení a na základě typu koncového zařízení vypočítává z datového obsahu (payloadu) hodnoty senzorů z nichž vybrané odesílá na server řízení přístupu přes kontolní panel a to z důvodu datového omezení protokolu v síti RS485, do které je gateway připojena. Pro každý podporovaný typ koncového zařízení musí být implementováno zpracování datového obsahu (payloadu) ve FW (FW) gatewaye. Pozdější přidání typů koncových zařízení tedy vyžaduje update FW gatewaye. Gateway tedy má uloženou informaci o typu koncového zařízení společně s jeho LoRaWAN device address. LoRaWAN protokol je zabezpečen šifrováním AES-128 na dva způsoby, a to zabezpečení aplikační pro nečitelnst přenášených dat a síťové pro zabránění útočníkům opakovat již přenesené pakety nebo odesílat falešné pakety. Jsou zde tedy dva AES-128 šifrovací klíče, aplikační klíč AppSKey (Application Session Key) a síťový klíč NwKSKey (Network Session Key).

Jelikož adresy koncových zařízení jsou předávány gatewayi stejně jako platné karty čtečce z aplikace na serveru řízení přístupu, není zde možnost předávávat dva 16 B dlouhé šifrovací klíče pro každé koncové zařízení společně s adresou zařízení. Geteway tedy má tyto dva klíče pro všechna zařízení stejné, uložené v non-volatile paměti, konfigurovatelné pouze přímo na gatewayi. V tomto návrhu není implementován opačný směr komunikace, tedy ze serveru řízení přístupu na koncové zařízení, ale je také možné implementovat pro ovládání aktulátorů, jako je relé, motor, apod.

4.2.1 Sestavení HW k vytvoření prototypu gatewaye k testování

Pro otestování navrženého řešení rozšíření přístupového systému o senzorovou síť je sestavena gateway z vývojového kitu NUCLEO-L073RZ [41], transceiveru Dragino LoRa Shield [42] a RS485 transceiver [44], viz. obr. 4.2.



Obrázek 4.2: Gateway block diagram, RFM95w [42], RS485 transceiver [44], NUCLEO-L073RZ [41]

Vývojový kit NUCLEO-L073RZ s integrovaným mikrokontrolérem STM32L073RZ je vhodný pro vývoj kvůli jeho parametrym viz tabulka 4.1,

pinoutu kompatibilním s Arduino UNO, dokumentaci a ceně (\$13 USD [41]). K vytvoření prototypu byl použit, protože splňuje všechny požadované parametry, je levný, dostatečně výkonný a jednoduchý pro vývoj. Kit obsahuje programátor ST-link pro nahrávání a debugování programu, tudiž není potřeba externí programátor během vývoje aplikace. LoRa transceiver RFM95w je PCB (Printed Circuit Board) s čipem SX1276. Pro tento prototyp je použit integrovaný v Dragino LoRa Shield [43], který má kompatibilní pinout s Arduino UNO, tedy i s použitým vývojovým kitem NUCLEO-L073RZ. RS485 transceiver konvertuje rozhranní RS485/UART pro umožnění komunikace s kontrolním panelem přes síť RS485.

| Parametr | Informace |
|------------------------------|------------------------------|
| Microcontroller architecture | ARM Cortex-M0+ 32-bit RISC |
| Internal flash memory | 192 KB |
| Internal SRAM memory | 20 kB |
| Internal EEPROM memory | 6 kB |
| CPU frequency | up to 32 MHz |
| Interfaces | 2x SPI, 3x I2C, 4x UART, LIN |

Tabulka 4.1: Vlastnosti mikrokontroléru STM32L073RZ [41]

■ Zapojení

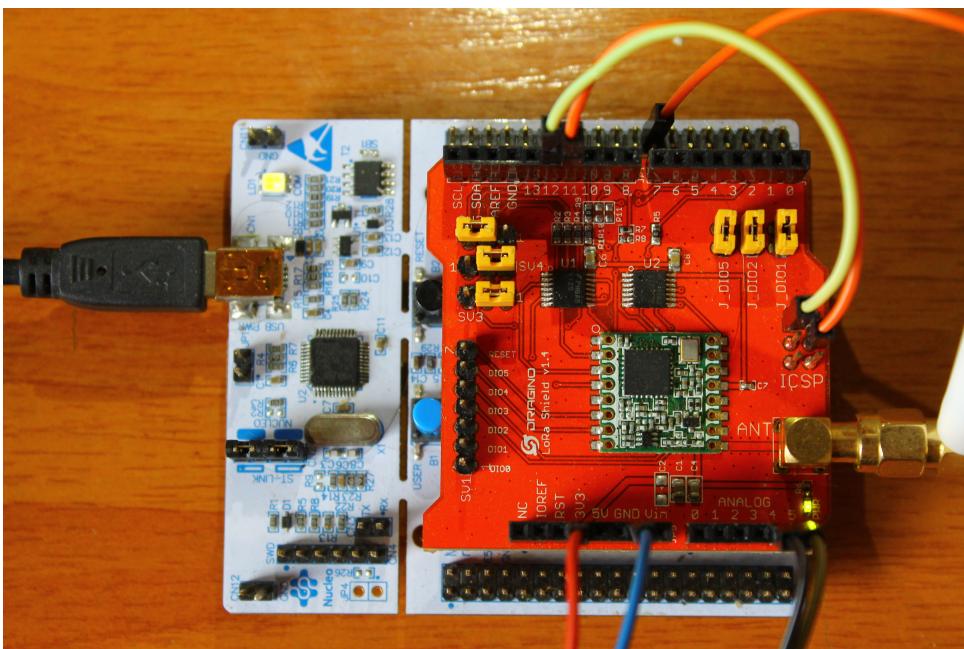
LoRa shield [43] je nasazen přímo na vývojový kit Nukleo. Kit neobsahuje ISCP konektor, který je součástí pinoutu Arduino UNO a LoRa shield má SPI piny MISO a MOSI přivedeny právě na tento konektor. Musí být tedy propojeny externě viz obrázek 4.3.

Pro komunikaci s LoRa transceiverem je použito SPI1, pro komunikaci přes USB je použito USART2 a pro připojení RS485 transceiveru je použito LPUART1. Připojení periférií k GPIO (General Purpose Input Output) mikrokontroléru je znázorněno v tabulce 4.2.

■ 4.2.2 Použité vývojové nástroje

Výrobce použitého mikrokontroléru STMicroelectronics poskytuje grafický nástroj STM32CubeMX [46] ke konfiguraci mikrokontrolérů STM32 a generování odpovídajícího kódu v programovacím jazyce C. Pomocí tohoto nástroje byl vygenerován kód pro předběžnou konfiguraci systémového hodinového signálu, watchdogu, GPIO a rozhranní.

Kód byl vyvíjen v textovém editoru Visual Studio Code [47], komplikován kompilátorem arm-none-eabi-gcc [48] pomocí nástroje GNU make [49], výsledný binární soubor byl nahráván do procesoru pomocí nástroje st-flash [50] a debugován pomocí Visual Studio Code rozšíření Cortex-Debug [51].



Obrázek 4.3: foto zapojení

| Periférie | Název pinu | GPIO mikrokontroléru |
|-------------------|------------|----------------------|
| LoRa transceiver | CS | PB6 |
| | CLK | PA5 |
| | MISO | PA6 |
| | MOSI | PA7 |
| | RST | PC7 |
| | DIO0 | PA10 |
| RS485 transceiver | RX | PC1 |
| | TX | PC0 |
| | RTS | PB1 |
| USB konektor | RX | PA3 |
| | TX | PA2 |

Tabulka 4.2: Pinout připojení periférií k mikrokontroléru

4.2.3 Vývoj FW

Pro tento vybraný případ není využit RTOS (Real Time Operating System), jelikož zde není potřeba řešení více úloh souběžně. K vývoji jsou použity drivery distribuovány výrobcem mikrokontroléru, CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) a HAL (Hardware Abstraction Layer).

Vyvinutá aplikace je rozdělena na několik nezávislých podprogramů viz tabulka 4.4.

| Název podprogramu | Popis |
|-------------------|--|
| LoRa | Knihovna zahrnující komunikaci s transceiverem RFM95W po rozhranní SPI, nainicializovaném v režimu komunikace LoRa |
| LoRaWAN_packet | Knihovna zahrnující LoRaWAN protokol, tedy dekódování a dešifrování přijatého LoraWAN paketu i vytvoření paketu pro odeslání. Tato knihovna je závislá na knihovnách aes a cmac. |
| LoRa_sensors | Knihovna zahrnující dekódování payloadu podporovaných koncových zařízení a zapsání výsledných hodnot do bufferu, který je pak odeslán na kontrolní panel přes síť RS485 |
| rs485_protocol | Podprogram zahrnující síťový protokol v síti RS485 |
| usb | Podprogram zahrnující konfiguraci systému přes USB |
| eeprom | Knihovna zahrnující práci s non-volatile paměti procesoru EEPROM |

Tabulka 4.3: Rozdělení aplikace na nezávislé podprogramy

Každý z těchto podprogramů je implementován ve zdrojovém souboru (source file) s koncovkou .c a hlavičkovém souboru (header file) s koncovkou .h. Pro vytvoření knihovny zahrnující LoRaWAN protokol jsou použity open source knihovny pro šifrování, tiny-AES128-C [52] pro zašifrování payloadu a openpana [53] pro vytvoření CMAC (Cipher-based Message Authentication Code)

| Název podprogramu | Popis |
|----------------------|--|
| buffer_ring | Knihovna implementující cyklický buffer o velikosti 256 B |
| ByteArray | Knihovna zahrnující pomocné funkce pro práci s polem bytů |
| LinkedList_ByteArray | Knihovna implementující linked list s neomezenou velikostí o datové struktuře pole bytů s ukládáním do části paměti heap |
| aes | Knihovna implementující šifrování AES-128 [52] |
| cmac | Knihovna pro výpočet CMAC, převzatý pouze potřebný kód z knihovny [53] |

Tabulka 4.4: Dodatečné pomocné podprogramy

Po spuštění aplikace je nejprve inicializován mikrokontrolér, hodinový signál, GPIO, rozhranní, timery a IWDG (Independent Watchdog). Systémový hodinový signál je nakonfigurován na maximální hodnotu, což je 32 MHz. Po inicializaci mikrokontroléru je z non-volatile paměti EEPROM vyčtena a

vypsána v logu aktuální konfigurace gatewaye a následuje inicializace LoRa transceiveru RFM95w dle načtené konfigurace a nakonec je vstoupeno do hlavní smyčky běhu programu, kde jsou dokola nepřetržitě zpracovávány cyklické buffery a fronty tvořeny linked listy.

Jsou zde použity 2 timery, TIM2 pro restartování procesoru a TIM3 pro resetování IWDG. Resetování procesoru po daném intervalu defaultně není použito, ale je implementováno a v případě potřeby je možné využít. IWDG je resetován timerem tudiž tvoří pojistku že resetuje procesor v případě že by aplikace spadla.

Komunikace s transceiverem RS485 přes LPUART1 je implementována pro vysílání v blokujícím módu a přijímání přes interrupt, kde přijatý byte je zapsán do cyklického bufferu o velikosti, který je zpracováván v hlavní smyčce běhu aplikace. Jelikož komunikace v síti RS485 je half-duplex a platí zde pravidlo LBT, vysílání je zde blokováno po dobu 20 ms od posledního přijatého bytu.

Komunikace s LoRa transceiverem RFM95W přes rozhranní SPI1 je implementována v blokujícím módu zápisem a čtením registrů. LoRa transceiver je nakonfigurován na kontinuální příjem na zvoleném kanále a SF, přijatý LoRa paket signalizuje zvednutím logické úrovně pinu DIO0. Toto je řešeno interrupt pinem, po jehož přerušení je vyčten přijatý LoRa paket z FIFO (First In First Out) paměti transceiveru a přidán do fronty tvořené linked listem, zpracovávané v hlavní smyčce běhu aplikace, kde pakety z této fronty jsou postupně dekódovány a diešifrovány, na základě typu zařízení jsou vypočteny hodnoty senzorů z payloadu a zakódovány do bufferu o délce 6 B, který je připojen do fronty tvořené linked listem, zpracovávané v hlavní smyčce běhu programu.

Komunikace přes USB přes USART2 je implementována obdobně jako komunikace v síti RS485 kde přijatá data jsou zapsána do cyklického bufferu, který je zpracováván v hlavní smyčce běhu programu, ale vysílání není blokováno během přijímání, jelikož se jedná o full-duplex.

■ **Nahrávání programu do mikrokontroléra a debugování**

jaktoze se stlink zobrazí jako flash drive pamet? todo

■ **Komunikace přes sériovou linku USB**

Gateway má implementovanou komunikaci přes sériovou linku, umožňující konfiguraci a log. K připojení lze použít PC s libovolnou aplikací umožňující

odesílání a přijímání dat zakódovaných ASCII (American Standard Code for Information Interchange) po sériové lince s nastavením parametrů dle tabulky 4.5.

| Parametr | Hodnota |
|--------------|---------|
| Baud rate | 115200 |
| Data bits | 8 |
| Parity | none |
| Stop bits | 1 |
| Flow control | none |

Tabulka 4.5: Parametry sériové linky PC terminálu pro komunikaci s gatewayí

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

4.2.4 Log Gatewaye

Po připojení ke gatewayi přes sériovou linku dle instrukcí v sekci Komunikace přes sériovou linku USB je možné kontinuálně snímat a log gatewaye obsahující informace o proběhlých událostech. Je-li gateway v normálním pracovním režimu, loguje informace automaticky přes sériovou linku a komunikace je zde pouze jednosměrná, tedy gateway vysílá a PC přijímá. Níže je příklad výpisu logu v případě, kdy gateway přjala LoRaWAN paket z koncového zařízení senzorové sítě, zpracovala ho a výslednou informaci odeslala na kontrolní panel přes RS485 síť.

```
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: "FF1F100D00D0F61F01281A0934CDFFFF09202E"

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

Nejprve jsou vypsány data týkající se LoRaWAN protokolu, zašifrovaný i dešifrovaný datový obsah (payload) koncového zařízení, typ zařízení a výsledné hodnoty dekódované z payloadu.

4.2.5 Konfigurace gatewaye

Konfigurace gatewaye se provádí obousměrnou komunikací po sériové lince s připojením dle instrukcí v sekci Komunikace přes sériovou linku USB. Po spuštění je gateway v normálním pracovním režimu, přeposílá tedy pakety ze senzorové sítě přes RS485 síť na kontrolní panel a informace loguje přes sériovou linku. Po vstoupení do stavu konfigurace je pozastavena činnost gatewaye, komunikace s koncovými zařízeními LoRaWAN sítě a komunikace s kontrolním panelem v síti RS485 nejsou aktivní. Do režimu konfigurace je vstoupeno odesláním "config", následuje vypsání současného stavu konfigurace a následně uživatel postupuje zadáním čísla pro výběr možnosti z menu či konkrétního parametru dle vyzvání. Z konfigurace je možné vystoupit kdykoliv bez uložení změn příkazem "quit". Procházení jednotlivými menu je navrženo

jedodušše tak, aby uživatel nepotřeboval dokumentaci a aby zde vždy bylo uvedeno dost informací pro srozumitelnost. Níže je zobrazen příklad výpisu po vstupu do konfigurace obsahující informaci o aktuální konfiguraci a hlavní konfigurační menu.

```
-----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
```

Jsou zde tedy tři sekce konfigurace, LoRa kanál, RS485 kanál a parametry LoRaWAN protokolu. Dále jsou zde další možnosti hlavně pro diagnostické účely, a to možnost ručně přidat LoRaWAN koncové zařízení a vymazání všech koncových zařízení, ačkoliv je to obvykle prováděno ze serveru řízení přístupu, a navrácení stavu gatewaye do defaultního stavu. Dále jsou zde možnosti vystoupení z menu s či bez uložení změn, tedy zapsání nově nakonfigurovaných parametrů do non-volatile paměti.

Při procházení jednou ze tří možných konfigurací je vždy pro každý parametr vypsáno jaká data mají být uživatelem 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 vván k dalšímu pokusu. Pokud uživatel některý parametr nechce měnit, přeskočí ho odesláním ASCII znaku LF (0x0D) u většiny terminálových aplikací stačí pouze stisknout na klávesnici Enter. Po provedení některé 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. Pokud je vybráno "Exit without save", gateway se pouze restartuje.

■ Konfigurace LoRa kanálu

Položka v menu pod názvem "Config LoRa channel" zahrnuje nastavení SF, tedy přenosovou rychlosť a frekvenční kanál. 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.
```

■ Konfigurace RS485 kanálu

Položka v menu pod názvem "Config RS485 channel" zahrnuje nastavení adresy gatewaye, tedy tohoto zařízení, adresy kontrolního panelu a timeout, což je doba čekání na potvrzení od kontrolního panelu 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
```

■ Konfigurace LoRaWAN protokolu

Položka v menu pod názvem "Config LoRaWAN protocol" 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)
1111111222222233333344444444
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)
1111111222222233333344444444
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 4.6. 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 4.6: Defaultní konfigurace systému

■ 4.2.6 Podpora koncových zařízení

Jak již bylo zmíněno v sekci , z důvodu datového omezení protokolu sítě RS485 jsou LoRaWAN pakety koncových zařízení dekódovány v gatewayi a z datového obsahu (payloadu) vypočítány konečné hodnoty dle dokumentace daného LoRaWAN zařízení a přes síť RS485 na kontrolní panel jsou odesány pouze vybraná data. Gateway má pro každé koncové zařízení uloženou 4 byty dlouhou adresu a 1 byte typ zařízení. Momentálně jsou podporovány dva typy koncových zařízení, dle potřeby je možné rozšířit FW gatewaye o další typy koncových zařízení. Tabulka 4.7 ukazuje hodnotu bytu označující typ koncového zařízení odpovídající konkrétním typům koncových zařízení.

| Typ zařízení | Hodnota |
|---------------|---------|
| RHF1S001 | 0x00 |
| IMA_tempPress | 0x01 |

Tabulka 4.7: Typy 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 přes síť RS485 příkazem "průchod".

■ RHF1S001

Senzor od firmy RisingHF měřící teplotu a vlhkost [40].

```

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 /* Put the data into 6 B long buffer, to be transmitted to the control panel */
21 buffer [0] = RHF1S001_data.temperature & 0xFF;
22 buffer [1] = RHF1S001_data.temperature >> 8;
23 buffer [2] = RHF1S001_data.humidity;
24 buffer [3] = RHF1S001_data.rssi;
25 buffer [4] = RHF1S001_data.snr;
      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 /* Put the data into 6B long buffer, that is transmitted to the K4 server */
17 buffer [0] = IMA_tempPress_data.temperature & 0xFF;
18 buffer [1] = IMA_tempPress_data.temperature >> 8;
19 buffer [2] = IMA_tempPress_data.pressure & 0xFF;
20 buffer [3] = IMA_tempPress_data.pressure >> 8;
      buffer [4] = IMA_tempPress_data.rssi;
      buffer [5] = IMA_tempPress_data.snr;

```

4.2.7 Přidávání koncových zařízení ze serveru řízení přístupu

Přidávání koncových zařízení senzorové sítě se provádí z uživatelského rozhranní serveru řízení přístupu stejně jako přidávání platných RFID karet, s délkou UID 8 B. Adresa koncového zařízení (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 serveru řízení přístupu. Při odesílání příkazu "průchod" se tedy už typ zařízení neposílá z důvodu omezené velikosti tohoto příkazu. Na serveru řízení přístupu se UID nastavuje jako dekadické číslo.

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

Kapitola 5

Měření výsledky a diskuse

Kapitola 6

Závěr

Literatura

- [1] H. Ali, W. Y. Chew, F. Khan and S. R. Weller, "Design and implementation of an IoT assisted real-time ZigBee mesh WSN based AMR system for deployment in smart cities," *2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, ON, 2017, pp. 264-270. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8052810> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [2] T. Malche and P. Maheshwary, "Internet of Things (IoT) for building smart home system," *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, Palladam, 2017, pp. 65-70. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8058258> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [3] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment". *ICT Express*, vol. 5, no. 1, March 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [4] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, October 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7721743> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [5] A. Lavric and A. Ioan Petrariu, "High-Density Low Power Wide Area Networks," *2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Iasi, Romania, 2018, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8678997> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [6] A. Kosari and D. D. Wentzloff, "MURS Band for LPWAN Applications," *2019 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet)*, Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-3.

- [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8711814> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [7] KRANZ, Maciej. The Internet of Things: 5 Predictions for 2018. CISCO: blog [Online]. Available: <https://blogs.cisco.com/innovation/the-internet-of-things-5-predictions-for-2018> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [8] R. F. Fernandes, C. C. Fonseca, D. Brandão, P. Ferrari, A. Flammini and A. Vezzoli, "Flexible Wireless Sensor Network for smart lighting applications," 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Montevideo, 2014, pp. 434-439. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6860782> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [9] W. Huiyong, W. Jingyang and H. Min, "Building a Smart Home System with WSN and Service Robot," 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Hong Kong, 2013, pp. 353-356. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6493740> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [10] Luo Hui, "A meter reading system based on WSN," 2010 International Conference on Optics, Photonics and Energy Engineering (OPEE), Wuhan, 2010, pp. 311-314. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5508121> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [11] M. J. Mudumbe and A. M. Abu-Mahfouz, "Smart water meter system for user-centric consumption measurement," 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Cambridge, 2015, pp. 993-998. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7281870> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [12] R. K. Kodali, "Radio data infrastructure for remote monitoring system using lora technology," 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Udupi, 2017, pp. 467-472. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8125884> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [13] N. Shah and P. S. Sundar, "Smart Electric Meter Using LoRA Protocols and lot applications," 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 2018, pp. 1178-1180. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8474749> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [14] C. Yoon, M. Huh, S. Kang, J. Park and C. Lee, "Implement smart farm with IoT technology," 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Chuncheon-si Gangwon-do, Korea (South), 2018, pp. 749-752. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8323908> [Accessed: 9-Sep-2019].

- [15] Know about Access Control Systems and Their Types with Features. *Electronics projects focus* [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/understanding-about-types-of-access-control-systems/> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [16] *RF*. IQRF Alliance. [Online]. Available: <https://www.iqrf.org/technology/rf> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [17] *RF*. IQRF Alliance. [Online]. Available: <https://www.iqrf.org/technology/iqrf-ide> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [18] *IQRF SDK*. IQRF Alliance. [Online]. Available: <https://www.iqrf.org/technology/iqrf-sdk> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [19] *Transceivers*. IQRF Alliance. [Online]. Available: <https://www.iqrf.org/products/transceivers> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [20] *Three security levels in new IQRF OS 4.0*. IQRF Alliance. [Online]. Available: <https://www.iqrfalliance.org/news/117-three-security-levels-in-new-iqrf-os-4-0> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [21] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8399666> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [22] [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eip/ageing/standards/ict-and-communication/data/en-13757_en [Accessed: 2-Apr-2020].
- [23] [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz//sbernice-wireless-mbus-jde-i-bezdratove> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [24] *Wireless Meter Bus, WM-Bus Technology*. Radio-Electronics. [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wireless-m-bus/basics-tutorial.php> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [25] *Wireless M-Bus in Industrial Wireless Sensor Networks*. Radiocrafts. [Online]. Available: <https://radiocrafts.com/technologies/wireless-m-bus-technology-overview/> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [26] Silicon labs: *WIRELESS M-BUS SOFTWARE IMPLEMENTATION*. [Online]. Available: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/AN451.pdf> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [27] Compass security: *Wireless M-Bus Security Whitepaper Black Hat USA 2013*. June 30th. 2013, v1.01. [Online]. Available: https://www.compass-security.com/fileadmin/Datein/Research/Praesentationen/blackhat_2013_wmbus_security_whitepaper.pdf [Accessed: 9-Jun-2018].

- [29] *The Zigbee Alliance.* Zigbee alliance. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/about-us/> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [30] *The Zigbee Alliance.* Zigbee alliance. [Online]. Available: <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [31] *BLE Packet.* [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/radio-versions/> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [32] *BLE Packet.* [Online]. Available: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/things-you-should-know-about-bluetooth-range> [Accessed: 9-Jun-2018].
- [33] LoRa Alliance, "LoRaWAN 1.1 Specification", version 1.1, October 11, 2017 [Online]. Available: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf [Accessed: 9-Sep-2019].
- [40] RisingHF, "Outdoor IP64 Temperature and Humidity LoRaWAN sensor RHF1S001", version 1.2, 2015 [Online]. Available: http://www.objenious.com/wp-content/uploads/2016/10/RHF-DS015880utdoor-IP64-Tempratrure-and-Humidity-LoRaWAN-Sensor-RHF1S001_V1.3.pdf [Accessed: 9-Sep-2019].
- [41] *NUCLEO-L073RZ.* ST Microelectronics [Online]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-1073rz.html> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [42] *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module.* HopeRF electronic. V1.0. [Online]. Available: <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [43] *Lora Shield.* Dragino. [Online]. Available: http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield [Accessed: 20-Sep-2019].
- [44] *SparkFun Transceiver Breakout - RS-485* Sparkfun. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10124> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [45] *NUCLEO-L073RZ* ARM Mbed. [Online]. Available: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L073RZ/> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [46] [Online]. Available: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [47] [Online]. Available: <https://code.visualstudio.com/> [Accessed: 20-Sep-2020].
- [48] [Online]. Available: <https://developer.arm.com/tools-and-software/open-source-software/developer-tools/gnu-toolchain/gnu-rm/downloads> [Accessed: 20-Sep-2020].

- [49] [Online]. Available: <https://www.gnu.org/software/make/manual/make.html> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [50] [Online]. Available: <https://github.com/texane/stlink> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [51] [Online]. Available: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=marus25.cortex-debug> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [52] *tiny-AES128-C* bitdust. [Online]. Available: <https://github.com/bitdust/tiny-AES128-C> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [53] *openpana*. OpenPANA. [Online]. Available: <https://github.com/OpenPANA/openpana> [Accessed: 20-Sep-2019].
- [19] N. H. Abd Rahman, Y. Yamada, M. H. Husni and N. H. Abdul Aziz, "Analysis of Propagation Link for Remote Weather Monitoring System through LoRa Gateway," *2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*, Kuching, 2018, pp. 55-60. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8580479> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [119] 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].
- [1110] [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/understanding-about-types-of-access-control-systems/> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1111] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8678997> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1112] [Online]. Available: <https://blogs.cisco.com/innovation/the-internet-of-things-5-predictions-for-2018> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1113] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8711814> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1114] [Online]. Available: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S240595917302953?token=1D12BD2186DD8FA9065DCE9301C63D4D2F67C3557C4677D06FCE5DBB92C96984BFCF132B6DD37ED892EAE> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1115] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7721743> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1116] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8323908> [Accessed: 9-Sep-2019].
- [1117] [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8125884> [Accessed: 9-Sep-2019].