



F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Bakalářská práce

Optimalizace přenosu dat v LPWAN sítích z hlediska energetické náročnosti

Vojtěch Masný

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph. D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Masný** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **499178**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace přenosu dat v LPWAN sítích z hlediska energetické náročnosti

Název bakalářské práce anglicky:

Optimization of Data Transmission in LPWAN Networks in Terms of Energy Consumption

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je optimalizace programového vybavení pro mikrokontrolér s cílem minimalizovat energetickou náročnost přenosu dat v LPWAN síti tak, aby bylo možné přenášet velmi malý objem dat (např. jednoduchá binární signalizace) a napájet zařízení energi harvestorem. Pro experimentální část bude použit nízkopříkonový mikrokontrolér STM32WL5E vybavený LoRa rádiovým rozhraním. Součástí práce bude měření spotřeby mikrokontroléru a identifikace energeticky náročných částí programového vybavení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] STM32WLEEx - Wireless MCUs with LoRa support [online]. ST. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wlex.html>
[2] GOMEZ-CASSERES, E. Andrés, et al. Comparison of passive rectifier circuits for energy harvesting applications. In: 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). IEEE, 2016. p. 1-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji především svému vedoucímu doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za vedení této práce, rady a čas věnovaný konzultacím. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 24. května 2023

Vojtěch Masný

Abstrakt

Úkolem této práce je snížit energii potřebnou k vyslání krátké zprávy v LPWAN síti, aby bylo možné zařízení napájet z energy harvesteru. V teoretické části jsou porovnány dostupné LPWAN sítě a dále je podrobně popsána použitá síť LoRaWAN a její modulační LoRa. Pro testování byla použita vývojová deska Nucleo-WL s mikrokontrolérem STM32WL55 a integrovaným rádiovým rozhraním na bázi SX1262. Měřičem spotřeby je Nordic Power Profiler Kit II. Část měření ukazuje jednotlivé spotřeby a dosažené úspory při různé volbě tříd a aktivací LoRaWAN a při změně vysílacích parametrů modulační LoRa. Dále se zaměřuje na změny v softwaru pro mikrokontrolér, které vedly k dalším energetickým úsporám. Výsledná minimální dosažená energie potřebná k vyslání je 2,752 mJ.

Klíčová slova: LPWAN, energetická náročnost, optimalizace, minimalizace, LoRaWAN

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph. D.

Abstract

This work focuses on lowering the energy needed for transmitting a short message in the LPWAN network, making it viable to work from the energy harvester. The theoretical part compares available LPWAN networks and further describes the function of the LoRaWAN network and its LoRa modulation. It uses a Nucleo-WL development board with an STM32WL55 microcontroller and an integrated radio interface based on SX1262 as the testing platform. Nordic Power Profiler Kit II was used for measuring current consumption. The measurement part shows consumptions and savings achieved with different classes and activation methods in LoRaWAN and different transmission parameters of LoRa modulation. The same part then describes changes made to microcontroller software and their effect on decreasing energy consumption. The final minimal reached energy required for transmission is 2,752 mJ.

Keywords: LPWAN, energy consumption, optimization, minimalization, LoRaWAN

Title translation: Optimization of Data Transmission in LPWAN Networks in Terms of Energy Consumption

Obsah

1 Úvod	1
2 LPWAN	3
2.1 Porovnání sítí	3
2.2 Zástupci LPWAN	4
2.2.1 LoRaWAN	4
2.2.2 SigFox	4
2.2.3 NB-IoT	5
2.2.4 Výběr technologie	5
2.3 LoRa	5
2.3.1 Shannon-Hartleyův teorém	6
2.3.2 Metoda rozprostřeného spektra	6
2.3.3 Modulace LoRa	6
2.3.4 Parametry LoRa	7
2.4 LoRaWAN	8
2.4.1 Koncové zařízení	9
2.4.2 LoRaWAN brána	11
2.4.3 LoRaWAN servery	12
2.4.4 Regionální nastavení LoRaWAN	12
2.4.5 Metody aktivace	13
2.4.6 Paket v LoRaWAN	15
3 Mikrokontrolér s rádiem	17
3.1 Mikrokontrolér STM32WL	17
3.1.1 Periferie	17
3.1.2 Flash paměť programu	18
3.1.3 Zdroj hodin a napájení	18
3.2 Integrované rádio SX1262	19
3.2.1 Zdroj hodin a napájení	19
3.3 STM32WL nucleo	19
3.3.1 Vybavení desky	20
3.3.2 Měření spotřeby proudu STM32WL	21
4 Měření spotřeby	23
4.1 Měřič spotřeby Nordic PPK2	23
4.2 Princip měření proudu	23
4.3 Stanovení spotřebované energie	24
5 Optimalizace spotřeby	27
5.1 Spotřeba příkladového softwaru End Node	27
5.2 Nastavení LoRaWAN sítě	28
5.2.1 Třída koncového zařízení	28
5.2.2 Aktivace – OTAA vs ABP	29
5.2.3 Deaktivace příjmu	30
5.3 Optimalizace parametrů modulace LoRa	31
5.3.1 Spreading factor	31
5.3.2 Vysílací výkon	32

5.3.3 Délka dat v paketu	33
5.4 Úspory běhu mikrokontroléru.....	34
5.4.1 Napájecí napětí.....	35
5.4.2 Zdroj časování – LSE vs LSI.....	36
5.4.3 Mazání nepotřebných funkcí v kódu příkladu	37
5.4.4 Periférie CRC	38
5.4.5 Optimalizace ukládání nastavení LoRaWAN	39
5.5 Výsledek optimalizací	41
6 Závěr	43
Literatura	45
A Software	49

Obrázky

2.1 Porovnání sítí podle dosahu a spotřeby [4]	3
2.2 Průběh chirpů v modulaci LoRa ($SF = 7$)	7
2.3 Porovnání symbolové doby upchirpů při různých hodnotách SF	8
2.4 Diagram struktury LoRaWAN sítě	9
2.5 Průběh komunikace v LoRaWAN třídě A [10]	10
2.6 Průběh komunikace v LoRaWAN třídě B [10]	11
2.7 Průběh komunikace v LoRaWAN třídě C [10]	11
2.8 Použití šifrovacích klíčů při komunikaci	13
2.9 Síťové prvky a jejich klíče a identifikátory	15
2.10 Složení LoRaWAN paketu [10]	15
3.1 Vývojová deska NUCLEO-WL55JC [18]	20
3.2 Diagram desky NUCLEO-WL55JC [18]	21
3.3 Napájecí strom desky NUCLEO-WL55JC [18]	22
4.1 Nordic Power Profiler Kit 2 [19]	23
4.2 Diagram Nordic PPK2 [19]	24
4.3 Vypočtené hodnoty v panelu aplikace Power Profiler	25
5.1 Průběh spotřeby čipu v příkladu End Node (3,3 V; 14dBm; DR0; ABP; Třída A; Délka dat: 15)	28
5.2 Průběh odběru proudu koncového zařízení ve třídě C (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)	29
5.3 Průběh odběru proudu při aktivaci OTAA (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)	30
5.4 Průběh spotřeby proudu bez přijímacích oken (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)	31
5.5 Průběhy spotřeby při různé volbě SF (3,3 V; 14 dBm; BW 125 kHz; Délka dat: 15)	32
5.6 Průběhy odběru proudu při různé volbě vysílacího výkonu (3,3 V; DR5; Délka dat: 15)	33
5.7 Průběhy spotřeby pro různou délku uživatelských dat (3,3 V; 10 dBm; DR5)	34
5.8 Průběh odběru proudu aplikace End Node po snížení spotřeby rádia	35
5.9 Průběh odběru proudu při 1,8 V	36
5.10 Průběh odběru proudu před pročištěním kódu	37
5.11 Průběh odběru proudu po vyčištění kódu	38
5.12 Průběh odběru proudu s hardware CRC výpočtem	39
5.13 Průběh odběru proudu fáze ukládání nastavení	40
5.14 Část stránky paměti se sekvenčním číslem	40
5.15 Průběh odběru proudu po optimalizaci ukládání	41
5.16 Průběh odběru proudu při mazání stránky sekvenčních čísel	42
5.17 Průběh odběru proudu výsledné optimalizované aplikace	42

Tabulky

2.1 Porovnání vlastností různých LPWAN technologií [5]	4
2.2 Kanály v nastavení EU868	13
2.3 Maximální délka uživatelských dat v závislosti na DR	16
3.1 Základní přehled parametrů STM32WL	17
3.2 Základní přehled parametrů integrovaného rádia SX1262 [16]	19
4.1 Parametry Nordic PPK2 [19]	24
5.1 Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace End Node	28
5.2 Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace v třídě C (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)	29
5.3 Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace při aktivaci OTAA (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)	30
5.4 Porovnání spotřeby a délky trvání pro různá nastavení SF (3,3 V; 14 dBm; BW 125 kHz; Délka dat: 15)	32
5.5 Porovnání odběru proudu při různém vysílacím výkonu (3,3 V; DR5; Délka dat: 15)	33
5.6 Porovnání spotřeby energie při různé délce uživatelských dat (3,3 V; 10 dBm; DR5)	34
5.7 Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace End Node po snížení spotřeby rádia	35
5.8 Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází při 1,8 V	36
5.9 Naměřené hodnoty spotřeby inicializační fáze po přepnutí na LSI	37
5.10 Naměřené hodnoty spotřeby po vyčištění kódu	38
5.11 Naměřené hodnoty spotřeby s hardware CRC výpočtem	38
5.12 Naměřené hodnoty spotřeby fáze ukládání po optimalizaci	41
5.13 Naměřené hodnoty spotřeby výsledné optimalizované aplikace	42
6.1 Porovnání výchozí a optimalizované aplikace	43

Seznam zkratek

- ABP** Activation by Personalization
- ADR** Adaptive Data Rate
- AES** Advanced Encryption Standard
- ARM** Advanced RISC Machine
- CMAC** Cipher-based Message Authentication Code
- CRC** Cyclic Redundancy Check
- CSS** Chirp Spread Spectrum
- DBPSK** Differential Binary Phase Shift Keying
- DSSS** Direct-Sequence Spread Spectrum
- DUT** Device under test
- ECC** Error Correction Code
- ERP** Effective Radiated Power
- eSIM** Embedded SIM
- FHSS** Frequency Hoping Spread Spectrum
- GFSK** Gaussian Frequency Shift Keying
- GMSK** Gaussian Minimum Shift Keying
- GPS** Global Positioning System
- HTTP** Hypertext Transfer Protocol
- IoT** Internet of Things
- IP** Internet Protocol
- iSIM** Integrated SIM
- ISM** Industrial, Scientific, Medical
- LED** Light Emitting Diode
- LoRa** Long Range
- LoRaWAN** Long Range Wide Area Network

LPWAN Low Power Wide Area Network

LTE Long-Term Evolution

MAC Media Access Control

MIC Message Integrity Code

MQTT Message Queue Telemetry Transport

NB-IoT Narrow Band Internet of Things

OTAA Over the Air Activation

PPK2 Power Profiler Kit II

QPSK Quaternary Phase Shift Keying

RAM Random Memory Access

REST Representational State Transfer

RSSI Received Signal Strength Indication

SIM Subscriber Identity Module

SNR Signal to Noise Ratio

TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol

TTN The Things Network

UART Universal asynchronous receiver-transmitter

USB Universal Serial Bus

Kapitola 1

Úvod

Vzrůstající počet zařízení připojených do Internetu podporuje rozvoj bezdrátových sítí. Jejich schopnosti sahají od komplexních sítí s velkou přenosovou rychlostí až po velmi pomalé, ale nenáročné sítě vhodné pro koncept IoT. Při návrhu IoT čidel je často žadáným požadavkem nízká spotřeba, aby se zajistila dlouhá výdrž. Z tohoto důvodu vznikly sítě LPWAN kombinující nízkou energetikou náročnost, malou přenosovou rychlost a velký dosah.

Tato práce se zabývá snižováním energetické náročnosti komunikace v LPWAN sítích. Existují i jiné práce, které ale nereflektují tamní možnosti nastavení sítě [1] nebo pouze porovnávají bez optimalizací existující technologie [2]. Motivací, proč se snažit spotřebu snížit, je možnost sestavení zařízení napájeného z energy harvesteru. Tyto součástky generují elektrickou energii z okolních neelektrických jevů. Jejich výhodou je, že umožňují zařízením běžet bezbateriově, a tím pádem bez nutnosti jejich výměny. Bezbateriová zařízení v kombinaci se schopností komunikace v LPWAN by našla využití v mnoha oblastech, např. v SOS tlačítkách, zvoncích, senzorech zavření oken a jiných.

Práce začíná v kapitole 2 teoretickým rozbohem, ve kterém je popsána LPWAN a na základě porovnání je vybrán nejvhodnější zástupce. Zvolen je LoRaWAN a její modulace LoRa, které jsou podrobněji vysvětleny v téže kapitole. Následující kapitola 3 popisuje použitý čip STM32WL a jeho vývojový kit. Na to navazuje kapitola 4, která obsahuje popis použitého měřiče spotřeby Nordic Power Profiler Kit II a vysvětluje jeho ovládání a interpretaci. Samotná měření spotřeby a optimalizace přenosu v LoRaWAN jsou v kapitole 5. Závěrečná kapitola 6 shrnuje průběh optimalizací a diskutuje dosažené výsledky.

Kapitola 2

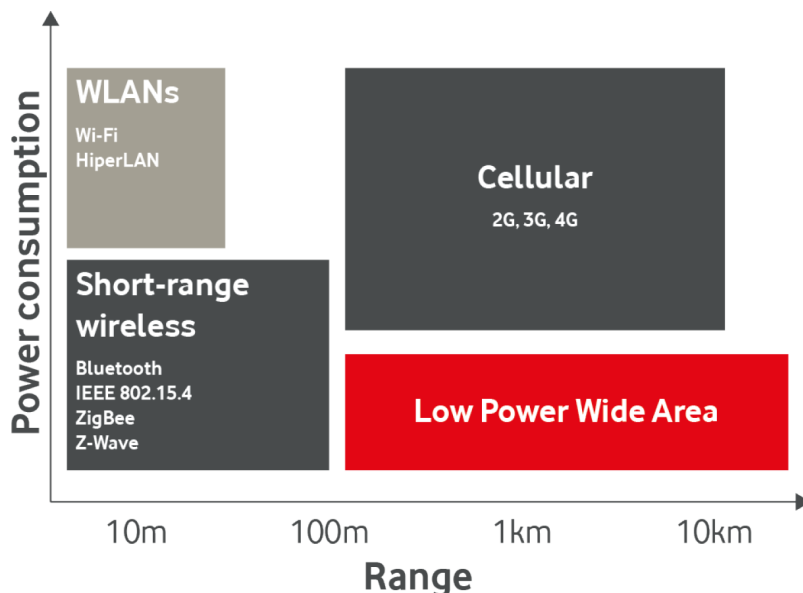
LPWAN

LPWAN (Low Power Wide Area Network) jsou sítě, které umožňují koncovým zařízením komunikovat na velkou vzdálenost a přitom mít nízkou spotřebu. Jsou určeny pro aplikace, ve kterých je vyžadována nízká spotřeba a postačuje malá přenosová rychlost. Důležitou vlastností těchto sítí je velký dosah umožňující komunikaci s velkým množstvím zařízení v okolí přijímací brány.

Typické využití LPWAN zařízení je v IoT (Internet of Things). To je koncept propojení velkého množství čidel, měřičů, aktuátorů a jiných chytrých zařízení k účelu přenosu dat [3]. Jsou to např. zařízení pro sledování spotřeby vody, elektřiny či plynu v konceptu smart city, sledování produkce v zemědělství a další. Principiálně jsou taková zařízení konstruována tak, aby byla velmi levná, malá, úsporná a vyrobitelná ve velkém množství, aby bylo možné sbírat velké množství informací.

2.1 Porovnání sítí

Oproti jiným typům sítí, např. mobilním 4G/5G sítím, jsou LPWAN velmi energeticky úsporné. Přitom na rozdíl od protokolů Bluetooth nebo Zigbee jsou schopny komunikace na velkou vzdálenost. Na obrázku 2.1 je porovnání LPWAN proti zmíněným sítím z hlediska spotřeby a dosahu.



Obrázek 2.1: Porovnání sítí podle dosahu a spotřeby [4]

2.2 Zástupci LPWAN

Sítí LPWAN existuje obecně velké množství. Dále se proto zaměřím na ty u nás nejpoužívanější, které mají aktuálně v Česku celostátní pokrytí a jejich konektivitu nabízí tamní operátor. Používány jsou tři sítě a to: LoRaWAN, SigFox a NB-IoT. V tabulce 2.1 jsou uvedeny jejich charakteristické vlastnosti.

	LoRaWAN	SigFox	NB-IoT
Modulace	LoRa (CSS)	DBPSK/GFSK	QPSK
Pásmo	868 MHz (ISM)	868 MHz (ISM)	Licencované
	433 MHz (ISM)	433 MHz (ISM)	(pásmo LTE)
Dosah – město	2–5 km	3–5 km	2 km
Dosah – volný	20 km	50 km	20 km
Přenosová rychlost	Malá	Velmi malá	Střední
Spotřeba	Malá	Malá	Střední

Tabulka 2.1: Porovnání vlastností různých LPWAN technologií [5]

Všechny zmíněné sítě cílí na využití v IoT, kde si vzájemně konkurují. Každá ale vychází z jiného principu a prosazuje jinou strategii. V následujících podkapitolách se pro porovnání podrobněji rozepíšu o každé z nich.

2.2.1 LoRaWAN

Široce používanou sítí je LoRaWAN. Jedná se o síť využívající modulaci LoRa, která umožňuje komunikaci na vzdálenost až desítek kilometrů. Díky zvýšení dosahu stačí k pokrytí oblasti méně LoRaWAN bran než u běžných mobilních sítí. Samotný LoRaWAN standard je otevřený, ale LoRa modulace je proprietární. Koncové zařízení je možné připojit do sítě operátora jako např. České radiokomunikace nebo otevřeného TTN (The Things Network), případně lze vytvořit síť lokální pomocí vlastních bran.

2.2.2 SigFox

Jednoduchou a oblíbenou technologií je SigFox, který je založen na základní DBPSK a GFSK modulaci. Díky tomu jsou koncová zařízení jednoduchá a velmi levná. Princip fungování je v zásadě opačný proti LoRa. SigFox používá velmi úzkou šířku pásma 100 Hz [6], což umožňuje velký dosah. Na druhou stranu to ovlivňuje přenosovou rychlost, která dosahuje pouze 100 bitů/s. Tím vyslání celé 12bytové uživatelské zprávy trvá přibližně dvě sekundy. Standardně se navíc zpráva pro vyšší robustnost třikrát opakuje a vysílání tak může trvat až 6 sekund. Komunikace může probíhat i směrem do zařízení, ale operátoři zpravidla nabízejí tarif jen s několika těmito zprávami denně. Nicméně síť je aktuálně nepoužitelná, protože českého operátora SimpleCell postihl

dlouhodobý výpadek konektivity a nic nenasvědčuje jejímu obnovení. Stavba vlastní SigFox sítě není možná.

■ 2.2.3 NB-IoT

Do LPWAN patří také rádiová technologie NB-IoT. Vychází ze zkratky Narrow Band Internet of Things. Staví na ořezaném funkčním základu LTE mobilní sítě přizpůsobeném tak, aby jej bylo možné použít v nízkopříkonových aplikacích. Jak je uvedeno v [7], oproti LTE byla dramaticky snížena přenosová rychlost a sníženy hardwarové i softwarové požadavky na koncové zařízení. Specifikace NB-IoT je součástí 5G standardu. Pro přihlášení do sítě je třeba mít od jednoho z operátorů (Vodafone, T-mobile) SIM kartu, eSIM čip nebo iSIM. Principem pro zvýšení dosahu je několikanásobné opakování zprávy a snížení šířky pásma proti LTE na 200 kHz [7]. Komunikace probíhá v ochranných pásmech LTE kmitočtů, kde je na ni dostatečná šířka pásma. Pro NB-IoT je potřeba lepšího a dražšího hardwaru v koncovém zařízení, aby splnila vyšší nároky na modulaci, dosah a složitost komunikačního protokolu.

■ 2.2.4 Výběr technologie

Z těchto tří technologií jsem vybral a dále použil LoRaWAN. Má mnohé výhody, např. je možné flexibilně přecházet mezi různými sítěmi bez nutnosti změny SIM nebo v případě špatného pokrytí operátora lze pomocí vlastní brány postavit privátní síť. SigFox je v době psaní zcela nefunkční.

Oproti Sigfox i NB-IoT je LoRaWAN software otevřený a umožňuje změny v komunikačních vrstvách, což je při optimalizaci potřeba. Tato síť je podporována vybraným nízkopříkonovým mikrokontrolérem řady STM32WL, který integruje i k tomu potřebné rádiové rozhraní. Z pohledu spotřeby je LoRaWAN výhodnější než náročné NB-IoT.

■ 2.3 LoRa

Charakteristickým znakem LoRaWAN je použitý způsob modulace LoRa. Vychází ze zkratky Long Range, česky: dlouhý dosah, který představuje důležitou vlastnost této modulace. Vyvinuta byla francouzskou společností Cycleo, kterou později koupil americký výrobce polovodičů Semtech. Tato firma jako jediná drží práva na výrobu rádií s technologií LoRa.

Hlavními vlastnostmi LoRa jsou:

- dlouhý dosah,
- nízká spotřeba,
- nízká cena implementace,
- nízká přenosová rychlost.

2.3.1 Shannon-Hartleyův teorém

K dosažení dlouhého dosahu existuje několik možností. Jednou z nich je zvýšení vysílacího výkonu. Kvůli regulačním podmínkám a požadavku nízké spotřeby to ale není vhodné. Pokud uvážíme, že stačí nízká přenosová rychlost a je k dispozici dostatečně široké pásmo, můžeme snížit nároky na SNR přijímaného signálu.

Teoretickou informační propustnost C lze stanovit pomocí Shannon-Hartleyova teorému [8]:

$$C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \text{ (bit/s)}, \quad (2.1)$$

kde B je šířka pásma signálu v Hz a $\frac{S}{N}$ je odstup signálu od šumu neboli SNR. Pro velkou vzdálenost přenosu bude hodnota SNR na přijímači malá, a tak lze vzorec 2.1 aproximovat následujícím způsobem [8]:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N}. \quad (2.2)$$

Z toho vyplývá, že pokud v rovnici 2.2 zvýšíme šířku pásma, tak při stejné přenosové rychlosti snížíme hranici SNR potřebnou k úspěšnému příjmu. Z pohledu přijímaného signálu, se toto zvýšení citlivosti nazývá tzv. procesní zisk [8]:

$$G_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{R_c}{R_b} \text{ (dB)}, \quad (2.3)$$

kde R_c je chipová rychlost (viz vztah 2.5) a R_b je bitová rychlost (viz vztah 2.6). Důsledkem zvýšení citlivosti procesním ziskem je zvýšení dosahu. Popsaný princip je základem modulace LoRa.

2.3.2 Metoda rozprostřeného spektra

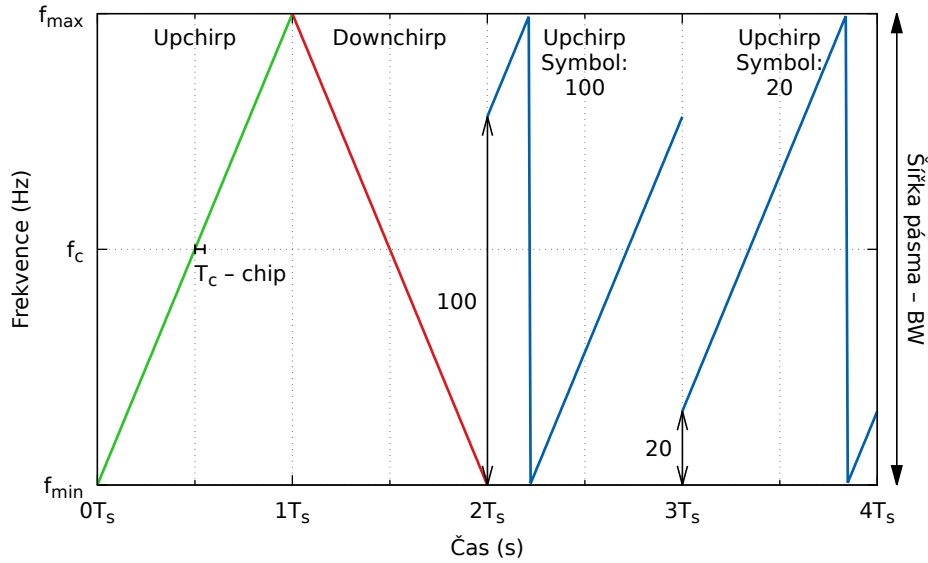
Metoda rozprostřeného spektra je takový způsob modulace, který využívá mnohem širšího pásma než je k danému datovému toku třeba. Nevýhodou je nevyužití plné datové propustnosti pásma, na druhou stranu, jak bylo uvedeno v podkapitole 2.3.1, rozšíření pásma umožňuje zvýšení dosahu.

Existuje více způsobů rozprostření spektra. Jak je popsáno v [9], jedním z typů je např. metoda DSSS, která se používá v GPS systémech, a metoda FHSS používaná v Bluetooth. V LoRa (Long Range) je použita metoda CSS.

2.3.3 Modulace LoRa

Modulace LoRa je založena na metodě CSS (Chirp Spread Spectrum). Jedná se o princip rozprostření spektra založený na tzv. chirpech. Chirp je signál, který rovnoměrnou rychlostí mění kmitočet. Pro zvyšující se kmitočet používáme pojem upchirp, pro snižující analogicky downchirp.

Parametrem ovládajícím meze změny frekvence je šířka pásma BW . Minimální frekvence je rovna $f_c - \frac{BW}{2}$ a maximální $f_c + \frac{BW}{2}$, kde f_c je střední frekvence kanálu, ve kterém se vysílá. Jakmile při upchirpu růst frekvence



Obrázek 2.2: Průběh chirpů v modulaci LoRa ($SF = 7$)

dosáhne maxima, pokračuje od té minimální. To je možné vidět na posledním a předposledním upchirpu na grafu 2.2. [8] [10]

V LoRa každý chirp přenáší jeden symbol. Ten je roven SF bitům dat, kde SF je jako parametr dále popsán v podkapitole 2.3.4. Z toho vyplývá, že symbol může nabývat jedné z 2^{SF} hodnot. Celá šířka pásma BW je rozdělena také na 2^{SF} kmitočtů a ke kódování informace dochází tak, že hodnota symbolu určuje frekvenci, na které vysílaný chirp začne. Graf 2.2 ukazuje posun počáteční frekvence pro symbol 100 a 20 z maximální hodnoty 127 pro $SF = 7$. Délka trvání jednoho symbolu je

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \text{ (s)}. \quad (2.4)$$

Jeden symbol je dále rozdělen na 2^{SF} chipů. Chipová rychlost R_c určuje, kolikrát za sekundu musí rádio upravit fázi. V LoRa je chipová rychlost obvykle přímo podělena z hlavní frekvence krystalu (32 MHz) a je rovna

$$R_c = BW \text{ (chip/s)}. \quad (2.5)$$

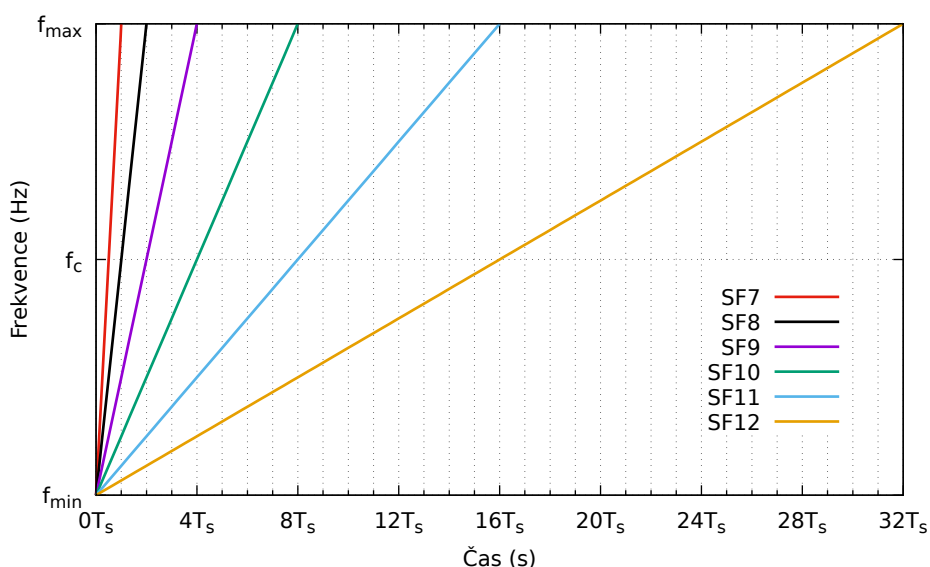
Bitová rychlost R_b vychází z rovnice 2.4 a dříve popsané vlastnosti, že jeden symbol je roven SF bitům. Pro bitovou rychlost tak můžeme napsat:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \text{ (bit/s)}. \quad (2.6)$$

2.3.4 Parametry LoRa

LoRa poskytuje poměrně širokou škálu nastavitelných parametrů, které umožňují navolit a optimalizovat přenos podle požadavků buď na minimální spotřebu, nebo na maximální dosah. Následující seznam podrobně popisuje každou z nich.

- Spreading factor (SF)** určuje míru rozprostření spektra. Zvětšením čísla SF zpomalujeme rychlost růstu nebo klesání chirpu a tím i prodlužujeme trvání symbolu. SF také určuje kolik bitů je nesených jedním symbolem. Zvýšením SF prodloužíme dosah, zároveň ale podle 2.4 každým zvýšením SF o jeden stupeň zdvojnásobíme čas vysílání a tím výrazně zvýšíme spotřebu. Důležitou vlastností je, že koncová zařízení se vzájemně neruší, pokud vysílají s rozdílnými SF . Změnou SF měníme kód použitý k rozprostření spektra a tím zaručujeme ortogonalitu signálů.



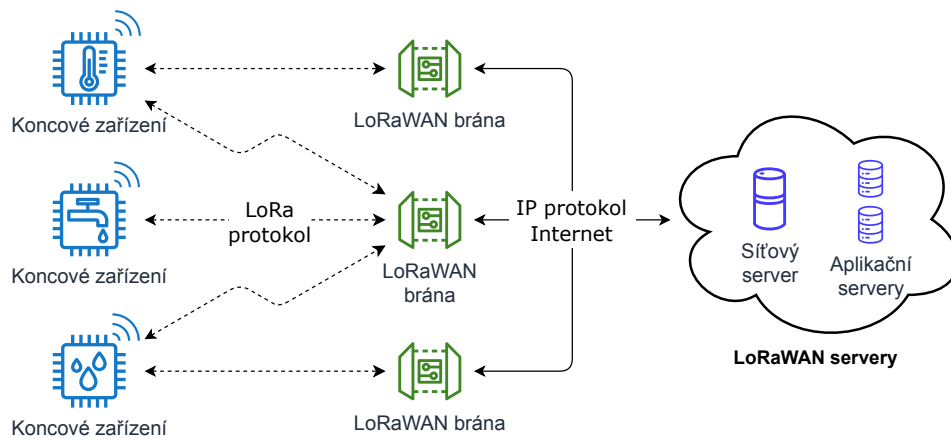
Obrázek 2.3: Porovnání symbolové doby upchirpů při různých hodnotách SF

- Šířka pásma (BW)** určuje šířku kmitočtového pásma, ve kterém je chirp modulován. Zvýšením šířky pásma dosáhneme kratšího času vysílání a tím vyšší přenosové rychlosti, ale snížíme dosah.
- Coding rate (CR)** udává kolik redundantních paritních bitů je přidáno ke čtyřem bitům (nibblu) dat. Řídí tím míru redundance přenášených dat, která slouží k zvýšení spolehlivosti komunikace. Zvýšením CR zvýšíme odolnost přenosu, ale snížíme přenosovou rychlost užitečných dat.

2.4 LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) je otevřená bezdrátová síťová technologie založená na dříve popsané modulaci LoRa. Je spravována a aktivně vyvíjena neziskovou organizací LoRa Alliance, která sdružuje mezinárodní firmy jako Microsoft, Amazon, ST a další s cílem rozšíření sítě LoRaWAN.

Z pohledu struktury se jedná o rozšířenou hvězdicovou topologii [9]. Na obrázku 2.4 je vidět architektura LoRaWAN sítě. Základem je koncové zařízení



Obrázek 2.4: Diagram struktury LoRaWAN sítě

v levé části, které vysílá zprávu do LoRaWAN pomocí LoRa protokolu. Její příjem zajišťuje LoRaWAN brána, která zprávu zpracuje a přeloží do TCP/IP paketu, který vyšle do Internetu. Paket je sítí dopraven až k síťovému serveru. Jelikož může být stejná zpráva přijata více branami, síťový server musí jednotlivé pakety z bran sesbírat a spolu zpracovávat. Podle aplikačního přiřazení je pro koncové zařízení vybrán aplikační server, na který síťový server zprávu pošle. Síťový a aplikační server se společně také označuje jako LoRaWAN server.

Popsaný proces vysílání zprávy z koncového zařízení nazýváme uplink. Komunikace může běžet i opačným směrem, kdy koncová stanice přijímá zprávu vyslanou z aplikačního serveru, tomu říkáme downlink. Nikdy nemůže probíhat uplink a downlink zároveň. Základní nepotvrzované uplink a downlink zprávy nezaručují doručení. Oba typy zpráv existují v potvrzované (confirmed) variantě, která opačným směrem vyšle potvrzení doručení.

V samotném standardu LoRaWAN není definována žádná forma uživatelského přístupu za aplikačním serverem. Reálná implementace může být různá, zpravidla se na aplikační server navazuje HTTP REST, MQTT rozhraním nebo jinou IoT platformou. Dále je možné připojit vizualizaci, která uživateli prezentuje data přijaté zprávy.

V dalších podkapitolách bude postupně vysvětlena každá ze základních komponent LoRaWAN sítě.

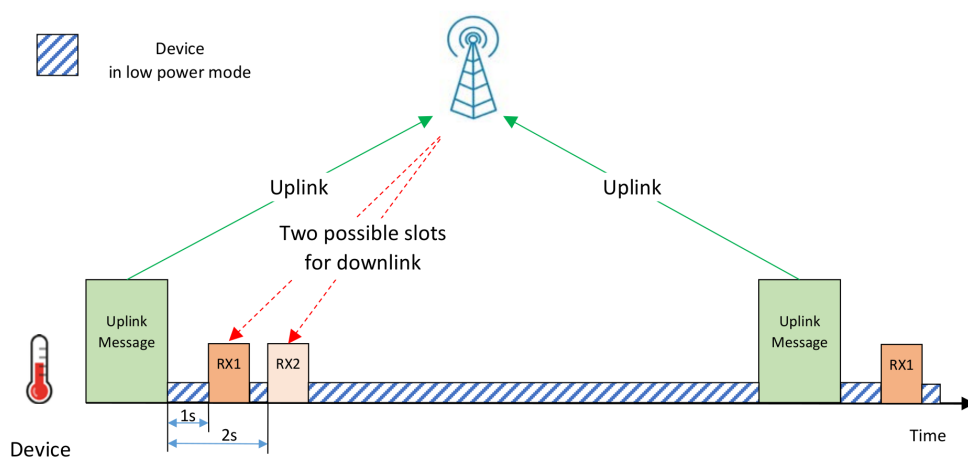
2.4.1 Koncové zařízení

Koncové zařízení je vybaveno hardwarem schopným komunikace pomocí LoRa protokolu. Jelikož LoRa rádia má, kvůli licenci, jen Semtech, všechna taková zařízení obsahují v nějaké formě rádio řady SX. K rádiu je obvykle připojen mikrokontrolér, který je velmi energeticky úsporný, protože jsou často koncová zařízení bateriově napájená. Doba, po kterou je schopno zařízení fungovat, se může pohybovat až v řádech let.

Podle požadavků aplikace mohou koncová zařízení fungovat jako senzory

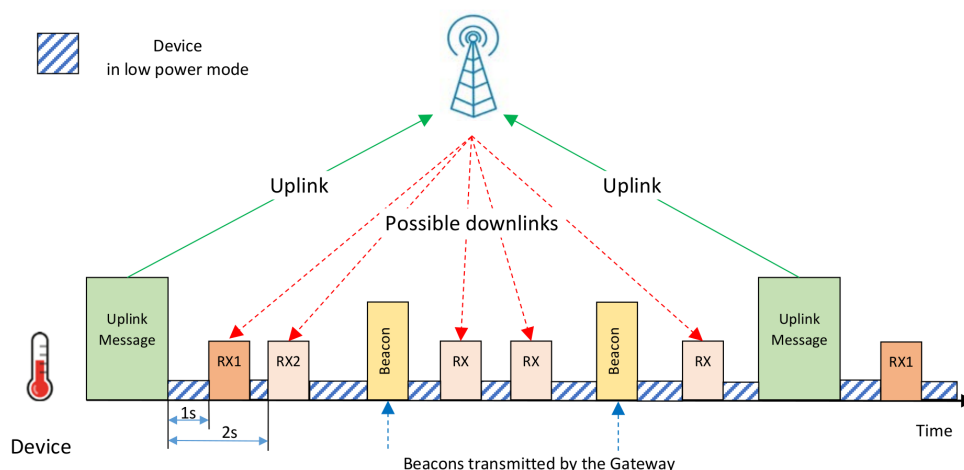
nebo aktuátory. Aktuátory po přijetí příslušného downlinku vykonají požadovanou akci ve formě např. zapnutí/vypnutí jiného zařízení nebo změny intenzity osvětlení. Koncové zařízení se senzorem, které je v LPWAN využíváno častěji, měří a předzpracovává veličinu ze senzoru a sesbírané výsledky posílá ve formě uplink do LoRaWAN. Pro popsání scénáře implementuje standard LoRaWAN tři různé třídy:

- **Třída A** je neúspornější třída, která je vhodná pro senzory. Jak je vidět na obrázku 2.5, jakmile je vyslána zpráva (uplink), hardware přechází do úsporného režimu. Po sekundě je otevřeno první přijímací okno RX1 a brána může vyslat downlink. Pokud není zasynchronizován žádný paket, je po určité prodlevě otevřeno ještě druhé okno RX2 a poté, nehledě na výsledek, přejde zařízení do hlubokého spánku. V něm zůstane až do dalšího uplinku. Downlink ve třídě A může proběhnout pouze po uplinku, a tak má velkou odezvu a tím je pro ovládání aktuátorů nevhodný.

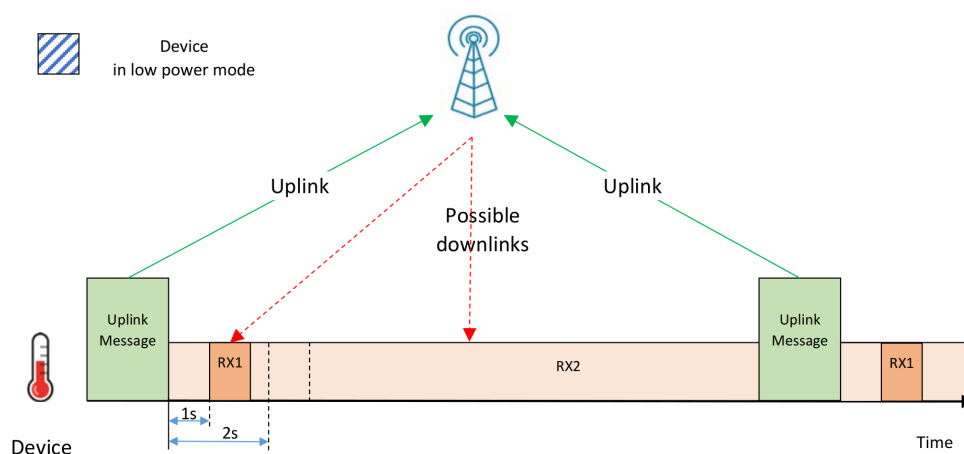


Obrázek 2.5: Průběh komunikace v LoRaWAN třídě A [10]

- **Třída B** přidává možnost častějšího přijímání downlink zpráv pomocí periodicky otevíraných přijímacích oken. Čas, kdy bude koncové zařízení přijímat, musí být synchronizován s bránou. Na obrázku 2.6 je vidět, že k tomuto účelu brána vysílá pravidelné beacon zprávy, které obsahují přesný GPS čas. Výhodou třídy B je častější příjem a tím snížené zpoždění downlink zprávy, ale naopak nevýhodou je vyšší energetická náročnost a potřeba beacon zpráv. Vhodná je tak spíše pro aktuátory s větší baterií nebo stabilním zdrojem.
- **Třída C** umožňuje downlink uskutečnit kdykoliv. V této třídě musí být koncové zařízení v režimu příjmu po celou dobu běhu a nikdy se tak nepřepíná do úsporného režimu. Oproti třídě B odpadá nutnost synchronizace. Jedná se o energeticky nejnáročnější třídu a je vhodná pro zařízení napájená z elektrické sítě. V případě ovládání aktuátoru je výhodou minimální latence.



Obrázek 2.6: Průběh komunikace v LoRaWAN třídě B [10]



Obrázek 2.7: Průběh komunikace v LoRaWAN třídě C [10]

Mezi třídami je možné za běhu přepínat, je však nutné, aby koncové zařízení softwarově danou třídu podporovalo. Třída A je výchozí třída a je podporována každým LoRaWAN zařízením. Třídy B a C jsou nadstavby třídy A, které pouze přidávají čas, po který může dojít k downlinku.

2.4.2 LoRaWAN brána

LoRaWAN brána zajišťuje výměnu dat mezi koncovým zařízením a síťovým serverem. Uvnitř velkých LoRaWAN bran operátorů se nachází výkonný čip, který nepřetržitě zpracovává přicházející pakety ze všech dostupných kanálů a SF zároveň. Brána ověřuje CRC ve zprávách a ty poškozené zahazuje.

Na jedné straně brána komunikuje bezdrátově pomocí LoRa protokolu. Na straně druhé komunikuje se serverem pomocí IP paketů, které běží na fyzické vrstvě Ethernetu, mobilních sítí 4G/5G nebo jiné technologie. Při uplinku posílané pakety doplňuje dalšími údaji např. vlastní GPS pozicí brány, silou signálu RSSI a přesným časovým razítkem.

2.4.3 LoRaWAN servery

O samotný provoz a sbírání dat z LoRaWAN sítě se starají dva typy serverů: síťový a aplikační server.

Síťový server řídí přenos dat přes LoRaWAN síť. Obstarává požadavky koncových zařízení na aktivaci v síti, dále řídí zabezpečení zpráv na síťové úrovni. Provádí směrování dat koncového zařízení ke správnému aplikačnímu serveru. V případě downlinku obstarává frontu zpráv čekajících na odeslání a vyhodnocuje okamžik, kdy je možné paket vyslat. Mimo užitečných dat spravuje komunikaci pomocí tzv. MAC (Media Access Control) příkazů, které upravují parametry fungování sítě.

Aplikační server zajišťuje funkci zabezpečení na aplikační úrovni a umožňuje přeposílání uplink zpráv dále k uživateli. Jak už bylo popsáno v podkapitole 2.4, může se jednat např. o HTTP REST, MQTT nebo další. Na serveru mohou být data po nějakou dobu skladována. V případě downlink data skládá a směřuje síťovému serveru.

2.4.4 Regionální nastavení LoRaWAN

LoRaWAN specifikace upravuje provozní parametry LoRa modulace. Pro optimální dlouhý dosah využívá kmitočtů pod jeden GHz. Aby byla LoRa konektivita levná, operuje tato síť v ISM (Industrial, Scientific, Medical) pásmech, která jsou pro jisté účely komunikace bezplatná. Na druhou stranu je nutné splnit požadavky, které pro tyto pásma platí. Pravidla se navíc liší podle umístění, a tak je nutné při nastavování parametrů LoRa brát ohled na aktuální region, ve kterém se koncové zařízení nachází.

V Evropě existují dvě hlavní regionální nastavení: EU433 a EU868. Jak lze z názvu poznat, liší se hlavně použitým frekvenčním pásmem, které je na 433 MHz resp. na 868 MHz. Dále se budu zabývat nastavením EU868, které je mnohem používanější.

EU868 používá ISM pásmo od 863 do 870 MHz [11]. Každé koncové zařízení musí podporovat alespoň 3 základní kanály. Dále, pokud to síť podporuje, se dá využít dalších 5 kanálů. Všechny tyto kanály jsou uvedeny v tabulce 2.2. U každého kanálu je uvedena možná kombinace parametrů LoRa modulace. Parametr CR je v LoRaWAN vždy roven 1, což znamená jeden redundantní bit na čtyři užitečné. V kanálu 868,3 MHz jako jediném může běžet komunikace při $BW = 250$ kHz, ale to pouze za podmínky, že $SF = 7$.

Kanál, ve kterém se bude vysílat, je pro každý uplink vybrán náhodně. Případný následný downlink proběhne v RX1 okně na stejném kanálu se stejnými parametry jako proběhl uplink. Pro downlink v RX2 okně je speciálně vyhrazen kanál 869,525 MHz, který má povoleno pouze $SF = 12$.

Rychlost přenosu je v LoRaWAN definována jako DR (Data rate), tedy přenosová rychlost. S růstem SF klesá DR a naopak, přesné hodnoty parametrů LoRa podle specifikace [12] při různých DR jsou dále vypsány v tabulce 2.3.

Z hlediska vysílacího výkonu je výkon omezen na ERP (Effective Radiated Power) 14 dBm. Je to maximální výkon, který může koncové zařízení vyzářit na půlvlnném dipólu. Standard dále definuje maximální dobu vysílání, která

Kmitočet (MHz)	SF	BW (kHz)	Směr zpráv	Povinné
867,1 867,3 867,5 867,7 867,9	7 až 12	125	Uplink Downlink (RX1)	Ne
868,1 868,3 868,5	7 až 12	125 125/250 125	Uplink Downlink (RX1)	Ano
869,525	12	125	Downlink (RX2)	Ne

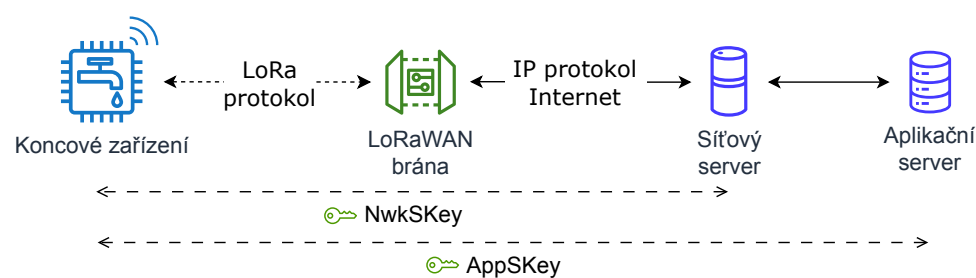
Tabulka 2.2: Kanály v nastavení EU868

je pro EU868 nastavena na 1 % ze dne, což po přepočtu dává 864 sekund nepřerušovaného vysílání denně. LoRaWAN operátoři mohou mít striktnější požadavky.

Každé koncové zařízení může být nastaveno na fixní SF nebo může SF dynamicky měnit. K tomu v LoRaWAN slouží funkce ADR (Adaptive Data Rate), která koncovému zařízení pomocí MAC příkazů sděluje, jestli má SF zvýšit nebo snížit. To určuje podle SNR přijatého signálu, pokud je signál silný, SF se sníží a naopak pokud je signál slabý, SF se zvýší. To přináší snížení spotřeby, pokud je signál dostatečně silný, a rozprostření koncových zařízení na optimální SF podle vzdálenosti od brány, což snižuje počet kolizí. Nevýhodou je nutnost dodatečných MAC zpráv.

2.4.5 Metody aktivace

Před první komunikací v LoRaWAN musíme koncové zařízení aktivovat. Proces aktivace (také nazývaný join) slouží k tvorbě šifrovacích klíčů a identifikaci koncového zařízení na straně síťového serveru.



Obrázek 2.8: Použití šifrovacích klíčů při komunikaci

Jak je vidět na obrázku 2.8 při běžné komunikaci se používají dva 128bitové AES klíče [11]:

- **NwkSKey** (Network Session Key) slouží k ověření integrity zprávy vyslané koncovým zařízením síťovému serveru. Ověření probíhá pomocí

MIC (Message Integrity Code) kódu ve zprávě, který je AES-CMAC algoritmem na serveru ověřen. Server díky této kontrole odpoví pouze pokud je prokázána integrita a autenticita.

- **AppSKey** (Application Session Key) je určen pro koncové (end-to-end) šifrování uživatelských dat. Data uplinku jsou zašifrována na koncovém zařízení a k dešifrování dojde až na aplikačním serveru. V downlinku je situace opačná, server data šifruje a zařízení dešifruje.

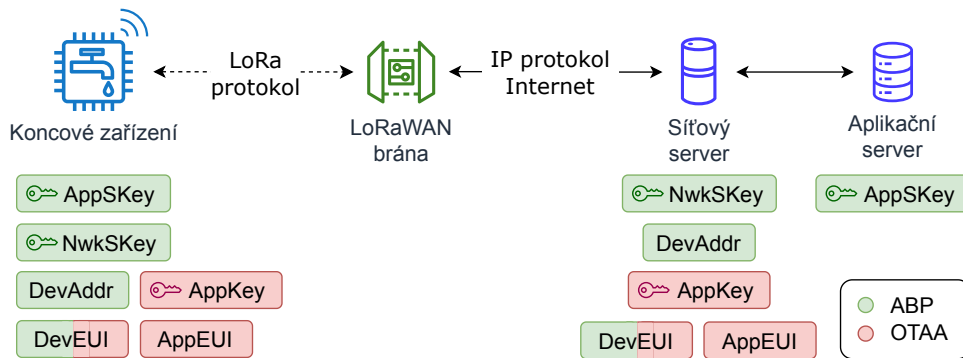
Kromě těchto klíčů jsou nutné údaje k identifikaci zařízení. K tomu slouží dvě čísla, která jsou uložena v koncovém zařízení. Následující seznam obě popisuje [11]:

- **DevEUI** (Device Extended Unique Identifier) je 64bitové unikátní číslo pevně přiřazené každému koncovému zařízení. Ve většině případů vychází ze sériového čísla mikrokontroléru.
- **DevAddr** (Device Address) je 32bitové číslo, které jednoznačně identifikuje koncové zařízení v dané LoRaWAN síti. Podle způsobu aktivace může být buď fixní, nebo je přiřazeno nové na každou relaci.

Aby proběhla aktivace úspěšně, je nutné vytvořit oba popsané klíče a přenést je na odpovídající prvky v síti. Stejně tak je nutné synchronizovat identifikátory mezi koncovým zařízením a síťovým serverem. Aktivaci zařízení do LoRaWAN sítě je možné provést dvěma způsoby [13]:

- **ABP** (Activation by Personalization) využívá přímo přednastavených klíčů NwkSKey a AppSKey. Oba klíče musí být před spuštěním ručně naprogramovány do koncového zařízení. Stejně klíče a identifikátory DevEUI a DevAddr, vygenerované většinou v mikrokontroléru, musí být manuálně ze zařízení opsány do síťového resp. aplikačního serveru. Po spuštění aktivace proběhne hned, zařízení jen použije nahrané klíče a k žádné rádiové komunikaci nedojde. Díky tomu je ABP aktivace rychlejší, energeticky úspornější a méně náročná na kvalitu spojení.
- **OTAA** (Over the Air Activation) umožňuje generovat nové klíče pro každou relaci. Před aktivací je v koncovém zařízení nahrán AppKey, AppEUI a vnitřně generovaný DevEUI. AppKey slouží jako kmenový klíč a zabezpečuje integritu ve směru uplinku a šifrování zpráv ve směru downlinku, ale pouze po dobu aktivace. AppEUI je 64bitový identifikátor zařízení při aktivaci. Aktivace probíhá tak, že koncové zařízení pomocí MAC příkazu pošle síťovému serveru AppKey, AppEUI a DevEUI a požádá o klíče AppSKey a NwkSKey. Jakmile klíče získá, další komunikace už probíhá standardně pomocí nich. OTAA je bezpečnější, jelikož jsou klíče generovány dynamicky a jsou platné pouze po dobu relace. Důsledkem je i menší počet údajů, které je nutné do serveru vyplňovat.

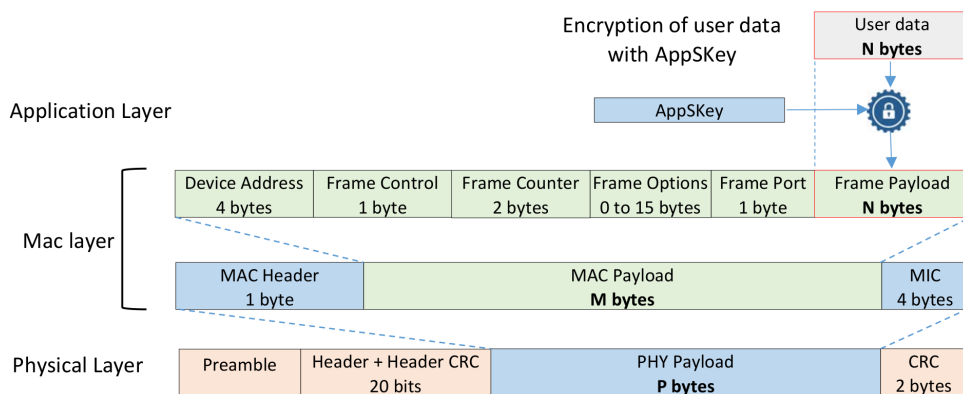
Obrázek 2.9 ukazuje, kam mají být nahrány jednotlivé parametry podle typů aktivace.



Obrázek 2.9: Síťové prvky a jejich klíče a identifikátory

2.4.6 Paket v LoRaWAN

Komunikace v LoRaWAN probíhá pomocí paketů. Jejich struktura je znázorněna na obrázku 2.10. Paket je složen zapouzdřením po průchodu každou ze tří vrstev.



Obrázek 2.10: Složení LoRaWAN paketu [10]

Nejvyšší je vrstva aplikační. V ní dochází k šifrování uživatelských dat AppSKey klíčem, jak bylo popsáno v podkapitole 2.4.5. Uživatelská data mohou mít délku od 0 do N bytů v závislosti na zvoleném DR . Maximální délku dat pro daný DR vypisuje tabulka 2.3.

Šifrovaná uživatelská data jsou zapouzdřena do LoRa MAC vrstvy. V ní jsou k datům přidány informace o adrese zařízení, potvrzování zpráv a případně jiné doplňující MAC informace. Důležitým parametrem je sekvenční číslo (Frame Counter), které zabraňuje útokům opakováním stejné zprávy. Sekvenční číslo je vždy o jedno vyšší každým dalším paketem. Pokud několik paketů vypadne, přijme se bez problémů další, nikdy by ale nemělo být nové číslo nižší, jinak je paket zahozen. Datový port (Frame port) umožňuje dále rozlišit, komu jsou data určena. Uživatelsky je použitelný rozsah 1 až 223. Jiné porty jsou vyhrazeny pro speciální účel, např. 0 je pro MAC příkazy, 224 pro certifikační testy. V rámci uživatelských portů mohou být některé použity pro další nadstavbové služby, např. port 202 pro synchronizaci reálného času. Ve stejné

DR	SF	BW (kHz)	Maximální délka uživatelských dat (b)
0	12	125	51
1	11	125	51
2	10	125	51
3	9	125	115
4	8	125	242
5	7	125	242
6	6	250	242

Tabulka 2.3: Maximální délka uživatelských dat v závislosti na DR

vrstvě je vzniklý MAC payload opatřen hlavičkou a MIC kontrolním kódem, který zajišťuje dříve zmíněnou integritu a autenticitu.

Nejnižší je vrstva fyzická, která vychází z protokolu LoRa. LoRaWAN rámeček je doplněn o preambuli, která má zpravidla délku 12,25 symbolů, poté se přidá hlavička obvykle délky 8 symbolů a 16bitový CRC (Cyclic Redundancy Check) kontrolní součet.

Pokud sečteme hlavičky LoRaWAN MAC vrstev, bude k uživatelským datům přidáno minimálně 13 bajtů. Dále jsou data opatřena hlavičkou nejnižší LoRa fyzické vrstvy o délce 20 symbolů a 2 bajtů CRC. Jelikož je výpočet délky paketu komplikovaný, můžeme využít připravený program SX1261 Calculator Tool od firmy Semtech [14]. Ten umí kromě výpočtu délky paketu určit dobu vysílání a parametry útlumu přenosu podle různého nastavení parametrů LoRa modulace.

Kapitola 3

Mikrokontrolér s rádiem

Důležitou součástí každého IoT zařízení je mikrokontrolér a rádiový čip. Mikrokontrolér slouží k měření dat ze senzorů, jejich vyhodnocování, zpracovávání a následnému časování vysílání. Rádio uskutečňuje kontrolu nad přenosovým médiem a řídí samotný přenos na fyzické vrstvě. Mikrokontrolérů s rádiem schopným komunikace v LoRaWAN existuje celá řada, pro tuto práci byl pro své vlastnosti vybrán čip firmy STMicroelectronics z řady STM32WL.

V následujících podkapitolách popíšu parametry samotného mikrokontroléru a dále rádio, které je na stejném čipu integrováno.

3.1 Mikrokontrolér STM32WL

Čip STM32WL obsahuje 32bitový mikrokontrolér na bázi jádra ARM Cortex-M4. Je dostupný ve dvou variantách: STM32WL5x se dvěma jádry (druhé jádro je Cortex-M0+) a STM32WLE5 s jedním jádrem. V tabulce 3.1 jsou shrnuty základní parametry rodiny STM32WL.

Velikost Flash paměti	Až 256 KB
Velikost RAM paměti	Až 64 KB
Napájecí napětí	1,8 V až 3,6 V
Maximální frekvence	48 MHz
Spotřeba (48 MHz)	3,5 mA
Spotřeba (Stop 2 + RTC)	1 μ A

Tabulka 3.1: Základní přehled parametrů STM32WL

3.1.1 Periferie

Jak je popsáno v [15], v čipu je vedle jádra mnoho periférií. Následující seznam vypisuje ty nejdůležitější základní periferie určené zejména k obsluze měření, řízení vstupů/výstupů, časování nebo komunikaci:

- GPIO – vstupně/výstupní porty
- NVIC/EXTI – jednotky pro generování přerušení
- ADC – analogově-digitální převodník
- DAC – digitálně-analogový převodník

3.2 Integrované rádio SX1262

Výhodou čipu STM32WL je přímo integrované rádio vycházející z SX1262 od firmy Semtech. Jedná se o halfduplexní transceiver [16], který zvládá modulace: GFSK, DBPSK, GMSK a z nich nejdůležitější LoRa. Spojením s mikrokontrolérem a použitím příslušného softwarového balíku je toto rádio schopno komunikace v LPWAN sítích typu LoRaWAN (případně i Sigfox). V tabulce 3.2 je přehled základních parametrů rádia.

Frekvence	150 až 960 MHz
Citlivost (SF12/BW 125kHz)	-137 dBm
Napájecí napětí	1,8 V až 3,7 V
Maximální výkon	15 dBm (Low Power)
Spotřeba (TX, 14dBm, DC-DC 3,3V)	45 mA
Spotřeba (RX, DC-DC 3,3V)	4,82 mA
Spotřeba (Sleep + RC64k)	810 nA

Tabulka 3.2: Základní přehled parametrů integrovaného rádia SX1262 [16]

Komunikace s rádiem probíhá pomocí periférie SUBGHZ, která je na nejnižší úrovni implementována jako SPI rozhraní připojující zaintegrované SX1262. Vedle SPI jsou připojeny přerušování, která oznamují, jestli proběhl příjem nebo vysílání v pořádku, případně jaká chyba se vyskytla.

3.2.1 Zdroj hodin a napájení

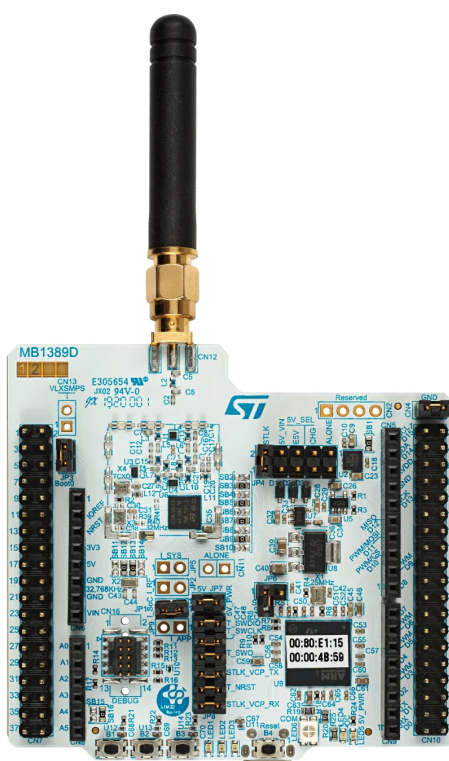
Ke komunikaci na stovkách MHz potřebuje čip stabilní a přesný zdroj hodin s frekvencí 32 MHz. Nabízí se použití buď krystalového oscilátoru (XO), nebo teplotně kontrolovaného krystalového oscilátoru (TCXO). První zmíněný je méně přesný, ale je levnější, energeticky úspornější a pro účely LoRa modulace do 14 dBm plně dostačující [17]. TCXO je naopak dražší, až desetkrát přesnější a jeho použití je vhodné pro vyšší výkony [17]. Pro potřeby SigFox úzkopásmové modulace je kvůli nižšímu frekvenčnímu driftu TCXO doporučován.

Jak bylo napsáno v podkapitole 3.1.3 rádio může být napájeno vnitřním stabilizátorem (LDO) nebo integrovaným DC-DC měničem (SMPS).

3.3 STM32WL nucleo

K rychlému zkoušení a testování STM32 čipů firma STMicroelectronics nabízí vývojové desky Nucleo. Kromě standardních mikroprocesorových řad je k dispozici i model s čipem STM32WL55, který má označení Nucleo-WL55JC (viz obrázek 3.1).

Výhodou je přítomnost programátoru a debuggeru STLINK-V3E, který je k čipu na desce připojen. Dále je z STM32WL vyvedena UART sériová linka, která umožňuje z mikrokontroléru posílat kontrolní výpisy. Ty se v počítači



Obrázek 3.1: Vývojová deska NUCLEO-WL55JC [18]

objeví na vytvořeném virtuálním COM portu. Desku k počítači lze připojit microUSB portem.

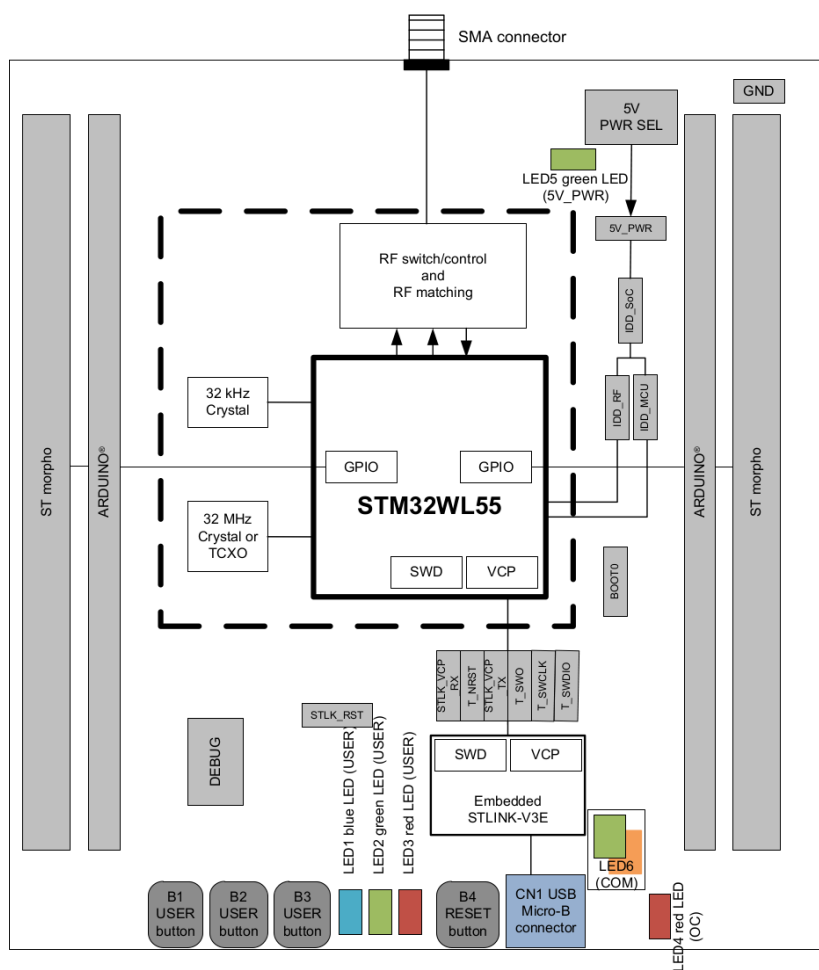
3.3.1 Vybavení desky

Obrázek 3.2 diagramem znázorňuje vybavení vývojové desky. Na desce se nachází kompletní rádiové přírůbání s trojcestným RF přepínačem pro volbu mezi příjmem a vysíláním v nižším nebo vyšším výkonu. Přepínač následuje filtr a vše je zakončeno SMA konektorem. Na něm je z výroby našroubována anténa, která je bohužel nevyměnitelná.

Připájeny jsou tři uživatelské LED spolu s třemi uživatelskými tlačítky a jedním tlačítkem pro reset. Dvoubarevnou indikaci stavu má i integrovaný ST-LINK a další LED jsou pro indikaci napětí a překročení proudu. K dispozici je hodinový 32768 Hz krystal a oba typy 32 MHz krystalů, jak bylo popsáno v podkapitole 3.2. Volit se mezi nimi dá přepájením nulových rezistorů. Ve výchozím stavu je zvolen přesnější TCXO a bude tak i použit v této práci.

Nucleo může být napájeno různými způsoby. Jednou možností je napájet z USB přes ST-LINK nebo přímo z USB, případně z vnějšího 3,3 V nebo 12 V napětí přes stabilizátor.

Na pouzdru ST-LINK čipu je u každé NUCLEO-WL desky nalepen štítek s číslem DevEUI.

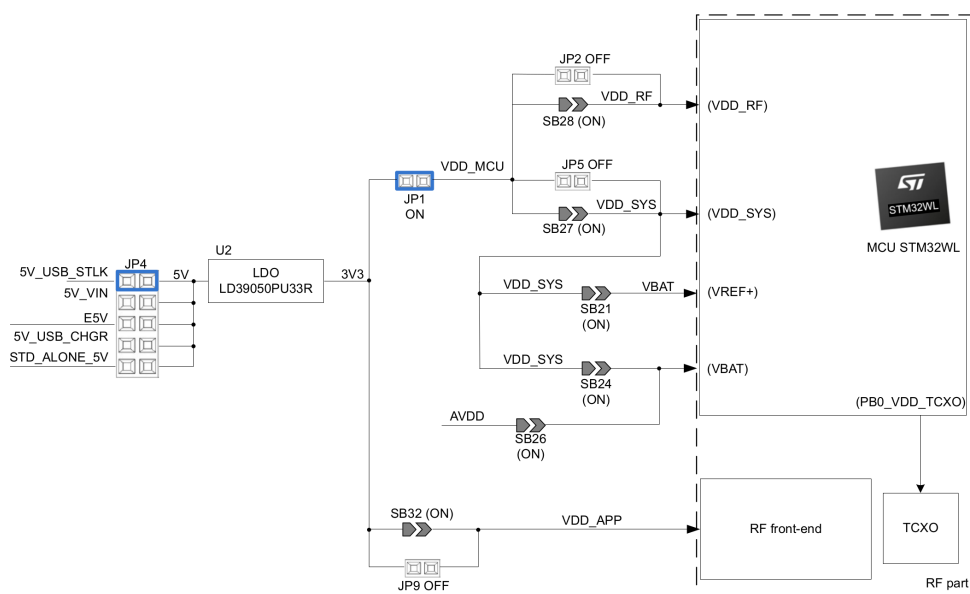


Obrázek 3.2: Diagram desky NUCLEO-WL55JC [18]

3.3.2 Měření spotřeby proudu STM32WL

Na desce jsou k dispozici čtyři pozice dvoupinových konektorů k měření proudu. Kromě již napájeného konektoru na větvi I_{SoC} je možné osadit i větve I_{RF} , I_{SYS} a I_{APP} . Jak je vidět na obrázku 3.3, I_{SoC} (VDD_MCU) slouží k měření spotřeby celého čipu. Dále se větev rozděluje na I_{RF} , což je proud tekoucí do rádiové části SX1262, a proud I_{SYS} , který napájí mikrokontrolér a periferie. I_{APP} je proud, který odebírají vnější rádiové obvody na desce, zejména RF přepínače.

Jelikož SMPS odebírá proud z větve I_{RF} , ale dále napájí i mikrokontrolér, není možné z jednotlivých větví bezpečně poznat spotřebu mikrokontroléru a rádia. V práci je proto měření protékajícího proudu všemi větvemi, a to na konektoru JP4 před stabilizátorem.



Obrázek 3.3: Napájecí strom desky NUCLEO-WL55JC [18]

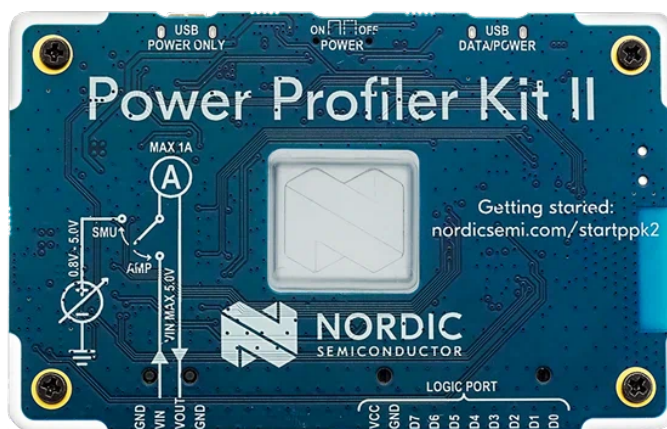
Kapitola 4

Měření spotřeby

Úkolem této práce je optimalizace spotřeby energie. Ke splnění cíle je nutné spotřebu měřit a to s dostatečnou přesností a vzorkovací rychlostí, aby byly zřejmé jednotlivé fáze běhu programu a jejich energetická náročnost. Následující podkapitoly popisují přístroj, který je v této práci použit a dále přibližují princip funkce a postup měření spotřebované energie.

4.1 Měřič spotřeby Nordic PPK2

K měření spotřeby jsem vybral Nordic Power Profiler Kit II (PPK2). Oproti konkurenčnímu X-NUCLEO-LPM01A od firmy STMicroelectronics má PPK2 vyšší dynamický rozsah měřeného proudu a menší rozměry. V tabulce 4.1 jsou vypsány nejdůležitější parametry.



Obrázek 4.1: Nordic Power Profiler Kit 2 [19]

Užitečnou funkcí je možnost přímo napájet měřené zařízení (DUT) z integrovaného nastavitelného napěťového zdroje. Při měření proudu je PPK2 také schopen snímat logický stav až osmi vstupů. Všechna naměřená data jsou přenášena přes microUSB rozhraní do počítače, na kterém je pomocí aplikace (nRF Connect for Desktop) možné zaznamenaný průběh prohlížet, analyzovat a ukládat do csv souboru.

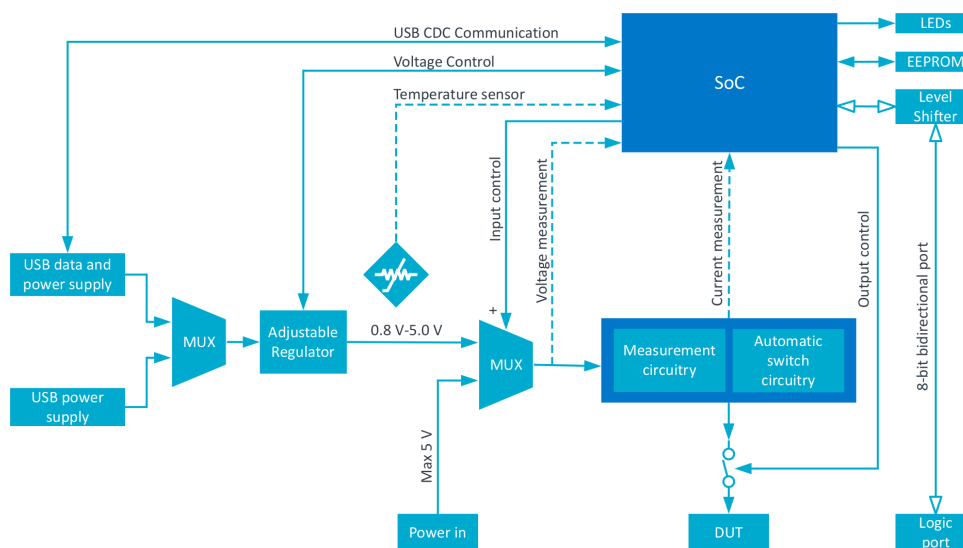
4.2 Princip měření proudu

Měření proudu v PPK2 probíhá snímáním napěťového úbytku na měřícím rezistoru. Úbytek je následně vzorkován analogově-digitálním převodníkem

	Min	Typ	Max
Rozsah napětí zdroje	0,8 V	-	5 V
Rozsah měření proudu	200 nA	-	1 A
Vzorkovací rychlost	-	-	100 kS/s
Přesnost	-	±10 %	-
Rozlišení (200 nA – 50 μA)	-	0,2 μA	-
Rozlišení (50 μA – 500 μA)	-	0,5 μA	-
Rozlišení (500 μA – 5 mA)	-	5 μA	-
Rozlišení (5 mA – 50 mA)	-	50 μA	-
Rozlišení (50 mA – 1 A)	-	1 mA	-

Tabulka 4.1: Parametry Nordic PPK2 [19]

a Ohmovým zákonem přepočítán na procházející proud [19]. Aby bylo možné dosáhnout velkého dynamického rozsahu, PPK2 automaticky přepíná mezi pěti rozsahy, čehož dosahuje přepínáním rezistorů s různým odporem.



Obrázek 4.2: Diagram Nordic PPK2 [19]

4.3 Stanovení spotřebované energie

Výstupem programu Power Profiler je graf protékajícího proudu v závislosti na čase. Označením určitého úseku se na dolním panelu objeví průměrná a maximální hodnota proudu za označený čas (viz obrázek 4.3) a vypočte se náboj Q , který za tento čas proteče. Hodnotu Q program vnitřně vypočte podle rovnice 4.1:

$$Q = \sum_{t_0}^{t_1} I[t] \Delta t \text{ (C)}, \quad (4.1)$$

kde t_0 a t_1 je počáteční a koncový čas vybraného úseku, $I[t]$ je velikost proudu v čase t a Δt je čas mezi vzorky (perioda vzorkování).

SELECTION				SELECT ALL	CLEAR
6.45mA average	6.72mA max	26.45ms time	170.59µC charge		

Obrázek 4.3: Vypočtené hodnoty v panelu aplikace Power Profiler

Znalost velikosti náboje umožňuje vypočítat spotřebovanou energii v daném časovém úseku. K tomu je nutné znát napájecí napětí $U(t)$, které je připojeno na DUT. Pokud vzhledem k malému zvlnění napájení prohlásíme napětí U jako konstantní, můžeme energii stanovit podle vzorce 4.2:

$$E = Q \cdot U \quad (\text{J}) \quad (4.2)$$

Kapitola 5

Optimalizace spotřeby

Tato kapitola se zabývá minimalizací energetické náročnosti čipu při komunikaci v LoRaWAN. K tomu je ve velké míře použit popsany měřič spotřeby Nordic PPK2, Nucleo WL a k němu dostupný softwarový balíček STM32CubeWL.

Aby bylo možné měnit napájecí napětí čipu, je měřič nastaven do módu měření proudu se zdrojem. Z naměřeného průběhu proudu jsou podle délky trvání a spotřeby rozpoznávány jednotlivé fáze běhu. Pro každou z nich je do tabulky vypsán průměrný proud a spotřebovaná energie vypočtená podle vztahu 4.2.

Prvním nutným krokem je změření spotřeby výchozího softwaru, aby bylo možné následně změny porovnávat. To je náplní první podkapitoly. Následující čísta jsou zaměřeny na popis jednotlivých změn v softwaru ze strany radiového rozhraní a poté mikrokontroléru. Měření se poté zhodnotí vliv na spotřebu energie a stanoví se případné vedlejší efekty, které provedená změna zapříčinila.

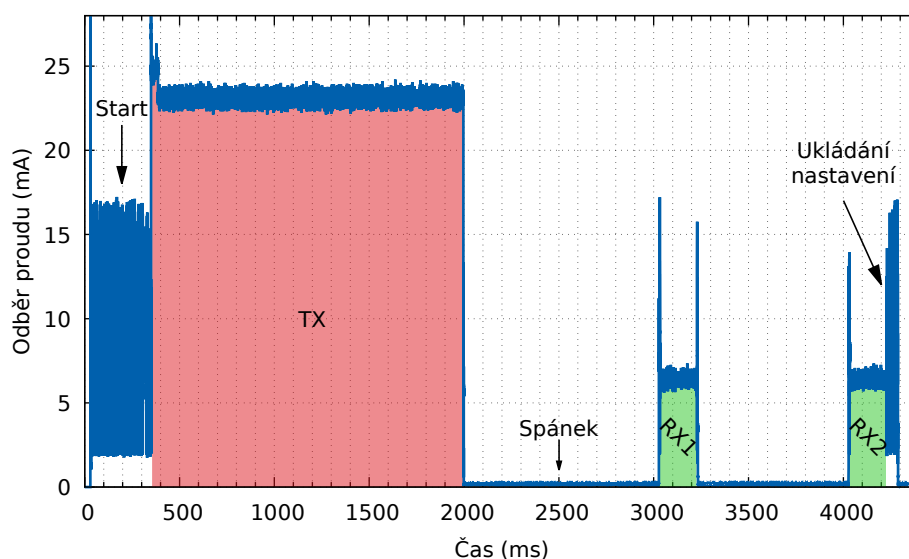
5.1 Spotřeba příkladového softwaru End Node

Kód, ze kterého budu vycházet, je součástí příkladové aplikace End Node pro LoRaWAN z balíčku STM32CubeWL verze 1.2.0 [20]. Aplikace posílá předpřipravená pevná data pomocí nepotvrzovaného uplinku do sítě LoRaWAN. Ta jsou podle volby vysílána periodicky s konstantou nastaveným intervalem nebo jako událost vyvolaná stiskem tlačítka. Opačným směrem je možné zapnout nebo vypnout LED na desce, a to posláním nepotvrzované downlink zprávy 1 nebo 0 na port 2. Jelikož je výchozím nastavením zvolena třída A, přepnutí LED se projeví až po dalším uplinku. Aktivace, posílání a příjem dat je indikován dalšími LED. Aby se neztratilo pořadové číslo zprávy a další údaje LoRaWAN při vypnutí nebo resetu, je možné tlačítkem uložit aktuální LoRaWAN nastavení do flash paměti.

Před měřením bylo nutné tento software mírně upravit. Nejprve jsem vložil vysílání hned za inicializaci, aby proběhlo okamžitě po startu programu. Dále jsem zrušil veškerou LED indikaci, protože má vysoký odběr (4,5 mA) a bylo by složité rozeznat spotřebu jednotlivých fází běhu aplikace. Poslední změnou je okamžité spuštění ukládání nastavení po odvysílání zprávy.

Na obrázku 5.1 je vidět naměřený průběh odběru proudu. Celý běh programu můžeme rozdělit na několik fází, které jsou vypsány v tabulce 5.1.

Z tabulky 5.1 je patrné, že nejvyšší spotřebu má čip ve fázi vysílání. Dále jsou náročná na spotřebu přijímací okna RX1 a RX2, která se navíc mohou ještě prodloužit, kdyby byl v okně rádiem zasynchronizován downlink paket a bylo by potřeba ho celý přijmout. Z tohoto pohledu je výhodné se nejprve



Obrázek 5.1: Průběh spotřeby čipu v příkladu End Node (3,3 V; 14dBm; DR0; ABP; Třída A; Délka dat: 15)

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	5,65	319	5,94
TX	23,11	1648	125,73
RX1	6,37	206	4,32
RX2	6,42	205	4,36
Ukládání nastavení	6,07	56	1,09
Spánek	0,19	1844	1,35
Celkem	-	4278	142,79

Tabulka 5.1: Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace End Node

zabývat snížením spotřeby rádiového rozhraní, a to jednak prozkoumáním možných nastavení v LoRaWAN síti a dále pak úpravou parametrů LoRa modulace.

5.2 Nastavení LoRaWAN sítě

Síť LoRaWAN umožňuje definovat nastavení, která ovlivňují komunikaci v síti. Volit je možné mezi různými třídami a typy aktivace. Tato podkapitola porovná a zhodnotí jednotlivé možnosti volby proti příkladové aplikaci ve výchozím nastavení.

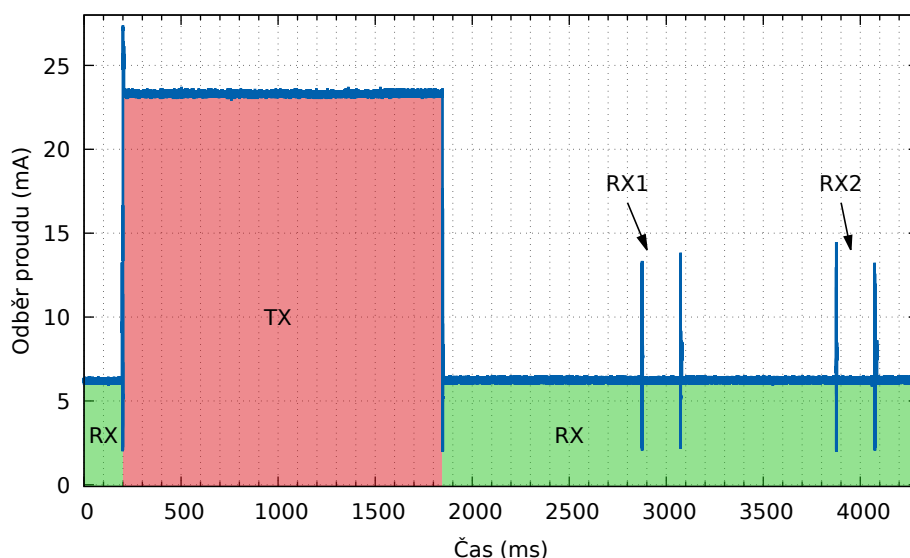
5.2.1 Třída koncového zařízení

Jak bylo popsáno v podkapitole 2.4.1, vybírat je možné ze tří tříd, do kterých lze koncové zařízení přepnout na základě požadované funkce. Výchozím nastavením

vením v příkladu End Node je třída A, která je zároveň nejúspornější. Průběh odběru proudu v tomto režimu byl vidět na obrázku 5.1.

Druhou možností je třída B. Zřejmě kvůli nutnosti tzv. beaconů není tato třída operátory často podporována. Např. České Radiokomunikace ve svém portálu podporu pro třídu B nenabízí a v síti TTN se zařízení do této třídy nepodařilo přepnout. I přesto, že spotřebu nebylo možné naměřit, lze ji velmi dobře přirovnat obrázku 2.6.

Nejnáročnější na spotřebu je třída C. Její spotřeba je vidět na obrázku 5.2. V tabulce 5.2 jsou rozepsány naměřené hodnoty spotřeby hlavních fází. V této třídě je příjem nepřetržitý, proto nelze stanovit její energii.



Obrázek 5.2: Průběh odběru proudu koncového zařízení ve třídě C (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)

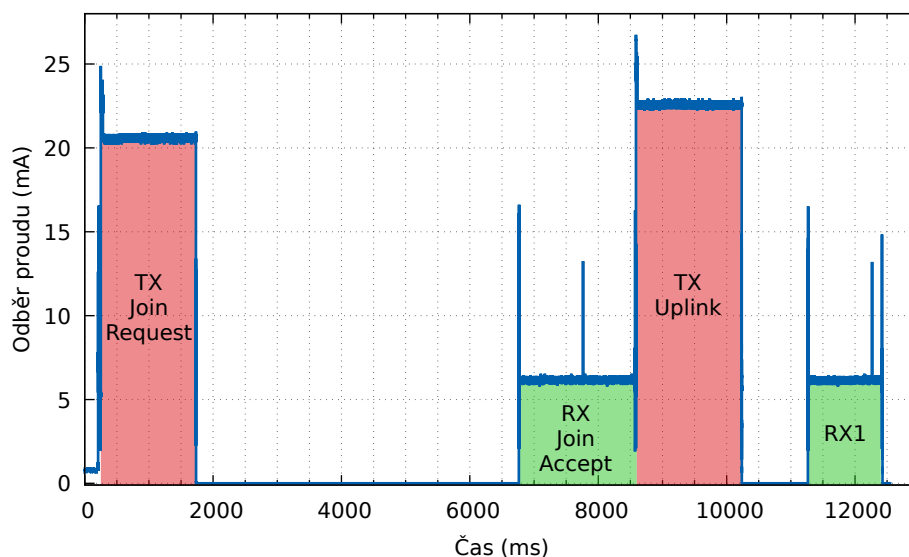
Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
TX	23,31	1647	126,72
RX	6,25	∞	-

Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace v třídě C (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)

Měření potvrzují počáteční předpoklady, a to že třída A je nejúspornější a nejvhodnější pro zařízení s velmi malou spotřebou energie.

5.2.2 Aktivace – OTAA vs ABP

V kapitole 2.4.5 byly popsány metody aktivace koncového zařízení. Robustnější a bezpečnější řešení je metoda OTAA. Jak je vidět na obrázku 5.3, před uživatelskou komunikací proběhne vyslání paketu typu Join Request a přijmutí Join Accept. Tabulka 5.3 shrnuje naměřené hodnoty průběhu.



Obrázek 5.3: Průběh odběru proudu při aktivaci OTAA (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
TX – Join Request	20,59	1483	100,78
RX – Join Accept	6,17	1804	36,70
TX	22,58	1648	122,86
RX1	6,15	1152	23,40

Tabulka 5.3: Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace při aktivaci OTAA (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)

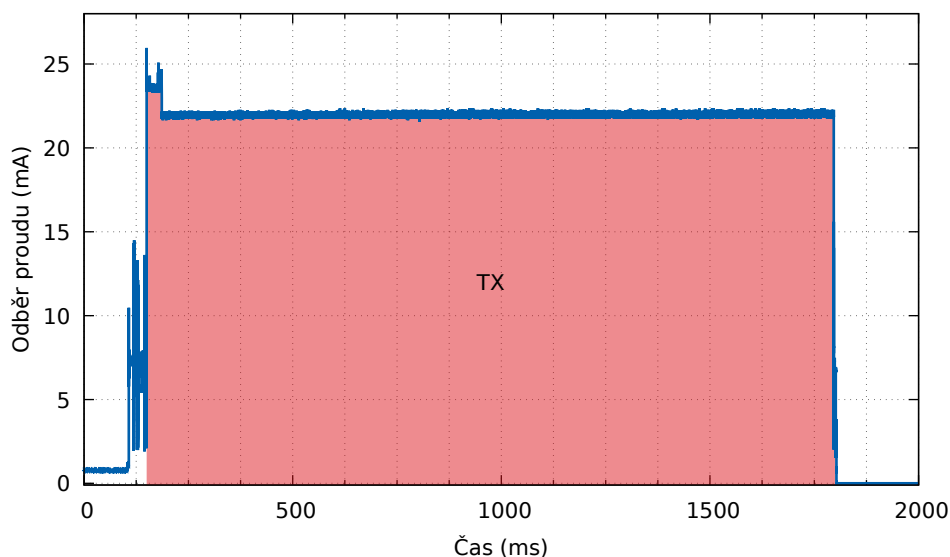
Nevýhodou OTAA je, že pokud se komunikace kvůli špatným přenosovým podmínkám nedaří, je nutné poslat paket znovu, což má za následek další spotřebovanou energii. Na druhou stranu umožňuje generování a distribuci nových šifrovacích klíčů, což je při ABP nemožné.

Z hlediska spotřeby je jednoznačně výhodnější ABP. Jak je vidět na obrázku 5.1, k žádné aktivační komunikaci nedochází, energie nutná pro aktivaci je nulová a uživatelská data se mohou přenášet hned po startu.

5.2.3 Deaktivace příjmu

Každé vysílání uplink zprávy v LoRaWAN nutně následuje dvojice přijímacích oken, která jsou připravena pro příjem downlink zprávy. Pokud nebudeme vyžadovat funkci příjmu, můžeme přijímací okna zrušit. Na obrázku 5.4 je naměřený průběh proudu bez přijímacích oken.

Výsledkem je očekávané snížení spotřeby přibližně o 8,68 mJ proti výchozímu uplinku ve třídě A. Při vysílání v DR0 je úspora relativně malá. Pokud zrychlíme vysílání na DR5, úspora energie je velmi podstatná. Na druhou stranu toto řešení, i když je funkční, ne plně vyhovuje standardu LoRaWAN,



Obrázek 5.4: Průběh spotřeby proudu bez přijímacích oken (3,3 V; 14 dBm; DR0; Délka dat: 15)

neboť zamezuje aplikačnímu serveru v posílání MAC příkazů např. k dynamické úpravě *DR* (ADR) nebo přidávání dalších volitelných kanálů.

5.3 Optimalizace parametrů modulace LoRa

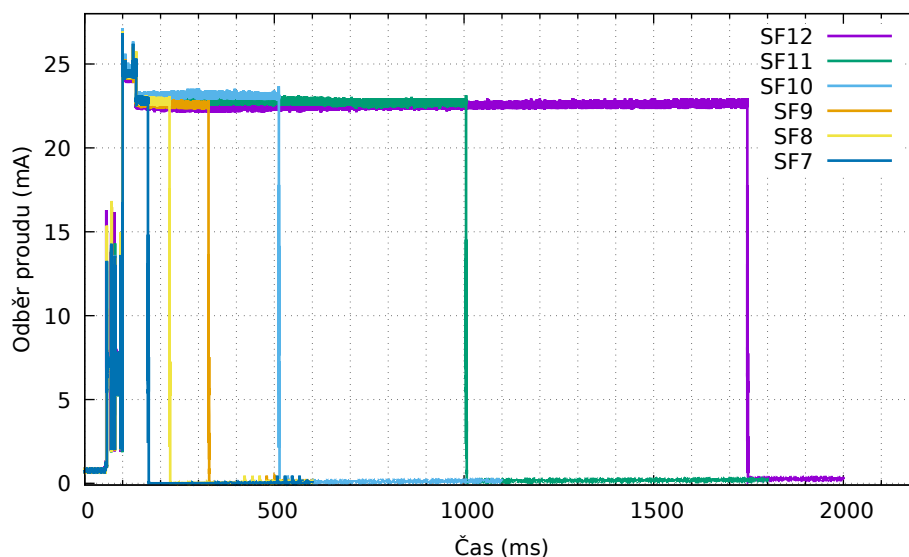
Jak bylo popsáno v kapitole 2.3.4, LoRa umožňuje úpravu přenosu pomocí tří specifických parametrů. Jelikož požadujeme možnost připojení do LoRaWAN, musíme se omezit pouze na hodnoty platné v regionálním nastavení, jak bylo ukázáno v tabulce 2.2.

V EU868 můžeme měnit pouze parametr *SF*, neboť *CR* je pro LoRaWAN fixní, což v tomto regionu v zásadě platí i pro *BW*. Zvýšením šířky pásma *BW* bychom sice mohli docílit snížení spotřeby, ale povolena je jen hodnota 125 kHz a 250 kHz při DR6, která je však velmi málo používaná a mnoho LoRaWAN bran ji nepodporuje.

5.3.1 Spreading factor

Pro minimalizaci spotřeby při vysílání je parametr *SF* velmi užitečný. Umožňuje prodloužit nebo zkrátit dobu trvání chirpu, viz obrázek 5.5.

Tabulka 5.4 vypisuje naměřenou dobu trvání paketu při daném *SF* a potřebnou energii k jeho vyslání. Jak je vidět, paket při nejnižší *SF*7 je 24krát kratší než nejvyšší *SF*12. Zkrácení není 32násobné, jak by bylo ze zkrácení doby symbolu možné usuzovat. Každým jednotlivým ubráním *SF* se sice doba trvání zpoloviční, ale také se zmenší počet bitů kódovaných do každého symbolu.



Obrázek 5.5: Průběhy spotřeby při různé volbě SF (3,3 V; 14 dBm; BW 125 kHz; Délka dat: 15)

Velkou nevýhodou snížení SF je dramaticky nižší dosah kvůli snížení procesního zisku podle vztahu 2.3. Teoretický dosah pro dané SF ukazuje [21] v grafu 16.

SF	Trvání (ms)	Energie (mJ)
12	1645	122,50
11	904	68,05
10	412	31,65
9	226	17,06
8	123	9,47
7	67	5,21

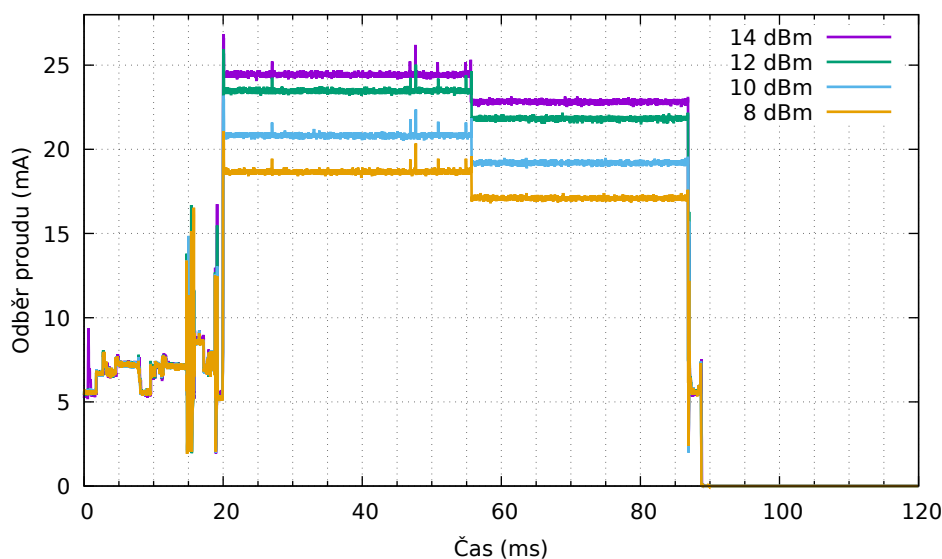
Tabulka 5.4: Porovnání spotřeby a délky trvání pro různá nastavení SF (3,3 V; 14 dBm; BW 125 kHz; Délka dat: 15)

Dobu trvání paketu při daném SF a BW lze ověřit výpočtem pomocí již zmíněného programu SX1261 Calculator Tool [14]. Zatímco výsledky pro hodnoty SF 10 až 7 souhlasí, pro dva zbývající SF jsou naměřené časy trvání o jeden symbol delší, což může znamenat, že pakety obsahují další MAC data.

■ 5.3.2 Vysílací výkon

Důležitým parametrem každé rádiové komunikace je vysílací výkon, který také určuje spotřebu při vysílání. Čím je vyšší vysílaný výkon, tím je vyšší odběr proudu. Jak bylo popsáno v podkapitole 3.2 rádio má dva výkonové výstupy, přičemž v EU868 regionálním nastavení se používá ten s nižším výkonem

do 14 dBm, což je maximální povolená úroveň. Na obrázku 5.5 a v tabulce 5.5 je vidět vliv snižování vysílacího výkonu na spotřebu proudu.



Obrázek 5.6: Průběhy odběru proudu při různé volbě vysílacího výkonu (3,3 V; DR5; Délka dat: 15)

Vysílací výkon (dBm)	Proud (mA)	Energie (mJ)	Účinnost (%)
14	22,81	5,21	33,37
12	21,82	4,98	22,01
10	19,20	4,42	15,78
8	17,10	3,96	11,18

Tabulka 5.5: Porovnání odběru proudu při různém vysílacím výkonu (3,3 V; DR5; Délka dat: 15)

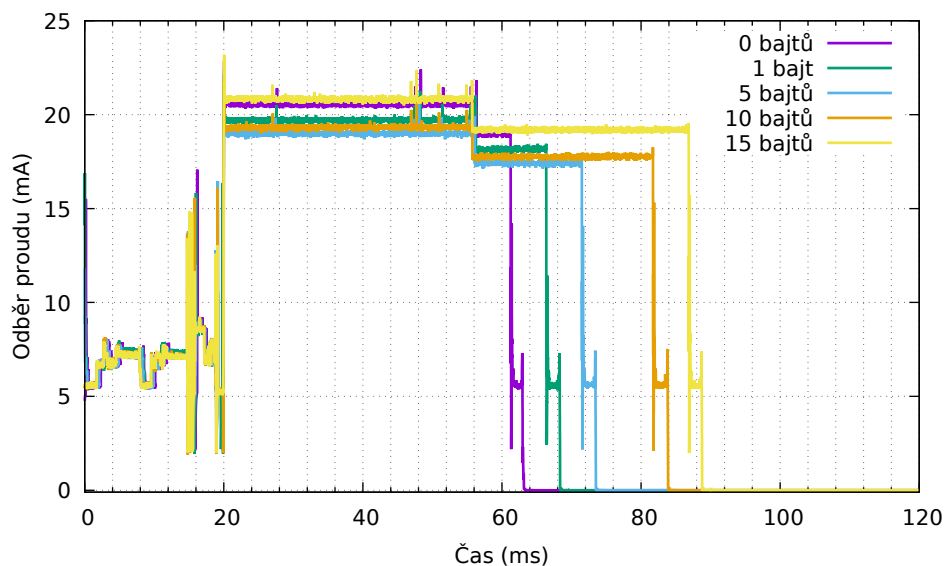
Se snižováním vysílacího výkonu klesá kromě proudu i spotřebovaná energie. Zároveň však klesá dosah a účinnost koncového stupně při vysílání, která je vypočtena v posledním sloupci.

Dále použijte hodnotu 10 dBm, protože je zmíněna jako optimální ve specifikaci [16] a v [22] jsou uvedeny optimální parametry, které jsou třeba pro rádio nastavit. Zároveň nabízí dobrý kompromis mezi vysílacím výkonem, energií a účinností.

5.3.3 Délka dat v paketu

Spotřebu lze také snížit zkrácením délky uživatelských dat. Jak bylo zjištěno, je možné posílat i pakety bez uživatelských dat. Ty jsou vhodné, pokud je cílem vysílání pouze indikovat serveru, že vznikla nějaká událost, jejíž význam byl předem domluven.

Obrázek 5.7 porovnává prodloužení doby vysílání při zvětšování paketu. V tabulce 5.6 jsou jednotlivé naměřené časy trvání a odpovídající energie vypsány.



Obrázek 5.7: Průběhy spotřeby pro různou délku uživatelských dat (3,3 V; 10 dBm; DR5)

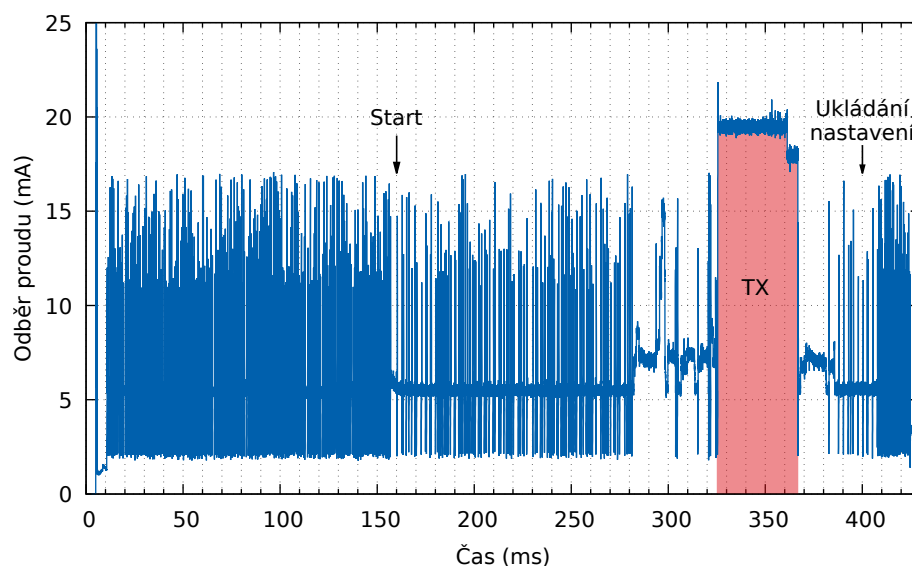
Délka uživatelských dat (b)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
15	67	3,96
10	62	3,80
5	51	3,14
1	47	2,97
0	41	2,77

Tabulka 5.6: Porovnání spotřeby energie při různé délce uživatelských dat (3,3 V; 10 dBm; DR5)

Zmenšování doby vysílání a energie není lineární se zkracováním zprávy, protože data jsou skládána po SF (v tomto případě sedmi) bitech do symbolů. V důsledku toho ubráním jednoho bajtu se zpráva zkrátí o jeden nebo dva symboly podle předchozího obsazení symbolu bity.

5.4 Úspory běhu mikrokontroléru

V předchozích podkapitolách se podařilo výrazně snížit energetickou náročnost vysílání. Na obrázku 5.8 je průběh čipem odebíraného proudu po snížení spotřeby rádiové části. Tabulka 5.7 podobně jako v tabulce 5.1 vypisuje jednotlivé fáze programu, ale tentokrát po snížení spotřeby.



Obrázek 5.8: Průběh odběru proudu aplikace End Node po snížení spotřeby rádia

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	5,65	319,70	5,97
TX	19,27	41,27	2,63
Ukládání nastavení	5,97	59,33	1,17
Celkem	-	420,30	9,77

Tabulka 5.7: Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází aplikace End Node po snížení spotřeby rádia

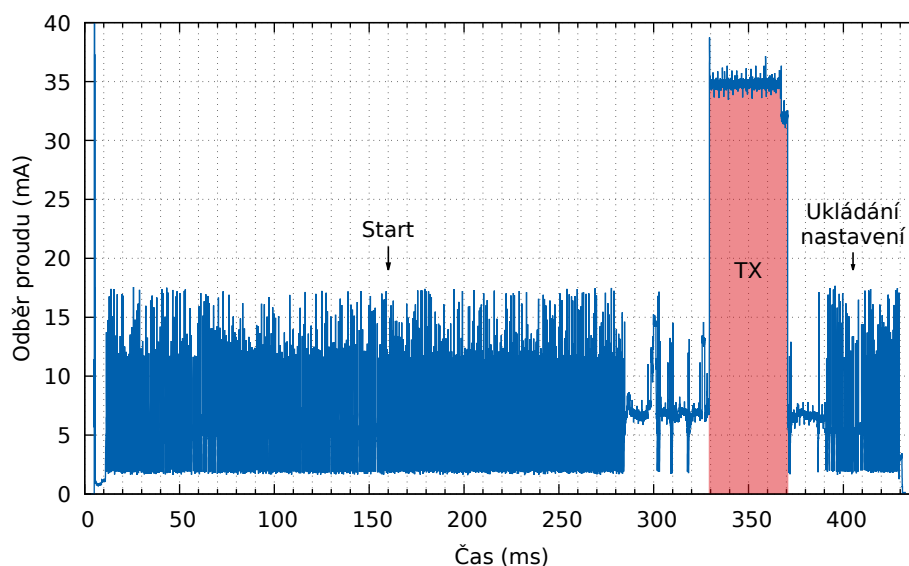
Jak jde vidět, fáze, kdy vysílá rádio, již spotřebovává menší energii než okolní běh mikrokontroléru. Ten je složen jednak z počáteční fáze inicializace mikrokontroléru s přípravou rádia na vysílání a dále ukončovací fází, ve které probíhá hlavně ukládání LoRaWAN nastavení. Proto je dále nutné zabývat se minimalizací času běhu a tím i spotřeby právě těchto částí programu.

5.4.1 Napájecí napětí

Nižší spotřeby lze u mikrokontroléru dosáhnout i bez zásahu do programu, a to snížením napájecího napětí. Jak bylo popsáno v kapitole 3.1, STM32WL je schopen běžet už od 1,8 V, a tak je možné z výchozích 3,3 V ještě klesnout. K tomu lze s výhodou využít dříve nastavený mód PPK2, který zapojuje vnitřní nastavitelný napěťový zdroj.

Na obrázku 5.9 je vidět naměřený průběh odebíraného proudu a v tabulce 5.8 jsou vypsány odběry proudu a spotřebovaná energie jednotlivých fází po snížení napětí.

Snížení napájecího napětí ovlivnilo nejenom mikrokontrolér. Jelikož je rádiová a procesorová část integrovaná v jednom čipu, snížilo se i napětí



Obrázek 5.9: Průběh odběru proudu při 1,8 V

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	5,40	322,90	3,15
TX	34,59	41,25	2,57
Ukládání nastavení	5,70	60,29	0,62
Celkem	-	424,44	6,34

Tabulka 5.8: Naměřené hodnoty spotřeby jednotlivých fází při 1,8 V

pro rádiové rozhraní, které musí zvýšit odběr proudu, aby dosáhlo stejného vysílacího výkonu. Na spotřebovanou energii při vysílání snížení nemá vliv.

Značný vliv má naopak na inicializační a ukládací fázi programu, ve kterých došlo k poklesu spotřeby energie o 2,82 mJ respektive 0,55 mJ. U obou se tak snížila o cca 48 %.

5.4.2 Zdroj časování – LSE vs LSI

Aby bylo možné odměřovat čas, používá aplikace periférii RTC v módu časovače bez kalendáře. Jako zdroj pro RTC je ve výchozím stavu použit LSE, který má ale dlouhý náběhový čas. Podle [15] náběh trvá typicky 2 s, ale jak bylo vidět dříve na obrázku 5.8, je schopen být funkční i mnohem dřív. Přepnutí na LSI se čas náběhu podle specifikace [15] zkrátí na maximálně 130 μ s.

Změna měla vliv pouze na inicializační fázi. Tabulka 5.9 proto vypisuje pouze spotřebu této fáze.

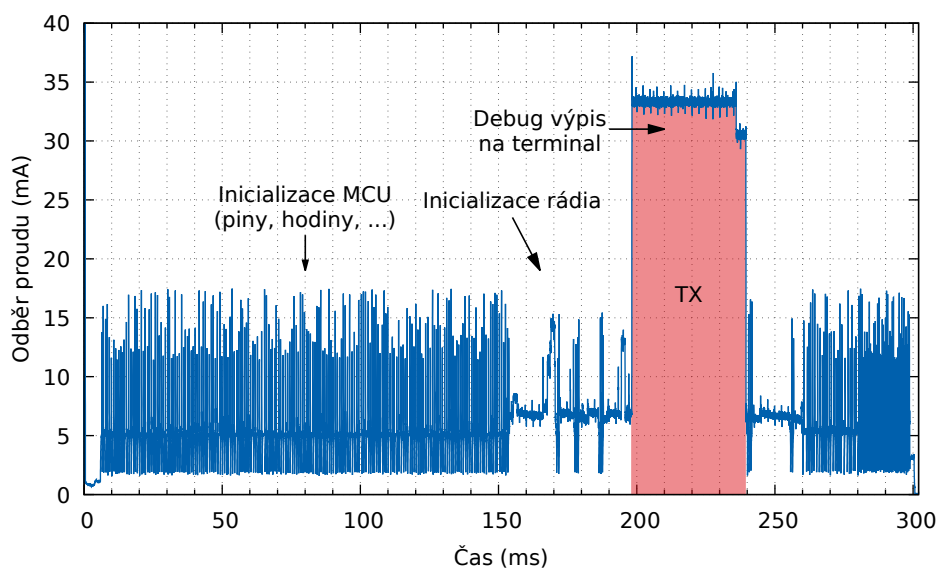
Přepnutím na integrovaný RC oscilátor (LSI) se, jak ukazuje měření, první fáze běhu programu zkrátila přibližně o 126 ms. V důsledku toho se spotřebovaná energie snížila o 1,19 mJ, což je cca 37 %.

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	5,54	196,90	1,96

Tabulka 5.9: Naměřené hodnoty spotřeby inicializační fáze po přepnutí na LSI

5.4.3 Mazání nepotřebných funkcí v kódu příkladu

Jak je vidět na obrázku 5.10, většina celkového času běhu programu je použita k inicializaci (start). Z ní nejdelší část je ta mezi 5 a 155 ms, která nastavuje samotný mikrokontrolér.



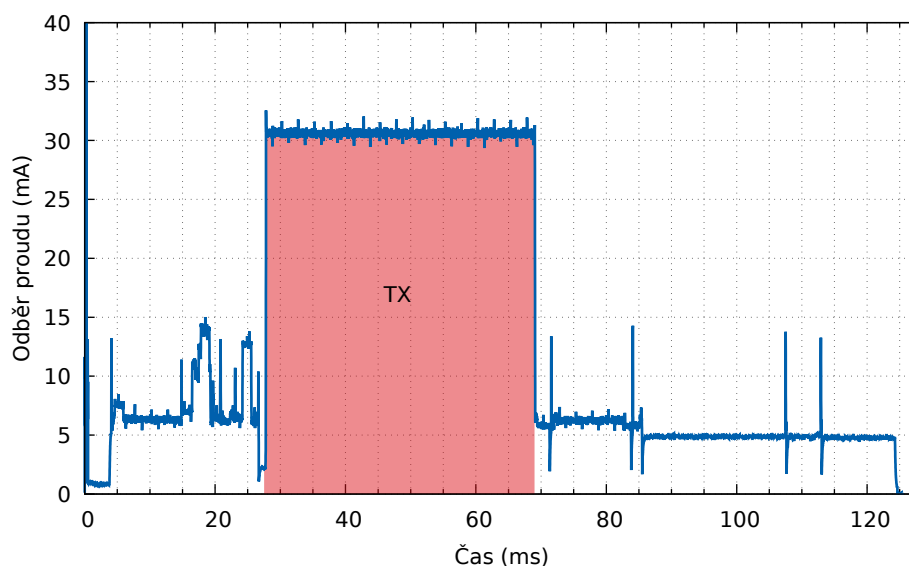
Obrázek 5.10: Průběh odběru proudu před pročištěním kódu

Jelikož byl příkladový software navržen velmi univerzálně, obsahuje mnoho funkcí, které jsou nepotřebné a jejich promazáním běh zrychlíme bez vedlejších efektů. Kvůli tomu byly v kódu provedeny následující změny:

- deaktivace debug výpisu (UART),
- odstranění inicializace tlačítek a LED na NUCLEO-WL desce,
- odstranění funkcí pro měření teploty čipu a napětí baterie,
- přesun inicializace systémových hodin na úplný začátek (rychlejší start),
- odstranění uspávání rádia při nastavování a zkrácení čekání.

Na obrázku 5.11 je vidět efekt popsanych změn. V tabulce 5.10 jsou opět vypsané jednotlivé fáze programu a jejich spotřeba po provedení změn.

Vyčištění kódu mělo zásadní vliv na zmenšení spotřeby. Největší úspory dosáhla inicializační část s poklesem o 2,83 mJ, což je snížení o 90 %. Ve fázi ukládání nastavení je úspora 0,3 mJ, tj. pokles o 17 %. Menší spotřeba je vidět



Obrázek 5.11: Průběh odběru proudu po vyčištění kódu

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	6,60	27,19	0,323
TX	30,60	41,27	2,268
Ukládání nastavení	5,21	55,26	0,519

Tabulka 5.10: Naměřené hodnoty spotřeby po vyčištění kódu

i v TX fázi, kde došlo ke zmenšení o 0,1 mJ (12 %). To je důsledkem zrušení debug výpisů, které kvůli pomalé UART rychlosti zasahovaly až do vysílací fáze.

5.4.4 Periférie CRC

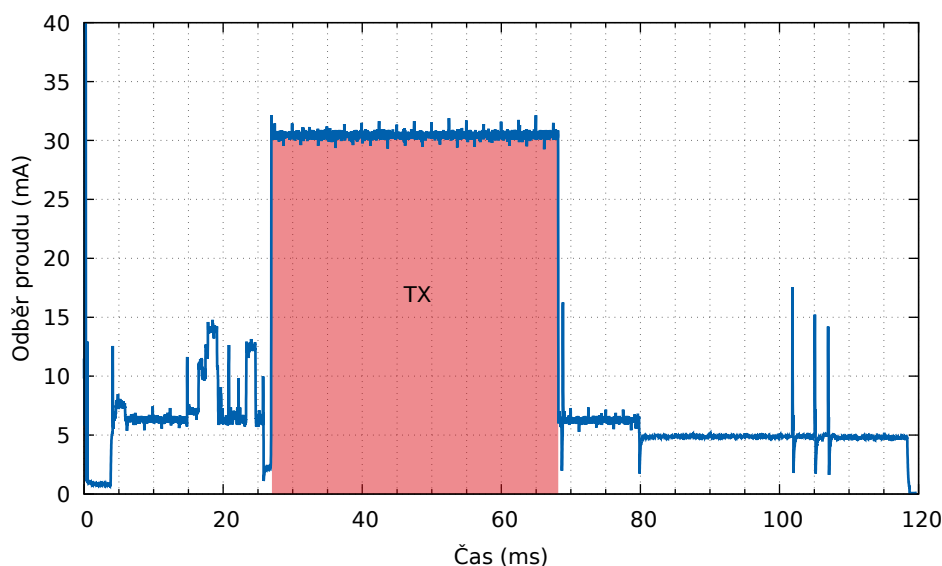
Při ukládání a načítání LoRaWAN nastavení aplikace používá CRC k zjištění, jestli jsou data validní a jestli nebyla poškozena. Ve výchozím stavu je výpočet CRC implementován softwarově. STM32WL obsahuje periférii CRC, která je schopna provést výpočet rychleji a přitom ušetřit programovou paměť.

Na obrázku 5.12 je průběh spotřeby proudu po přechodu na hardwarové CRC. Tabulka 5.11 ukazuje naměřenou spotřebu.

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	6,57	26,36	0,312
TX	30,42	41,31	2,268
Ukládání nastavení	5,18	50,34	0,469

Tabulka 5.11: Naměřené hodnoty spotřeby s hardware CRC výpočtem

Výsledkem je velmi malé snížení spotřeby první a poslední fáze. Inicializační



Obrázek 5.12: Průběh odběru proudu s hardware CRC výpočtem

fáze uspořila $11 \mu\text{J}$ (3,5 %) a poslední fáze snížila spotřebu o $50 \mu\text{J}$ (9,7 %).

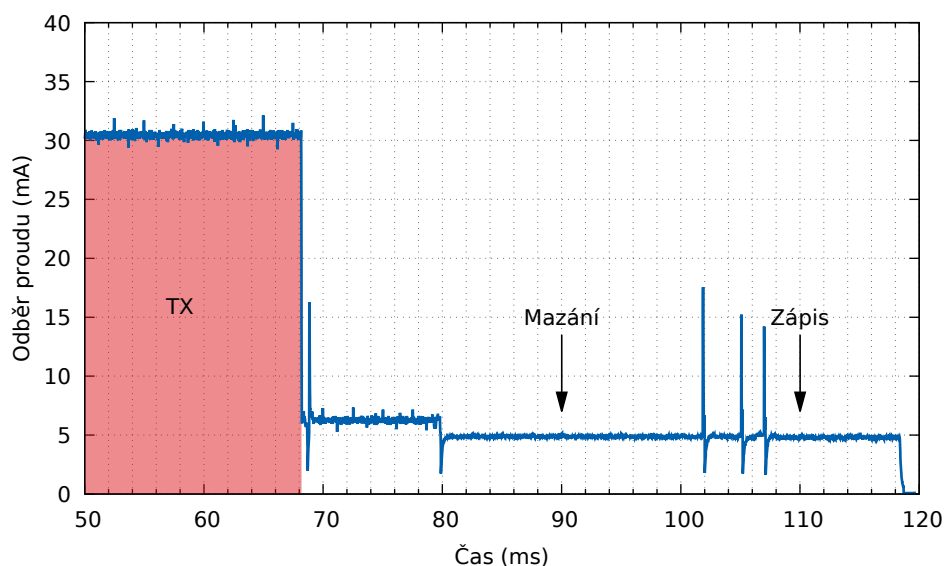
5.4.5 Optimalizace ukládání nastavení LoRaWAN

Poslední fází programu je ukládání nastavení LoRaWAN. Jejím úkolem je zapamatovat údaje do flash paměti, aby při odebrání napájení a opětovném spuštění čipu nebylo třeba zařízení v rámci LoRaWAN znova aktivovat.

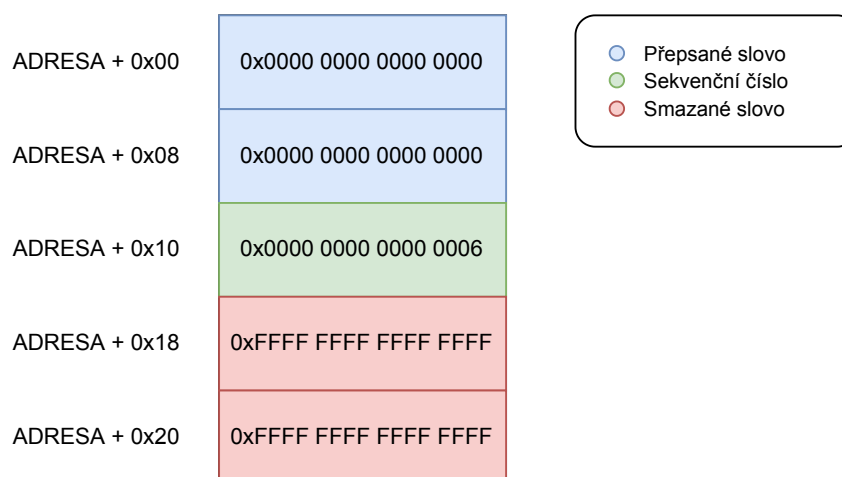
Jak popisuje [23], ve výchozím stavu program ukládá 1484 bajtů dlouhou strukturu nastavení do vyhrazené 2 KB stránky na konci programové paměti. Jak bylo popsáno v podkapitole 3.1.2, před zapsáním je nutné stránku pokaždé vymazat a uložení nastavení tak celkově v součtu trvá 37,20 ms. To je vidět na obrázku 5.13.

Zmíněná struktura je dále dělena na sedm dalších podstruktur, které obsahují informace o zvoleném regionu, klíčích, nastavení ve třídě B a parametrech použitých při aktivaci, přičemž všechny jsou podrobněji rozebrány v [23]. Většina podstruktur zůstává po odvysílání stejná a pokud uvažíme, že nebudeme parametry jako region a klíče měnit, zůstane nám jediná proměnná podstruktura Crypto. Ta obsahuje zejména počítadla uplink a downlink sekvenčních čísel a dále DevNonce a JoinNonce používané k počítání paketů při aktivaci v OTAA. Jelikož jsme se rozhodli nepoužívat OTAA ani příjem, stačí si ukládat pouze uplink sekvenční číslo.

V důsledku lze při ukládání časově i energeticky ušetřit. Při prvotním naprogramování stačí fixně zapsat celou strukturu do jedné stránky a rezervovat další stránku, kam se bude za sebou ukládat sekvenční číslo. K uložení dojde po každém vysílání, kdy se nejprve přepíše na nulu staré číslo v předchozím slovu a poté se do následujícího zapíše nové. Až se stránka přeplní (po 255 vysílání) musí se energie místo na vysílání použít na její smazání. Na obrázku 5.14 je vidět část stránky v paměti se zapisovaným sekvenčním číslem.



Obrázek 5.13: Průběh odběru proudu fáze ukládání nastavení

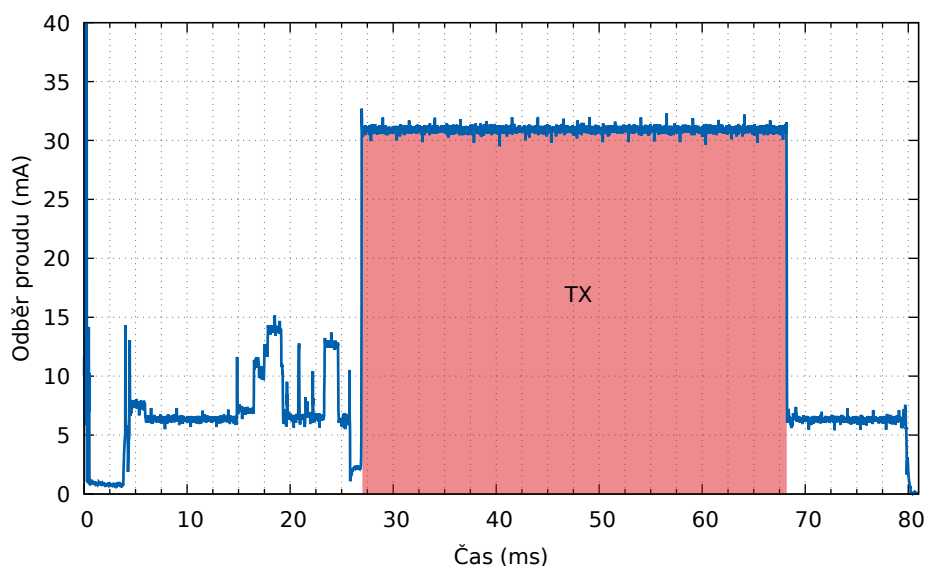


Obrázek 5.14: Část stránky paměti se sekvenčním číslem

Uložené sekvenční číslo je načítáno na začátku programu. Nejprve se celá fixní stránka nahraje do struktury v RAM a poté se ve druhé stránce vyhledá sekvenční číslo, které se přepíše do správné proměnné struktury.

Pro vyhledávání sekvenčního čísla byla zvolena metoda půlení intervalu. Na začátku se program podívá na adresu v polovině stránky. Pokud je její 64bitová hodnota samá jednička (smazané slovo), skočí do dolní poloviny na prostřední adresu, naopak pokud je hodnota nula, skočí do horní poloviny na prostřední adresu. Tento proces se opakuje, dokud nedosáhne validního sekvenčního čísla (tj. není 0 ani samé jedničky).

Na obrázku 5.15 je vidět průběh proudu po optimalizaci ukládání nastavení.



Obrázek 5.15: Průběh odběru proudu po optimalizaci ukládání

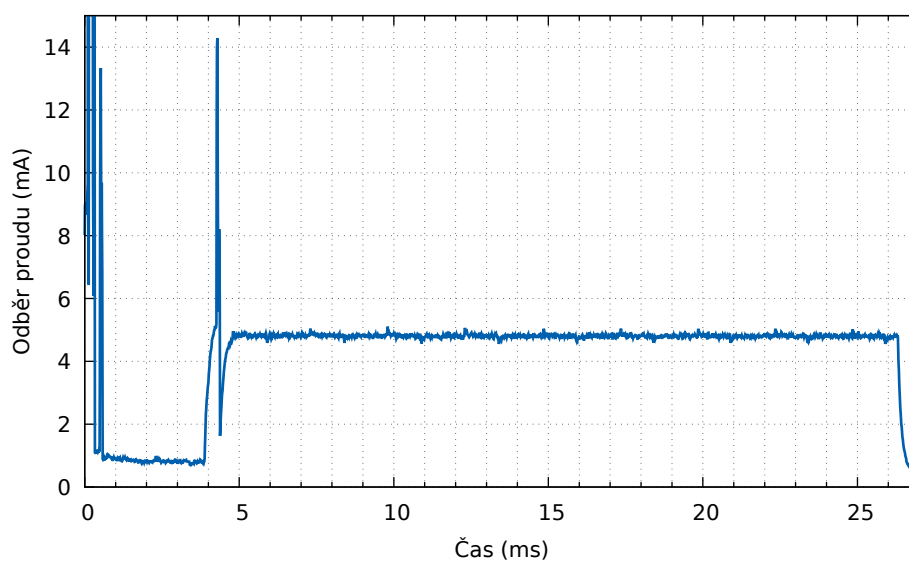
Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Ukládání nastavení	6,15	12,02	0,133

Tabulka 5.12: Naměřené hodnoty spotřeby fáze ukládání po optimalizaci

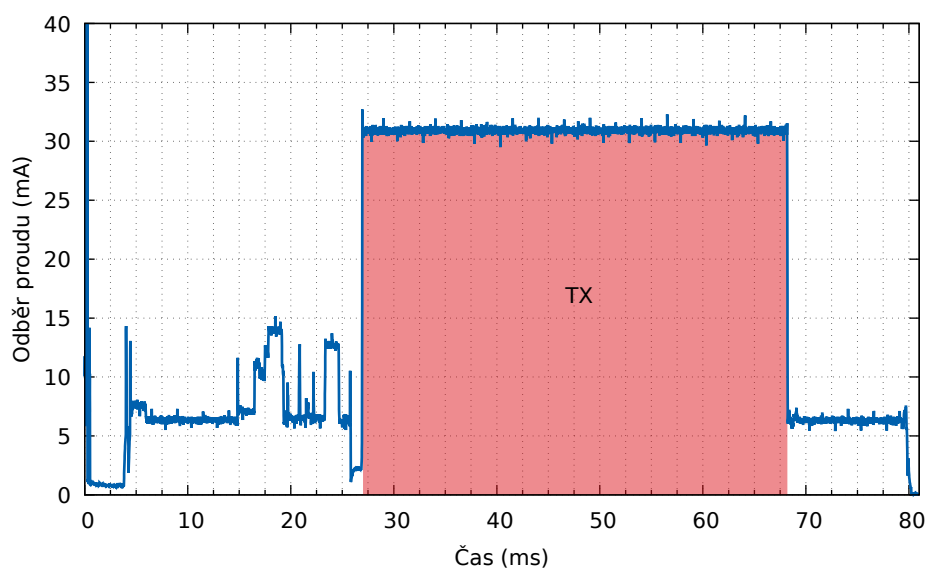
V tabulce 5.12 jsou vypsány hodnoty spotřeby optimalizované fáze ukládání. Výsledná doba trvání ukládání je $165,4 \mu\text{s}$. Jelikož je ale v této fázi zahrnuta celá část po vysílání, je její délka trvání $11,89 \text{ ms}$. Spotřebovaná energie klesla o $0,336 \text{ mJ}$, což je pokles o 72% . Na obrázku 5.16 je průběh odběru proudu pro případ mazání plné stránky, které trvá $25,87 \text{ ms}$ při průměrném proudu $4,28 \text{ mA}$ a spotřebě $0,199 \text{ mJ}$ energie.

5.5 Výsledek optimalizací

Předešlé kapitoly ukázaly, jak optimalizovat příkladovou aplikaci, aby měla co nejmenší spotřebu energie, a to z pohledu rádiové a mikrokontrolérové části. Na obrázku 5.17 je vidět odběr proudu výsledného řešení. V tabulce 5.13 jsou shrnuty výsledné spotřeby jednotlivých fází programu a celková spotřeba optimalizované aplikace.



Obrázek 5.16: Průběh odběru proudu při mazání stránky sekvencních čísel



Obrázek 5.17: Průběh odběru proudu výsledné optimalizované aplikace

Fáze	Proud (mA)	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Inicializace čipu (Start)	6,64	26,33	0,315
TX	30,90	41,29	2,304
Ukládání nastavení	6,15	12,02	0,133
Celkem	-	79,64	2,752

Tabulka 5.13: Naměřené hodnoty spotřeby výsledné optimalizované aplikace

Kapitola 6

Závěr

Práce ukázala, že je možné výrazně snížit spotřebovanou energii na vyslání jedné prázdné signalizační zprávy. Porovnání spotřebované energie mezi výchozí příkladovou a optimalizovanou aplikací ukazuje tabulka 6.1.

	Trvání (ms)	Energie (mJ)
Výchozí aplikace	4278,00	142,790
Optimalizovaná aplikace	79,64	2,752
Úspora	4198,36	140,038
Úspora (%)	98,1 %	98,1 %

Tabulka 6.1: Porovnání výchozí a optimalizované aplikace

Největších úspor je možné dosáhnout změnou nastavení LoRaWAN. Volba nesprávné třídy nebo způsobu aktivace navýší spotřebovanou energii o stovky mJ. Nevýhodami těchto změn je buď zvýšení latence, nebo úplná ztráta možnosti downlink zpráv a nemožnost výměny klíčů pro OTAA. Jelikož požadujeme jednoduchou uplink signalizaci, můžeme downlink zprávy zrušit.

Změna parametrů LoRa modulace přináší velké úspory za cenu snížení dosahu. Spotřeba se pohybuje od jednotek mJ po řádově 100 mJ, podle volby SF , vysílacího výkonu a délky zprávy.

Úspory v neefektivitě příkladového softwaru mikrokontroléru jsou velmi omezené. Optimalizací se podařilo snížit spotřebu o jednotky mJ, hlavně vyčištěním kódu od nepotřebných funkcí. Použitím rychlé CRC periférie místo softwarového řešení se uspořilo pouze 62 μJ .

Výsledná spotřeba energie aplikace je 2,752 mJ. Takovou energii je možné nasbírat akumulací z energy harvestoru, např. ve formě malého solárního panelu. Pro impulzní energy harvestory ve formě vypínačů [24], které na jeden stisk generují energii v řádu mJ a mívají tato aplikace příliš náročná.

Literatura

1. BOUGUERA, Taoufik; Jean-François DIOURIS; Jean-Jacques CHAILLOUT; Randa JAOUADI; Guillaume ANDRIEUX. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors* [online]. 2018, roč. 18, č. 7 [cit. 2023-05-20]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s18072104.
2. SINGH, Ritesh Kumar; Priyesh Pappinisseri PULUCKUL; Rafael BERKENS; Maarten WEYN. Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application. *Sensors* [online]. 2020, roč. 20, č. 17 [cit. 2023-03-26]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s20174794.
3. *What is the internet of things (IoT)?* [Online]. TechTarget [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>.
4. *LPWAN - technologie, které mění IoT* [online]. Pavel Hübner, 2020 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.hardwario.com/cs/blog/2020-06-09-lpwan/>.
5. *LoRaWAN, Sigfox nebo NB-IoT? Srovnání 3 významných typů IoT sítí* [online]. České Radiokomunikace, 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/iot-novinky/lorawan/lorawan-sigfox-nebo-nb-iot-srovnani-3-vyznamnych-typu-iot-siti>.
6. *SigFox for M2M & IoT* [online]. Electronics notes [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/sigfox/what-is-sigfox-basics-m2m-iot.php>.
7. *LTE-M vs NB-IoT – A Guide Exploring the Differences between LTE-M and NB-IoT* [online]. Telenor IoT [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://iot.telenor.com/iot-insights/lte-m-vs-nb-iot-guide-differences/>.
8. *LoRa™ Modulation Basics* [online]. Semtech, 2015 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>.
9. ZLEVOR, Jan. *Využití SDR v LoRaWAN sítích*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
10. MONTAGNY, Sylvain. *LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners* [online]. Savoie Mont Blanc University, 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>.

11. *The Things Fundamentals on LoRaWAN* [online]. The Things Network [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.
12. *RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters* [online]. LoRa Alliance®, 2021 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://hz137b.p3cdn1.secureserver.net/wp-content/uploads/2021/05/RP002-1.0.3-FINAL-1.pdf>.
13. *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview* [online]. Semtech, 2019 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf.
14. *SX1261 LoRa Calculator* [online]. Semtech [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R000000Q20T/GhbZe21GVN06sNDUlo61cHVakMQvcVCdaYffFeSjyitk>.
15. *Reference manual: STM32WL5x advanced Arm® - based 32-bit MCUs with sub-GHz radio solution* [online]. Rev. 7. STMicroelectronics, 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0461-stm32wlex-advanced-armbased-32bit-mcus-with-subghz-radio-solution-stmicroelectronics.pdf.
16. *STM32WLE5xx, STM32WLE4xx: Multiprotocol LPWAN 32-bit Arm® Cortex®-M4 MCUs, LoRa®, (G)FSK, (G)MSK, BPSK, up to 256KB flash, 64KB SRAM* [online]. Rev. 12. STMicroelectronics, 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wle5c8.pdf>.
17. *AN5646: 32 MHz HSE oscillator selection for STM32WL series MCUs* [online]. STMicroelectronics, 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5646-32-mhz-hse-oscillator-selection-for-stm32wl-series-mcus-stmicroelectronics.pdf.
18. *STM32WL Nucleo-64 board: User manual* [online]. STMicroelectronics, 2021 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1727-getting-started-with-stm32-nucleo-board-software-development-tools-stmicroelectronics.pdf.
19. *Profiler Power Kit II: User Guide* [online]. Nordic Semiconductor, 2022 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/PPK2_User_Guide_v1.0.1.pdf.
20. *STM32CubeWL* [online]. STMicroelectronics [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/embedded-software/stm32cubewl.html>.
21. MAUDET, Sébastien; Guillaume ANDRIEUX; Romain CHEVILLON; Jean-François DIOURIS. Refined Node Energy Consumption Modeling in a LoRaWAN Network. *Sensors* [online]. 2021, roč. 21, č. 19 [cit. 2023-03-26]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s21196398.

22. *Application Note: RF matching network design guide for STM32WL Series* [online]. STMicroelectronics, 2022 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5457-rf-matching-network-design-guide-for-stm32wl-series-stmicroelectronics.pdf.
23. *Application Note: How to build a LoRa® application with STM32CubeWL* [online]. STMicroelectronics, 2022 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5406-how-to-build-a-lora-application-with-stm32cubewl-stmicroelectronics.pdf.
24. BOISSEAU, Sebastien; Olivier TOSONI; Gerard DELETTE. An autonomous switch based on a rotating magnet driven by magnetic launchers. *Smart Materials and Structures*. 2021, roč. 30, č. 2, s. 2–13. ISSN 0964-1726. Dostupné z DOI: 10.1088/1361-665X/abd7e8.

Příloha A

Software

K této práci je přiložen zip archiv, který obsahuje výsledný optimalizovaný software pro prostředí STM32CubeIDE a vývojovou desku Nucleo-WL. Kromě kódu jsou nahrány i naměřené průběhy ve formátu ppk, které lze otevřít v programu Power Profiler. Následující strom popisuje strukturu archivu:

```
BP_masnyvoj_priloha.zip
├── LPWAN_Harvesting ..... Zdrojový kód optimalizované aplikace.
│   └── ...
├── Mereni ..... Naměřené průběhy.
│   └── ...
└── README.md ..... Popis obsahu archivu.
```

Software je také dostupný na školním gitlabu na adrese:
https://gitlab.fel.cvut.cz/masnyvoj/LPWAN_Harvesting.