



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Radiový modul pro energetický dohledový systém

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2612 – Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika  
*Autor práce:* **Bc. Josef Kracík**  
*Vedoucí práce:* Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# Radio module for power monitoring system

## Master thesis

*Study programme:* N2612 – Electrical Engineering and Informatics  
*Study branch:* 3902T005 – Automatic Control and Applied Computer Science  
*Author:* **Bc. Josef Kracík**  
*Supervisor:* Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef Kracík**  
Osobní číslo: **M14000187**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a inženýrská informatika**  
Název tématu: **Radiový modul pro energetický dohledový systém**  
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou volných frekvenčních pásem, jejich možnostmi a limity jejich využití pro průmyslovou komunikaci.
2. Najděte existující komunikační moduly, které využívají tato volná pásma. Seznamte se s jejich vlastnostmi a porovnejte jejich parametry.
3. Otestujte vybrané moduly s ohledem na jejich použitelnost ve spojení s existující řídicí jednotkou firmy Solar Monitor.
4. Navrhněte a realizujte prototyp komunikační jednotky pro použití s dohledovým systémem firmy Solar Monitor.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Václav Žalud: Moderní radioelektronika, BEN - technická literatura 2004**
- [2] **Jiří Vlček: Modulace a přenos signálu, BEN - technická literatura 2002**
- [3] **ČTU: Využívání vymezených rádiových kmitočtů, [online]  
<https://www.ctu.cz/ctu-informuje/jak-postupovat/radiove-kmitocty/vyuzivani-vymezenych-radiovych-kmitoctu.html>**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Jaroslav Dytrych**

Solar Monitor s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2017**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan



*Kolář*  
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2016

## Abstrakt

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15.5.2017

Podpis:



Key words:

## **Abstrakt**

V průmyslu se často vyskytuje komplikace při přenosu informace na velkou vzdálenost tím, kdy jeden z měřicích radiových modulů nemůže být napájen z elektrické sítě. Následně tedy dochází k použití akumulátoru či baterie pro provoz daného systému. Cílem této práce bylo proto vybrat a naprogramovat několik různých řešení od odlišných výrobců a porovnat jejich nejdůležitější vlastnosti (např. cena, výdrž baterie či celkový odebíraný proud, výkon při vysílání nebo příjmu, dosah atd.). Po zahrnutí všech těchto kritérií či parametrů pak navrhnout plošný spoj bezdrátového modulu (vysílač i přijímač), který by byl plně použitelný pro dálkový odečet spotřeby různých energií (vody, plynu atd.). Tato diplomová práce byla řešena ve spolupráci s firmou Solar Monitor s.r.o.

### **Klíčová slova:**

bezdrátový modul, baterie, odběr proudu, programování, plošný spoj

## **Abstract**

One of the most interesting complication in industry is sending an information over the air by radio modules but only one is powered from electricity network. The second one is powered by a battery. The aim of this work was to select and program several different solutions from different manufacturers and compare their most important characteristics (eg. price, battery life, performance in broadcasting, outreach etc.). After the inclusion of these criteria or parameters make a printed circuit board of wireless module (transmitter and receiver), which would be fully usable for remote reading of consumption various energies (water, gas etc.). This thesis was carried out in collaboration with Solar Monitor Ltd.

### **Key words:**

wireless module, batteries, current consumption, programming, printed circuit board

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Tomáši Martincovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady a cenné připomínky, které výrazně přispěly k vypracování této diplomové práce. Dále bych pak rád poděkoval Ing. Dušanu Ferbasovi a zaměstnancům firmy Solar Monitor s.r.o.

# Obsah

Seznam zkratek . . . . .	12
<b>1 Úvod</b>	<b>14</b>
<b>2 Frekvenční pásma v ČR</b>	<b>15</b>
2.1 ISM pásma . . . . .	15
2.2 Zařízení krátkého dosahu . . . . .	16
2.3 Modulace . . . . .	16
2.3.1 Analogová modulace . . . . .	16
2.3.2 Digitální modulace . . . . .	17
<b>3 Řešení s mikrokontroléry architektury AVR</b>	<b>21</b>
3.1 Popis hardwaru s AVR . . . . .	21
3.1.1 Radino HW . . . . .	23
3.1.2 Anarduino HW . . . . .	25
3.2 Programování a software Arduino . . . . .	26
<b>4 STMicroelectronics řešení</b>	<b>30</b>
4.1 Popis hardwaru ST . . . . .	30
4.2 Programování a software ST . . . . .	33
<b>5 Texas Instruments řešení</b>	<b>35</b>
5.1 Popis hardwaru TI . . . . .	35
5.2 Programování a software TI . . . . .	37
<b>6 Návrh finálního řešení</b>	<b>40</b>
6.1 Porovnávání dosažených výsledků . . . . .	40
6.2 Návrh hardwarové části . . . . .	42
6.2.1 SM2-RF . . . . .	43
6.2.2 SM2-RF BASE . . . . .	46
6.2.3 Osazovací varianty . . . . .	48
6.3 Programování, testování a měření . . . . .	51
<b>7 Závěr</b>	<b>56</b>
Literatura . . . . .	57
<b>A Blokové diagramy</b>	<b>65</b>



B Programovací kódy	69
C Ostatní obrázky	74
D Obsah přiloženého CD	89

## Seznam obrázků

2.1	Modulace . . . . .	17
2.2	Druhy analogových modulací . . . . .	19
2.3	Druhy digitálních modulací . . . . .	20
3.1	RF69HCW + ATmega328P na univerzální DPS . . . . .	21
3.2	RF69 vnitřní propojení (převzato z [12]) . . . . .	23
3.3	Radino RF69 na Spider boardu . . . . .	24
3.4	Radino RF69 pinout (převzato z [12]) . . . . .	24
3.5	Řešení Anarduino . . . . .	26
3.6	AVRDude v terminálu . . . . .	27
3.7	Testovací schéma zapojení . . . . .	28
4.1	X-NUCLEO-IDS01A4 s SPSGRF-868 . . . . .	31
4.2	NUCLEO-L053R8 . . . . .	32
4.3	NUCLEO-L053R8 s X-NUCLEO-IDS01A4 boardem . . . . .	33
5.1	Blokové schéma CC1310 (převzato z [39] str. 36) . . . . .	36
5.2	LAUNCHXL-CC1310 . . . . .	37
5.3	Přenos pulzů v programu PuTTY . . . . .	39
6.1	Maximální dosah všech řešení (převzato z [44]) . . . . .	41
6.2	SM2-RM-GSM (převzato z [47]) . . . . .	42
6.3	Obrys finálního řešení . . . . .	43
6.4	Složení vrstev plošného spoje . . . . .	45
6.5	Pohled na finální řešení ve 3D shora . . . . .	47
6.6	Pohled na finální řešení ve 3D ze strany konektoru pro S0 vstupy . . . . .	47
6.7	SM2-RF + BASE osazovací varianta vysílače s RS485 . . . . .	48
6.8	SM2-RF + BASE osazovací varianta vysílače s S0 vstupy . . . . .	49
6.9	SM2-RF + BASE osazovací varianta vysílač/přijímač na baterii . . . . .	50
6.10	SM2-RF osazovací varianta vysílač/přijímač + SM2-RM . . . . .	50
6.11	Částečné osazení SM2-RF . . . . .	51
6.12	Výřez schéma procesorové části . . . . .	51
6.13	Ošetření pulzního vstupu . . . . .	52
6.14	Testování S0 vstupu s elektroměrem . . . . .	52
6.15	Detail testovacího tlačítka + varianta SM2-RF s SM2-RM . . . . .	53
6.16	Test odeslaných pulzů z SM2-RF . . . . .	53

6.17	Schéma rozhraní RS485 . . . . .	54
6.18	Příprava spektrálního analyzátoru . . . . .	55
6.19	Příprava antény . . . . .	55
A.1	Blokové schéma přijímače pro řešení na nepáživém poli a radina . . . .	65
A.2	Blokové schéma vysílače pro řešení na nepáživém poli a radina . . . .	66
A.3	Blokové schéma přijímače pro řešení Anarduino . . . . .	67
A.4	Blokové schéma vysílače pro řešení Anarduino . . . . .	68
B.1	Inicializace RF modulu radina (převzato z [26]) . . . . .	69
B.2	Inicializace RF modulu Anarduino a řešení na nepáživém poli (převzato z [25]) . . . . .	70
B.3	Struktura uspávající mikrokontrolér a RF modul (převzato z [37]) . . .	71
B.4	Definice RF modulu a nastavení paketu . . . . .	73
C.1	Přijímací modul Arduino umístěný v modulu SM2-RM-GSM . . . . .	74
C.2	Vysílací modul Arduino ve speciálním plastovém boxu . . . . .	75
C.3	Porovnávací graf Nucleo boardů z hlediska řady a paměti flash (převzato z [30]) . . . . .	76
C.4	Import projektu v programu System Workbench for STM32 . . . . .	77
C.5	Pohled na finální řešení ve 3D ze strany RJ45 konektoru . . . . .	78
C.6	Pohled na finální řešení ve 3D z boku . . . . .	79
C.7	Programování SM2-RF . . . . .	79
C.8	Spotřeba CC1310 s minimálním osazením . . . . .	80
C.9	Záznam sériové komunikace přijímače S0 vstupu . . . . .	81
C.10	Testování rozhraní RS485 . . . . .	82
C.11	Sledování komunikace RS485 v programu PuTTY . . . . .	83
C.12	Sledování komunikace RS485 pomocí osciloskopu . . . . .	84
C.13	GUI programu MCS Realtime Spectrum Analyzer Software . . . . .	85
C.14	Spektrum v programu MCS Realtime Spectrum Analyzer Software . . .	86
C.15	Vygenerované spektrum pro SM2-RF . . . . .	87
C.16	Vygenerované spektrum pro TI LaunchPad . . . . .	88

## Seznam tabulek

2.1	ISM pásma v ČR (převzato z [1]) . . . . .	16
3.1	Výstupní zesílení RF modulu RF69HW (převzato z [8]) . . . . .	22
3.2	Spotřeba a dosah radino modulů spolu s řešením na nepájivém poli .	28
3.3	Spotřeba a dosah řešení Anarduino . . . . .	29
4.1	Spotřeba a dosah STM řešení . . . . .	34
5.1	Spotřeba a dosah TI řešení . . . . .	39
6.1	Spotřeba a dosah všech řešení . . . . .	40
6.2	Výřez hodnot z datasheetu TPL5111 (převzato z [51]) . . . . .	44

## Seznam zkratek

<b>3G</b>	označení třetí generace mobilních telekomunikačních technologií
<b>ADC</b>	Analog-to-Digital Conversion, převod analogového signálu na digitální
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard, standardizovaný algoritmus používaný k šifrování dat
<b>AVR</b>	Alf (Egil Bogen) Vegard (Wollan) Risc procesor, RISC mikroprocesor od firmy Atmel
<b>ARM</b>	Advanced RISC Machine, druh architektury mikroprocesorů
<b>BIOS</b>	Basic Input-Output System, počáteční firmware zajišťující inicializaci a konfiguraci připojeného hardwaru
<b>CCS</b>	Code Composer Studio, vývojové studio podporující mikrokontroléry od firmy Texas Instruments
<b>COM</b>	COMmon, označení sériového portu
<b>CPU</b>	Central Procesing Unit, součástka vykonávající strojový kód z operační paměti
<b>DAC</b>	Digital-to-Analog Conversion, převod digitálního signálu na analogový
<b>DMA</b>	Direct Memory Access, přímý přístup do paměti
<b>DPS</b>	Deska Plošných Spojů
<b>EEPROM</b>	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektricky mazatelná nonvolatilní paměť
<b>ESD</b>	Electrostatic discharge, elektrostatický výboj
<b>GND</b>	GrouND, označení zemnicího vodiče
<b>GNU</b>	GNU's Not Unix, projekt zaměřený na svobodný software
<b>GPIO</b>	General-purpose Input/Output, nastavitelná vlastnost pinu na vstup či výstup
<b>GPS</b>	Global Positioning System, globální polohový systém
<b>GSM</b>	Groupe Spécial Mobile, Globální Systém pro mobilní komunikaci
<b>HBUS</b>	speciální druh sběrnice pro komunikaci mezi jednotkami a rozšiřujícími moduly firmy Solar Monitor
<b>HID</b>	Human Interface Device, zařízení pro komunikaci uživatele s PC
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Internal-Integrated-Circuit, komunikační sběrnice mezi dvěma integrovanými obvody
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment, integrované vývojové prostředí
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific and Medical, frekvenční pásmo určené pro průmyslové, vědecké a lékařské účely
<b>JTAG</b>	Joint Test Action Group, způsob pro testování a programování mikroprocesorů a pamětí
<b>JSC</b>	druh koaxiálního konektoru
<b>LDO</b>	Low-Drop-Out regulator, lineární regulátor napětí

<b>LED</b>	Light-Emitting Diode, polovodičová elektronická součástka vyzařující světlo
<b>M-BUS</b>	Meter Bus, průmyslový komunikační protokol určený pro dálkový odečet hodnot z měřičů spotřeby
<b>MCU</b>	Micro Controller Unit, jiný význam pro mikrokontrolér
<b>OS</b>	Operating System, zkratka pro operační systém
<b>OTA</b>	Over-the-air, programování neboli poslání kódu bezdrátově do cíleného zařízení
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board, jiné označení pro desku plošného spoje
<b>QFN</b>	Quad Flat No-leads package, druh pouzdra integrovaného obvodu
<b>RAM</b>	Random-Access Memory, paměť určená ke čtení a zápisu, po vypnutí napájení ztrácí data
<b>RF</b>	Radio Frequency, rádiová frekvence
<b>RP-SMA</b>	Reverse-Polarity SubMiniature version A, druh koaxiálního konektoru s opačnou polaritou
<b>RTC</b>	Real-Time Clock, hodiny reálného času
<b>RS232</b>	typ rozhraní sériové komunikace
<b>RS422</b>	typ rozhraní sériové komunikace
<b>RS485</b>	typ rozhraní sériové komunikace
<b>S0</b>	druh vstupu pro měření spotřeby
<b>SM2-RM</b>	druh modulu firmy Solar Monitor umožňující odečty měřidel
<b>SMA</b>	SubMiniature version A, druh koaxiálního konektoru
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface, sériové rozhraní mezi dvěma integrovanými obvody
<b>SRAM</b>	Static Random Access Memory, druh paměti RAM, nepotřebuje periodickou obnovu dat
<b>SRD</b>	Short Range Devices, zařízení krátkého dosahu
<b>STM</b>	STMicroelectronics, zkrácený název firmy STMicroelectronics
<b>SWD</b>	Serial Wire Debug, dvou vodičové programovací rozhraní
<b>TI</b>	Texas Instruments, zkrácený název firmy Texas Instruments
<b>TI-RTOS</b>	Texas Instruments-Real Time Operating System, operační systém firmy Texas Instruments
<b>ULP</b>	Ultra-Low-Power, extrémně nízká spotřeba
<b>USB</b>	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
<b>USON</b>	Ultra-Thin Small Outline No-lead Package, druh pouzdra integrovaného obvodu

# 1 Úvod

Snaha o bezdrátový přenos informace zde byla už od nepaměti. Přes různé kouřové a světelné signály, poštovní holuby, praporovou signalizaci atd. se nakonec přešlo až k radiové komunikaci. Za jednoho z prvních zakladatelů této moderní komunikace je považován italský inženýr elektrotechniky Guglielmo Marconi, který v roce 1896 začal realizovat své první pokusy s drátovou anténou připevněnou na létajícím draku.

Bezdrátová komunikace se v dnešní době provozuje pomocí nejrůznějších komerčních technologií a standardů v ISM pásmu (např. Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, 3G, GSM, GPS a tak podobně). Dalším řešením je použití bezdrátových modulů v pásmu volných frekvencí (434, 868, 915 MHz atd.), tedy bez licence. Bezlicenční pásma jsou určena lokálně, ne celosvětově. V České republice tyto frekvence vymezuje Český telekomunikační úřad. Na trhu lze nalézt spousty radiových modulů, které využívají frekvenční kódování k bezdrátovému přenosu dat.

Cílem této diplomové práce je vybrat a použít tzv. Sub-1 GHz moduly (moduly s frekvencí do jednoho gigahertzu) z aktuálního trhu, které mají za úkol přenášet informaci o stavu pulzů na výstupu z elektroměru, vodoměru, plynoměru a tak podobně. Kvůli možnosti použití zařízení i v takových místech, kde není dostupná elektrická síť, musí být vysílač pulzů napájen pouze z baterie či akumulátoru. Do jednotlivých mikroprocesorů, propojených pomocí SPI komunikace s vysílacím čipem postupně naprogramovat a nahrát kód vytvořený v programovacím jazyku C. Dále vybrat taková vývojová prostředí pro tvorbu softwaru, která nejlépe splňují důležitá kritéria (např. dostupnost, efektivnost, spolehlivost, uživatelskou přívětivost, doporučení výrobce MCU a tak dále). Následně testovat dané moduly z hlediska přenosu dat na určitou vzdálenost, spotřeby či výkonu vysílače, spolehlivosti při měření pulzů apod. Na základě těchto kritérií a výsledků vybrat nejvhodnější řídicí mikroprocesor s RF čipem, typ antény, velikost kapacity a typ baterie na straně vysílače a různé další komponenty pro vysílací a přijímací modul. Posledním bodem této práce je navrhnout plošný spoj pro oba dva moduly tak, aby se vešly do předem určených plastových krabiček vybraných firmou Solar Monitor. Speciální krabičky totiž zajišťují snadnou konektivitu mezi ostatními moduly od této firmy.

## 2 Frekvenční pásma v ČR

Firma Solar Monitor s.r.o., která byla založena v roce 1994, se zabývá vývojem modulárního systému pro fotovoltaické a větrné elektrárny. Jedním z mnoha modulů je řešení, které odesílá informace pomocí SMS zprávy díky GSM modemu. V tom případě vzniká i potřeba SIM karty v daném modulu. Přenos informace pomocí bezdrátového řešení se dá uskutečnit i jiným způsobem, a to pomocí RF modulů, které fungují na různých frekvencích. Pro výběr a testování příslušných řešení s radiovým čipem bylo nejprve zapotřebí vybrat takové frekvenční pásmo, ve kterém je přenášená informace nejméně rušena. Díky předchozím firemním měřením na elektrárně bylo ISM pásmo 433 MHz nedoporučováno, kvůli výraznému rušení. Důraz byl též kladen na použití volné frekvence z tzv. decimetrového pásma tzn. od 300 do 3 Ghz.

### 2.1 ISM pásma

Pásma ISM (industrial, scientific and medical) jsou volná pásma pro užití v průmyslovém, vědeckém a zdravotnickém oboru, ve kterých lze provozovat přenos informace pomocí předem homologovaného, tzn. předem schváleného, zařízení, a to bez licenčních poplatků. Neplatí ale žádná garance proti rušení v daném ISM pásmu. Tato zařízení dále podléhají generálním licencím, které vydává Český telekomunikační úřad, který vydal takzvané všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. Mezi komerční využití v ISM pásmech patří Bluetooth s frekvencí 2450 MHz a IEEE 802.11/Wifi s frekvencí 2450 MHz a 5800 MHz.

Pokud by došlo k omezení pouze na frekvenční oblast decimetrového pásma, můžeme v tabulce 2.1 vidět dvě ISM pásma, která lze využít v České republice.

432 - 438 MHz	Necivilní využití	Amatérské vysílání	Nespecifikované SRD	ISM	Družicové amatérské vysílání	Radiolokace (civilní)	Aktivní čidla (na družicích)
862 - 890 MHz	RFID (SRD)	Nespecifikované SRD	Bezdrátový přenos zvuku (SRD)	Poplachová SRD	Mobilní sítě	GSM-R	



2300 - 2450 MHz	Ama- térské vysí- lání	RFID (SRD)	SRD pro ra- diové určování	SRD pro tele- ma- tiku	Nes- pecifí- kova- né SRD	ISM	Družico- vé ama- térské vysí- lání	Rada- ry GPR/ WPR- (SRD)	SAP/ SAB	Letecká tele- met- rie	Širo- kopás- mový přenos dat
-----------------	---------------------------------	---------------	----------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	-----	---------------------------------------------------	--------------------------------------	-------------	---------------------------------	------------------------------------------

Tabulka 2.1: ISM pásma v ČR (převzato z [1])

## 2.2 Zařízení krátkého dosahu

Zařízení, často pojmenované jako SRD (Short Range Device), je konkrétní zařízení, které lze provozovat pouze v určitém pásmu a musí splňovat určité vlastnosti. Tato vymezení stanovuje Český telekomunikační úřad, který vydal takzvané všeobecné oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13. Článek 3 nese název *Konkrétní podmínky pro nespecifikované stanice krátkého dosahu* a je určen pro zařízení, bez ohledu na použití nebo účel. Pozornost byla soustředěna pouze na označení *g*, *g1*, *g2*, *h*, *h1*, *h2*, *h3*, *h4*, *h5*, *h6*, *h7* a *i* z frekvenčního rozsahu od cca 433 MHz do cca 2,5 GHz z tabulky v tomto článku. Figurovaly zde další údaje např.:

- vyzářený výkon, popřípadě intenzita magnetického pole - z anglického *effective radiated power* (proto zkratka e.r.p.) je údaj, který vyjadřuje vyzářený výkon vysílací anténou, včetně jeho zisku, jeho jednotkou je Watt,
- kanálová rozteč - vzdálenost mezi jednotlivými kanály v jednotkách Hertzů,
- klíčovací poměr - *duty cycle* je podíl času, kdy zařízení aktivně vysílá, v rámci jakékoliv jedné hodiny.

Nachází se zde řada dalších doplňujících odstavců a poznámek, které přesně vymezují použití těchto zařízení. Úplnou verzi je možno shlédnout v přiložené literatuře, viz [2].

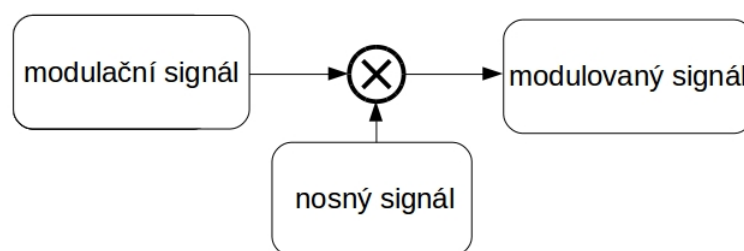
## 2.3 Modulace

Přenos informace na dálku probíhá pomocí takzvané modulace, to znamená, že se potřebná informace zakóduje do elektromagnetické vlny o vyšší frekvenci, než je obsažena v této informaci, viz obrázek 2.1.

Signál, který je potřeba zakódovat, nese název *modulační signál*. Ten pak dále vstupuje s tzv. *nosným signálem* do elektronického zařízení, které se nazývá *modulátor*. Tento elektronický obvod lze shlédnout na obrázku 2.1, který zde vyjadřuje kruh s křížkem uprostřed. Výsledkem je požadovaný *modulovaný signál*. Modulace se dále dělí na analogovou a digitální.

### 2.3.1 Analogová modulace

V prostředí, kde se modulační a nosné signály šíří spojitě, lze uplatnit pouze analogovou modulaci. Pak evidentně musí platit rovnice harmonické vlny ve tvaru:



Obrázek 2.1: Modulace

$$y = A \cdot \sin(\Omega t + \phi)$$

kde  $A$  ... značí amplitudu,  $\Omega$  ... úhlovou frekvenci,  $\phi$  ... fázový posuv

Podle potřeby zakódování signálu lze rozdělit spojité modulace do tří druhů:

- Amplitudová modulace
  - nedochází ke změně fáze ani frekvence,
  - modulační signál ovlivňuje pouze amplitudu nosné vlny,
  - nejstarší druh modulace.
- Frekvenční modulace
  - amplituda nosného signálu zůstává konstantní,
  - kmitočet modulovaného signálu se zvyšuje v kladném průběhu nosné vlny,
  - kmitočet modulovaného signálu se snižuje v záporném průběhu nosné vlny.
- Fázová modulace
  - modulačním signálem je měněna fáze nosné vlny,
  - amplituda nosné vlny zůstává stejná,
  - se změnou fáze se mění i frekvence nosné vlny,
  - fázovou modulací nelze stejnosměrnou složku signálu přenést.

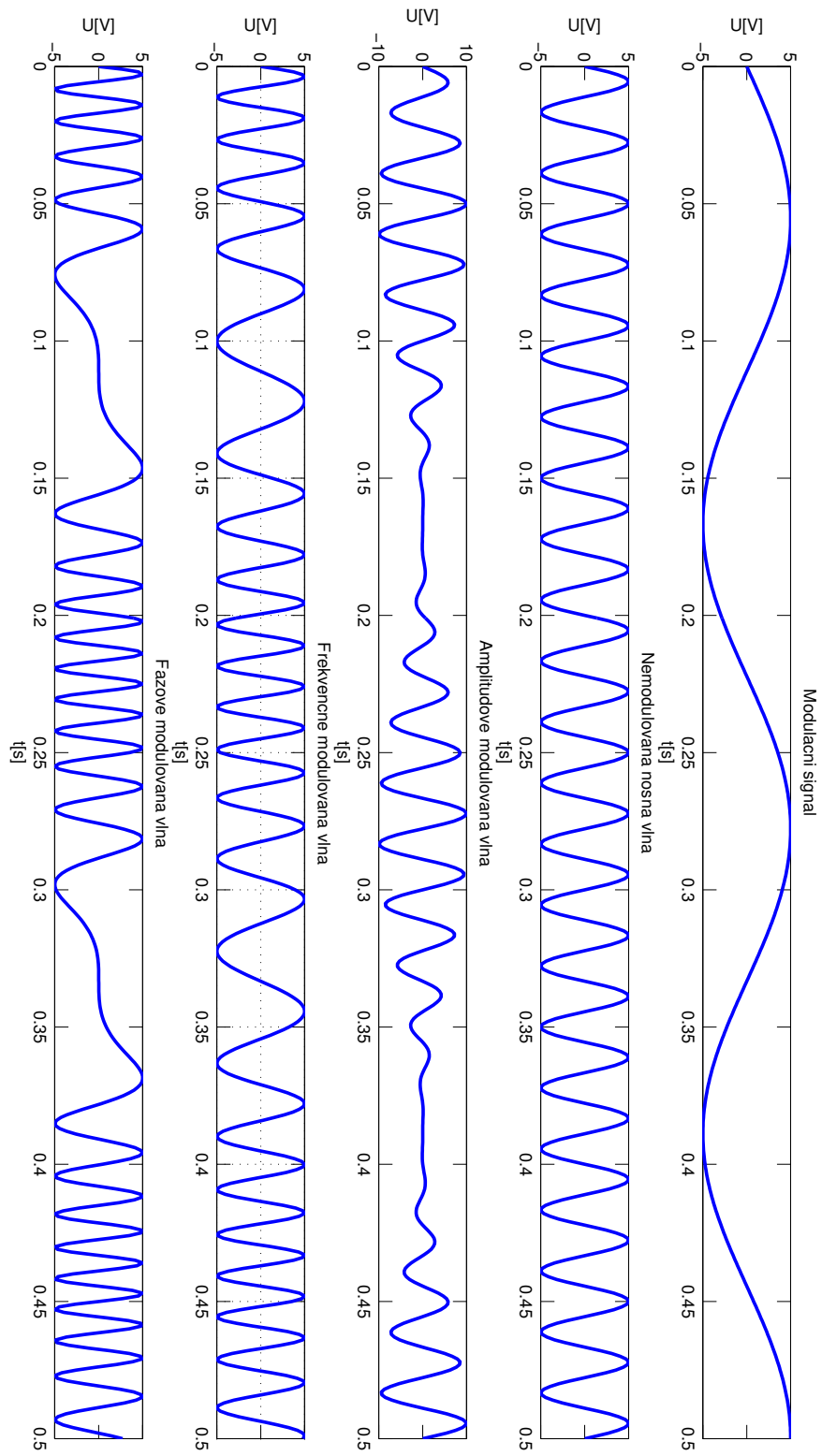
### 2.3.2 Digitální modulace

Kromě analogových modulací existují další možnosti jak zakódovat informaci, a to digitálně. Nosná vlna je sice pořád analogová a spojitá, ale modulační signál se již šíří diskrétně. Digitální modulaci se často říká tzv. klíčování. Jedná se o přenos vzorkovaného signálu s předem definovaným počtem stavů. Stejně jako u analogové

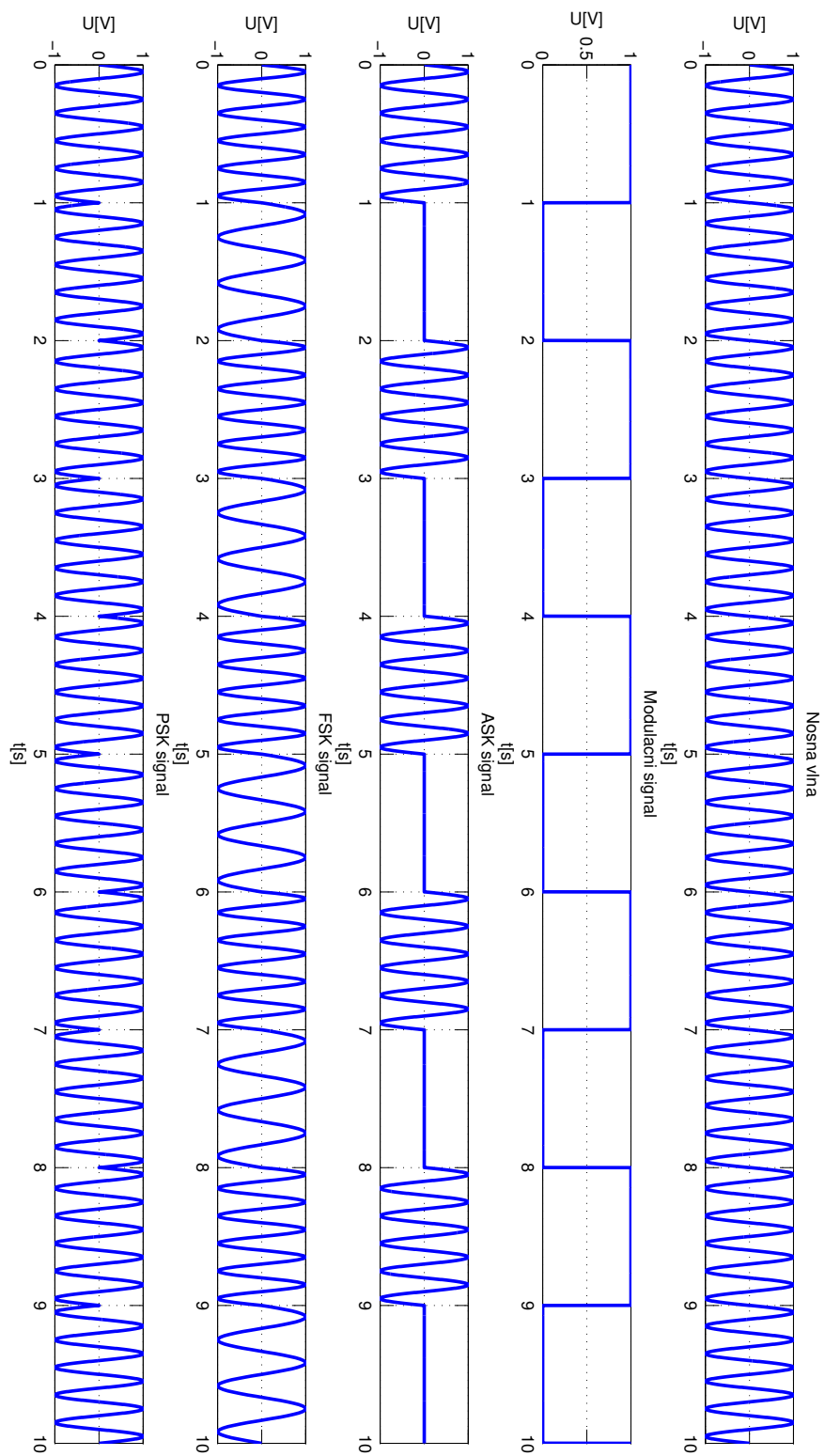
modulace lze upravovat amplitudu, frekvenci a fázi, tak se dají tyto složky měnit i digitálně. Mezi základní druhy patří:

- ASK – (Amplitude-Shift Keying) - amplitudové klíčování
  - digitální obdoba amplitudové modulace,
  - jednoduchá a častá forma ASK se nazývá dvoustavová (binární modulace) anglicky OOK - (On-Off Keying).
- FSK – (Frequency-Shift Keying) - frekvenční klíčování
  - digitální obdoba frekvenční modulace,
  - binární forma FSK se nazývá BFSK - (Binary FSK),
  - speciální forma FSK má název MSK - (Minimum-Shift Keying)
  - variantou MSK je GMSK - (Gaussian MSK) - Gaussova MSK,
  - GFSK - (Gaussian Frequency-Shift Keying) - Gaussova FSK.
- PSK – (Phase-Shift Keying) - fázové klíčování
  - digitální obdoba fázové modulace,
  - BPSK – (Binary Phase Shift Keying) dvoustavová - binární forma PSK,
  - QPSK – (Quadrature Phase Shift Keying) čtyřstavová, 8PSK, 16PSK (vícestavové) - kvadrurní fázové klíčování.

Existuje celá řada dalších modulací, které mohou být i různě kombinované mezi sebou. Digitální klíčování využívají právě RF moduly, které pomocí modulací přenášejí informaci na stovky metrů daleko.



Obrázek 2.2: Druhy analogových modulací



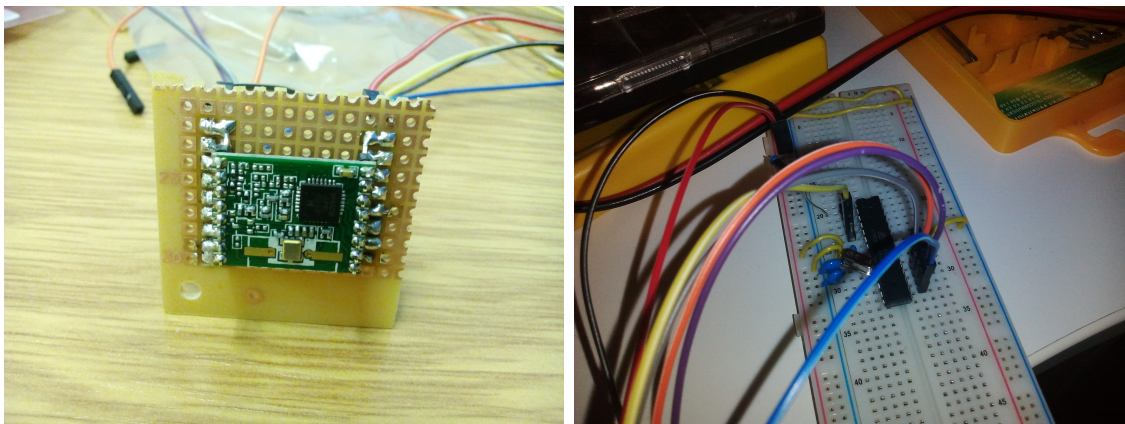
Obrázek 2.3: Druhy digitálních modulací

## 3 Řešení s mikrokontroléry architektury AVR

Prvními testovanými bezdrátovými moduly, firmou Solar Monitor s.r.o., byly MTX2 a MRX1 [6] od firmy Flajzar. Tato zařízení pracovala na frekvenci 868 MHz s FSK modulací. Dosah ve volném prostoru činil s anténou více než 300 metrů. Vysílač MTX2 obsahoval sice držák baterie pro třívoltovou baterii CR2032, ale celková doba testování, pouze s tímto zdrojem, nepřekročila dvacet jedna dní nepřetržitého provozu. Proto byl vymyšlen nový projekt, který se začal zabývat vývojem lepšího řešení.

### 3.1 Popis hardwaru s AVR

V první vlně vývoje došlo k testování přenosu bezdrátové informace na řídicích mikrokontrolérech AVR spolu s platformou Arduino [5], kterou lze na těchto procesorech uplatnit. Po shlédnutí několika hotových řešení (např. JeeNode, Split, Moteino, atd.) byl vybrán mikrokontrolér ATmega328P spolu s RF modulem RFM69HW.



Obrázek 3.1: RF69HCW + ATmega328P na univerzální DPS

ATmega328 disponoval těmito důležitými parametry (viz také [7]):

- napájecí napětí od 1,8 V do 5,5 V,
- 23 programovatelných I/O pinů,
- 32KBytes of In-System Self-Programmable Flash programovací paměť,

- 1KBytes EEPROM,
- 2KBytes Internal SRAM,
- časovač - Real Time Counter,
- SPI rozhraní pro propojení s RF modulem,
- šest módů pro šetření energie - Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby a Extended Standby.

Druhý komponent RFM69 se vyráběl v těchto třech variantách [8], [9] a [10], a to:

- RF69HW - high power - možnost nastavení vyššího vysílacího výkonu,
- RF69CW - compatible with RFM12 - kompatibilní pinout s RFM12,
- RF69HCW - compatible high power - obě předchozí varianty spojené dohromady.

Mezi jeho jednotlivé vlastnosti patřily:

- frekvenční pásmo: 290 - 340 MHz, 424 - 510 MHz, 862 - 890 MHz, 890 - 1020 MHz,
- RF modulace: FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK,
- rychlost přenosu dat od 1,2 do 300 kbps,
- spotřeba max. 16 mA při příjmu,
- programovatelná šířka kanálu od 2,6 kHz do 500 kHz,
- programovatelné výstupní zesílení do +20 dBm,
- integrovaný senzor teploty,
- AES 255-bitové šifrování,
- wireless M-BUS.

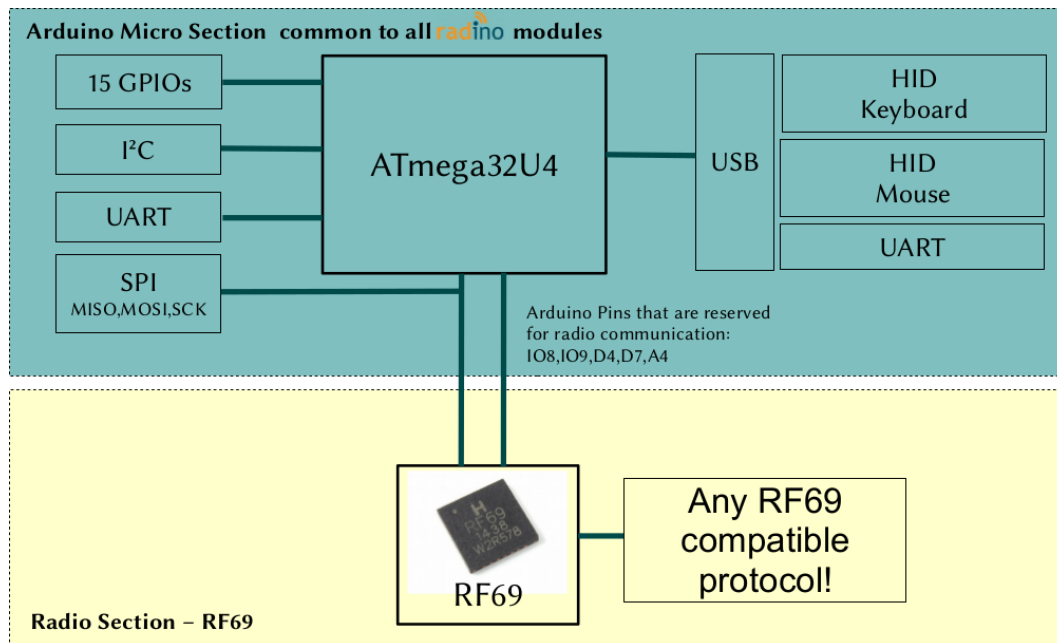
Mezi jednotlivými údaji nebyl záměrně uveden vysílací výkon, ten je totiž u tohoto integrovaného obvodu nastavitelný, jak lze vidět v tabulce 3.1.

Výstupní zesílení a povolené piny	Min. odběr proudu	Typ. odběr proudu	Max. odběr proudu	Jednotky
RFOP = +20 dBm, on PA BOOST	-	130	-	mA
RFOP = +17 dBm, on PA BOOST	-	95	-	mA
RFOP = +13 dBm, on RFIO pin	-	45	-	mA
RFOP = +10 dBm, on RFIO pin	-	33	-	mA
RFOP = 0 dBm, on RFIO pin	-	20	-	mA
RFOP = -1 dBm, on RFIO pin	-	16	-	mA

Tabulka 3.1: Výstupní zesílení RF modulu RF69HW (převzato z [8])

### 3.1.1 Radino HW

Díky celkové spotřebě vysílacího modulu (RF69HW + ATmega328P) bylo dále rozhodnuto o koupi dalších již hotových testovacích modulů, tentokrát od německé firmy In-Circuit GmbH. Zkušební dvojici řešení představovala radina RF69 868 MHz z výroby připevněná na speciálním a rozšiřujícím hardwaru radino Spider RP-SMA. Radino RF69 je označení pro mikrokontrolér ATmega32U4, který je pomocí SPI sběrnice a pěti I/O pinů propojen s RF modulem stejným jako v prvním případě, a to RF69HW viz obr. 3.2.



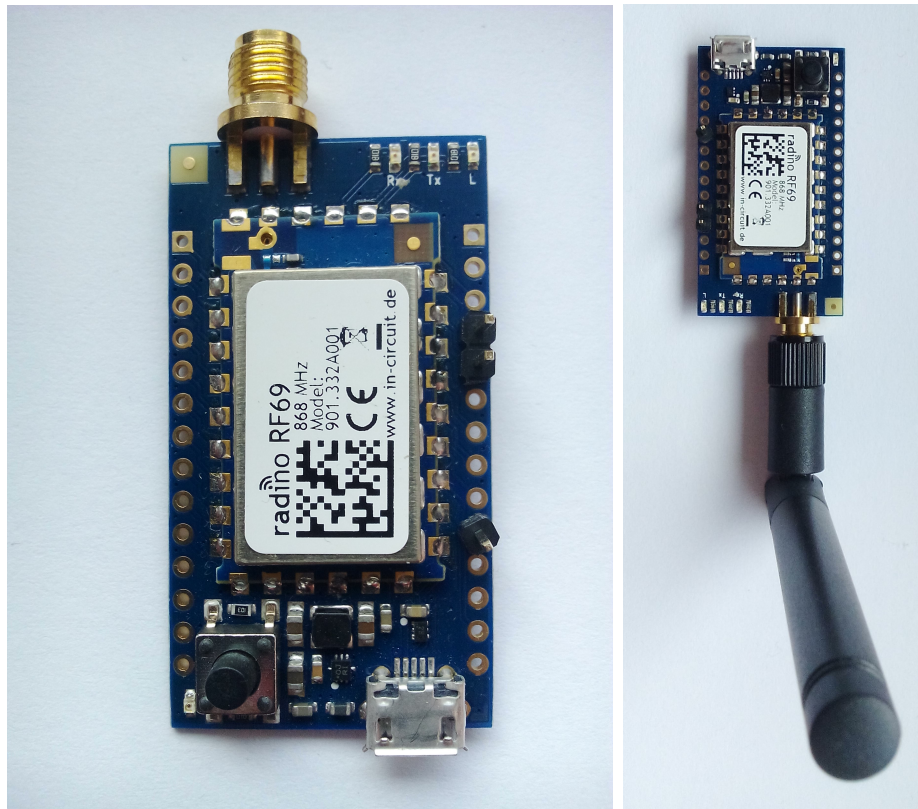
Obrázek 3.2: RF69 vnitřní propojení (převzato z [12])

Toto řešení, připraveno na hotovém plošném spoji, je z velké části zakryto stíněním, které lze vidět na obrázku 3.3. Radino RF69 868 MHz disponuje těmito hlavními parametry:

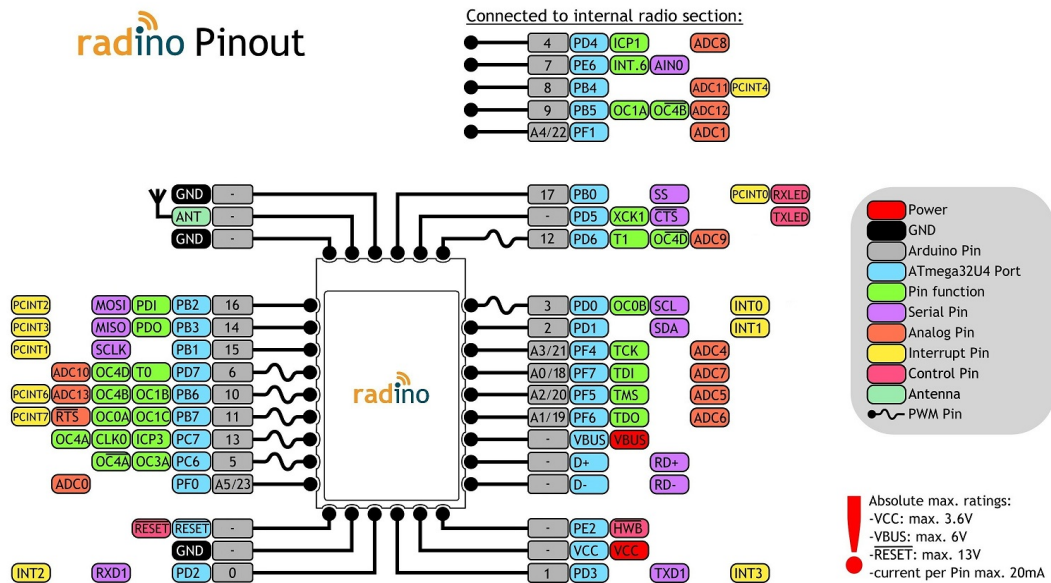
- 15 programovatelných I/O pinů,
- sběrnice I²C, SPI, UART, USB (HID Keyboard & Mouse, virtual UART),
- šest módů pro šetření energie - Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby a Extended Standby.

Komplexnější pohled na celkové využití jednotlivých pinů radina nabízí obrázek 3.4. Radino Spider modul velice usnadňuje programování modulu RF69 pomocí osazení micro-USB konektoru. Dále také umožňuje externí připojení antény.





Obrázek 3.3: Radino RF69 na Spider boardu



radino.cc



Obrázek 3.4: Radino RF69 pinout (převzato z [12])

Do seznamu celkových výhod tedy patří:

- RP-SMA konektor (reverse polarity subminiature version A),
- Micro-USB konektor,
- resetovací tlačítko,
- Arduino-LED diody pro RX a TX signály,
- napěťový regulátor na 3,3 V,
- LED signalizační dioda pro přítomnost napájení.

K radino modulům byly také přikoupeny antény 2JW031-868, které disponovaly propustným pásmem pro frekvenci 868 Mhz. Detailní charakteristiky lze shlédnout v příložené dokumentaci (viz [16]).

### 3.1.2 Anarduino HW

Posledním testovaným řešením z AVR rodiny od firmy ATMEL bylo Anarduino. Tento vývojový plošný spoj používal jako řídicí mikrokontrolér ATmega328P [7]. K tomuto hlavnímu procesoru byl připojen bezdrátový modul, který se volil z více než patnácti továrně nastavitelných druhů. Anarduino tak činilo jednoho z nejlepších kandidátů na kvalitní výsledek v této kategorii i z hlediska ultra úsporného provozu. Na plošném spoji byly dále obsaženy tyto dvě důležité komponenty:

- externí paměť - SPI FLASH 128 Mbit (16 Mbyte) - S25FL127S [17] od firmy Cypress Semiconductor Corporation,
- externí RTC - MCP7940N [18] od firmy Microchip Technology Inc.

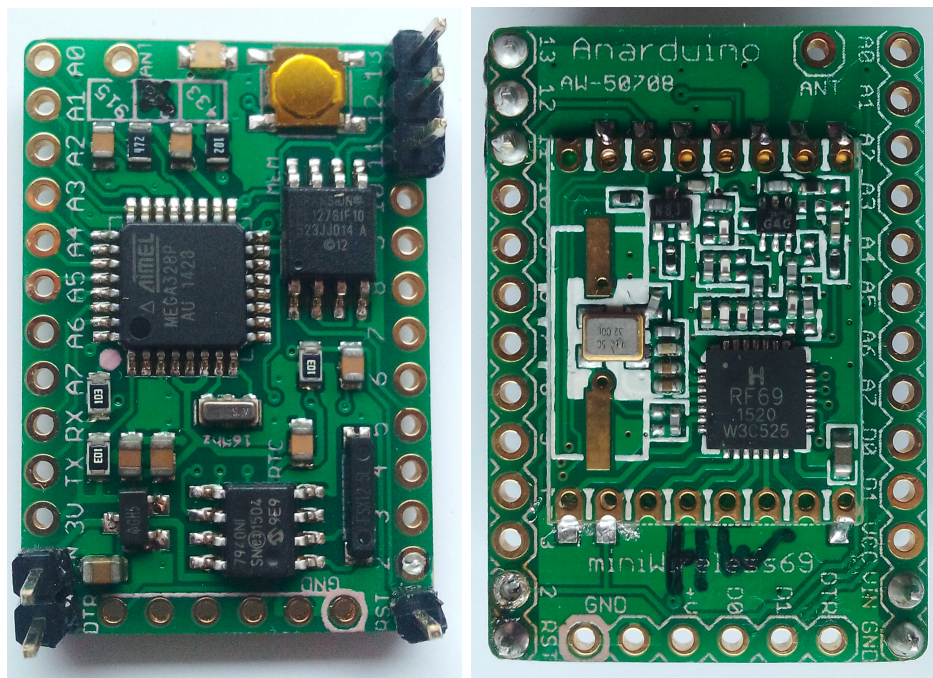
Kdyby došlo k přehrání firmwaru bezdrátově (pomocí OTA), mohla by být novější verze uložena právě v této SPI FLASH paměti. Další výhoda, v podobě externího a velice úsporného real time obvodu, by napomáhala k hlubšímu spaní mikrokontroléru ATmega328P. Ten by byl právě tímto čipem, po předem naprogramované době, probuzen. Externí paměť podle datasheetu disponovala těmito parametry:

- napájecí napětí od 2,7 V do 3,6 V,
- spotřeba proudu 70  $\mu\text{A}$  ve standby režimu.

RTC obvod vlastnil tyto hodnoty:

- napájecí napětí od 1,8 V do 5,5 V,
- spotřeba proudu při napájení z  $V_{cc} = 1,2 \mu\text{A}$ ,
- spotřeba proudu na záložní baterii při 3,0 V = 925 nA,
- rozhraní I<sup>2</sup>C.

Jak lze vidět z obrázku 3.5, Anarduino bylo objednáno 1x s bezdrátovým modulem RF69W pro příjem a 1x s RF čipem RF69HW pro vysílání kvůli možnosti nastavení vyzařovaného výkonu (více o modulech v literatuře [8], [9] a [10]). Stejně jako radino, tak i plošný spoj Anarduina měl po obvodu vyvedeny jednotlivé I/O piny (viz obrázek 3.5), kde je každý z nich jednotlivě popsán.



Obrázek 3.5: Řešení Anarduino

## 3.2 Programování a software Arduino

Všechna AVR řešení, představená v předchozí kapitole 3.1, byla též vyzkoušena jak na operačním systému Windows, tak na operačním systému Linux. Konkrétně Windows XP a Linux Ubuntu.

Mikrokontroléry byly programovány ve vývojovém prostředí Arduino IDE, ve kterém již došlo k programování firmwaru v bakalářské práci s názvem *Modul pro podporu procesorů z řady AVR na existujícím výukovém přípravku* [19].

První řešení s vysílačem, které bylo zapojeno na nepájivém poli (viz kapitola 3.1), obsahovalo pouze nezbytné komponenty pro správnou funkci mikrokontroléru ATmega328p a bezdrátového modulu RF69HW. Na straně přijímací byl použit stejný mikrokontrolér, ale odlišný RF modul, a to RF69W.

Programátor, který byl použit pro toto řešení, se nazýval AVR Prog USB v2. Jeho podrobný popis a instalace pro OS Windows proběhla v již zmíněné bakalářské práci [19]. V této diplomové práci však poprvé došlo k jeho propojení s operačním systémem Linux, konkrétně Linux Ubuntu 16.04 LTS. Jelikož programátor pracoval v režimu HID, bylo potřeba použít software AVRdude pro nahrání firmwaru do mikrokontroléru. Pomocí tří příkazů v terminálu proběhla instalace programu:

- `sudo add-apt-repository ppa:pmjdebruijn/avrdude-release`
- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get install avrdude`

Poté došlo k testu propojení mezi čipem ATmega328P a notebookem. Z počítače vedl USB kabel přímo do programátoru, který byl připojen k mikrokontroléru pomocí SPI rozhraní. Po zadání příkazu `sudo avrdude -c stk500v2 -p m328p -P avrdoper -v` v terminálu se podrobně zobrazily veškeré údaje. Mezi jedním z mnoha údajů figurovalo také číslo mikrokontroléru a stav jeho pojistek viz 3.6.

```
avrdude: AVR device initialized and ready to accept instructions

Reading | ##### | 100% 0.01s

avrdude: Device signature = 0x1e950f (probably m328p)
avrdude: safemode: hfuse reads as DA
avrdude: safemode: efuse reads as FD

avrdude: safemode: hfuse reads as DA
avrdude: safemode: efuse reads as FD
avrdude: safemode: Fuses OK (E:FD, H:DA, L:FF)

avrdude done. Thank you.
```

Obrázek 3.6: AVRDUde v terminálu

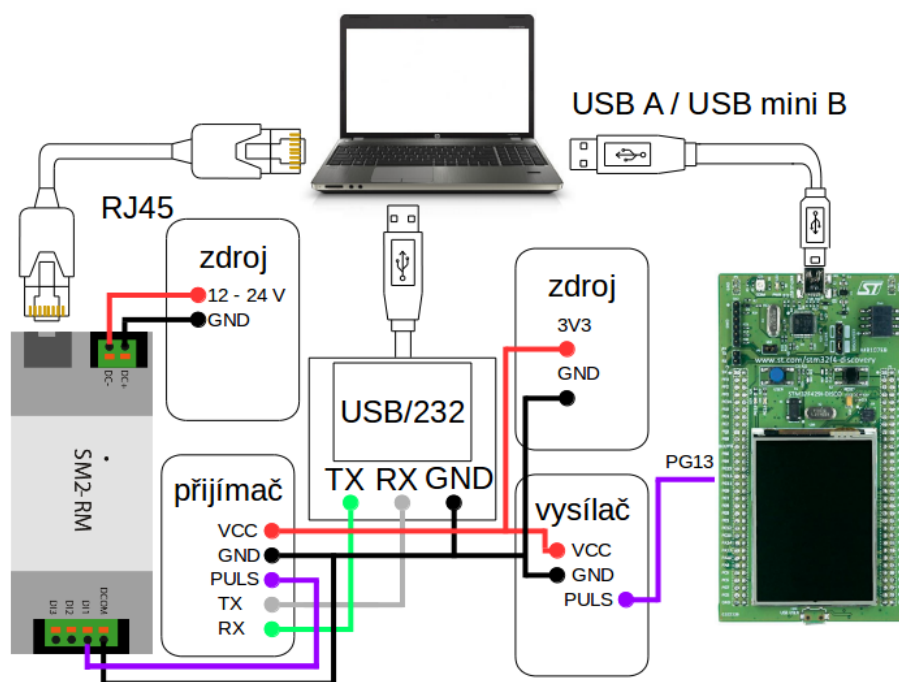
Software, pro řešení radino RF69 osazené na radino Spider RP-SMA (viz kapitola 3.1), bylo nejprve potřeba trochu upravit pro správnou funkci těchto modulů. Nejprve došlo ke stažení a instalaci podpůrných souborů do vývojového prostředí Arduino IDE. Firma In-Circuit GmbH, která radino moduly vyrábí, sepsala postup této instalace přímo do datasheetu bezdrátového modulu (viz str. 10 v [12]) tak, že po následování jednotlivých kroků vše správně fungovalo.

Pak už nic nebránilo tomu, aby se začal vytvářet program pro komunikaci mezi vysílačem a přijímačem. Protože se počítalo s tím, že přijímací modul bude vždy připojen ke stabilnímu napájecímu zdroji, odpadlo tak tedy uspávání mikrokontroléru. Přijímač stále čekal na příchozí zprávy od vysílače, ve kterých byl údaj o počtu pulzů z S0 vstupu vysílače [21]. Tyto pulzy se dále preposílaly pomocí sběrnice UART. Pro sledování aktuálního stavu pulzů v internetovém prohlížeči byl pin 4 vysílacího modulu naprogramován jako výstupní, aby simuloval příchozí pulzy na vstup monitorovací jednotky SM2-RM [22], [23]).

Ze strany vysílače byl kód poněkud složitější. Nejprve se muselo nastavit přerušování mikrokontroléru na sestupnou hranu signálu. Poté určit počet hran, po kterých se bude odesílat zpráva ohledně počtu pulzů. Následně správně uspat mikrokontrolér tak, aby se dokázal probudit na hranu signálu.

Aby byl údaj o počtu pulzů z elektroměru pro testovací účely přesný a nemusela se kvůli testování zbytečně plýtvat energie, došlo k simulaci S0 vstupu pomocí vývojového kitu STM32F429I-DISCO [24] od firmy STMicroelectronics. Na této desce byl nastaven pin PG13, který stále generoval předem naprogramovaný pulz stejné střídy. Celou tuto problematiku lze pro lepší představu pozorovat na obrázku 3.7.

Vysílací modul byl nejprve testován na konstantním napájecím zdroji. Nutno dodat, že také došlo k vypájení zenerovy diody, která bránila průstupu pulzu menší napěťové hodnoty než 7,6 V. Tato dioda byla nahrazena rezistorem s nulovou hod-



Obrázek 3.7: Testovací schéma zapojení

notou elektrického odporu.

Pro řešení na nepájivém poli a radino moduly byl vyvinut velice podobný kód jak pro přijímač, tak pro vysílač. Jediná odlišnost, mezi řešením na nepájivém poli a radinem, lze pozorovat na obrázku B.1 a B.2, kde došlo k odlišnému nastavení v knihovně *RTC69.h*, a to v inicializaci jednotlivých pinů na SPI sběrnici a pinu přerušení. Celkový software, pro přijímací a vysílací modul, byl pro lepší představu uskupen do blokového diagramu, viz A.1 a A.2.

Při průběhu tohoto softwaru šlo velice dobře měřit spotřebu vysílače a dosah u obou řešení. Pro jednoduchost byly tyto údaje zařazeny do tabulky 3.2.

Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
řešení na nepájivém poli - při vysílání	28,9	mA
řešení na nepájivém poli - sleep mode	20,2	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
řešení na nepájivém poli - dosah	cca 50	m
radino - dosah s anténami	cca 150	m

Tabulka 3.2: Spotřeba a dosah radino modulů spolu s řešením na nepájivém poli

Řešení Arduino bylo trochu odlišné. Jelikož plošný spoj obsahoval již zmiňovaný RTC obvod, dal se hlavní MCU budit pomocí přerušení učeného pinu z tohoto obvodu. Dále tu byla možnost vysílat i čas. Výhoda spočívala například v odhalení delšího přenosu (např. kvůli momentální nedosažitelnosti přijímače). Vývojové

prostředí i programování Anarduina bylo shodné s řešením na nepájivém poli, tudíž mohl být rovnou tvořen software. Pro jednodušší pochopení a vysvětlení lze shlédnout zjednodušené blokové schéma A.3 a A.4.

Opět došlo k měření parametrů z hlediska spotřeby a dosahu Anarduino vysílače. Tyto údaje lze pozorovat v následující tabulce.

Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
Anarduino - při vysílání	33,4	mA
Anarduino - při příjmu	26,9	mA
Anarduino - sleep mode	24	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
Anarduino - dosah	cca 50	m
Anarduino - dosah s externí anténou	cca 150	m

Tabulka 3.3: Spotřeba a dosah řešení Anarduino

Nakonec byla vyrobena speciální dvojice, kdy vysílací modul, umístěný ve speciálním boxu s S0 vstupem, fungoval pouze na dvou bateriích typu AA s externě vyvedeným anténním konektorem. Pin číslo čtyři přijímacího modulu se připojil, po odpájení několika součástek, přímo na pulzní vstup SM2-RM. Následně došlo k vyvedení externí antény pomocí redukčního kabelu, který byl našroubován do speciálně vyvrtaného otvoru v plastové krabičce, viz obrázek C.1 a C.2.

## 4 STMicronics řešení

Dalším důležitým výrobcem elektroniky, který měl řešení v oblasti bezdrátové komunikace s minimální spotřebou, byla firma STMicronics. Opět došlo k výběru vhodné sady vývojových kitů a k testování klíčových vlastností jako například dosah signálu, spotřeba zařízení v různých režimech, atd.

### 4.1 Popis hardwaru ST

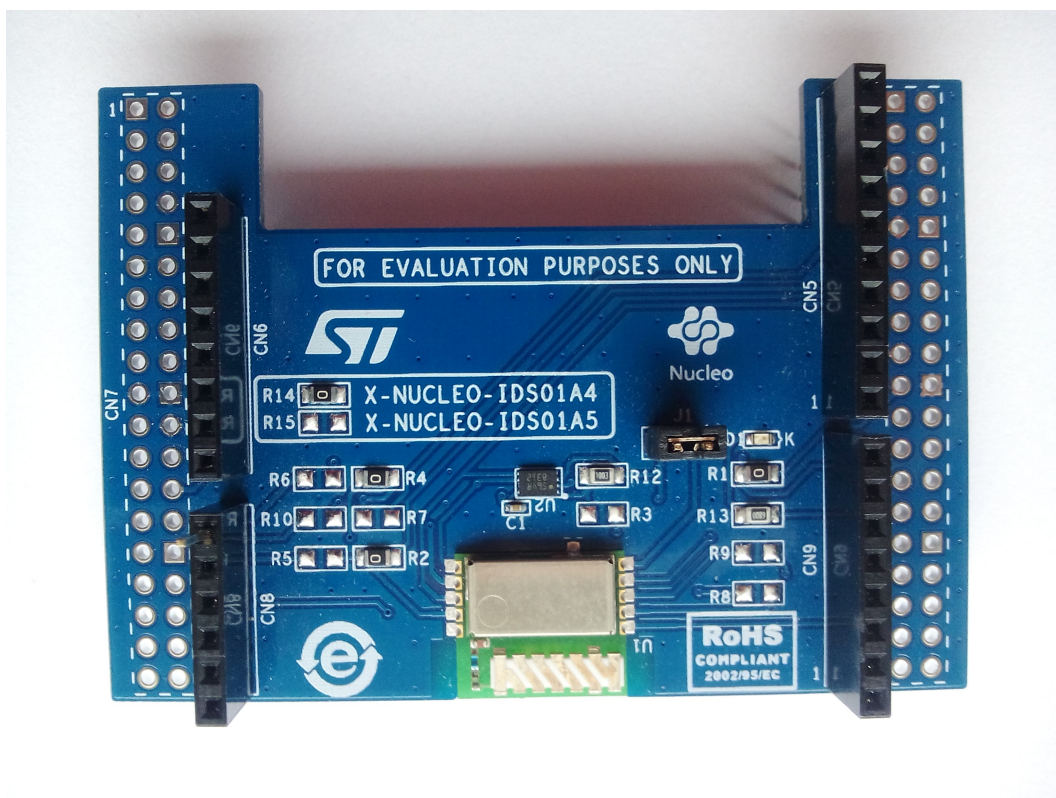
Společnost STM používala pro komunikaci v Sub-1 GHz pásmu RF modul SPIRIT1 [27]. Komunikace s tímto čipem probíhala pomocí SPI rozhraní. Mezi další významné parametry patřilo např.:

- frekvenční pásmo: 150-174 MHz, 300-348 MHz, 387-470 MHz, 779-956 MHz,
- RF Modulace: 2-FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK, ASK,
- rychlost přenosu dat od 1 do 500 kbps,
- spotřeba max. 9 mA při příjmu, 21 mA při vysílání na +11 dBm,
- programovatelná šířka kanálu od 12,5 kHz,
- programovatelné výstupní zesílení do +16 dBm,
- integrovaný senzor teploty,
- indikátor baterie a detektor nízkého napětí na baterii,
- AES 128-bitový šifrovací koprocessor,
- wireless M-BUS.

Pro jednoduché a efektivní otestování RF modulu SPIRIT1 byl vybrán vývojový kit X-NUCLEO-IDS01A4 [28]. Jako vysílač a přijímač bezdrátové informace zde figuroval integrovaný modul pod názvem SPSGRF-868 [29]. Toto zařízení se zelenou nepájivou maskou, obsahovalo filtr a keramickou anténu, umístěnou přímo na plošném spoji, viz obrázek 4.1. Tato vývojová deska dále obsahovala tyto důležité parametry a komponenty:

- propojku J1 pro měření odebíraného proudu,
- paměť EEPROM,

- Arduino UNO R3 konektor,
- výběr frekvence 868 MHz či 915 MHz podle osazení nulového rezistoru R14, R15,
- kompatibilitnost s STM32 Nucleo deskami,
- možnost vrstvení dalších kitů na sebe.



Obrázek 4.1: X-NUCLEO-IDS01A4 s SPSGRF-868

SPIRIT1 je pouze samostatný RF modul bez řídicího mikroprocesoru. Proto musel být vybrán ještě další vývojový kit pro řízení vysílacího integrovaného obvodu. Podle výše zmíněných parametrů X-NUCLEO-IDS01A4 boardu nejlépe splňovaly kompatibilitu desky STM32 Nucleo. Po porovnání z hlediska nízké spotřeby řídicího mikrokontroléru a dalších parametrů, které lze sledovat i na obrázku C a podle předpřipraveného softwaru viz kapitola 4.2, o kterém bude řeč dále, bylo nakonec zvoleno NUCLEO-L053R8. Tento board obsahoval velice úsporný mikrokontrolér STM32L053R8T6 [32], který disponoval následujícími vlastnostmi:

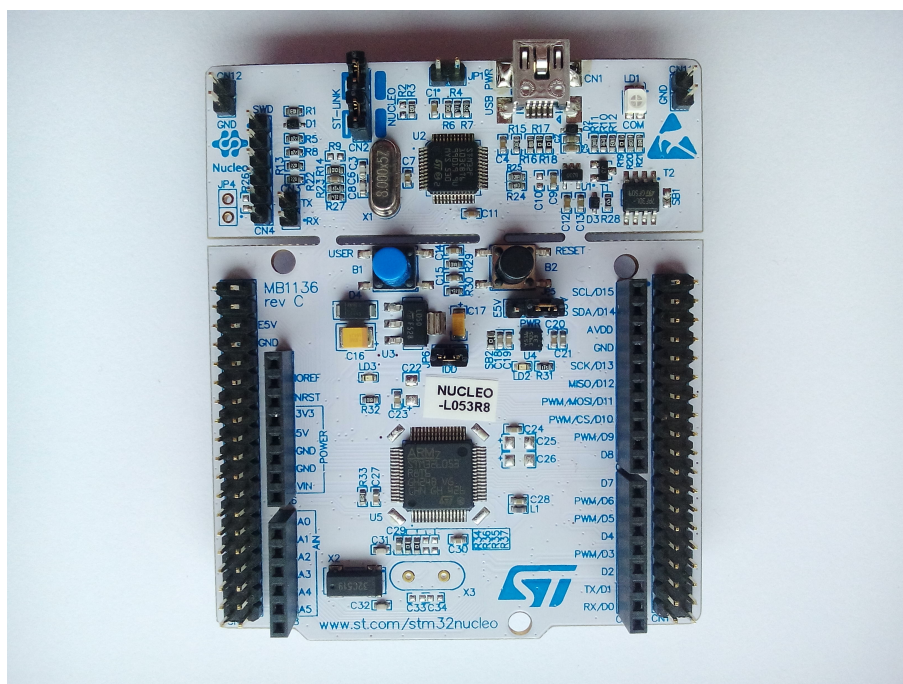
- napájecí napětí od 1,65 V do 3,6 V,
- ARM® 32-bit Cortex®-M0+,
- spotřeba 0,27  $\mu\text{A}$  ve standby režimu, buzení možno pomocí dvou určitých pinů,
- spotřeba 0,4  $\mu\text{A}$  ve stop režimu, buzení pomocí šestnácti způsobů,



- od 1 do 25 MHz krystalový oscilátor,
- 32 kHz oscilátor pro RTC s kalibrací,
- vysokorychlostní interní 16 MHz továrně nastavený RC ( $\pm 1\%$ ),
- až 51 I/O z nichž 45 pinů je 5V tolerantních,
- SWD - Serial Wire Debugování,
- 64 kB paměti FLASH,
- DMA, ADC, SPI, I2C, USART, DAC, časovače.

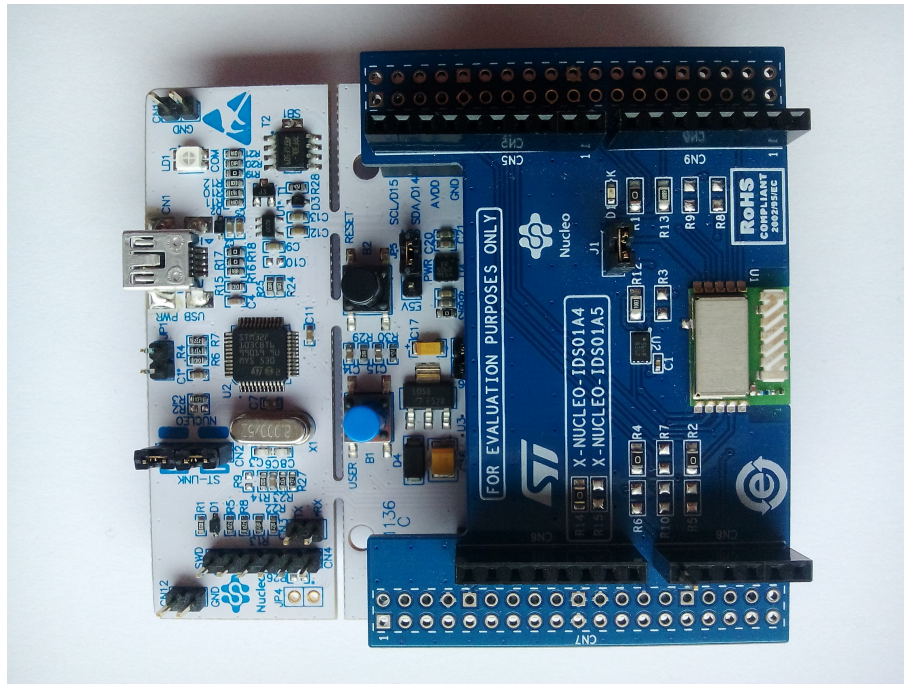
Vývojový kit NUCLEO-L053R8 nabízí tyto speciální komponenty a další možnosti (viz také [31]):

- Arduino™ Uno V3 propojení,
- přístup k STM32 I/O pomocí připravených konektorů,
- ARM® mbed™,
- integrovaný ST-LINK/V2-1 debugger/programátor s SWD konektorem,
- 2 tlačítka - RESET a USER,
- USB mini konektor může sloužit jako: virtuální COM port, debugovací port nebo Mass Storage (paměťové zařízení).



Obrázek 4.2: NUCLEO-L053R8

Po zasunutí X-NUCLEO-IDS01A4 desky do NUCLEO-L053R8 boardu, jak lze vidět na obrázku 4.3, bylo vše připravené na testování vybraného řešení od firmy STMicroelectronics.



Obrázek 4.3: NUCLEO-L053R8 s X-NUCLEO-IDS01A4 boardem

## 4.2 Programování a software ST

Hardware, který byl představen v předešlé kapitole, se též vybíral na základě softwarové podpory. Pro mikrokontrolér STM32L053R8T6 spolu s bezdrátovým vysílačem SPIRIT1 byl totiž vytvořen balíček s ovladači a projekty, který firma STMicroelectronics nabízela na stránkách bezdrátového modulu X-NUCLEO-IDS01A4 pod názvem X-CUBE-SUBG1 [33].

Aby mohl být tento předem připravený projekt z balíčku dále využíván a upravován, došlo k výběru a instalaci vhodného vývojového prostředí. Jeden z takových programů nabízela, zdarma po registraci, komunita OpenSTM32. Program *System Workbench for STM32* bylo možné stáhnout jako samotnou instalaci nebo jako balíček do vývojového prostředí Eclipse. Je také nutno poznamenat, že toto prostředí bylo možné stáhnout pro operační systém Windows, Linux a Mac OS/X. Testování STM řešení proběhlo jen na dvou zmíněných, a to na Windows 7 a Linux Ubuntu 16.04 LTS. Návody, rady a instalace byly velice dobře popsány na stránkách komunity [34].

Po instalaci vývojového prostředí už nic nebránilo importu předpřipraveného projektu pod názvem *P2P demo*, jak lze pozorovat na obrázku č. C.4.

Tento předem připravený projekt uměl odesílat paket dat s předem nastavenými vlastnostmi po stisknutí modrého tlačítka na vývojovém kitu. Ostatní vysvětlení o tomto kódu a další různé možnosti nastavení udával uživatelský manuál (viz příložená literatura [35]), pod označením *UM1904*, který velice usnadnil další testování. Přes jakékoliv další úpravy počátečního projektu musely být zachovány texty v záhlaví a zápatí kódů od firmy STMicroelectronics, jinak by došlo k porušení

autorských práv.

Aby se docílilo podobného výsledku jako u platformy AVR, došlo k přetvoření zmíněného kódu. V první řadě byla snaha o vytvoření programu pro vysílač, který by se budil na hranu signálu a po nějaké době odeslal data přijímači. Jelikož signál vedoucí k modrému tlačítku byl již naprogramován jako přerušení na sestupnou hranu a zároveň dokázal probudit mikrokontrolér ze spánku, stačilo pouze nastavit interní RTC obvod tak, aby též dokázal probudit hlavní obvod STM32L053R8T6 po předem naprogramované době, čímž by dal povel k odeslání informace o aktuálním stavu pulzů. Nastavení úsporných módů mikrokontroléru lze pozorovat na obrázku B.3. Pro RF modul SPIRIT1 byly též připraveny funkce tak, aby odebíral co nejméně energie ve stavu, kdy nevysílá, viz obrázek B.3.

Další důležitou část tohoto řešení tvořilo nastavení samotného RF modulu z hlediska struktury paketu (viz obrázek B.4). Po zkoušení a testování různých kombinací úsporných módů vysílače (viz příložená literatura [36]) byl nakonec sestaven neoptimálnější firmware jak pro vysílání, tak pro příjem informace o stavu pulzů. Vysílací RF modul SPIRIT1 měl nejmenší spotřebu tehdy, když byl mimo vysílací dobu úplně vypnut, což nijak nevadilo při finální funkci. Na začátku inicializace mikrokontroléru STM32L053R8T6 došlo k nastavení modrého tlačítka na kytu NUCLEO-L053R8 v podobě externího přerušení. Následně proběhla inicializace interního RTC obvodu, konfigurace doby vyvolání přerušení a nastavení MCU do Sleep módu. Výsledné parametry lze pozorovat v následující tabulce 4.1.

Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
STM řešení - při vysílání	10,3	mA
STM řešení - při příjmu	6,4	mA
STM řešení - sleep mode	252	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
STM řešení - dosah	cca 150	m

Tabulka 4.1: Spotřeba a dosah STM řešení

## 5 Texas Instruments řešení

Posledním testovacím hardwarem se stal *Sub-1 GHz CC1310 wireless micro-controller (MCU) LaunchPad™ development kit* od společnosti Texas Instruments. Integrovaný obvod CC1310, který řídil celý tento kit, byl též představen na IoT konferenci v Mnichově v listopadu 2015. Tentokrát, ale ještě na starších vývojových deskách *SimpleLink™ Sub-1 GHz CC1310 Evaluation Module Kit*, ke kterým bylo nutno použít hlavní mateřskou desku *SmartRF06 Evaluation Board*, což výrazně prodražilo vyzkoušení tohoto řešení.

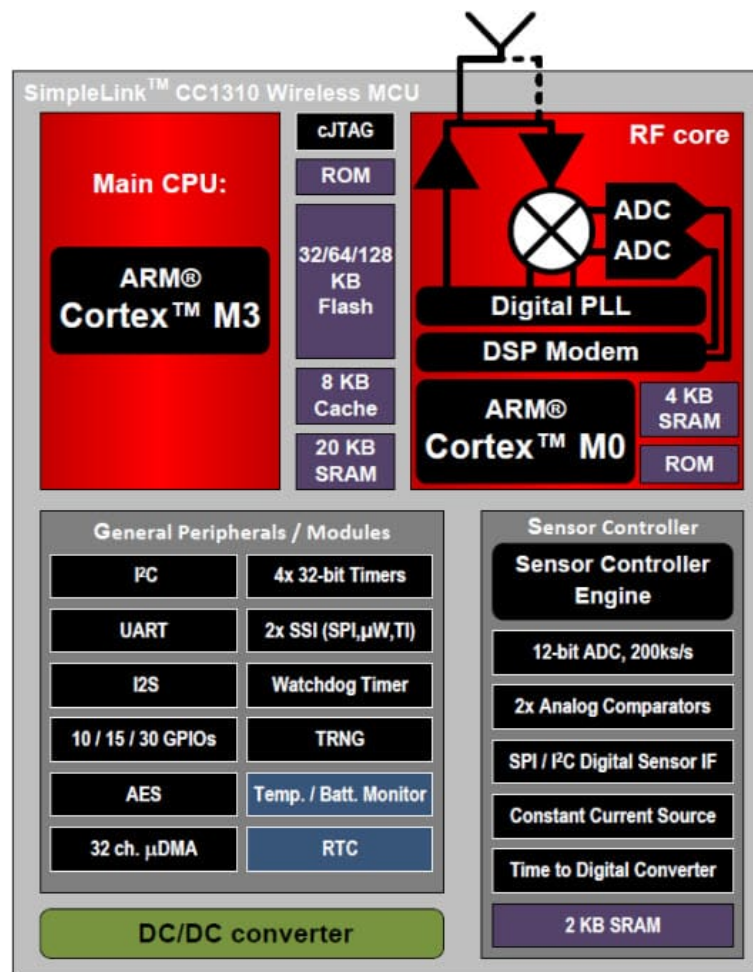
### 5.1 Popis hardwaru TI

V červenci roku 2016 přišla firma na trh s novým řešením v podobě TI LaunchPad kitu. Tento board se skládal ze dvou částí umístěných na jednom plošném spoji. První sekci tvořil mikrokontrolér, který sloužil jako programátor a debugger, spolu s JTAG konektorem. V druhé části tohoto boardu byl umístěn samotný MCU CC1310 s úspornou pamětí FLASH a dalšími komponentami. Obě tyto sekce propojovaly napájecí a JTAG signály čipu CC1310, které byly chytře zkratovány pomocí jumperů. To proto, aby bylo možné použít programátor a debugger externě po odstranění zmíněných propojek. Samotný kit šlo napájet pomocí micro USB konektoru.

Toto řešení od firmy Texas Instruments mělo unikátní podobu propojení řídicího mikrokontroléru a RF modulu, protože byly umístěny v jednom QFN pouzdru. Pro bližší seznámení lze pozorovat uvedené parametry mikrokontroléru CC1310:

- napájecí napětí od 1,8 V do 3,8 V,
- spotřeba 0,7  $\mu\text{A}$  ve standby režimu (při zapnutém RTC, paměti RAM a při zastaveném CPU),
- spotřeba 185 nA v shutdown režimu, buzení na externí události,
- rychlost hodinového taktu do 48MHz,
- odběr proudu při příjmu: 5,4 mA,
- odběr proudu při vysílání s výkonem +10 dBm: 13,4 mA
- programovatelné zesílení vysílače až do +15 dBm,
- wireless M-Bus and Selected IEEE® 802.15.4g PHY + podpora pro Over-the-Air naprogramování.

Pro lepší přehled bylo dále použito blokové schéma z datasheetu mikrokontroléru.

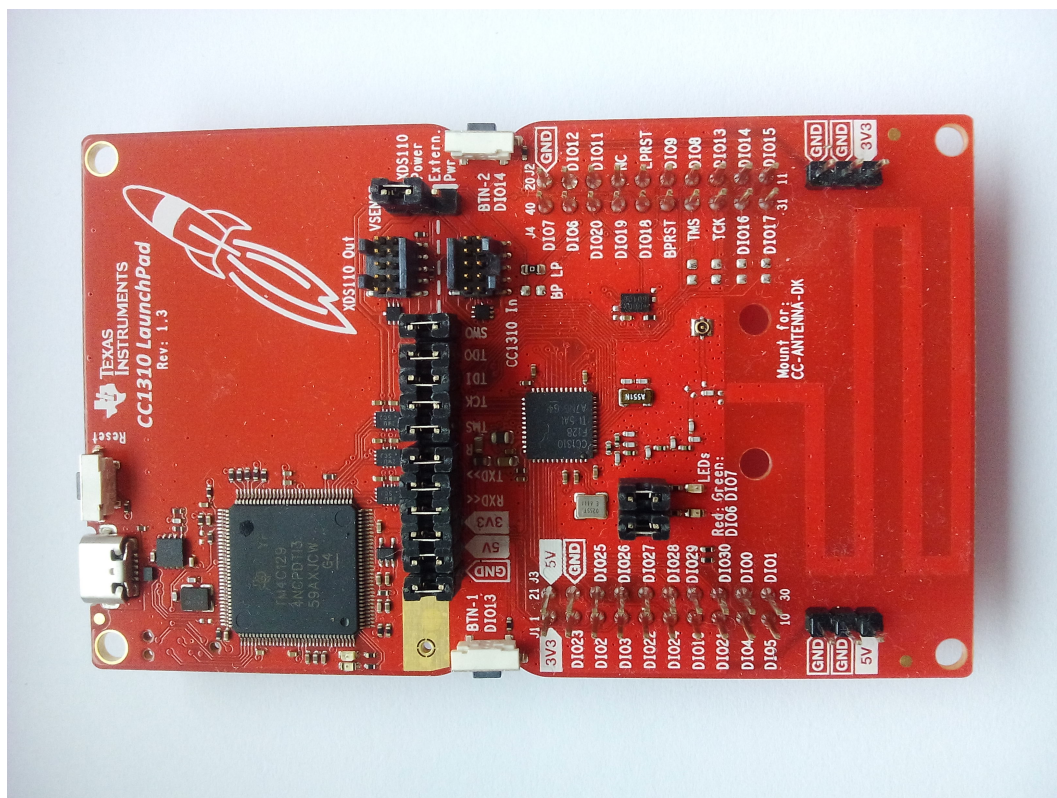


Obrázek 5.1: Blokové schéma CC1310 (převzato z [39] str. 36)

Z řídicího obvodu dále vystupovala anténa, která byla přímo vylita na plošném spoji. Šlo též použít JSC konektor pro vyvedení vlastní externí antény. Další velice významnou komponentu na tomto kitu tvořila již zmíněná úsporná paměť, a to SPI FLASH MX25R8035FZUIH1 [40] od firmy Macronix. Mezi její hlavní přednosti patřily:

- napájecí napětí od 1,65 V do 3,6 V,
- spotřeba 5  $\mu\text{A}$  ve standby módu,
- spotřeba 0,007  $\mu\text{A}$  v deep power-down módu,
- miniaturní pouzdro USON (2x3 mm),
- velikost: 8M byte (1M byte x 8) + pamatování dat až 20 let,
- rychlost čtení: 104 MHz.

Na kitu se dále nacházela dvojice tlačítek a LED diod. Červenou a zelenou diodu šlo pomocí jumperů odepnout od GPIO pinů (z důvodu úspory energie). Předposlední komponenty, které stojí za zmínku, představovala dvojice třípinových konektorů. Na tyto konektory bylo možné přivést externí napájení a zároveň měřit spotřebu druhé části kitu (bez programátoru a debuggeru). Pro připojování dalších modulů a kitů ke stávající desce sloužily dva konektory s GPIO piny mikrokontroléru CC1310. Na obrázku 5.2 lze sledovat představený vývojový board LAUNCHXL-CC1310.



Obrázek 5.2: LAUNCHXL-CC1310

## 5.2 Programování a software TI

Poslední vývojové studio, které bylo použito v této diplomové práci neslo název *Code Composer Studio™ - Integrated Development Environment* [41]. Toto prostředí podporovalo široké spektrum mikrokontrolérů od firmy Texas Instruments a disponovalo též C/C++ kompilátorem, debuggerem a mnoha dalšími funkcemi. Nutno též poznamenat, že byla použita verze CSSv6, která neměla žádná omezení z hlediska času, velikosti a ladění kódu. Instalace tohoto programu byla provedena jak na operačním systému Windows XP, tak v Linux Ubuntu 16.04 LTS. Poté došlo k výběru a instalaci dodatků, a to TI-RTOS CC13xx/CC26xx (operačního systému od firmy Texas Instruments pro čip CC1310) pomocí aplikace *App Center* umístěné přímo ve vývojovém prostředí.

Následoval výběr vhodného programovacího kódu z předem připravených projektů, který by byl použitelný pro následný vývoj. První dvojicí testovacích softwarů se staly projekty s názvy:

- *rfPacketTx\_CC1310\_LAUNCHXL\_TI\_CC1310F128* [42]- pro vyslání informace,
- *rfPacketRx\_CC1310\_LAUNCHXL\_TI\_CC1310F128* [43]- pro příjem informace.

Nutno uvést, že tyto softwary používaly již zmíněný TI-RTOS, na který se vztahovala podpora od firmy Texas Instruments. Kdyby došlo k vývoji kódu bez použití operačního systému, tak by tím automaticky nebyla podpora firmy TI zajištěna. Tento fakt vyplýval i z později objevené diskuze o programování CC1310 na fóru firmy Texas Instruments, kdy nebyla poskytnuta žádná rada uživateli, který vyvíjel software bez použití TI-RTOS. Tento operační systém disponoval chytře naprogramovaným uspáváním procesoru CC1310, takže zde nedocházelo ke zbytečnému plýtvání energií při použití OS.

Vysílací program *rfPacketTx* byl tvořen pomocí jednoho tasku, a to vysílacího. Ten po předem naprogramované době (pomocí interního RTC) odeslal paket. Bylo zde také nakonfigurováno externí přerušování na sestupnou hranu, které vedlo na vstup tlačítka vývojového kitu. Po počáteční inicializaci mikrokontroléru a nastavení vysílacího modulu uvnitř integrovaného obvodu došlo ke spuštění BIOSu pomocí funkce *BIOS.start()*, ve kterém byla též zahrnutá uspávací policie.

Tento program velice dobře pokrýval testovací požadavky. Zachycení pulzu v tomto případě zajišťovalo externí přerušování. Odesílání informace za předem naprogramovaný čas bylo umožněno pomocí interního časovače. Uspávání se v tomto případě uskutečňovalo automaticky. Jediná úprava tedy spočívala v inkrementaci proměnné, ve které byl akumulován počet pulzů a následné zařazení této informace do odesílacího paketu. Pro testovací účely simulace S0 výstupu mohly být využity dva způsoby. Pomocí stisku tlačítka na vývojovém kitu či propojení pinu *PG13* na boardu STM32F429I-DISCO od firmy STMicroelectronics s pinem *GPIO13* na TI LaunchPad kitu.

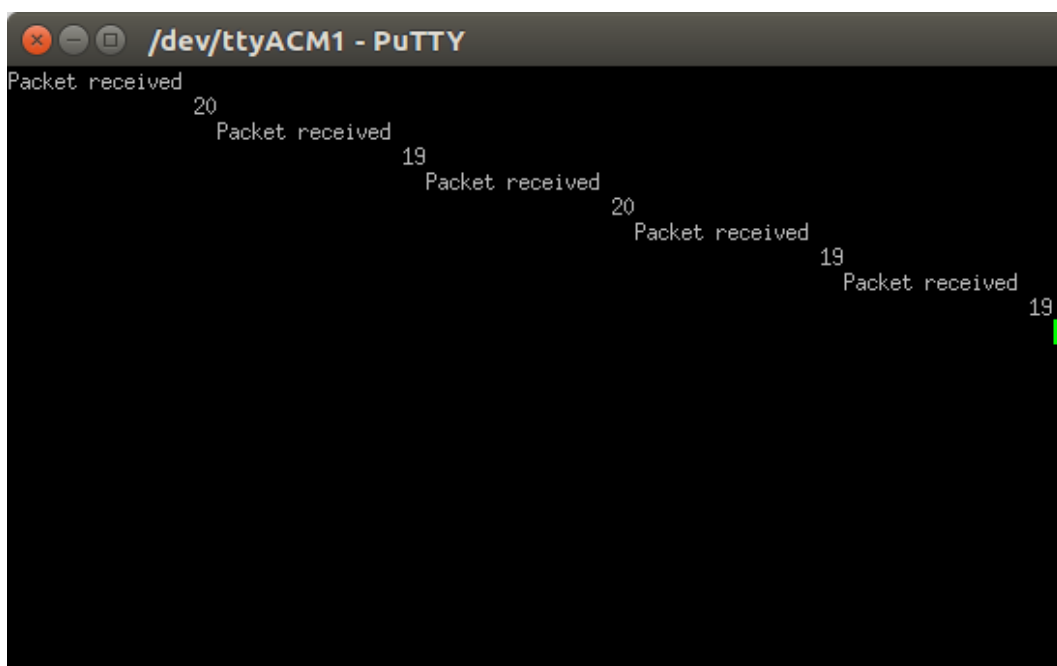
Program *rfPacketRx*, který čekal na příchozí zprávu od vysílače, byl též tvořen pomocí jednoho tasku, a to přijímacího. Po získání paketu došlo k přeposlání informace na sériovou komunikaci. Při spojení vývojového kitu s počítačem pomocí USB kabelu tak šlo velice jednoduše sledovat příchozí zprávu. Po inicializaci též došlo ke spuštění BIOSu jako v případě vysílacího softwaru.

I zde byl software velice dobře použitelný pro testovací účely, co se týče příjmu informace. Došlo navíc k naprogramování pinu *GPIO7*, na kterém byla též připojena zelená LED dioda, za účelem zobrazení počtu pulzů z vizuální stránky a možnosti připojení tohoto pulzního vstupu na SM2-RM viz 3.7.

Po nahrání firmwaru do vývojových kitů lze pozorovat výslednou komunikaci, viz obrázek 5.3.

Klíčové informace též tvořily údaje jako spotřeba a dosah vysílacího kitu. Tyto prvky lze shlédnout v následující tabulce 5.1.

V této části došlo k testování posledního vývojového kitu. Nyní následovalo porovnávání dosažených dat a parametrů tak, aby finální produkt nejlépe pokrýval požadavky firmy Solar Monitor s.r.o.



Obrázek 5.3: Přenos pulzů v programu PuTTY

Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
TI řešení - při vysílání	13,1	mA
TI řešení - při příjmu	6,1	mA
TI řešení - shutdown mode	18,1	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
TI řešení - dosah	cca 330	m

Tabulka 5.1: Spotřeba a dosah TI řešení



## 6 Návrh finálního řešení

### 6.1 Porovnávání dosažených výsledků

Pro jednoduchost a lepší přehlednost byly dosažené výsledky shrnuty do finální tabulky 6.1, ve které figurují údaje o spotřebě a dosahu jednotlivých řešení, která byla v předchozích kapitolách testována.

Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
řešení na nepájivém poli - při vysílání	28,9	mA
řešení na nepájivém poli - sleep mode	20,2	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
řešení na nepájivém poli - dosah	cca 50	m
radino - dosah s anténami	cca 150	m
Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
Anarduino - při vysílání	33,4	mA
Anarduino - při příjmu	26,9	mA
Anarduino - sleep mode	24	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
Anarduino - dosah	cca 50	m
Anarduino - dosah s externí anténou	cca 150	m
Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
STM řešení - při vysílání	10,3	mA
STM řešení - při příjmu	6,4	mA
STM řešení - sleep mode	252	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
STM řešení - dosah	cca 150	m
Řešení a módy	Spotřeba	Jednotky
TI řešení - při vysílání	13,1	mA
TI řešení - při příjmu	6,1	mA
TI řešení - shutdown mode	18,1	uA
Řešení	Dosah	Jednotky
TI řešení - dosah	cca 330	m

Tabulka 6.1: Spotřeba a dosah všech řešení

Dále byly v tabulce 6.1 zvýrazněny údaje, které vyplývaly z předchozích měření jako nejlepší. Lze si povšimnout, že většina prvenství patřila řešení od firmy Texas

Instruments až na vysílací spotřebu proudu. Tam dominoval bezdrátový modul SPIRIT1 od STMicroelectronics. Nutno dodat, že vysílací spotřeba tvořila jen nepatrnou část celkového odběru proudu, tudíž neměla až takový význam při konečném výpočtu spotřeby zařízení. Na tom se hlavně podílela spotřeba proudu v úsporných módech, kdy nepřicházely žádné pulzy a nic nebylo vysíláno ani přijímáno.

Dosah komunikace mezi přijímačem a vysílačem u všech dosavadních testovaných modulů znázorňuje obrázek 6.1. Tato zkouška byla prováděna ve stejném prostředí tak, aby měly všechny vývojové kity a řešení srovnatelné podmínky.



- Lokace přijímače,
- Řešení na nepájivém poli,
- Arduino s externí anténou,
- Radino s externí anténou,
- STMicroelectronics,
- Texas Instruments.

Obrázek 6.1: Maximální dosah všech řešení (převzato z [44])

Lze velice dobře pozorovat, že maximální vzdálenost přenesené informace při použití TI LaunchPad kity je více než dvojnásobná.

Z hlediska dostupnosti a připravenosti softwarových příkladů a vývojových prostředí byla všechna testovací řešení relativně na stejné úrovni. Negativním do-

jmem zapůsobilo řešení s radino moduly, které mělo v základním příkladu, pro odesílání a příjem informace, špatně nastavené piny pro komunikaci s RF čipem. Tento problém byl vyřešen až po emailové komunikaci s firmou In-Circuit GmbH.

S přihlédnutím k tomu, že integrovaný obvod CC1310 obsahoval jak řídicí mikrokontrolér, tak RF modul a firma Texas Instruments nabízela dokumentaci k vývojovým kitům s CC1310, v podobě GERBER souborů a projektů v programu Altium Designer [45], ve kterém se měla finální řešení navrhovat, došlo k výběru právě tohoto bezdrátového MCU.

## 6.2 Návrh hardwarové části

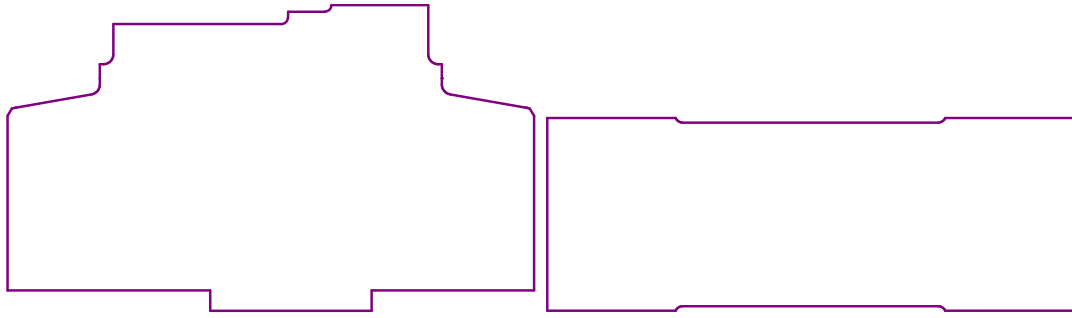
Před návrhem samotného finálního řešení byl proveden průzkum trhu kvůli přehledu a inspiraci. Velice zajímavými řešeními disponovala firma Adeunis RF, která se zabývala výrobou a prodejem bezdrátových modulů fungujících na baterii. Doba funkce těchto modulů se pohybovala okolo jedné desítky let. Moduly bylo možné vybírat vzhledem ke konkrétnímu využití v podobě čítání pulzů či měření teploty atd. Zákazník si mohl zvolit i druh komunikace např. Wireless M-Bus, LoRaWAN nebo SIGFOX [46].

Jak již bylo zmíněno v úvodní části diplomové práce, firma Solar Monitor sama určila výsledný typ plastové krabičky, do kterých mělo být finální řešení umístěno. Konkrétně se jednalo o stejný typ boxu jako v případě řešení s názvem SM2-RM-GSM, viz obrázek 6.2.



Obrázek 6.2: SM2-RM-GSM (převzato z [47])

Elektronika měla být navržena na dva plošné spoje, které spojoval speciální konektor. Oba obrysy DPS, které lze sledovat na obrázku 6.3, vyplňovaly přesně daný rozměr vnitřku plastového boxu. Vlevo lze sledovat obrys plošného spoje, který je umístěn svisle. Vpravo je pak umístěn obrys DPS položený horizontálně v plastovém boxu.



Obrázek 6.3: Obrys finálního řešení

### 6.2.1 SM2-RF

Aby bylo možné jednoduše vyměnit vysílací a přijímací modul, došlo při vymýšlení schémat k několika osazovacím variantám. Řídicí elektronika v čele s hlavním mikrokontrolérem CC1310 byla umístěna na svislé DPS ve finální krabici. Důvod pro toto rozhodnutí tvořila např. snadná výměna GSM modulu za budoucí RF modul u řešení SM2-RM. Proto byl vymyšlen i nový název pro svislou destičku, a to SM2-RF. Ve finálním návrhu vysílače byl především kladen požadavek na čítání pulzů z S0 vstupu elektroměru, vodoměru či plynoměru tak, aby mikrokontrolér setrval zbytek času v ultra úsporném režimu a zbytečně neplýtl energií, která by byla čerpána z baterie. Tato úvaha se trochu pozměnila v momentu, kdy k S0 vstupu přibylo rozšíření o komunikaci RS485. Funkce čtení S0 vstupu se od vyčítání z RS485 [48] značně odlišovala. Při detekci příchodu pulzu musí být mikrokontrolér neustále nastaven na detekci hrany pomocí externího přerušení. Komunikace přes RS485 takto nefunguje. V tomto případě se dotazuje MCU, které vyčítá data právě přes zmiňovanou sběrnici. Ve chvílích kdy by bezdrátové MCU nevysílalo ani nekomunikovalo pomocí RS485, šlo by celé řešení odpojit od napájení na určitou dobu, která by byla určena opětovným sepnutím napájení a tím by došlo opakování úkonu v podobě přečtení dat po RS485 a odeslání zprávy přijímači. Řešení této problematiky bylo objeveno v literatuře firmy Texas Instruments pod názvem *Humidity & Temp Sensor Node for Sub-1GHz Star Networks Enabling 10+ Year Coin Cell Battery Life* [49].

Za tímto inteligentním spínáním napájecího napětí stála trojice integrovaných obvodů. Prvním z nich byl *TPS61291 Low Iq Boost Converter with Bypass Operation* [50]. Tento čip generoval konstantní napájecí napětí na výstupu, jestliže se na vstupu vyskytovalo proměnné napájení, což bylo výhodné právě tam, kde se energie čerpala z lithiové baterie. Níže lze sledovat parametry TPS61291:

- vstupní napájecí napětí od 0,9 V do 5 V,
- volitelné výstupní napájení: 3,3 V, 3 V, 2,5 V,
- klidový proud 15 nA v Bypass módu,
- klidový proud 5,7  $\mu$ A v Boost módu,
- ovládání čipu pomocí ENABLE pinu.

Druhou součástku tvořil časovací obvod TPL5111 [51], který ovládal celé finální řešení tím, že řídil probouzení jak TPS61291, tak zbývající součástku TPS22860 [52]. Tato doba byla nastavena pomocí externí kombinace paralelně zapojených rezistorů. Podle tabulky v datasheetu součástky došlo k výběru nejdelší možné budící doby v podobě hodnot 2x 340 k $\Omega$ , viz tabulka 6.2.

Interval	Vypočítaná hodnota (k $\Omega$ )	Nejbližší reálná hodnota (k $\Omega$ )	Paralelní zapojení dvou 1% rezistorů (k $\Omega$ )
30min	92.43	92.233	182.0 // 187.0
40min	104.67	104.625	130.0 // 536.00
50min	115.33	115.331	150.0 // 499.00
1h	124.91	124.856	221.0 // 287.00
1h30min	149.39	149.398	165.0 // 1580.0
2h	170.00	170.00	340.0 // 340.0

Tabulka 6.2: Výřez hodnot z datasheetu TPL5111 (převzato z [51])

Mezi další významné údaje této součástky patří:

- přesnost časovače: 1%,
- spotřeba proudu při 2,5 V: 35 nA,
- rozsah napájecího napětí: 1,8 V až 5,5 V.

Poslední třetí součástku tvořil spínač zátěže TPS22860, který přiváděl napětí na bezdrátový mikrokontrolér CC1310 a vyznačoval se těmito parametry:

- rozsah napájecího napětí: 1,65 V až 5,5 V,
- maximální výstupní proud: 200 mA,
- svodový proud vstupního napětí: 2 nA,
- svodový proud napětí BIAS: 10 nA.

V napájecí části schématu SM2-RF se dále vyskytoval držák baterie BAT-HLD-001-THM [53], díky kterému šlo opakovaně vyměňovat zdroj energie v podobě třívoltové baterie CR2032. Další součástka, Schottkyho dioda, bránila přepólování celého obvodu. Navazující část tvořily odrušovací cívky a paralelně zapojené kondenzátory pro stabilnější hladinu napájecího napětí. Poslední prvek představoval konektor s roztečí 2 mm. Pomocí propojek, které se nasadily na tento konektor, docházelo k výběru napájecího napětí, a to z baterie či ze stabilního napájecího napětí, pokud bylo přítomno.

Další část vysílacího modulu tvořil list schématu, který obsahoval zapojení mikrokontroléru se vstupně/výstupními piny, resetovacím pinem a externími krystaly pro řízení frekvence. Dále zde byla zapojena paměť SPI FLASH MX25R8035FZUIH1, kterou disponoval také kit LAUNCHXL-CC1310, viz kapitola 5.1, a to hlavně kvůli uložení a následnému přehrání nového firmwaru pomocí OTA. Poslední část tohoto

listu tvořil anténní obvod sestavený z induktorů a kondenzátorů spolu se dvěma konektory, a to SMA-15 [54] a U.FL-R-SMT-1(10) [55]. Dva konektory se zde vyskytovaly proto, aby mohly být otestovány různé varianty připojení antén.

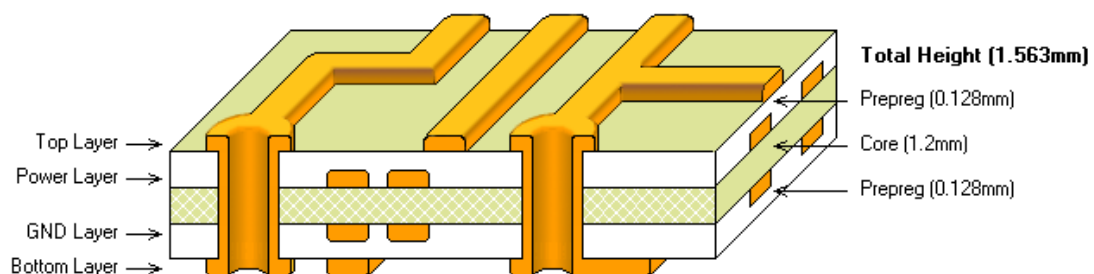
Třetí list schématu patřil signalizaci v podobě LED diod, které zobrazovaly příchozí počet pulzů a přítomné napájení. Tyto diody by byly osazeny jen v případě, že vysílací nebo přijímací modul fungoval na trvalý zdroj napájení, ne na baterii. Dále zde byla umístěna dvojice tlačítek. První tlačítko sloužilo k funkci párování přijímače s vysílačem. Druhé pak resetovalo finální zařízení.

První část čtvrtého a tedy i předposledního schématu tvořily konektory. Prvním z nich byl JTAG konektor pro připojení programátoru. Druhý konektor sloužil k propojení plošného spoje k horizontální DPS, na kterém bylo vyvedeno napájecí napětí, pulzní vstupy a RS485 či UART komunikace (podle druhu osazovací varianty). Druhou část tohoto listu schématu tvořila ochrana S0 vstupů, kterých bylo nakonec možno vyvést pět a vyhlazovací RC filtry pro vyhlazení příchozích pulzů.

Poslední část schématu zaujímaly komponenty pro správnou funkci a ochranu komunikace RS485. Hlavní úlohu v této části prováděl integrovaný obvod rozhraní RS422/RS485 ISL32603E [56] od firmy Intersil. Tento čip disponoval zejména těmito údaji:

- rozsah napájecího napětí: 1,8 V, 3 V a 3,3 V,
- maximální výstupní proud: 100  $\mu$ A,
- poloduplexní komunikace,
- ultra nízký proud při vypnutém čipu: 10 nA,
- EC61000 ESD ochrana RS485 I/O pinů:  $\pm$ 15 kV.
- Piny A a B přizpůsobeny na napětí od -7 V do +12 V.

Komunikace RS485 byla též chráněna pomocí transilů. Pro správné ukončení sběrnice zde figuroval rezistor o hodnotě 120  $\Omega$ . Pomocí dvoupinového konektoru šlo tento rezistor připnout pomocí propojky mezi A a B piny integrovaného obvodu ISL32603E. Po dokončení schématu následovalo rozmístění součástek na plošný spoj s předem daným obrysem. Před samotným routováním byl stanoven počet vrstev DPS, a to na čtyři. Následné složení lze pozorovat na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Složení vrstev plošného spoje

## 6.2.2 SM2-RF BASE

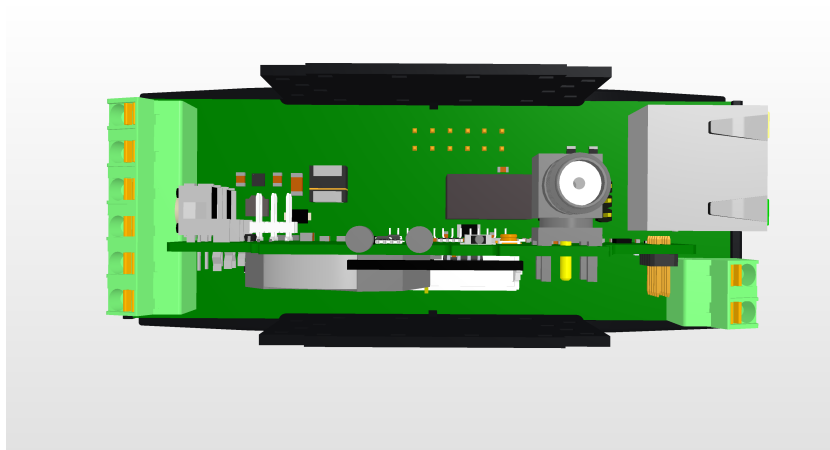
K vyvedení komunikace RS485, S0 vstupů a k přivedení napájecího napětí sloužila spodní DPS, stejně jako je tomu u modulu SM2-RM-GSM, na které jsou umístěny konektory pro připojení potřebných kabelů a vodičů. Tento horizontální plošný spoj dostal název SM2-RF BASE.

První problematiku, která byla řešena na prvním listu schématu, tvořila napájecí část. Stejně jako ostatní výrobky firmy Solar Monitor, tak i toto řešení muselo být uzpůsobeno pro napájecí napětí v rozmezí od 9-35 V. Protože se uvažovalo o použití integrovaných obvodů, které potřebovaly ke správné funkci 3,3 V, došlo k výběru Step-Down konverteru umožňujícího transformovat napěťové rozmezí. Mezi další parametry též patřila cena a efektivita výsledného konverteru. Tyto požadavky velice dobře splňoval integrovaný obvod TPS5401 [57]. Dále bylo rozhodnuto umožnit vyvedení odděleného napájecího napětí 12 V pro komunikaci RS485, protože to bylo vyžadováno u některých druhů elektroměrů. Řešení, která umožňovala galvanické oddělení a usměrnění z rozsahu 9-35 V na 12 V, byla velice drahá. Řešení se nabízelo v převedení 3,3 V na 5 V a poté na 12 V. Integrované obvody, které tuto činnost umožňovaly byly běžně dostupné. V této části byl též umístěn dvoupinový konektor pro přivedení napájecího napětí.

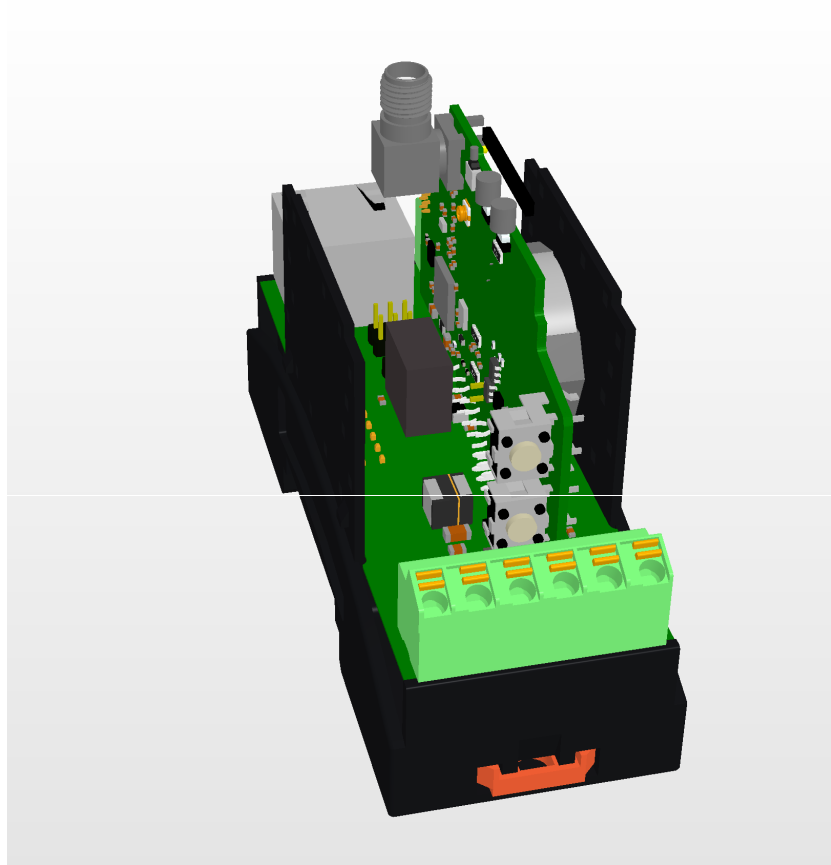
Druhý list schématu tvořila pětice konektorů. První čtrnáctipinový konektor zaujímal protějšek ke konektoru, který byl umístěn na SM2-RF. Druhý sloužil k vyvedení komunikace RS485 a napájení na HBUS sběrnici [58]. S třetím konektorem typu RJ45 bylo možné velice snadno propojit např. elektroměr ED 310 [59] od firmy ZPA pomocí standardizovaného kabelu. Pro výběr mezi galvanicky odděleným napájením či přímým napájecím napětím sloužila dvojice konektorů s možností osazení propojek. Poslední konektor umožňoval přivedení napětí 3,3 V na svislou DPS SM2-RF pomocí propojky (jestliže baterie nebyla umístěna).

Poslední list schématu patřil pěti pulzním vstupům. Byly vymyšleny dva druhy spínání S0 vstupů, a to k signálu GND či k napájecímu napětí 12 V. Výběr spínání šlo nastavit na připraveném konektoru pomocí propojek. Tuto přepínací logiku zajišťovaly usměrňovací můstky, přes které signál z S0 vstupu dále pokračoval skrze optické oddělení. Poté následoval Schmittův klopný obvod. Za ním již signál směřoval do SM2-RF. Pro přivedení pulzních vstupů do SM2-RF sloužil konektor se šesti póly, které tvořilo pět S0 vstupů a jedna referenční zdírka pro výběr spínané logiky.

I v tomto případě následovalo rozmístění a routování součástek na předem připravený tvar DPS. Nyní již byl tvořen plošný spoj pouze v dvouvrstevném provedení. Finální řešení lze pro lepší představu sledovat ve 3D pohledu na následujících obrázcích 6.5 a 6.6. Hardwarová část zde byla popisována z hlediska použití všech součástek na plošném spoji. Finálně však došlo k vytvoření osazovacích variant, které upravovaly a dělily výsledné řešení na různá použití.



Obrázek 6.5: Pohled na finální řešení ve 3D shora

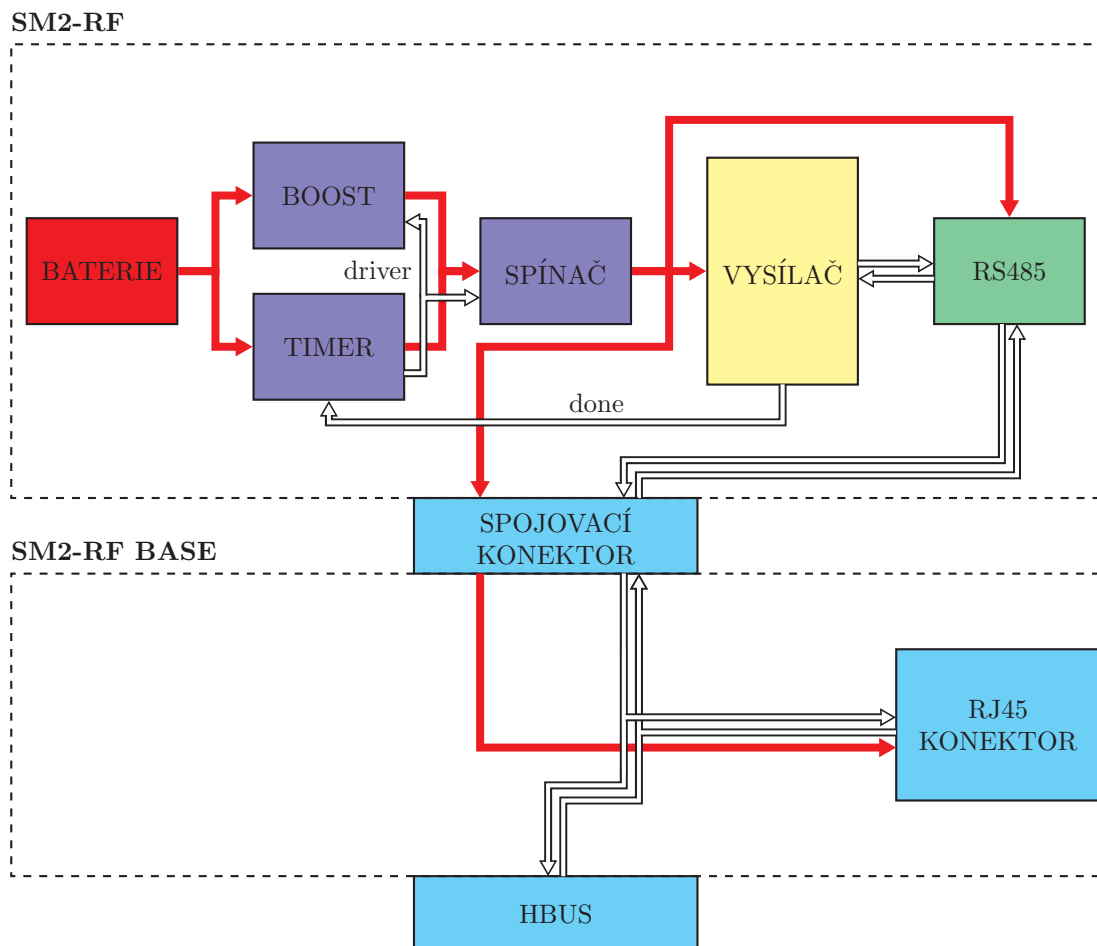


Obrázek 6.6: Pohled na finální řešení ve 3D ze strany konektoru pro S0 vstupy



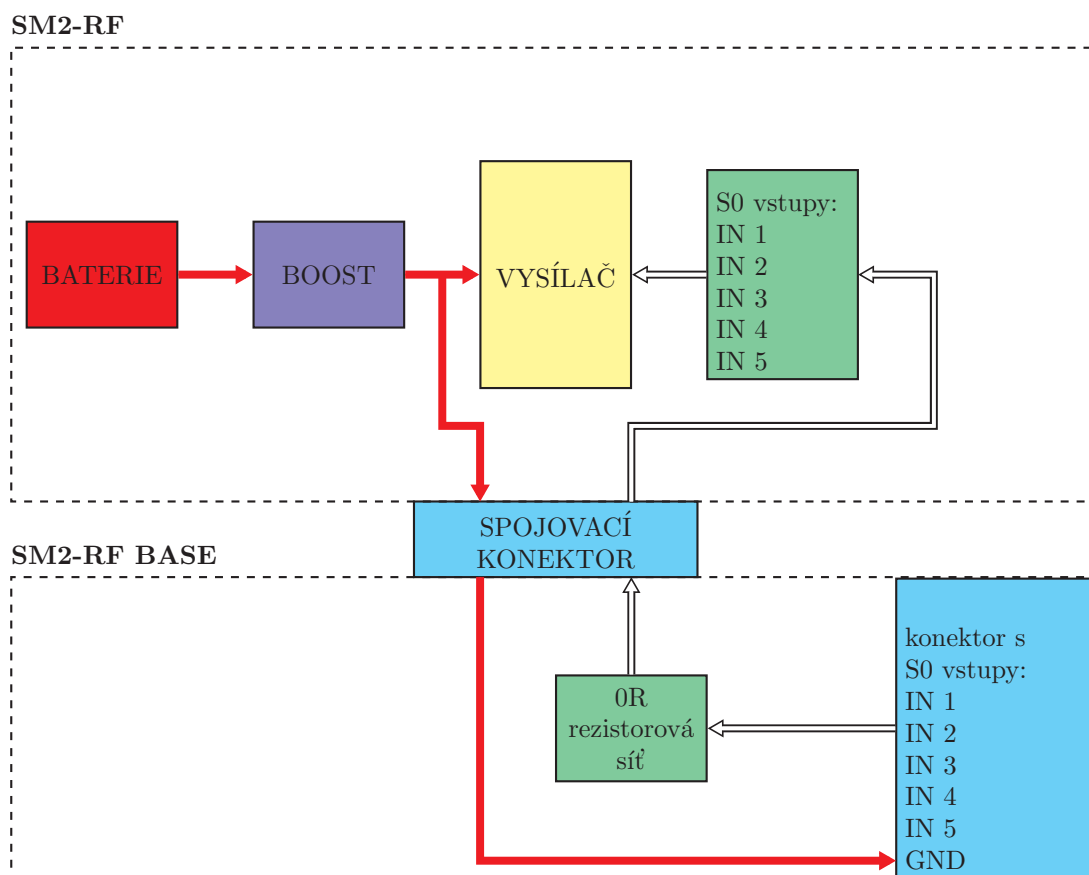
### 6.2.3 Osazovací varianty

Když bylo potřeba použít vysílač s komunikací RS485 a zároveň toto řešení napájet z baterie, došlo k vytvoření prvního typu osazovací varianty, kterou lze pozorovat na obrázku 6.7, kde červené šipky značí přivedení napájecího napětí a bílé komunikační signály integrovaných obvodů. V tomto případě nebyly osazeny LED diody kvůli menší spotřebě energie. Signály komunikace RS485 též mohly vést do centrální sběrnice HBUS.



Obrázek 6.7: SM2-RF + BASE osazovací varianta vysílače s RS485

V případě použití S0 vstupů již nebyl osazen časovací ani spínací integrovaný obvod (viz obr. 6.8). Z baterie procházelo napájecí napětí přes odrušovací cívky a paralelně zapojené kondenzátory přímo do mikrokontroléru CC1310. Z MCU bylo vyvedeno pět vstupů, které pokračovaly přes RC filtr kvůli uhlazení pulzů a dále přes oddělovací a propojovací rezistory s nulovou hodnotou rovnou na vstupní konektor na SM2-RF BASE. U této varianty nebyl možný výběr spínací logiky jako v plně osazeném řešení. Napájecí napětí se připojovalo k zemi GND z úrovně 3,3 V. Ani zde nebyly osazeny LED diody jako v předchozím případě.

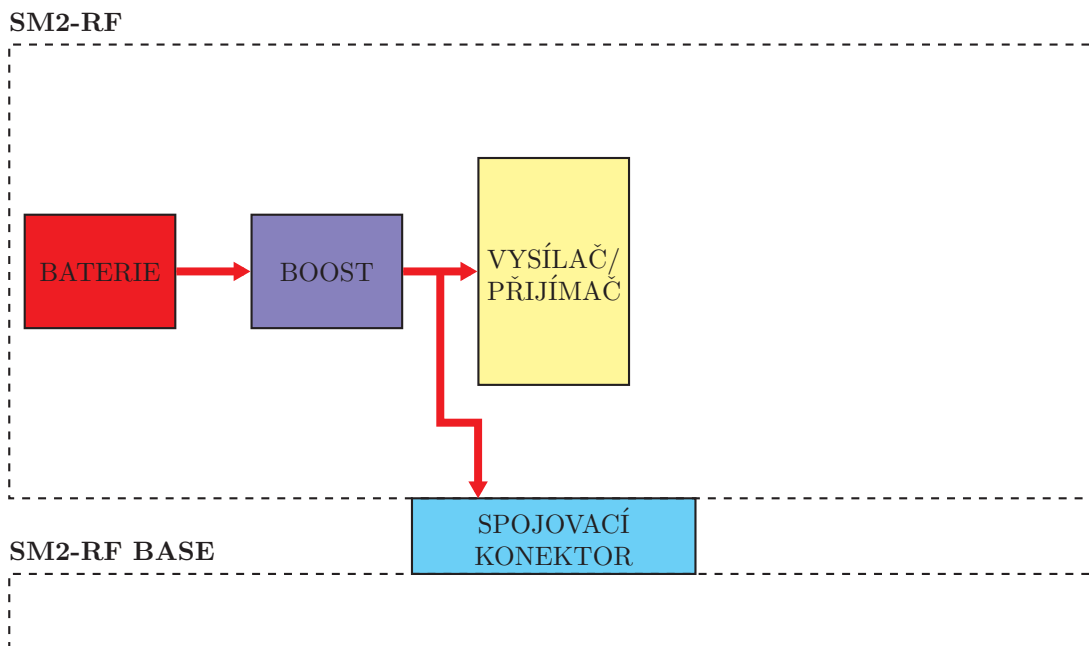


Obrázek 6.8: SM2-RF + BASE osazovací varianta vysílače s S0 vstupy

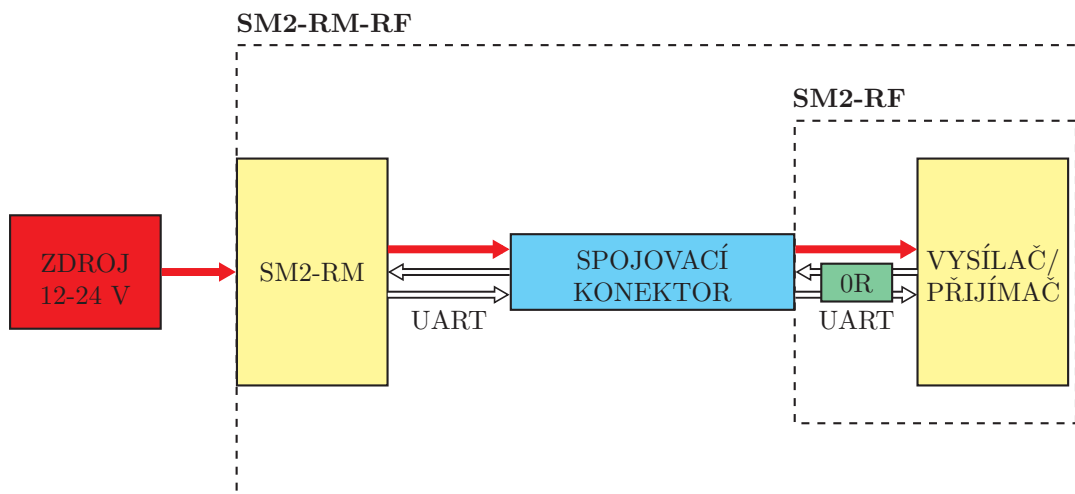
Třetí varianta (viz obrázek 6.9) sloužila jako přeposílací stanice. Toto řešení šlo využít tam, kde bylo potřeba prodloužit komunikaci mezi vysílacím a přijímacím modulem bez přítomnosti stálého napájecího zdroje.

Už od počátku návrhu plošného spoje SM2-RF se počítalo s tím, že by bylo možné jej v budoucnu nasadit na již stávající modul SM2-RM. Proto zde existovala možnost v podobě neosazení integrovaného obvodu ISL32603E pro rozhraní RS485. Signály RX a TX z mikrokontroléru CC1310 byly pouze přemostěny propojovacími rezistory s nulovou hodnotou a vyvedeny na spojovací konektor do SM2-RM. Tuto variantu lze pozorovat na obrázku 6.10.

V plně osazené variantě pak bylo možné napájet SM2-RF BASE pomocí 12 V zdroje a vyčítat spotřebovanou energii přes komunikaci RS485 a pulzní S0 vstupy zároveň.



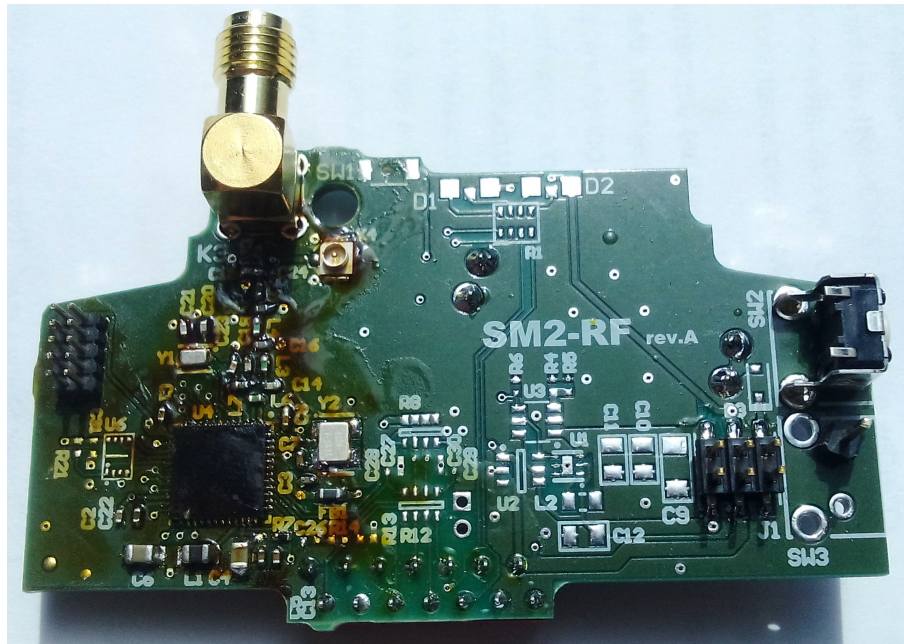
Obrázek 6.9: SM2-RF + BASE osazovací varianta vysílač/přijímač na baterii



Obrázek 6.10: SM2-RF osazovací varianta vysílač/přijímač + SM2-RM

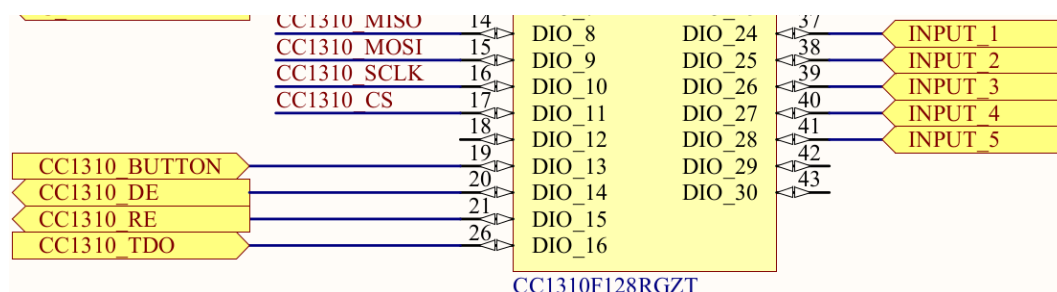
## 6.3 Programování, testování a měření

Po vyrobení plošného spoje SM2-RF došlo k jeho ručnímu osazení. Aby mohla být otestována správná funkčnost celkového řešení, stačilo pouze zapájet hlavní mikrokontrolér CC1310, vyhlazovací kondenzátory a cívky, JTAG konektor, prvky ovládající reset a časování MCU, součástky vedoucí k anténnímu konektoru a samotný konektor pro připojení antény, viz obrázek 6.11. SM2-RF byl poté připojen,

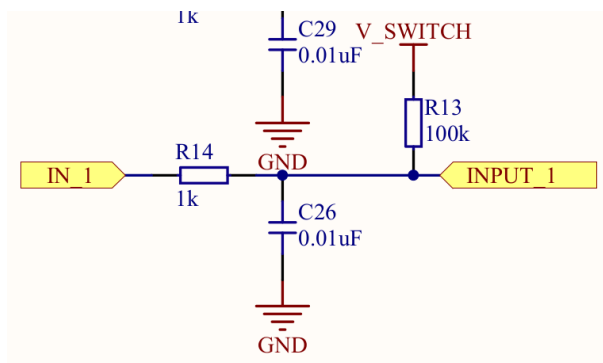


Obrázek 6.11: Částečné osazení SM2-RF

pomocí programovacího kabelu s roztečí pinů 1,27 mm, k vývojovému TI LaunchPad kitu s odstraněnými propojkami. Po propojení počítače s LaunchPad kitem se dalo finální řešení naprogramovat, viz obrázek C.7. Spotřeba se v tomto případě pohybovala okolo 200 nA, což lze pozorovat na obr. C.8. Pro testování pulzního vstupu bylo použito stejné vývojové prostředí a stejný program zvaný *rfPacketTx\_CC1310\_LAUNCHXL\_TI\_CC1310F128* jako v kapitole 5.2, ve kterém došlo pouze k menší úpravě, a to v nastavení přerušení z pinu DIO\_13 na DIO\_24 (viz obr. 6.12).



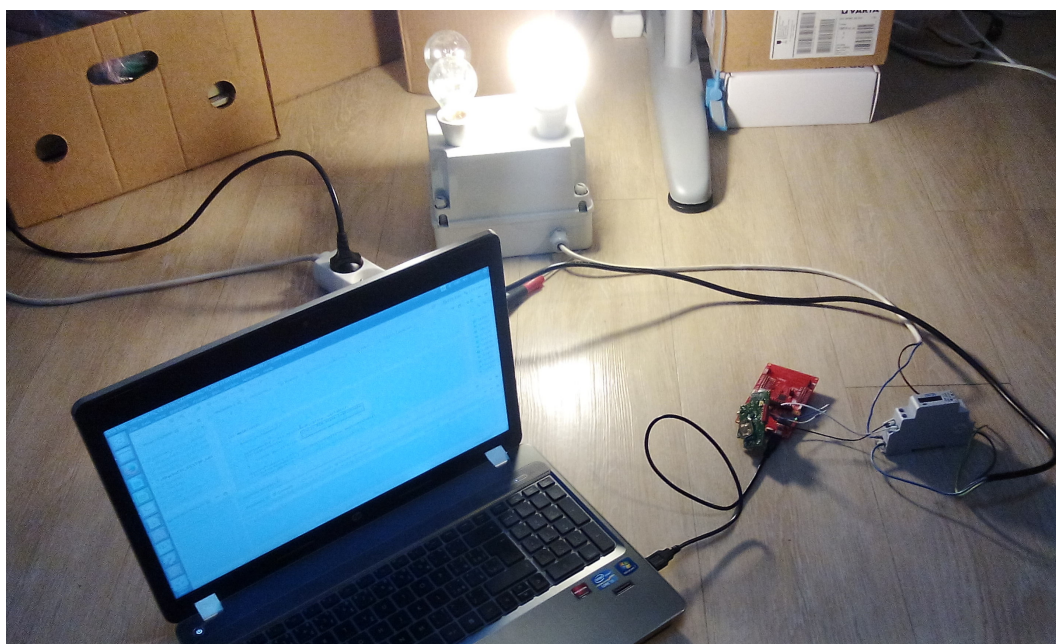
Obrázek 6.12: Výřez schéma procesorové části



Obrázek 6.13: Ošetření pulzního vstupu

Poté byly zapájeny dvě součástky: rezistor R14 s hodnotou 1 k $\Omega$  a kondenzátor C26 s hodnotou 10 nF pro vyhlazení příchozího pulzu (viz obr. 6.13).

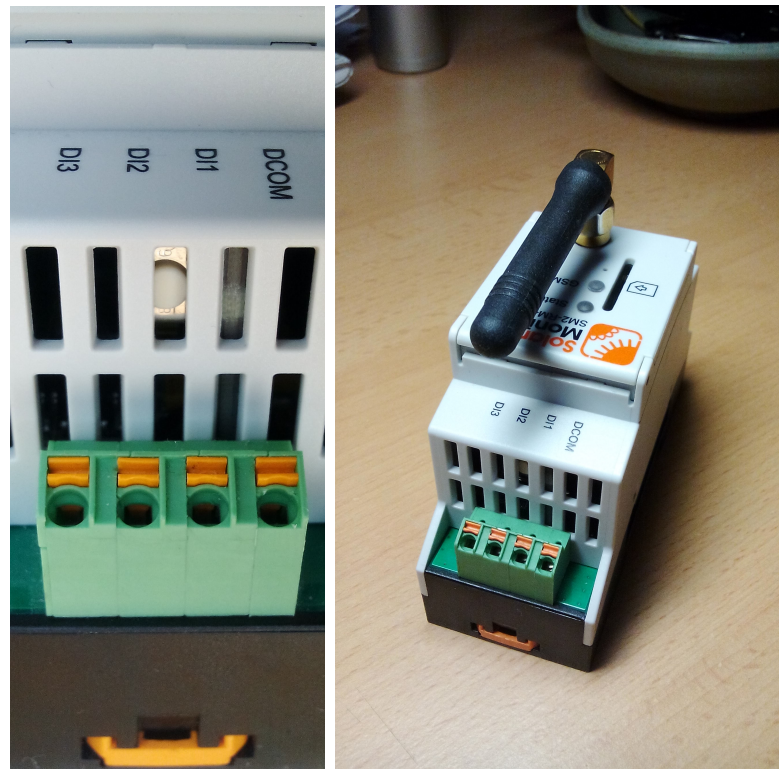
Dále došlo vyvedení dvou signálů IN\_1 a GND ze spojovacího konektoru umístěných na SM2-RF do elektroměru DDS-1Y-L [60], ke kterému byla též připojena zátěž v podobě tří žárovek (viz obr. 6.14). Pro příjem informace nyní posloužil jeden z vývojových kitů, ve kterém byl uložen program *rfPacketRx\_CC1310\_LAUNCH\_XL\_TI\_CC1310F128*. Počet pulzů šel sledovat pomocí zobrazení sériové komunikace v programu PuTTY. Po připojení elektroměru do sítě se čekalo na příchozí hranu signálu. Po spotřebě jedné watt hodiny se inkrementoval přesně jeden pulz, viz obrázek C.9. Tento test byl vykonáván vícekrát pro důkladné ověření.



Obrázek 6.14: Testování S0 vstupu s elektroměrem

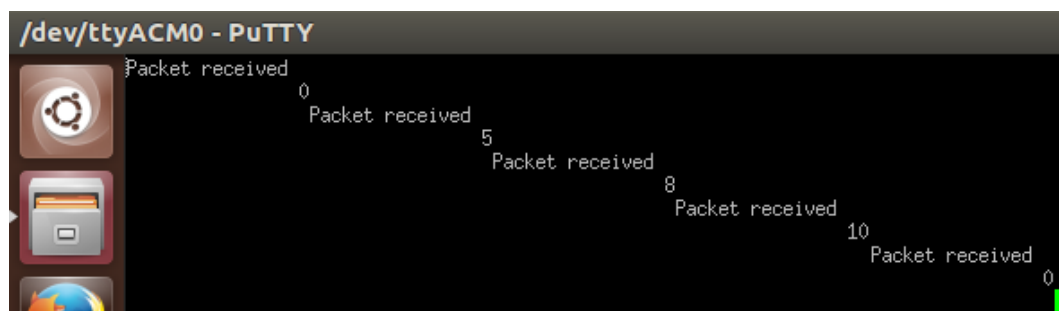
Aby došlo k otestování funkce SM2-RF ve variantě s SM2-RM, byl dále osazen spojovací konektor spolu s párovacím tlačítkem. Toto tlačítko nyní sloužilo jako

simulátor pulzů. Pro vyzkoušení zapouzdření celého řešení bylo použito horní víko od modulu SM2-RM-GSM, viz obrázek 6.15.



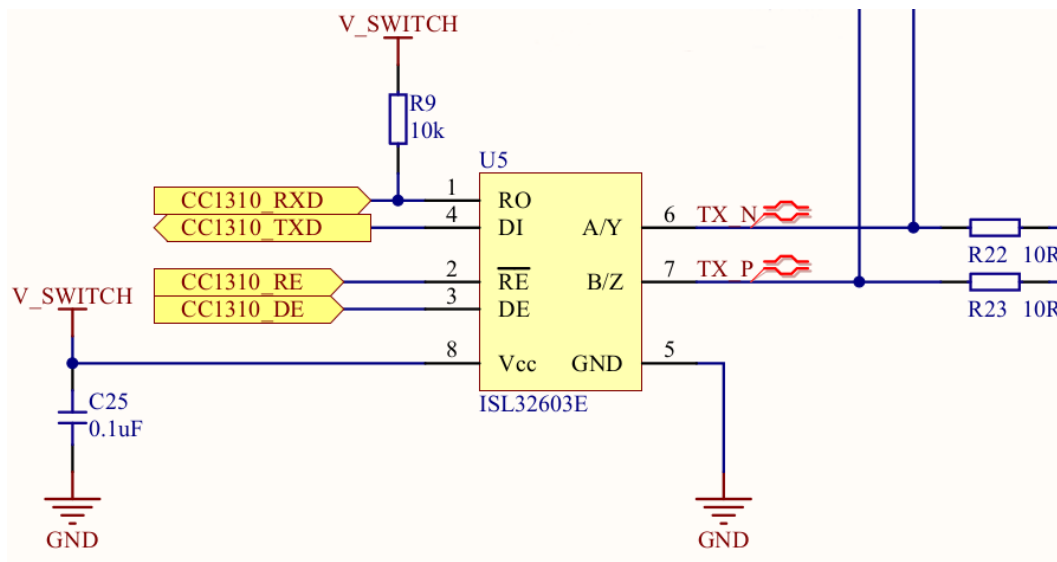
Obrázek 6.15: Detail testovacího tlačítka + varianta SM2-RF s SM2-RM

Při shlednutí levé části obrázku lze pozorovat umístění tlačítka přesně do plastového výřezu v krabici, s čímž se počítalo při návrhu hardwaru. K sepnutí tohoto tlačítka musel být použit například plochý šroubovák. Pomocí zmiňovaného předmětu následně došlo k inkrementaci vyslaných pulzů. Vše bylo opět sledováno přes sériový port LaunchPad kitu (viz obr. 6.16). Jelikož počty pulzů odpovídaly číslu zobrazeném v paketu přijímače, byl tento test také označen jako úspěšný.



Obrázek 6.16: Test odeslaných pulzů z SM2-RF

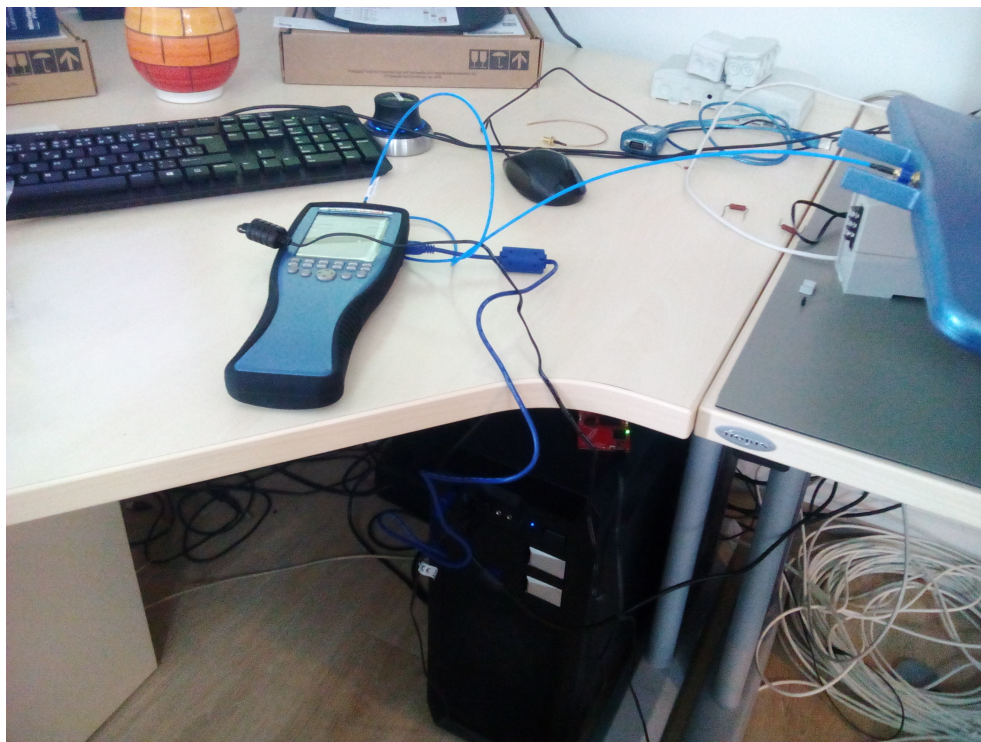
Pro ověření správné funkce RS485 došlo k vytvoření dalšího testování. Nejprve byly osazeny potřebné součástky, viz obrázek 6.17. Signály A a B vedly dále na spojo-



Obrázek 6.17: Schéma rozhraní RS485

vací konektor, z kterého byly připájenými vodiči zapojeny k převodníku CS-428/9AT mini [61]. Dále došlo k použití převodníku RS232/USB, protože počítač, na kterém se tato komunikace prováděla, neobsahoval COM port. Jako testovací software byl vybrán projekt *rfPacketRx\_CC1310\_LAUNCHXL\_TI\_CC1310F128*, protože již obsahoval naprogramovaný UART, který po příjmu zprávy od vysílače vypisoval přijaté pulzy. I tento program musel být upraven, a to ohledně pinu DIO\_14, který povoloval vysílání transceiveru ISL32603E v logické jedničce, tj. hodnota 3,3 V. Po naprogramování druhého LaunchPad kitu jako vysílače (projekt *rfPacketRx\_CC1310\_LAUNCHXL\_TI\_CC1310F128*) s periodou odesílání informace každou sekundu, se mohlo vše začít testovat. Průběh komunikace byl sledován v programu PuTTY a pomocí osciloskopu, viz obrázek C.12 a C.11.

Pro ověření správného frekvenčního rozsahu a zesílení došlo k porovnání LaunchPad kitu s finálním řešením SM2-RF. Oba tyto moduly byly prověřeny pomocí spektrální analýzy. Přístroje německé značky AARONIA pro toto měření vlastnila firma Solar Monitor, a to spektrální analyzátor Spectran HF-6065 [62] se šířkou pásma 10MHz - 6GHz a anténu HyperLOG 4060 [63] s rozsahem 400MHz - 6GHz. K těmto přístrojům byla též přiložena instalace počítačového programu Spectrum Analyzer Software MCS [64]. Po připojení spektrálního analyzátoru k počítači a anténě, což lze pozorovat na obrázku 6.18 a 6.19, byl spuštěn zmiňovaný software. Po výběru typu spektrálního analyzátoru v programu šlo sledovat vybraný rozsah frekvencí. Mezi další parametry patřily například: zesílení, vzorkovací čas, histogram, spektrum a výsledná frekvence (viz C.13 a C.14). Po měření a testování obou řešení SM2-RF a TI Launchpad došlo k vytvoření dvou grafů, ve kterých byla zobrazena frekvence na ose x a zesílení na ose y, viz obrázek C.15 a C.16. Lze si povšimnout vysoké shody obou řešení, tudíž šlo považovat SM2-RF z hlediska návrhu hardwaru za funkční a dostatečně prověřený.



Obrázek 6.18: Příprava spektrálního analyzátoru



Obrázek 6.19: Příprava antény



## 7 Závěr

Při realizaci této diplomové práce bylo nejprve vybráno pět odlišných vývojových řešení od rozdílných výrobců. Postupným programováním a testováním docházelo k určení nejvhodnějšího kandidáta pro bezdrátovou elektroniku ve finálním modulu.

První z nich, v nejjednodušším možném zapojení, figurovalo na nepájivém poli. I toto zdánlivě primitivní řešení nakonec ukázalo svoje silné stránky z hlediska úspory energie, tudíž se na AVR platformě dále pokračovalo.

Druhým řešením byla dvě radina RF69 osazená na mateřských deskách radino Spider RP-SMA od firmy In-Circuit GmbH. Kvůli absenci externího RTC obvodu nemohl mikroprocesor na vysílacím modulu odesílat počet pulzů po určitém intervalu, takže zbývalo stanovit buď daný počet hran, po kterém se stav pulzů odešle, nebo posílat každou hranu zvlášť (v případech, kdy má elektroměr velice malý odběr). Toto řešení bylo bohužel velmi náročné na spotřebu energie, protože radino Spider RP-SMA obsahoval LDO regulátor napětí. Další nevýhodou tvořily předpřipravené softwarové příklady, které obsahovaly špatně naprogramované knihovny pro inicializaci vysílacího čipu. Zmíněné řešení mělo i přednosti, a to v možnosti připojení externích antén díky SMA konektorům. Při použití antény 2JW031-868 dosahovala komunikační vzdálenost mezi moduly až ke sto padesáti metrům ve volném prostředí.

Ve třetím případě došlo k použití kitů Anarduino od firmy HOPERF ELECTRONIC North America, které také disponovaly čipem RF69. Tyto moduly již obsahovaly externí RTC obvod, takže se dalo posílat informaci o stavu pulzů po předem naprogramovaném časovém intervalu. Po odebrání stabilizátoru na 3,3 V, z důvodu úspory odběru proudu na vysílacím modulu, došlo k použití dvou lithiových AA baterií jako hlavního zdroje napájecího napětí. Po výpočtu výdrže vysílače činila doba provozu několik jednotek měsíců. Velikou roli zde hrála vzdálenost přijímače od vysílače, kvůli odebíranému proudu při vysílání. Druhým faktorem byl také počet generovaných pulzů. Jestliže nepřišel ani jeden pulz do pěti minut, vysílací modul žádnou informaci neodeslal. Po připájení anténního kabelu a připojení antény 2JW031-868 došlo k prodloužení dosahu modulu na cca 150 m. Obě dosavadní AVR platformy byly vybírány s ohledem na jednoduché programování a přímá řešení, která se nemusela nijak zásadně upravovat z hlediska hardwaru.

Další řešení nabízela firma STMicroelectronics, a to s použitím vývojových desek NUCLEO-L053R8, které tvořily řídicí část. Vyslání a příjem bezdrátové informace zajišťoval rozšiřující kit X-NUCLEO-IDS01A4 s čipem SPIRIT1. Výhoda celkového použití spočívala ve vestavěném RTC obvodu přímo v řídicím mikroprocesoru. Byla zde možnost výběru z několika úsporných režimů MCU. Rozšiřující kit

již obsahoval ISM anténu, takže žádná externí již nebyla potřeba. Po následném na-programování a testování došlo ke kalkulaci doby výdrže baterie na několik jednotek až jednu desítku let. Dosah se též pohyboval okolo 150 m.

Pětici řešení uzavíral vývojový kit LAUNCHXL-CC1310 od firmy Texas Instruments, který jako jediný obsahoval mikrokontrolér a bezdrátový vysílač v jednom pouzdře. Stejně jako řešení od STMicroelectronics, tak i firma Texas Instruments umístila programátor přímo na vývojový kit. LAUNCHXL-CC1310 disponoval naroutovanou anténou přímo na plošném spoji. Po sestavení vysílacího a přijímacího programu zde došlo k nejdelšímu přenosu informace, a to až na vzdálenost cca 330 m. Tento LaunchPad kit též dosáhl prvenství v odběru elektrického proudu v tzv. shutdown módu. Po změření se spotřeba pohybovala okolo 18,1  $\mu\text{A}$ .

Po porovnání dosažených výsledků bylo rozhodnuto použít finální elektroniku s bezdrátovým mikrokontrolérem CC1310. Návrh hardwaru se separoval na dvě části, a to řídicí a připojovací. Řídicí plošný spoj s názvem SM2-RF obsahoval hlavní integrovaný obvod, transceiver RS485, externí časování, spínání napájecího napětí z lithiové baterie a možnost připojení různých druhů antén. Tato DPS byla umístěna svisle v předem daném plastovém boxu. Na druhém plošném spoji, zvaném SM2-RF BASE a položeném horizontálně, figurovala trojice konektorů pro připojení pulzních vstupů, komunikace po sběrnici RS485 a pro napájecí napětí. Byly zde také umístěny obvody sloužící ke galvanickému oddělení napájení, výběru logiky pulzních vstupů či k převodu napěťových úrovní. Pro spojení obou plošných spojů jak SM2-RF, tak SM2-RF BASE sloužil tzv. Micro-MaTch konektor. Aby se daly tyto moduly multifunkčně využívat, došlo k navržení několika osazovacích variant, včetně možnosti připojení SM2-RF ke stávajícímu modulu SM2-RM firmy Solar Monitor.

Obě nově vymyšlená řešení SM2-RF i SM2-RF BASE byla navržena v programu Altium Designer. Po výrobě a ručním osazení SM2-RF došlo k otestování pulzních vstupů a sériové komunikace RS485. Kvůli porovnání frekvenčních vlastností, kitu LAUNCHXL-CC1310 a výsledného řešení SM2-RF, byl použit spektrální analyzátor, který ukázal vysokou shodu obou spekter, čímž došlo k ověření, že se daná bezdrátová komunikace provádí ve správných frekvenčních pásmech, které definuje Český telekomunikační úřad. Podařilo se tak splnit všechny body ze zadání.

## Literatura

- [1] VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO SPEKTRA. *Český telekomunikační úřad* [online]. 28. dubna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://spektrum.ctu.cz/>
- [2] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13. *Český telekomunikační úřad* [online]. 22. listopadu 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/11.2016-13/obrazky/vo-r10-112016-13.pdf>
- [3] O společnosti. *solarmonitor.cz* [online]. 4. května 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://www.solarmonitor.cz/cz/o-nas/kontakt>
- [4] Základní vlastnosti. *wiki.solarmonitor.cz* [online]. 24. listopadu 2014 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://wiki.solarmonitor.cz/doku.php?id=sim:rm:aplikace:zakladni\\_vlastnosti](http://wiki.solarmonitor.cz/doku.php?id=sim:rm:aplikace:zakladni_vlastnosti)
- [5] Arduino. *arduino.cc* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [6] Mikromoduly 868MHz MTX1, MTX2 a MRX1. *flajzar.cz* [online]. 22. dubna 2009 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://flajzar.cz/eshop/index.php?id\\_product=7009&controller=product&search\\_query=MTX&results=2](http://flajzar.cz/eshop/index.php?id_product=7009&controller=product&search_query=MTX&results=2)
- [7] ATmega328/P DATASHEET COMPLETE. *Atmel* [online]. listopad 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/atmel-42735-8-bit-avr-microcontroller-atmega328-328p\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-42735-8-bit-avr-microcontroller-atmega328-328p_datasheet.pdf)
- [8] RFM69HW ISM TRANSCEIVER MODULE V1.3. *HopeRF* [online]. 9. září 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM69HW-V1.3.pdf>
- [9] RFM69W ISM TRANSCEIVER MODULE V1.3. *HopeRF* [online]. 9. září 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM69W-V1.3.pdf>

- [10] RFM69CW ISM TRANSCEIVER MODULE V1.1. *HopeRF* [online]. 9. září 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM69CW-V1.1.pdf>
- [11] 8-bit Microcontroller with 16/32K bytes of ISP Flash and USB Controller. *Atmel* [online]. 4. dubna 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4.Datasheet.pdf>
- [12] radino RF69. <http://wiki.in-circuit.de> [online]. 26. ledna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://wiki.in-circuit.de/images/7/7c/305000082A\\_radino\\_RF-69.pdf](http://wiki.in-circuit.de/images/7/7c/305000082A_radino_RF-69.pdf)
- [13] Low Power Integrated UHF Transceiver with On-Chip +20dBm PA. [online]. 19. ledna 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://wiki.in-circuit.de/images/1/1f/RF69-V12.pdf>
- [14] radino Spider RP-SMA. <http://wiki.in-circuit.de> [online]. 26. ledna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://wiki.in-circuit.de/images/8/85/305000086A\\_radino\\_Spider\\_RP-SMA.pdf](http://wiki.in-circuit.de/images/8/85/305000086A_radino_Spider_RP-SMA.pdf)
- [15] SCHMIEDEL, Martin. 610000294: radino Spider. <http://wiki.in-circuit.de> [online]. 26. ledna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://wiki.in-circuit.de/images/b/b3/610000294C.pdf>
- [16] 2JW031-868-915. *2j-antennae.com* [online]. 9. července 2014 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.2j-antennae.com/images/products/2JW031-868-915.pdf>
- [17] S25FL127S 128 Mbit (16 Mbyte) 3.0V SPI Flash Memory. *cypress.com* [online]. 24. března 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.cypress.com/file/177961/download>
- [18] MCP7940N Data Sheet - 20005010F. *microchip.com* [online]. 20. března 2014 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005010F.pdf>
- [19] KRACÍK, Josef. *Modul pro podporu procesorů z řady AVR na existujícím výukovém přípravku*. Liberec, 2013. 53 s. Bakalářská práce. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.

- [20] Programming Device Manual Booklet AVR Prog USB v2. *and-tech.pl* [online]. Polsko, 17. října 2012 [cit. 12. května 2017].  
Dostupné z: [http://and-tech.pl/wp-content/download/avrprog\\_20usb\\_20v2/instrukcja\\_20avrprog\\_20usb\\_20v2.pdf](http://and-tech.pl/wp-content/download/avrprog_20usb_20v2/instrukcja_20avrprog_20usb_20v2.pdf)
- [21] S0 mereni. <http://merenienergie.cz> [online]. 14. března 2016 [cit. 12. května 2017].  
Dostupné z: [http://merenienergie.cz/images/user-files/s0\\_popis.pdf](http://merenienergie.cz/images/user-files/s0_popis.pdf)
- [22] Instalační návod SM2-RM. *solarmonitor.cz* [online]. 2. září 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [https://www.solarmonitor.cz/files/Navod\\_20SM2\\_RM.pdf](https://www.solarmonitor.cz/files/Navod_20SM2_RM.pdf)
- [23] Vzdálené odečty měřidel. *solarmonitor.cz* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://www.solarmonitor.cz/cz/o-nas/aktualne/198-vzdalene-odecty-meridel>
- [24] 32F429IDISCOVERY. *st.com* [online]. 13. dubna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/ff/c1/b6/02/c3/b4/49/cb/DM00094498.pdf/files/DM00094498.pdf/jcr:content/translations/en.DM00094498.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/ff/c1/b6/02/c3/b4/49/cb/DM00094498.pdf/files/DM00094498.pdf/jcr:content/translations/en.DM00094498.pdf)
- [25] RUSU, Felix. LowPowerLab/RFM69. *github.com* [online]. 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://github.com/LowPowerLab/RFM69/blob/master/RFM69.h>
- [26] radino Library - IC\_RF69.h. *wiki.in-circuit.de* [online]. 25. dubna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://wiki.in-circuit.de/index.php5?title=radino\\_Library#Downloads](http://wiki.in-circuit.de/index.php5?title=radino_Library#Downloads)
- [27] SPIRIT1 - Low data rate, low power sub-1GHz transceiver. *st.com* [online]. 1. března 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/68/6c/7b/ec/b2/6b/49/16/DM00047607.pdf/files/DM00047607.pdf/jcr:content/translations/en.DM00047607.pdf>
- [28] Sub-1 GHz RF expansion board based on the SPSGRF-868 module for STM32 Nucleo. *st.com* [online]. 1. března 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/56/b5/74/42/91/92/4a/70/DM00168233.pdf/files/DM00168233.pdf/jcr:content/translations/en.DM00168233.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/56/b5/74/42/91/92/4a/70/DM00168233.pdf/files/DM00168233.pdf/jcr:content/translations/en.DM00168233.pdf)
- [29] Sub-GHz (868 or 915 MHz) low power programmable RF transceiver modules. *st.com* [online]. 1. března 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f9/a3/aa/67/de/86/4b/62/DM00171035.pdf/files/DM00171035.pdf/jcr:content/translations/en.DM00171035.pdf>

- [30] STM32 MCU Nucleo. *st.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-mcu-nucleo.html?querycriteria=productId=LN1847>
- [31] STM32 Nucleo-64 board. *st.com* [online]. 19. dubna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/c8/3c/30/f7/d6/08/4a/26/DM00105918.pdf/files/DM00105918.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105918.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/c8/3c/30/f7/d6/08/4a/26/DM00105918.pdf/files/DM00105918.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105918.pdf)
- [32] Ultra-low-power 32-bit MCU ARM®-based Cortex®-M0+, up to 64KB Flash, 8KB SRAM, 2KB EEPROM, LCD, USB, ADC, DAC. *st.com* [online]. 1. března 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/8a/f4/9d/d7/61/1b/46/b4/DM00105960.pdf/files/DM00105960.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105960.pdf>
- [33] X-CUBE-SUBG1. *st.com* [online]. 1. března 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-subg1.html>
- [34] System Workbench for STM32. *openstm32.org* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.openstm32.org/System+Workbench+for+STM32>
- [35] Getting started with the X-CUBE-SUBG1 for Point-to-Point communications based on Sub-1 GHz RF STM32 expansion board. *st.com* [online]. 6. ledna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/7b/34/d5/28/d7/42/4b/de/DM00189294.pdf/files/DM00189294.pdf/jcr:content/translations/en.DM00189294.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/7b/34/d5/28/d7/42/4b/de/DM00189294.pdf/files/DM00189294.pdf/jcr:content/translations/en.DM00189294.pdf)
- [36] Guidelines for Battery operated applications with SPIRIT1. *emcu.it* [online]. 28. března 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.emcu.it/Wireless/SubGHz/AN/Battery-operated-SPIRIT1.pdf>
- [37] spirit1\_appli.c. *github.com* [online]. 31. července 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [https://github.com/STclab/stm32nucleo-spirit1-lib/blob/master/stm32cube-prj/Src/spirit1\\_appli.c](https://github.com/STclab/stm32nucleo-spirit1-lib/blob/master/stm32cube-prj/Src/spirit1_appli.c)
- [38] SimpleLink™ Sub-1 GHz CC1310 wireless microcontroller (MCU) LaunchPad™ development kit. *ti.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/launchxl-cc1310#Technical%20Documents>
- [39] CC1310 Simplelink™ Ultra-Low Power Sub-1 GHz Wireless MCU. *ti.com* [online]. 29. dubna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1310.pdf>

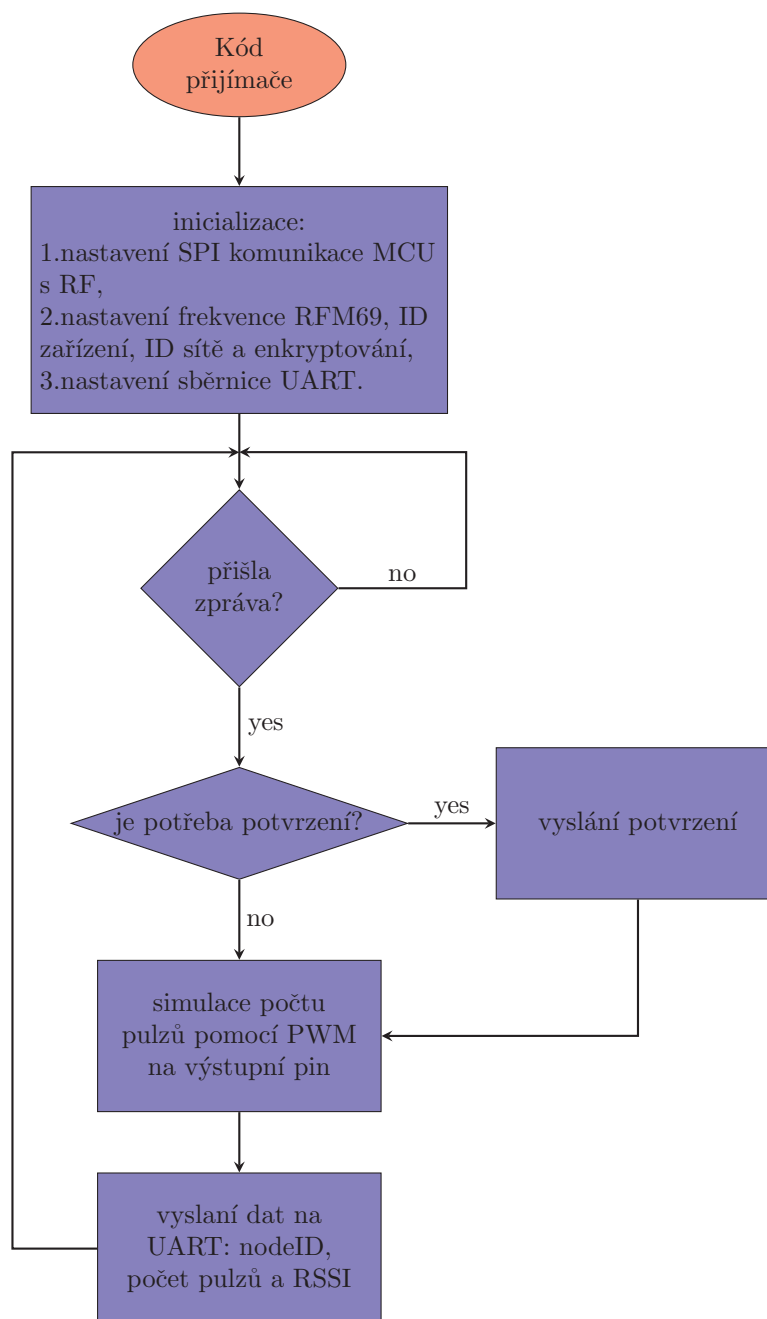
- [40] MX25R8035F. *macronix.com* [online]. 22. února 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.macronix.com/Lists/Datasheet/Attachments/5378/MX25R8035F\\_20Wide\\_20Range\\_208Mb\\_20v1.4.pdf](http://www.macronix.com/Lists/Datasheet/Attachments/5378/MX25R8035F_20Wide_20Range_208Mb_20v1.4.pdf)
- [41] Download CCS. *wiki.ti.com* [online]. 22. února 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://processors.wiki.ti.com/index.php/Download\\_CCS](http://processors.wiki.ti.com/index.php/Download_CCS)
- [42] rfPacketTx. *http://dev.ti.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink\\_cc13x0\\_sdk\\_1.30.00.06/docs/proprietary-rf/html/cc13x0/examplesusersguide/rfPacketTx/README.html](http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc13x0_sdk_1.30.00.06/docs/proprietary-rf/html/cc13x0/examplesusersguide/rfPacketTx/README.html)
- [43] rfPacketRx. *http://dev.ti.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink\\_cc13x0\\_sdk\\_1.30.00.06/docs/proprietary-rf/html/cc13x0/examplesusersguide/rfPacketRx/README.html](http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc13x0_sdk_1.30.00.06/docs/proprietary-rf/html/cc13x0/examplesusersguide/rfPacketRx/README.html)
- [44] Železnice. *mapy.cz* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka-2015?x=15.3895678&y=50.4728444&z=18>
- [45] CC1310 SimpleLink™ Sub-1 GHz Ultra-Low Power Wireless Microcontroller - Tools & software. *ti.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/product/CC1310/toolssoftware>
- [46] Product Finder. *adeunis-rf.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.adeunis-rf.com/en/product-finder>
- [47] SM2-RM-GSM Modul odečtů měřidel-Solar Monitor. *shop.solarmonitor.cz* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://shop.solarmonitor.cz/cs/solar-monitor/116-sm2-rm-gsm-modul-odectu-meridel.html>
- [48] POUCHA, Pavel. Přenos dat po linkách RS485 a RS422. *http://vyvoj.hw.cz* [online]. 25. srpna 1999 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/prenos-dat-po-linkach-rs485-a-rs422.html>
- [49] Humidity & Temp Sensor Node for Sub-1GHz Star Networks Enabling 10+ Year Coin Cell Battery Life. *ti.com* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/TIDA-00484>
- [50] TPS61291 Low Iq Boost Converter with Bypass Operation. *ti.com* [online]. září 2014 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61291.pdf>
- [51] TPL5111 Nano-Power System Timer for Power Gating. *ti.com* [online]. červen 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpl5111.pdf>

- [52] TPS22860 Ultra-Low Leakage Load Switch. *ti.com* [online]. duben 2015 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps22860.pdf>
- [53] BAT-HLD-001-THM. *linxtechnologies.com* [online]. 31. ledna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://www.linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/bat-hld-001-thm.pdf>
- [54] SMA-15. *tme.eu* [online]. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/sma-15/konektory-sma-smb-smc/>
- [55] Ultra Small Surface Mount Coaxial Connectors - 1.9mm or 2.3mm, 2.4mm Mated Height. *mouser.com* [online]. 20. dubna 2017 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: [http://www.mouser.com/ds/2/185/U.FL\\_catalog-939761.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/185/U.FL_catalog-939761.pdf)
- [56] ISL32600E, ISL32601E, ISL32602E, ISL32603E Datasheet. *intersil.com* [online]. 22. června 2012 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/isl3/isl32600e-01e-02e-03e.pdf>
- [57] TPS5401 0.5-A, 42-V Input, Step-Down Converter. *ti.com* [online]. listopad 2014 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps5401.pdf>
- [58] Přípojka lištové sběrnice - HBUS 53,6-16P-1S BK - 2896458. *phoenixcontact.com* [online]. listopad 2014 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/cz?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2896458&library=czcs&pceck=P-01-04-03-01&tab=1>
- [59] ED310-TS.0019.01.CZ. *zpa.cz* [online]. 3. srpna 2016 [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <https://www.zpa.cz/files/files/ED310-TS.0019.01.CZ-02-2016-web.pdf>
- [60] Elektroměr AMT DDS-1Y L, přímé měření 5-45A. *elektromery.com*. [cit. 4. května 2017].  
Dostupné z: <http://www.elektromery.com/product/jednofazove-elektromery-na-listu-din-neo/elektromer-amt-dds-1y-l-prime-mereni-5-4>
- [61] CS-428/9AT mini. *autic.no* [online]. 13. září 2016 [cit. 4. května 2017]  
Dostupné z: [http://www.autic.no/doc/Catalog\\_CS428\\_9AT\\_mini\\_Eng.pdf](http://www.autic.no/doc/Catalog_CS428_9AT_mini_Eng.pdf)
- [62] Spectrum Analyzer Aaronia Spectran HF-6000-Series. *aaronia.com* [online]. 14. března 2017 [cit. 4. května 2017]  
Dostupné z: [http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum\\_Analyzer/Spectrum\\_Analyzer\\_Aaronia\\_Spectran\\_HF-6000-Series.pdf](http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum_Analyzer/Spectrum_Analyzer_Aaronia_Spectran_HF-6000-Series.pdf)

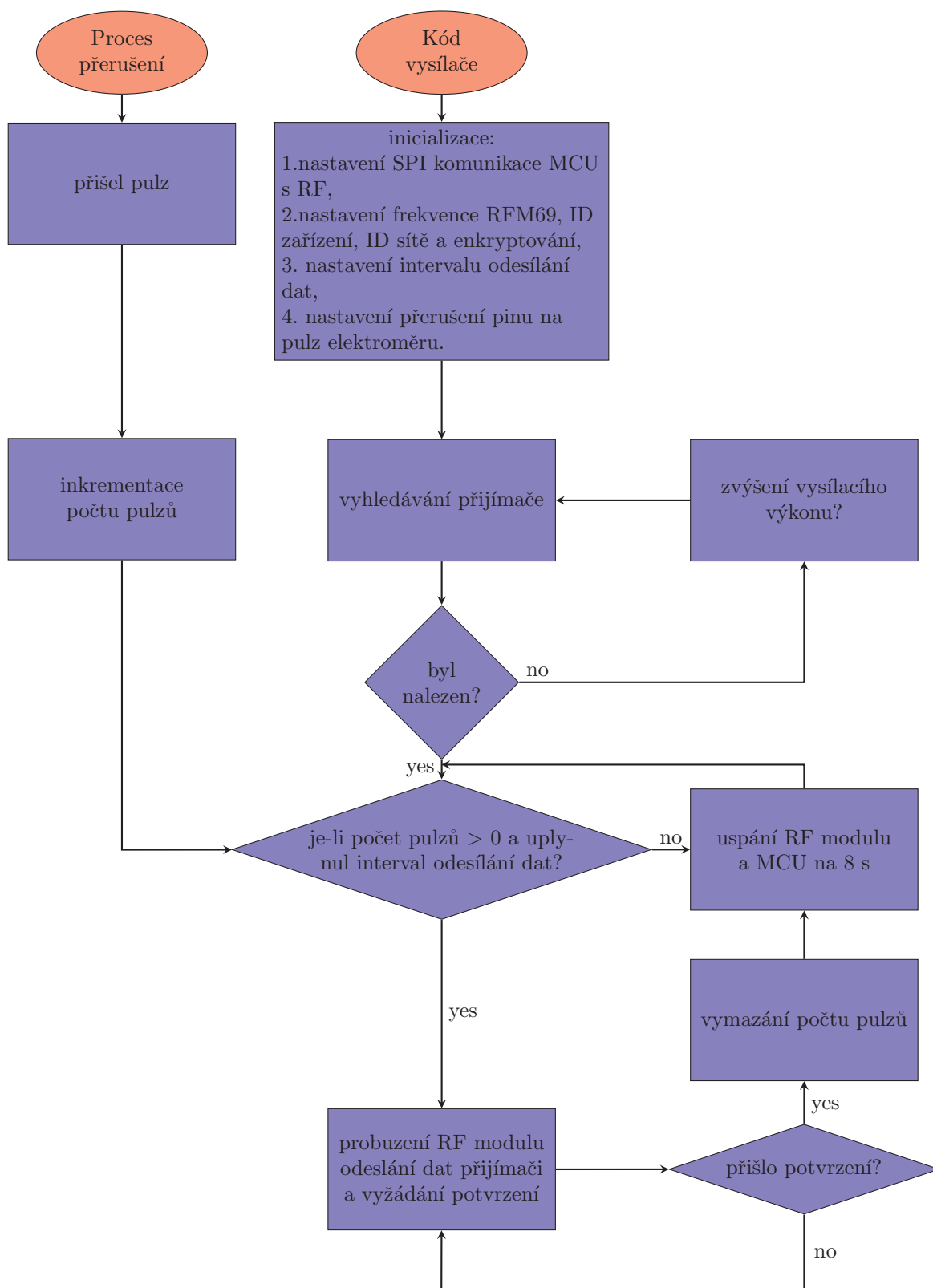


- [63] Measurement\_Antenna\_HyperLOG4000\_datasheet. *aaronia.com* [online]. 14. března 2017 [cit. 4. května 2017]  
Dostupné z: [http://www.aaronia.com/Datasheets/Antennas/Masurement\\_Antenna\\_HyperLOG4000\\_datasheet.pdf](http://www.aaronia.com/Datasheets/Antennas/Masurement_Antenna_HyperLOG4000_datasheet.pdf)
- [64] Aaronia Spectrum Analyzer Software MCS. *aaronia.com* [online]. [cit. 4. května 2017]  
Dostupné z: <http://www.aaronia.com/products/software/>
- [65] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vydání. Praha: BEN, 2000. ISBN 80-86056-47-3
- [66] VLČEK, Jiří. *Modulace a přenos signálu*. 1. vydání. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-23915-85-1
- [67] Využívání vymezených rádiových kmitočtů. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 4. května 2017]  
Dostupné z: <https://www.ctu.cz/ctu-informuje/jak-postupovat/radiove-kmitocty/vyuzivani-vymezenych-radiovyeh-kmitoctu.html>

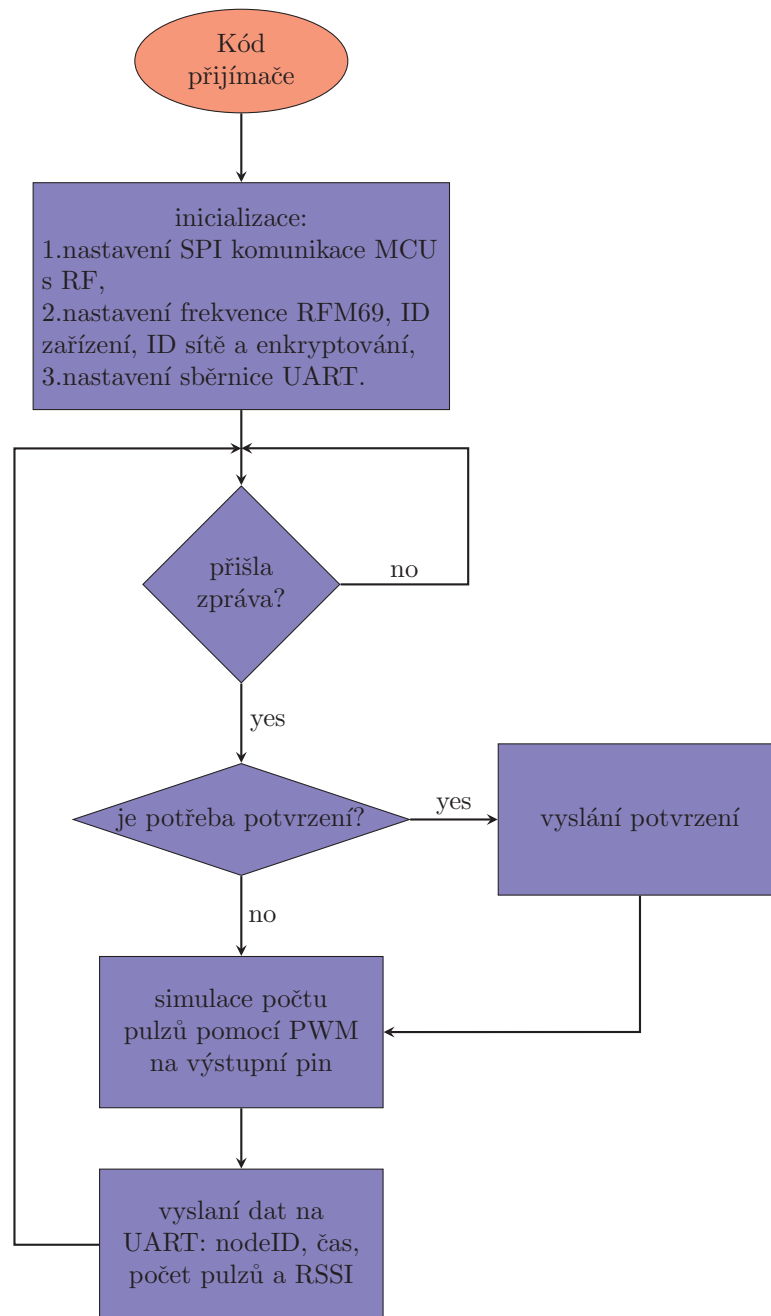
## A Blokové diagramy



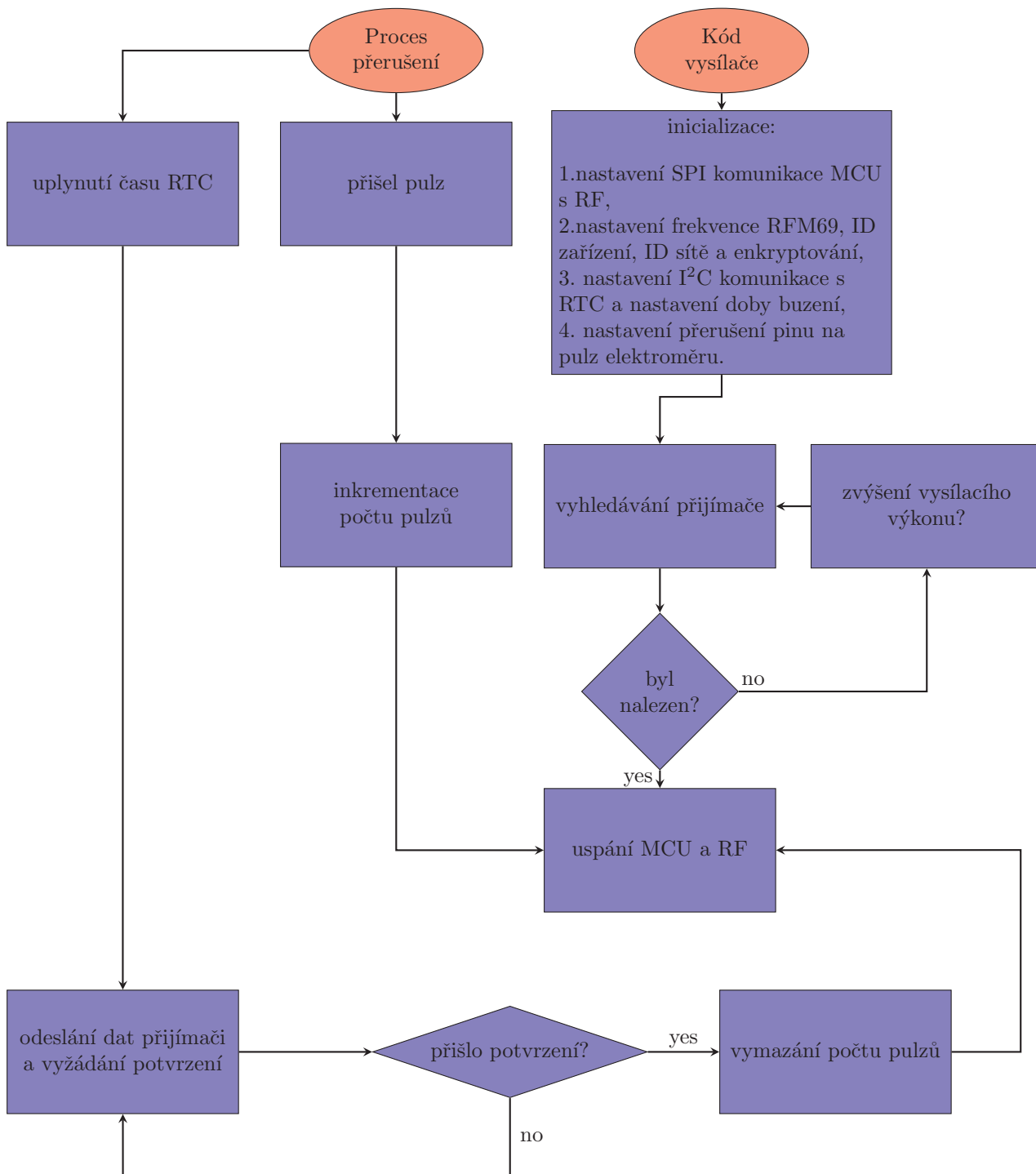
Obrázek A.1: Blokové schéma přijímače pro řešení na nepájivém poli a radina



Obrázek A.2: Blokové schéma vysílače pro řešení na nepájivém poli a radina



Obrázek A.3: Blokové schéma přijímače pro řešení Anarduino



Obrázek A.4: Blokové schéma vysílače pro řešení Anarduino

## B Programovací kódy

```
/*  
RF69 radio-Chip on In-Circuit radino RF69 modules  
for more information: www.in-circuit.de or www.radino.cc  
  
Copyright (c) 2015 In-Circuit GmbH  
  
Permission is hereby granted, free of charge, to any person  
obtaining a copy of this software  
and associated documentation files (the "Software"), to deal in  
the Software without restriction,  
including without limitation the rights to use, copy, modify,  
merge, publish, distribute, sublicense,  
and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom  
the Software is furnished to do so.  
  
THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND,  
EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT  
LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A  
PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT.  
IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR  
ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER  
LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE,  
ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION  
WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.  
*/  
//Pins and SPI setup  
#define ICRF69_SS_PIN 8  
#define ICRF69_IRQ_PIN 7 //within arduino:  
#define ICRF69_IRQ_NUM 4 //INT6 -> int = 4
```

Obrázek B.1: Inicializace RF modulu radina (převzato z [26])

```

// *****
// Driver definition for HopeRF RFM69W/RFM69HW/RFM69CW/RFM69HCW,
// Semtech SX1231/1231H
// *****
// Copyright Felix Rusu (2014), felix@lowpowerlab.com
// http://lowpowerlab.com/
// *****
// License
// *****
// This program is free software; you can redistribute it
// and/or modify it under the terms of the GNU General
// Public License as published by the Free Software
// Foundation; either version 3 of the License, or
// (at your option) any later version.
//
// This program is distributed in the hope that it will
// be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the
// implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A
// PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public
// License for more details.
//
// You should have received a copy of the GNU General
// Public License along with this program.
// If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
//
// Licence can be viewed at
// http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.txt
//
// Please maintain this license information along with authorship
// and copyright notices in any redistribution of this code
// *****
// INTO on AVRs should be connected to RFM69's DIO0 (ex on
// ATmega328 it's D2, on ATmega644/1284 it's D2)
#if defined(__AVR_ATmega168__) || defined(__AVR_ATmega328P__) ||
    defined(__AVR_ATmega88__) || defined(__AVR_ATmega8__) || defined(
    __AVR_ATmega88__)
    #define RF69_IRQ_PIN          2
    #define RF69_IRQ_NUM         0
#elif defined(__AVR_ATmega644P__) || defined(__AVR_ATmega1284P__)
    #define RF69_IRQ_PIN          2
    #define RF69_IRQ_NUM         2
#elif defined(__AVR_ATmega32U4__)
    #define RF69_IRQ_PIN          3
    #define RF69_IRQ_NUM         0
#else
    #define RF69_IRQ_PIN          2
    #define RF69_IRQ_NUM         0
#endif

```

Obrázek B.2: Inicializace RF modulu Anarduina a řešení na nepájivém poli (převzato z [25])

```

/**
*****
* @file      spirit1_appli.c
* @author    CLAB
* @version   V1.2.0
* @date      10-Sep-2016
* @brief     user file to configure Spirit1 transceiver.
*
*****
* @attention
*
* <h2><center>&copy; COPYRIGHT(c) 2014 STMicroelectronics</center
  ></h2>
*
* Redistribution and use in source and binary forms, with or
  without modification,
* are permitted provided that the following conditions are met:
* 1. Redistributions of source code must retain the above
  copyright notice,
*    this list of conditions and the following disclaimer.
* 2. Redistributions in binary form must reproduce the above
  copyright notice,
*    this list of conditions and the following disclaimer in the
  documentation
*    and/or other materials provided with the distribution.
* 3. Neither the name of STMicroelectronics nor the names of its
  contributors
*    may be used to endorse or promote products derived from this
  software
*    without specific prior written permission.

/* MCULowPowerMode_t structure fitting */
MCULowPowerMode_t MCU_LPM_cb =
{
    .McUStopMode = MCU_Enter_StopMode,
    .McUStandbyMode = MCU_Enter_StandbyMode,
    .McUSleepMode = MCU_Enter_SleepMode
};

/* RadioLowPowerMode_t structure fitting */
RadioLowPowerMode_t Radio_LPM_cb =
{
    .RadioShutDown = RadioPowerOFF,
    .RadioStandBy = RadioStandBy,
    .RadioSleep = RadioSleep,
    .RadioPowerON = RadioPowerON
};

```

Obrázek B.3: Struktura uspávající mikrokontrolér a RF modul (převzato z [37])



```

/**
*****
* @file    spirit1_appli.h
* @author  Central Labs
* @version V1.2.0
* @date    10-Sep-2016
* @brief   Header for spirit1_appli.c module
*****
* @attention
*
* <h2><center>©copy; COPYRIGHT(c) 2014 STMicroelectronics</center>
  </h2>
*
* Redistribution and use in source and binary forms, with or
  without modification,
* are permitted provided that the following conditions are met:
* 1. Redistributions of source code must retain the above
  copyright notice,
*    this list of conditions and the following disclaimer.
* 2. Redistributions in binary form must reproduce the above
  copyright notice,
*    this list of conditions and the following disclaimer in the
  documentation
*    and/or other materials provided with the distribution.
* 3. Neither the name of STMicroelectronics nor the names of its
  contributors
*    may be used to endorse or promote products derived from this
  software
*    without specific prior written permission.
*****
*/

#if defined(X_NUCLEO_IDS01A4)
    #define USE_SPIRIT1_868MHz
#elif defined(X_NUCLEO_IDS01A5)
    #define USE_SPIRIT1_915MHz
#else
#error SPIRIT1 Expansion Board is undefined or unsupported
#endif

#ifdef USE_SPIRIT1_868MHz
#define BASE_FREQUENCY            868.0e6
#endif

#define CHANNEL_SPACE            100e3
#define CHANNEL_NUMBER           0
#define MODULATION_SELECT        FSK
#define DATARATE                 38400
#define FREQ_DEVIATION           20e3
#define BANDWIDTH                100E3

#define POWER_DBM                11.6
#define POWER_INDEX              7
#define RECEIVE_TIMEOUT          2000.0 /*change the value for
    required timeout period*/

```

```

#define RSSI_THRESHOLD          -120  /* Default RSSI at
    reception, more than noise floor */
#define CSMA_RSSI_THRESHOLD    -90   /* Higher RSSI to
    Transmit. If it's lower, the Channel will be seen as busy */

/* Packet configuration parameters */
#define PREAMBLE_LENGTH        PKT_PREAMBLE_LENGTH_04BYTES
#define SYNC_LENGTH            PKT_SYNC_LENGTH_4BYTES
#define SYNC_WORD              0x88888888
#define LENGTH_TYPE            PKT_LENGTH_VAR
#define LENGTH_WIDTH           7
#define CRC_MODE               PKT_CRC_MODE_8BITS
#define CONTROL_LENGTH         PKT_CONTROL_LENGTH_0BYTES
#define EN_FEC                 S_DISABLE
#define EN_WHITENING           S_ENABLE

#define EN_ADDRESS             S_ENABLE
#define EN_FILT_MY_ADDRESS     S_ENABLE
#define EN_FILT_MULTICAST_ADDRESS S_ENABLE
#define EN_FILT_BROADCAST_ADDRESS S_ENABLE
#define EN_FILT_SOURCE_ADDRESS S_ENABLE
#define SOURCE_ADDR_MASK      0xf0
#define SOURCE_ADDR_REF       0x37
#define MULTICAST_ADDRESS     0xEE
#define BROADCAST_ADDRESS     0xFF

```

Obrázek B.4: Definice RF modulu a nastavení paketu

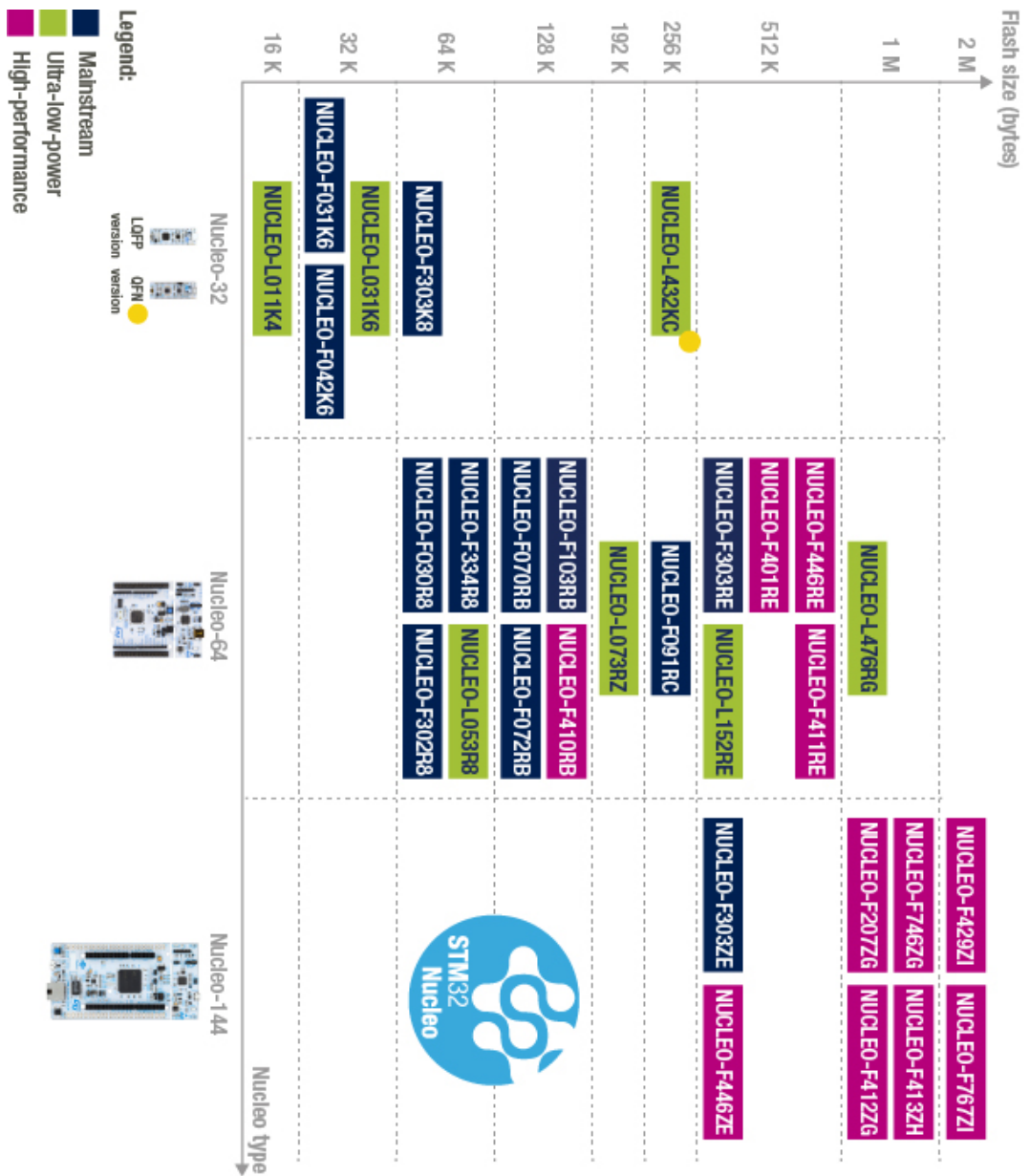
## C Ostatní obrázky



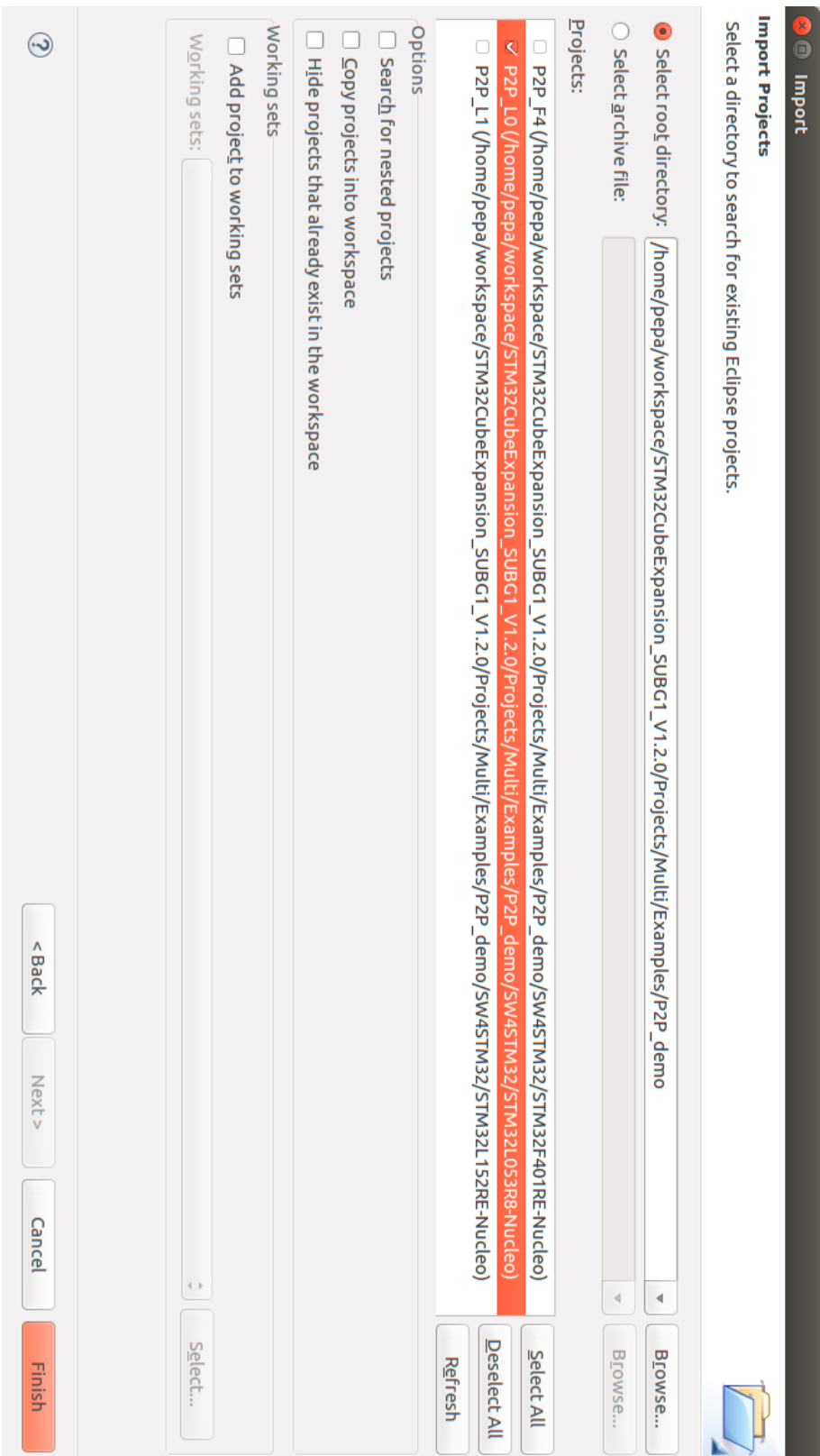
Obrázek C.1: Přijímací modul Arduino umístěný v modulu SM2-RM-GSM



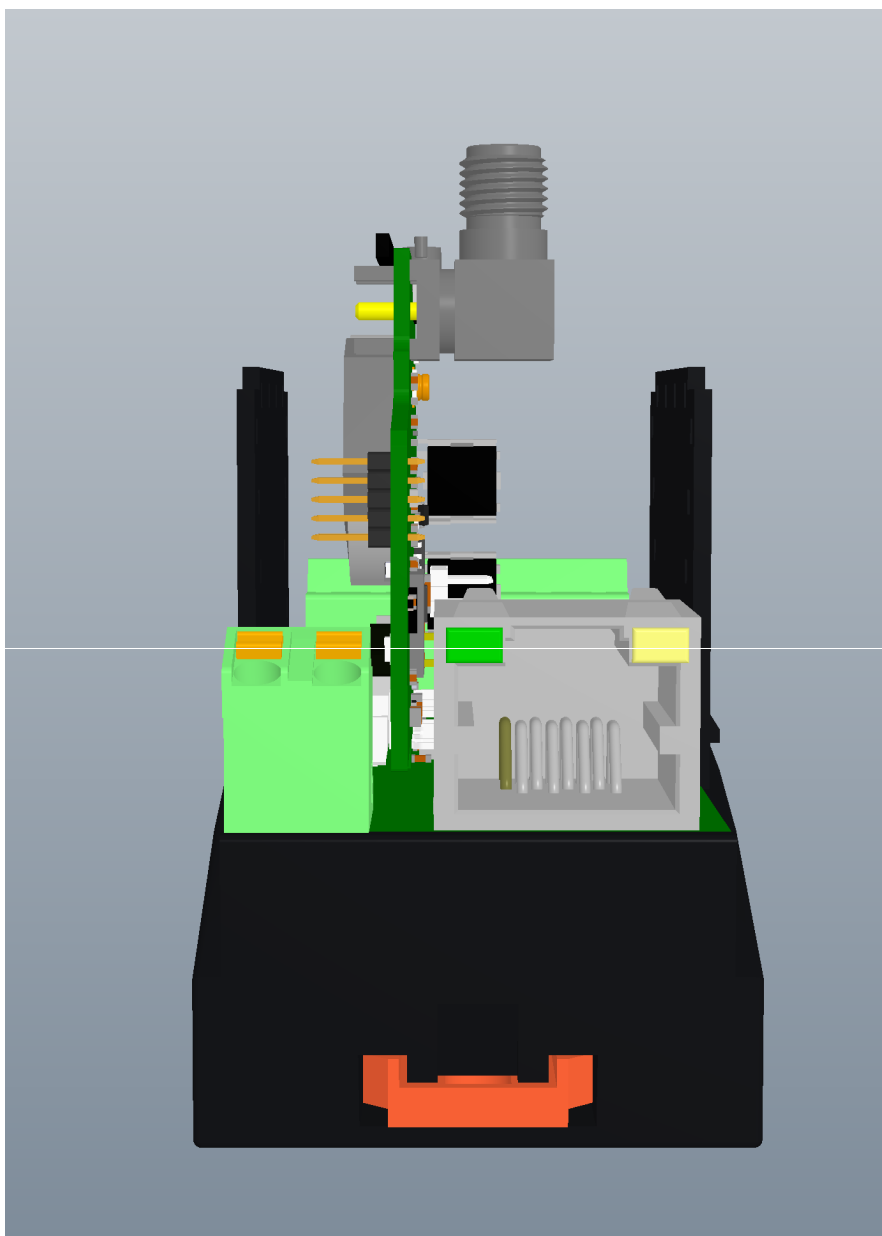
Obrázek C.2: Vysílací modul Arduino ve speciálním plastovém boxu



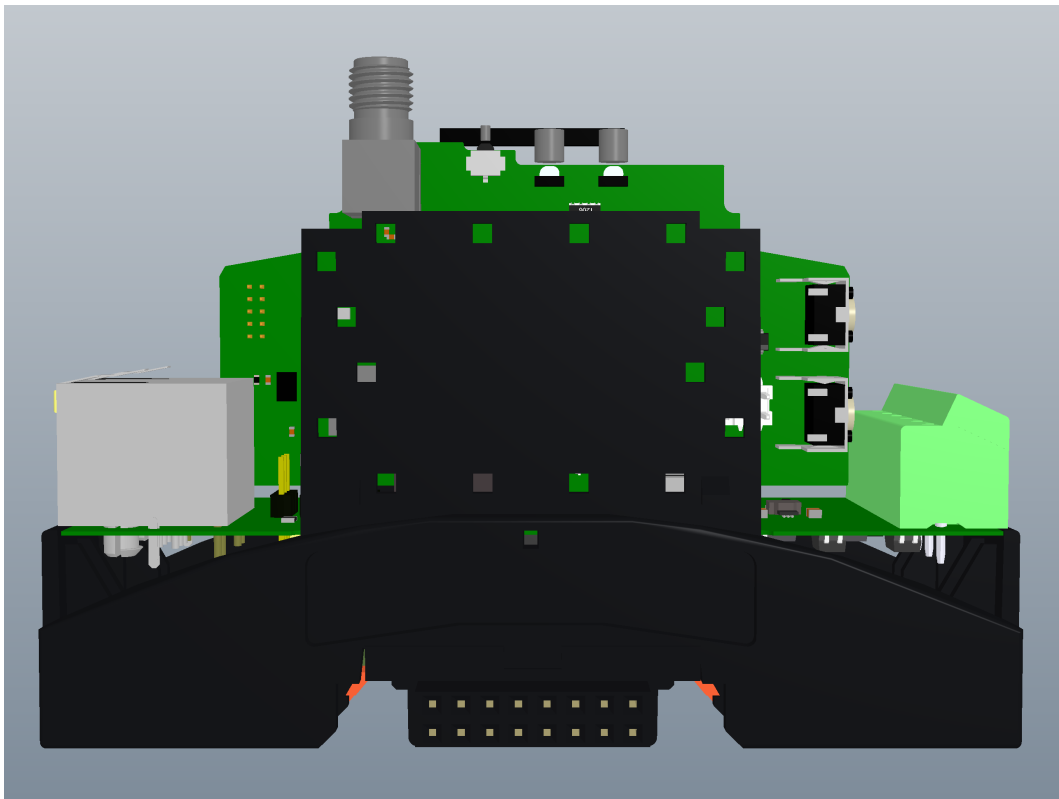
Obrázek C.3: Porovnávací graf Nucleo boardů z hlediska řady a paměti flash (převzato z [30])



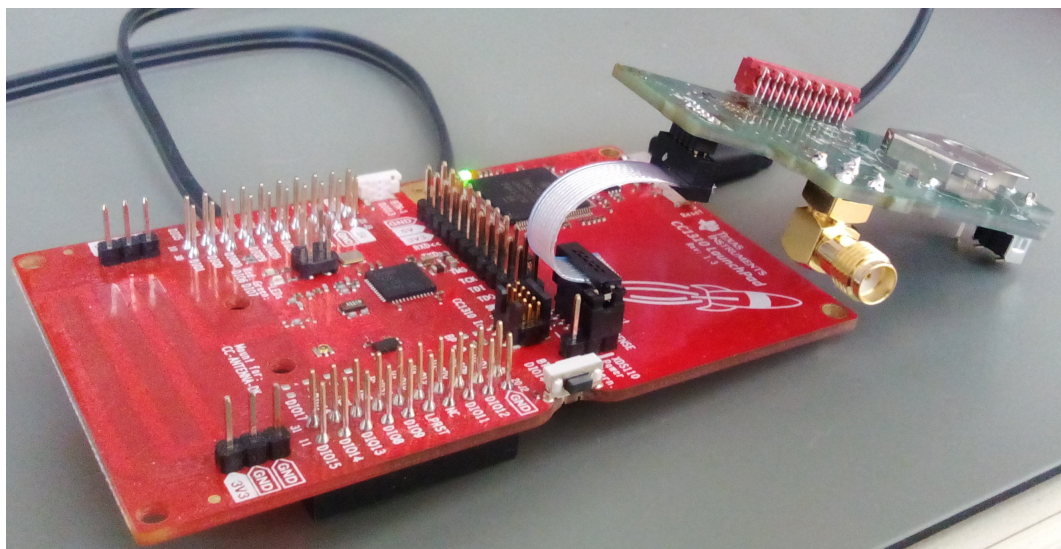
Obrázek C.4: Import projektu v programu System Workbench for STM32



Obrázek C.5: Pohled na finální řešení ve 3D ze strany RJ45 konektoru



Obrázek C.6: Pohled na finální řešení ve 3D z boku

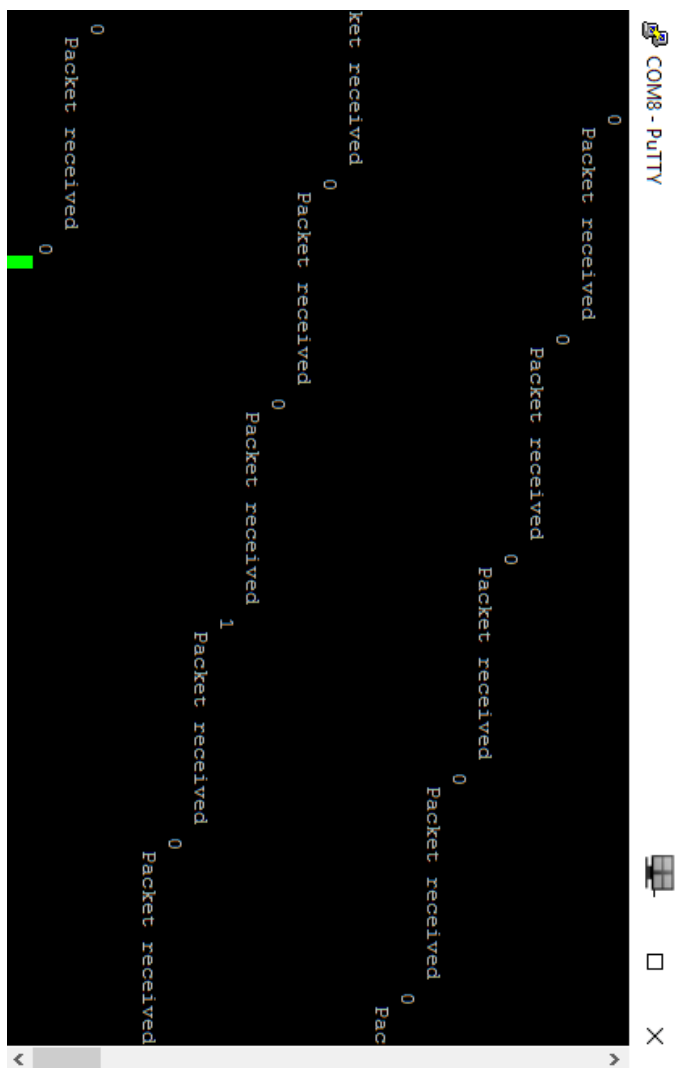


Obrázek C.7: Programování SM2-RF

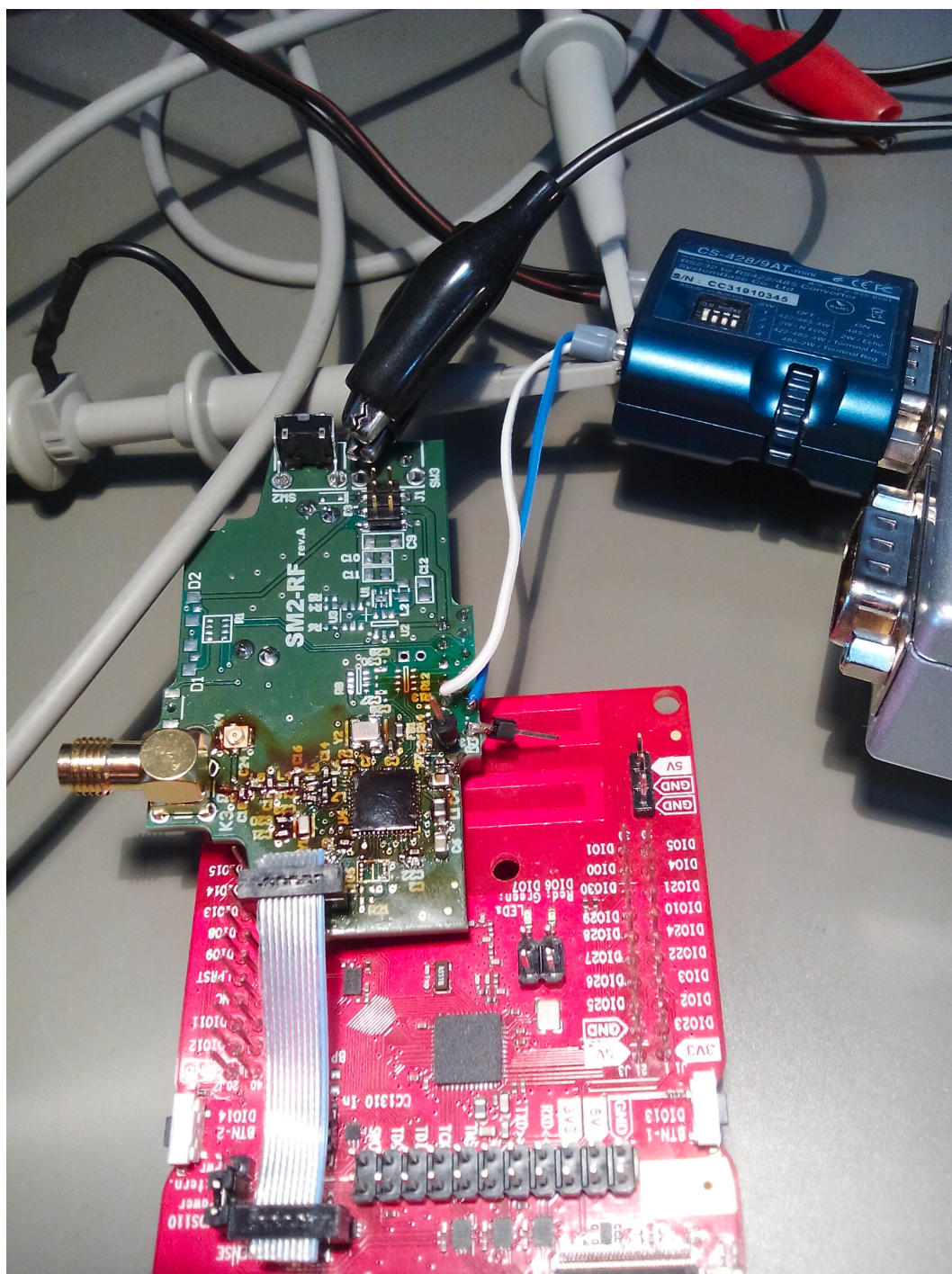




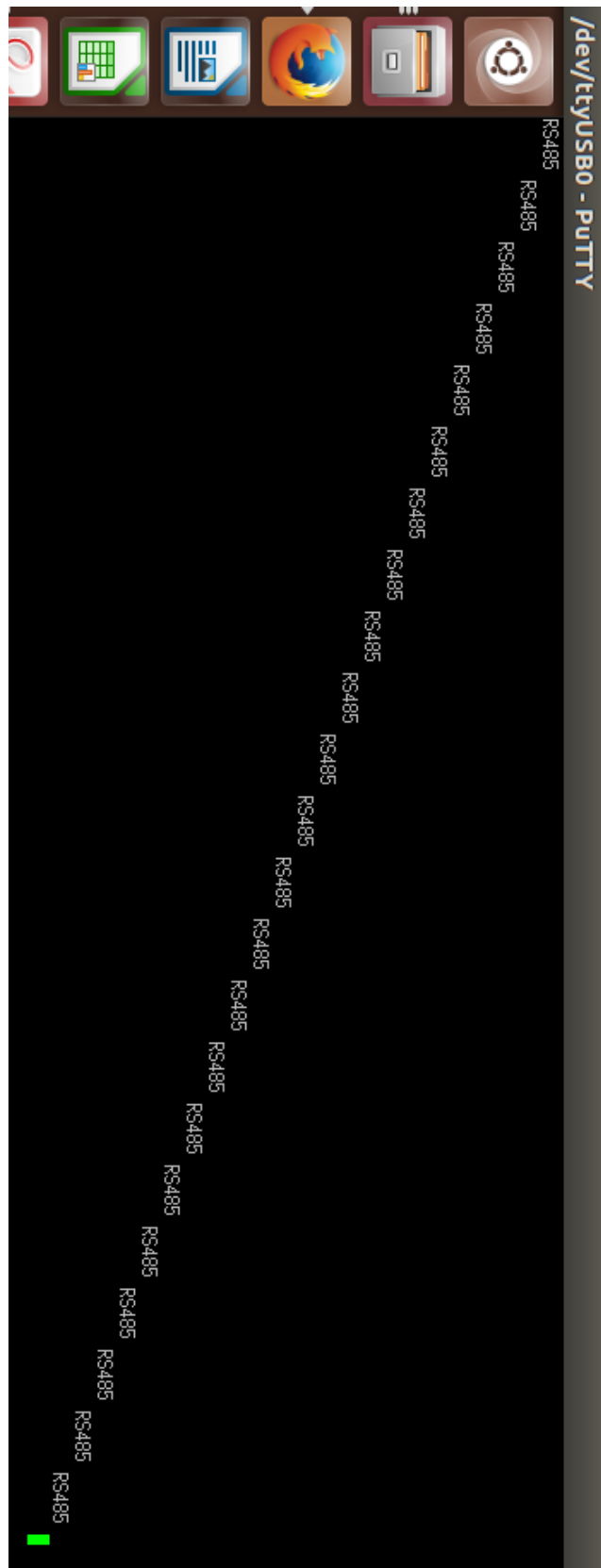
Obrázek C.8: Spotřeba CC1310 s minimálním osazením



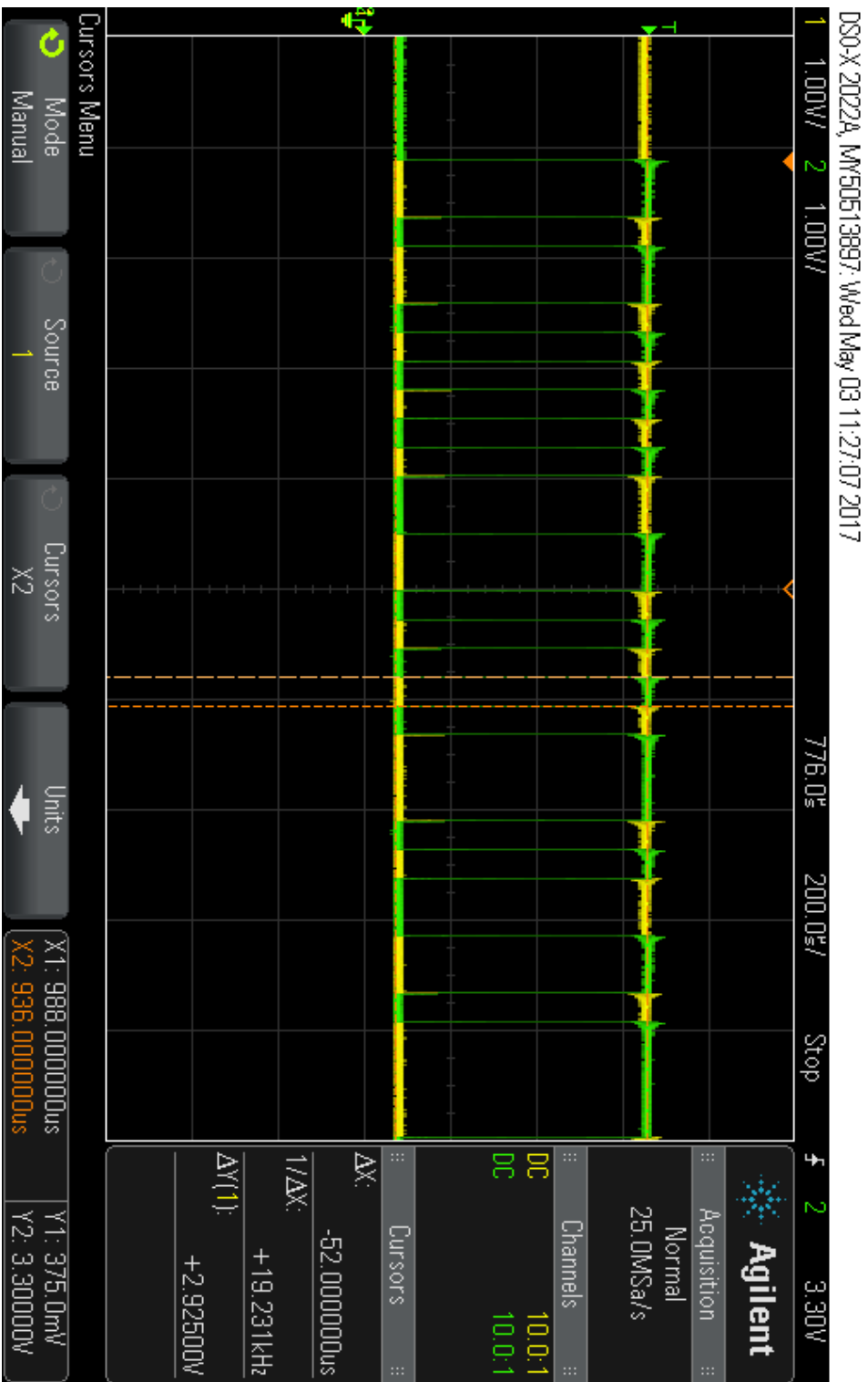
Obrázek C.9: Záznam sériové komunikace přijímače S0 vstupu



Obrázek C.10: Testování rozhraní RS485



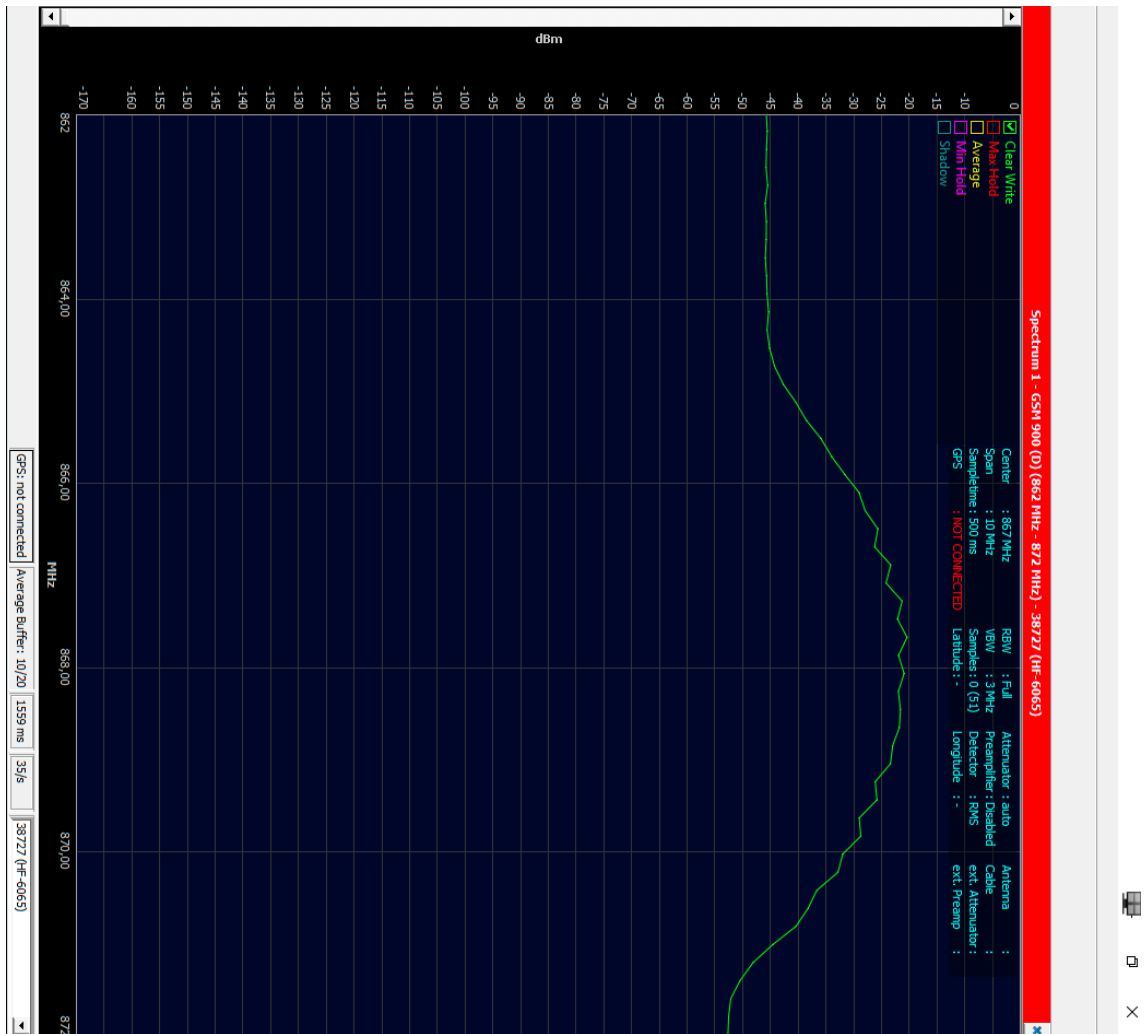
Obrázek C.11: Sledování komunikace RS485 v programu PuTTY



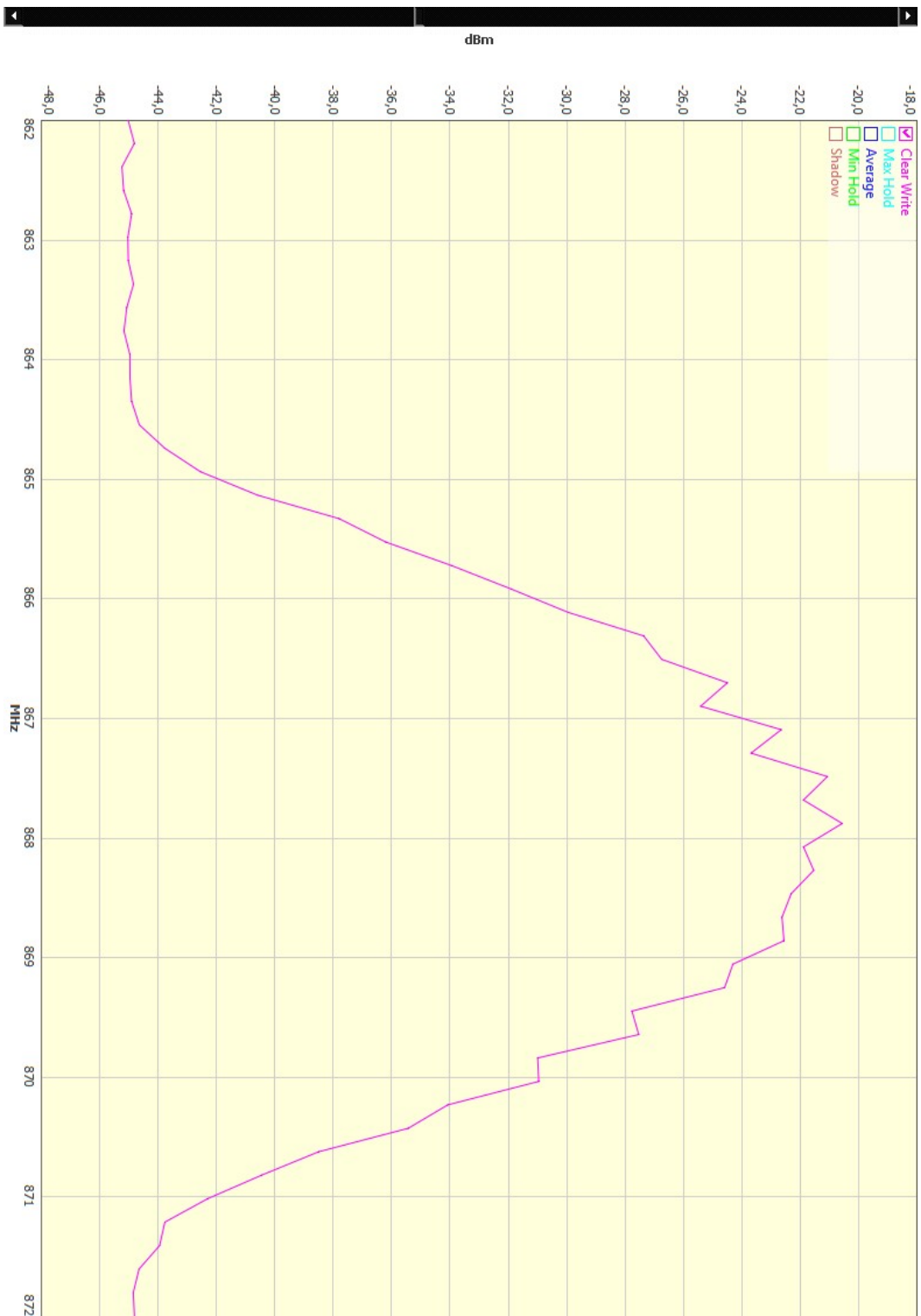
Obrázek C.12: Sledování komunikace RS485 pomocí osciloskopu



Obrázek C.13: GUI programu MCS Realtime Spectrum Analyzer Software



Obrázek C.14: Spektrum v programu MCS Realtime Spectrum Analyzer Software



Obrázek C.15: Vygenerované spektrum pro SM2-RF





Obrázek C.16: Vygenerované spektrum pro TI LaunchPad

## D Obsah přiloženého CD

- text diplomové práce
  - diplomova\_prace\_2016\_Josef\_Kracik.pdf
  - diplomova\_prace\_2016\_Josef\_Kracik.tex
  - kopie\_zadani\_diplomove\_prace\_2013\_Josef\_Kracik.pdf
- fotografie
- zdrojové kódy