



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

BEZDRÁTOVÉ ŘÍZENÍ OSVĚTLENÍ

WIRELESS LIGHTING CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Pilmajer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Pavel Pilmajer

ID: 164360

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátové řízení osvětlení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte zařízení, které bude umožňovat bezdrátovou správu osvětlovacích systémů. Zařízení bude ovládáno sběrnici DMX 512, a bude umožňovat bezdrátovou distribuci řídicího signálu do připojených světelných zařízení. Dále bude disponovat možností propojení s osobním počítačem za účelem správy systému. V rámci diplomové práce proveďte rešerši současných možností řízení, popište je a navrhněte komunikační protokol s ohledem na zadání. Dále proveďte obvodový návrh komunikačních modulů a zařízení zrealizujte. Závěrem popište dosažené parametry provozu zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou řízení osvětlovací techniky pomocí bezdrátové technologie. V práci je zahrnut popis současných možností řízení světelné techniky, dále jsou popsány metody přenosu digitálního signálu pomocí radiových vln a protokoly zabývající se zmíněnou problematikou. Součástí práce je i výběr vhodných elektronických komponent včetně návrhu elektronického zapojení a plošného spoje. Závěrem práce je realizace elektronických modulů včetně tvorby programového vybavení a měření dosažených parametrů v reálných podmínkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdrátové řízení osvětlení, bezdrátová komunikace, modulace, klíčování, ISM, SDR, IEEE 802.15.4, MiWi, RF, 868 MHz, MRF89x

ABSTRACT

Thesis deals with the issue of lighting technology control using wireless technology. Thesis includes a description of current possibilities of control light technology, methods of digital signal transmission using radio waves and protocols dealing with this issue are described. This thesis also contains a park aimed at the selection of suitable electronic components including the design of individual electronic blocks and printed circuit board. The conclusion of the thesis is the realization of electronic modules, including the creation of module software and measurement of achieved parameters under real conditions.

KEYWORDS

Wireless Lighting Control, Wireless Communication, Modulation, Keying, ISM, SDR, IEEE 802.15.4, MiWi, RF, 868 MHz, MRF89x

PILMAJER, P. *Bezdrátové řízení osvětlení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Levek.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne

(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji Ing. Vladimíru Levkovi za vedení diplomové práce a čas strávený u textové korektury. Dále děkuji Ing. Jindřichu Vavříkovi za věcné připomínky a cenné rady při zpracování. Poděkování patří i firmě ROBE lighting s.r.o. za finanční zajištění této práce.

Obsah

ÚVOD.....	- 9 -
1 ZPŮSOBY KOMUNIKACE S OSVĚTLOVACÍ TECHNIKOU.....	- 10 -
1.1 DRÁTOVÁ KOMUNIKACE.....	- 10 -
1.2 BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE	- 11 -
2 BEZDRÁTOVÉ ŘÍZENÍ OSVĚTLOVACÍ TECHNIKY	- 12 -
2.1 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE.....	- 12 -
2.1.1 <i>Digitální modulace</i>	- 12 -
2.2 BEZLICENČNÍ RADIOVÁ PÁSMÁ	- 15 -
2.2.1 <i>Pásmo ISM</i>	- 16 -
2.2.2 <i>Frekvenční pásma pro zařízení krátkého dosahu</i>	- 16 -
2.3 STANDARDY A PROTOKOLY PRO RF KOMUNIKACI	- 18 -
2.3.1 <i>Standard IEEE 802.15.4</i>	- 18 -
2.3.2 <i>Protokol MiWi</i>	- 21 -
3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ	- 25 -
3.1 ELEKTRONICKÝ NÁVRH ZAŘÍZENÍ	- 25 -
3.1.1 <i>Základní elektronické komponenty</i>	- 26 -
3.1.2 <i>Napájecí obvody</i>	- 29 -
3.1.3 <i>Interface DMX 512</i>	- 30 -
3.1.4 <i>Interface pro komunikaci se světelným zařízením</i>	- 30 -
3.1.5 <i>Interface USB</i>	- 31 -
3.1.6 <i>Interface MCU</i>	- 32 -
3.1.7 <i>Interface RF</i>	- 33 -
3.2 NÁVRH TOPOLOGIE KOMUNIKAČNÍHO PROTOKOLU	- 35 -
3.3 NÁVRH KOMUNIKAČNÍHO PROTOKOLU	- 36 -
3.3.1 <i>Paket protokolu</i>	- 36 -
3.3.2 <i>Funkce protokolu</i>	- 37 -
3.3.3 <i>Směrovací funkce protokolu</i>	- 38 -
3.3.4 <i>Šifrování komunikace</i>	- 39 -

4	REALIZACE ZAŘÍZENÍ.....	- 40 -
4.1	NÁVRH A VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE	- 40 -
4.2	PROGRAM PRO MIKROKONTROLÉR	- 41 -
4.2.1	<i>Základní členění programu</i>	<i>- 42 -</i>
4.2.2	<i>Algoritmus příjmu a vysílání DMX 512</i>	<i>- 42 -</i>
4.2.3	<i>Algoritmy síťového protokolu</i>	<i>- 44 -</i>
4.2.4	<i>Programové vybavení z pohledu uživatele</i>	<i>- 48 -</i>
5	MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH PARAMETRŮ ZAŘÍZENÍ	- 51 -
5.1	MĚŘENÍ ČASOVÝCH INTERVALŮ.....	- 51 -
5.2	PARAMETRY ZAŘÍZENÍ V REÁLNÉM PROVOZU	- 54 -
6	ZÁVĚR	- 59 -
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 61 -
8	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	- 63 -

Úvod

Osvětlení se v dnešní době stalo nedílnou součástí každodenního života. Z tohoto důvodu se neustále zvyšuje technický standard jak samotných světelných zdrojů, tak i způsobů jejich řízení. Běžnému uživateli je dnes nabízena široká škála inteligentní systémů řízení světél v domácnosti. Je proto zřejmé, že vývoj nezaostal ani u profesionálního osvětlení.

Možnosti řízení, mezi které patří například regulace intenzity světelného zdroje nebo změna úhlu vyzařovaného světelného, se již dávno staly standardem toku pro profesionální osvětlení. Dále se v poslední době i díky rozmachu LED technologie nabízí další možnosti řízení, jako například míchání barev za pomoci několika typů LED čipů, které vyzařují světelné spektrum odlišných vlnových délek. S výše uvedenými narůstajícími možnostmi řízení vznikají nové požadavky na modernizaci osvětlení různorodých typů prostor, ve kterých nemusí být z historického důvodu pamatováno na signálové vedení pro ovládání osvětlovací techniky.

Dodatečná instalace fyzického signálového vedení může být problémem nejen kvůli zdlouhavé a nákladné realizaci, ale i z estetického důvodu. Musíme také připustit, že v některých případech může být realizace signálového vedení dokonce i zcela vyloučena. Za těchto okolností jsme nuceni použít alternativní řešení. Jako reálně proveditelná alternativní řešení se nabízí vedení signálu po napájecí síti nebo vedení signálu pomocí bezdrátové technologie.

Náplní diplomové práce je rozbor problematiky vedení signálu od ovládacího zařízení ke koncovému zařízení s využitím bezdrátové technologie. Součástí práce je i návrh a realizace protokolu, který řeší problematiku přenosu signálu ve virtuální síti světél, výběr vhodného frekvenčního pásma pro bezdrátovou komunikaci a výběr elektronických komponent. Závěrem práce je fyzická realizace modulů, které jsou schopny vytvořit virtuální síť a vzájemně komunikovat pomocí bezdrátové technologie na frekvenci 868 MHz. Dosažené parametry z reálného provozu zařízení jsou shrnuty v poslední kapitole této práce.

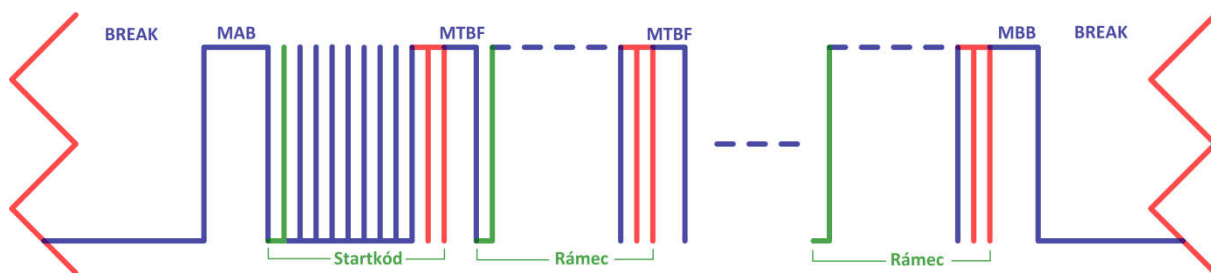
1 Způsoby komunikace s osvětlovací technikou

Moderní světelné zdroje disponují řadou funkcí, které jsou ovladatelné prostřednictvím digitální technologie. V současné době se pro řízení profesionální osvětlovací techniky používá několik způsobů vedení signálu. Běžným způsobem je použití fyzického vedení, které je tvořeno stíněným metalickým kabelem. Tento způsob vedení signálu je nejspolehlivější z důvodu minimálního zarušení informace. Dalším způsobem je použití bezdrátové technologie, která však přináší mnohá úskalí, i když je její instalace jednoduchá. V neposlední řadě je možné využít silové vedení pro přenos signálu. Tento způsob má ještě více úskalí, diplomová práce se proto tímto způsobem přenosu dat nebude dále zabývat.

1.1 Drátová komunikace

Komunikace prostřednictvím fyzického signálového vedení je běžným a spolehlivým způsobem. Pro vedení signálu mezi osvětlovacími body se obvykle využívá symetrický dvou až čtyř žilový metalický kabel s opleteným stíněním, který je zakončen konektory XLR. Tento způsob signálového vedení včetně zmíněných konektorů je využíván pro protokoly DMX 512 a RDM. Signál může být veden i prostřednictvím párů kroucené dvojlinky, která je zakončena konektorem RJ-45. Tato kombinace signálového vedení a konektorů je využívána protokolem Art-Net.

Protokol DMX 512 je provozován na sběrnici EIA 485. Tento jednoduchý komunikační protokol umožňuje propojení jednoho vysílače s maximálně 32 přijímači. Principem protokolu je cyklické vysílání paketů, ve kterých je zapouzdřeno až 512 osmibitových datových rámců. Tyto rámce jsou čitelné všemi přijímači na sběrnici. Odlišení funkcí konkrétního zařízení je zajištěno nastavením rozsahu adres pro dané zařízení. Fyzická vrstva protokolu má stanovenou přenosovou rychlost 250 kb/s, obnovovací frekvence sběrnice je při plném využití všech 512 kanálů 44 Hz. Paket protokolu DMX 512 je znázorněn na obrázku 1.



Obr. 1 Paket protokolu DMX 512

Alternativou protokolu DMX 512 je protokol Art-Net. Jedná se o komunikační protokol, který zapouzdřuje signály DMX 512 vysílačů do internetových paketů UDP. Tyto pakety jsou dále odesílány za pomoci jakéhokoli přenosového média určeného pro internetovou komunikaci. Veškerá komunikace protokolu Art-Net je provozována na portu

6454. Umožňuje-li koncové zařízení přijímat pakety protokolu Art-Net, může být využita i oboustranná komunikace, při které mohou být koncová zařízení přímo konfigurována s pomocí speciálních paketů protokolu. Zásadní rozdíl protokolu spočívá ve způsobu odesílání dat, která jsou na rozdíl od RDM protokolu odesílána pouze v případě datové změny nebo po uplynutí časového intervalu 4 sekund.

Protokol RDM vychází z protokolu DMX 512. Výsledkem je protokol zpětně kompatibilní s protokolem DMX 512 implementující obousměrnou komunikaci, která slouží pro konfiguraci a monitorování koncových zařízení.

1.2 Bezdrátová komunikace

Bezdrátová komunikace je hitem dnešní doby. S pomocí chytrého telefonu a bezdrátového připojení můžeme ovládat nespočet zařízení v domácnosti nebo například sledovat aktuální zprávy na internetových stránkách. Rozmach bezdrátové technologie a to především v oblasti mobilních zařízení s sebou nese i řadu úskalí, kterým je třeba věnovat velkou pozornost. Bezdrátové řízení osvětlovací techniky je v současné době provozováno především v bezlicenčním pásmu. Provoz na těchto nosných frekvencích je regulován českým telekomunikačním úřadem. Vysílací výkony většiny zařízení dosahují maximálních hodnot těchto regulí, čímž vzniká významné zarušení v oblasti těchto frekvencí a to zejména v hustě zabydlených lokalitách. Garance proti zarušení díky velkému množství vysílačů zaručena není.

Mimo standardní radiový šum je dnes zapotřebí zohlednit i možnost, že radiová komunikace může značně kolísat v závislosti na počtu komunikujících zařízení, které jsou potencionálními vysílači různých frekvencí. Dalším úskalím je možnost odposlechu přenášených dat, což může mít za následek vysílání falešných zpráv, které mohou narušit činnost osvětlovacího systému. Z tohoto důvodu musí být veškerá komunikace dostatečně šifrována a zabezpečena proti případnému útočníkovi.

V současné době je pro řízení osvětlovací techniky hojně využíván standard IEEE.802.11, který je označován zkratkou WiFi. Důvodem je především celosvětové bezlicenční užívání jeho frekvenčních pásem. Na trhu je k prodeji velké množství převodníků, které převádí světově nejvíce rozšířený standard DMX 512 do bezdrátové podoby. Využívají k tomu buď zapouzdření do standardní internetové sítě, nebo užití vlastních protokolů včetně různých digitálních modulací. Velkou nevýhodou tohoto pásma je hojné rozšíření pro přenos internetové komunikace. Dalších několik typů vysílačů signálu DMX 512 existuje i v ISM pásmu s frekvencí 868 MHz. Tato zařízení ovšem z velké části fungují pouze jako všesměrové vysílače, jejichž signál je pouze přijímán koncovými prvky.

2 Bezdrátové řízení osvětlovací techniky

Kapitola bezdrátové řízení osvětlovací techniky je rozdělena do tří částí. Nejprve je čtenáři nastíněn způsob komunikace bezdrátové techniky z fyzikálního pohledu. Druhá část je zaměřena na právní předpisy, které se týkají bezlicenčních pásem pro bezdrátový přenos. Závěrem jsou popsány standardy a protokoly využívané pro bezdrátovou komunikaci pro zařízení krátkého dosahu.

2.1 Bezdrátové technologie

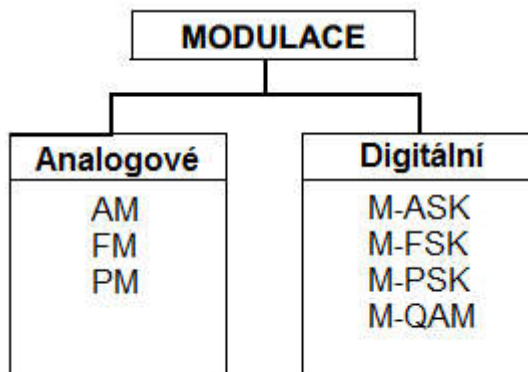
Během vývoje elektroniky docházelo k potřebám přenášet různé druhy informací bez pomoci metalických vodičů. Tyto potřeby se podařilo splnit s objevem radiových vln, které umožňují přenos energie volným prostorem s rychlostí světla. Radiové vlny jsou částí spektra elektromagnetického záření. Zdrojem těchto vln je procházející střídavý proud elektrickým obvodem. Tímto elektrickým obvodem rozumíme anténu a její vedení. Systém je ve většině případů navržen pro konkrétní frekvenční spektrum. Na stejném principu můžeme indukovat elektrické napětí na svorkách anténního systému, za podmínky působení elektromagnetického pole.

Aby bylo umožněno přenášet informace v analogové či digitální podobě pomocí radiových vln, je nutno provést modulaci nosného signálu přenášenou informací. Při modulaci dochází k ovlivnění jednoho či více parametrů. Pokud je modulační signál spojitý, mluvíme o modulacích analogových. V případě číslicového modulačního signálu hovoříme o digitální modulaci, která je označována pojmem klíčování, z důvodu přechodu nosné vlny mezi několika diskrétními stavy ovlivňovaného parametru. Je-li ovlivněným parametrem amplituda signálu, hovoříme o amplitudové modulaci (AM). Jedná se o nejstarší způsob přenosu signálu pomocí radiových vln. Tento způsob přenosu dat je používán i v dnešní době. Nevýhodou amplitudové modulace je špatná energetická bilance, způsobená vysíláním části výkonu, který není pro přenos dat užitečným. Vzniklo proto několik modifikací s částečně nebo zcela potlačenou nosnou vlnou. Je-li ovlivněna frekvence nosného signálu, je modulace nazývána jako frekvenční (FM). Nejznámějším příkladem využití frekvenční modulace je přenos audio signálu rozhlasových stanic. Třetí základní modulací je modulace fázová (PM), při které je modulována fáze nosného signálu. Tato modulace se u analogových spojitých signálů příliš nevyužívá z důvodu složitosti demodulačních obvodů. Její využití nacházíme především v digitální modulaci.

2.1.1 Digitální modulace

Základním rozdílem digitální modulace oproti modulaci analogové je použití modulačního signálu, který nabývá konečný počet stavů. V modulačním signálu je obsažena digitální informace, která je předem upravena za pomoci modulace v základním pásmu

z důvodu využití více konečných stavů. Informace o počtu konečných stavů je většinou zřejmá z názvu klíčování. Například zkratka QPSK (Quadruple Phase Shift Keying) označuje fázové klíčování s využitím čtyř konečných stavů. Pro přehlednost jsou základní typy modulací nosného signálu uvedeny na obrázku 2.

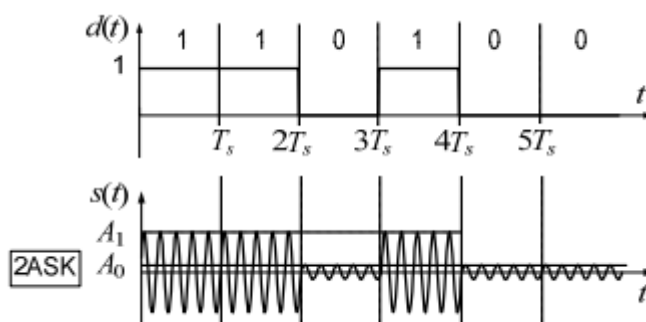


Obr. 2 Přehled základních modulací nosného signálu

Přenášená informace pomocí klíčování může nabývat konečný počet stavů, z tohoto důvodu je nutné přenášenou informaci vhodně zakódovat. Pro účely klíčování se v současné době používá velké množství kódů, od jednoduchých NRZ (No Return to Zero) až po složité, mezi které patří například HDB3 (High Density Bipolar of order 3).

Klíčování M-ASK

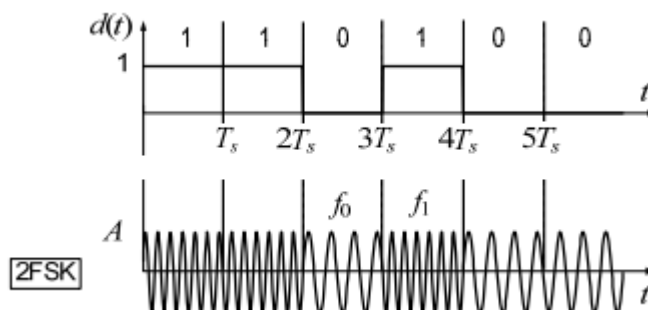
Amplitudové klíčování označované zkratkou ASK (Amplitude Shift Keying) je obdobou analogové amplitudové modulace, což s sebou nese i své nevýhody, mezi které patří citlivost na atmosférický šum, zkreslení nebo podmínky šíření na různých trasách. ASK klíčování používá konečný počet amplitud, které reprezentují jednotlivé logické úrovně. Pro zjednodušení budeme popisovat klíčování 2-ASK, které nabývá dvou logických úrovní. Logická úroveň 1 je reprezentována vysokou amplitudou nosné frekvence, logická úroveň 0 je naopak reprezentována nízkou nebo žádnou amplitudou nosné frekvence. V případě, že je nízká úroveň reprezentována nulovou hodnotou amplitudy, označujeme toto klíčování zkratkou OOK (On-Off Keying). Tato metoda je používána v telegrafii pro vysílání morseovy abecedy a je nejčastějším využitím klíčování 2-ASK. Důvodem je dosažení maximálního rozdílu amplitud mezi oběma stavy, což vede k minimální chybovosti přenosu dat. Modulace OOK je realizována součinem nosné vlny a informace, která je zakódována do binární podoby. Časová analýza amplitudové modulace 2-ASK s použitím nízké úrovně amplitudy pro logickou úroveň 0 je znázorněna na obrázku 3.



Obr. 3 Digitální modulace 2-ASK [14]

Klíčování M-FSK

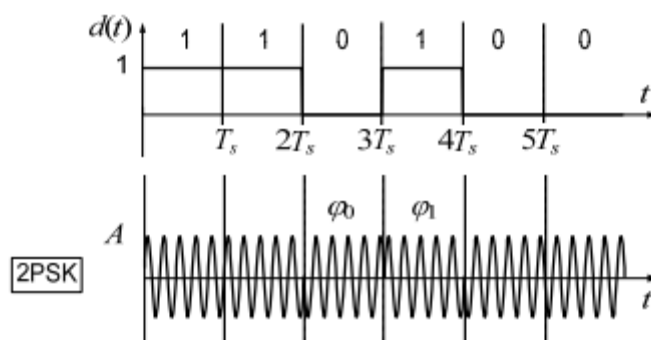
Frekvenční klíčování je označováno zkratkou FSK (Frequency Shift Keying). Vychází z analogové frekvenční modulace, jelikož je ovlivňovaným parametrem nosného signálu frekvence. Pro zjednodušení je popisováno klíčování 2-FSK nabývajícím dvou logických úrovní. Logické úrovně jsou reprezentovány dvojicí různých frekvencí. Pro logickou úroveň 1 je frekvence nazývána jako značková a pro logickou úroveň 0 jako mezerová. Je-li rozdíl dvojice frekvencí roven polovině bitové rychlosti přenášeného binárního signálu, je toto klíčování označováno jako MSK (Minimum Shift Keying). Mezi nejznámější využití klíčování MSK patří přenos informací v mobilních sítích GSM. Časová analýza klíčování 2-FSK je znázorněna na obrázku 4.



Obr. 4 Digitální modulace 2-FSK [14]

Klíčování M-PSK

Fázové klíčování je označováno zkratkou PSK (Phase Shift Keying). Ovlivňovaným parametrem klíčování je fáze nosné vlny signálu. Klíčování 2-PSK nabývá dvou logických úrovní, je proto nejjednodušším fázovým klíčováním. V praxi jsou ovšem používána především fázová klíčování, která mohou nabývat více logických stavů. U fázového klíčování je změna logické úrovně realizována pomocí okamžitého fázového posunu nosné vlny signálu o hodnotu, která je reprezentována podílem plného úhlu počtem konečných logických úrovní. V případě modulace 2-PSK je změna logické úrovně realizována fázovým posunem o 180° , což znázorňuje obrázek 5.



Obr. 5 Digitální modulace 2-PSK [14]

Klíčování QAM

Kvadrurní amplitudová modulace označována jako QAM (Quadrature Amplitude Modulation) je kombinací fázového a amplitudového klíčování. QAM využívá dvou nosných vln, které jsou vůči sobě fázově posunuty o 90° . Tyto nosné vlny jsou nezávisle na sobě amplitudově klíčovány a sečteny. Jednotlivé logické úrovně se tedy liší nejen velikostí a polaritou amplitudy, ale i fázovým posunem. Díky kombinaci těchto parametrů dochází ke snadnému navýšení počtu konečných stavů, čímž je umožněno přenášet velké množství informací prostřednictvím jednoho radiového kanálu. Kvadrurní amplitudová modulace je v dnešní době hojně využívána, její uplatnění nalezneme například u digitálního televizního vysílání DVB-T.

2.2 Bezlicenční radiová pásma

Elektronická zařízení využívající elektromagnetické vlnění pro přenos dat volným prostorem způsobují pro ostatní zařízení elektromagnetické rušení v okolí své nosné frekvence. Aby bylo zabráněno rušení a zařízení mohla smysluplně využívat radiové vlny, byla stanovena zákonná pravidla, která vyčleňují radiová pásma pro nejrůznější druhy použití. Správu těchto pravidel zajišťují příslušné organizace dané země. O správu radiového pásma a přidělování licencí se v České republice stará Český telekomunikační úřad (ČTU), který při správě postupuje v souladu se závazky, jež vyplývají z mezinárodních smluv. Tyto smlouvy vychází ze směrnic mezinárodní telekomunikační unie (ITU), která je součástí organizace spojených národů (OSN). Aby bylo možné vysílat na radiových frekvencích bez nutnosti přidělení licenčního pásma, vznikla pásma volná, neboli bezlicenční. Typický představitel bezlicenčního pásma je pásmo ISM. Při dodržení regulací, která stanovují všeobecná oprávnění, je možno tato radiová pásma volně užívat. Nevýhodou bezlicenčního pásma je absence jakékoli garance proti zarušení.

2.2.1 Pásmo ISM

Pásmo ISM je určeno pro volné použití v průmyslu, medicíně a vědě, z čehož vyplývá i zkratka vycházející z anglického slovního spojení (Industrial Scientific Medical). Elektronické zařízení ovšem nemusí využívat tohoto radiového pásma pouze pro komunikační účely, pokud dodrží podmínku minimalizace elektromagnetického rušení do okolí. Typickým příkladem takového zařízení je mikrovlnná trouba pracující na kmitočtu 2,4 GHz. Pásmo obsahuje frekvence od jednotek MHz po stovky GHz. Jeho uplatnění je proto k nalezení například u velmi populárních bezdrátových sítí typu WiFi či Bluetooth. Jednotlivá frekvenční vymezení pro ISM pásmo dle ITU jsou uvedena v tabulce 1.

Tabulka 1: Kmitočtová pásma ISM

Kmitočtové pásmo [MHz]	Střední kmitočet [MHz]
6,765 - 6,795	6,780
13,553 - 13,567	13,560
26,957 - 27,283	27,12
40,66 - 40,70	40,68
433,05 - 434,79	433,92
902 - 928	915
2 400 – 2 500	2 450
5 725 – 5 875	5 800
24 000 – 24 250	24 125
61 000 – 61 500	61 250
122 000 – 123 000	122 500
244 000 – 246 000	245 000

V české republice je povoleno využití veškerých pásem ISM uvedených v tabulce 1 s výjimkou frekvenčního pásma 902 – 928 MHz. Dále je použití frekvenčních pásem se středním kmitočtem 6,780 MHz, 61,25 GHz, 122,5 GHz, 245 GHz podmíněno povolením.

2.2.2 Frekvenční pásma pro zařízení krátkého dosahu

Short range device (SDR), neboli zařízení krátkého dosahu je elektronické zařízení určené pro komunikaci na krátkou vzdálenost. Tato zařízení pracují s malým vysílacím výkonem, čímž zmírňují rušení pro ostatní přístroje. Pro svůj provoz využívají pásma uvedená v příslušných normách, které jsou děleny dle frekvenčního rozsahu a způsobu použití. Typickým příkladem je norma EN 300 220. Tuto normu vydal Evropský ústav pro telekomunikační standardy (ETSI), který je součástí Konference evropských správ pošt a telekomunikací (CEPT) spravující radiové spektrum pro 48 členských zemí včetně České republiky. Norma je zaměřena na kmitočtový rozsah 25 – 1000 MHz, zahrnuje tedy široké spektrum přístrojů využívající jednoduchou bezdrátovou komunikaci v krátkém dosahu. Mezi

typické představitele SDR patří široká škála zařízení od jednoduchých bezdrátových zvonků až po sofistikovaná zařízení pracující na standardu IEEE 802.15.4.

Český telekomunikační úřad zohledňuje evropské normy pro zařízení krátkého dosahu a shrnuje jejich znění do všeobecného oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13. Přehled jednotlivých kmitočtových pásem všeobecného oprávnění pro nespécifikovaná zařízení krátkého dosahu je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2: Kmitočtová pásma pro SDR

Označení	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon / Intenzita elm. pole	Harmonizovaná norma
A	6765–6795 kHz	42 dB μ A/m /10 m	300 330
B	13,553–13,567 Mhz	42 dB μ A/m /10 m	
C	26,957–27,283 MHz	42 dB μ A/m /10 m nebo 10 mW e.i.r.p.	300 220
D	40,66–40,7 MHz	10 mW e.i.r.p.	
E	138,2–138,45 MHz	10 mW e.i.r.p.	
F	169,4–169,475 MHz	500 mW e.i.r.p.	
G	433,05–434,79 MHz	10 mW e.i.r.p.	
H	863,0–870,0 MHz	25 mW e.i.r.p.	
I	2400–2483,5 MHz	25 mW e.i.r.p.	300 440
J	5725–5875 MHz	25 mW e.i.r.p.	
K	24,0–24,25 GHz	100 mW e.i.r.p.	
L	57–64 GHz	100 mW e.i.r.p. 10 dBm a spektrální hustota výkonu 13 dBm/MHz e.i.r.p.	300 550
M	122–123 GHz	100 mW e.i.r.p.	
N	244–246 GHz	100 mW e.i.r.p.	

Omezení vysílání v kmitočtových pásmech uvedených v tabulce 2 je všeobecným oprávněním dále specifikováno maximálním vyzářeným výkonem, zabranou šířkou pásma a klíčovacím poměrem. Kmitočtové pásmo F, G, H a K je nadále členěno na subpásma. Z důvodu využití frekvenčního pásma H v diplomové práci je jeho rozdělení podrobněji popsáno v tabulce 3.

Tabulka 3: Kmitočtová pásma pro SRD v rozsahu 863-870 MHz

Označení	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon / intenzita elm. pole	Zabraná šířka pásma	Klíčovací poměr
H	863,0 – 870 MHz	25 mW e.r.p.		$\leq 0,1 \%$
H1	863,0 – 870 MHz	25 mW e.r.p. Spektrální hustota výkonu -4dBm/100kHz		$\leq 0,1 \%$
H2	863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.		$\leq 0,1 \%$
H3	868,0–868,6 MHz	25 mW e.r.p.		$\leq 1 \%$
H4	868,7–869,2 MHz	25 mW e.r.p.		$\leq 0,1 \%$
H5	869,4–869,65 MHz	500 mW e.r.p.	25 kHz	$\leq 0,1 \%$
H6	869,7–870,0 MHz	5 mW e.r.p.		
H7	869,7–870,0 MHz	25 mW e.r.p.		$\leq 0,1 \%$

2.3 Standardy a protokoly pro RF komunikaci

Z důvodu přehlednosti a sjednocenosti v oblasti bezdrátové komunikace vznikly standardy, ze kterých dále vychází komunikační protokoly. Tyto standardy popisují správu komunikační periferie a zahrnují hierarchické členění do několika vrstev. Skupina standardů popisující síť typu PAN, LAN a MAN je označena IEEE 802. Typickými představiteli této skupiny je standard 802.3 známý jako Ethernet nebo standard 803.11 známý pod názvem WiFi.

Komunikační protokoly vychází z těchto standardů a rozšiřují je o další vrstvy, čímž vytvářejí rozhraní pro programování. Výsledkem je snazší práce programátorů, kteří přistupují k jednotlivým vrstvám protokolu. V diplomové práci je popsán protokol IEEE 802.15.4, ze kterého dále vychází protokol MiWi. Tento protokol byl vybrán z důvodu plánovaného použití mikrokontroléru od firmy Microchip v diplomové práci.

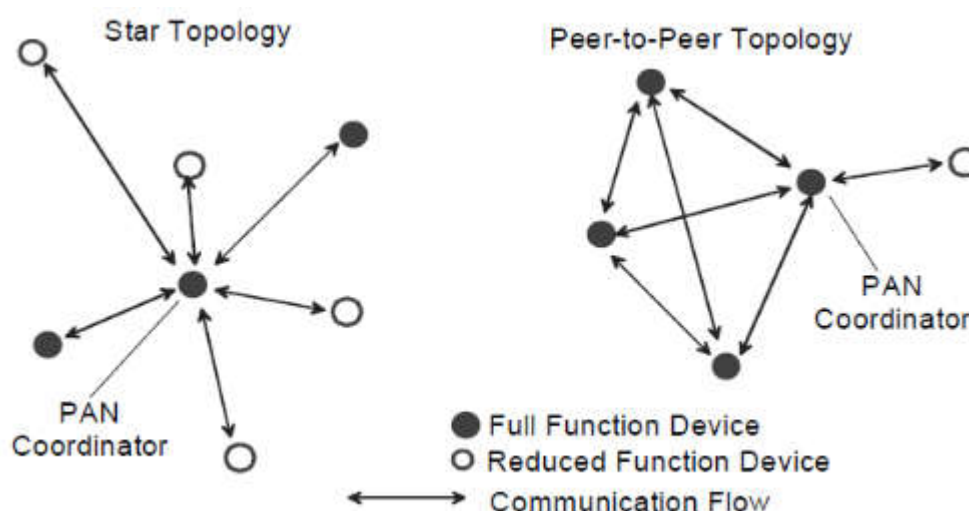
2.3.1 Standard IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 je technický standard specifikující bezdrátové sítě s nízkou přenosovou rychlostí a malou spotřebou. Standard zahrnuje model obsahující fyzickou vrstvu (PHY - Physical Layer) a vrstvu linkovou (MAC - Medium Access Control). Fyzická vrstva definuje možná frekvenční pásma a typy klíčování signálu a popisuje základní uspořádání dat a řídicích signálů pro spolehlivý přenos. Linková vrstva vytváří rozhraní pro přístup k fyzickému rádiovému kanálu a jednoduchou síťovou strukturu, která je standardem označována LR WPAN (Low Rate Wireless Private Area Networks).

Standard umožňuje využití dvou druhů fyzických adres, volitelné přidělení časových intervalů (GTS), detekci kolizí a indikaci kvality spojení. Dále jsou standardem definovány dvě topologie sítě, hvězda nebo peer-to-peer.

Topologie hvězda je založena na principu centralizované komunikace, při které veškerá komunikace prochází centrálním uzlem. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost komunikačního protokolu. Nevýhodou je nutnost bezpodmínečné funkčnosti centrálního uzlu, který je nadměrně vytižen v porovnání s ostatními uzly.

Topologie peer-to-peer je založena na principu decentralizované komunikace, při které komunikují jednotlivá zařízení mezi sebou přímo nebo pomocí nejvhodnější trasy. Výhodou tohoto řešení je rozložení zátěže sítě, nevýhodou je složitost komunikačního protokolu. Popisované síťové topologie jsou zobrazeny na obrázku 6.

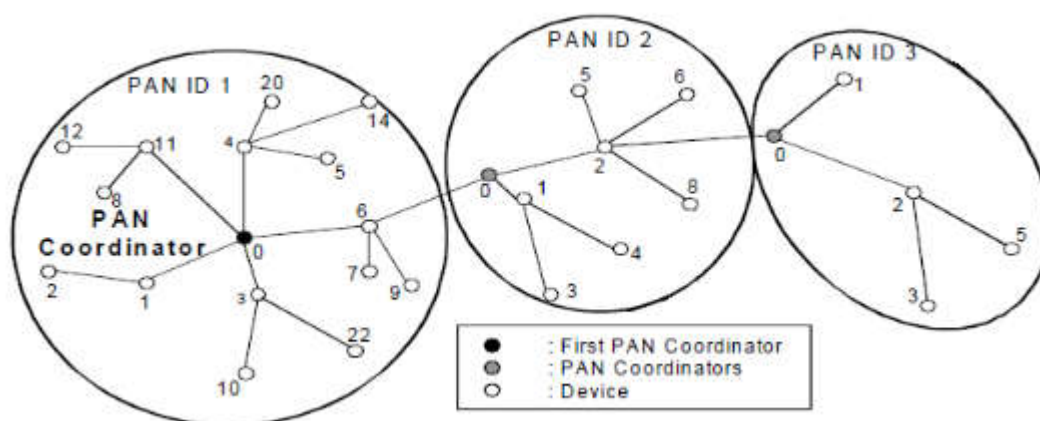


Obr. 6 Síťové topologie protokolu IEEE 802.15.4 [6]

Zařízení v síti jsou protokolem dělena na plně funkční zařízení (FFD) a zařízení s omezenou funkcí (RFD). Plně funkční zařízení může pracovat jako hlavní řídicí prvek vlastní sítě (PAN Coordinator), ke kterému mohou být připojena ostatní zařízení. Dalším operačním módem FFD je koordinátor, který slouží jako přístupový bod pro ostatní zařízení v síti. Je ovšem podřízen hlavnímu řídicímu prvku sítě (PAN Coordinator). Zařízení s omezenou funkcí jsou prosté koncové body, které mohou být připojeny vždy pouze k jednomu FFD. Výhodou implementace RFD do zařízení je úspora výpočetní a paměťové kapacity, což vede k energetickým úsporám.

Využitím topologie peer-to-peer společně s dělením síťových zařízení do několika skupin je možné realizovat topologii Cluster-Tree. Tato topologie zmírňuje požadavky na složitost komunikačního protokolu a umožňuje tvorbu velmi rozsáhlé sítě. Nevýhodou topologie je latence zpráv.

V síti s topologií Cluster-Tree se nachází první hlavní koordinátor (First PAN Coordinator), který instruuje další FFD zařízení a stanoví ho hlavním koordinátorem jeho vlastní podsítě. Ve výsledku může dle potřeby vzniknout několik PAN podsítí s vlastními hlavními koordinátory, které jsou řazeny hierarchicky. Tyto podsítě mohou navzájem mezi sebou komunikovat prostřednictvím libovolného koordinátoru v dané podsíti. Popisovaná topologie je znázorněna na obrázku 7.



Obr. 7 Síťová topologie Cluster-Tree [6]

Standard IEEE 802.15.4 je základním stavebním kamenem několika síťových protokolů, které se používají pro komunikaci v bezlicenčních pásmech 860 - 870 MHz, 902 - 928 MHz a 2400 - 2500 MHz. Typickými představiteli těchto síťových protokolů jsou ZigBee a MiWi.

Fyzická vrstva

Fyzická vrstva zajišťuje přenos dat prostřednictvím datových rámců a řízení spoje na fyzické úrovni. Přenos dat na fyzické vrstvě je realizován pomocí datových rámců PPDU (Physical Packet Data Unit).

Datové rámce fyzické vrstvy jsou složeny ze tří částí. První pětice bajtů označena SHR (Start of Header) slouží pro synchronizaci komunikace. Poslední bajt označený SFD (Start of Frame) indikuje konec synchronizační části rámce. Poté následuje bajt označený PHY Header, který obsahuje informaci o délce rámce. Poslední část označená PHY Service Data Unit (PSDU) obsahuje přenášená data o maximální velikosti 127 B. Složení popisovaného rámce je uvedeno na obrázku 8.

Preamble (4 bytes)	SFD	Frame length (7 bits)	Reserved (1 bit)	PSDU (max 127 bytes)
SHR		PHR		PHY payload

Obr. 8 Datový rámec fyzické vrstvy [6]

Radiový provoz je vymezen do sedmi různých frekvenčních pásem a detailně specifikován. Pro zjednodušení a zpřehlednění obsahu jsou níže uvedena pouze bezlicenční frekvenční pásma, která je možno legálně užívat na území České republiky, včetně specifikace radiového provozu.

- Pásmo 868 MHz, klíčování BPSK
- Pásmo 868 MHz, klíčování ASK
- Pásmo 868 MHz, klíčování QPSK
- Pásmo 2400 MHz, klíčování DSSS

Linková vrstva

Linková vrstva tvoří rozhraní, které zprostředkovává přenos dat mezi fyzickou vrstvou a vyšší vrstvou bezdrátové sítě, která ze standardu IEEE 802.15.4 vychází. Datovou strukturu nacházející se na linkové vrstvě tvoří rámec MPDU (Mac Protocol Data Unit).

Datové rámce na linkové vrstvě jsou složeny ze tří základních částí. První částí je hlavička rámce, která obsahuje kontrolní část specifikující obsah rámce, sekvenční číslo rámce, adresu příjemce a odesílatele rámce, adresu příjemce a odesílatele podsítě a pomocné bezpečnostní záhlaví. Druhá část obsahuje data vyšších vrstev. Rámec je zakončen výsledkem cyklického redundantního součtu pro kontrolu korektnosti dat. Popisovaný rámec je znázorněn na obrázku 9.

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
		Addressing fields						
MHR							MAC Payload	MFR

Obr. 9 Datový rámec linkové vrstvy [6]

2.3.2 Protokol MiWi

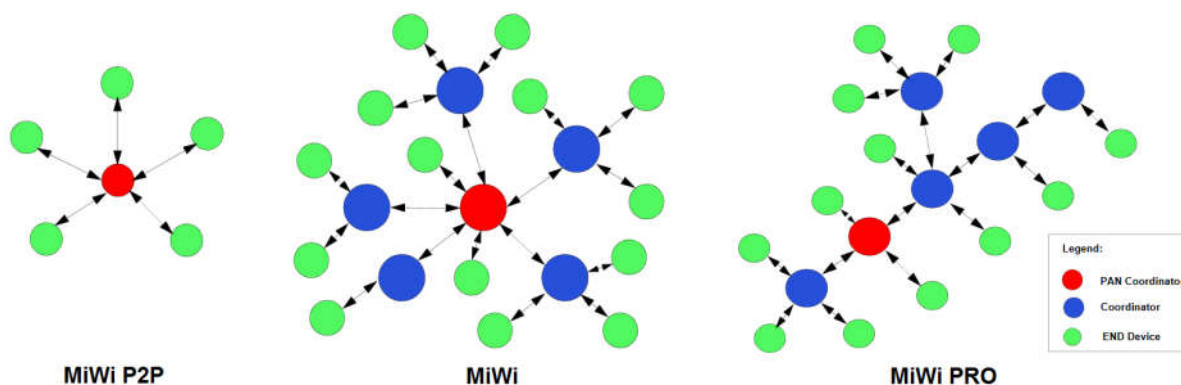
MiWi je soubor bezdrátových protokolů vytvořených firmou Microchip pro snadnou obsluhu bezdrátové komunikace. Tyto protokoly nabízejí alternativu pro jednoduchou a nízkonákladovou komunikaci na krátkou vzdálenost. Protokoly jsou založeny na standardu IEEE 802.15.4. Použití protokolů je omezeno pouze na mikroprocesory a RF transceivery firmy Microchip. Pro komunikaci s periférií RF transceiveru protokoly využívají rozhraní MiMAC, komunikace s aplikační vrstvou je zajištěna prostřednictvím rozhraní MiApp.

Mezi výhody protokolu patří přenositelnost mezi mikrokontroléry firmy Microchip a snadná použitelnost aplikačního programovacího prostředí. Výhody protokolu jsou ovšem

zastíněny řadou nevýhod. Zásadní nevýhodou je omezený okruh použití protokolu pouze na výrobky firmy Microchip. Mezi další zásadní nedostatky se řadí přímo bídná přehlednost knihovny. Orientace v kódu je velmi náročná, stejně tak, jako zmapování základní činnosti protokolu. Jako nevýhoda může být považováno i periodické volání funkcí za účelem správy bezdrátové komunikace.

Topologie protokolu MiWi

Typy možných topologií sítě vychází ze standardu IEEE 802.15.4. Nejjednodušší variantou je protokol MiWi P2P, který umožňuje použití topologie peer-to-peer a hvězda. Protokol nepodporuje žádné směrování, komunikace je proto možná pouze mezi dvěma body. V případě topologie hvězda probíhá komunikace mezi hlavním koordinátorem sítě (PAN coordinator) a koncovým zařízením. Protokol MiWi je rozšíření protokolu MiWi P2P o směrovací algoritmy. Protokol umožňuje připojit až 8 koordinátorů, z nichž každý může spravovat nejvýše 127 zařízení. Přeposílání paketů v síti je možno provést až čtyřikrát mezi koncovými body a dvakrát mezi koncovým bodem a koordinátorem. Topologie sítě protokolu MiWi představuje omezenou Cluster-Tree topologii standardu IEEE 802.15.4, jelikož každý z koordinátorů může být připojen pouze k hlavnímu koordinátoru (PAN Coordinator) sítě. Pokud je překročen maximální možný počet koordinátorů sítě, zařízení se připojí jako koncové zařízení k libovolnému koordinátoru v dosahu. Protokol MiWi PRO vychází z výše popisovaných dvou protokolů a přináší rozšířené možnosti v oblasti směrování. Rozšířením je možnost připojení koordinátora na libovolného dalšího koordinátora v dosahu, čímž vytváří hierarchickou strukturu topologie Cluster-Tree dle standardu IEEE 802.15.4. Maximální počet koordinátorů sítě je navýšen na 64. Popisované topologie jednotlivých protokolů jsou zobrazeny na obrázku 10.



Obr. 10 Topologie protokolů MiWi [8]

Paket protokolu MiWi

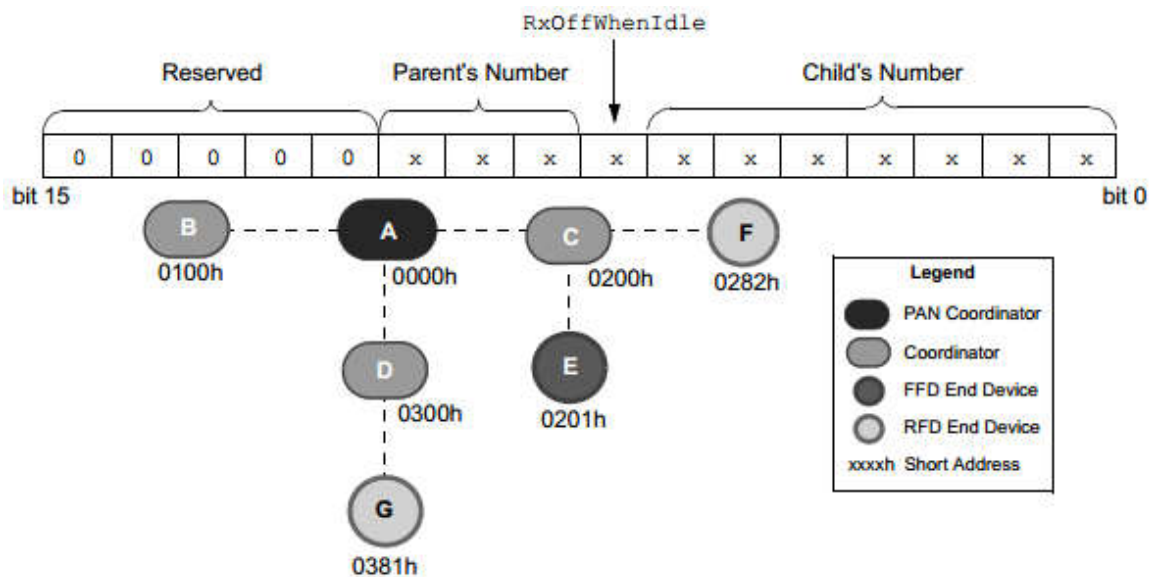
Paket MiWi protokolu obsahuje hlavičku protokolu, za kterou následují data určená vyšším vrstvám. Hlavička paketu je rozdělena na 9 částí. Pro lepší orientaci je hlavička paketu znázorněna na obrázku 11. Čísla na obrázku 11 zde představují počet bajtů.

- Hops – Počet možných přeskoků paketu.
- Frame Control – Informace o typu paketu.
- Destination PANID – Adresa nadřazeného koordinátora příjemce.
- Destination Short Address – Krátká adresa příjemce.
- Source PANID – Adresa nadřazeného koordinátora odesílatele.
- Source Short Address – Krátká adresa odesílatele.
- Sequence Number – Pořadové číslo paketu.
- Report Type – Typ hlášení
- Report ID – Obsah hlášení



Obr. 11 Paket protokolu MiWi PRO [8]

Každé zařízení v síti obsahuje trojici adres. První adresa obsahuje unikátní identifikátor zařízení. Tento identifikátor se skládá z osmi bajtů, z nichž první tři jsou za poplatek udělovány organizací IEEE. Druhá adresa obsahuje 16 bitový identifikátor koordinátora, který sdílí všechna zařízení zařazená hierarchicky pod daného koordinátora. Poslední adresa je označována jako krátká adresa (Short Address). Tato adresa je přidělena hierarchicky nadřazeným prvkem sítě a je unikátní v rámci sítě. Složení krátké adresy sítě společně s příkladem přidělení adresy pro protokol MiWi je znázorněno na obrázku 12. Protokol MiWi PRO má šestibitovou velikost části adresy obsahující adresu koordinátora (Coordinator Identifier) z důvodu možnosti využití 64 koordinátorů. V síti jsou dále rezervovány adresy 0xFFFF pro všesměrové vysílání, 0xFFFE pro zařízení FFD a 0xFFFD pro všechny koordinátory sítě.



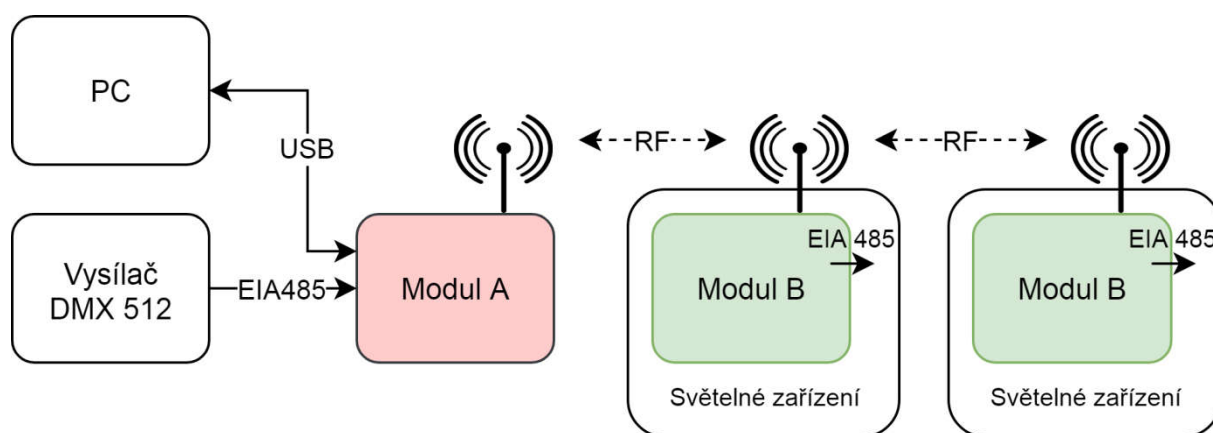
Obr. 12 Short Adress MiWi a příklad jeho přidělení [7]

Směrovací algoritmy protokolu MiWi

Protokol používá dva způsoby směrování. První způsob se nazývá Tree routing a využívá prvky stromové struktury sítě. Hlavní koordinátor sítě udržuje v paměti základní topologii sítě, kterou pomocí všesměrových zpráv odešle koordinátorům sítě. Topologie sítě je uložena formou tabulky, která obsahuje adresu koordinátora sítě. K této adrese je přiřazena adresa hierarchicky nadřazeného zařízení. Druhý způsob směrování je označen jako Mesh routing a je využíván primárně. Tato směrovací metoda se snaží najít nejkratší cestu od odesílatele k příjemci. Výhodou tohoto směrování je tedy funkčnost i v případě výpadku hlavního koordinátora, nevýhodou je nutnost uchování složitější struktury v paměti. Funkčnost směrování je podmíněna uchováním informací o sousedních zařízeních. Tyto informace jsou koordinátory sdíleny napříč sítí obdobně jako v protokolu ethernet.

3 Návrh zařízení

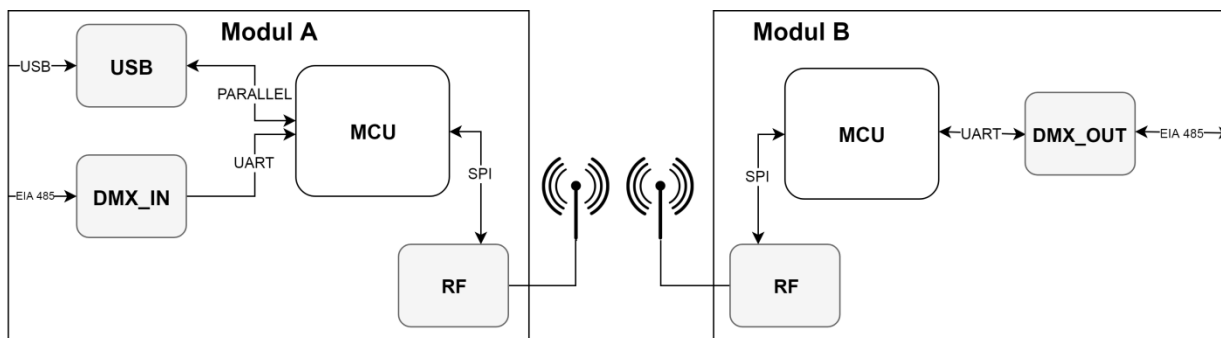
Součástí práce je návrh dvojice modulů, které jsou schopny společné bezdrátové komunikace. Modul A je samostatné zařízení, které přijímá data standardu DMX 512 prostřednictvím sběrnice EIA 485. Tato data jsou dále distribuována bezdrátovou sítí modulům B. Součástí modulu A je i připojení k osobnímu počítači prostřednictvím sběrnice USB za účelem správy komunikačních toků bezdrátové sítě. Modul B slouží jako externí periferie určená do světelných zařízení. Bezdrátová komunikace i komunikace s osobním počítačem je obousměrná, přičemž moduly B mohou přeposílat data mezi sebou za účelem delšího dosahu bezdrátové komunikace. Popisovaný princip funkce navrženého systému je znázorněn na obrázku 13.



Obr. 13 Diagram navrženého systému

3.1 Elektronický návrh zařízení

Elektronika navržených modulů je složena z diskretních součástek a integrovaných obvodů. Jednotlivé elektronické části jsou na základě funkcí děleny do bloků. Základním blokem obou modulů je mikrokontrolér, který spravuje komunikaci a obsluhuje transceiver. Blok RF obsahuje transceiver a diskretní součástky včetně frekvenčních filtrů. Tento blok komunikuje s blokem MCU pomocí sběrnice SPI. Součástí obvodu je i rozhraní pro připojení externí antény. Tyto bloky jsou součástí obou modulů a jejich elektronická schémata jsou totožná. Rozdílné jsou bloky DMX_IN, DMX_OUT a USB, které jsou určeny pro drátovou komunikaci. Modul A obsahuje bloky DMX_IN a USB, modul B obsahuje blok DMX_OUT. Blok USB spravuje komunikaci s osobním počítačem pomocí sběrnice USB a komunikuje s blokem MCU pomocí jednoduché paralelní sběrnice. Komunikace bloku DMX_IN určeného pro příjem řídicích dat s blokem MCU je pomocí sběrnice UART. Blok DMX_OUT zajišťuje přenos dat do světelného zařízení a jeho komunikace s blokem MCU je opět pomocí sběrnice UART. Popisované bloky jsou zobrazeny na obrázku 14.



Obr. 14 Blokové diagramy modulů

3.1.1 Základní elektronické komponenty

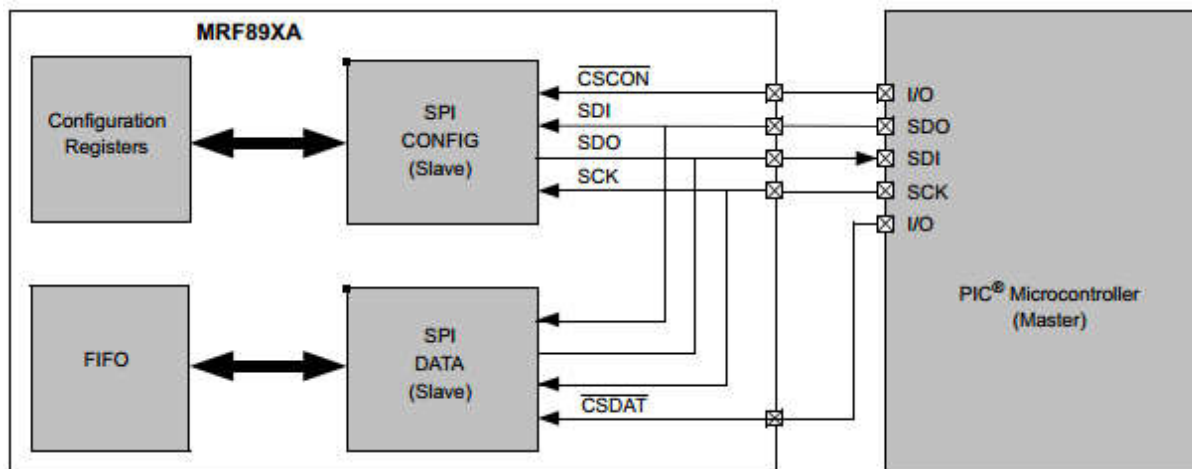
Důležitými prvky elektronického obvodu obou navrhovaných modulů jsou mikrokontrolér a transceiver. Mikrokontrolér je zařízení obsahující mikroprocesor a periférie, které vykonávají činnost nezávisle na mikroprocesoru. Transceiver sdružuje funkci bezdrátového přijímače a vysílače. Výstupem či případným vstupem zařízení, v závislosti na funkci bezdrátové části, je metalické vedení. Volba transceiveru je závislá na volbě frekvenčního pásma pro bezdrátovou komunikaci. Z důvodu velkého rozšíření ISM pásma v oblasti spotřební techniky bylo zvoleno frekvenční pásmo 863 – 870 MHz. Jako nejvhodnější transceiver pracující v uvedeném frekvenčním pásmu byl vybrán MRF 89x od firmy Microchip. Tento transceiver všemi parametry dostatečně vyhovuje potřebám tohoto projektu. Výhodou je i možnost využít knihoven výrobce, které velmi zjednoduší obsluhu transceiveru. Z důvodu výběru transceiveru od firmy Microchip byl zvolen mikrokontrolér od stejného výrobce. Pro převod signálové úrovně standardu EIA 485 na standard CMOS 3,3 byl vybrán obvod ADM2483 od výrobce Analog Devices, obrácený převod signálové úrovně zajišťuje obvod SN75176.

Transceiver MRF 89x

Integrovaný obvod MRF-89x je zařízení s nízkým odběrem elektrické energie, které v sobě integruje prvky vysílače a přijímače v sub-GHz pásmu. Vysílací obvod je kompatibilní s normou ETSI EN300-220, která je zahrnuta ve všeobecném oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13. Součástí integrovaného obvodu jsou modulátory FSK a OOK, nízkošumový zesilovač signálu, fázový závěs a další prvky zajišťující úpravu elektronické informace pro bezdrátové vysílání.

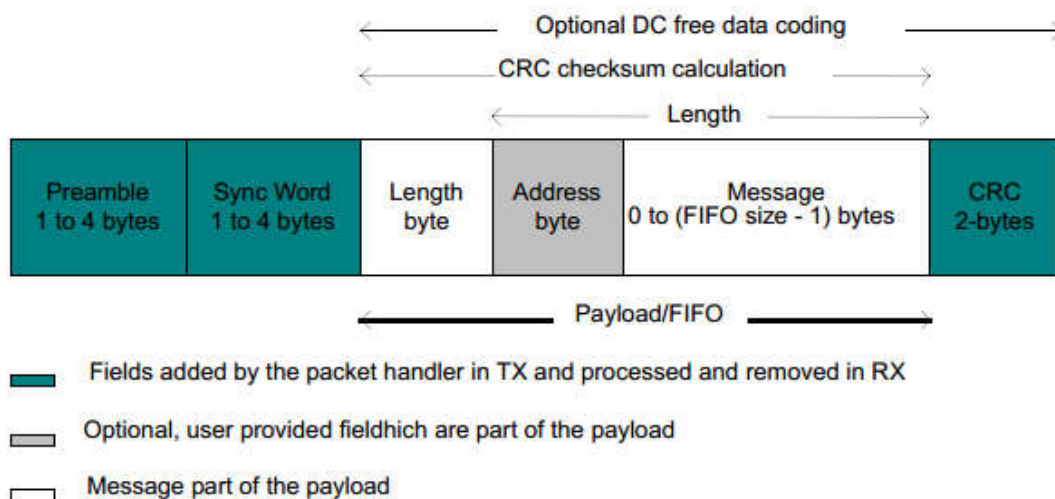
Komunikace s mikrokontrolérem je realizována prostřednictvím sběrnice SPI. Přístup na straně transceiveru je dělen do dvou bloků. Konfigurační blok slouží k nastavení komunikace a zprostředkovává přístup ke konfiguračním registrům integrovaného obvodu. Datový blok slouží ke čtení a zápisu dat do FIFO registru. Výběr komunikace mezi těmito bloky je realizován pomocí signálů CSCON a CSDAT. Maximální přenosová rychlost komunikace po

sběrnici SPI je 1 MHz pro datový blok a 6 MHz pro konfigurační blok. Blokové schéma popisované komunikace je znázorněno na obrázku 14.



Obr. 15 SPI Komunikace s Transceiverem MRF 89x [15]

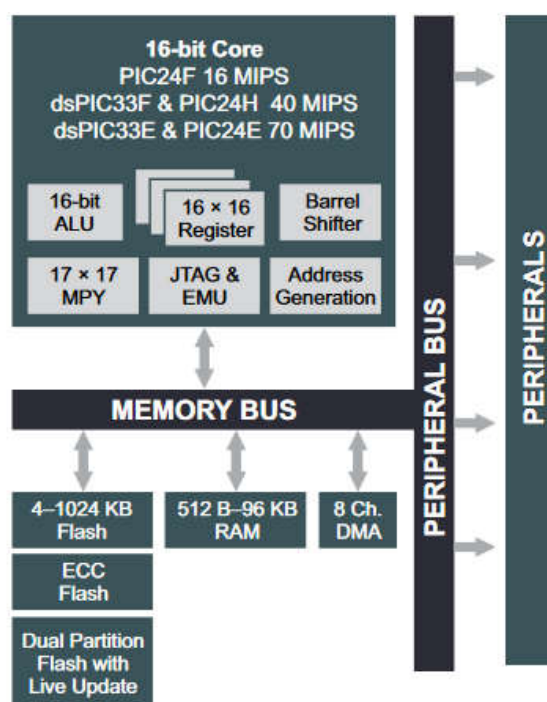
Transceiver umožňuje komunikaci ve frekvenčních pásmech 863 – 870 MHz, 950 – 960 MHz, 915 - 928 MHz a 902 – 915 MHz s klíčováním OOK nebo FSK. Šířku pásma i rychlost přenosu je možno měnit v závislosti na hodnotě konfiguračních registrů a použitým hodinovým zdroji. Proces přenosu dat může být realizován třemi způsoby. Prvním způsobem je kontinuální přenos dat, při kterém je každý přijatý bit zprostředkován mikrokontroléru prostřednictvím výstupního portu. Druhým způsobem je registrový přenos, při kterém jsou veškerá přijatá data uložena do FIFO registru, odkud jsou dále čtena prostřednictvím sběrnice SPI. Třetím způsobem je přenos prostřednictvím paketové komunikace. Paket obsahuje jednoduchou hlavičku složenou z preamble a synchronizačního slova. Preamble i synchronizační slovo mají velikost 1 až 4 B. Preamble sloužící k zaregistrování vysílací sekvence přijímačem, synchronizační slovo slouží k identifikaci sítě. Následuje bajt obsahující velikost odesílané zprávy. Pokud je zvolena konstantní velikost paketů, je tento bajt vynechán. Maximální možná velikost zprávy je omezena velikostí FIFO registru, který může dosahovat maximálně 64 B. Dále v pořadí se nachází adresa zařízení o velikosti 1 B. Následuje zpráva, která prezentuje přenášenou informaci. Paket je zakončen kontrolním redundantním součtem o velikosti 2 B. V případě využití přenosu dat prostřednictvím paketového režimu nekonstantní velikosti paketu jsou uživateli poskytnuta pouze finální data obsahující velikost zprávy, adresu zařízení a zprávu. Tato data jsou uložena do FIFO registru a zprostředkována uživateli prostřednictvím SPI sběrnice. Popisovaný paket je zobrazen na obrázku 16.



Obr. 16 Paket transceiveru MRF 89x [15]

Mikrokontrolér PIC24FJ128GA204

Jako vhodný mikrokontrolér pro danou aplikaci byl vybrán 16-ti bitový mikrokontrolér PIC24FJ128GA204. Mikrokontroléry řady PIC24F jsou nákladově efektivní a nízkopříkonová zařízení firmy Microchip, která dosahují výkonu až 16 milionů instrukcí během jedné sekundy. Součástí zařízení jsou hardwarové bloky pro práci s šifrovanými informacemi. Dešifrování i šifrování dat tedy nezatěžuje výpočetní výkon mikroprocesoru. Výhodou je i propracovaný generátor náhodných čísel určený pro generování bezpečnostních



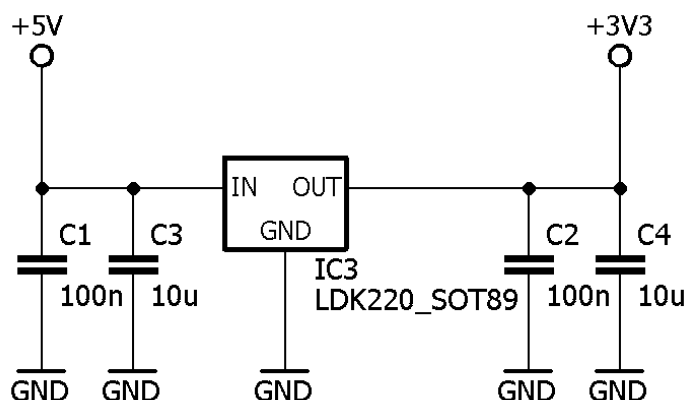
Obr. 17 Blokový diagram mikrokontrolérů řady PIC24F

klíčů. Mikrokontrolér disponuje také periferií USB v 2.0 On-The-Go, která umožňuje komunikovat v obou komunikačních rolích standardu USB. Mikroprocesor může vykonávat 16 milionů instrukcí během jedné sekundy při maximální hodinové frekvenci 32 MHz. Samozřejmostí jsou periferie typu A/D převodník, čítač/časovač i sběrnice UART, SPI a I2C. Rozsah napájecího napětí mikrokontroléru je 2,0 V až 3,6 V. Na obrázku 17 je znázorněn blokový diagram mikrokontrolérů řady PIC24F, na kterém jsou patrné jednotlivé elektronické bloky a jejich vzájemné propojení.

3.1.2 Napájecí obvody

Důležitou částí elektronického obvodu, která není zahrnuta v blokovém diagramu modulů, jsou napájecí obvody. Elektronické zapojení těchto napájecích obvodů je v obou modulech řešeno stejným způsobem.

Modul A je samostatné zařízení, jehož aktivní elektronické součástky vyžadují napájení stejnosměrným napětím o velikosti 5 V a 3,3 V. Zdrojem elektrické energie je stejnosměrné napájecí napětí 5 V, které je poskytováno sběrnicí USB. Pro získání napětí o úrovni o velikosti 3,3 V je napájecí obvod doplněn stabilizátorem napětí. Standard USB specifikuje maximální proudový odběr 500 mA a 100 mA před enumerací zařízení. Reálnou spotřebu celého modulu ovšem nelze přesně stanovit. Je totiž závislá na okamžitém zatížení mikroprocesoru a pracovním stavu, ve kterém se nachází transceiver. Odhadovaná maximální spotřeba by u obou modulů neměla přesáhnout hodnotu 100 mA. Výhodou napájení ze sběrnice USB je možnost použití libovolného napájecího zdroje určeného pro napájení nejrozličnějších typů mobilních zařízení. Pro stabilizaci napětí na hodnotu 3,3 V slouží lineární stabilizátor napětí s nízkým napětíovým úbytkem, jehož výhodou je menší energetická ztráta oproti konvenčním lineárním regulátorům, LDK220 od firmy ST Microelectronics. Tento stabilizátor udržuje konstantní výstupní napětí 3,3 V při rozsahu vstupního napětí 3,6 V až 13,2 V. Pro správnou funkci obvodu musí být odebírán výstupní proud v rozsahu 5 mA až 200 mA. Schéma zapojení napájecího obvodu modulu A je znázorněno na obrázku 18.

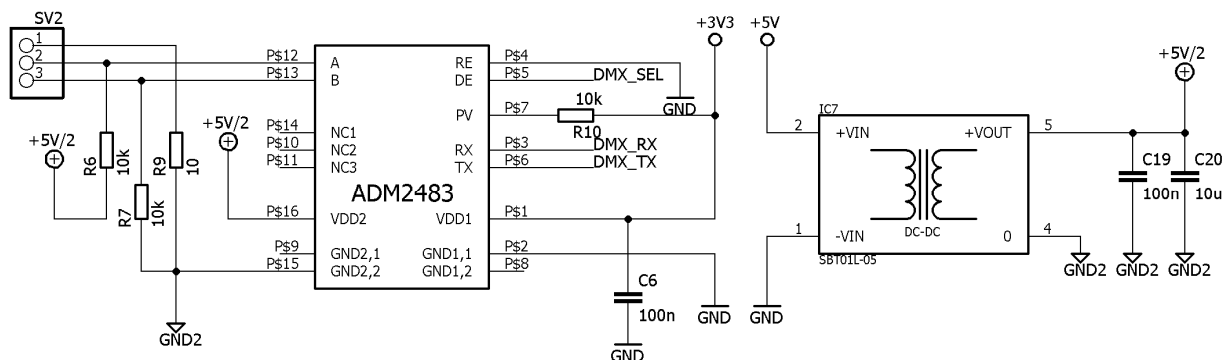


Obr. 18 Schéma zapojení napájecího obvodu modulu A

Modul B je navržen pro integraci do světelného zařízení. Napájení bude realizováno pomocí 5 V stejnosměrného napájecího napětí ze světelného zařízení. Aktivní elektronické součástky modulu vyžadují stejně jako u modulu A napájení stejnosměrným napětím o velikosti 5 V a 3,3 V. Napájecí napětí je stabilizováno na požadovanou hodnotu pomocí napětěvého stabilizátoru LDK220 stejným způsobem, jako v modulu A.

3.1.3 Interface DMX 512

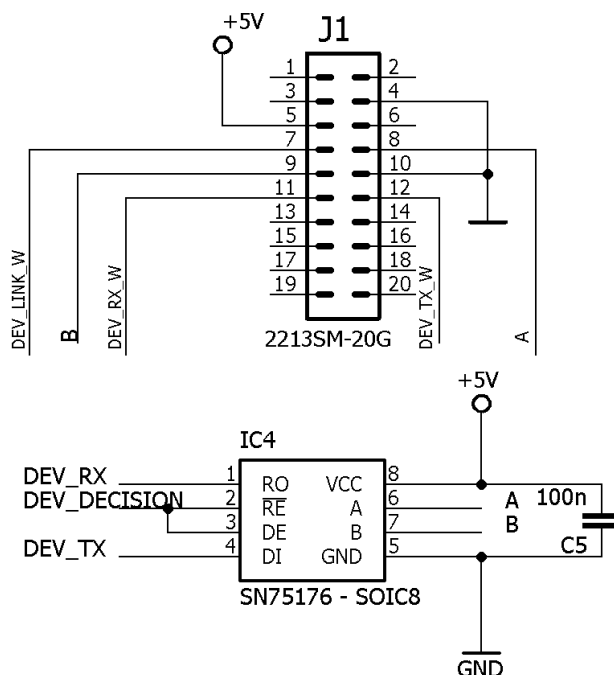
Interface DMX 512 představuje elektrický blok, který je označen jako DMX_IN v blokovém diagramu modulu. Funkcí tohoto bloku je převod napětěvé úrovně ze standardu EIA 485 na standard CMOS 3,3 V pomocí integrovaného obvodu ADM2483. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 19. Data protokolu DMX 512 jsou přivedena konektorem na piny A a B integrovaného obvodu ADM2483. Součástí bloku je i galvanicky oddělený převodník stejnosměrného napětí, který je využit pro napájení vstupní části integrovaného obvodu ADM2483. Výhodou použití obvodu ADM2483 je galvanické oddělení celé signálové části a možnost využití half-duplex komunikace. Data jsou po převodu napětěvé úrovně poskytována bloku MCU.



Obr. 19 Schéma zapojení interface DMX 512

3.1.4 Interface pro komunikaci se světelným zařízením

Blok nazývaný DMX_OUT zajišťuje signálové a výkonové propojení se světelným zařízením včetně napětěvé konverze. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 20.

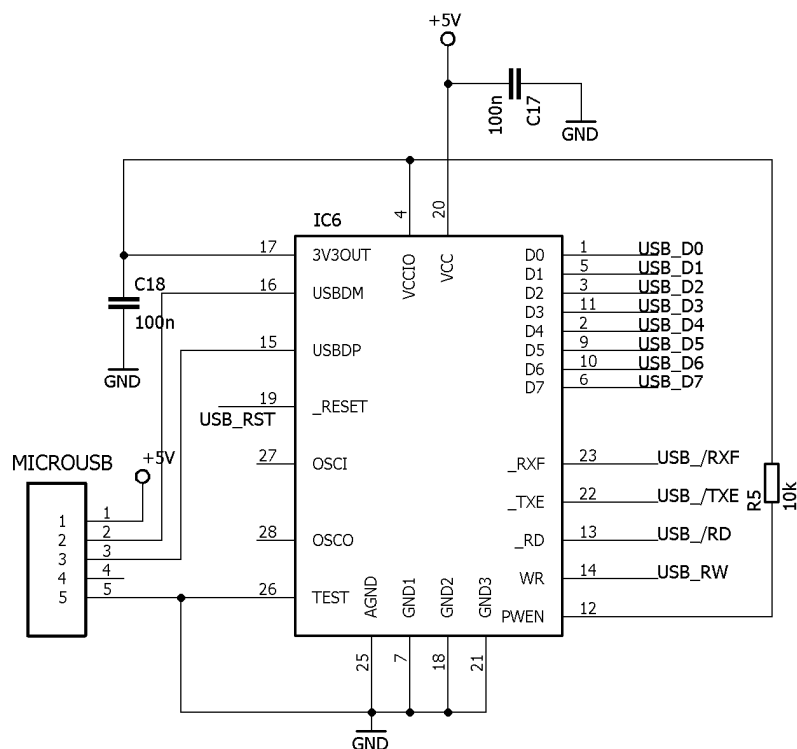


Obr. 20 Schéma zapojení interface pro komunikaci se světelným zařízením

Pro datovou komunikaci, obsahující řídicí pokyny určené pro světelné zařízení, je využita sběrnice EIA 485, na které jsou data odesílána protokolem DMX 512. K převodu napětíové úrovně je použit integrovaný obvod SN75176. Komunikace zajišťující správu světelného zařízení je realizována prostřednictvím přímého dvou vodičového propojení periférií UART, které jsou obsaženy v bloku MCU a světelného zařízení.

3.1.5 Interface USB

Interface USB, označovaný výše jako blok USB, slouží pro obousměrnou komunikaci s osobním počítačem. Hlavní komponentou tohoto bloku je integrovaný obvod FT245, který vytváří virtuální sériový port na straně osobního počítače. Přenášená data slouží ke správě vytvořené sítě a k případnému monitorování stavu připojených světelných zařízení. Komunikace integrovaného obvodu s blokem MCU je řešena za pomoci osmibitové paralelní sběrnice. Schéma zapojení bloku USB je znázorněno na obrázku 21. Elektronické schéma vychází z katalogového zapojení. S využitím 5 V napájecího napětí je možno obvod provozovat s interním oscilátorem. Napětíový standard obvodu je s pomocí interního stabilizátoru a elektronického zapojení CMOS 3,3 V, čímž je zachována správná kompatibilita s blokem MCU.



Obr. 21 Schéma zapojení interference USB

3.1.6 Interface MCU

Hlavní část blokové struktury tvoří blok MCU, který obsahuje mikrokontrolér a diskrétní součástky doplňující jeho funkčnost. Mikrokontrolér využívá pro generování hodinového signálu externí krystal, který je doplněn vazebními kondenzátory o velikosti 30 pF. Kapacita těchto kondenzátorů je závislá na zatěžovací kapacitě použitého krystalu, kapacitě pinů, na které je krystal připojen a kapacitě cesty na plošném spoji. Výpočet hodnoty kondenzátorů je znázorněn na rovnici 1.

$$C_{L1} = \frac{C_{x1} * C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} \rightarrow C_{x1} = C_{x2} \rightarrow C_{L1} = C/2 \quad (1)$$

$$C_L = C_{L1} + C_{STRAY(PCB)} + C_i \quad (C_{STRAY} = 10 \text{ pF}, C_i = 5 \text{ pF}, C_{L1} = 2 * 15 \text{ pF})$$

$$2 * 15 \text{ pF} = \frac{C}{2} + 10 \text{ pF} + 5 \text{ pF}$$

$$C = 30 \text{ pF}$$

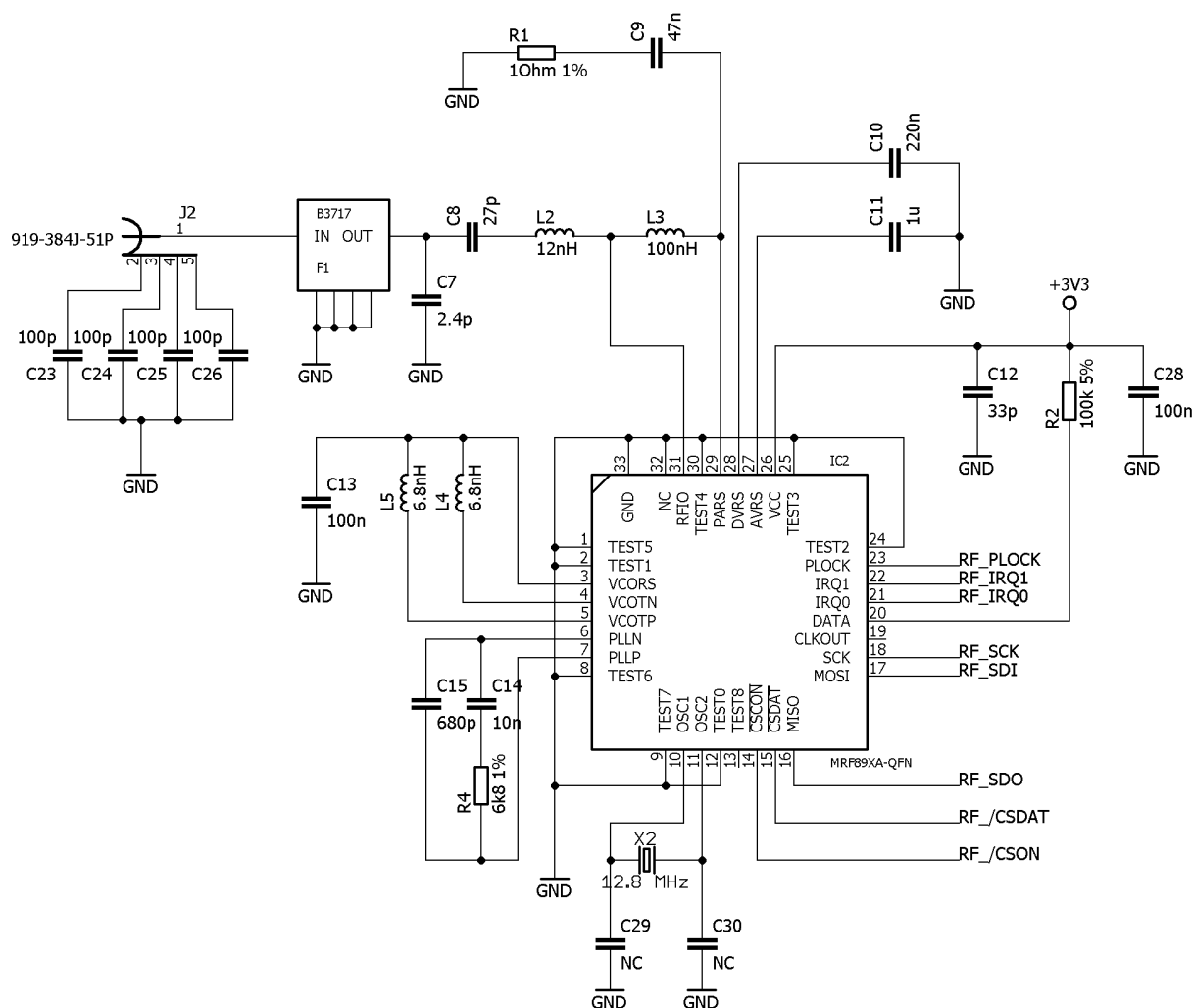
Jednotlivé bloky jsou v bloku MCU připojeny přímo k mikrokontroléru. Blok RF zajišťující úpravu dat pro bezdrátovou komunikaci využívá sběrnici SPI. K realizaci této komunikace je proto v mikrokontroléru použita periferie SPI a externí vstupy přerušení. Pro komunikaci s bloky DMX_IN a DMX_OUT jsou v mikrokontroléru použity periferie UART. Blok USB využívá paralelní sběrnici a pro jeho řízení je na straně mikrokontroléru využito

[illegible]

3.1.7 Interface RF

- 33 -

Výpočet impedance při dodržení je uveden v rovnici 2. Konstanta W reprezentuje šířku signálové cesty, konstanta H reprezentuje sílu základního materiálu a konstanta ϵ_r reprezentuje relativní permitivitu základového materiálu.



Obr. 23 Obvodové zapojení bloku RF

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_R + 1}{2} + \left(\frac{\varepsilon_R - 1}{2 * \sqrt{1 + 12 * \frac{H}{W}}} \right) [-] \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{120 * \pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} * [\frac{W}{H} + 1,393 + \frac{2}{3} \ln (\frac{W}{H} + 1,444)]} [\Omega]$$

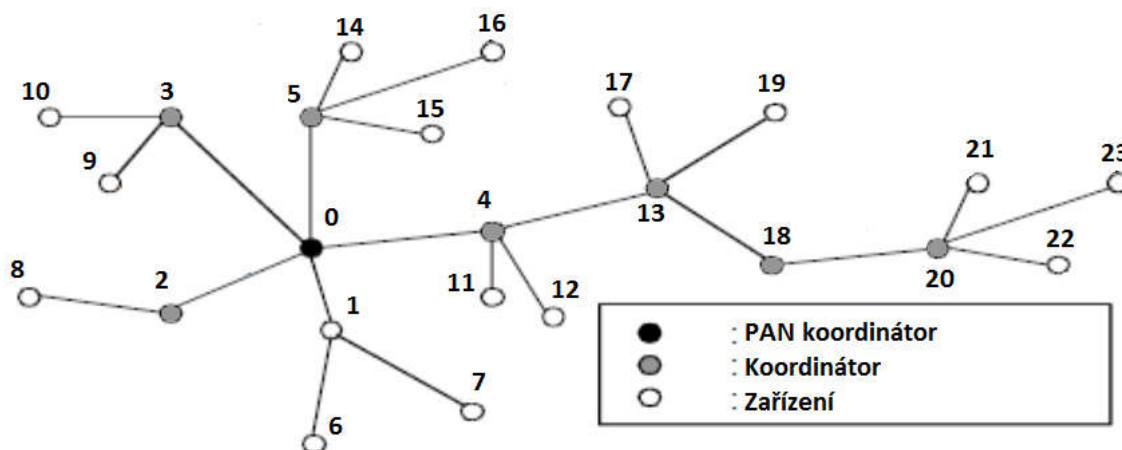
$$\varepsilon_{eff} = \frac{4,4 + 1}{2} + \left(\frac{4,4 - 1}{2 * \sqrt{1 + 12 * \frac{0,6}{1,16}}} \right) = 3,0309 [-]$$

$$Z_0 = \frac{120 * \pi}{\sqrt{3,0309} * [\frac{0,6}{1,16} + 1,393 + \frac{2}{3} \ln (\frac{0,6}{1,16} + 1,444)]} = 49,90 \Omega$$

3.2 Návrh topologie komunikačního protokolu

Princip současného řízení světelné techniky je odvozen z protokolu DMX 512. Tento protokol umožňuje jednosměrné vysílání, které přijímají všechna zařízení připojená na sběrnici. Světelné povely jsou přenášeny v osmibitových rámcích. Připojená zařízení jsou řízena předem stanoveným intervalem těchto osmibitových rámců, který je dostatečný pro obsluhu celého zařízení.

Aby byla zajištěna přenositelnost mezi již vyráběným světelným zařízením, bylo využito následujícího návrhu. Moduly B společně s modulem A tvoří virtuální síť typu Cluster Tree. V síti se nachází jeden PAN koordinátor, který ztotožňuje modul A. Dále jsou součástí sítě i moduly B, které mohou být prostředníky pro přenos informací mezi modulem A a dalším připojeným modulem B. Popisovaná topologie sítě je znázorněna na obrázku 24.



Obr. 24 Topologie navrhované sítě

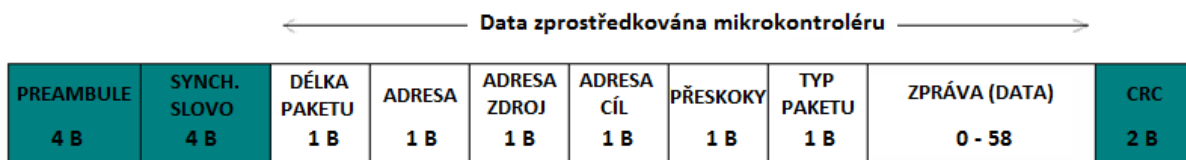
Je možné si pro jednoduchost představit, že vstupem modulu A jsou data protokolu DMX 512. Tato data jsou dále prostřednictvím bezdrátové komunikace doručena cílovému modulu B, který data předá světelnému zařízení. Modul A je dále možno připojit k osobnímu počítači. S ohledem na přenosové rychlosti použité elektroniky můžeme omezit počet aktivně připojených světelných zařízení k takto vzniklé bezdrátové síti na hodnotu 254. Vytvořená bezdrátová síť umožňuje oboustrannou komunikaci, která může být využita pro přenos dat ze světelné techniky za účelem monitorování stavu připojeného přístroje.

3.3 Návrh komunikačního protokolu

Vznik virtuální sítě s výše popisovanou topologií je podmíněn vytvořením komunikačního protokolu. Funkcí protokolu je nejen zajištění přenosu dat mezi koncovými uzly, ale i správa a tvorba virtuální sítě. Návrh protokolu vychází z požadavků na komunikaci v síti. Komunikace ve vytvořené síti probíhá vždy od konkrétního modulu B k modulu A a naopak. Připojené moduly B mohou mezi sebou komunikovat pouze za účelem zprostředkování informací mezi modulem A a modulem B, který není v jeho dostatečném dosahu. Komunikace je zahájena vždy na požadavek modulu A.

3.3.1 *Paket protokolu*

Komunikační protokol využívá pro správu a řízení datové komunikace paketový přenos transceiveru s proměnnou délkou paketu. Hlavička tohoto paketu je doplněna o další části, které jsou nezbytné pro funkčnost protokolu. Mezi doplněné části patří zdrojová adresa, cílová adresa, počet přeskoků a typ paketu. Popisovaný paket je znázorněn na obrázku 25.



Obr. 25 Paket navrženého protokolu

Preamble obsahuje řetězec identifikující komunikační protokol, synchronizační slovo reprezentuje číslo sítě. Adresa zařízení představuje adresu aktuálního příjemce paketu. Pro potřeby všesměrového vysílání je vyhrazena adresa 0xFF, PAN koordinátor sítě má vždy adresu 0x00. Zdrojová adresa obsahuje adresu odesílatele, cílová adresa je adresou konečného příjemce. Následující bajt obsahuje počet přeskoků v síti. Tento byt zabraňuje cyklickému přeposílání paketů v rámci sítě. Poslední částí hlavičky paketu je bajt reprezentující typ zprávy.

Z důvodu tvorby a správy virtuální sítě jsou pakety členěny na následující typy:

- *DATA_DMx* – Data obsahující řídicí povely
- *DATA_M* – Data monitorující činnost světel
- *DATA_ACK* – Potvrzení přijetí datového paketu
- *DATA_REQ* – Vyžádání datového paketu
- *AUTORIZATION* – Požadavek na přihlášení
- *AUT_RES* – Odpověď na požadavek přihlášení
- *AUT_COORD_REQ* – Výzva k odeslání požadavku na přihlášení
- *AUT_COORD_RES* – Potvrzení výzvy k odeslání požadavku na přihlášení
- *ADDR_SET* – Nastavení adresy zařízení
- *ADDR_ACK* – Potvrzení nastavení adresy
- *KEY* – Šifrování komunikace
- *KEY_ACK* – Potvrzení šifrování komunikace
- *BEAKON* – Informace o stálé existenci sítě

3.3.2 Funkce protokolu

Před zahájením komunikace se světelnými prvky je vytvořena virtuální síť PAN koordinátorem. Veškerá světelná zařízení, která v tuto chvíli nejsou ovládána žádným PAN koordinátorem, naslouchají paketu *AUTORIZATION*, jehož obsah žádá potvrzení příjmu společně s hodnotou reprezentující sílu přijatého signálu. Odpovědí naslouchajícího modulu B PAN koordinátoru je paket *AUT_RES*, který je zaslán v náhodném časovém slotu velikosti 10

ms z důvodu eliminace možné kolize. PAN koordinátor čeká po dobu 700 mS na přijetí paketů *AUT_RESPONSE* od všech naslouchajících zařízení a následně postupně všem přihlášeným s dostatečnou silou signálu přiděluje adresu zařízení a síť paketem *ADDR_SET*. Po přijetí adresy odesílá světelné zařízení paket *ADDR_ACK*, čímž potvrzuje přijetí adresy zařízení a sítě. Zařízení může nadále vysílat pakety pouze v případě výzvy ze strany PAN koordinátora sítě, který mu přidělil adresu.

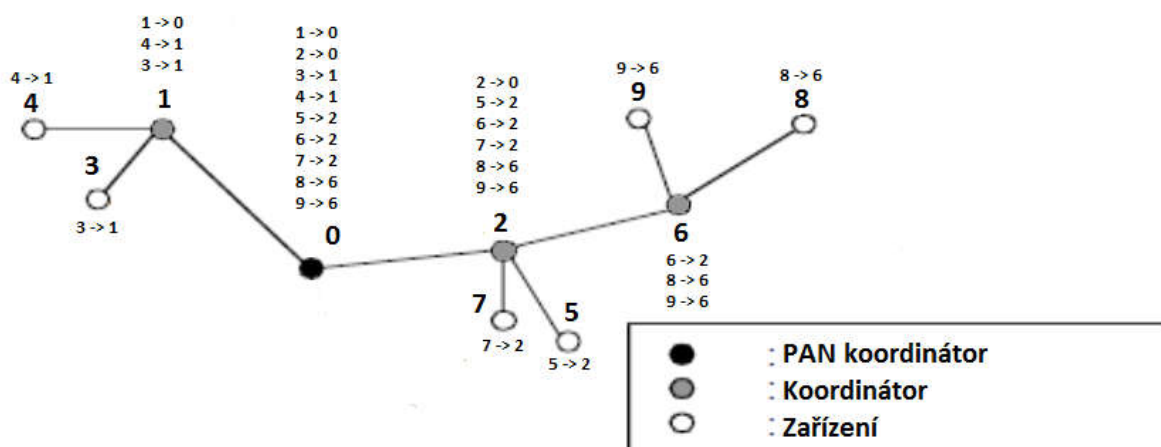
V dalším kroku PAN koordinátor prostřednictvím světelných zařízení, kterým již přidělil adresu, zjistí, zda-li nejsou v dosahu další možná zařízení. PAN koordinátor odešle postupně paket *AUT_COORD_REQ* všem světelným zařízením, kterým již byla přidělena adresa. Tato zařízení potvrdí výzvu k odeslání požadavku na přihlášení paketem *AUT_COORD_RES* a zopakují výše popsany postup. PAN koordinátor a světelná zařízení, kterým již byla přidělena adresa, na paket *AUTORIZATION* nereagují. Ostatní světelná zařízení v dosahu odpovídají paketem *AUT_RES*, který je prostřednictvím příjemce přeposlán PAN koordinátoru. Přidělení adresy je řízeno PAN koordinátorem, který paketem *ADDR_SET* vyzývá světelné zařízení k udělení adresy. Odpovědí na přijatý paket je *ADDR_ACK*, kterým světelné zařízení zároveň přijímá funkci koordinátora.

Po odeslání požadavku na přihlášení všemi světelnými zařízeními je ukončen proces tvorby virtuální sítě. V tomto okamžiku dochází k distribuci klíče o velikosti 16 B pro následnou již šifrovanou komunikaci. Zařízení potvrzují příjem paketu a šifrování další komunikace paketem *KEY_RES*. Následně je umožněna datová komunikace za pomoci paketů *DATA_DMx*, *DATA_ACK*, *DATA_REQ* a *DATA_M*. Komunikace probíhá vždy na žádost PAN koordinátora sítě, který vyvolá datovou komunikaci směrovanou konkrétnímu cílovému zařízení. Je-li tato komunikace uskutečněna paketem *DATA_DMx*, obsahem paketu jsou řídicí pokyny pro cílové světelné zařízení. Korektní doručení zprávy světelnému zařízení je potvrzeno paketem *DATA_ACK*. Chce-li PAN koordinátor získat informace týkající se činnosti světla, odesílá paket *DATA_REQ*, na který světelné zařízení reagují paketem *DATA_M*. Komunikace prostřednictvím paketu *BEACON* je využita pro účel informování o přetrvání komunikační cesty v síti pro obě zařízení. Paket *BEACON* je vysílán všem světelným zařízením koordinátory pomocí všesměrového vysílání s periodou 1 s. V případě neaktivity PAN koordinátora po dobu delší než 10 sekund je předpokládáno jeho odpojení a světelná zařízení jsou uvolněna pro další PAN koordinátory.

3.3.3 Směrovací funkce protokolu

Protokol umožňuje komunikaci od PAN koordinátora ke světelným zařízením prostřednictvím jedné předem definované cesty. Je tedy vytvořena stromová topologie sítě, které odpovídá i způsobu směrování.

Princip směrování je založen na ukládání struktury do tabulek, které jsou vytvářeny při sestavování sítě. PAN koordinátor sítě uděluje adresy světelným zařízením a určuje, která z těchto zařízení budou koordinátory sítě. Díky tomu má PAN koordinátor přehled o struktuře celé sítě. Toho je využito pro uložení dat do tabulky, ve které je ke každé přidělené adrese uvedena adresa jeho koordinátora. Zařízení, které je koordinátorem sítě a zprostředkovává tedy informace pro další světelná zařízení, vlastní pouze část této tabulky. Tato tabulka je sestavována na základě přijetí nebo přeposlání zprávy obsahující výzvu udělení adresy koordinátorem. Obsahem tabulky je přidělená adresa nového zařízení společně s adresou koordinátora. Popisované směrovací tabulky jsou společně s topologií zobrazeny na obrázku 26.



Obr. 26 Směrovací tabulky protokolu

3.3.4 Šifrování komunikace

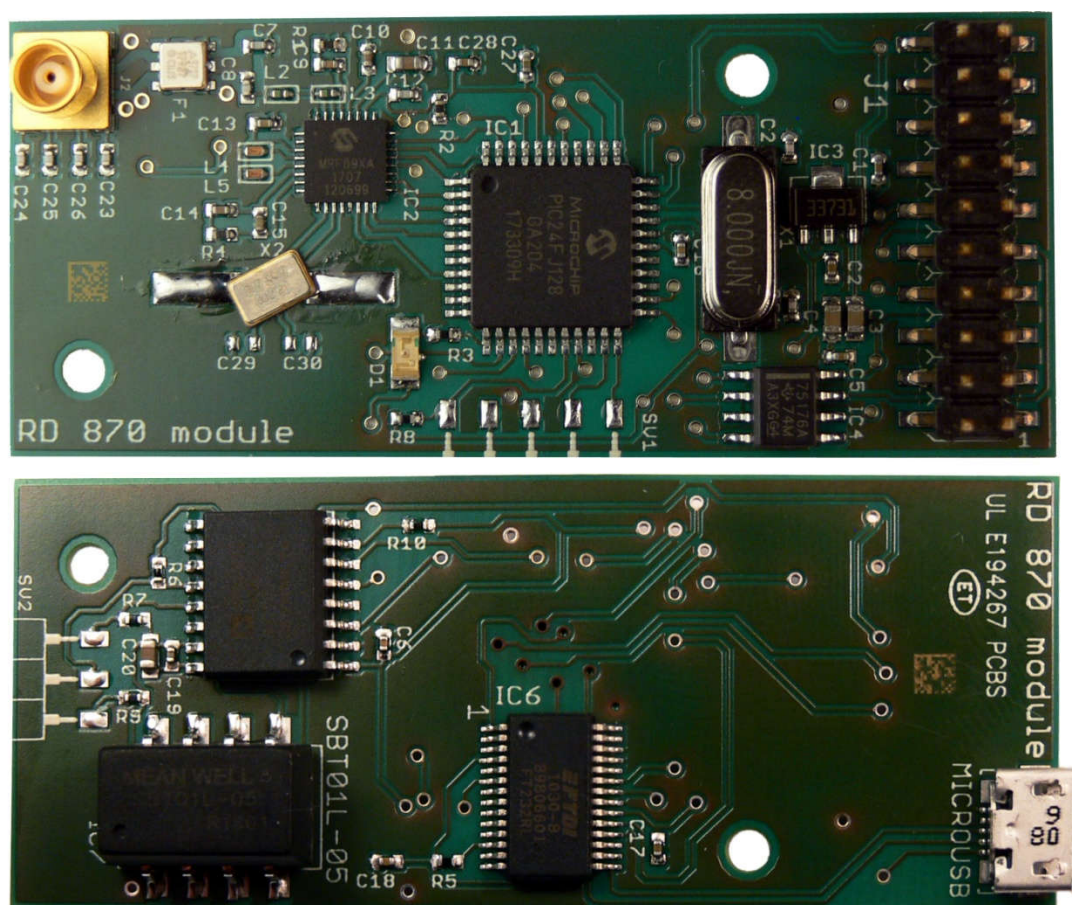
Datová komunikace po sestavení sítě probíhá šifrovaně pomocí standardu pokročilého šifrování Rijndael/AES. Jedná se o symetrický algoritmus, který používá sdílený klíč pro šifrování i dešifrování datového řetězce. Protokol využívá náhodně vygenerovaný 128 bitový klíč PAN koordinátorem sítě.

4 Realizace zařízení

Realizace zařízení byla započata návrhem plošného spoje v návrhovém prostředí Eagle. Dle požadavků firmy ROBE lighting s.r.o. musely být dodrženy celkové rozměry, umístění konektorů a umístění montážních otvorů. Po důkladné validaci vytvořeného návrhu bylo rozhodnuto o výrobě prototypových desek plošných spojů. Tvorba programu pro mikrokontrolér obou modulů byla zahájena již při výrobě a osazení desek plošných spojů. Následně pokračoval vývoj programů na již zhotovených prototypových deskách plošných spojů.

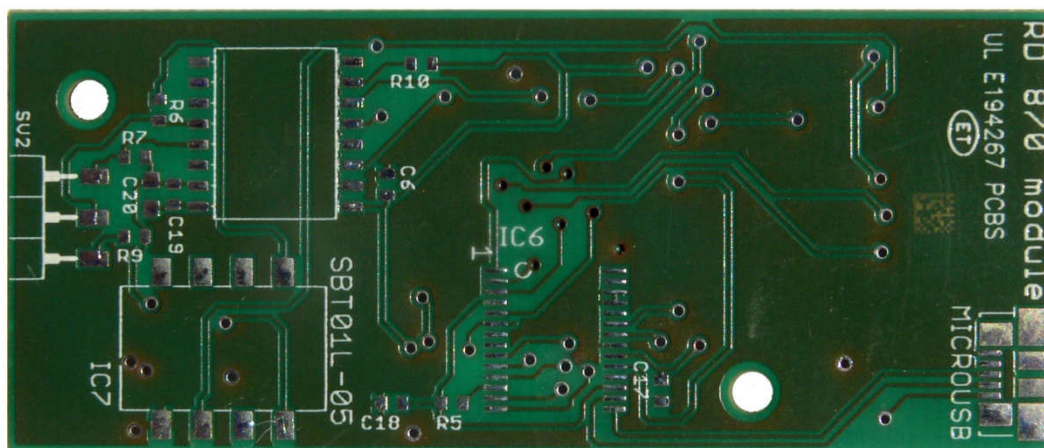
4.1 Návrh a výroba plošného spoje

Návrh plošného spoje navazoval na již navržené obvodové zapojení. Požadavky na rozměry plošného spoje a možnosti jeho osazení vyplynuly z již zaběhlého standardu na tyto řídicí moduly osvětlovací techniky firmy ROBE lighting s.r.o. Při návrhu bylo uvažováno impedanční přizpůsobení pro vysokofrekvenční vedení k externí anténě. Dále bylo dodrženo rozmístění diskrétních součástek v okolí transceiveru dle prodáváného bezdrátového modulu výrobcem. Vyrobena a osazená deska plošného spoje modulu A je zobrazena na obrázku 27.



Obr. 27 Osazená deska plošného spoje modulu A

S ohledem na úspory, rozměry použitých elektronických součástek a technologii výroby bylo umožněno vytvořit jeden typ desky plošného spoje, který má odlišné osazovací varianty pro modul A i modul B. Na obrázku 28 je zobrazena spodní strana modulu B, která se od modulu A odlišuje absencí elektronických součástek, což je výhodou z důvodu možného prostorového omezení ve světelném zařízení.



Obr. 28 Spodní strana desky plošného spoje modulu B

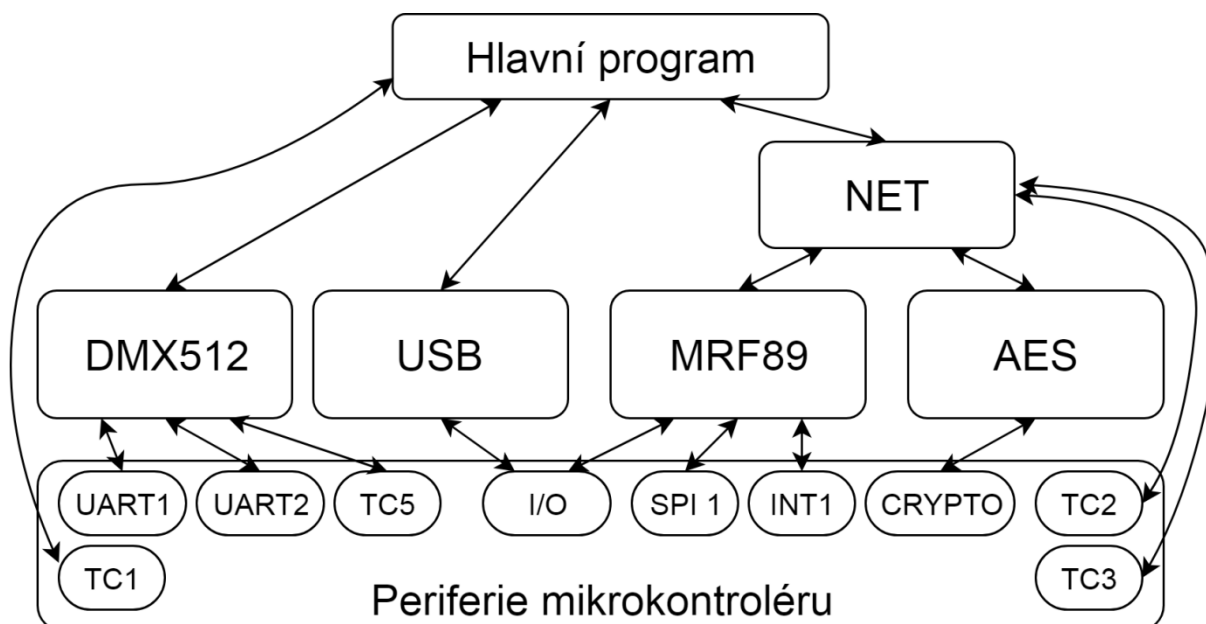
Elektronické komponenty obou modulů jsou pouze povrchové montáže. Diskrétní elektronické součástky jsou v převážné většině velikosti 0402. Desky plošných spojů jsou ošetřeny povrchovou úpravou žárového cínování (HAL), pájení elektronických součástek bylo realizováno s využitím přetavovací pece. Ačkoli proběhla pečlivá kontrola návrhu plošného spoje a s ní i kontrola souvisejícího obvodového zapojení, vyskytnul se problém týkající se externího rezonátoru pro transceiver. Při návrhu bylo vybráno zapouzdření rezonátoru, které pro danou frekvenci není dostupné. Tento problém byl vyřešen ručním osazením externího rezonátoru požadované hodnoty v jiném zapouzdření.

4.2 Program pro mikrokontrolér

Program pro mikrokontrolér byl napsán v jazyku C s použitím kompilátoru XC 16 v1.34 a vývojového prostředí MPLAB X IDE v4.15. Z důvodu odlišných funkcí i elektronického osazení modulů byly zhotoveny dva typy programů. Při tvorbě nebyly využity žádné externí knihovny jiných autorů, jako jsou například knihovny určené pro ovládání periférií mikrokontroléru nebo knihovny pro bezdrátovou komunikaci. Celkové vytížení programové paměti mikrokontroléru je 11 %, vytížení paměti dat dosahuje 25 %. Z důvodu časové náročnosti projektu nebylo realizováno zprostředkování dat mezi dvojicí modulů B, finální program v aktuální verzi tedy umožňuje tvorbu sítě topologie hvězda. Knihovny síťového protokolu jsou ovšem připraveny pro navrhovanou stromovou strukturu sítě.

4.2.1 Základní členění programu

Pro svou funkci program využívá pětici knihoven, které spravují konkrétní části elektronických bloků. Výjimkou je knihovna NET, která využívá knihoven MRF89 a AES pro tvorbu virtuální síťové vrstvy. Blokový diagram struktury programu je znázorněn na obrázku 29. Pro modul B není využita knihovna USB a část knihovny DMX 512.



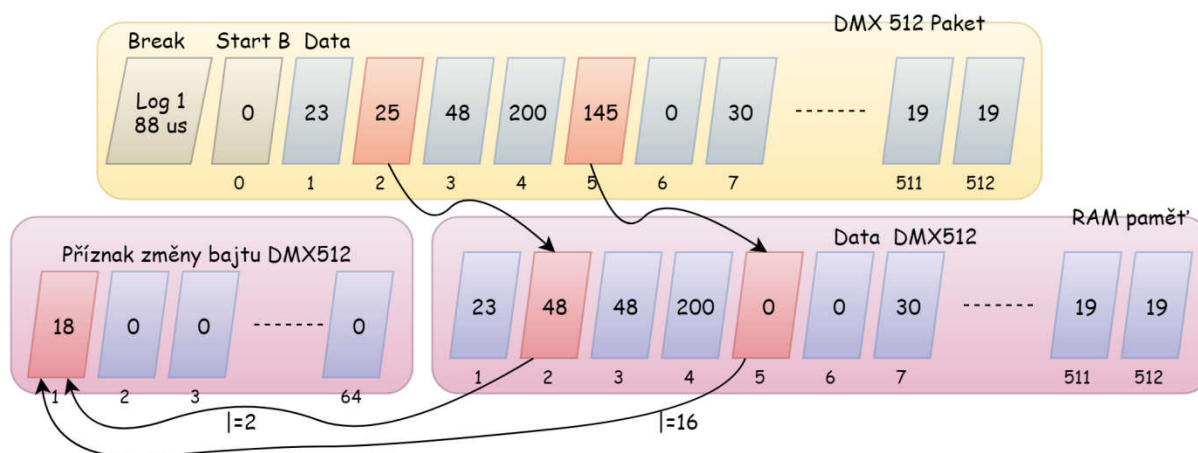
Obr. 29 Blokový diagram struktury programu.

Program po vykonání základních inicializačních procedur přechází do nekonečné smyčky, ve které je provádění dalších úkonů závislé na vyvolání přerušení periferie, případně změny stavu na vstupech mikrokontroléru.

4.2.2 Algoritmus příjmu a vysílání DMX 512

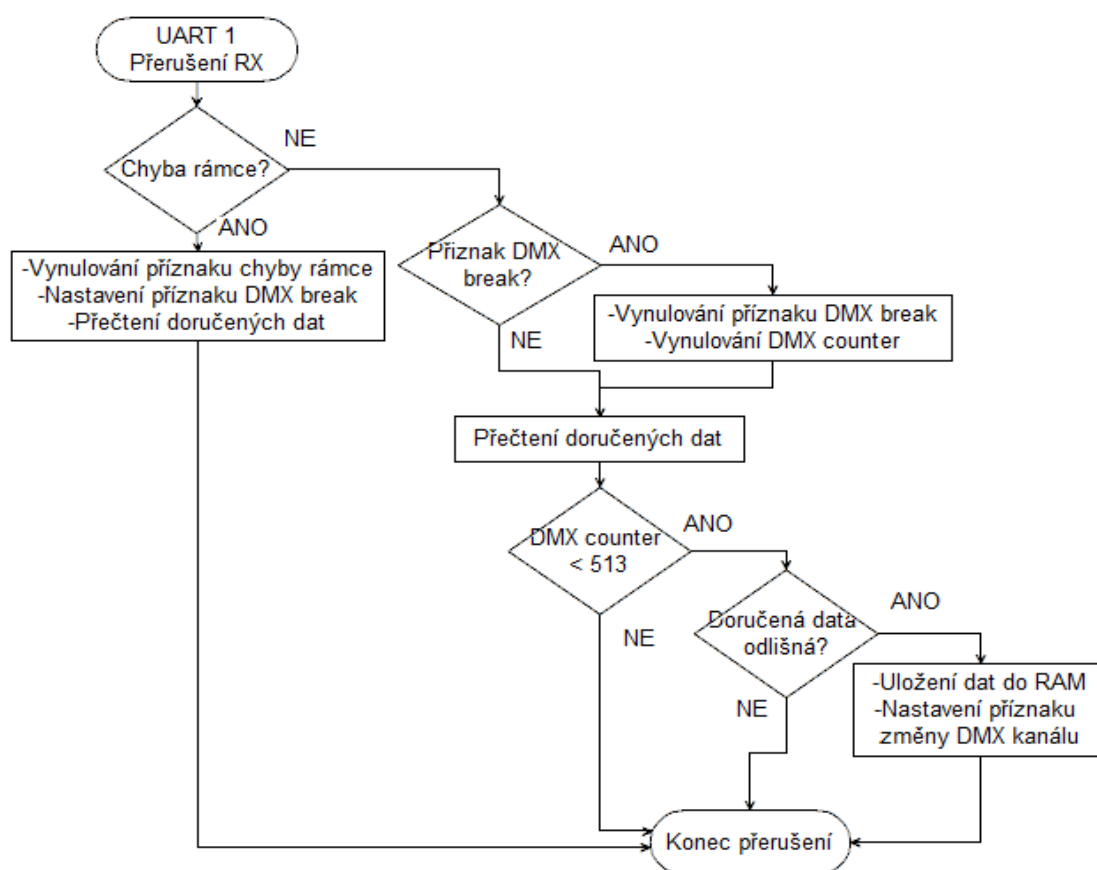
Knihovna DMX 512 po vlastní inicializaci, při které jsou periferie nastavovány dle specifikací protokolu DMX 512, nezávisle na běhu hlavního programu vyvolává přerušení od periférií UART 1, UART 2 a časovač 5. V těchto přerušeních jsou prováděny algoritmy pro dodržení specifikací protokolu DMX 512.

Pro příjem dat je využito přerušení periferie UART 1. Přerušení je vyvoláno při příjmu dat do registru periferie. Doručená data jsou ukládána do RAM paměti mikrokontroléru pouze v případě, dojde-li ke změně hodnoty čteného bajtu v aktuálním paketu dat. Při zápisu nových dat je nastavován příznak, který informuje, že došlo ke změně hodnoty pro konkrétní bajt vstupních dat. Způsob nastavení příznaku je zobrazen na obrázku 30.



Obr. 30 Nastavení příznaku změny bajtu DMX 512

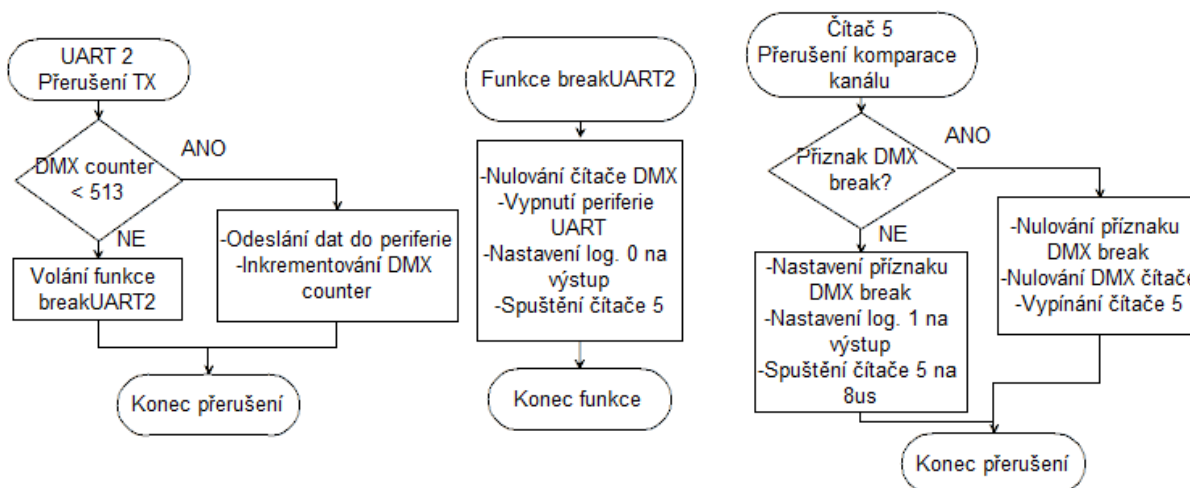
Po přijetí všech dat paketu je na vstupu periferie po dobu 88 us nízká napěťová úroveň. Klidový stav sběrnice je ovšem definován vysokou napěťovou úrovní, data jsou proto periferií přečtena a vyhodnocena jako chybová. Toho je využito k detekci konce DMX 512 paketu a s ním spojeným vykonáním potřebných úkonů pro příjem dalšího datového paketu. Popisovaná problematika příjmu je nastíněna v algoritmu zobrazeném na obrázku 31.



Obr. 31 Algoritmus příjmu dat DMX 512 protokolu

Vysílač protokolu DMX 512 využívá pro svou činnost přerušení periférie UART 2 a přerušení vyvolané komparací kanálu čítače 5. Čítač je použit pro vyměření doby, po kterou

musí být sběrnice držena v nízké napět'ové úrovni po odvysílání datového rámce. Dále je čítač využit pro vyměření doby před zahájením odeslání prvního datového bajtu. Při spuštění zařízení je po inicializaci spuštěna funkce breakUART2. Tato funkce vypne periférii UART 2, nastaví logickou napět'ovou úroveň 0 na sběrnici a spustí čítač 5. Po uplynutí doby 88 us je vyvoláno přerušení čítače 5, ve kterém je nastavena vysoká napět'ová úroveň na sběrnici a opětovně spuštěn čítač 5, jehož přerušení je vyvoláno po 8 us. Tímto procesem je generován restartovací signál na sběrnici a synchronizační signál spuštění sběrnice dle specifikací protokolu DMX 512.



Obr. 32 Algoritmus vysílání dat DMX 512 protokolu

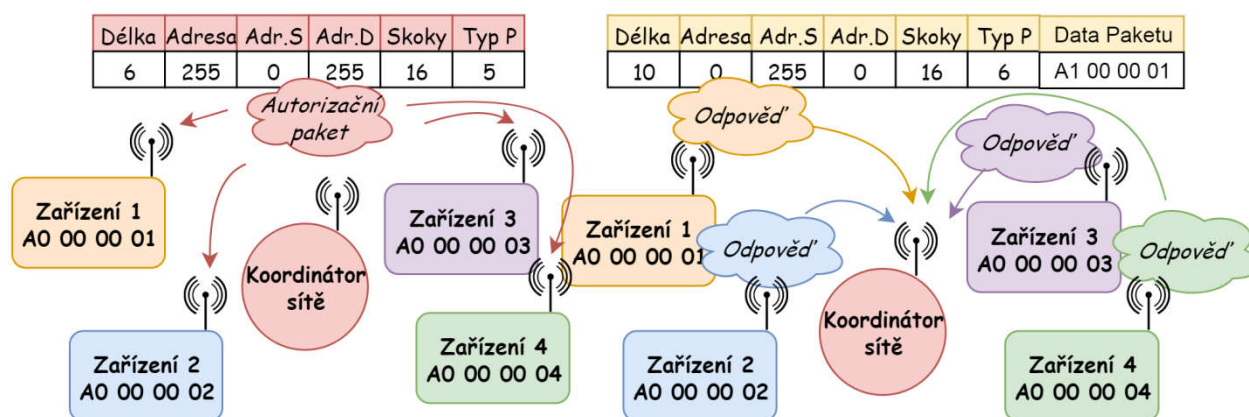
Při druhém vyvolání přerušení čítače 5 je zapnuta periférie UART 2 a vypnut a nulován čítač 5. Následuje vyvolání přerušení od periférie UART 2, ve kterém je postupně odesláno 513 B dat, z čehož první bajt reprezentuje start DMX 512 protokolu. Po odeslání je spuštěna funkce breakUART2 a celý algoritmus je opakován. Popisovaný algoritmus je znázorněn na obrázku 32.

4.2.3 Algoritmy síťového protokolu

Před zahájením datového přenosu mezi koordinátorem sítě (modul A) a koncovým světelným zařízením je nutno zahájit proces inicializace modulů instalovaných ve světelných zařízeních. Pro tuto část byl napsán algoritmus, který je částečně řízen komunikací uživatele prostřednictvím osobního počítače. Před spuštěním tohoto algoritmu jsou všechny nespárované moduly B v režimu příjmu dat. V následujícím popisu algoritmu bude modul B popisován jako zařízení a modul A jako koordinátor sítě.

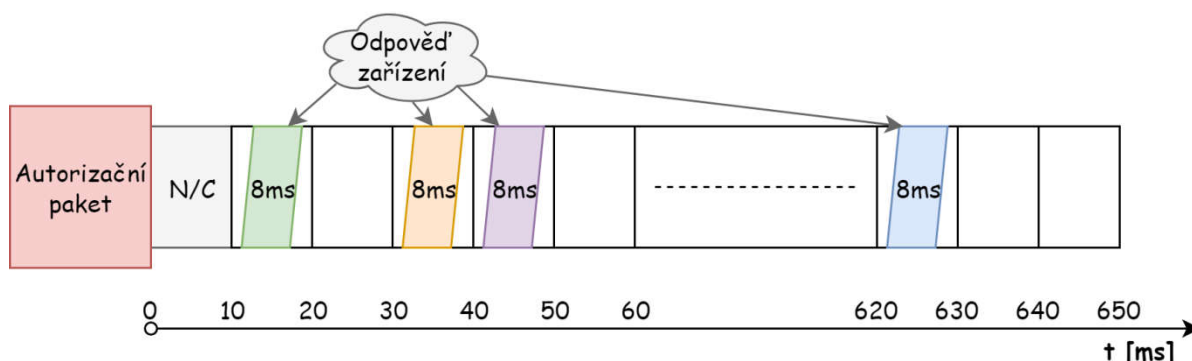
Algoritmus je spuštěn přijetím libovolného znaku prostřednictvím paralelní sběrnice z bloku USB. Koordinátor sítě zahajuje proces inicializace odesláním autorizačního paketu netAuthorizationPacket, který je přijímán všemi zařízeními. Po přijetí autorizačního paketu je v zařízení spuštěn čítač hlídající existenci sítě a čítač pro generování časových slotů pro

odpověď. Odpovědi nespárovaných zařízení je paket netAutRespPacket, jehož obsahem je čtyřbajtová unikátní adresa zařízení, kterou koordinátor sítě ukládá do paměti. Na obrázku 33 je znázorněna popisovaná část inicializace sítě.



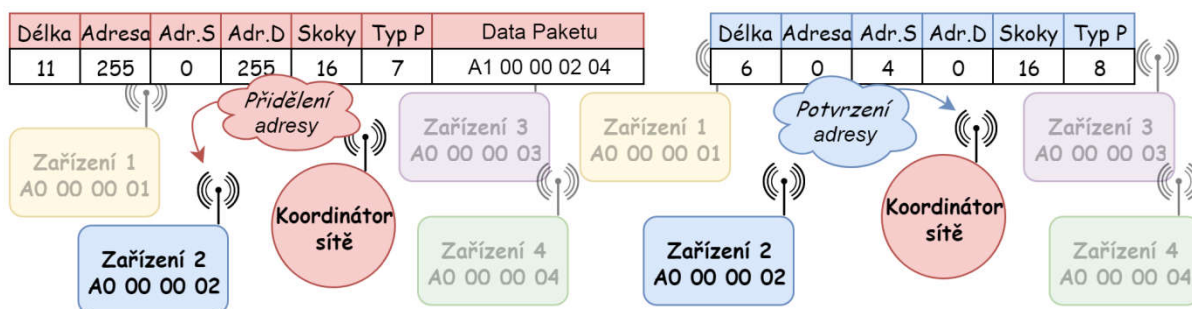
Obr. 33 Inicializace sítě – přihlášení zařízení

Odpověď, kterou představuje paket netAutRespPacket, je odesílána v náhodně generovaných časových slotech o velikosti 10 ms v časovém rozmezí 10 až 650 ms. Doba trvání slotu byla stanovena na základě měření celkové délky trvání odpovědi na autorizační paket, která činí 8 ms. Popisované časové sloty a jejich náhodné obsazení je znázorněno na obrázku 34.



Obr. 34 Časové sloty a jejich náhodné obsazení

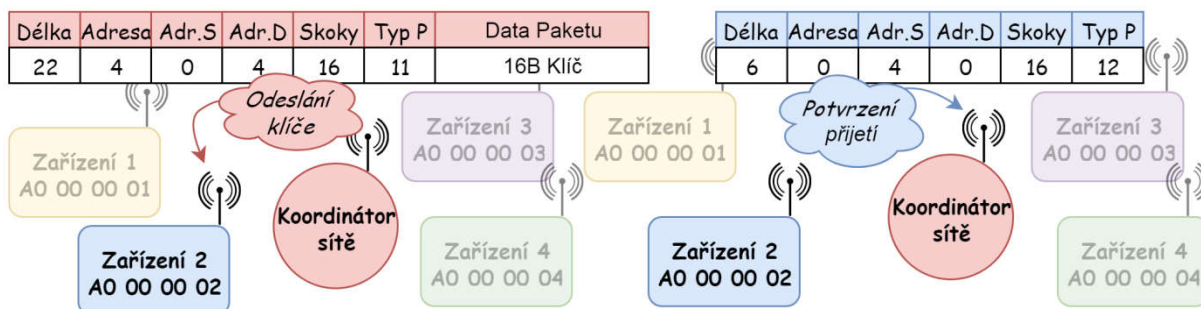
Po uplynutí časového intervalu pro přijetí autorizačních paketů jsou koordinátorem sítě rozesílány pakety netAddrSetPacket obsahující přidělenou adresu velikosti jednoho bajtu. Přidělovaná adresa odpovídá pořadí přijetí odpovědi na autorizační paket. Způsob rozesílání je již specifikován pro konkrétní zařízení. Způsob rozeznání vlastníka adresy je realizován pomocí unikátní adresy zařízení, která je v paketu také zahrnuta. Po obdržení paketu odpovídá příjemce paketem netAddrAckPacket, v jehož hlavičce je již vyplněna zdrojová adresa zařízení. Další komunikace mezi těmito uzly již probíhá pouze pomocí přidělené adresy o velikosti jeden bajt, unikátní adresa zařízení již dále není využívána. Popisovaná problematika předání adresy je zobrazena na obrázku 35.



Obr. 35 Inicializace sítě – přidělení adresy

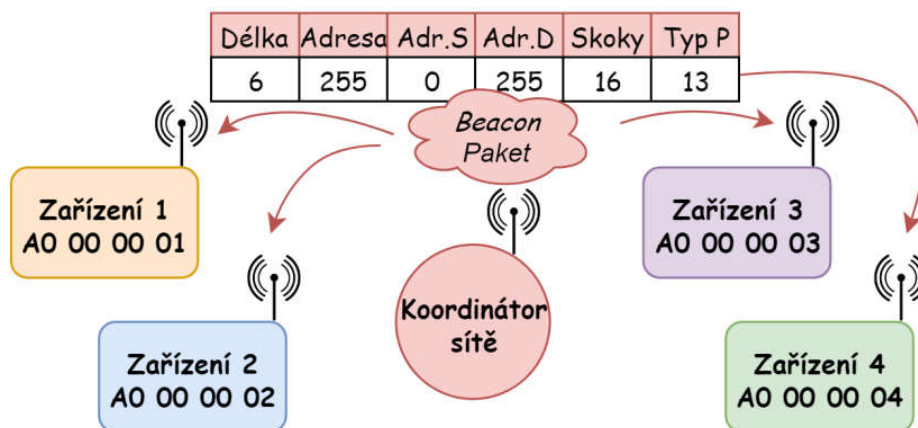
Po odeslání paketu `netAddrSetPacket` čeká koordinátor sítě maximálně 25 ms na odpověď potvrzující přijetí adresy. V případě, že během tohoto časového intervalu není paket doručen, je opakováno odeslání paketu `netAddrSetPacket` a opětovně čekáno maximálně 25 ms na potvrzení přijetí. Maximálně jsou ovšem uskutečněny tři pokusy přidělení adresy. V případě nedoručení odpovědi ani na třetí pokus je uživatel ve výsledném výpisu po sestavení sítě informován o problému a se zařízením není dále pracováno. Zařízení, které potvrdí adresu, již nemůže dále odpovídat na paket `netAuthorizationPacket`. V případě, že koordinátor sítě z jakéhokoli důvodu nebude pokračovat v komunikaci, dojde po uplynutí 10 sekund k uvolnění zařízení pro případné další koordinátory sítě. Po přidělení adres všem reagujícím zařízením je celý proces, který je zahájen odesláním paketu `netAuthorizationPacket`, opakován. Minimální počet opakování popisovaného procesu je tři. Reálný počet opakování je závislý na počtu zařízení a případných kolizích při odpovědi na autorizační paket. Pokud existuje i při třetím nebo kterémkoli dalším kole zařízení, které odpoví na autorizační paket, dojde automaticky k dalšímu opakování. Maximálně je však provedeno deset opakování.

Po přidělení adres všem zařízením v dosahu je koordinátorem sítě vygenerován 128 bitový klíč a je provedena jeho distribuce. Distribuce je provedena zvlášť pro každé zařízení paketem `netKeyPacket`. Po odeslání je vyžadováno potvrzení od zařízení paketem `netKeyAckPacket` analogicky, jako v případě přiřazení adresy zařízení. Proces přidělení klíče je znázorněn na obrázku 36. Distribuce klíče je v rámci diplomové práce řešena nezabezpečeně. V současné době již ovšem probíhá analýza možných řešení distribuce klíče s cílem vyhledání nejvhodnějšího řešení, které bude použito při ostrém provozu.



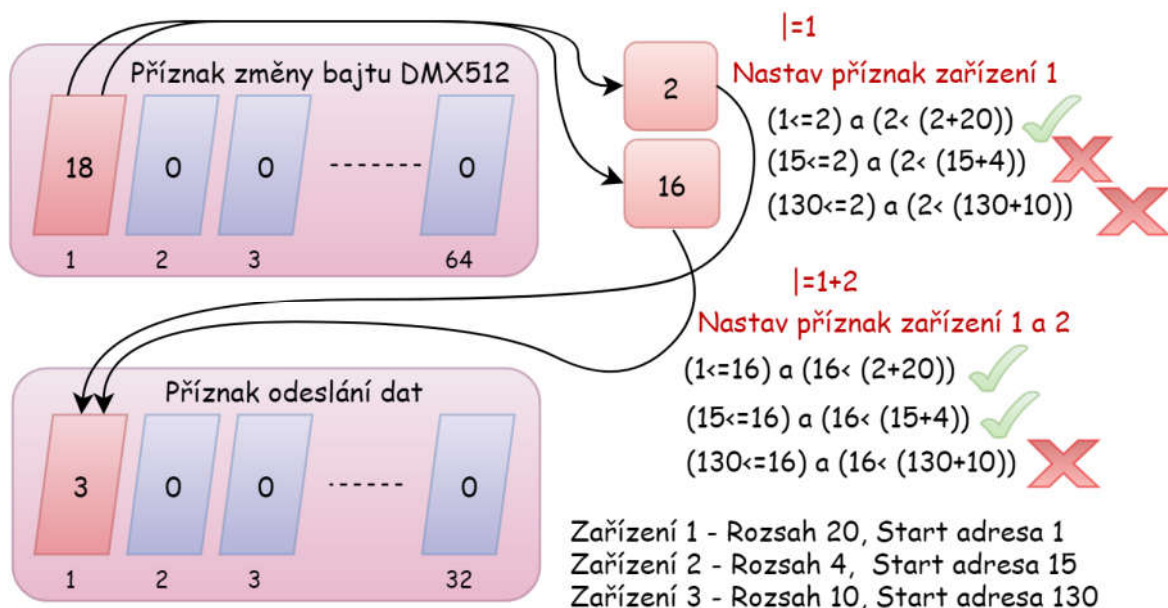
Obr. 36 Inicializace sítě – proces přidělení klíče

Přijetím klíče připojenými zařízeními začíná datová komunikace v síti a je započato odesílání paketu netBeaconPacket v pravidelných intervalech s periodou 1 sekunda. Tento paket informuje zařízení o trvající aktivitě sítě. Paket je vysílán adresou pro všesměrové vysílání a přijímán všemi připojenými zařízeními zároveň. Jedná se o jediný paket, na který příjemce neodpovídá. V případě, že paket není doručen v časovém intervalu překračující 10 sekund, je zařízení uvolněno pro dalšího koordinátora sítě, který v případě jeho začlenění do sítě musí provést celý popisovaný proces inicializace zařízení. Paket netBeaconPacket je odeslán až ve chvíli, kdy dojde k přijetí hesla. Čítač hlídající aktivitu sítě je ovšem zapnut již při doručení paketu netAutorizationPacket. Nulování čítače je dále provedeno při každém úkonu aktivity při inicializaci sítě, jako je přijetí adresy nebo přijetí síťového klíče. Nejdelší možný čas, kdy nedojde k nulování čítače při sestavování sítě je 6,5 s, což splňuje časový limit pro udržení zařízení v síti. Uvedený čas odpovídá využití všech deseti možných opakování odeslání paketu netAutorizationPacket, po kterém čeká koordinátor sítě 700 ms na odpovědi z uvolněných zařízení. Obsah paketu a jeho distribuce je zobrazena na obrázku 37.



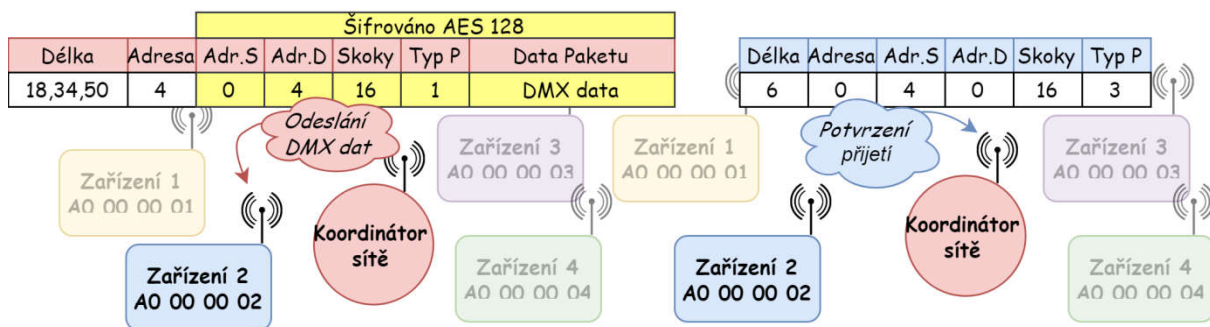
Obr. 37 Beacon paket sítě

Následná datová komunikace probíhající po inicializaci sítě je zahájena vždy na pokyn koordinátora sítě užitím paketů netDataDmxPacket a netDataReqPacket. Algoritmus je rozdělen na několik částí, které jsou cyklicky volány. V první části je nastaven příznak pro konkrétní zařízení, které spadá pod rozsah vstupních dat protokolu DMX 512. Uložené příznaky změn konkrétních bajtů protokolů jsou knihovnou DMX uloženy do pole velikosti 64 B. Prvotní část algoritmu kontroluje nenulovou hodnotu celého bajtu pole. V případě existence nenulové hodnoty je kontrolována za pomoci maskování pozice konkrétního bitu. Z pozice je poté dopočítáno pořadí bajtu protokolu. Následuje hledání, zda-li konkrétní bajt vstupních dat náleží rozsahu připojených zařízení. Tato operace je řešena cyklickou kontrolou pro všechna připojená zařízení, důvodem je možnost odesílání stejných vstupních dat více zařízením. Odpovídá-li změna vstupních dat rozsahu pro konkrétní zařízení, je nastaven příznak odesílání datového paketu tomuto zařízení. Popisovaná část je znázorněna na obrázku 38.



Obr. 38 Algoritmus nastavení příznaku pro odeslání dat

V druhé části je kontrolováno, zdali je nastaven příznak odeslání dat pro připojené zařízení. Je-li příznak nastaven, dojde k odeslání paketu `netDataDmxPacket`. Tento paket obsahuje data protokolu DMX. Po odeslání dat je požadováno potvrzení přijetí paktem `netDataAckPacket`, na které koordinátor čeká maximálně 25 ms. Není-li potvrzovací paket doručen, není smazán příznak odeslání dat a inkrementuje se proměnná reprezentující čítač neaktivity zařízení. Přenos dat včetně struktury datového paketu je zobrazen na obrázku 39.

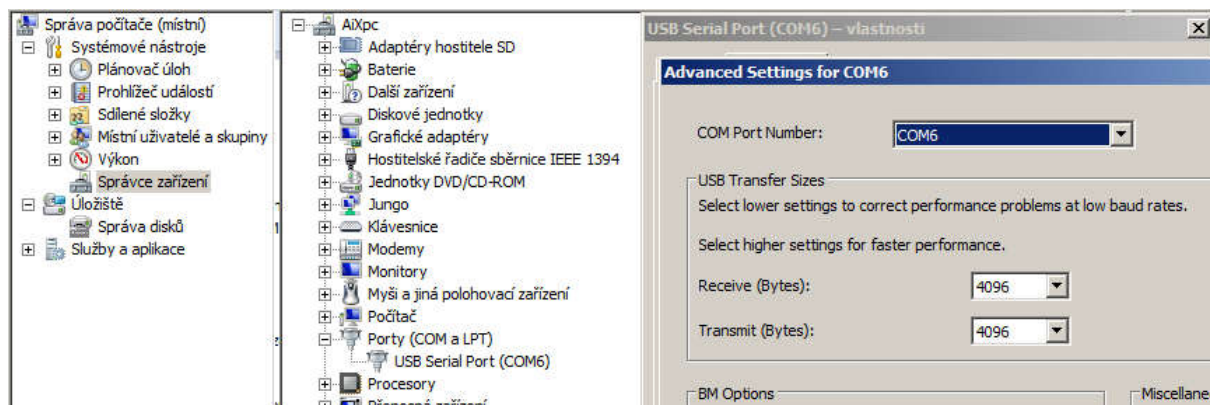


Obr. 39 Přenos datových paketů v síti

4.2.4 Programové vybavení z pohledu uživatele

Po připojení modulu A k osobnímu počítači prostřednictvím sběrnice USB je nutno nainstalovat ovladače integrovaného obvodu FTDI 245. Po instalaci těchto ovladačů, které jsou pod systémem MS Windows instalovány automaticky, dojde k vytvoření virtuálního sériového rozhraní COM. Je-li použit operační systém MS Windows, úspěšnost instalace společně s kontrolou čísla portu sériového rozhraní lze zkontrolovat ve správci zařízení. Na

obrázku 40 je zobrazen správce zařízení se záložkou pro nastavení čísla virtuálního sériového portu.



Obr. 40 Správce zařízení – nastavení čísla portu

Dalším krokem je spuštění prostředí umožňující textovou komunikaci prostřednictvím sériového portu COM. Po připojení je nutno odeslat libovolný znak pro výpis informací. Následně je požadováno odeslání dalšího libovolného znaku pro spuštění algoritmu inicializace sítě. Během provádění operací popsanych v kapitole 4.2.3 je uživatel informován o počtu aktuálně nalezených zařízení. V dalším kroku je zobrazeno generované heslo a tabulka připojených zařízení včetně přiřazených adres a unikátních adres. Zároveň je uživatel informován o úspěšnosti inicializace pro připojená zařízení. Připojené moduly, které prošly v pořádku procesem inicializace, informují uživatele o existenci a setrvání v síti blikáním LED diody se sekundovou periodou.

Následuje požadavek na zadání vstupních dat ze strany uživatele. Na základě unikátní adresy je uživatel informován, kterých zařízení se nastavení týká. Celkově jsou požadovány pro každé připojené zařízení dvě informace. První požadovanou informací je rozsah odesílaných bajtů protokolu DMX 512. Horní hranice rozsahu je omezena velikostí paketu společně s kombinací šifrování dat. Maximální velikost odesílaného paketu je transceiver omezena na 64 B, ovšem první dva bajty obsahují délku a adresu, jež nemohou být pro transceiver šifrována. Z tohoto důvodu je šifrováno zbylých 62 B. Při použití standardu pokročilého šifrování (AES) je nutno dodržet velikost šifrovaných dat v násobku velikosti šifry. Při použití šifry o velikosti 128 bitů se jedná o násobky velikosti 16 B. Z tohoto důvodu je velikost odesílaných dat omezena na 42 B. Druhou požadovanou informací je počáteční bajt protokolu DMX 512, od kterého budou data až do hodnoty zadaného rozsahu odesílána. Po zadání hodnot pro všechna zařízení je nutno potvrdit korektnost dat. Nejsou-li data v pořádku, celý proces inicializace bude spuštěn od začátku. V případě potvrzení je uživatel informován o spuštění datové komunikace a možnosti kdykoli restartovat síť.

Na obrázku 41 je zobrazena popisovaná komunikace při použití čtyř modulů B. Z přijatých dat je patrné, že všechna čtyři zařízení byla inicializována po prvním odeslání

paketu netAuthorizationPacket. Při třetím odeslání autorizačního paketu nebyla registrována žádná odpověď, byl proto ukončen proces hledání a přidělování adres. Po vygenerování hesla byla uživateli poskytnuta tabulka, ve které je patrné, že všechna čtyři zařízení byla v pořádku inicializována. Dále byly uživatelem nastaveny rozsahy a počáteční vstupní adresy bajtů protokolu DMX 512. Po potvrzení byl uživatel informován o spuštění datové komunikace.

```

-----
-- Welcome in RF 868 MHz Pan Coordinator --
-----

Send a character to start initialization network...
Initialization network...

Starting loop 1 wait 700 ms to reply from light device.
Found devices in this loop : 4

Starting loop 2 wait 700 ms to reply from light device.
Found devices in this loop : 0

Starting loop 3 wait 700 ms to reply from light device.
---Searching nodes has been stopped, nothing else node in this cycle

Generating network password... (AES 128b encrypt)
PASS (HEX) : F0 DD 96 FC 0E E6 43 2E 58 6E AB F6 28 32 1E E8

Connected nodes...
-NodeAddr-||-MAC--Address-||-----Node-status-----
Node 001 || A0 00 00 01 || Initialization OK
Node 002 || A0 00 00 02 || Initialization OK
Node 003 || A0 00 00 03 || Initialization OK
Node 004 || A0 00 00 04 || Initialization OK

Select the range of DMX data for each device and their start address..

Addr 001 MAC: A0 00 00 01
DMX range (send number 1 to 42 in format XX exmaple-> 16 Entered DMX range : 8
DMX512 Addr start (number 0 to 512 in format XXX exmaple-> 012 ) Entered start Addr : 20
Addr 002 MAC: A0 00 00 02
DMX range (send number 1 to 42 in format XX exmaple-> 16 Entered DMX range : 32
DMX512 Addr start (number 0 to 512 in format XXX exmaple-> 012 ) Entered start Addr : 28
Addr 003 MAC: A0 00 00 03
DMX range (send number 1 to 42 in format XX exmaple-> 16 Entered DMX range : 4
DMX512 Addr start (number 0 to 512 in format XXX exmaple-> 012 ) Entered start Addr : 29
Addr 004 MAC: A0 00 00 04
DMX range (send number 1 to 42 in format XX exmaple-> 16 Entered DMX range : 4
DMX512 Addr start (number 0 to 512 in format XXX exmaple-> 012 ) Entered start Addr : 390

Are the entered data correct? ? [Y - continue / N - Research]

Now we are sending data to connected nodes. If you want data report from some device send node
address. If you want restart network send R. Remember, that connected lighting device maintains
network connection for 10 sec while during.

```

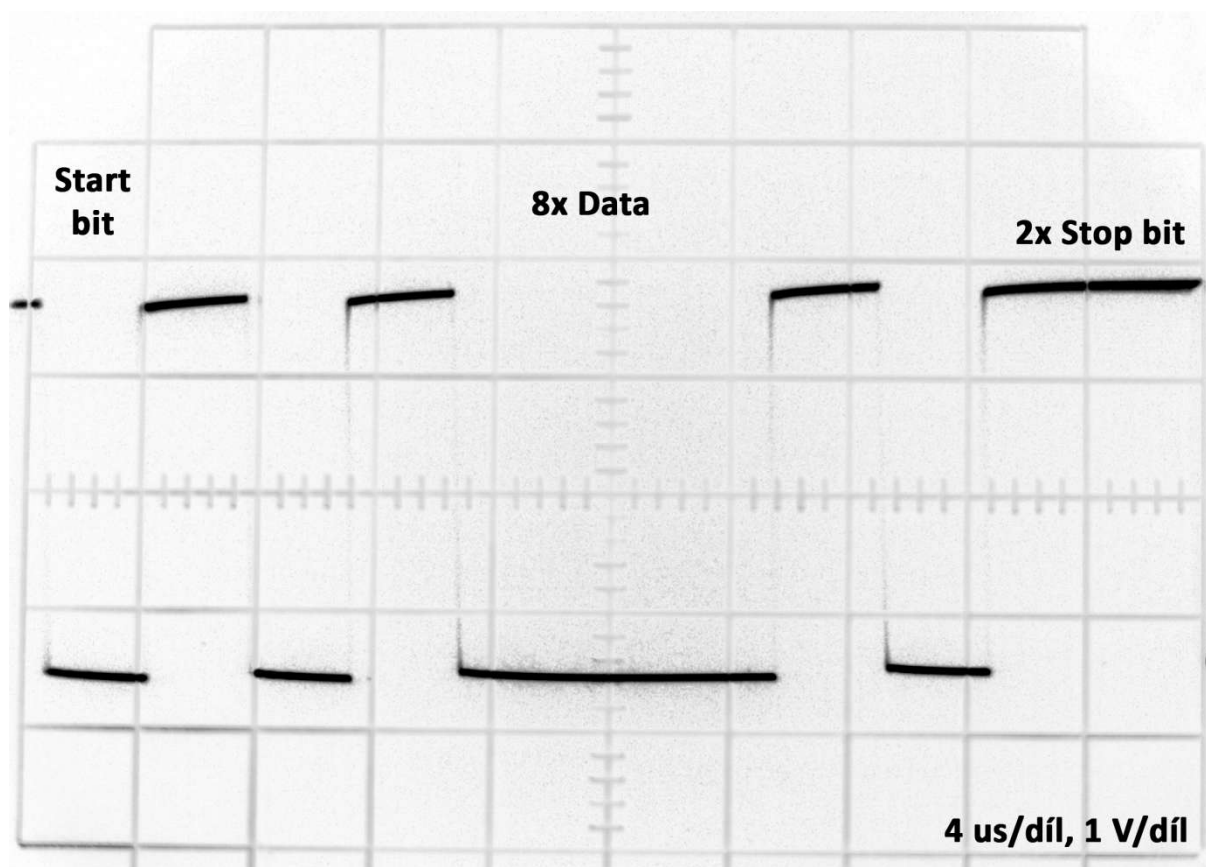
Obr. 41 Ukázka komunikace koordinátoru s uživatelem

5 Měření dosažených parametrů zařízení

Při vývoji programovaného vybavení modulů bylo prováděno měření skutečných časových intervalů jednotlivých úkonů za pomoci analogového osciloskopu. Měření byla prováděna za účelem ověření předem vypočítaných nebo stanovených hodnot, které byly důležité pro tvorbu síťového protokolu. Po dokončení programového vybavení jednotlivých modulů bylo provedeno měření zařízení v reálném provozu. Obsahem tohoto měření bylo potvrzení předem vypočítané frekvence za pomoci spektrálního analyzátoru a zjištění maximálního dosahu zařízení při vyzařovacím výkonu, který nepřekračuje povolené normy.

5.1 Měření časových intervalů

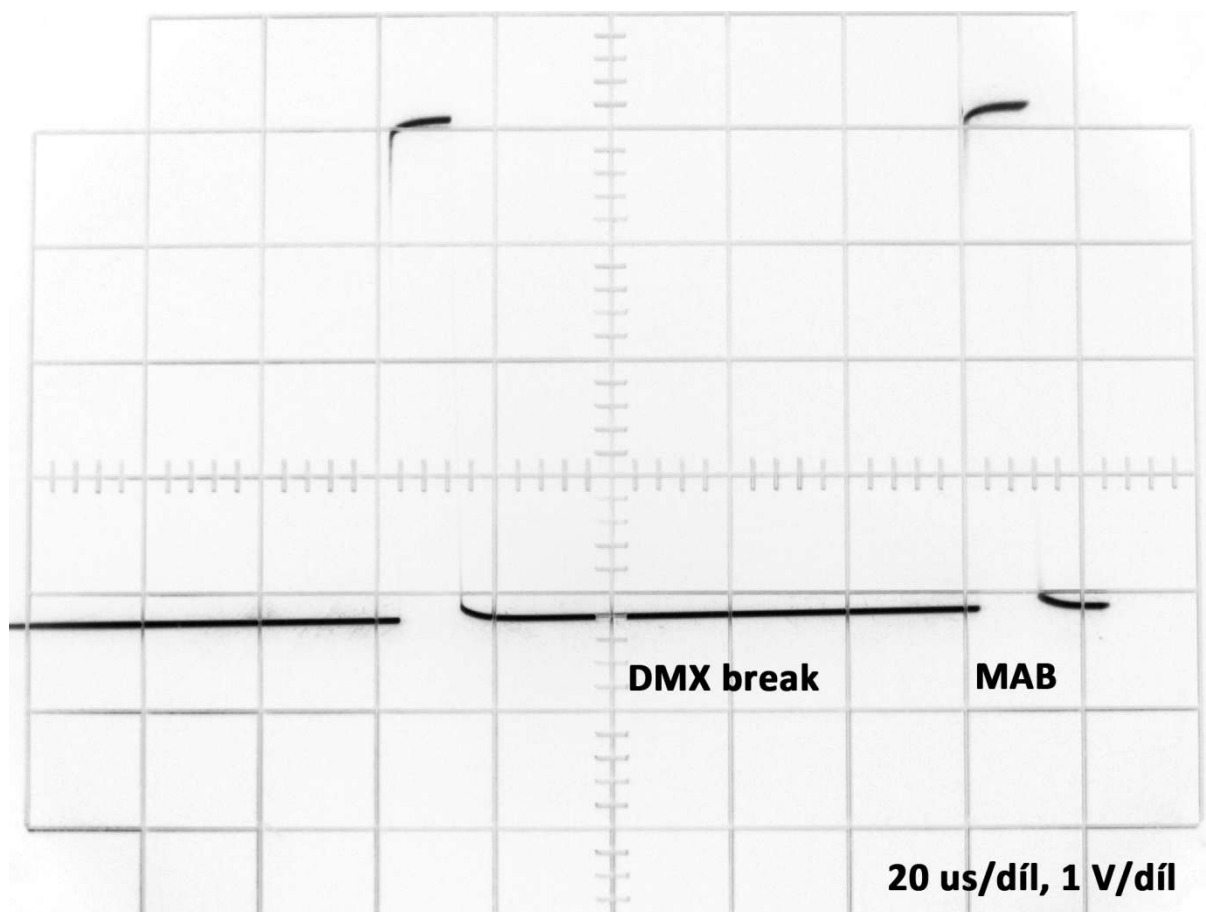
K měření časových intervalů byl použit analogový osciloskop, jehož grafický výstup ověřil funkčnost a dodržení parametrů pro komunikaci s transceiverem prostřednictvím sběrnice SPI i korektnost vysílání dat protokolem DMX 512. Měřením byly dále upřesněny výpočty potřebné doby pro odeslání jednotlivých datových paketů, s čímž se dále pracovalo při tvorbě komunikačního protokolu. Na obrázku 42 je znázorněn rámec protokolu DMX 512 odesílaný periferií UART do transceiveru SN75176.



Obr. 42 Fotografie z osciloskopu – rámec protokolu DMX 512

Vysílaný rámec začíná dle specifikace protokolu DMX 512 start bitem v nízké napěťové úrovni, poté následuje datový bajt a dva stop bity ve vysoké napěťové úrovni, což odpovídá zobrazenému průběhu. Vysílaná data by měla reprezentovat hodnotu 69, která je v binární soustavě reprezentována jako 01000101. Rychlost přenosu dat protokolem DMX 512 je stanovena na 250 000 bit/s. Při této rychlosti je doba odesílání jednoho bitu 4 us a doba odesílání celého rámce 44 us. Z výsledků osciloskopu vyplývá, že naměřené hodnoty odpovídají výpočtům, což potvrzuje i reálná zkouška na světelném zařízení.

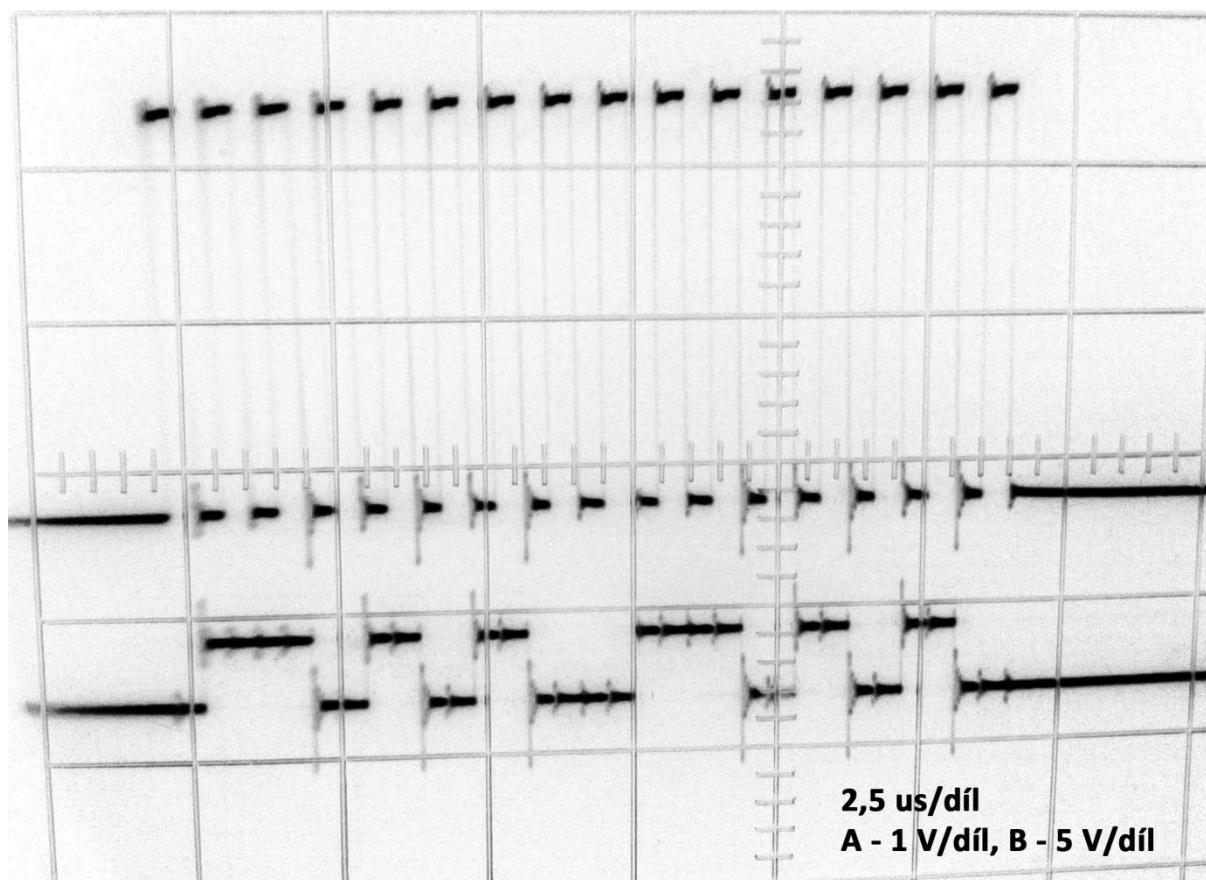
Obrázek 43 zobrazuje začátek DMX 512 paketu, ve kterém je pomocí čítače 5 generována restartovací sekvence a synchronizační mezera. Restartovací sekvence má dle specifikace protokolu DMX 512 minimální velikost 88 us při nízké napěťové úrovni. Synchronizační mezera navazuje na restartovací signál vysokou napěťovou úroveň, čímž upozorňuje připojená zařízení, že bude započato vysílání nového rámce. Protokol DMX 512 specifikuje minimální dobu trvání synchronizační mezery na 8 us. Ze zobrazených průběhů vyplývá, že naměřené hodnoty odpovídají specifikaci protokolu.



Obr. 43 Restartovací a synchronizační úseky paketu DMX 512

Komunikace mikrokontroléru s transceiverem MRF89x probíhá prostřednictvím sběrnice SPI a několika řídicích signálů. Rychlost sběrnice je 1 MHz, což odpovídá maximální možné rychlosti pro čtení z datové části dle doporučení výrobce. Na obrázku 44 je zobrazena část

komunikace, při které je čtena hodnota z konfiguračního registru. Zobrazené průběhy reprezentují hodinový a datový vodič sběrnice. V horní části je zobrazen průběh hodinového signálu, ve spodní části je zobrazen výstupní datový signál sběrnice ze strany od transceiveru. Dle informací z katalogového listu výrobce transceiveru MR89x jsou data čtena při nástupné hraně hodinového signálu. Dále je také specifikován způsob čtení a zápisu dat pro přístup ke konfiguračním registrům a paměti dat. K přečtení konfiguračního registru je zapotřebí celkem 16 hodinových taktů, při kterých je během první osmice odeslána adresa a informace, že je požadováno čtení z registru. Při dalších osmi hodinových taktech jsou na výstup odesílána validní data. Zobrazené časové průběhy odpovídají předpokladům.



Obr. 44 Komunikace SPI

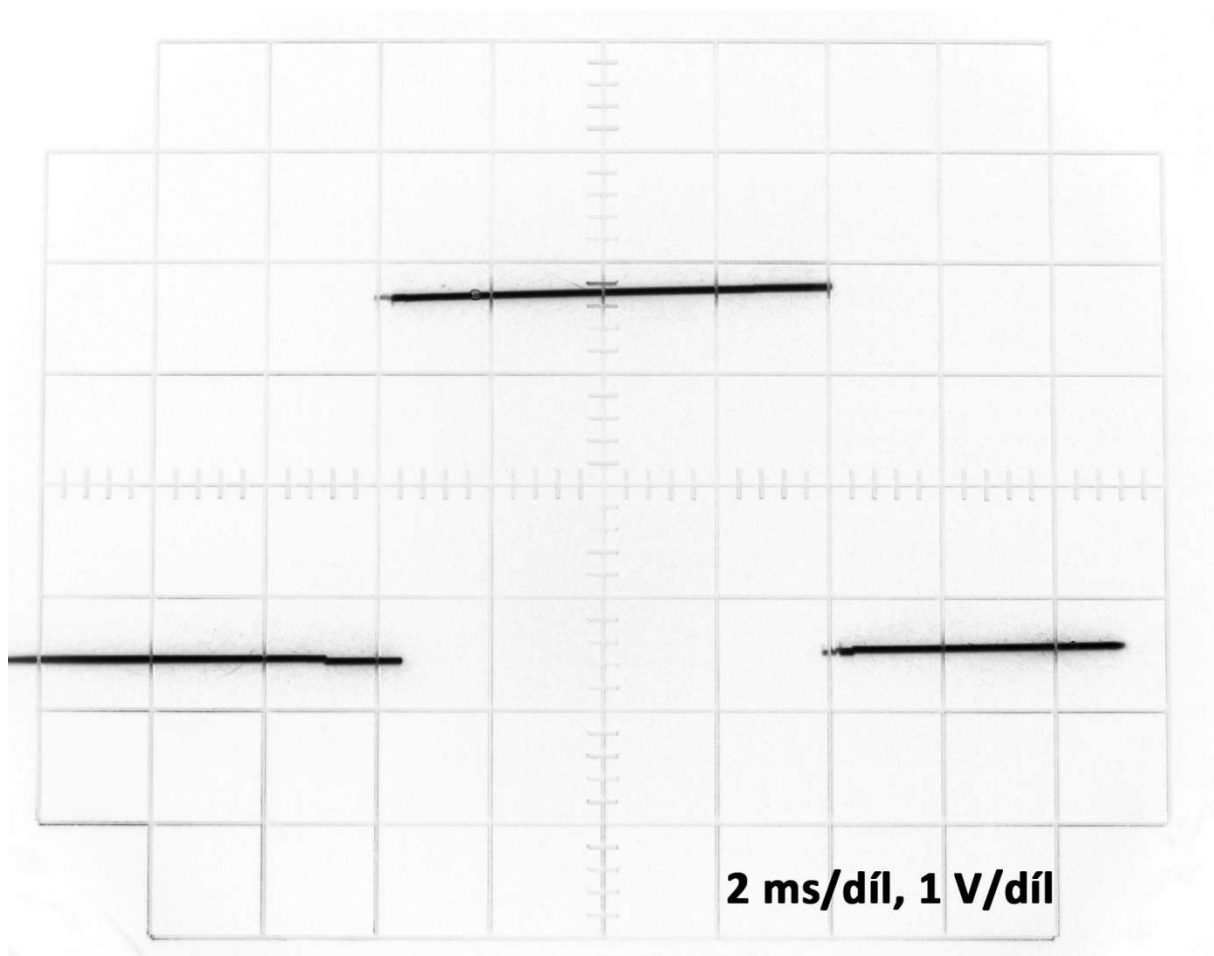
Při tvorbě komunikačního protokolu bylo nutné vypočítat dobu, po kterou je odesílána odpověď na autorizační paket. Tento paket je složen z preamble a synchronizačního slova. Tato dvojice obsahuje dohromady 8 B. Dále je v paketu obsažena hlavička paketu a data, celková velikost této dvojice je 10 B. Paket je na závěr zakončen dvojicí bajtů obsahující redundantní součet pro kontrolu, zdali nebyla data během doručení poškozena. Celková velikost odesílaných dat paketu je 20 B. Rychlost odesílání dat při zvolené frekvenční modulaci je 25 kb/s. Rovnice 3 obsahuje výpočet délky času, která je zapotřebí pro odeslání paketu uvedené velikosti.

$$t_{paket} = T_b * n_B * 8 [s] \quad (3)$$

$$t_{paket} = (25 * 10^3)^{-1} * 20 * 8 [s]$$

$$t_{paket} = 6,4 \text{ ms}$$

Reálná hodnota, včetně zápisu dat do paměti transceiveru a poskytnutí informace o úspěšném odeslání, je zobrazena na obrázku 45. Z naměřených hodnot vyplývá, že celkový čas, při kterém je vysílána odpověď na autorizační paket, nepřesahuje hodnotu 8 ms. Na základě těchto informací byla stanovena délka časového slotu využívaná při inicializaci sítě.



Obr. 45 Délka vysílání odpovědi na autorizační paket

5.2 Parametry zařízení v reálném provozu

Před zahájením bezdrátového vysílání je prováděna inicializace transceiveru, během které jsou nastavovány základní parametry bezdrátového přenosu. Mezi nejdůležitější parametry bezesporu patří typ klíčování signálu, nosná frekvence, šířka pásma, rychlost přenosu dat a vysílací výkon. Při realizaci bylo rozhodnuto o použití frekvenčního klíčování s šířkou pásma 100 kHz. Rychlost dat je stanovena na 25 kb/s, což je nejvyšší přípustná rychlost dle

katalogového listu transceiveru pro zvolený typ klíčování. Nosná frekvence je nastavena na pevnou hodnotu 867,9 MHz, což odpovídá kmitočtovému pásmu H pro zařízení krátkého dosahu (SDR). Nastavení frekvence je realizováno pomocí trojice registrů. V rovnici 4 je uveden výpočet pro jejich nastavení vyplývající z katalogového listu transceiveru.

$$R_1 = 119 [-] \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{\left(\left(\frac{f * 8 * (1 + R)}{9 * f_{XTAL}} \right) - 75 \right)}{76} + 1 [-]$$

$$P_1 = \frac{\left(\left(\frac{867,9 \text{ MHz} * 8 * (1 + 119)}{9 * 12,8 \text{ MHz}} \right) - 75 \right)}{76} + 1 = 95$$

$$S_1 = \left(\frac{f * 8 * (1 + R)}{9 * f_{XTAL}} \right) - (75 * (P + 1)) [-]$$

$$S_1 = \left(\frac{867,9 \text{ MHz} * 8 * (1 + R)}{9 * 12,8 \text{ MHz}} \right) - (75 * (95 + 1)) = 33$$

Pro ověření korektního nastavení nosného kmitočtu je na obrázku 46 zobrazeno frekvenční spektrum, ze kterého je patrné, že zařízení vysílá ve stanoveném frekvenčním rozmezí. Uvedenou hodnotu frekvence na měřidle je nutno brát pouze jako orientační z důvodu nevhodného nastavení spektrálního analyzátoru.



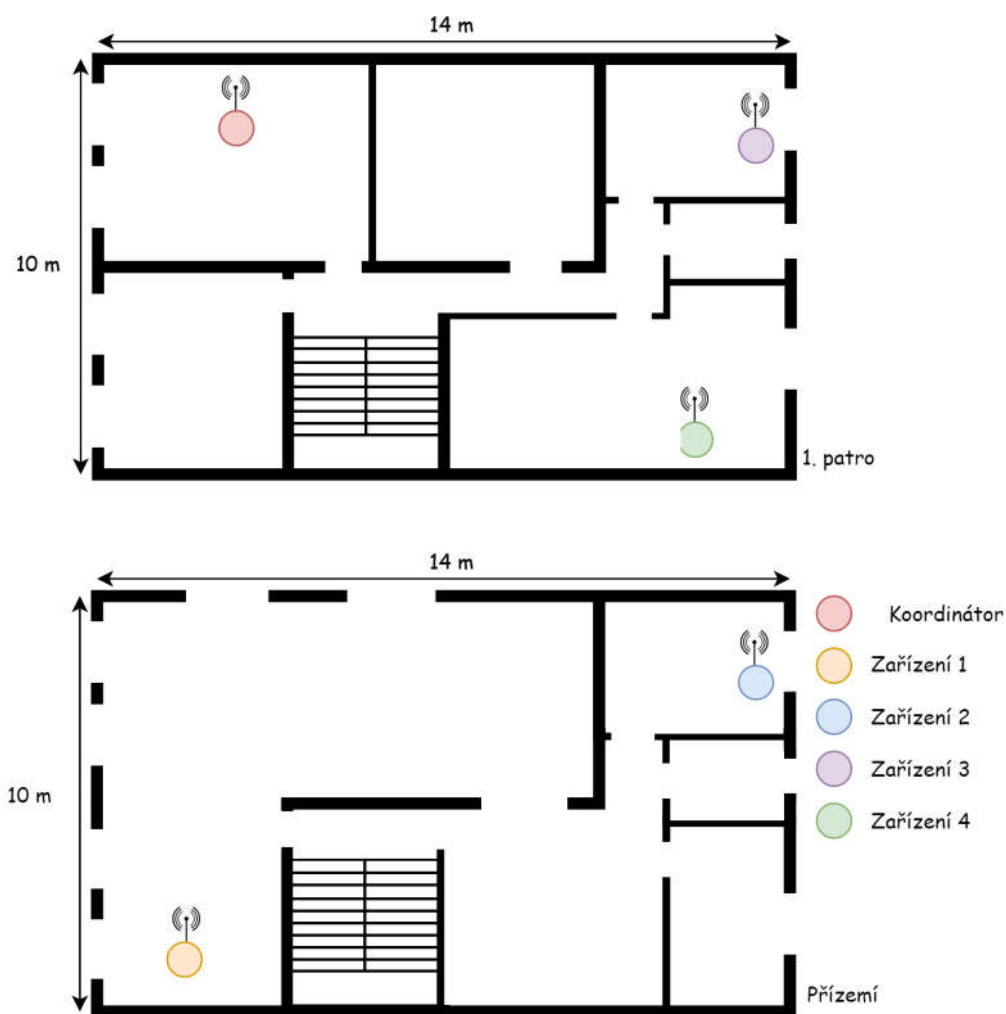
Obr. 46 Frekvenční spektrum

Frekvenční pásmo H pro zařízení krátkého dosahu (SDR) zahrnuje frekvenční rozmezí 863 až 870 MHz. Maximální přípustný vyzářený výkon v tomto pásmu je 25 mW. Pro následující měření byla použita externí anténa se ziskem 3,6 dBi a délkou $\frac{1}{4}$ lambda. Aby byl dodržen maximální vyzářený výkon zařízení, byl nastaven výstupní výkon koncového zesilovače v transceiveru na hodnotu 10 dBm. Teoretický maximální vyzářený výkon by neměl přesáhnout hodnotu 13,6 dBm, což odpovídá hodnotě 22,9 mW. Výpočet je uveden v rovnici 5.

$$P = 1mW * 10^{P_{dbm}/10} [mW] \quad (5)$$

$$P = 1mW * 10^{13,6/10} = 22,9 mW$$

Celkem byla provedena dvojice orientačního měření za účelem nastínění možného dosahu zařízení. První měření bylo prováděno v uzavřených prostorách. Vysílač byl umístěn v rohové místnosti, která se nachází v prvním patře. Čtveřice přijímačů byla rozmístěna do místností stejného objektu. Rozmístění jednotlivých zařízení je znázorněno na obrázku 47.

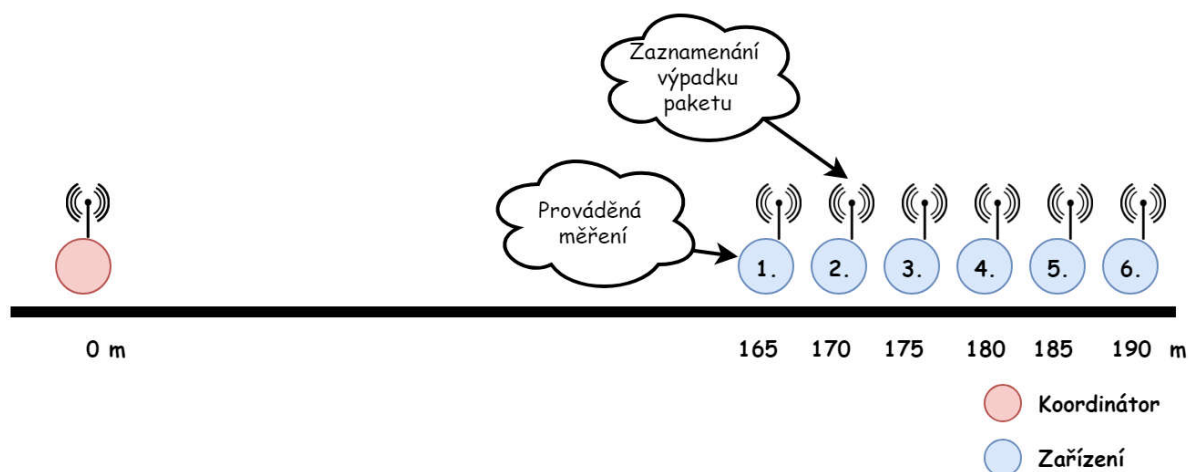


Obr. 47 Půdorys objektu pro orientační měření

Objekt, ve kterém bylo měření prováděno je postaven ze zdiva, jehož tloušťka u nosných a obvodových zdí dosahuje 35 cm. Zděné příčky mají tloušťku 10 cm. Mezi podlažími je litý beton tloušťky 30 cm.

Proces měření probíhal při simulovaných podmínkách běžného provozu, při kterém je nejprve sestavena síť koordinátorem, a poté jsou odesílány datové balíky pro všechna zařízení. Při procesu sestavení sítě byly v pořádku inicializovány 3 ze 4 zařízení. Od zařízení 2 nebyla doručena žádná odpověď na autorizační paket. Po inicializaci byla zahájena datová komunikace s trojicí zařízení. Po dobu nepřetržité datové komunikace trvající 10 minut nedošlo k žádnému výpadku provozu. Výpadek by byl zaznamenán v případě, že by nebylo možné ani po deseti pokusech doručit datový paket.

Druhé měření bylo zaměřeno na maximální možný dosah v otevřeném prostoru. Při měření byl použit koordinátor a zařízení, které bylo inicializováno v minimální blízkosti koordinátora. Následně probíhalo vzdalování zařízení od koordinátora sítě, dokud nebyly zaznamenány výpadky paketů, které slouží k udržení síťové komunikace. V okolí zaznamenaných výpadků spojení bylo prováděno opakované měření po délkových intervalech 5 m. Popisovaný princip měření je znázorněn na obrázku 48.



Obr. 48 Princip měření vzdálenosti

V tabulce 4 jsou uvedeny výsledky měření dosahu. První výpadky byly zaznamenány ve vzdálenosti 172 metrů. První měření bylo provedeno 5 metrů před místem zaznamenaného výpadku. Celkově bylo provedeno 6 měření. Z naměřených hodnot můžeme říci, že maximální dosah zařízení ve volném prostranství se pohybuje v rozmezí 170 až 180 metrů.

Tabulka 4: Výsledky orientačního měření dosahu signálu

Vzdálenost [m]	Pakety doručeno/odesláno	Úspěšnost doručení
165	100 / 100	100 %
170	98 / 100	98 %
175	73 / 100	73 %
180	61 / 100	61 %
185	0 / 100	0 %
190	0 / 100	0 %

6 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou bezdrátového řízení osvětlení. Téma této práce bylo nabídnuto firmou ROBE lighting s.r.o., která je jedním z předních světových výrobců pohyblivé osvětlovací techniky.

Začátek práce obsahuje krátkou rešerši možných způsobů řízení současné světelné techniky. Následuje popis radiových vln a způsobu jejich využití. Okrajově jsou popsány metody klíčování včetně jejich výhod a uplatnění. Dále je čtenáři nastíněna legislativa užívání bezlicenčních radiových frekvencí na území České republiky, přičemž jsou vysvětleny pojmy ISM a SDR. Teoretická část dále pokračuje rozbořem standardu IEEE 802.15.4, který popisuje bezdrátovou komunikaci pro zařízení krátkého dosahu. Na tento standard navazuje řada vyspělých komunikačních protokolů. V práci je stručně popsán protokol MiWi z důvodu výběru mikrokontroléru firmy Microchip.

Další částí práce je obecný návrh řešení, při kterém jsou definovány dva typy zařízení. Tato zařízení se dále označují jako moduly A a B. Modul A představuje zdroj datového signálu a prvotního aktéra při sestavení sítě, z čehož vyplývá, že není možné mít v síti více těchto modulů. Modul B je dle požadavků firmy Robe lighting s.r.o. bezdrátovou periferií, kterou je možno osadit do světelného zařízení. Při návrhu desek plošných spojů pro modul B musely být dodrženy požadavky na rozměr, umístění konektoru a pozici montážních děr, aby bylo možné modul B zakomponovat do stávajících světelných zařízení firmy ROBE lighting s.r.o. Vzhledem k možnostem použít elektronické součástky malých rozměrů v provedení povrchové montáže, bylo umožněno realizovat celé obvodové zapojení modulu A na desku plošného spoje, která splňuje požadavky pro osazení do světelných zařízení firmy ROBE lighting s.r.o. S ohledem na tuto skutečnost byly zhotoveny dva osazovací plány pro jednu desku plošného spoje.

Návrhu desek plošných spojů ovšem předcházela výběr vhodných elektronických komponent a s ním související výběr frekvenčního pásma pro danou problematiku. Při návrhu bylo rozhodnuto využít pásmo H určené pro zařízení krátkého dosahu (SDR), které zahrnuje frekvence 863 až 870 MHz. Z tohoto důvodu byl vybrán transceiver MRF89x, který je schopen pracovat v rozmezí těchto frekvencí. Pro správu elektronických komponent obou typů modulů byl vybrán mikrokontrolér PIC24FJ128GA204 od firmy Microchip. Návrh obvodového zapojení elektronických komponent vychází především z katalogových listů a doporučených zapojení od výrobce. Poslední popisovaná část v kapitole zabývající se návrhem zahrnuje návrh jednoduchého komunikačního protokolu, který je optimalizován požadavkům řízení světelné techniky. Jeho součástí je nejen správa komunikace mezi jednotlivými uzly sítě, ale i tvorba vlastní sítě před zahájením přenosu dat.

Druhá polovina práce se zabývá realizací desek plošných spojů, tvorbou programového vybavení pro mikrokontrolér a měření dosažených parametrů zařízení. Při realizaci programového vybavení byl vytvořen síťový protokol umožňující tvorbu sítě s topologií hvězda. Knihovny protokolu jsou nachystány pro budoucí rozšíření projektu s využitím stromové topologie sítě. Bezpečnost při přenosu dat zajišťuje standard pokročilého šifrování (AES) s využitím 128 bitového klíče.

Z důvodu časové náročnosti projektu nebyl dokončen algoritmus síťového protokolu, který by umožnil vytvořit síť stromové topologie dle návrhu protokolu. I přes tuto skutečnost bylo zadání diplomové práce zcela splněno. Realizovaný systém pro řízení osvětlovací techniky dokáže vytvořit virtuální síť za pomoci protokolu, který byl navržen a optimalizován dle požadavků na distribuci řídicího signálu. Systém dále dokáže komunikovat jak s připojenými světelnými zařízeními, tak i s uživatelem prostřednictvím sběrnice USB. Drobnou nevýhodou systému je malá rychlost bezdrátové komunikace transceiveru. Systém proto není vhodný pro řízení velkého množství osvětlovací techniky v reálném čase. Tato skutečnost byla již při návrhu brána na vědomí.

Téma práce vzniklo jako alternativa pro řízení osvětlovací techniky bezdrátovými moduly, které pracují na jiných frekvencích. Dosažené výsledky realizovaných modulů naplnily očekávání a i za předpokladu použití stávajícího transceiveru, který nedisponuje vysokou rychlostí bezdrátové komunikace, moduly najdou uplatnění. Navržený systém proto bude v budoucnu pod vedením firmy ROBE lighting s.r.o. rozšířen a upraven do podoby, která bude akceptovatelná pro sériovou výrobu.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/11.2016-13/obrazky/vo-r10-112016-13.pdf>
- [2] Frequently asked questions [online]. 2001 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html>
- [3] Impact of industrial, scientific and medical (ISM) equipment on radiocommunication services. International telecommunications union [online]. Geneva: Electronic Publication, 2011 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2180-2010-PDF-E.pdf
- [4] DR. HAIM MAZAR. ITU Workshop on Short Range Devices (SRDs) and Ultra Wide Band (UWB) [online]. Geneva, 2014, 35 str. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/workshops/RWP1B-SRD-UWB-14/Presentations/International,%20regional%20and%20national%20regulation%20of%20SRDs.pdf>
- [5] ETSI EN 300 220-2. European Telecommunications Standards Institute [online]. 2016 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.01.01_30/en_30022002v030101v.pdf
- [6] *IEEE Std 802.15.4* [online]. New York: IEEE, 2011 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://ecee.colorado.edu/~liue/teaching/comm_standards/2015S_zigbee/802.15.4-2011.pdf
- [7] Microchip MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack. *Microchip Technology Inc* [online]. U.S.A., 2010 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN1066%20-%20MiWi%20App%20Note.pdf>
- [8] Microchip MiWi™ PRO Wireless Networking Protocol. *Microchip Technology Inc.* [online]. U.S.A., 2011 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01371A.pdf>
- [9] 16-bit Embedded Control Solutions. *Microchip Technology Inc.* [online]. U.S.A., 2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001032Q.pdf>
- [10] LDK220. STMicroelectronics [online]. 2016 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/17/47/52/b8/86/63/45/b6/DM00109416.pdf/files/DM00109416.pdf/jcr:content/translations/en.DM00109416.pdf>
- [11] SN75176A Differential Bus Transceiver. Texas Instruments [online]. Dallas, 2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75176a.pdf>
- [12] ADM2483. Analog Devices [online]. 2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adm2483.pdf>
- [13] FT245R USB FIFO IC. Future Technology Devices International Limited [online]. 2010 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT245R.pdf
- [14] *Universal Serial Bus Specification* [online]. 2000 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: http://sdphca.ucsd.edu/Lab_Equip_Manuals/usb_20.pdf

- [15] PROKEŠ, Aleš, prof. Ing., Ph.D.. *RÁDIOVÉ KOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] MRF89XA Data Sheet. *Microchip Technology Inc* [online]. U.S.A., 2011 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70622C.pdf>
- [17] PIC24FJ128GA204 FAMILY. *Microchip Technology Inc*. [online]. U.S.A., 2015 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30010038c.pdf>
- [18] 1W DC-DC Unregulated Single Output Converter. Mean Well [online]. 2008 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.mean-well.cz/assets/data/SBT01-spec.pdf>
- [19] 915 MHz Ultra Low-Power Sub-GHz Transceiver Module. Microchip Technology Inc [online]. 2012 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/75017B.pdf>
- [20] SAW Components. EPCOS AG [online]. 2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/400/B3717-526034.pdf>
- [21] Microstrip Calculator. Pasternack [online]. Infinite Electronics International [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip.aspx>
- [22] MPLAB® XC16 C Compiler User's Guide. Microchip Technology Inc [online]. 2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/DS50002071GFinal1.pdf>

8 Seznam obrázků

Obr. 1	Paket protokolu DMX 512	- 10 -
Obr. 2	Přehled základních modulací nosného signálu	- 13 -
Obr. 3	Digitální modulace 2-ASK [14]	- 14 -
Obr. 4	Digitální modulace 2-FSK [14]	- 14 -
Obr. 5	Digitální modulace 2-PSK [14]	- 15 -
Obr. 6	Síťové topologie protokolu IEEE 802.15.4 [6]	- 19 -
Obr. 7	Síťová topologie Cluster-Tree [6]	- 20 -
Obr. 8	Datový rámec fyzické vrstvy [6]	- 20 -
Obr. 9	Datový rámec linkové vrstvy [6]	- 21 -
Obr. 10	Topologie protokolů MiWi [8]	- 22 -
Obr. 11	Paket protokolu MiWi PRO [8]	- 23 -
Obr. 12	Short Adress MiWi a příklad jeho přidělení [7]	- 24 -
Obr. 13	Diagram navrženého systému	- 25 -
Obr. 14	Blokové diagramy modulů	- 26 -
Obr. 15	SPI Komunikace s Transceiverem MRF 89x [15]	- 27 -
Obr. 16	Paket transceiveru MRF 89x [15]	- 28 -
Obr. 17	Blokový diagram mikrokontrolérů řady PIC24F	- 28 -
Obr. 18	Schéma zapojení napájecího obvodu modulu A	- 29 -
Obr. 19	Schéma zapojení interface DMX 512	- 30 -
Obr. 20	Schéma zapojení interface pro komunikaci se světelným zařízením	- 31 -
Obr. 21	Schéma zapojení interference USB	- 32 -
Obr. 22	Obvodové zapojení bloku MCU	- 33 -
Obr. 23	Obvodové zapojení bloku RF	- 34 -
Obr. 24	Topologie navrhované sítě	- 36 -
Obr. 25	Paket navrženého protokolu	- 37 -
Obr. 26	Směrovací tabulky protokolu	- 39 -
Obr. 27	Osazená deska plošného spoje modulu A	- 40 -

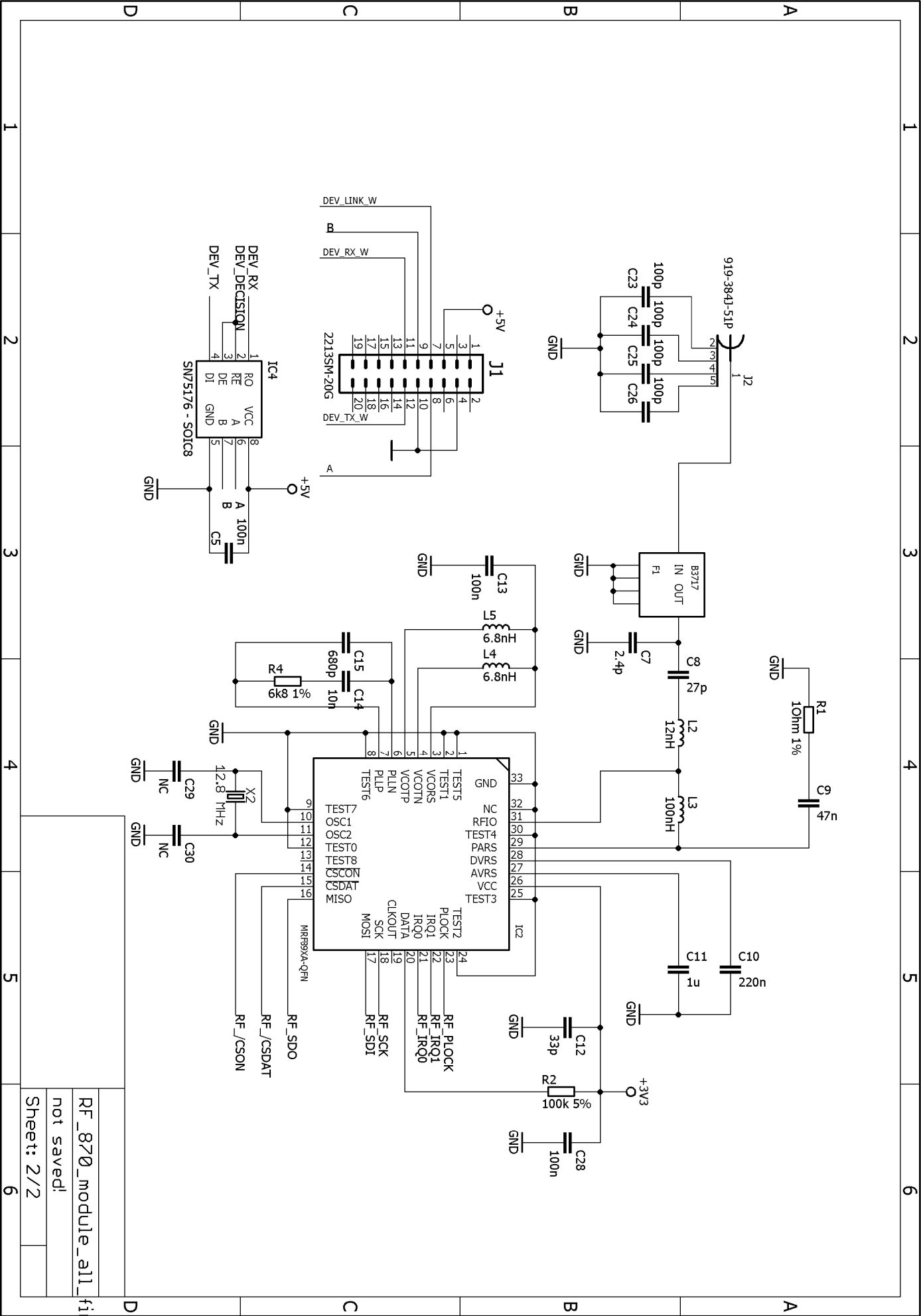
Obr. 28 Spodní strana desky plošného spoje modulu B.....	- 41 -
Obr. 29 Blokový diagram struktury programu.....	- 42 -
Obr. 30 Nastavení příznaku změny bajtu DMX 512.....	- 43 -
Obr. 31 Algoritmus příjmu dat DMX 512 protokolu.....	- 43 -
Obr. 32 Algoritmus vysílání dat DMX 512 protokolu.....	- 44 -
Obr. 33 Inicializace sítě – přihlášení zařízení	- 45 -
Obr. 34 Časové sloty a jejich náhodné obsazení.....	- 45 -
Obr. 35 Inicializace sítě – přidělení adresy	- 46 -
Obr. 36 Inicializace sítě – proces přidělení klíče	- 46 -
Obr. 37 Beacon paket sítě.....	- 47 -
Obr. 38 Algoritmus nastavení příznaku pro odeslání dat.....	- 48 -
Obr. 39 Přenos datových paketů v síti.....	- 48 -
Obr. 40 Správce zařízení – nastavení čísla portu	- 49 -
Obr. 41 Ukázka komunikace koordinátoru s uživatelem	- 50 -
Obr. 42 Fotografie z osciloskopu – rámec protokolu DMX 512	- 51 -
Obr. 43 Restartovací a synchronizační úseky paketu DMX 512	- 52 -
Obr. 44 Komunikace SPI	- 53 -
Obr. 45 Délka vysílání odpovědi na autorizační paket	- 54 -
Obr. 46 Frekvenční spektrum.....	- 55 -
Obr. 47 Půdorys objektu pro orientační měření	- 56 -
Obr. 48 Princip měření vzdálenosti.....	- 57 -

The diagram illustrates the internal circuitry of the RF_870 module. Key components include:

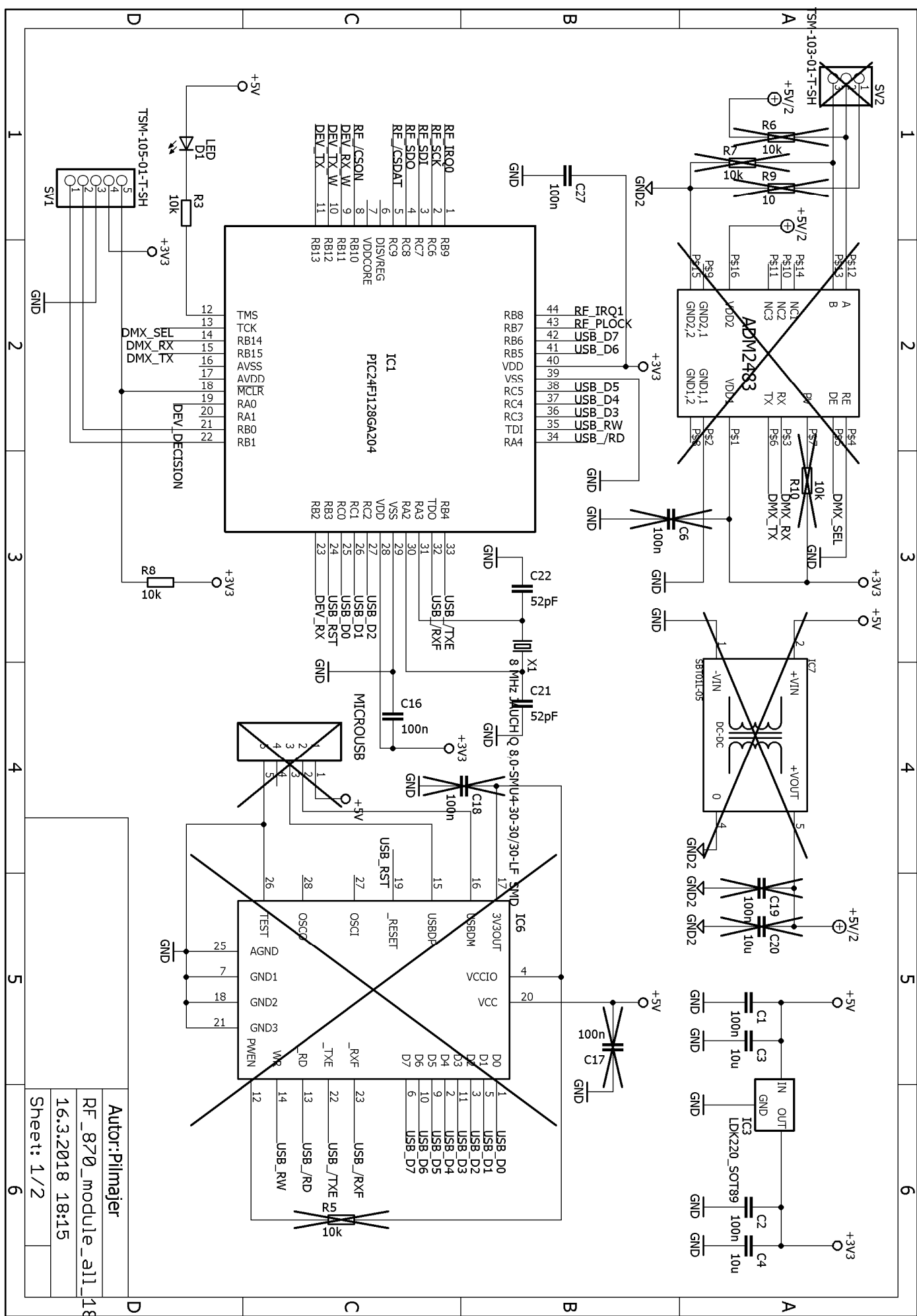
- PIC24F128GA204 (IC1):** The central microcontroller, configured with various pins for RF, USB, and general I/O.
- ADM2483 (IC2):** A differential line driver/receiver for RS-485 communication, connected to the PIC's TX and RX pins.
- DC-DC Converter (IC3):** A 3V3 to 5V converter (SOT23-5) for power regulation.
- USB Module (IC6):** A USB-to-UART bridge (FT232RL) for interfacing with a PC.
- Connectors:**
 - SV2:** 5V and GND pins.
 - SV1:** 3V3 and GND pins.
 - DMX:** DMX_SEL, DMX_RX, and DMX_TX pins.
 - DEV:** Various development pins including TX, RX, and control lines.
- Passive Components:** Resistors (R1-R10), capacitors (C1-C27), and an LED (D1) are used for signal conditioning and power management.

The layout is organized into sections labeled A, B, C, and D, corresponding to the top, bottom, left, and right of the module respectively.

Sheet: 1/2

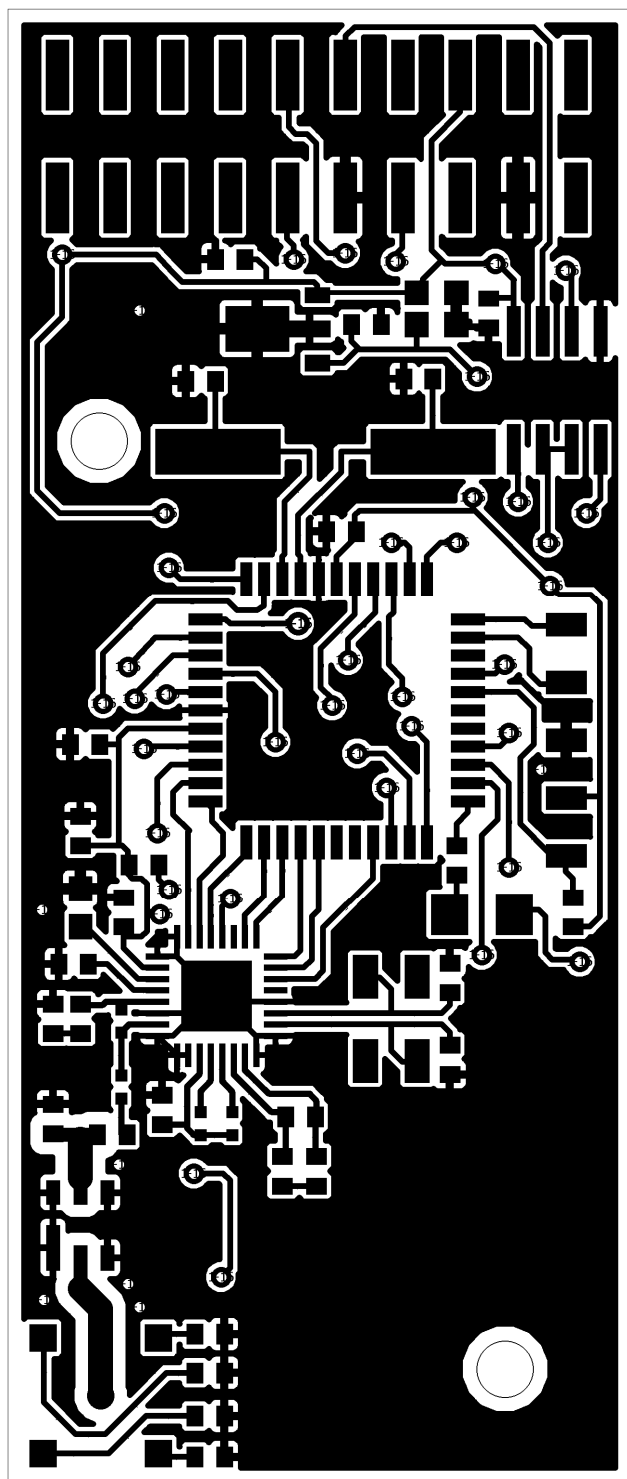


Příloha 2 – Změny obvodového schématu pro modul B

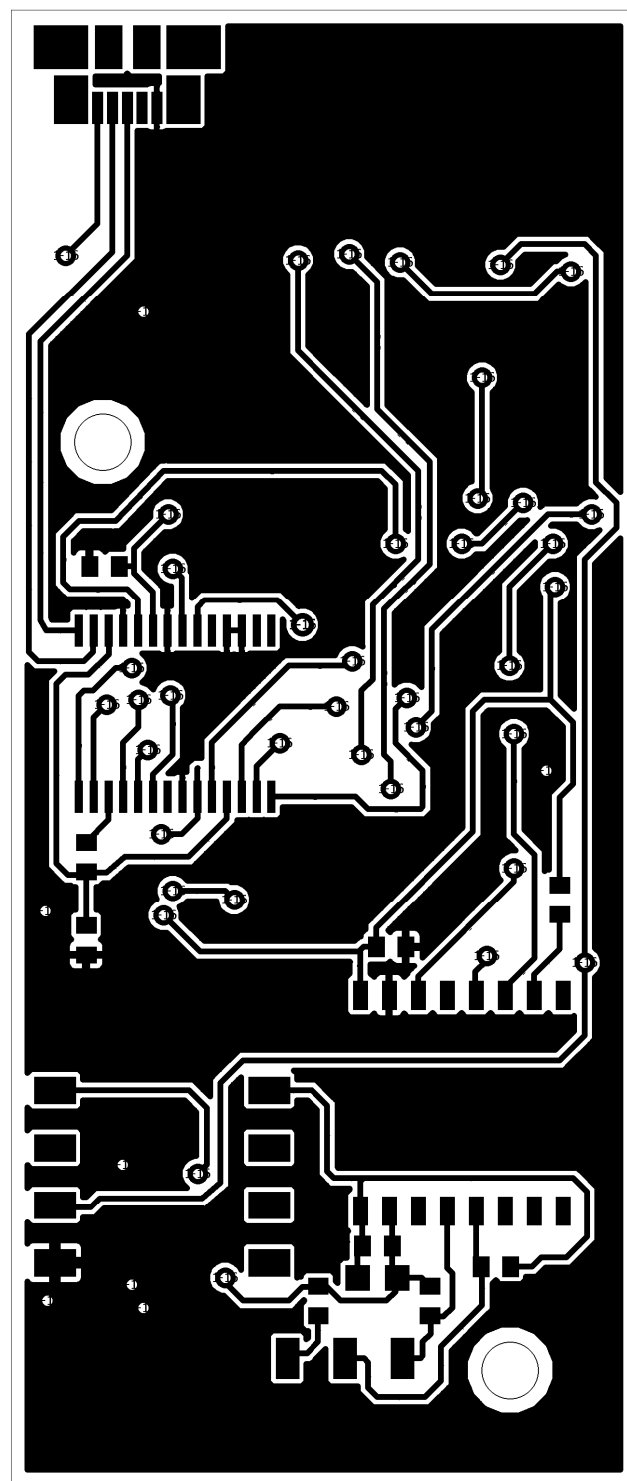


Příloha 3 – Návrh desky plošného spoje

Měřítko 3:1



Horní strana



Dolní strana