

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ**  
**ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Peer-to-peer komunikace ve frekvenčním pásmu 868 MHz

**vedoucí práce: Ing. Radek Šalom. 2014**

**autor: Bc. Petr Vaněček**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr VANĚČEK**  
Osobní číslo: **E12N0159P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**  
Název tématu: **Peer-to-peer komunikace ve frekvenčním pásmu 868 MHz**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Diplomová práce souvisí s realizací hardwaru a příslušného softwaru pro peer-to-peer komunikaci v rámci frekvenčního pásma 868 MHz.

1. Prostudujte na trhu dostupné transceivery komunikující ve frekvenčním pásmu 868 MHz a vyberte vhodné kandidáty pro realizaci spolehlivé bezdrátové sítě s nízkým odběrem.
2. S pomocí zvoleného transceiveru a vhodného mikroprocesoru realizujte hardware pro peer-to-peer komunikaci ve frekvenčním pásmu 868MHz a implementujte vhodnou linkovou vrstvu umožňující přenášet pakety mezi jednotlivými uzly a jejich potvrzování. Při implementaci linkové vrstvy postupujte s ohledem na zajištění spolehlivosti přenosu.
3. Zhodnoťte realizované řešení, navrhnete další možná vylepšení a práci podrobně popište

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radek Šalom**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá návrhem hardwaru a softwaru pro praktickou realizaci Peer-to-peer komunikace ve frekvenčním pásmu 868 MHz. Tato práce popisuje výběr hlavních částí výrobku a porovnání různých typů transceiverů. Dále se diplomová práce zabývá vyrobáním konkrétního zařízení od návrhu schéma po návrh desky plošných spojů a softwarovou realizací linkové vrstvy.

## **Klíčová slova**

Peer-to-peer, Transceiver, Frekvenční pásmo 868 MHz, Modul, Bezdrátový

## **Abstract**

This diploma thesis deals with hardware and software design for practical realization of Peer-to-peer communication in 868 MHz frequency band. This thesis describes choice of the main parts of the product and comparison of various types of transceivers. Furthermore, the thesis handles the production of a particular device from schematic design to design of a printed circuit board and software realization of a link layer.

## **Keywords**

Peer-to-peer, Transceiver, Frequency band 868 MHz, Module, Wireless

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9.5.2014 Bc. Petr Vaněček

.....

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Šalomovi, za ochotu a rady při metodickém vedení této práce.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>6</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>13</b>
<b>1 PROVOZ ZAŘÍZENÍ KRÁTKÉHO DOSAHU .....</b>	<b>15</b>
1.1 RÁDIOVÁ PÁSMÁ .....	15
1.2 ZAŘÍZENÍ PRACUJÍCÍ V PÁSMU SRD.....	15
1.3 PODMÍNKY PROVOZU .....	16
1.4 SPECIFIKACE KONKRÉTNÍCH PODMÍNEK .....	17
1.5 ISM.....	18
<b>2 OBECNÝ RADIOKOMUNIKAČNÍ MODEL SYSTÉMU .....</b>	<b>19</b>
2.1 PEER TO PEER KOMUNIKACE.....	19
2.2 MODULACE .....	20
2.2.1 <i>Digitální modulace</i> .....	20
2.2.2 <i>Modulace FSK</i> .....	21
2.2.3 <i>Modulace OOK</i> .....	22
2.2.4 <i>Modulace PSK</i> .....	23
<b>3 TRANSCEIVER.....</b>	<b>24</b>
3.1 VÝBĚR TRANSCEIVERU .....	24
3.2 TRANSCEIVERY JAKO PERIFÉRIE MIKROKONTROLÉRU .....	24
3.2.1 <i>Vlastnosti mikrokontroléru s transceiverem</i> .....	24
3.2.2 <i>Parametry mikrokontroléru s transceiverem</i> .....	25
3.3 TRANSCEIVERY JAKO SAMOSTATNÉ MODULY .....	26
3.3.1 <i>Parametry modulů</i> .....	26
3.4 POPIS NĚKTERÝCH FUNKCÍ TRANSCEIVERŮ.....	27



3.4.1	<i>CSMA/CA protokol</i> .....	28
3.4.2	<i>AES</i> .....	28
3.4.3	<i>RSSI</i> .....	29
3.4.4	<i>Potvrzení doručení</i> .....	29
3.4.5	<i>Kontrolní součty</i> .....	29
3.4.6	<i>Rámce</i> .....	30
3.4.7	<i>Druhy režimů</i> .....	30
<b>4</b>	<b>STAVBA ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>31</b>
4.1	BLOKOVÉ SCHÉMA .....	31
4.1.1	<i>FTDI</i> .....	31
4.1.2	<i>Nabíjecí obvod</i> .....	32
4.1.3	<i>Akumulátor</i> .....	32
4.1.4	<i>DC/DC měnič</i> .....	33
4.1.5	<i>Mikrokontrolér</i> .....	33
4.1.6	<i>Transceiver</i> .....	34
4.2	PROGRAMOVÁNÍ.....	35
4.2.1	<i>JTAG</i> .....	35
4.2.2	<i>Programování</i> .....	35
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
5.1	ZHODNOCENÍ.....	39
5.2	DALŠÍ VÝVOJ .....	39
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>40</b>
	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

## **Úvod**

V této práci se zaměřím na výběr a realizaci hardwaru a příslušného softwaru pro peer-to-peer komunikaci ve frekvenčním pásmu 868 MHz.

Cílem této diplomové práce je prostudovat dostupné transceivery a vybrat vhodného kandidáta pro realizaci spolehlivé bezdrátové sítě s nízkým odběrem. Z prostudovaných transceiverů jsem vybral modul SPIRIT1 od společnosti STMicroelectronics. K tomuto modulu jsem jako řídicí prvek vybral mikrokontrolér STM32L151CC od stejnojmenné firmy. Text diplomové práce jsem rozdělil do několika částí. Nejdůležitějšími kapitolami jsou Transceiver a Stavba zařízení. V těchto kapitolách popisuji, jak jsem postupoval při výběru vhodného transceiveru a také popis celkového návrhu zařízení.

## Seznam symbolů

$B$ [Hz]	Šířka pásma
$f$ [Hz]	Frekvence
$P$ [W]	Výkon
$v_m$ [Bd]	Modulační rychlost
$v_p$ [b/s]	Přenosová rychlost

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 2.1 OBECNÝ KOMUNIKAČNÍ MODEL .....	19
OBRÁZEK 2.2 ARCHITEKTURA SÍTÍ .....	20
OBRÁZEK 2.3 FSK MODULACE .....	22
OBRÁZEK 2.4 OOK MODULACE .....	22
OBRÁZEK 2.5 MODULACE PSK .....	23
OBRÁZEK 4.1 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ .....	31
OBRÁZEK 4.2 NABÍJECÍ OBVOD.....	32
OBRÁZEK 4.3 DC/DC MĚNIČ .....	33

## **Seznam tabulek**

TABULKA 1.1 KONKRÉTNÍ PODMÍNKY .....	17
TABULKA 3.1 MIKROKONTROLÉRY S PERIFÉRIÍ .....	26
TABULKA 3.2 SAMOSTATNÉ MODULY .....	27
TABULKA 3.3 VÝKONNĚJŠÍ MODULY .....	27
TABULKA 3.4 STACKPACKET.....	30
TABULKA 4.1 VLASTNOSTI MIKROKONTROLÉRU .....	34
TABULKA 4.2 VLASTNOSTI SPIRIT1 .....	35
TABULKA 4.3 INICIALIZACE SCK .....	36
TABULKA 4.4 INICIALIZACE SPI .....	37
TABULKA 4.5 FUNKCE ČTENÍ.....	38

## Seznam rovnic

ROVNICE 2.1 MODULAČNÍ RYCHLOST.....	21
ROVNICE 2.2 PŘENOSOVÁ RYCHLOST .....	21
ROVNICE 2.3 VZTAH PRO LOG 1 FSK.....	21
ROVNICE 2.4 VZTAH PRO LOG 0 FSK.....	21
ROVNICE 2.5 VZTAH PRO LOG 1 PSK.....	23
ROVNICE 2.6 VZTAH PRO LOG 0 PSK.....	23

## Seznam zkratek

Zkratka	Anglicky	Česky
ČTÚ		Český telekomunikační úřad
ERP	Effective Radiated Power	Efektivní vyzářený výkon
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power	Ekv.izotropně vyzářený výkon
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
LBT	Listen Before Talk	
SRD	ShortRangeDevices	Zařízení krátkého dosahu
ISM	Industrial, Scientific and Medical	průmyslové, vědecké a zdravotnické
ERC		Evropský radiokomunikační výbor
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations	Evropská konference poštovních a telekomunikačních správ
ECC	European Radiocommunications Committee	Evropská správa komunikací
OSN		Organizace Spojených Národů
ČSN		Označení československých norem
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Evropský ústav pro telekomunikační normy
OSN		Organizace Spojených Národů
FSK	Frequency Shift Keying	Frekvenční klíčování
OOK	On-Off Keying	Zapnuto-vypnuto klíčování
BFSK	Binary Frequency Shift Keying	Binární frekvenční klíčování
GFSK	Gaussian Prefiltered Frequency Shift Keying	FSK s Gaussovským filtrem
MSK	Minimum Shift Keying	Minimální klíčování
GMSK		MSK s Gaussovským filtrem
ASK	Amplitude Shift Keying	Klíčování amplitudovým posuvem
PSK	Phase Shift Keying	Klíčování fázovým posuvem
BPSK	Binary-Phase Shift Keying	Binární PSK
RISC	Reduced Instruction Set Computing	Redukovaná (optimalizovaná) sada instrukcí

---

ARM	Advanced RISC Machine	Architektura mikrokontrolérů
SPI	Serial Peripheral Interface	Sériová rozhraní
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter	Synchoronní/asynchoronní sériové rozhraní
P2P	Peer-to-peer	Architektura komunikce
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	Protokol pro přístup k médiu
CCA	Clear Channel Assessment	Detekce nosné
ACK	Acknowledgement	Potvrzování
AES	Advanced Encryption Standard	Standard pokročilého šifrování
RSSI	Received Signal Strength Indication	Výkon přijímaného signálu
CRC	Cyclic Redundancy Check	Cyklický redundantní součet
RS	Reed- Solomon	Samoopravný kód
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
DPS		Deska Plošných Spojů



# 1 Provoz zařízení krátkého dosahu

## 1.1 Rádiová pásma

O využití rádiového spektra se v České republice stará Český telekomunikační úřad (ČTÚ). Česká republika je jednou z členských zemí Mezinárodní telekomunikační unie (ITU), kam spadají všechny členské země OSN (Organizace Spojených Národů).

Hlavními úkoly ITU jsou například rozdělování kmitočtových pásem, způsoby a zásady využití kmitočtového spektra, přidělování kmitočtových úseků jednotlivým radiokomunikačním službám a další služby. Každý výrobce, i někteří uživatelé musí dodržovat podmínky vytvořené těmito organizacemi a mít potřebnou licenci na dané pásmo. Kromě licencovaných pásem existují i bezlicenční, v těchto pásmech ovšem také platí různá pravidla, která se musí dodržovat. Pravidla pro bezlicenční pásma jsou uvedena níže, protože tato práce je navržena právě v těchto oblastech frekvencí.

## 1.2 Zařízení pracující v pásmu SRD

Podmínky pro provozování zařízení využívajících rádiových kmitočtů a provozování rádiových zařízení krátkého dosahu (SRD) pro Českou republiku vychází z doporučení Evropského radiokomunikačního výboru (ERC) Evropské konference poštovních a telekomunikačních správ (CEPT).

CEPT patří pod jednu z normalizačních institucí, jako je například Evropská komise pro normalizaci nebo Evropská komise pro normalizaci v elektrotechnice. Byla založena v roce 1959 a nyní čítá 48 členských zemí. CEPT se skládá ze tří hlavních složek, z nichž jedna je právě zodpovědná za oblast radiokomunikací a telekomunikací (ECC). V roce 1988 založila CEPT Evropský ústav pro telekomunikační normy (ETSI).

ETSI je nezisková a nezávislá organizace zabývající se standardizací informačních a komunikačních zařízení v Evropě. Tento ústav vydal některé, pro tuto práci důležité, normy pro SRD zařízení. První normou je EN 300 220 [2], která popisuje rádiová zařízení v kmitočtovém rozsahu od 25 MHz do 1000 MHz s maximálním výkonem do 500mW. Tato norma byla u nás přejata pod označením ČSN ETSI EN 300 220. Z důvodů rozšíření práce na zařízení pracujícím na kmitočtu 2,4 GHz je pro nás důležitá i norma ETSI EN 300 440

(v ČR ČSN ETSI EN 300 440), která popisuje kmitočtový rozsah od 1 GHz do 40 GHz. Tyto normy doplňují nařízení od ITU pro ISM pásmo.

### 1.3 Podmínky provozu

Na zařízení krátkého dosahu se vztahuje všeobecné oprávnění českého telekomunikačního úřadu č. VO-R/10/04.2012-7 [1]. Toto oprávnění stanovuje podmínky provozování přístrojů krátkého dosahu využívajících rádiového pásma. Výrobce i uživatelé musejí dbát těchto podmínek:

- a) stanice lze provozovat bez individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů
- b) stanice se užívají v pevné službě, pozemní pohyblivé službě a bezpečnostní službě, v oblastech dálkového ovládání, telemetrie, signalizace a přenosu poplachových informací, přenosu hovorových signálů, přenosu dat, přenosu obrazových informací a v dalších podobných oblastech
- c) stanice lze provozovat pouze s vestavěnou anténou nebo s anténou, kterou stanoví výrobce, jím zmocněný zástupce v členském státě Evropské unie nebo osoba odpovědná za uvedení zařízení na trh dle návodu k obsluze. Stanice nesmí být provozovány s přídatnými zesilovači vysokofrekvenčního výkonu a s převaděči
- d) stanice jsou provozovány na sdílených kmitočtech
- e) využívání kmitočtů stanicemi je zařazeno do kategorie podružné (sekundární) služby, stanice tedy nesmí působit škodlivé rušení stanicím přednostních radiokomunikačních služeb a nemají ochranu před škodlivým rušením způsobeným vysílacími rádiovými stanicemi jiných radiokomunikačních služeb provozovaných na základě individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů nebo dalšími stanicemi krátkého dosahu již do provozu uvedenými. Případné rušení uživatelé řeší vzájemnou dohodou

Tyto veškeré obecné podmínky jsou přesně převzaty z [1]. Byly vybrány jen některé hlavní podmínky, které jsou pro zhotovení této práce klíčové.

## 1.4 Specifikace konkrétních podmínek

Sestavené zařízení musí splňovat podmínky dle ČTÚ. V tabulce 1.1 jsou vybrané hodnoty pro komunikaci na frekvenci 868 MHz a 2,4 GHz. Tabulka je upravena a převzata z pramene [1].

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Kanálová rozteč	Klíčovací poměr
g	863,000–870,000 MHz	25 mWERP		$\leq 0,1$ % pozn. 2
g1	868,000–868,600 MHz	25 mWERP	nedefinovaná	$\leq 1,0$ % pozn. 2
g2	868,700–869,200 MHz	25 mWERP	nedefinovaná	$\leq 1,0$ % pozn. 2
g3	869,300–869,400 MHz	25 mWERP	max. 25 kHz	$\leq 100$ %
g4	869,400–869,650 MHz	500 mWERP	max. 25 kHz pozn. 1	$\leq 10$ % pozn.2
g5	869,700–870,000 MHz	5 mWERP	nedefinovaná	$\leq 100$ %
g6	869,700–870,000 MHz	25 mWERP	nedefinovaná	$\leq 100$ %
h	2400–2483,5 MHz	25 mWEIRP	nedefinovaná	$\leq 100$ %

**Tabulka 1.1 Konkrétní podmínky**

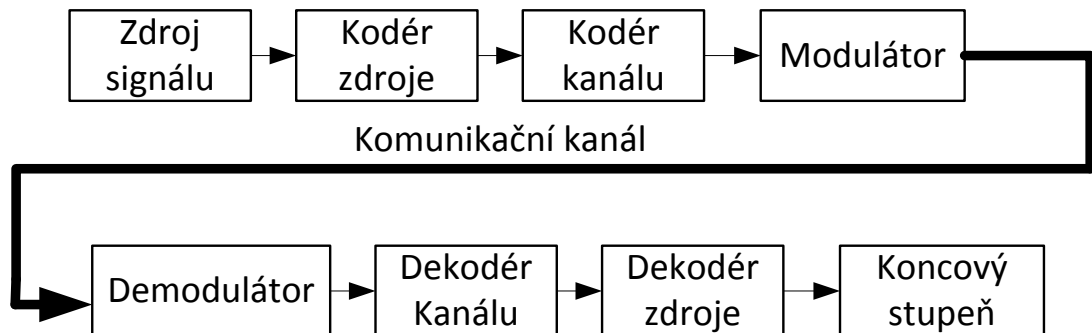
Z tabulky můžeme vyčíst, že pásmo g se rozděluje na sub pásma od g1 až po g6, kde platí podmínky, které jsou vypsány v kapitole 1.3 a v tabulce 1.1. Poznámka 1 nám dále říká, že se může vysílat v celém kmitočtovém pásmu nebo může být využito jako jeden kanál pro přenos dat s vysokou rychlostí. Přitom kanálovou roztečí rozumíme rozdíl mezi sousedními frekvencemi. Poznámka 2 umožňuje výjimku při použití technologie LBT (Listen Before Talk, kdy stanice vysílá pouze na vyžádání), kde není klíčovací poměr omezen. Klíčovacím poměrem rozumíme dobu vysílání na nosné frekvenci ku jedné hodině. V tabulce 1.1 je výkon vyjádřen v ERP (Effective Radiated Power) nebo v EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power). ERP vyjadřuje celkový vyzářený výkon dipólovou anténou tak, aby v určitém směru bylo dosaženo jisté intenzity záření. EIRP udává celkový výkon vyzářený izotropní anténou tak, aby v určitém směru bylo dosaženo dané intenzity záření. Pásmo h nesouvisí přímo se zadáním této diplomové práce, ale při hledání vhodných zařízení pro vysílání a příjem se zdálo být vhodné prozkoumat i tuto frekvenční oblast. Z důvodů, které jsou popsány v kapitole 3.1 výběru transceiveru.

## **1.5 ISM**

Tato zkratka se v katalogových listech transceiverů často vyskytuje, a proto jí uvádím. ISM (Industrial, Scientific and Medical) zařízení jsou taková, která se používají ve zdravotnickém a vědeckém odvětví, nebo také pro průmyslové využití. ISM zařízení pracují v rozhraní bezlicenčních pásem. Podmínky pro provoz těchto zařízení vydal ČTÚ. Konkrétní podmínky viz kapitola 1.3.

## 2 Obecný radiokomunikační model systému

Podle Shannona lze všechny různé druhy rádiových komunikačních systémů považovat pouze jen za zvláštní případ obecného komunikačního systému, který je znázorněn na obrázku 2.1.



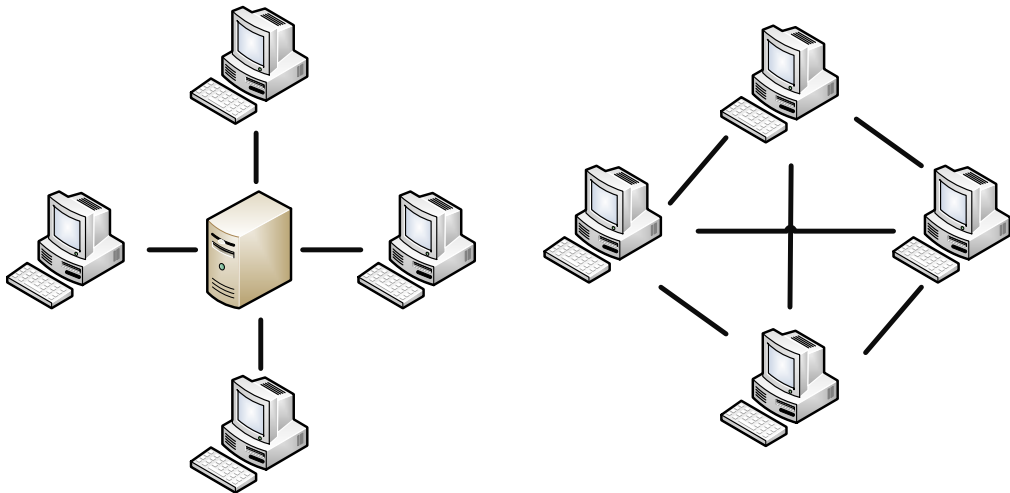
**Obrázek 2.1 Obecný komunikační model**

Zdrojem signálu rozumíme to, že do tohoto bloku vcházejí zprávy nesoucí informaci. Kodérem zdroje je myšleno zařízení, které nám zprávu upraví pro náš přenos, např. odstranění redundance. V kodéru kanálu se naopak redundance záměrně přidává. Přidává se z důvodu zabezpečení přenosu. Na tuto práci je vysoký požadavek na zabezpečení přijetí zprávy. Různé druhy zabezpečení jsou vysvětleny v kapitole 3. V modulátoru se modulačním signálem ovlivňují parametry nosného signálu, více v kapitole 2.2. Komunikačním kanálem je v našem případě volné prostředí. V přijímači, který je znázorněn v dolní polovině obrázku 2.1, se signál zpracovává v opačném smyslu než ve vysílači v horní polovině.

### 2.1 Peer to peer komunikace

Komunikace v síti se dají rozdělit do několika skupin. Jednou z hlavních skupin je, jak vlastní komunikace probíhá a kdo ji řídí. Do této skupiny spadá tzv. architektura Klient-server (obrázek 2.2 vlevo) a Peer-to-peer (obrázek 2.2 vpravo). Na obrázku jsou pro názornost síť zobrazeny pomocí serveru a osobních počítačů, ale mohou zde být jiná zařízení. U peer-to-peer (dále již jen P2P) architektury, na rozdíl od architektury klient-server, jsou si všechny prvky v síti rovny a není zde centrální server. U P2P sítí může tedy jakýkoliv prvek komunikovat bezprostředně s jiným, to znamená, že prvek se chová jako klient a zároveň pro ostatní klienty jako server. Jednou z velkých výhod P2P sítí je, že s rostoucím počtem prvků

roste také celková přenosová kapacita.



**Obrázek 2.2** Architektura sítí

## 2.2 Modulace

Modulací je velmi mnoho druhů. Hlavním způsobem, jak je můžeme rozdělit, je na modulace diskrétní a analogové. S ohledem na využití digitální modulace v této práci, je popis analogových modulací nadále vynechán a není v této práci zmiňován. Dále jsou popisovány pouze digitální modulace a jejich některé verze, které se používají ve vybraných transceiverech.

### 2.2.1 Digitální modulace

Digitální modulací rozumíme takovou modulaci, kde modulační signál je diskrétní a nabývá omezeného počtu hodnot. Pro snížení modulační rychlosti se často používají vícestavové modulace, kde každý signálový prvek vyjadřuje několik bitů. Například u čtyřstavové modulace vyjadřuje jeden stav nosného signálu dvojbitovou kódovou skupinu (tzv. dibit). U dvoustavových modulací je každému bitu modulačního signálu přiřazen jeden signálový prvek.

Dalším důležitým parametrem je modulační a přenosová rychlost. Modulační rychlost vyjadřuje počet změn nosného signálu za sekundu, vyjádřeno v Baudech (Bd). Vztah pro modulační rychlost je vyjádřen rovnicí 2.1, kde  $v_m$  je modulační rychlost a  $B$  je šířka pásma. Lepší názornost o počtu přenesených dat udává tzv. přenosová rychlost v bitech za sekundu, viz rovnice 2.2.

$$v_m = 2 \cdot B$$

Rovnice 2.1 Modulační  
rychlost

$$v_p = v_m \cdot \log_2(n)$$

Rovnice 2.2 Přenosová  
rychlost

### 2.2.2 Modulace FSK

Frekvenční klíčování FSK (Frequency Shift Keying) pracuje na změně frekvence nosného signálu. Například, jak je vidět na obrázku 2.3, jsou zde dva nosné signály, z nichž bitová nula je reprezentována nosným signálem o menší frekvenci, než nosný signál reprezentující logickou jedničku. Tento případ FSK je nejjednodušší možný a je nazván BFSK (Binary Frequency Shift Keying). U vysílačů se můžeme setkat ještě se speciálními typy této modulace. Modulace GFSK (Gaussian Prefiltered Frequency Shift Keying) je filtrací, kde je filtrován binární signál před vstupem do modulátoru Gaussovým filtrem. Dalším typem je modulace MSK (Minimum Shift Keying). Jedná se o frekvenční klíčování, kde je velké potlačení parazitních bočních složek kmitočtového spektra. Potlačení je dosaženo tak, že ke změně bitů dochází jen tehdy, kdy modulovaná nosná vlna prochází nulou. GMSK je kombinace obou předchozích modulací.

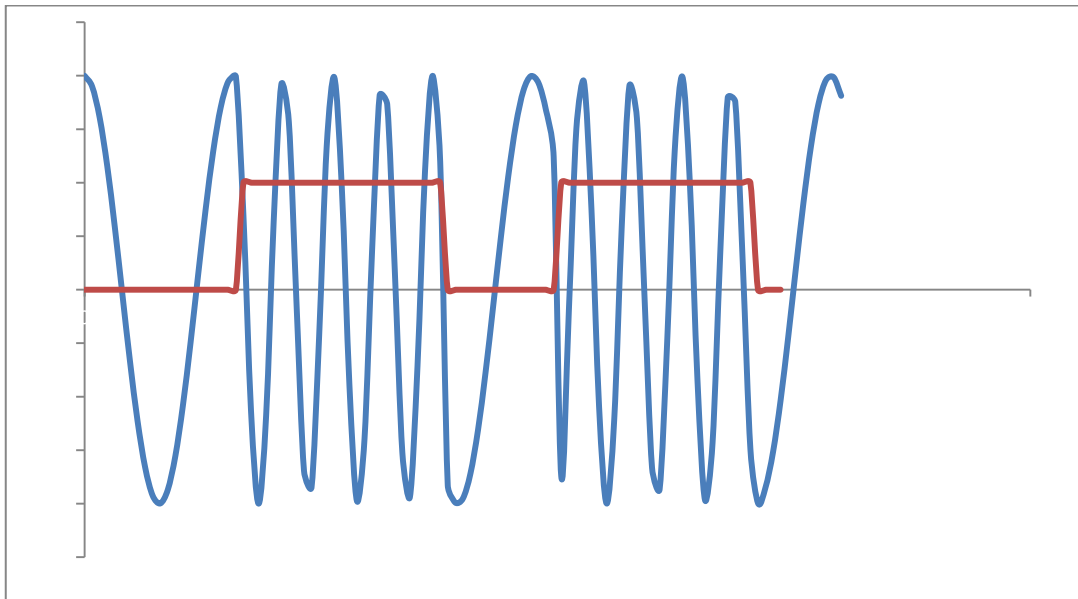
Obecné vztahy pro modulaci FSK jsou popsány rovnicemi 2.3 a 2.4.

$$s_{FSK}(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

Rovnice 2.3 Vztah pro log 1  
FSK

$$s_{FSK}(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$$

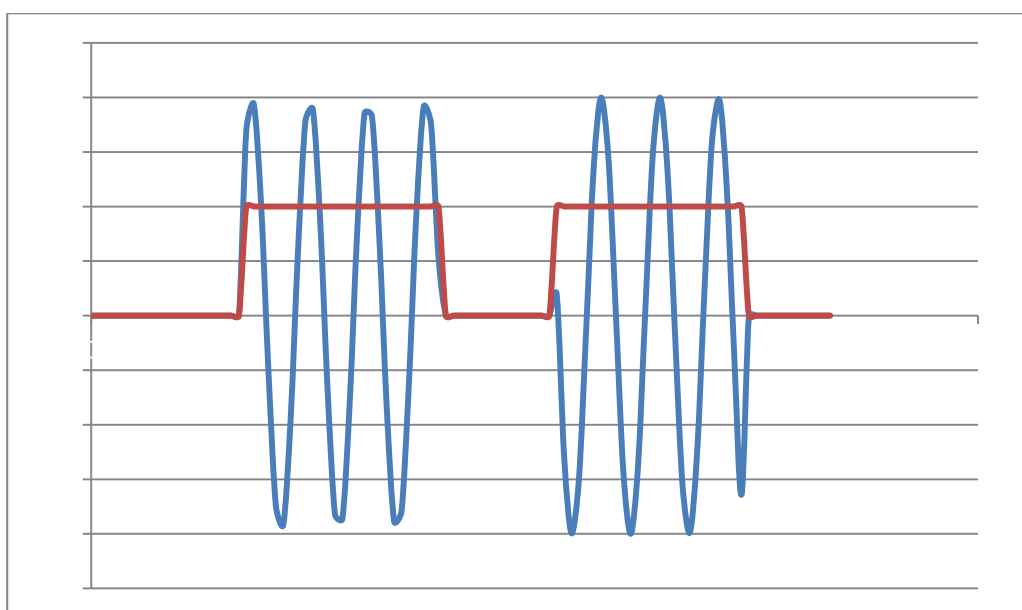
Rovnice 2.4 Vztah pro log 0  
FSK



Obrázek 2.3 FSK modulace

### 2.2.3 Modulace OOK

Modulace OOK (On-Off Keying) patří k základním modulacím ASK (Amplitude Shift Keying). Pracuje na principu násobení nosného signálu s amplitudovou modulační složkou. Tímto principem je dosaženo, že při logické nule modulačního signálu je amplituda nosného signálu také nula. V době, kdy modulační signál má úroveň logickou jedna, má nosný signál velikost amplitudy amplitudové modulační složky. Tyto vlastnosti jsou vidět na obrázku 2.4. I přes úsporu výkonu při vysílání logické nuly, je tato modulace velmi energeticky náročná.



Obrázek 2.4 OOK modulace



### 2.2.4 Modulace PSK

Modulace PSK (Phase Shift Keying) přenáší diskrétní signál pomocí změny fáze modulovaného signálu o předem danou hodnotu. Nejjednodušším typem je často nazývaná BPSK (Binary-Phase Shift Keying), nebo 2PSK. Jedná se o dvoustavovou modulaci, kdy je změna fáze  $180^\circ$ . Změna fáze je volena  $180^\circ$  proto, že v tomto případě je nejvyšší spolehlivost správného rozpoznání při následné demodulaci. Na obrázku 2.5 je znázorněna modulace PSK.

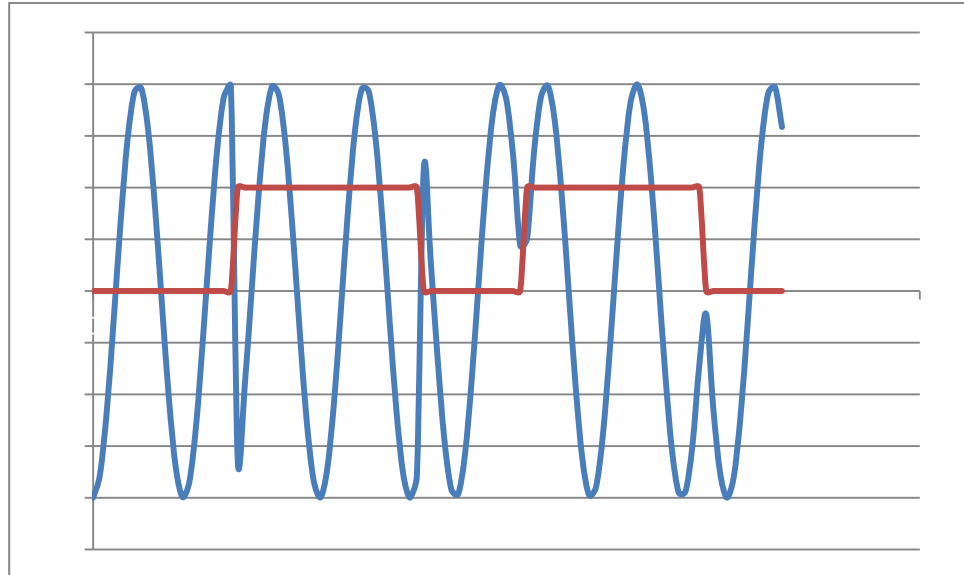
Obecné vztahy pro modulaci PSK jsou popsány rovnicemi 2 3

$$s_{FSK}(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Rovnice 2.5 Vztah pro log 1  
PSK

$$s_{FSK}(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \pi)$$

Rovnice 2.6 Vztah pro log 0  
PSK



Obrázek 2.5 Modulace PSK

## 3 Transceiver

Transceiverem obecně nazýváme zařízení, které má v sobě zahrnut, jak vysílač, tak přijímač (transceiver složen ze slov Transmitter a Receiver, tzn. v překladu vysílač a přijímač). Vysílač a přijímač jsou přitom řešeny tak, že tyto dva obvody jsou vzájemně provázané a zhotovené jako samostatné zařízení nebo periférie. V této práci bude popisováno několik typů transceiverů pracujících na frekvenci 868 MHz. Bude zde také zařazeno několik transceiverů pracujících na frekvenci 2,4 GHz, z důvodů lepší dostupnosti, co se týče provedení na jednom čipu společně s mikrokontrolérem.

### 3.1 Výběr transceiveru

Výběr transceiveru byl rozdělen do několika hlavních skupin dělení. Hlavním dělením je, zda dané zařízení pracuje v pásmu 868 MHz nebo 2,4 GHz. Jedním z dalších neméně důležitých dělení je, jestli transceiver je zhotoven jako samostatný modul nebo bude přímo jako periférie v mikrokontroléru. V dalších kapitolách budou konkrétněji rozebrána jednotlivá kritéria, na která jsou také kladeny neméně důležité požadavky. A také zde bude popsáno, proč došlo k výběru mikrokontroléru STM321151CCT6 a modulu SPIRIT1.

### 3.2 Transceivery jako periférie mikrokontroléru

Transceivery, které jsou přímo implementovány do jednoho pouzdra s mikrokontrolérem, mají tu výhodu, že zde odpadá komunikace s modulem, například nejčastěji používanou SPI nebo UART komunikací. Také při požadavcích na velikost je tato varianta značně úspornější. Velkou výhodou je také to, že počet externích součástek je většinou v tomto případě menší než u modulů.

#### 3.2.1 Vlastnosti mikrokontroléru s transceiverem

Jádro mikrokontroléru je kritérium vztahující se pouze na transceivery, které jsou zhotoveny jako periférie u mikrokontroléru. Z důvodů zhotovování dalších aplikací nad touto prací jsou více upřednostněné novější a výkonnější mikrokontroléry s jádrem ARM (Advanced RISC Machine). V tabulce 3.1 jsou pro úplnost zobrazeny i mikrokontroléry s jiným než ARM jádrem.

Ohledně výkonu mikrokontrolérů ještě tabulka 2 obsahuje maximální frekvenci jádra

a také velikost paměti RAM a FLASH, která bude úzce souviset s dalšími aplikacemi postavenými nad touto prací. Proto například nepřicházejí v úvahu mikrokontroléry od firmy Texas Instruments a Microchip.

Z tabulky 3.1 tedy vychází jako nejlepší pro tuto práci mikrokontroléry od firmy Freescale, a to jak varianta na frekvenci 868 MHz (MKW01Z128), tak varianta pracující na frekvenci 2,4 GHz (MKW24D512V). Bohužel tyto dva výrobky zatím nejsou k dostání a ani po komunikaci s výrobcem o uvolnění několika vzorků se nepodařilo je získat. Vhodným kandidátem se zdál být ještě transceiver STM32W108xx, nicméně stejně jako u firmy Freescale ani u ST nejsou vzorky dostupné.

Další výběr z těchto důvodu směřoval k výběru samostatného mikrokontroléru zvlášť modulu transceiveru.

### 3.2.2 Parametry mikrokontroléru s transceiverem

Dalším parametrem vypsáním v tabulce 3.1 je například přenosová rychlost. Bohužel v katalogových listech výrobců jsou různá nastavení transceiverů (modulace, výkon, měřená vzdálenost), při kterých je přenosová rychlost měřena. Většinou je tento parametr měřen tak, aby byl co možná největší, tím pádem tento parametr může být brán jako maximální daného zařízení. Přesto je tento záznam v tabulce spíše orientační.

Parametrem je také druh modulace, který se nachází u daného zařízení, tyto druhy modulací jsou převážně podobné. Všechny tyto modulace a jejich verze jsou podrobněji rozebrány v příloze A.

Zásadní parametry a výhody budou podrobněji popsány společně pro skupinu modulů i RF periférií dohromady v kapitole 3.4. V příloze A je přiložena tabulka s podrobnějším výpisem důležitých funkcí u jednotlivých zařízení.

Výrobce	TI	TI	ST
Název řady	CC430F613x	CC2545	STM32W108xx
Jádro	16-Bit RISC	8051	ARM Cortex-M3
Frekvence	50 KHz	32 MHz	24 MHz
Rádio	868 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Přen. rychlost	500 Kbps	2 Mbps	500 Kbps
RAM	4 KB	1 KB	16 KB
Flash	32 KB	32 KB	256 KB
Modulace	2-FSK, 2-GFSK,MSK, OOK	GFSK	

Výrobce	Freescle	Freescle	NXP
Název řady	MKW01Z128	MKW24D512V	JN5148
Jádro	ARM Cortex-M0+	ARM Cortex-M4	32-Bit RISC
Frekvence	32 MHz	50 MHz	32 MHz
Rádio	868 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Přen. rychlost	600 Kbps	250 Kbps	667 Kbps
RAM	16 KB	64 KB	128 KB
Flash	128 KB	512 KB	128 KB
Modulace	FSK, MSK, OOK	O-QPSK	O-QPSK

**Tabulka 3.1 Mikrokontroléry s periférií**

### 3.3 Transceivery jako samostatné moduly

Moduly mají rozdíl od jejich integrovaných verzí výhodu v tom, že jsou více flexibilní a obsahují více funkcí. Další velkou výhodou je, že moduly mají větší výkon. Tyto transceivery můžeme rozdělit na dva základní typy podle konstrukce. Jedním z typů je modul, který v sobě již obsahuje veškeré externí součástky a je již zhotoven pro vysílání na určité frekvenci. Druhým typem je modul, ke kterému pomocí externího zapojení můžeme měnit frekvenci vysílání např. u modulu SPIRIT1 na frekvence 170 MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz a jiné.

#### 3.3.1 Parametry modulů

Moduly se liší zejména tím, jak pracují. Je třeba brát v potaz to, že nemohou samostatně pracovat, ale že je třeba řídit např. pomocí mikrokontroléru. Některé moduly mají tak složité vnitřní zapojení, že již v sobě mikrokontrolér obsahují. Převážně se jedná

o mikrokontroléry s jádrem 8051 upravené pro tyto aplikace. Základní vlastnosti modulů jsou popsány v tabulce 3.2. Od tabulky 3.1 se následná tabulka liší v tom, že odpadá popis procesoru, ale naopak přibylo rozhraní, po kterém je modul schopen komunikovat s mikrokontrolérem. Podrobnější vlastnosti a kritéria jsou přiloženy v příloze B.

Tabulka 3.3 je zde přiložena stranou z důvodů ukázky možností výkonnějších modulů. Pro tuto práci jsou tyto moduly předimenzované, protože zařízení má být schopno pracovat delší dobu z akumulátoru. Tedy jsou na toto zařízení kladeny požadavky nízké spotřeby, což moduly v tabulce 3.3 nemohou splňovat.

Výrobce	TI	Microchip	Microchip	ST
Název	CC1121	MRF24J40	MRF89XAM8A	SPIRIT1
Rádio	868 MHz	2,4 GHz	868 MHz	868 MHz
Přen. rychlost	200 Kbps	625 Kbps	40 Kbps	500 Kbps
Modulace	2- GFSK, 4-FSK, 4-GFSK	O-QPSK	FSK, OOK	2-FSK, GFSK, MSK
Komunikuje	SPI	SPI	SPI	SPI

Výrobce	ATMEL	Freescall	AD	AD
Název	AT86RF233	MC13201	ADF7023	ADF7242
Rádio	2,4GHz	2,4 GHz	868 MHz	2,4 GHz
Přen. rychlost	2 Mbps	250 Kbps	300 Kbps	2 Mbps
Modulace	O-QPSK	O-QPSK	FSK, MSK, OOSK	O-QPSK, FSK, GFSK
Komunikuje	SPI	SPI	SPI	SPI

**Tabulka 3.2 Samostatné moduly**

Výrobce	Amber wireless	Amber wireless	AeroComm
Název	AMB8626	AMB8355	AC4486-5
Rádio	868 MHz	868 MHz	868 MHz
Rychlost	250 Kbps	19,2 Kbps	115,2 Kbps
Modulace	2-(G)FSK, (G)MSK, 4-(G)FSK	2-GFSK	FSK
Komunikuje	UART, SPI	UART	

**Tabulka 3.3 Výkonnější moduly**

### 3.4 Popis některých funkcí transceiverů

Tato kapitola bude společná pro všechny typy transceiverů výše zmiňovaných. Bude pojednávat o jednotlivých funkcích, podle kterých se zužoval výběr daných zařízení. Jedná se

o funkce, které usnadňují programování. Protože na tomto zařízení má být naprogramována tzv. linková vrstva, jedná se zejména o zabezpečení přenosu. Řada transceiverů v sobě má již zabudované zabezpečující mechanismy, které se již snadněji využívají. Zabezpečením jako takovým je zde myšleno, že příjemce dostane zprávu nepoškozenou. Je zde tedy využíváno například různých typů kontrolních součtů. Když tento kontrolní součet nebude souhlasit, tak jsou zde mechanismy pro automatické odeslání zprávy znovu. V transceiverech je zabudován tzv. automatický potvrzovací systém (AACK) kdy přijímací zařízení automaticky posílá zprávu zpět, že byla doručena.

Kromě zabezpečujících mechanismů se uplatňují také mechanismy před začátkem vysílání. Pro náhodný přístup ke sdílenému médiu se zde například používá protokol CSMA/CA.

Jednou z dalších funkcí je již možnost výběru z několika možných rámců (tzv. paketů). Tato funkce usnadňuje jejich programové sestavování.

#### 3.4.1 CSMA/CA protokol

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) je protokol, který umožňuje přístup k danému bezdrátovému médiu v „libovolný“ okamžik. Vysílání probíhá přesně podle vývojového diagramu v [13]. Zařízení, které chce vysílat, nejprve zjistí, zda dané médium je volné. Kdyby médium volné nebylo, počká náhodnou dobu a opět zkusí k médiu přistoupit. Když je volné, tak si toto médium zarezervuje a začne s vysíláním. Po ukončení vysílání je toto médium opět zpřístupněno ostatním zařízením. Tento algoritmus díky detekování nosné dokáže předejít většině kolizí, ale kolize mohou nastat i přesto. Proto do tohoto algoritmu je navíc zabudováno potvrzování o doručení. Když není přijat po určité době potvrzovací signál tak se zpráva vyšle znovu.

O detekci nosné se v tomto algoritmu se stará funkce CCA (Clear Channel Assessment). Na citlivosti této funkce velmi závisí. Z důvodů, kdy špatně vyhodnotí připravenost média, může vysílat více zařízení najednou, nebo naopak nevysílá žádné zařízení.

#### 3.4.2 AES

Některá z výše popisovaných zařízení disponují také funkcí AES (Advanced Encryption Standard). Jedná se o symetrickou blokovou šifru, tj. používá k šifrování i dešifrování bloků, v našem případě většinou 128 bitovou pouze jeden neveřejný klíč.

Výhodou tohoto šifrování je nízká výpočetní náročnost.

### 3.4.3 RSSI

RSSI (Received Signal Strength Indication) je funkce pro měření intenzity přijatého signálu. Tato funkce má například použití pro stabilitu navázaného spojení. RSSI měří, zda přijímaný signál je v určitém rozsahu intenzity signálu. Když je tento přijímaný signál vyhodnocen jako nízký, umí si zařízení vyžádat na vysílači zesílení vysílaného signálu. Naopak je-li přijímaný signál nad horní mezí RSSI, tak se vysílacímu zařízení vyšle informace o tom, že může vysílací výkon zeslabit.

RSSI se dá také v mnoha aplikacích používat na odhadování pozice daného zařízení. Tato lokalizace je ale pouze jen přibližná, protože zde závisí na mnoha faktorech.

### 3.4.4 Potvrzení doručení

V zařízeních je často využíván takzvaný ACK (Acknowledgement) signál. Tento signál je využit i v CSMA/CA jak již bylo zmíněno. Jedná se o automatické potvrzování doručení, kdy přijímací zařízení pošle zpět zprávu, zda byla od něj zpráva přijata. Toto potvrzovací zpráva může obsahovat více informací o tom, proč zpráva nebyla přijata, např. nebyla doručena celá zpráva, nesedí kontrolní součet a jiné. ACK je přímo obsažen v rámci.

### 3.4.5 Kontrolní součty

Kontrolní součty jsou obsaženy také v sestaveném rámci pod názvem FCS (Frame Check Sequence). Za pomoci dat se vypočítá ve vysílači podle určitých funkcí (podle typu kontrolního součtu) kontrolní součet. Tento kontrolní součet je s celým rámcem odeslán a přijímací zařízení si vypočte svůj kontrolní součet a porovná, zda je roven přiloženému. Když kontrolní součet nebude souhlasit, zařízení si pomocí jiných mechanismů může vyžádat opětovné opakování zprávy. Nejčastěji používaným algoritmem u těchto zařízení je CRC (Cyclic Redundancy Check), kde se počítá jako zbytek po dělení polynomu.

V některých zařízeních můžeme nalézt i samo opravné kódy typu RS (Reed-Solomon). S těmito samoopravnými kódy roste redundance v odesílané zprávě.

### 3.4.6 Rámce

Popisovaná zařízení poskytují většinou několik typů rámců (packets). Například modul SPIRIT1 obsahuje 3 předdefinované typy rámců, a to Basic packet, M-bus packet a SStackpacket. Z důvodu použití je zde zobrazen SStackpacket, viz tabulka 3.4. Oproti basic rámci obsahuje SStack rámec zdrojovou adresu, sequencenumber (kolikrát byl daný paket odeslán) a potvrzovací signál ACK.

1-32	1-4	0-16	1	1	0-4	2 bit	1 bit	0-65535	0-3
Preamble	Sync	Lenght	Dest. Address	Source address	Control	Seq. No.	NO_ACK	Payload	CRC

**Tabulka 3.4 SStackpacket**

### 3.4.7 Druhy režimů

Jelikož zařízení pracuje na akumulátor, jsou režimy jak mikrokontrolérů, tak modulů z hlediska spotřeby důležité.

Co se týče mikrokontrolérů se zabudovaným RF transceiverem, tak mikrokontroléry mají tzv. power management propracovaný a lze je uvést do různých druhů režimů. Jsou zde i režimy které z úsporných režimů přerušují detekování přijímání. Naopak se také zařízení dokáže dostat do některých režimů spánků prostřednictvím příjmu zprávy. Také jde nastavit režim, který nastaví blok transceiveru tak, aby přijímal bez jakéhokoliv zásahu jádra mikrokontroléru a po dokončení přijetí se vrátil opět do režimu spánku.

Ohledně modulů je situace podobná jako u samotných mikrokontrolérů, s rozdílem, že se režimy provozu řeší jak v mikrokontroléru, tak v modulu.



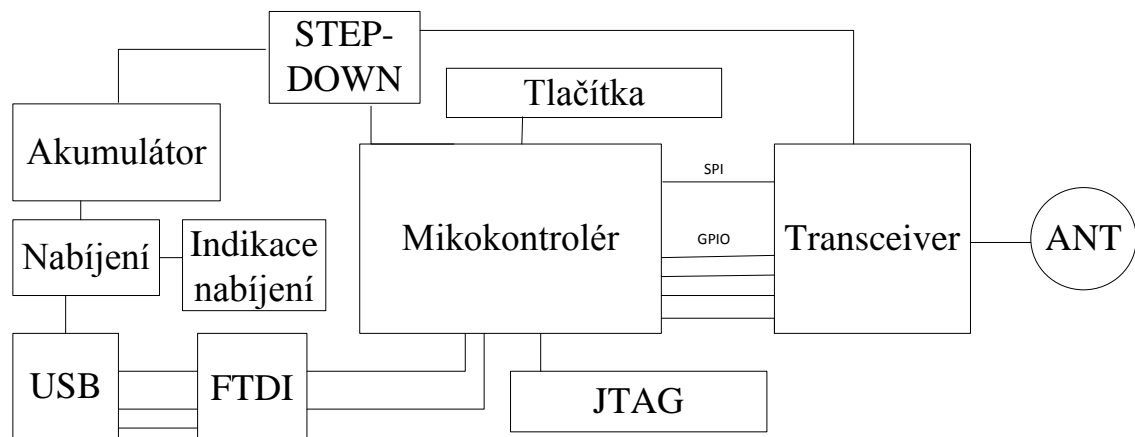
## 4 Stavba zařízení

Pro samotný návrh zařízení byla vybrána varianta s transceiverem jako samostatným modulem. Bylo tak učiněno proto, že mikroprocesory s RF periférií, které by splňovaly všechny požadavky, bohužel ještě nejsou na trhu dostupné. Proto byl vybrán modul od společnosti STMicroelectronics a to SPIRIT1. K tomuto modulu byl vybrán mikrokontrolér STM32L151CC.

Celý návrh zařízení byl realizován v programu Eagle. Desky plošných spojů byly vyrobeny v pražské společnosti PragoBoard s.r.o.. Jedná se o oboustrannou DPS s prokovením, nepájivou maskou a potiskem.

### 4.1 Blokové schéma

Na tomto blokovém (obrázek 4.1) schématu jsou zobrazeny všechny hlavní části zařízení a jejich názorné propojení. V následujícím textu budou rozebrány části tohoto blokového schématu.



Obrázek 4.1 Blokové schéma zařízení

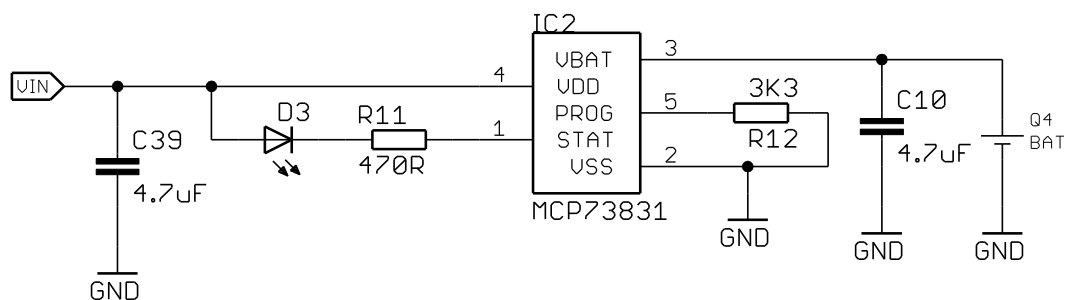
#### 4.1.1 FTDI

USB konektor zde plní několik funkcí. Jedna funkce je, že po připojení konektoru USB do počítače, se pomocí nabíjecího obvodu pokud je to nutné začne nabíjet Lithium-Polymerový (Li-Pol) článek. Další funkcí USB konektoru je sériová komunikace mikrokontroléru s počítačem přes FTDI (Future Technology Devices International) převodník. Pomocí této sériové komunikace můžeme vyčíst nebo naopak vyslat data do mikrokontroléru.

V tomto případě se konkrétně jedná o převodník FT230xs. Tomuto obvodu bylo nutné přehrát firmware z důvodu, aby se choval jako virtuální port v počítači a také bylo nutné nastavit pin CBUS3. Zapojení tohoto obvodu bylo převzato z katalogového listu [17].

#### 4.1.2 Nabíjecí obvod

Další částí blokového schématu je nabíjecí obvod, který je zhotoven pomocí obvodu MCP73831T-2DCI/OT. Pomocí několika externích součástek (viz obrázek 4.2) tento obvod nabíjí akumulátor konstantním napětím 4,2 V a proudem, který byl nastaven pomocí rezistoru R12 na hodnotu cca. 300 mA. Dioda D3 zde slouží k signalizaci nabíjení akumulátoru. Když dioda D3 svítí tak akumulátor je nabitý, pokud dioda nic nesignalizuje, může nastat několik možností. Jedna z možností je, že akumulátor je nabíjen konstantním napětím. Další možností je nabíjení konstantním proudem, nebo také nepřítomnost akumulátoru. Z důvodu zahřívání přímo výrobce udává, jak má být dané zapojení na desce plošných spojů (dále již jen DPS) konstruováno. Tento návrh zapojení a následného propojení na DPS byl převzat z katalogového listu výrobce [18].



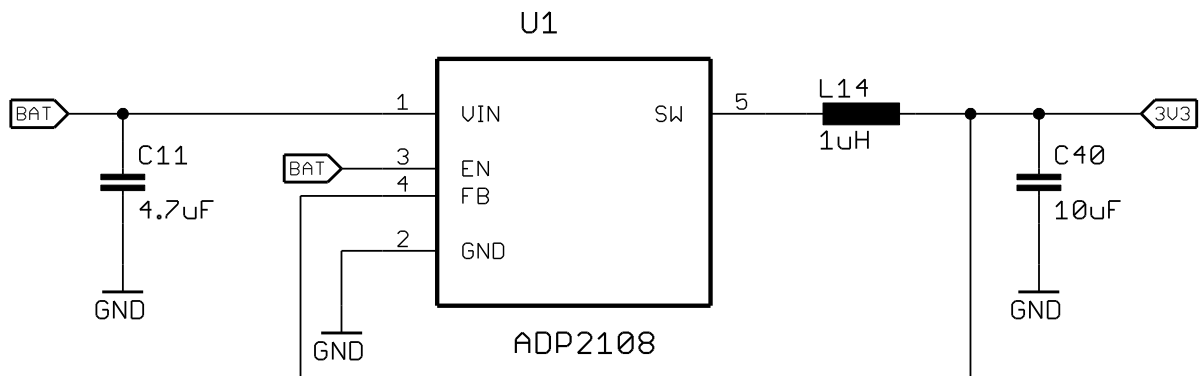
Obrázek 4.2 Nabíjecí obvod

#### 4.1.3 Akumulátor

Pomocí dříve zmiňovaného nabíjecího obvodu se nabíjí jeden Lithium-Polymerový článek. Výběr tohoto akumulátoru probíhal na základě tří vlastností a to kapacity, velikosti a ceny. Kapacita tohoto akumulátoru je 350 mAh o ceně cca. 50 Kč. Rozměry jsou 40 x 20 x 8 mm (délka x šířka x výška). Za akumulátor je zapojen DC/DC měnič, který snižuje napětí z 3,7 V na 3,3V. Výdrž na tento článek nelze přesněji definovat. Záleží totiž, v jakém režimu se nachází dané zařízení a kolikrát je například odeslána nebo přijata zpráva transceiverem, jelikož transceiver ze všech zařízení spotřebovává nejvíce energie.

#### 4.1.4 DC/DC měnič

Jednou z dalších částí je DC/DC velmi účinný tzv. snižující (Step- Down converter) měnič. Stejně jako nabíjecímu obvodu postačí jen několik externích součástek (viz obrázek 4.3) pro správnou funkci. Tento měnič má konstantní výstupní napětí 3,3 V a jeho maximální zatěžovací proud je 600 mA což je plně dostačující. Jádrem tohoto měniče je PWM modulátor pracující na frekvenci 3 MHz. Zapojení DC/DC měniče bylo převzato z [19].



Obrázek 4.3 DC/DC měnič

#### 4.1.5 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér byl vybrán STM32L151CC. Jedná se o low power mikrokontrolér s 32-bit jádrem Cortex-M3. Výběr byl zhotoven podle několika kritérií. Hlavními požadovanými vlastnostmi, mezi kterými bylo nejvíce vybíráno, jsou jádro mikrokontroléru velikosti paměti Flash, RAM a také jednoduchost a spotřeba. Jednoduchost je míněna v tom smyslu, že není zapotřebí mnoha periférií, protože pro funkci zařízení jsou používány pouze vstupně/výstupní porty, periférie USART a SPI. V tabulce 4.1 jsou zobrazeny základní údaje o tomto mikrokontroléru. Spotřeba byla přesně spočítána pro dva režimy pomocí volně dostupného programu MicroXplore od společnosti STM. Souhrn těchto vlastností byl převzat z katalogového listu [20]. Zapojení mikrokontroléru je zobrazeno v celkovém schématu v příloze D.

Výrobce	STMicroelectronics
Typ	STM32L151CC
Paměť	246 KB Flash 32 KB RAM
Napájecí napětí	1,65 až 3,6 V
Max. kmitočet	32 MHz
Periférie	3x USART 3x SPI 2x I2C 12 bit AD i DA LCD driver 11x čítač/ časovač
Spotřeba	RUN 2,4 mA SLEEP 200 $\mu$ A

**Tabulka 4.1** Vlastnosti mikrokontroléru

#### 4.1.6 Transceiver

Veškerá kritéria výběru transceiveru byla probrána v kapitole 3. V tabulce 4.2 jsou pro přehlednost shrnuty vlastnosti vybraného modulu SPIRIT1. Zapojení transceiveru bylo převzato z katalogového listu a je znázorněno na obrázku [13]. Pro správnou funkci transceiveru se při zhotovování DPS musí dodržovat kritéria, která jsou zadána v aplikačním listu [21] od výrobce. Výrobce v tomto aplikačním listu se také doporučuje i rozmístění a velikosti součástek na DPS. Toto rozmístění součástek pro správnou funkci bylo rovněž převzato.

Výrobce	STMicroelectronics
Typ	SPIRIT1
Frekvence	150- 174 MHz 300- 348 MHz 387- 470 MHz 779- 956 MHz
Modulace	2-FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK, ASK
Komunikační rozhraní	SPI
Napájecí napětí	1,8 až 3,6 V
Spotřeba RX	9 mA
Spotřeba TX	21 mA
Max. přenosová rychlost	500 Kbps
Citlivost	118 dBm
Funkce	AES-128 bit Programovatelná velikost rámce CRC s ACK Kontrola adres CSMA/CA RSSI

**Tabulka 4.2 Vlastnosti SPIRIT1**

## 4.2 Programování

### 4.2.1 JTAG

Blokové schéma obsahuje (obrázek 4.1) také naznačení zapojení 10 vývodového JTAG konektoru. Tento konektor je navržen pro programování a ladění zařízení. Pro programování slouží ST-LINK V2 od firmy STMicroelectronics. Tento programátor má několik druhů konektorů pro připojení k zařízení, ale 10-ti vývodový konektor neobsahuje. Pro jednodušší manipulaci byla navržena redukce z 20-ti vývodového konektoru na 10-ti vývodový konektor.

Program byl navržen ve vývojovém prostředí EmBlocks 1.45 v jazyce C. V tomto prostředí byl i laděn. Jedná se o volně dostupný program.

### 4.2.2 Programování

Program se skládá z několika částí, z nichž na začátku je velmi důležitá inicializace

mikrokontroléru. Tato inicializace obsahuje nastavení vstupně výstupních portů a periférií. Pro tato nastavení byla vytvořena samostatná knihovna. Vstupně výstupní porty jsou nastaveny pro tlačítka, LED diodu a komunikaci se SPIRIT1. V tabulce 4.3 je ukázka nastavení pinu SCK (komentář těchto funkcí je psán bez diakritiky). Tento vývod byl nastaven pro komunikaci SPI.

```
#define SPI1_SCK  GPIO_Pin_5

//Povolení AHB peripheral clock
RCC_AHBPeriphClockCmd(RCC_AHBPeriph_GPIOA|RCC_AHBPeriph_GPIOB,
ENABLE);

//Nastavení pinu SCK
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = SPI1_SCK;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF ;
GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_DOWN;
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_40MHz;
GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

//Nastavení GPIO pinu alternate function
GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource5, GPIO_AF_SPI1);
```

**Tabulka 4.3 Inicializace SCK**

Inicializace SPI musí souhlasit přesně s parametry komunikace SPIRIT1, proto je v tabulce 4.4 ukázán část kódu, který je stěžejní pro správnou komunikaci.

```
RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_SPI1 , ENABLE);
SPI_I2S_DeInit(SPI1);

//SPI configuration -----
SPI_Cmd(SPI2, DISABLE);
SPI_InitStructure.SPI_Direction = SPI_Direction_2Lines_FullDuplex;
SPI_InitStructure.SPI_DataSize = SPI_DataSize_8b;
SPI_InitStructure.SPI_CPOL = SPI_CPOL_Low;    //spirit cpol=0
SPI_InitStructure.SPI_CPHA = SPI_CPHA_1Edge; //spirit cpha =0
SPI_InitStructure.SPI_NSS = SPI_NSS_Soft;
SPI_InitStructure.SPI_BaudRatePrescaler = SPI_BaudRatePrescaler_2;
SPI_InitStructure.SPI_FirstBit = SPI_FirstBit_MSB; //první Spirit MSB
SPI_InitStructure.SPI_CRCPolynomial = 7;
SPI_InitStructure.SPI_Mode = SPI_Mode_Master;
SPI_Init(SPI1, &SPI_InitStructure);

SPI_Cmd(SPI1, ENABLE);
```

**Tabulka 4.4 Inicializace SPI**

Další knihovnou jsou funkce pro komunikaci. Tyto tři funkce jsou pro zápis (`SpiritStatusSpiritSpiWriteRegisters`) čtení (`SpiritSpiReadRegisters`) a příkazy (`SpiritStatusSpiritSpiCommand`). Funkce zápis slouží k zapsání dat na adresu ve SPIRIT1. Čtení slouží k přečtení dat z určité adresy v transceiveru a poslední funkce příkaz je zhotovena pro některé speciální příkazy pro ovládání transceiveru. U veškerých těchto funkcí si lze vyčíst status, který transceiver vysílá při těchto komunikacích. Pro názornost v tabulce 4.5 je zobrazena funkce čtení. Pomocí těchto funkcí probíhá jakékoliv nastavování SPIRITU1.

```
uint8_t st1 = 0;
uint8_t st2 = 0;
uint16_t pom = 0;

// chip select na nulu, delay
GPIO_ResetBits(GPIOA, SPI1_CS);
Delay(20);

while (SPI_I2S_GetFlagStatus(SPI1, SPI_I2S_FLAG_TXE) == RESET);
SPI_I2S_SendData(SPI1, READ_HEADER);

while (SPI_I2S_GetFlagStatus(SPI1, SPI_I2S_FLAG_RXNE) == RESET);
st1 = SPI_I2S_ReceiveData(SPI1);

while (SPI_I2S_GetFlagStatus(SPI1, SPI_I2S_FLAG_TXE) == RESET);
SPI_I2S_SendData(SPI1, address);

while (SPI_I2S_GetFlagStatus(SPI1, SPI_I2S_FLAG_RXNE) == RESET);
st2 = SPI_I2S_ReceiveData(SPI1);

while (SPI_I2S_GetFlagStatus(SPI1, SPI_I2S_FLAG_TXE) == RESET);
SPI_I2S_SendData(SPI1, 0x00);

while (SPI_I2S_GetFlagStatus(SPI1, SPI_I2S_FLAG_RXNE) == RESET);
*data = SPI_I2S_ReceiveData(SPI1);

pom = st1;
*status = (pom<<8 ) + (st2);
//Chip select 1 pak delay
GPIO_SetBits(GPIOA, SPI1_CS);
Delay(20);
```

**Tabulka 4.5 Funkce čtení**



## 5 Závěr

### 5.1 Zhodnocení

V této práci jsem se zaměřil na výběr a realizaci hardwaru a příslušného softwaru pro peer-to-peer komunikaci ve frekvenčním pásmu 868 MHz. Nejdříve jsem postupoval nalezením všech možných typů transceiverů a následně bližším prostudováním jejich funkcí. Z důvodu nízkého počtu vyhovujících a dostupných transceiverů pracujících ve frekvenčním pásmu 868 MHz jsem musel rozšířit výběr o zařízení pracujících ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz.

Mým cílem bylo vybrat transceiver jako periférii v mikrokontroléru, což nejvíce splňovaly mikrokontroléry od firmy Freescale, konkrétně MKW01Z128, MKW24D512V. Dle informací od výrobce, že tyto mikrokontroléry budou dostupné na trhu od začátku roku 2014, jsem vyčkával na jejich zavedení na trh. Nicméně výroba se zpozdila, proto jsem z časových důvodů navrhl jinou realizaci.

Jako další možné řešení jsem vybral transceiver od společnosti STMicroelectronics modul SPIRIT1. Modul nebyl mojí první volbou, protože mým cílem, jak sem již zmiňoval výše, bylo vybrat transceiver jako periférii v mikrokontroléru. K tomuto modulu jsem vybral nízkospotřebový mikrokontrolér STM32L151CC, rovněž od firmy STMicroelectronics.

Když sem měl vybrané součástky pro dané zařízení, začal jsem s návrhem hardwaru, který jsem realizoval po obdržení všech potřebných součástek. Bohužel i zde došlo k časovému prodlení v dodání součástek.

Po oživení hardwaru jsem začal s programováním v jazyce C ve volně dostupném programu EmBlocks 1.45. Nicméně z časových komplikací během výběru a realizace zařízení, se mi nepodařilo celkově naprogramovat finální podobu linkové vrstvy.

### 5.2 Další vývoj

Další vývoj bych viděl v doprogramování celkové linkové vrstvy. V současné době jsou již na trhu dostupné vhodné transceiver jako periférie v mikrokontroléru vhodné pro mou diplomovou práci. Nejen firma Freescale, ale i také společnost STMicroelectronics má již na trhu dostupné mikrokontroléry s perifériemi transceiveru. Tím by došlo k celkovému zmenšení a odpadla by tím i komunikace s modulem.

## 6 Seznam použité literatury

- [1]. MACEK, Jiří. *VO SRD* [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok\\_2012/vo-r\\_10-04\\_2012-07.pdf](http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2012/vo-r_10-04_2012-07.pdf)
- [2]. EN 300 440-1. *EN 300 220-1 - V2.4.1 - Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 1: Technical characteristics and test methods: EN 300 220-1 - V2.4.1*. France: ERM, 2012. Dostupné z:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300200\\_300299/30022001/02.04.01\\_40/en\\_30022001v020401o.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_40/en_30022001v020401o.pdf)
- [3]. ERM. *etsi.org*. [Online] 6. 1 2012. [Citace: 22. 11 2013.]  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300200\\_300299/30022001/02.04.01\\_40/en\\_30022001v020401o.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_40/en_30022001v020401o.pdf).
- [4]. TEXAS INSTRUMENTS. *CC430F613x, CC430F612x, CC430F513x MSP430 SoC With RF Core: Data Sheet* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc430f5137.pdf>
- [5]. TEXAS INSTRUMENTS. *CC2545 System-on-Chip for 2.4-GHz RF Applications: Data Sheet* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/swrs106b/swrs106b.pdf>
- [6]. STMICROELECTRONICS. *High-performance, IEEE 802.15.4 wireless system-on-chip with up to 256 Kbytes of embedded Flash memory: Data Sheet* [online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00248316.pdf>
- [7]. FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MKW22D512V: Data Sheet* [online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[http://cache.freescale.com/files/rf\\_if/doc/data\\_sheet/MKW22D512V.pdf](http://cache.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MKW22D512V.pdf)
- [8]. FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MKW0Z128: Data Sheet* [online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data\\_sheet/MKW01Z128.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MKW01Z128.pdf)
- [9]. NXP LABORATORIES UK LTD. *JN-DS-JN5148-001: Data Sheet* [online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/JN5148.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/JN5148.pdf)
- [10]. TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *CC1121 High Performance Low Power RF Transceiver: Data Sheet* [online]. 2014 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:

- <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1121.pdf>
- [11].MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MRF24J40 Data Sheet IEEE 802.15.4 2.4 GHz RF Transceiver: Data Sheet* [online]. 2010 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39776C.pdf>
- [12].MICROCHIP TECHNOLOGIES. *MRF89XAM8A Data Sheet 868 MHz Ultra-Low Power Sub-GHz Transceiver Module* [online]. 2010 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70651A.pdf>
- [13].STMICROELECTRONICS. *Low data rate, low power sub-1GHZ transceiver* [online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00047607.pdf>
- [14].AMBER WIRELESS GMBH. *AMB8626* [online]. 2014 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[mber-wireless.de/index.php?getfile=amb8626\\_ma.pdf](http://mber-wireless.de/index.php?getfile=amb8626_ma.pdf)
- [15].AMBER WIRELESS GMBH. *AMB8355* [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[amber-wireless.de/index.php?getfile=amb8355\\_ds.pdf](http://amber-wireless.de/index.php?getfile=amb8355_ds.pdf)
- [16].AEROCOMM INC. *AC4486 868 MHz OEM TRANSCEIVERS* [online]. 2005 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[www.lairdtech.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2545](http://www.lairdtech.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2545)
- [17].*USB to BASIC UART IC FT230X: Data Sheet* [online]. 2012 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT230X.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf)
- [18].MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers: Charge Management Controllers* [online]. 2008 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21984F.pdf>
- [19].ANALOG DEVICES, Inc. *Compact, 600 mA, 3 MHz, Step-Down DC-to-DC Converter: Data Sheet* [online]. 2012 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADP2108.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADP2108.pdf)
- [20].STMICROELECTRONICS. *Ultra-low-power 32-bit MCU ARM-based Cortex-M3, 256KB Flash, 32KB SRAM, 8KB EEPROM, LCD, USB, ADC, DAC: Data Sheet* [online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:  
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00048356.pdf>
- [21].STMICROELECTRONICS. *PCB design guidelines for the SPIRIT1 transceiver* [online]. 2012 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/technical/document/application\\_note/DM00065838.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/technical/document/application_note/DM00065838.pdf)

- [22].HANUS, Stanislav. *Rádiové a mobilní komunikace*. Brno, 2002. Elektronická skripta. Vysoké učení technické v Brně.
- [23].NOVOTNÝ, Miroslav. *Peer-to-Peer*. Praha, 2009. Skripta. Univerzita Karlova v Praze.
- [24].SHKLYAEVA. *Automatická Klasifikace Digitálních Modulací*. Brno, 2008. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Vít Novotný.

## **Přílohy**

**Příloha A – Tabulka kontrolérů s periférií transceiveru**

**Příloha B – Tabulka modulů transceiveru**

**Příloha C – Tabulka výkonnějších transceiveru**

**Příloha D – Schéma zapojení**

**Příloha E – DPS horní strana**

**Příloha F – DPS dolní strana**

**Příloha G – Osazení horní strana**

**Příloha H – Osazení spodní strana**

## Příloha A – Tabulka kontrolérů s periférií transceiveru

Výrobce	Texas Instruments	Texas Instruments	STMicroelectronics	Freescle
Typ	CC430F6137	CC2545	STM32W108CC	MKW01Z128
Jádro	16- bit	Low-Power 8051 32- bit	ARM Cortex-M3	Cortex M0+
RAM	4 KB	1 KB	16 KB	16 KB
Flash	32 KB	32 KB	256 KB	128 KB
Max. frekvence mikrokon.	27 MHz	32 MHz	24 MHz	48 MHz
Frekvence	300- 348 MHz 389- 464 MHz 779- 928 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz	315 MHz, 433 MHz,470 MHz 868 MHz,915 MHz, 928 MHz , 955 MHz
Modulace	2-FSK, MSK, 2-GFSK, OOK	GFSK	O-QPSK	FSK,GFSKA,MSK, GMSK,OOK
Napájecí napětí	1,8 až 3,6	2 až 3,6 V	2,1 až 3,6 V	1,8 až 3,6
Spotřeba RX	15 mA	20,8 mA	27 mA	16 mA
Spotřeba TX	18 mA	26,3 mA	31 mA	max. 95 mA nastavitelné
Max. přenosová rychlost	500 Kbps	2 Mbps	500 Kbps	600 Kbps
Citlivost	-117 dBm	-98 dBm	-100 dBm	-118 dBm
Funkce	Flexible Support for Packet-Oriented, CCA, RSSI, CRC, Packet-Oriented, Listen-Before-Talk, SystemsBackward	RSSI, AES, POWER, MODE	Automatic ACK, RSSI, CCA, Attaching packet information to received, Address recognition and packet filtering packets, Packets support	16-tap FIR Channel Filter, Incoming Sync word, Recognition, Automatic RF Sense, CRC, Battery indicator

Výrobce	Freescale	Analog Devices	NXP
Typ	MKW24D512V	ADuCRF101	JN5148
Jádro	Cortex-M4	Cortex-M3	32-bit RISC
RAM	64 KB	16 KB	128 KB
Flash	512 KB	128 KB	128 KB
Max. frekvence mikrokon.	50MHz	16 MHz	32 MHz
Frekvence	2,4 GHz	431- 464 MHz 862- 928 MHz	2,4 GHz
Modulace	O-QPSK	2FSK ,OOK	O-QPSK
Napájecí napětí	1,8 až 3,6 V	2,2 až 3,6 V	2 až 3,6 V
Spotřeba Rx	15 mA	12,8 mA	17,5 mA
Spotřeba TX	17 mA	max. 32 mA nastavitelné	15 mA
Max. přenosová rychlost	250 Kbps	300 Kbps	667 Kbps
Citlivost	-102 dBm	-107 dBm	-95 dBm
Funkce	CCA, ED, Link quality indicator, Supports all frame, Allows frame type-specific filtering	RSSI, Battery monitor, Sync word detection,	CRC, Address check, Auto ACK, AES 128 bit

### Příloha B – Tabulka modulů transceiveru

Výrobce	Texas Instruments	Microchip	Microchip	ATMEL
Typ	CC1121	MRF24J40	MRF89XAM8A	AT86RF233
Frekvence	169 MHz, 315 MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 920 MHz, 950 MHz	2,4 GHz	863, 870 MHz	2,4 GHz
Modulace	2-FSK, 2- GFSK, 4- FSK, 4-GFSK, MSK, OOK	O-QPSK	FSK, OOK	O-QPSK
Napájecí napětí	2 až 3,6 V	2,4 až 3,6 V	2,1 až 3,6 V	1,8 až 3,6 V
Spotřeba Rx	22 mA	19 mA	3 mA	11,8 mA
Spotřeba TX	45 mA	23 mA	25 mA	13,8 mA
Max. přenosová rychlost	200 Kbps	625 Kbps	40 Kbps	2000 Kbps
Citlivost	-110 dBm	-95 dBm	-107 dBm	-101 dBm
Komunikace	SPI	SPI	SPI	SPI
Funkce	RSSI, CCA, Listen before talk, Wake up on radio, Packet handling, ACK	RSSI, AES, ED, CCA, ACK, Automatic packet retransmission, CSMA/CA	Low power, CRC, Supports manchester Synch. For incoming data, Packet handling	CSMA/CA, AES 128 bit, FCS, Automatic adr. filter, Power modes RSSI, ED, LQI

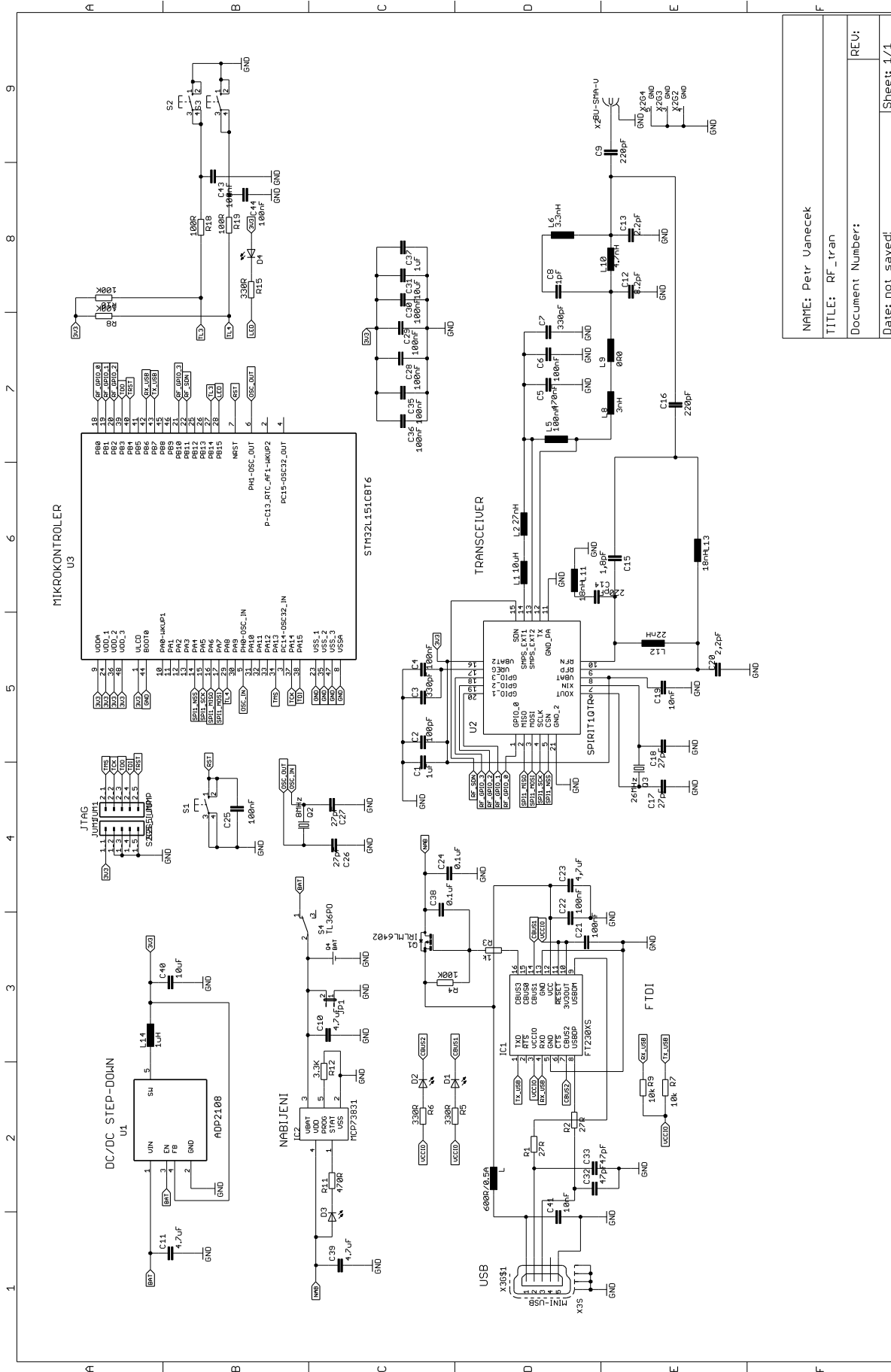
Výrobce	freescale	ANALOG	Analog
Typ	MC13201	ADF7023	ADF7242
Frekvence	2,4 GHz	431- 464 MHz 862- 928 MHz	2,4 GHz
Modulace	O-QPSK	GFSK, FSK, MSK, GMSK, OOSK	O-QPSK, FSK, GFSK
Napájecí napětí	2 až 3,4 V	2,2 až 3,6 V	1,8 až 3,6 V
Spotřeba Rx	37 mA	12,8 mA	19 mA
Spotřeba TX	30 mA	24,1 mA	21,5 mA
Max. přenosová rychlost	250 Kbps	300 Kbps	2000 Kbps
Citlivost	-95 dBm	-107 dBm	-96 dBm
Komunikace	SPI	SPI	SPI
Funkce	CRC, CCA, Support P2P, Internal amplifier, Power modes	RSSI, Wake up on radio, AES 128 bit, Reed Solomon, Battery control, Packet management, CRC, ACK, CCA	RSSI, CRC, CSMA/CA, Auto ACK , Packet management



### Příloha C – Tabulka výkonnějších transceiveru

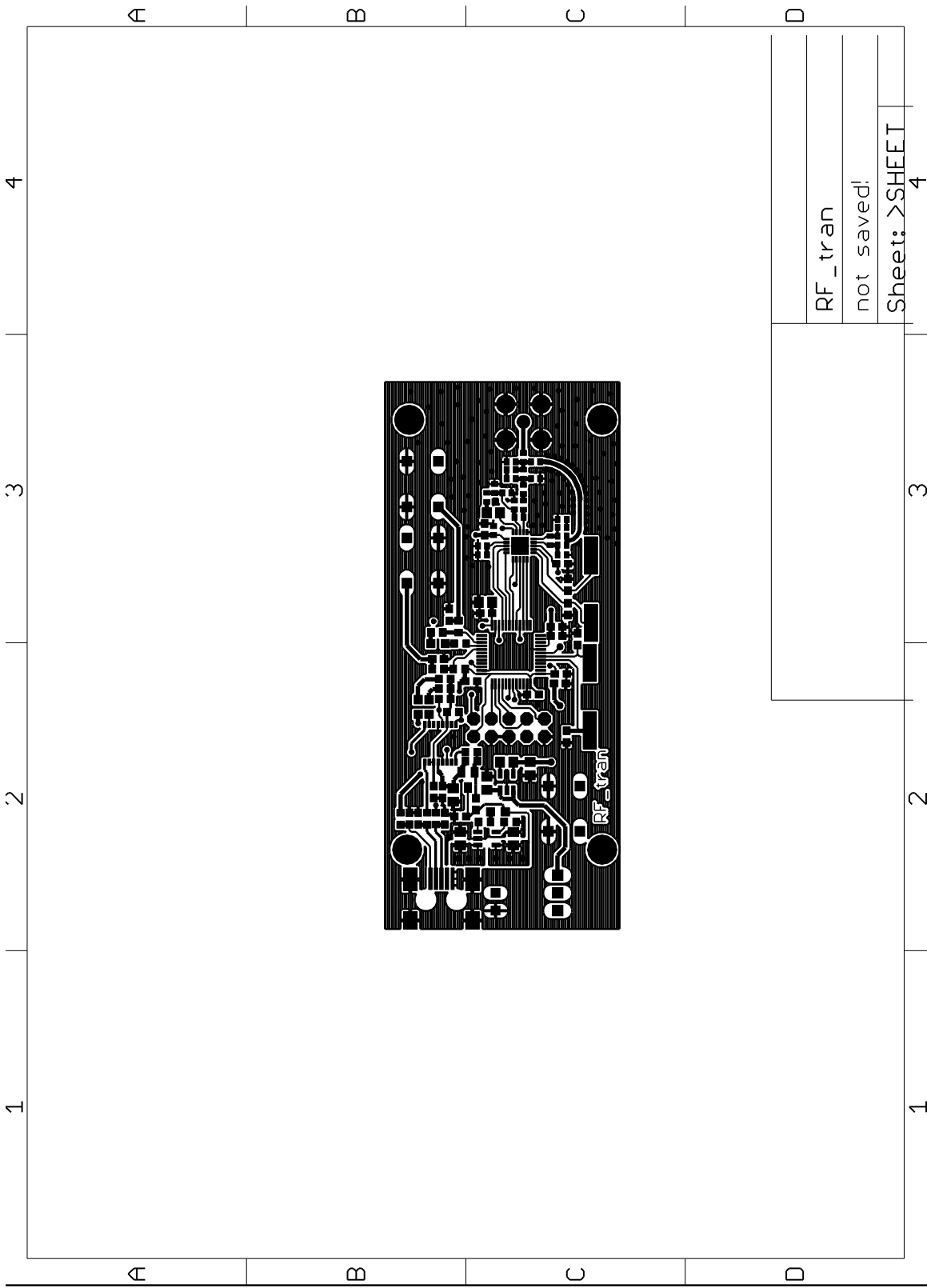
Výrobce	Amber wireless	Amber wireless	AeroComm
Typ	AMB8626	AMB8355	AC4486 - 5
Frekvence	868,03- 868,95 MHz	869,40- 869,65 MHz	869,7- 869,65 MHz
Modulace	2FSK, 2GFSK, 4FSK, 4GFSK, GMSK, MSK	2-GFSK	FSK
Napájecí napětí	2 až 3,6 V	7 až 30 V	3,3 V
Spotřeba Rx	30 mA	75 mA	40 mA
Spotřeba TX	53 mA	530 mA	40 mA
Max. přenosová rychlost	250 Kbps	19.2 Kbps	115.2 Kbps
Citlivost	-109 dBm	-110 dBm	-100 dBm
Komunikace	UART, SPI	UART	UART
Funkce	Support P2P, Wake up, CRC, AES, Long range	Range 20 km, Support P2P, CRC, ACK, Packet handling	CRC, Long range, Packet filtering, Support packet, Auto ACK

# Príloha D – Schéma zapojení

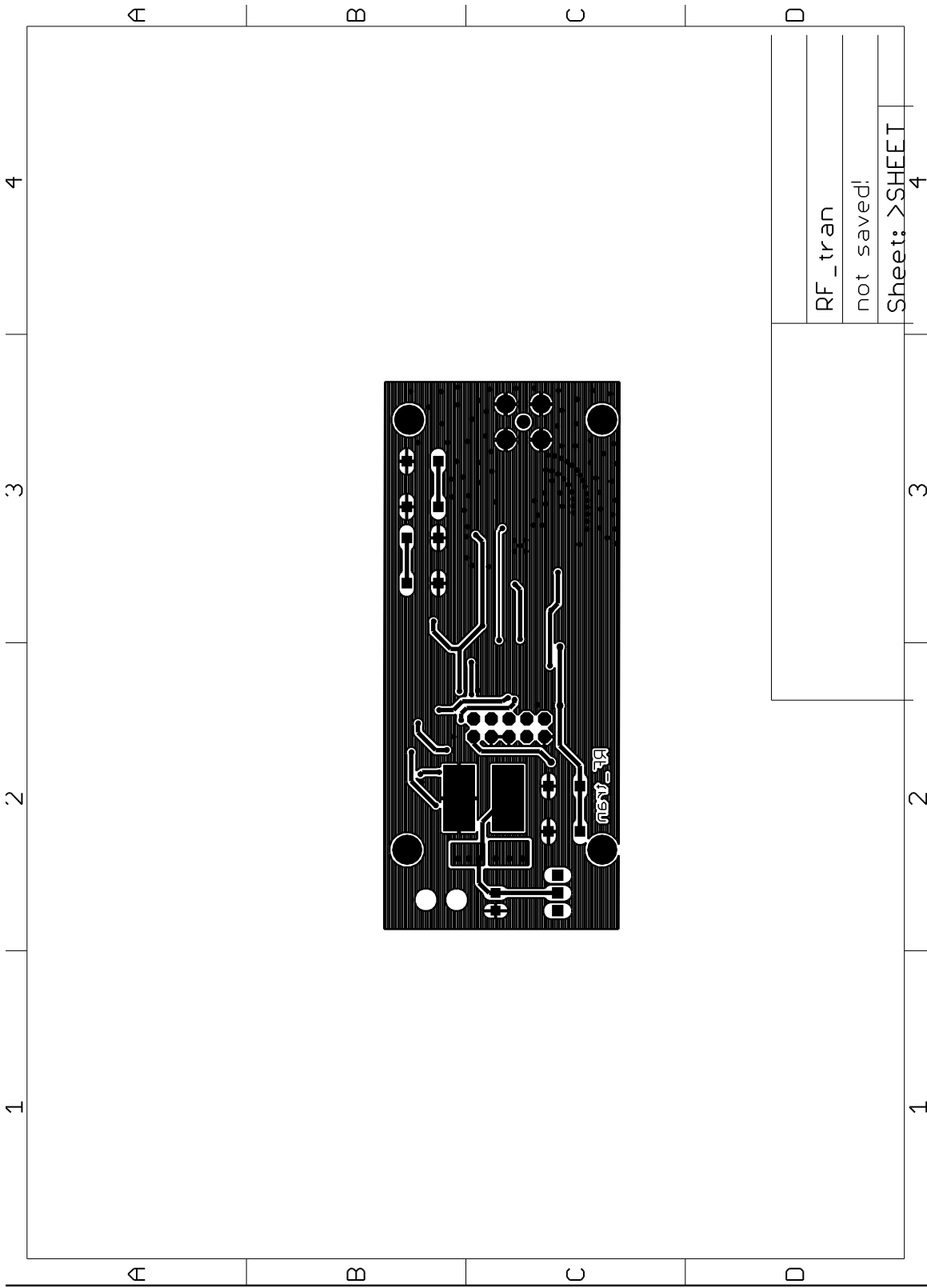


NAME: Petr Uanecek	REV:
TITLE: RF_tran	Document Number:
Date: not_saved!	Sheet: 1/1

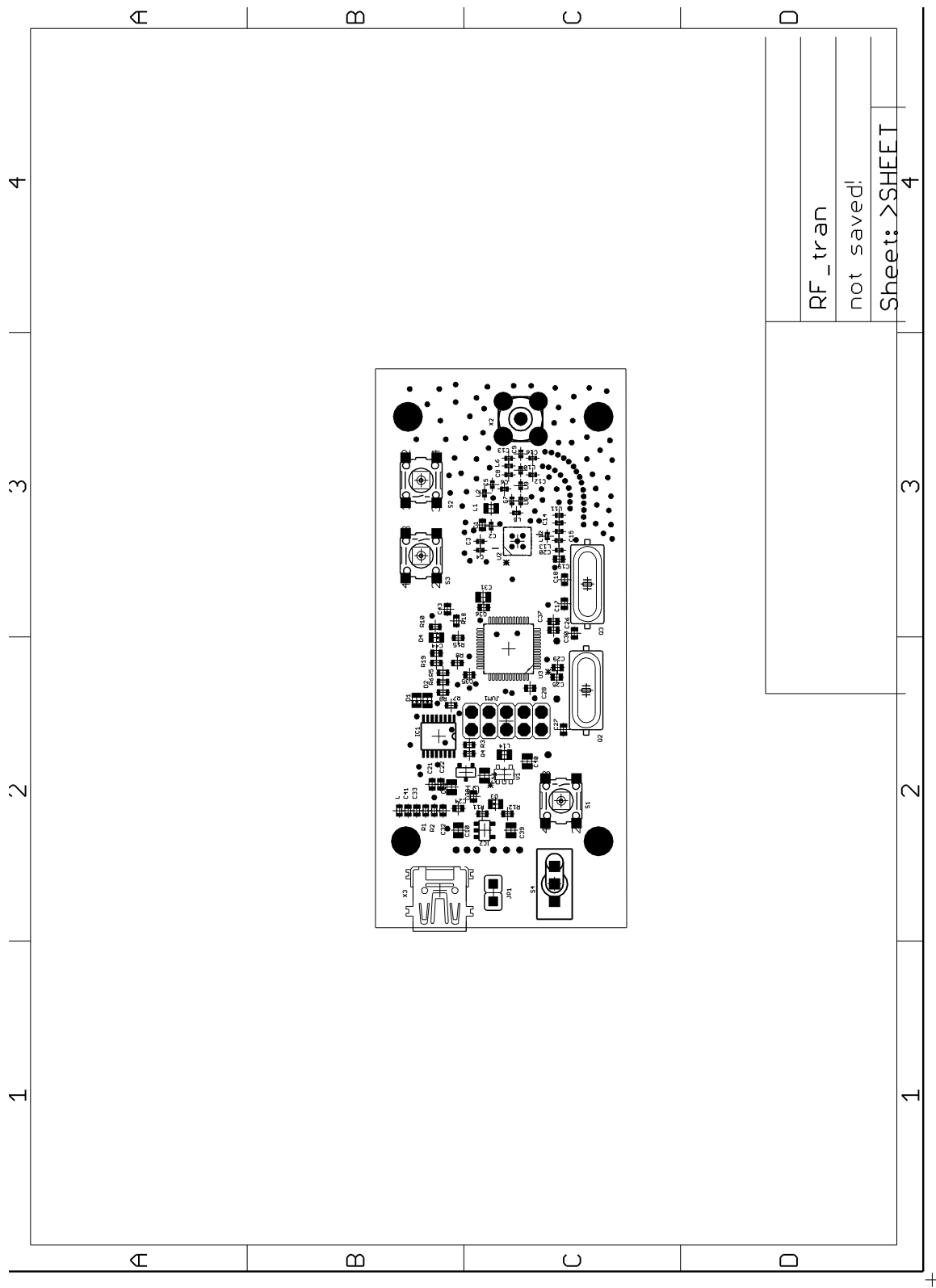
**Příloha E – DPS horní strana**



**Příloha F – DPS spodní strana**



**Příloha G – Osazení horní strana**



# Příloha H – Osazení spodní strana

