



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

RADIOKOMUNIKAČNÍ MONITOR PRO ISM PÁSMO 868 MHZ

RADIOCOMMUNICATION MONITOR FOR ISM BAND AT 868 MHZ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR FREČER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POVALAČ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Petr Frečer

ID: 106435

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Radiokomunikační monitor pro ISM pásmo 868 MHz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti využití ISM pásem se zaměřením na vlastnosti pásma 868 MHz. Prostudujte metodu digitální modulace FSK a její implementaci v obvodu CC1020.

Navrhněte koncepci radiokomunikačního monitoru s funkcí dekódování FSK dat přenášených na zvolené frekvenci. Navrhněte obvodové schéma a desky plošných spojů. Realizujte funkční vzorek radiokomunikačního monitoru.

Vytvořte obslužný firmware pro mikroprocesor. Proveďte experimentální ověření funkce systému včetně možností indikace kmitočtové odchylky pomocí systému AFC.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PROKEŠ, A. Komunikační systémy. Elektronické skriptum. Brno: VUT FEKT v Brně, 2004.

[2] CC1020: Low-Power RF Transceiver for Narrowband Systems. Data sheet [Online]. Texas Instruments, 2010 [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na [www: http://www.ti.com/lit/gpn/cc1020](http://www.ti.com/lit/gpn/cc1020)

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

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 návrhem a realizací radiokomunikačního monitoru pro ISM pásmo 868 MHz. V práci je uveden popis bezlicenčních rádiových pásem dle doporučení ITU a norem ETSI. Zvláštní pozornost je věnována pásmu 863 MHz až 870 MHz. Podrobně je popsán transceiver CC1020, který tvoří základ monitoru. Postupně je představen obvodový návrh, sestavení monitoru a vytvoření firmwaru. Radiokomunikační monitor je přenosný, napájený primárně z baterií. Monitor umožňuje zobrazit spektrum signálů v pásmu 868 MHz, indikuje kmitočtovou odchylku vysílače a přijímá vysokofrekvenční signál s modulací FSK. Demodulovaná data je možné přenést do osobního počítače přes rozhraní USB.

KLÍČOVÁ SLOVA

ISM pásmo, transceiver CC1020, mikrokontrolér ATmega32L, grafický LCD displej.

ABSTRACT

This thesis deals with the design and the realization of the radiocommunication monitor for the 868 MHz band. In the thesis, a description of licence-free radio bands complying ITU recommendations and ETSI standards is given. A special attention is paid to the 863 MHz - 870 MHz band. The transceiver CC1020 that forms the base for the monitor is described in detail. The circuit design, the monitor assembly and the firmware creation are presented step by step. The radiocommunication monitor is portable and battery powered. The monitor is able to display RF signals in the 868 MHz band, to indicate the frequency error of the transmitter and to receive FSK modulated signal. Demodulated data can be transferred to the personal computer via the USB.

KEYWORDS

ISM band, transceiver CC1020, microcontroller ATmega32L, graphical LCD display.

FRECER, P. *Radiokomunikační monitor pro ISM pásmo 868 MHz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 48 s., 8 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Radiokomunikační monitor pro ISM pásmo 868 MHz jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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 ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Povalačovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Bezlicenční rádiová pásma	2
1.1 ISM pásma	2
1.2 Pásma pro SRD zařízení	3
1.3 Využití bezlicenčních pásem	4
2 Modulace nosné vlny	5
2.1 Analogové modulace	5
2.2 Digitální modulace.....	5
2.3 Modulace QAM	6
3 Transceiver CC1020	8
3.1 Princip činnosti	8
3.2 Parametry obvodu	9
4 Komunikační modul	12
4.1 Popis modulu	12
4.2 Ověření funkce modulu	13
5 Návrh radiokomunikačního monitoru	16
5.1 Součásti radiokomunikačního monitoru	16
5.2 Transceiver.....	17
5.3 LCD displej.....	18
5.4 Tlačítka	19
5.5 USB spojení	19
5.6 Externí paměť Flash.....	20
5.7 Mikrokontrolér.....	21
5.8 Napájecí obvody	22
5.8.1 Tvorba napájecích napětí	22

5.8.2	Nabíječka baterií	23
5.8.3	Vstup externího napájecího napětí.....	25
5.9	Konstrukce radiokomunikačního monitoru	26
6	Firmware	29
6.1	Obsluha stisknutí tlačítka.....	30
6.2	Řízení transceiveru CC1020	31
6.3	Ovladače grafického LCD displeje.....	32
6.4	Hlavní část programu.....	32
6.5	Zobrazení spektra v pásmu 868 MHz	35
6.6	Měření kmitočtové odchylky přijímaného signálu	36
6.7	Implementace FSK demodulátoru	37
6.8	Vysílač pseudonáhodných dat	38
7	Experimentální měření	39
7.1	Měření spektra	39
7.2	Přesnost AFC	40
7.3	Spotřeba radiokomunikačního monitoru	41
8	Závěr	42
	Literatura	43
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	46
	Seznam příloh	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Modulátor a demodulátor QAM (převzato z [6])	7
Obr. 3.1:	Blokové schéma obvodu CC1020 (převzato z [7]).....	8
Obr. 4.1:	Fotografie osazené horní desky komunikačního modulu (převzato z [8]) ..	12
Obr. 4.2:	Blokové schéma komunikačního modulu (převzato z [8]).....	13
Obr. 4.3:	Vývojová deska EvB se dvěma komunikačními moduly	14
Obr. 5.1:	Blokové schéma radiokomunikačního monitoru	16
Obr. 5.2:	Schéma zapojení LCD displeje	18
Obr. 5.3:	Schéma zapojení USB/UART převodníku	20
Obr. 5.4:	Schéma zapojení nabíječky baterií.....	24
Obr. 5.5:	Schéma zapojení vstupu externího napájecího napětí	26
Obr. 5.6:	Uchycení DPS v zadním panelu radiokomunikačního monitoru.....	27
Obr. 5.7:	Pohled z vnitřní strany na čelní panel radiokomunikačního monitoru	27
Obr. 5.8:	Levý bok monitoru s řadou konektorů a připojenou anténou	28
Obr. 5.9:	Čelní pohled na zhotovený radiokomunikační monitor.....	28
Obr. 6.1:	Zdrojové soubory programu mikrokontroléru	29
Obr. 6.2:	Změna stavu spínačů rotačního kodéru při točení voličem vpravo (převzato z [35]).....	30
Obr. 6.3:	Schéma stavového automatu řízení transceiveru CC1020.....	31
Obr. 6.4:	Vývojový diagram funkce <code>main()</code>	33
Obr. 6.5:	Schéma stavového automatu činnosti radiokomunikačního monitoru	34
Obr. 6.6:	Úvodní obrazovka.....	34
Obr. 6.7:	Hlavní menu.....	35
Obr. 6.8:	Volba parametrů pro měření spektra.....	35
Obr. 6.9:	Zobrazení měřeného spektra	36
Obr. 6.10:	Závislost indikované kmitočtové odchylky na skutečné odchylce (převzato z [43]).....	37
Obr. 6.11:	Ukazatel kmitočtové odchylky přijímaného signálu.....	37
Obr. 6.12:	Radiokomunikační monitor v režimu přijímače	38
Obr. 6.13:	Volba kmitočtu nosné vlny vysílače	38
Obr. 7.1:	Spektrum se signálem o výkonu -70 dBm	39

Obr. 7.2: Spektrum se signálem o výkonu -60 dBm	39
Obr. 7.3: Graf závislosti chyby měření kmitočtové odchylky na rádiovém kanálu....	40

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	ISM pásma dle doporučení ITU pro region 1 (převzato z [2])	2
Tab. 1.2:	Kmitočtová pásma pro SRD zařízení dle oprávnění ČTÚ (převzato z [4])... 3	3
Tab. 1.3:	Dělení pásma g pro SRD zařízení (převzato z [4])	4
Tab. 3.1:	Vlastnosti přijímače	9
Tab. 3.2:	Vlastnosti ukazatele síly přijatého signálu.....	10
Tab. 3.3:	Vlastnosti vysílače	10
Tab. 3.4:	Frekvence obvodu CC1020.....	10
Tab. 3.5:	Napájecí napětí a proudový odběr obvodu CC1020	11
Tab. 4.1:	Kmitočty kanálů komunikačního modulu.....	12
Tab. 4.2:	I ² C příkazy pro komunikační modul (převzato z [8])	14
Tab. 5.1:	Vlastnosti přepínače AS169-73LF (převzato z [17]).....	17
Tab. 5.2:	Parametry sériové komunikace	20
Tab. 5.3:	Přehled vybraných vlastností mikrokontroléru ATmega32L	21
Tab. 5.4:	Obsazenost vstupně/výstupních pinů mikrokontroléru ATmega32L	22
Tab. 5.5:	Teoretický maximální proudový odběr vybraných obvodů radiokomunikačního monitoru.....	23
Tab. 5.6:	Doladění oscilačního kmitočtu RC článku časovače CD4541BC	25
Tab. 7.1:	Měření přesnosti ukazatele kmitočtové odchylky.....	40
Tab. 7.2:	Spotřeba radiokomunikačního monitoru.....	41

ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem a realizací radiokomunikačního monitoru pro pásmo 868 MHz. Radiokomunikační monitor slouží ke zpracování přehledu radiových přenosů v daném vysokofrekvenčním pásmu, případně k jejich příjmu a demodulaci.

Pro přehledné zobrazení vysílačů a síly jejich signálu je vhodné, aby radiokomunikační monitor dokázal vykreslit vysokofrekvenční spektrum, čili závislost síly přijímaného signálu na kmitočtu. Analýza vysílání může být provedena za pomoci demodulace signálu, kdy lze určit, zda jsou přijatá data ve správném formátu a během radiového přenosu nedošlo k jejich poškození. Zadání práce se v tomto ohledu zasazuje o implementaci FSK demodulátoru.

Pro bezdrátové datové přenosy s malou přenosovou rychlostí a malou šířkou pásma jsou často používány cenově nenáročné vysílače. Požadavek na přesnost kmitočtu nosné vlny není u těchto vysílačů striktní a tak se může během vysílání hodnota kmitočtu odchýlit od nominální hodnoty až o několik kilohertzů. Předpokládá se, že radiokomunikační monitor bude schopen takovouto odchylku změřit.

První kapitola diplomové práce zavádí pojmy související s bezlicenčními pásmy. Jsou analyzovány současné právní předpisy k využití bezlicenčních pásem v České republice. Blíže je pak popsáno pásmo 863 MHz – 870 MHz.

V druhé kapitole se text věnuje modulacím radiových vln. Jsou uvedeny základní typy modulací a jejich matematický popis. Dle zadání diplomové práce je pozornost zaměřena na modulaci FSK. Podrobněji je také popsána modulace FM pro svoji podobnost s FSK.

Následující kapitola pojednává o integrovaném obvodu CC1020, který je zadáním práce doporučen pro realizaci radiokomunikačního monitoru. V návaznosti na druhou kapitolu je vysvětlena funkce modulace a demodulace FSK v tomto obvodu.

Čtvrtá kapitola popisuje praktickou zkoušku činnosti transceiveru využitého v komunikačním modulu. Předpokládá se kompatibilita navrhovaného radiokomunikačního monitoru s nastavenou modulací komunikačního modulu.

Obvodový návrh radiokomunikačního monitoru včetně schémat zapojení je popsán v páté kapitole. Pro realizaci jednotlivých funkčních částí monitoru jsou voleny vhodné integrované obvody a jsou diskutovány jejich vlastnosti. V závěru kapitoly je zdokumentována mechanická konstrukce radiokomunikačního monitoru.

Šestá kapitola nazvaná Firmware představuje strukturu programu pro řídicí mikrokontrolér. Vysvětlena je podstata komunikace s periferiemi a vytvořeno menu zobrazované na LCD displeji. Implementace vykreslení spektra v pásmu 868 MHz, měření kmitočtové odchylky přijímaného signálu a FSK demodulátoru je rozvedena v příslušných podkapitolách.

Práce je zakončena experimentálním měřením, kde jsou ověřeny schopnosti radiokomunikačního monitoru. Závěr diplomové práce diskutuje, na kolik je splněno zadání a navrhuje postup pro budoucí vývoj monitoru.

1 BEZLICENČNÍ RÁDIOVÁ PÁSMA

Výrobci elektronických zařízení a jejich uživatelé jsou v případě, že tato zařízení vysílají elektromagnetické vlny na určitém rádiovém kmitočtu, povinni dbát na to, aby pro daný rádiový kmitočet resp. kmitočtové pásmo, měli přidělenou potřebnou licenci. Přidělování licencí spravuje v každé zemi příslušná organizace. V České republice tuto činnost zajišťuje Český telekomunikační úřad (ČTÚ) [1]. Kromě licencovaných pásem, která převažují, existují pásma bezlicenční. Pro využití bezlicenčního pásma není třeba žádat ČTÚ o vydání povolení. Podmínky vysílání jsou dány regulacemi týkajícími se technických parametrů vysílání.

1.1 ISM pásma

Zkratka ISM pochází z anglického slovního spojení „Industrial Science Medical“. Používá se pro označení bezlicenčních kmitočtových pásem původně určených pro průmyslové, vědecké a zdravotnické aplikace. Termín „ISM pásmo“ zavedla Mezinárodní telekomunikační unie (ITU – International Telecommunication Union). ITU je společnost spadající pod Organizaci spojených národů (OSN). Jednou z jejích rolí je celosvětová koordinace využívání rádiového spektra.

ISM pásma jsou primárně určena pro využití mimo oblast komunikací. Slouží pro provoz zařízení, která by svou činností mohla rušit rádiový provoz v daném kmitočtovém pásmu, např. mikrovlnné trouby. Využití ISM pásem pro komunikace není zakázáno. Komunikační zařízení musí být ale dostatečně odolná proti rušení. V současné době využívá ISM pásma mnoho známých komunikačních standardů jako např. IEEE 802.15.3 (Bluetooth) nebo IEEE 802.11 (WiFi). V tab. 1.1 jsou uvedena ISM pásma dle doporučení ITU. Hodnoty jsou platné pro tzv. region 1, který zahrnuje kromě Evropy a Afriky také země Blízkého východu a země bývalého Sovětského svazu.

Tab. 1.1: ISM pásma dle doporučení ITU pro region 1 (převzato z [2])

Kmitočtové pásmo	Střední kmitočet
6,765-6,795 MHz	6,780 MHz
13,553-13,567 MHz	13,560 MHz
26,957-27,283 MHz	27,120 MHz
40,66-40,70 MHz	40,68 MHz
433,05-434,79 MHz	433,92 MHz
2400-2500 MHz	2450 MHz
5725-5875 MHz	5800 MHz
24-24,25 GHz	24,125 GHz
61-61,5 GHz	61,25 GHz
122-123 GHz	122,5 GHz
244-246 GHz	245 GHz

1.2 Pásmo pro SRD zařízení

Pojem zařízení krátkého dosahu (SRD – Short Range Device) se objevuje v evropských dokumentech týkajících se bezlicenčních pásem. SRD jsou zařízení, která pracují s malým vyzářeným výkonem a tím minimalizují možné rádiové interference.

Správu rádiového spektra koordinuje v Evropě Konference evropských správ pošt a telekomunikací (CEPT) sdružující 48 států. Skrze Evropský ústav pro telekomunikační standardy (ETSI – European Telecommunication Standards Institute) vydává CEPT závazné normy. Pro zařízení krátkého dosahu platí v Evropě norma EN 300 220. V České republice je norma známa pod označením ČSN ETSI EN 300 220. Norma se zabývá kmitočtovým pásmem 25 MHz – 1000 MHz. Doplnuje ISM pásma doporučená organizací ITU o nová pásma pro SRD. Zavádí se také pásmo 863 MHz - 870 MHz. Kromě technických specifikací SRD zařízení obsahuje norma také způsoby měření a testování těchto zařízení.

Pojmy „ISM pásmo“ a „SRD pásmo“ jsou v praxi často zaměňovány, ale z hlediska norem se jedná o odlišné výrazy. S každým pracuje jiná standardizační organizace, která může mít na zařízení jiné požadavky.

Český telekomunikační úřad při správě kmitočtového spektra zohledňuje rozhodnutí CEPTu, normy ETSI a bere v úvahu i doporučení ITU. V současné době platí všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2007-4 k využívání rádiových kmitočtů a zařízení krátkého dosahu [4]. Bezlicenční kmitočtová pásma pro nespécifikované stanice krátkého dosahu udává tab. 1.2.

Tab. 1.2: Kmitočtová pásma pro SRD zařízení dle oprávnění ČTÚ (převzato z [4])

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Ozn.	Kmitočtové pásmo
<i>a</i>	6,765 - 6,795 MHz	<i>h</i>	2400 - 2483,5 MHz
<i>b</i>	13,553 - 13,567 MHz	<i>i</i>	5725 - 5875 MHz
<i>c</i>	26,957 - 27,283 MHz	<i>j</i>	24 - 24,25 GHz
<i>d</i>	40,66 - 40,70 MHz	<i>k</i>	61 - 61,5 GHz
<i>e</i>	138,20 - 138,45 MHz	<i>l</i>	122 - 123 GHz
<i>f</i>	433,05 - 434,79 MHz	<i>m</i>	244 - 246 GHz
<i>g</i>	863,00 - 870,00 MHz		

Kmitočtové pásmo *g* (863 MHz – 870 MHz) je dále děleno na subpásma, jejichž vlastnosti shrnuje tab. 1.3. Kromě kmitočtového rozsahu je každé pásmo určeno hodnotou maximálního vyzářeného výkonu, který je dovoleno použít. Požadavky mohou být kladeny i na rozteč kanálů. Doporučuje se používat rozteč kanálů 25 kHz, 50 kHz a 100 kHz. Rozteč by neměla přesáhnout 100 kHz. Poslední parametr uvedený v tabulce, klíčovací poměr, je poměr času, kdy vysílač vysílá na nosné vlně, k celkovému času (měřeno v rámci jedné hodiny). Pro zařízení, která vysílají pouze po vyžádání na základě příjmu, není klíčovací poměr nikterak omezen. Celé pásmo *g* mohou využívat systémy s rozprostřeným spektrem jako DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) a FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum). Jejich použití je ovšem podmíněné a musí se řídit dalšími specifikacemi uvedenými ve všeobecném oprávnění. Pásmo *g* nelze použít pro přenos hovorových, akustických a video signálů

s výjimkou subpásma *g5*, které pro audio signály využít lze.

Tab. 1.3: Dělení pásma *g* pro SRD zařízení (převzato z [4])

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Max. vyzářený výkon	Kanálová rozteč	Klíčovací poměr
<i>g</i>	863,00-870,00 MHz	25 mW	max. 100 kHz	< 0,1 %
<i>g1</i>	868,00-868,60 MHz	25 mW	-	< 1 %
<i>g2</i>	868,70-869,20 MHz	25 mW	-	< 0,1 %
<i>g3</i>	869,30-869,40 MHz	25 mW	max. 25 kHz	-
<i>g4</i>	869,40-869,65 MHz	500 mW	max. 25 kHz nebo celé pásmo	< 10 %
<i>g5</i>	869,70-870,00 MHz	5 mW	-	až 100 %

Pokud bude vysílač SRD zařízení provozován jen v krátkých časových úsecích a vyhoví tak požadavku na klíčovací poměr menší než 0,1 %, může využívat kterýkoli z kmitočtů pásma *g* (s ohledem na dříve zmíněné rozteče kanálů). Subpásma *g1* a *g2* nabízí vysílači možnost využít celé pásmo za cenu malého klíčovacího poměru. V subpásmu *g3* lze vysílat nepřetržitě ovšem s omezenou šířkou pásma. Při požadavku na větší dosah signálu lze s výhodou využít subpásmo *g4*. Pro zařízení, která mohou vysílat neustále a to i s větší šířkou pásma, je určeno subpásmo *g5*, které je výkonově omezeno na 5 mW. Z výše uvedeného je patrné, že každé subpásmo má své výhody i nevýhody. Pro omezení interferencí mezi vysílanými signály jsou tyto omezeny časově (pásma *g1*, *g2*), kanálovou roztečí (pásmo *g3*) nebo vyzářeným výkonem (pásmo *g5*).

1.3 Využití bezlicenčních pásem

SRD pásma jsou využívána pro rozličné aplikace. Kromě použití, které má charakter ISM, uvedeném v kapitole 1.1 a kromě datových technologií využívajících pásmo *h* (okolo 2,4 GHz) jsou nejčastěji SRD pásma použita pro přenos telemetrických dat, dálkové ovládání a signalizaci a přenos poplachových informací. Známé je například využití u domácích meteorologických stanic, kde čidla teploty a vlhkosti bezdrátově přenášejí měřenou hodnotu do vyhodnocovací jednotky. Využití dálkového ovládání je možné vidět jak u RC modelů, tak i u bezdrátových myší pro osobní počítače (PC).

Pásmo 865 MHz – 868 MHz slouží pro rádiová identifikační zařízení (RFID – Radio Frequency Identification Applications). Jedná se o zařízení pro automatickou identifikaci zboží, sledování pohybu prostředků, osobní identifikaci, řízení vstupu, bezdotykové senzory, systémy lokalizace a jiné. RFID zařízení vysílají signál jen po vyžádání na základě příjmu.

Subpásmo *g1* (868,00 MHz – 868,60 MHz) využívá standard IEEE 802.15.4 s protokoly ZigBee specifikující datovou komunikaci s nízkou přenosovou rychlostí probíhající na malou vzdálenost (10 m).

V pásmu *g* je teoreticky možné provozovat komunikaci na vzdálenost dosahující až 500 m. Vlivem zhoršeného šíření vln v zastavěné oblasti je ovšem typická vzdálenost komunikujících zařízení menší než 100 m.

2 MODULACE NOSNÉ VLNY

Přenos užitečného signálu bezdrátově je proveden modulací tohoto signálu na nosnou rádiovou vlnu. Modulace je proces, při kterém dojde ke změně jednoho nebo více parametrů nosné vlny. Při matematickém popisu se nosná vlna vyjadřuje jako funkce kosinus

$$s_0(t) = S_0 \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0). \quad (2.1)$$

Velikost rádiové vlny (kosinu) se mění s časem t . Vlna má amplitudu S_0 , kmitočet f_0 a počáteční fázi φ_0 .

2.1 Analogové modulace

Základními modulacemi, při kterých užitečný signál plynule moduluje nosnou vlnu, jsou amplitudová modulace (AM), kmitočtová modulace (FM) a fázová modulace (PM). Při kmitočtové modulaci se mění kmitočet nosné vlny dle vztahu

$$f(t) = f_0 + \Delta f \cdot n(t). \quad (2.2)$$

Výsledný kmitočet nosné vlny se odchyluje od střední hodnoty f_0 působením modulační funkce $n(t)$. Změnu kmitočtu ovlivňuje také koeficient Δf , což je tzv. kmitočtový zdvih. Modulovaný rádiový signál má šířku pásma danou vztahem (2.3), kde B je šířka pásma a F je kmitočet modulačního signálu.

$$B = 2 \cdot (F + \Delta f) \quad (2.3)$$

Doposud bylo uvažováno, že se parametry nosné vlny mění plynule. Modulační funkce byla spojitá, analogová. Proto jsou uvedené modulace označovány jako analogové modulace.

2.2 Digitální modulace

V případě, že je modulační funkce nespojitá a parametry nosné vlny se mění skokově, dochází k modulaci digitální. Digitální modulace jsou označovány jako tzv. klíčování. Základními typy jsou amplitudové klíčování (ASK – Amplitude Shift Keying), kmitočtové klíčování (FSK – Frequency Shift Keying) a fázové klíčování (PSK – Phase Shift Keying).

Parametr nosné vlny, který je modulací měněn může nabývat vždy jen několika hodnot. Počet možných hodnot je obvykle mocninou čísla dvě a bývá vyjádřen v názvu modulace. Existují tak např. modulace 4ASK, 4FSK, 8PSK. Dvoustavové kmitočtové klíčování je označováno jako 2FSK nebo někdy jen FSK.

Kmitočet FSK se mění dle vztahu

$$f_i(t) = f_0 + \Delta f \cdot n_i(t), \quad (2.4)$$

kde modulační funkce $n_i(t)$ nabývá hodnoty ± 1 . Kmitočet nosné vlny tak v čase střídá dvě hodnoty.

Modulace FSK, stejně jako ostatní digitální modulace, je vhodná pro přenos binárních datových signálů. Modulační signál získáme z binárního pomocí tzv. linkového kódu. Jedná se o předpis, který udává, čím je v modulačním signálu reprezentována logická nula (log. 0) a logická jednička (log. 1). Nejjednodušším typem je kódování NRZ (Non Return to Zero), které pro log. 1 přiřadí jednu úroveň (např. +1) a pro log. 0 přiřadí druhou úroveň (např. -1). U složitějších linkových kódů jsou logické úrovně reprezentovány přechody mezi úrovněmi (např. -1 \rightarrow +1) a to jedenkrát nebo dvakrát za bitovou periodu. Cílem je obohatit modulační signál o časté změny úrovně, které mohou být využity přijímačem pro bitovou synchronizaci.

2.3 Modulace QAM

Zvláštním případem modulace je tzv. kvadrurní amplitudová modulace, kdy není modulována jedna, ale dvě rádiové vlny. Obě vlny jsou navzájem v kvadratuře (mají fázový rozdíl 90°). Jedna vlna je označována jako I (In phase) a druhá jako Q (Quadrature). Výsledný rádiový signál je součtem obou vln. Matematicky můžeme tuto skutečnost vyjádřit jako

$$s(t) = S_1 \cdot \cos(2\pi f_0 t) + S_2 \cdot \sin(2\pi f_0 t). \quad (2.5)$$

Modulace QAM může být analogová i digitální. Záleží na povaze modulačních signálů, které mění amplitudy S_1 a S_2 .

Pro digitálně modulovaný signál lze odvodit (převzato z [5]), že pomocí modulace QAM lze realizovat i modulace ASK, FSK a PSK. Obecný digitálně modulovaný signál je vyjádřen vztahem

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n \cdot \cos[2\pi f_0 t + 2\pi f_n t + \varphi_n(t)] \cdot u(t - nT_s), \quad (2.6)$$

kde S_n , f_n a φ_n jsou hodnoty závislé na modulační funkci. Výsledný modulovaný signál je součtem diskrétních pulzů, které udává funkce obdélníkového pulzu $u(t)$ o šířce pulzu T_s a výšce 1. n je pořadí jednotlivých pulzů. Vztah (2.6) lze upravit do tvaru obsahujícího synfázní a kvadrurní složku

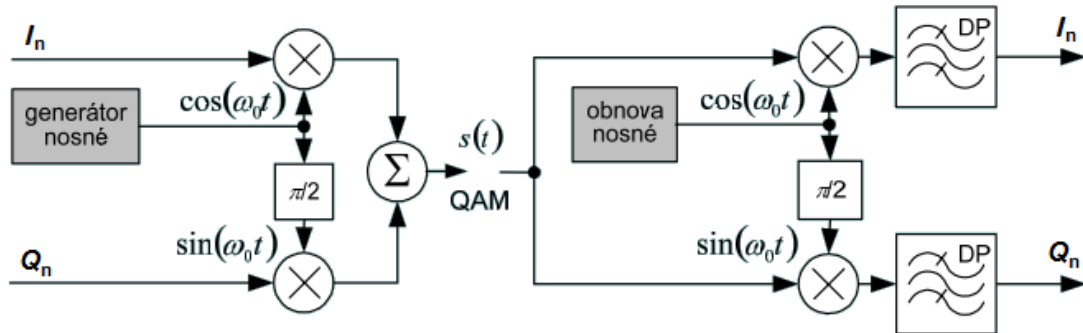
$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [I_n \cdot \cos(2\pi f_0 t) + Q_n \cdot \sin(2\pi f_0 t)] \cdot u(t - nT_s). \quad (2.7)$$

Modulačními signály jsou

$$I_n = S_n \cdot \cos(2\pi f_n t + \varphi_n(t)), \quad (2.8)$$

$$Q_n = S_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi_n(t)). \quad (2.9)$$

Možnost realizovat různé digitální modulace pomocí modulace QAM je v praxi často využívána. Zejména pro modulace s větším počtem stavů. Příkladem mohou být modulátory a demodulátory pro 4PSK (označované také jako QPSK – Quadrature Phase Shift Keying), 8PSK a MSK (Minimum Shift Keying). MSK je obdoba modulace FSK, kde ovšem nedochází se skokovou změnou kmitočtu i ke skokové změně fáze nosné vlny. Blokové schéma modulátoru a demodulátoru QAM ukazuje obr. 2.1.



Obr. 2.1: Modulátor a demodulátor QAM (převzato z [6])

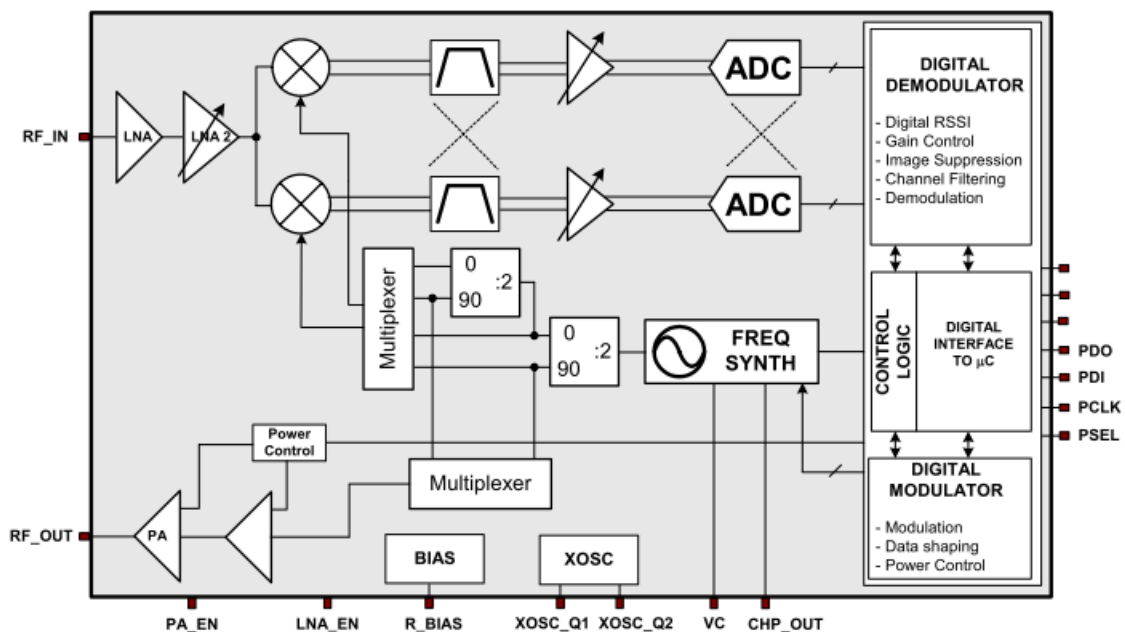
3 TRANSCEIVER CC1020

Ze zadání diplomové práce vyplývá požadavek na využití obvodu CC1020 od firmy Texas Instruments [7]. Jedná se o úzkopásmový UHF transceiver integrovaný na jednom čipu určený pro aplikace s nízkým napětím a malým proudovým odběrem využívající ISM a SRD pásma. Slovo „transceiver“ pochází z anglických slov „transmitter“ – vysílač a „receiver“ – přijímač. Transceiver je tedy elektronický obvod sloužící pro vysílání i příjem rádiových signálů. CC1020 je schopný komunikovat v rádiových pásmech 402 MHz – 470 MHz a 804 MHz – 960 MHz. Nastavování rozmanitých parametrů obvodu má na starost externí mikrokontrolér, který s transceiverem komunikuje přes sériové rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface).

3.1 Princip činnosti

Obvod CC1020 podporuje přenos digitálního signálu pomocí modulací OOK, FSK, GFSK. Modulace OOK (On-off Keying) je nejjednodušším případem digitální modulace. Je to obdoba modulace ASK. Nosná vlna je přenášena binární posloupností klíčována tak, že se amplituda mění skokově mezi maximální a nulovou hodnotou. Modulace FSK byla již zmíněna v kapitole 2.2. Pro snížení výsledné šířky pásma rádiového signálu je u FSK modulace možné modulační signál kmitočtově omezit Gaussovským filtrem. Výsledný proces se nazývá GFSK (Gaussian-FSK) modulace.

Blokové schéma obvodu CC1020 je zobrazeno na obr. 3.1. Proces vysílání dat začíná v digitálním modulátoru, kde jsou sériová data zaslána mikrokontrolérem upravena linkovým kódem (NRZ nebo Manchester) a je vytvořen modulační signál.



Obr. 3.1: Blokové schéma obvodu CC1020 (převzato z [7])

Při modulaci FSK je modulačním signálem řízena hodnota kmitočtu nosné vlny, kterou generuje frekvenční syntezátor (blok **FREQ SYNTH**). Kmitočet nabývá střídavě dvou hodnot. Syntetizovaný signál je výkonově zesílen (blok **PA – Power Amplifier**) a vyveden na výstupní pin připojený k vysílací anténě.

Přijímaný signál (vstup **RF-IN**) je nejdříve zesílen ve dvoustupňovém nízkošumovém zesilovači (bloky **LNA – Low Noise Amplifier**). FSK demodulace je realizována za pomoci **QAM** demodulátoru. Modulační signály ve větvích *I* a *Q* jsou získány vynásobením nosné vlny synfázovou a kvadraturní vlnou o nižším kmitočtu. Rozdílové produkty na tzv. mezifrekvenci **IF** (Intermediate Frequency) jsou vybrány analogovým filtrem. Signál v každé větvi je zesílen a navzorkován analogově-digitálním převodem (blok **ADC**). Digitalizovaný signál je dále filtrován a demodulován. Dochází také k bitové synchronizaci. Demodulovaný binární signál je předán mikrokontroléru.

Transceiver disponuje možností měřit sílu přijímaného signálu **RSSI** (Received Signal Strength Indicator). Údaj je možné použít pro spouštění demodulátoru jen v případě dostatečně silné nosné vlny. Sílu signálu je možné číst ze stavového registru **CC1020** pomocí mikrokontroléru a s jeho pomocí pak realizovat techniku **CSMA** (Carrier Sense Multiple Access) pro snížení interference v rušném prostředí.

Při demodulaci dochází k průměrování hodnot detekovaného modulačního kmitočtu. Průměr je použit pro automatickou úpravu rozhodovací úrovně. Pokud nejsou oba kmitočty modulačního signálu rozloženy rovnoměrně okolo středního kmitočtu přijímaného signálu, je možné použít průměrovanou hodnotu kmitočtu k opravení nastavení kmitočtu lokálního oscilátoru (**AFC – Automatic Frequency Control**).

3.2 Parametry obvodu

V tomto oddílu jsou zmíněny vlastnosti transceiveru **CC1020** (převzato z [7]). Uvedené hodnoty jsou vztaženy k provozování obvodu v pásmu **SRD 868 MHz**. Tab. 3.1 zmiňuje vlastnosti přijímací části transceiveru. Velmi dobrá je hodnota citlivosti přijímače, která je běžně nižší než **-100 dBm**.

Tab. 3.1: Vlastnosti přijímače

Parametr	Hodnota	Poznámka
Citlivost přijímače (FSK)		
12,5 kHz kanálová rozteč	-116 dBm	
25 kHz kanálová rozteč	-111 dBm	
500 kHz kanálová rozteč	-94 dBm	
Citlivost přijímače (OOK)		
4,8 kBaud symbolová rychlost	-107 dBm	
153,6 kBaud symbolová rychlost	-87 dBm	
Maximální vstupní úroveň signálu	10 dBm	
Šumové číslo	7 dB	

Vstupní bod zahrazení IP3 25 kHz kanálová rozteč	-18 dBm -15 dBm -13 dBm	LNA2 největší zesílení LNA2 střední zesílení LNA2 nejmenší zesílení
---	-------------------------------	---

Vlastnosti ukazatele síly přijatého signálu (RSSI) shrnuje tab. 3.2.

Tab. 3.2: Vlastnosti ukazatele síly přijatého signálu

Parametr	Hodnota	Poznámka
Dynamický rozsah RSSI	55 dB	rozteč 12,5 kHz, 25 kHz
Přesnost RSSI	±3 dB	
Linearita RSSI	±1 dB	
Maximum rozsahu RSSI při	-55 dBm	rozteč < 200 kHz
Doba ustálení hodnoty RSSI	3.8 ms	symb. rychlost 2,4 kBaud, rozteč 12,5 kHz

Vysílač obvodu CC1020 může pracovat s proměnnou symbolovou rychlostí i výstupním výkonem (viz tab. 3.3).

Tab. 3.3: Vlastnosti vysílače

Parametr	Hodnota
Symbolová rychlost	0,45 – 153,6 kBaud
Výstupní výkon	-20 – 5 dBm
Výkony vyšších harmonických při výstupním výkonu 5 dBm	
2. harmonická	-50 dBc
3. harmonická	-50 dBc

Pracovní frekvence transceiveru shrnuje tab. 3.4. Adaptace transceiveru na různé kanálové rozteče je dána možností měnit šířku pásma digitálního filtru mezifrekvence.

Tab. 3.4: Frekvence obvodu CC1020

Parametr	Hodnota	Poznámka
Kmitočet krystalového oscilátoru	14,7456 MHz	
Mezifrekvence	307,2 kHz	
Šířka pásma filtru mezifrekvence	9,6 – 307,2 kHz	
Rozlišení AFC	150 kHz	symb. rychlost 2,4 kBaud

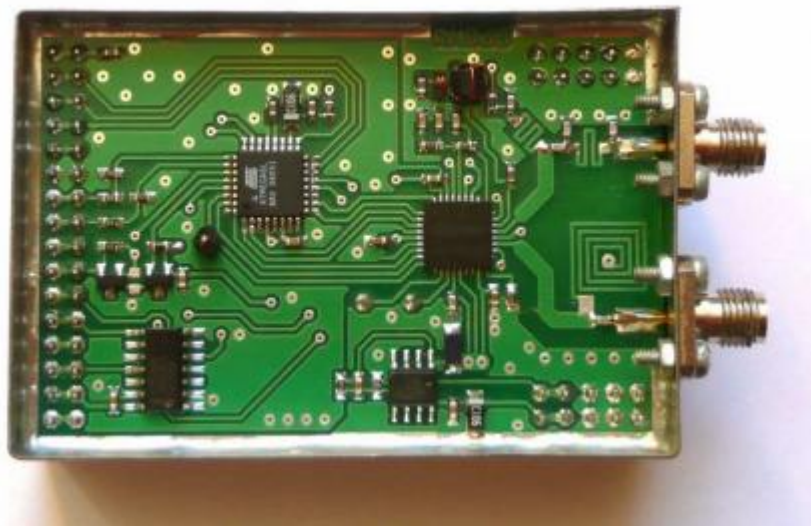
Představu o napájení a proudovém odběru obvodu nám dává tab. 3.5. Pokud není požadován příjem nebo vysílání může být transceiver uveden do úsporného režimu.

Tab. 3.5: Napájecí napětí a proudový odběr obvodu CC1020

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3,0 V
Proudový odběr v úsporném módu	0,2 μ A
Proudový odběr při příjmu	19,9 mA
Proudový odběr při vysílání	
P = -20 dBm	14,5 mA
P = -5 dBm	17,0 mA
P = 0 dBm	20,5 mA
P = 5 dBm	25,1 mA

4 KOMUNIKAČNÍ MODUL

Využití transceiveru CC1020 je demonstrováno komunikačním modulem (viz obr. 4.1), který je součástí radiomodemu vytvořeného v rámci projektu č. ST20072008026 Vývoj univerzálního softwaru a mikroprocesorové řídicí jednotky pro systém na zónové měření [8].



Obr. 4.1: Fotografie osazené horní desky komunikačního modulu (převzato z [8])

4.1 Popis modulu

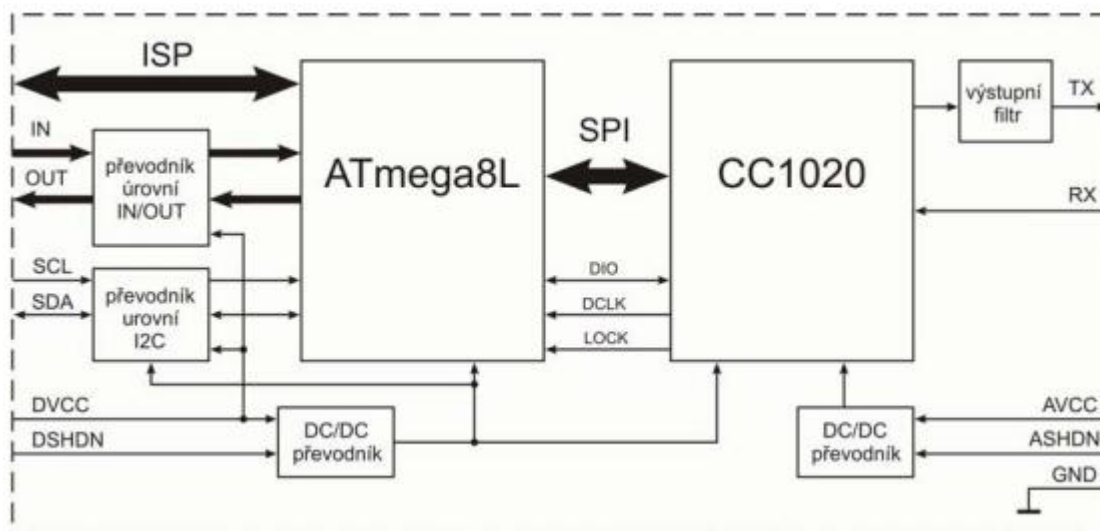
Komunikační modul obsahuje kromě transceiveru CC1020 především mikrokontrolér ATmega8L, který je zodpovědný za řízení obvodu CC1020 pomocí rozhraní SPI a komunikaci s hlavní procesorovou jednotkou radiomodemu přes sběrnici I²C (Inter-Integrated Circuit). Blokové schéma modulu je na obr. 4.2. Mikrokontrolér i transceiver pracují se stejnosměrným napájecím napětím 3,0 V. Celý modul je pak napájen napětím 5,0 V. Na stejné úrovni probíhá i datová komunikace přes I²C díky převodníku napěťových úrovní. Mikrokontrolér je možné přeprogramovat pomocí ISP (In-System Programming).

Tab. 4.1: Kmitočty kanálů komunikačního modulu

Kanál	Kmitočet [MHz]	Kanál	Kmitočet [MHz]
0	869,4125	4	869,5125
1	869,4375	5	869,5375
2	869,4625	6	869,5625
3	869,4875	7	869,5875

Komunikační modul pracuje v pásmu SRD 868 MHz. Data s přenosovou rychlostí

2400 Baud jsou kódována pomocí kódu Manchester a vysílána s modulací FSK s kmitočtovým zdvihem 1125 kHz. Modul může využít jeden z osmi definovaných rádiových kanálů (viz tab. 4.1). Kanály mají šířku pásma 9,6 kHz a rozteč 25 kHz. Výstupní vyzářený výkon modulu je 5 dBm.



Obr. 4.2: Blokové schéma komunikačního modulu (převzato z [8])

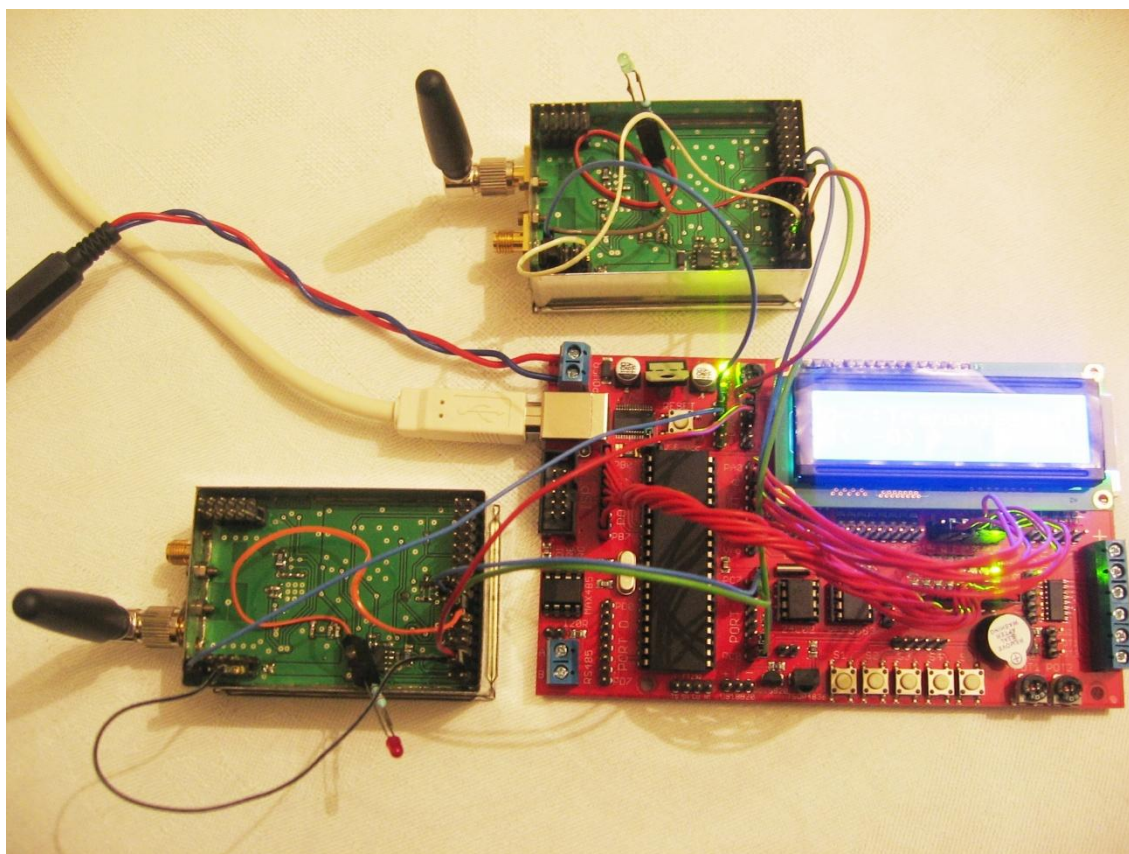
4.2 Ověření funkce modulu

Pro vyzkoušení funkce komunikačního modulu byla sestavena bezdrátová komunikace mezi těmito dvěma moduly. Oba moduly byly řízeny přes I²C pomocí vývojové desky EvB 4.3 v4 [9]. Vývojová deska EvB je osazena mikrokontrolérem ATmega32 s taktovacím kmitočtem 16 MHz a 32 kB programové paměti. Ze široké výbavy desky byl dále použit převodník FT232R pro převod mezi USB a UART, dvouřádkový alfanumerický LCD displej a LED diody pro signalizaci. Stabilizátor na 5,0 V desky EvB posloužil pro vytvoření napájecího napětí pro oba komunikační moduly.

Každý komunikační modul je osazen anténou – čtvrtvlnným dipólem pro pásmo 868 MHz. Antény mají 50 Ω impedanci a jsou zakončeny konektorem SMA. Jeden z komunikačních modulů slouží jako vysílač a má anténu připevněnou k výstupu TX, druhý slouží jako přijímač s anténou připevněnou ke vstupu RX.

Řídící deska ovládá každý komunikační modul samostatnou sběrnici I²C. Běžně je možné využít pro komunikaci s více integrovanými obvody jen jednu sběrnici I²C, přičemž každý obvod má svou jedinečnou adresu. V tomto případě mají ale oba komunikační moduly stejnou I²C adresu a proto nemohou sdílet stejnou sběrnici.

Realizaci propojení desky EvB s komunikačními moduly zobrazuje obr. 4.3. Deska EvB je spojena pomocí USB s osobním počítačem, kde je možné vyhodnocovat přijímaná data. USB port se díky příslušnému ovladači jeví v operačním systému Windows jako sériová linka. Příjem a odeslání dat po sériové lince zabezpečuje program Terminal [10]. Přijímaná data jsou také zobrazena na LCD displeji.



Obr. 4.3: Vývojová deska EvB se dvěma komunikačními moduly

Pro vývoj softwaru mikrokontroléru ATmega32 bylo použito vývojové prostředí AVR Studio 4.18 [11] a programovací jazyk C. Kompilaci kódu zprostředkoval kompilátor avr-gcc ze softwarového balíku WinAVR [12]. Výsledný program byl do ATmega32 nahrán pomocí USB rozhraní a programu AND-Load v3.2.

Program mikrokontroléru řídící desky využívá balíku knihoven avr-libc 1.6.7 [13]. Pro rozhraní UART byla převzata knihovna obslužných funkcí od Petera Fleuryho [14]. Od stejného autora pochází také knihovna pro obsluhu LCD displeje s řadičem HD44780 [15], která byla upravena pro dvouřádkový displej. Knihovna pro I²C rozhraní [16] může být implementována buď pro obsluhu hardwarově realizovaného I²C řadiče nebo pro softwarovou realizaci I²C. Knihovna byla proto modifikována, aby podporovala zároveň hardwarovou i softwarovou realizaci. Řídící mikrokontrolér používá totiž dvě I²C sběrnice z důvodů dříve zmíněných.

Tab. 4.2: I²C příkazy pro komunikační modul (převzato z [8])

Příkaz	ID	Přenášená data
I2C_CMD_RESET	0x00	1 B: nevyužitý
I2C_CMD_CHANNEL	0x31	1 B: kanál 0-7
I2C_CMD_SEND	0xA0	1 B – 65 B: délka paketu, jednotlivé bajty paketu (max. 64)
I2C_CMD_TXTTEST	0xA1	1 B: vypnout 0/zapnout 1

Komunikační modul reaguje na čtyři základní povely, které specifikuje tab. 4.2. Povely jsou zapisovány do komunikačního modulu na I²C adrese 0x50. Kromě resetování modulu je možné měnit kanál vysílání/příjmu, zadávat data k bezdrátovému přenosu nebo zapnout vysílání testovacího signálu.

Při čtení z I²C adresy komunikačního modulu je v prvním bajtu vrácena síla přijímaného signálu a v druhém bajtu poté velikost přijatého datového paketu. Při nenulové velikosti paketu následují jednotlivé bajty přijatých dat.

Během ověření funkčnosti modulů byl jedním komunikačním modulem opakovaně vyslán paket o velikosti 12 bajtů (dvanáct písmen v kódu ASCII tvořících slovo „Transmission“). Následně byl druhý modul dotazován na přijatá data. Ta odpovídala vyslané sekvenci. Síla přijímaného signálu byla díky malé vzdálenosti modulů natolik velká, že přenos dat probíhal úspěšně i bez pomoci čtvrtvlnných antén.

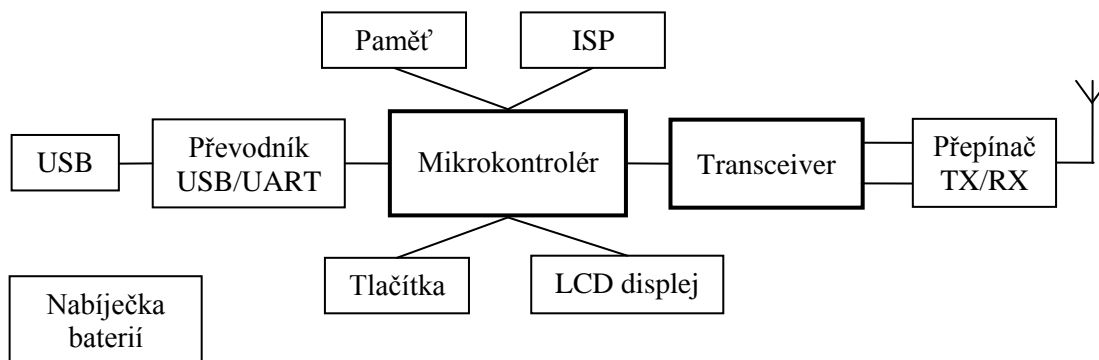
Provedení komunikačního modulu posloužilo jako inspirace pro návrh radiokomunikačního monitoru s obvodem CC1020. Jeden z komunikačních modulů byl dále využit jako vysílač náhodných i definovaných dat pro ověření funkcí radiokomunikačního modemu vyžadujících příjem vysokofrekvenčního modulovaného signálu.

5 NÁVRH RADIOKOMUNIKAČNÍHO MONITORU

Klíčovým prvkem radiokomunikačního monitoru je rádiový přijímač. Od jeho vlastností se odvíjí i schopnosti monitoru. Ze zadání práce vyplývá, že radiokomunikační monitor je založen na obvodu transceiveru CC1020. Další obvody radiokomunikačního monitoru tak pracují v součinnosti s transceiverem nebo rozšiřují monitor o další užitečné funkce zvyšující komfort ovládání uživatelem. Klíčová je možnost indikace síly přijatého signálu, kterou transceiver poskytuje. Díky ní může monitor vykreslit přehled síly signálů v mnoha kanálech a zobrazit rádiové spektrum s rozlišením daným mezifrekvenčním filtrem přijímače. Transceiver je také použit k FSK demulaci a k indikaci kmitočtové odchylky přijímaného signálu.

5.1 Součásti radiokomunikačního monitoru

Navrhovanou koncepci radiokomunikačního monitoru představuje obr. 5.1. Transceiver má kromě funkce přijímače zachovánu i možnost vysílání, přičemž anténa je mezi vysílacím výstupem a přijímacím vstupem přepínána vysokofrekvenčním přepínačem. Řídicím centrem radiokomunikačního monitoru je mikrokontrolér. Mikrokontrolér přijímá pokyny uživatele pomocí tlačítek. Na jejich základě pak nastavuje pracovní mód transceiveru. Provozní informace jsou přehledně zobrazeny na LCD displeji. Pro přenos přijatých dat z FSK demodulátoru k dalšímu zpracování je možné použít USB spojení.



Obr. 5.1: Blokové schéma radiokomunikačního monitoru

Možnosti monitoru jsou dále zvýšeny přidavnou pamětí. Uživatelský komfort také zvyšuje vestavěná nabíječka baterií. Pohodlí v případě vývoje monitoru zajišťuje integrace standardního ISP rozhraní, které umožňuje radiokomunikační monitor jednoduše naprogramovat nejnovější verzí firmwaru.

5.2 Transceiver

Obvodové zapojení obvodu CC1020 vychází z doporučení uvedeného v katalogovém listu výrobce [7]. Pro větší názornost jsou součástky použité pro zapojení transceiveru číslovány stejně, jak uvádí katalogový list (viz příloha A.3).

Pracovní kmitočet, od kterého se odvozují vnitřní taktovací signály transceiveru, je dán krystalem Q1. Hodnota 14,7456 MHz je doporučená a neměla by se měnit o více než 5 ppm. Případná nepřesnost krystalu může být korigována změnou zatěžovací kapacity. Pro tento účel slouží kondenzátor CT1, který nemusí být osazen.

Rezistor R1 je určen k přesnému nastavení klidového proudu. Jeho tolerance by neměla být větší než 1 %. Rezistory R2, R3 a kondenzátory C6 až C7 tvoří filtr smyčky fázového závěsu. Hodnoty součástek předurčují obvod pro použití symbolové rychlosti do 4,8 kBaud. Cívka L1 společně s kondenzátorem C1 přizpůsobují impedanci vysokofrekvenčního vstupu transceiveru k impedanci antény. Vysokofrekvenční výstup CC1020 je impedančně přizpůsoben prvky L2 a C3. Za vysílací výstup je zařazen filtr vyšších harmonických, který se skládá z cívky L70 a kondenzátorů C71 a C72. Obvod transceiveru je schopen pracovat, i když se vstupní a výstupní signálová cesta přímo spojí. Výhodnější je ovšem použít přepínač.

Pro funkci vysokofrekvenčního přepínače byl vybrán obvod AS169-73LF firmy Skyworks. Přepínač je vyroben pomocí HEMT technologie z galium arzenidu. Jeho parametry shrnuje tab. 5.1. Předností je malé zkreslení přepínače i při maximálním spínaném výkonu, který je 5 dBm. Přepínač je řízen pomocí výstupů transceiveru označených jako LNA_EN (Low Noise Amplifier Enabled) a PA_EN (Power Amplifier Enabled). Výstupy jsou původně určeny, jak název napovídá, k sepnutí externího předzesilovače v případě příjmu vysokofrekvenčního signálu anebo k aktivaci externího výkonového zesilovače při vysílání. Alternativní použití výstupů k řízení přepínače je ale také možné.

Tab. 5.1: Vlastnosti přepínače AS169-73LF (převzato z [17])

Parametr	Hodnota
Kmitočtový rozsah	300 kHz – 2,5 GHz
Vložný útlum	0,3 dB
Izolace	25 dB
Bod jednodécibellové komprese	30 dBm
Bod IP3	43 dBm
Řídící napětí	3 – 5 V

Konektor X3 (SMA konektor) spojuje radiokomunikační monitor s anténou. Anténa je reprezentována čtvrtvlnným dipólem s charakteristickou impedancí 50 Ω , který byl zmíněn v kapitole 4.2.

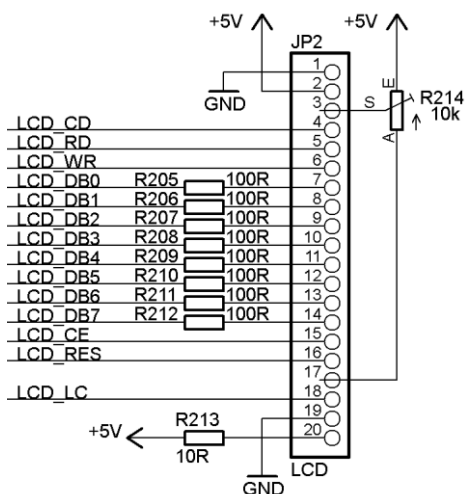
CC1020 vyžaduje oddělené napájecí napětí pro analogovou a digitální část obvodu. Doporučená hodnota napájecího napětí je 3,0 V. Vzhledem k úspoře napěťových stabilizátorů při návrhu radiokomunikačního monitoru bylo napájecí napětí zvoleno 3,3 V. Tato hodnota se pohybuje v povoleném rozmezí napájení transceiveru.

Napájecí napětí je pečlivě blokováno. Napájecí cesty jsou na desce plošných spojů (DPS) vedeny ke každému napájecímu pinu CC1020 odděleně pro zvýšení účinnosti blokování. Při návrhu DPS bylo přihlédnuto k referenčnímu návrhu výrobce označeného jako CC1020EMX [18] a k návrhu komunikačního modulu (viz kapitola 4).

Spojení transceiveru s mikrokontrolérem je provedeno pomocí sedmi vodičů. Vodiče PSEL, PCLK, PDI a PDO jsou kompatibilní s rozhraním SPI. Rozhraní SPI označuje tyto vodiče jako !SS, SCK, MOSI a MISO. Pro přenos demodulovaných dat nebo naopak dat k vysílání slouží dvojice vodičů DCLK a DIO. Posledním z propojovacích vodičů je signál LOCK, jehož funkce je programovatelná. Nejčastěji se používá k indikaci přítomnosti nosné vlny.

5.3 LCD displej

Uživatelskému rozhraní monitoru vévodí grafický LCD displej. Potřeba grafického displeje plyne ze snahy zobrazit přehledně měřená data, například sílu signálu jednotlivých kanálů v pásmu 868 MHz. Alfanaumerický displej by v tomto ohledu nevyhověl. Displej postačí monochromatický. Barevnost displeje by mohla pomoci při podrobném analyzování měřených dat v podobě užití barevných kurzorů. Není ovšem nezbytně nutná. Uživatelský komfort je více ovlivněn rozměry displeje a jeho rozlišením. Rozlišení displeje by mělo být nejméně 128x64 bodů, aby byly zobrazené grafy srozumitelné. Jako ideální se jeví displej s téměř dvojnásobnou šířkou, 240x64 bodů. Pro snížení výpočetních nároků na mikrokontrolér je výhodné použít displej s vlastním řadičem. Velmi zajímavý je typ řadiče T6963C [19]. Disponuje řadou funkcí jako je vlastní generátor znakové sady, možnost užití textového, grafického a kombinovaného režimu, automatická inkrementace adresy paměti při zápisu a jiné. Oproti méně pokročilým řadičům (např. KS0108B [20]) umožňuje také přímo změnit jen jeden bit v paměťovém slově. U jednodušších řadičů je nutné přečíst z paměti celé slovo, modifikovat jej a opět uložit do paměti. Příkladem displeje splňujícího dané požadavky je typ MG2406F od firmy Everbouquet [21].



Obr. 5.2: Schéma zapojení LCD displeje

Obr. 5.2 představuje obvodové zapojení displeje. Jak řadič, tak i celý modul displeje vyžadují napájecí napětí 5,0 V. Zdroj záporného napětí pro řízení kontrastu displeje je součástí modulu. Nastavení kontrastu je možné provést odporovým trimrem R214. Displej je řízen mikrokontrolérem pomocí pěti řídicích vodičů a osmibitové datové sběrnice.

Mikrokontrolér pracuje s nižším napájecím napětím než displej. Pro řídicí vodiče, po kterých probíhá komunikace jednosměrně od mikrokontroléru k displeji, není třeba provádět konverzi napěťových úrovní, protože výstupní napětí mikrokontroléru ve stavu logické 1 je položeno nad vstupní rozhodovací úrovní displeje. Na datové sběrnici je komunikace obousměrná. Pro sražení výstupního napětí displeje je do signálové cesty zařazen rezistor o hodnotě 100 Ω (R205 – R212).

5.4 Tlačítka

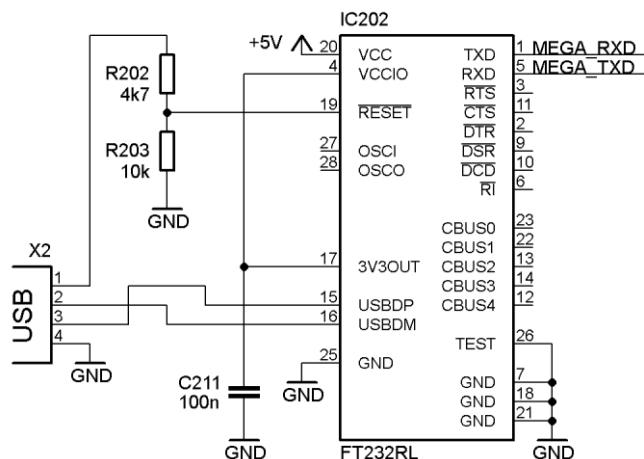
Vstupní rozhraní mezi radiokomunikačním monitorem a uživatelem zprostředkovávají čtyři tlačítka. Tlačítka „UP“ a „DOWN“ slouží pro pohyb v menu přístroje. Pro potvrzení volby slouží tlačítka „ENTER“ a pro návrat tlačítka „BACK“.

Tlačítka „BACK“ je realizováno pomocí spínače červené barvy. Zbývají tři tlačítka jsou realizována rotačním kódérem s axiálním spínacím kontaktem. Stisk představuje tlačítka „ENTER“. Rotace vlevo a vpravo nahrazuje tlačítka „UP“ a „DOWN“. Kódér má dvacet poloh na jednu obrátku. Rotace je signalizována postupnou změnou napěťové úrovně na pinech 1 a 3. Tlačítka jsou spojena s napájecím napětím pomocí pull-up rezistorů uvnitř mikrokontroléru. Zámkity tlačítek nejsou hardwarově ošetřeny. Veškerá obsluha tlačítek je přenechána firmwaru mikrokontroléru. Zapojení tlačítek lze nalézt v příloze A.2.

5.5 USB spojení

Radiokomunikační monitor je možné spojit s osobním počítačem pomocí USB portu. USB konektivita nabízí nepřeberné množství možností (např. zasílání provozních dat během vývojové fáze přístroje nebo přenos demodulovaného datového proudu z transceiveru do PC). Pro snížení nároků na mikrokontrolér se používá převodník USB/UART, kdy se veškerá implementace USB protokolu ponechá na převodníku a mikrokontrolér si vystačí s jednotkou sériové komunikace UART.

Osvědčeným typem převodníku je obvod FT232R firmy FTDI [22]. Obvod je napájen stejnosměrným napětím s hodnotou 5,0 V, přestože podporuje nižší napětí, které využívá většina ostatních digitálních obvodů radiokomunikačního monitoru. Při napětí 5,0 V není potřeba obvod FT232R vybavovat externím oscilátorem, čímž dojde k ušetření počtu nutných součástek.



Obr. 5.3: Schéma zapojení USB/UART převodníku

Pro spojení s mikrokontrolérem je využit UART vysílač (TXD) a přijímač (RXD), viz obr. 5.3. Datové spojení probíhá bez hardwarového handshakingu. Napěťové úrovně jsou s mikrokontrolérem kompatibilní díky možnosti napájet vstupně/výstupní piny FT232R pomocí vnitřního stabilizátoru napětí 3,3 V. V případě, že není USB kabel připojen, je obvod FT232R držen v resetu pro minimalizaci spotřeby. Jako provedení USB konektoru je pro svoji robustnost zvoleno USB B.

Tab. 5.2: Parametry sériové komunikace

Parametr	Hodnota
Symbolová rychlost	9600 Baud
Počet datových bitů	8
Parita	žádná
Počet stop bitů	1
Handshaking	žádný

Na straně počítače je možné zadávat pokyny a číst přijatá data z virtuálního sériového portu programem Terminal. Příslušné ovladače pro systém Windows jsou dostupné na přiloženém DVD. Ovladače odpovídají identifikačním hodnotám VID (Vendor ID) a PID (Product ID) příslušného převodníku použitého v radiokomunikačním monitoru. Nastavení sériové komunikace shrnuje tab. 5.2.

5.6 Externí paměť Flash

Deska radiokomunikačního monitoru je osazena přídavnou pamětí Flash o velikosti 8 Mbit. Záměrem je dobrá hardwarová výbava desky, která může být s výhodou využita při následné tvorbě firmwaru. Mikrokontroléry mají obecně malou interní paměť, kterou lze použít pro uložení dat přetrvávajících i po odpojení napájecího napětí (paměť EEPROM). Množství měřených dat nebo dat přijatých vysílačem může být značné. V případě, že není možné spojit monitor s osobním počítačem, lze předpokládat potřebu ukládání informací do externí paměti.

Paměť je realizována obvodem AT45DB081D od firmy Atmel [23]. Napájecí napětí je zvoleno 3,3 V. V okamžiku mazání paměti může dojít ke skokovému zvýšení spotřeby, proto je napájecí napětí blokováno kondenzátorem C204 s hodnotou 4,7 μ F.

Obvod paměti je spojen s mikrokontrolérem pomocí čtyř vodičů: „Chip Select“ (!CS), „Serial Input“ (SI), „Serial Output“ (SO) a „Serial Clock“ (SCK). Komunikace je kompatibilní s SPI. Tři vodiče rozhraní SPI jsou na desce plošných spojů sdíleny mezi transceiverem CC1020, externí paměti a programováním mikrokontroléru ISP (viz příloha A.2). Pro bezkonfliktní činnost je nutné, aby v každém okamžiku vysílal na sběrnici jen jeden obvod a ostatní obvody měly své výstupy ve stavu vysoké impedance. Při komunikaci s obvody CC1020 a AT45DB081D řídí činnost sběrnice mikrokontrolér. Vystupuje jako tzv. „Master“. Mikrokontrolér generuje sériový hodinový signál SCK a zařízení, které si vybral ke komunikaci (tzv. „Slave“), informuje úrovní logické 0 na příslušném pinu (PSEL pro CC1020 nebo !CS pro AT45DB081D). Na pinech PSEL a !CS má být klidová hodnota odpovídající logické 1.

Při programování mikrokontroléru je Masterem na SPI sběrnici programátor spojený s deskou radiokomunikačního monitoru přes konektor SV1. Programátor vybírá ke komunikaci mikrokontrolér pomocí úrovně logické 0 na pinu RESET. V okamžiku programování, kdy mikrokontrolér vystupuje jako Slave, jsou jeho vstupně/výstupní piny nastaveny jako vstupní a není tak dodržen požadavek úrovně logické 1 na vstupech PSEL a !CS a může dojít ke konfliktu na SPI sběrnici. Piny PSEL a !CS tak musí být spojeny pomocí pull-up rezistorů s napájecím napětím. Výrobce obvodu CC1020 již na tento fakt myslel a obvod má pull-up rezistor integrován na čipu. Pro paměť je nutné použít rezistor R204.

5.7 Mikrokontrolér

Podstatným prvkem radiokomunikačního monitoru je kromě transceiveru CC1020 především zvolený mikrokontrolér. Pro součinnost s ostatními obvody je požadováno, aby mikrokontrolér podporoval rozhraní SPI a UART, reagoval na externí přerušení, obsahoval A/D převodník a nejméně dva čítače/časovače a umožňoval programování ISP. Zadané požadavky splňuje obvod ATmega32L od výrobce Atmel [24]. Jedná se o osmibitový mikrokontrolér s dostatečnou programovou pamětí, která přijde vhod při tvorbě grafického rozhraní (viz tab. 5.3).

Tab. 5.3: Přehled vybraných vlastností mikrokontroléru ATmega32L

Parametr	Hodnota
Kmitočet hodinového signálu	0 – 8 MHz
Velikost programové paměti	32 kB
Velikost paměti SRAM	2 kB
Velikost paměti EEPROM	1 kB
Počet vstupně/výstupních pinů	32
Napájecí napětí	2,7 – 5,5 V

Napájecí napětí je pro snížení spotřeby a kompatibility s dalšími digitálními obvody zvoleno 3,3 V. Maximální taktovací kmitočet obvodu je 8 MHz. Hodnota kmitočtu hodinového signálu byla zvolena nižší, 7,3728 MHz. Důvodem je snazší odvozování standardních symbolových rychlostí pro sériovou komunikaci. Kmitočet je generován externím krystalem Q2, protože interní RC oscilátor nevyhovuje požadované přesnosti.

Vytíženost vstupně/výstupních pinů popisuje tab. 5.4. Je patrné, že z 32 pinů zbývají jen dva volné. Oba piny jsou vyvedeny na konektor JP3 pro případné budoucí využití. Významnou úsporu pinů přineslo sdílení rozhraní SPI, které je uvedeno jako samostatná položka. Hodnoty pinů obsazených transceiverem a paměť jsou tak o počet vodičů SPI nižší.

Tab. 5.4: Obsazenost vstupně/výstupních pinů mikrokontroléru ATmega32L

Periferie	Počet pinů
LCD displej	14
Tlačítka	4
SPI	3
Transceiver CC1020	4
Paměť Flash	1
Převodník USB/UART	2
Napájecí obvody (A/D převod)	2
CELKEM	30

5.8 Napájecí obvody

Volba napájecích napětí jednotlivých integrovaných obvodů radiokomunikačního monitoru byla vedena snahou co nejvíce snížit spotřebu zařízení při zachování kompatibility napěťových úrovní mezi jednotlivými obvody a zároveň minimalizovat počet potřebných součástek. Radiokomunikační monitor je možné provozovat i bez externího zdroje napětí. Napájení v tomto případě zajišťuje sada baterií. Nízká spotřeba zařízení je předpokladem pro praktickou využitelnost napájení z baterií.

5.8.1 Tvorba napájecích napětí

Napájení digitálních obvodů lze měnit v rozmezí 2,7 V až 3,6 V, aby odpovídalo napájecímu rozsahu všech digitálních obvodů s výjimkou napájení displeje a převodníku USB/UART, které je 5,0 V. Přestože by bylo výhodné zvolit napájení 3,0 V a plně vyhovět požadavkům katalogového listu transceiveru CC1020, bylo napájecí napětí stanoveno na 3,3 V. Důvodem je použití ISP programátoru BiProg [25], který spolupracuje s logikou 3,3 V.

Stabilní stejnosměrné napájecí napětí je vytvořeno pomocí napěťových stabilizátorů. Pro jejich dimenzování je nutné znát přibližný odhad proudového odběru zařízení. Z tab. 5.5 plyne, že v zapojení vyhoví stabilizátory na 3,3V typu LE33CD [26] s maximálním výstupním proudem 100 mA. Jeden stabilizátor je použit pro digitální

obvody (IC104) a jeden pro oddělené napájení analogové části transceiveru (IC105).

Tab. 5.5: Teoretický maximální proudový odběr vybraných obvodů radiokomunikačního monitoru

Obvod	Napájecí napětí [V]	Max. proudový odběr [mA]
LCD displej	5,0	17
Převodník USB/UART	5,0	15
Transceiver CC1020	3,3	25
Paměť Flash	3,3	17
Mikrokontrolér ATmega32L	3,3	7
CELKEM		81

Zdrojem pro IC104 i IC105 je stabilizátor na 5,0 V typu LF50CDT [27]. Maximální výstupní proud obvodu LF50CDT je 500 mA. Takto dimenzovaný obvod byl vybrán pro vytvoření určité proudové rezervy. Všechny tři stabilizátory jsou zapojeny dle doporučení výrobce s hodnotou kondenzátoru 100 nF na vstupu a kondenzátorem 2,2 μ F na výstupu (viz příloha A.1). Vlastností stabilizátorů je tzv. „low drop“. Jedná se o malý úbytek vstupního napětí vůči napětí výstupnímu. Například pro dané výstupní napětí 5,0 V postačí vstupní napětí stabilizátoru jen 5,2 V (typická hodnota při výstupním proudu do 200 mA).

Pro bateriové napájení byly zvoleny dobíjecí články NIMH velikosti AA. Nominální napětí jednoho článku je 1,2 V. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 1,0 V (zcela vybitý) až po 1,4 V (plně nabitý). Pro dosažení dostatečné úrovně napájecího napětí i v případě částečně vybitých článků je potřeba celkem 6 kusů baterií. Nominální napájecí napětí radiokomunikačního monitoru pomocí baterií je tak 7,2 V.

Kapacita jednoho článku je 1300 mAh. Odhadovanou minimální výdrž zařízení t_{min} při bateriovém napájení udává vztah

$$t_{min} = \frac{C}{I_{max}} = \frac{1300 \text{ mAh}}{81 \text{ mA}} \doteq \underline{16 \text{ h}}, \quad (5.1)$$

kde C je kapacita článku a I_{max} je maximální proudový odběr.

5.8.2 Nabíječka baterií

Prvkem rozšiřujícím výbavu radiokomunikačního monitoru je nabíječka baterií. Při nabíjecím procesu jsou baterie protékány proudem I_{ch} odpovídající desetině kapacity článku, čili 130 mA. Doba nabíjení t_{ch} by měla odpovídat vztahu

$$I_{ch} \cdot t_{ch} = 1,2 \cdot C. \quad (5.2)$$

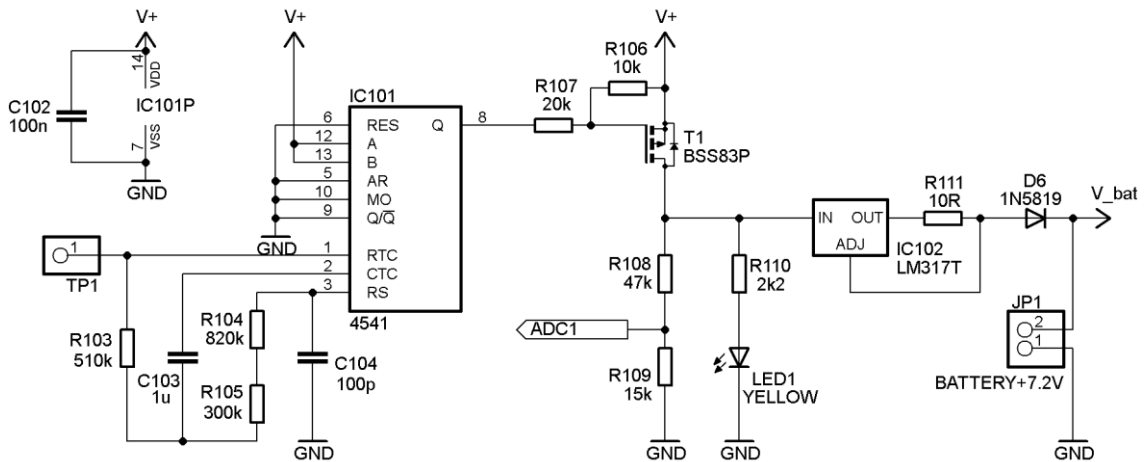
Ze vztahu vyplývá doba nabíjení 12 hodin.

Obvodový návrh nabíječky baterií představuje obr. 5.4. Při návrhu bylo čerpáno z [28] a [29]. Nabíjecí proud obstarává integrovaný obvod LM317T [30] zapojený jako

zdroj konstantního proudu. Velikost proudu je určena hodnotou rezistoru R111:

$$R = \frac{U_{\text{ref}}}{I_{\text{ch}}} = \frac{1,25 \text{ V}}{130 \text{ mA}} \doteq \underline{10 \Omega}, \quad (5.3)$$

kde U_{ref} je vnitřní referenční napětí obvodu LM317T. Při nabíjení by mělo být napětí na NIMH článku přibližně 1,4 V. Šest baterií společně s napětovým úbytkem 3 V na obvodu LM317T (viz [30]) dává požadavek na vstupní napětí zdroje proudu o hodnotě větší než 11,4 V. Od této hodnoty se odvíjí napájecí úroveň radiokomunikačního monitoru externím napájením, která je 12 V.



Obr. 5.4: Schéma zapojení nabíječky baterií

Vstupní napětí zdroje proudu je spínáno unipolárním tranzistorem BSS 83 P [31] s maximálním spínaným proudem 330 mA, napětím 60 V a výkonovou zatížitelností 360 mW. Úbytek napětí na tranzistoru v sepnutém stavu je dán rovnicí

$$\Delta U = I_{\text{ch}} \cdot r_{\text{DS}} = 130 \text{ mA} \cdot 2 \Omega = \underline{260 \text{ mV}}, \quad (5.4)$$

kde r_{DS} je odpor tranzistoru v sepnutém stavu. Výkonovou zatížitelnost P tranzistoru udává vztah

$$P = I_{\text{ch}} \cdot \Delta U = 130 \text{ mA} \cdot 260 \text{ mV} = \underline{33,8 \text{ mW}} < 360 \text{ mW}. \quad (5.5)$$

Z výše uvedených údajů je patrné, že tranzistor vyhovuje ve všech na něj kladených parametrech.

Spínání řídí programovatelný časovač CD4541BC [32], který má na výstupu nulové nebo napájecí napětí. Při nulovém výstupu je děličem složeným z rezistorů R106 a R107 vytvořeno napětí mezi hradlem a elektrodou Source tranzistoru $U_{\text{GS}} = -4 \text{ V}$. Tato hodnota postačuje k plnému otevření tranzistoru.

Programovatelný časovač je zapojením svých vstupů nastaven tak, aby po připojení napájecího napětí držel na výstupu Q nulovou úroveň po definované době T_{out} . Poté se výstup překlápí na úroveň napájecího napětí. Odměřování času je realizováno pomocí RC oscilátoru (R103, C103) a interní děličky hodinového signálu. Kmitočet oscilátoru f_{osc} lze na základě známé doby T_{out} spočítat jako

$$f_{osc} = \frac{2^{15}}{T_{out}} = \frac{2^{15}}{12 \text{ h}} = \frac{2^{15}}{43200 \text{ s}} \doteq \underline{0,759 \text{ Hz}}. \quad (5.6)$$

Kmitočet RC článku je dán vztahem

$$f_{osc} = \frac{1}{2 \cdot R_{tc} \cdot C_{tc}}. \quad (5.7)$$

převzatým z katalogového listu časovače [32]. Po úpravě vztahu a volbě $C_{tc} = 1 \mu\text{F}$ lze psát

$$R_{tc} = \frac{1}{2,3 \cdot f_{osc} \cdot 2^{15}} = \frac{1}{2,3 \cdot 0,759 \cdot 2^{15}} = \underline{573 \text{ k}\Omega}. \quad (5.8)$$

Návrhový vztah pro volbu hodnot R a C oscilátoru není určen pro kmitočty menší než 1 kHz. Na desku byl proto umístěn měřicí bod TP1 a skutečná hodnota oscilačního kmitočtu byla změřena a doladěna hodnotou odporu R103 (viz tab. 5.6).

Tab. 5.6: Doladění oscilačního kmitočtu RC článku časovače CD4541BC

Iterace	R103 [kΩ]	C103 [μF]	Změřený f_{osc} [Hz]	Odhad T_{out} [h]
1	560	1	0,680	13,4
2	510	1	0,746	12,2

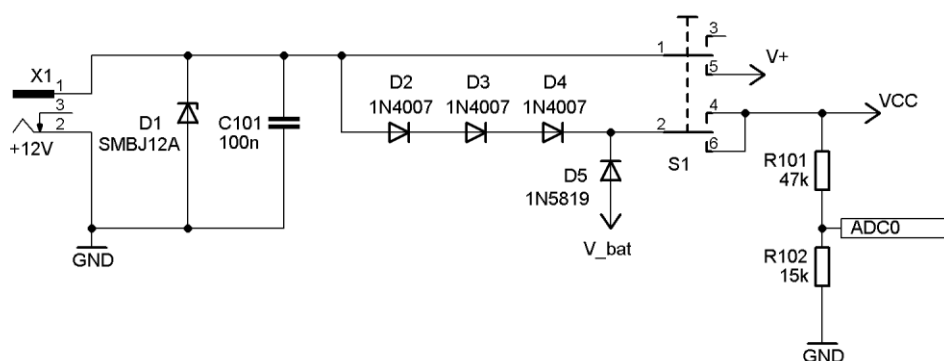
Skutečná hodnota T_{out} je při $R103 = 510 \text{ k}\Omega$ necelých 12 hodin. Probíhající nabíjení indikuje žlutá dioda LED1.

5.8.3 Vstup externího napájecího napětí

Obvodové řešení pro vstup externího stejnosměrného napájecího napětí je na obr. 5.5. Za napájecím konektorem X1 je umístěn transil chránící vstup před napěťovými špičkami a přepólováním. Dioda D5 zabezpečuje automatické přepínání napájení z baterií nebo z externího zdroje. Přepínač S1 umístěný na ovládacím panelu radiokomunikačního monitoru má tři volby. Poloha 0 znamená vypnuté napájení monitoru. V poloze I je radiokomunikační monitor zapnut. V poloze II je monitor zapnut a zároveň dochází k nabíjení baterií. Diody D2 až D4 a dioda D6 zabraňují samovolnému spuštění obvodu nabíječky pomocí napětí samotných baterií.

Zatímco obvod nabíječky vyžaduje plné napájecí napětí 12 V, stabilizátoru na 5,0 V LF50CDT postačuje napětí mnohem nižší. Pro snížení výkonových ztrát stabilizátoru je jeho vstupní napětí sníženo sérií diod D2 až D4. Rozdíl je větší než 2,0 V. Nižší výkonová ztráta stabilizátoru LF50CDT vede k možnosti použít kompaktní

pouzdro DPAK s vyšším tepelným odporem a jako chladič využít část desky plošných spojů. Úbytek napětí na diodách by mohl být zvětšen zvýšením počtu diod v sérii a tím ještě více ubrat na výkonové ztrátě stabilizátoru. Současný stav ovšem umožňuje použít místo NIMH článků pro napájení i běžné alkalické baterie s nominální hodnotou 1,5 V a stále zachovat možnost automatického přepínání na externí napájení. Alkalické baterie nesmí být dobíjeny integrovanou nabíječkou, protože hrozí nebezpečí jejich zničení. Alternativně může také radiokomunikační monitor fungovat s externím napájecím napětím 9,0 V. V takovém případě je opět nemožné využívat obvod nabíječky baterií. Tentokrát z důvodu příliš nízkého napájecího napětí.



Obr. 5.5: Schéma zapojení vstupu externího napájecího napětí

Rezistory R101, R102 a R108, R109 tvoří děliče napětí. Napětí jsou přiváděna na dva kanály A/D převodníku integrovaném v mikrokontroléru. Výstupní napětí děličů je čtvrtinové oproti vstupnímu, aby se pohybovalo v dynamickém rozsahu převodníku (0 až 3,3 V). Digitalizovaná napětí slouží k detekci vybitých baterií a k rozpoznání aktuálního stavu nabíječky baterií.

5.9 Konstrukce radiokomunikačního monitoru

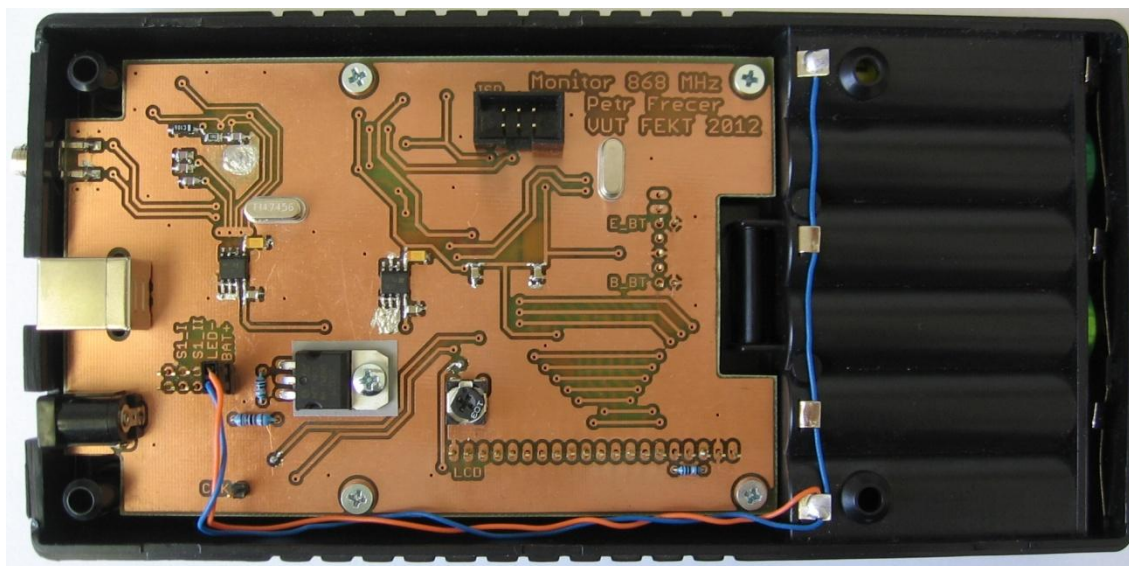
Navržené obvodové zapojení radiokomunikačního monitoru (viz přílohy A.1, A.2, A.3) bylo realizováno na oboustranné desce plošných spojů. Rozměry DPS 125 x 80 mm jsou určeny vnitřními rozměry boxu, do kterého je deska vestavěna (přílohy A.4 a A.5).

Většina součástek byla použita v provedení SMD pro úsporu místa a omezení případných parazitních vlastností (viz příloha A.8 Seznam součástek). Indukčnosti L1, L2, L22 a L70 byly realizovány pomocí SMD cívek od firmy Coilcraft [33]. Cívku L21 tvoří feritová perla s třemi závity. Nulový potenciál je vytvořen tzv. „rozlitou zemní vrstvou“. Výsledek realizace desky plošných spojů dokumentují přílohy A.6 a A.7.

Rozmístění obvodů na DPS je zásadně ovlivněno snahou umístit všechna externí rozhraní (napájení, USB, SMA konektor antény) po levém boku monitoru. Propojení s prvky umístěnými na čelním panelu radiokomunikačního monitoru je provedeno sérií pinových lišt, na které jsou pomocí konektorů připojeny propojovací vodiče. Rozmístění pinů je optimalizováno tak, aby byla délka propojovacích vodičů co nejmenší. Displej je připojen pomocí dvaceti pinů, tlačítka a rotační kodér pak pomocí dvou- a třívodičových propojení. Dvoupólový konektor je spojen s DPS šesti vodiči,

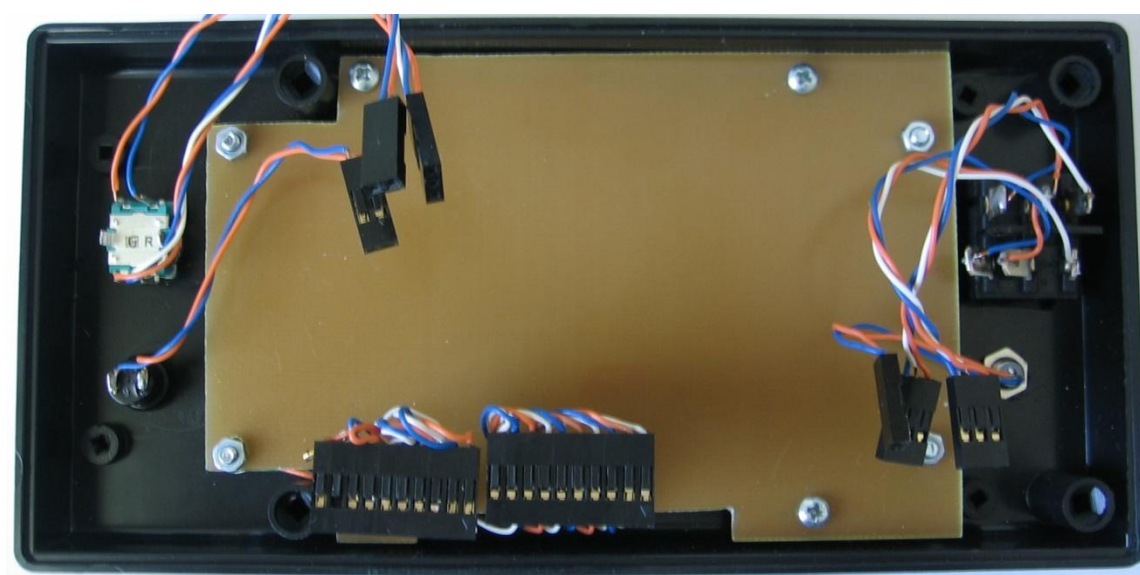
signalizační LED a blok baterií po dvou vodičích.

Za velkou výhodou radiokomunikačního monitoru lze považovat jeho snadnou přenositelnost. Obvodový návrh předpokládá bateriové napájení a tak byla pro realizaci monitoru vybrána plastová konstrukční krabička KM 103 [34] rozměrů 41 x 93 x 190 mm, která má vestavěn držák na šest baterií velikosti AA.



Obr. 5.6: Uchycení DPS v zadním panelu radiokomunikačního monitoru

Krabička se skládá z předního a zadního dílu a krytu bateriového prostoru. V levém boku krabičky byly vyříznuty otvory pro příslušné konektory. DPS je k zadnímu dílu krabičky přichycena čtyřmi zářeznými šrouby (viz obr. 5.6). Deska je navíc vymezena v prostoru pomocí vlepených plastových distančních sloupků délky 5 mm.



Obr. 5.7: Pohled z vnitřní strany na čelní panel radiokomunikačního monitoru

Pro modul LCD displeje byl v čelním panelu vyříznut otvor odpovídající velikosti. Modul není možné přímo uchytit k panelu, protože rozmístění bodů pro zářezné šrouby v panelu je odlišné od montážních bodů displeje. Řešení problému za použití kuprexitové desky ukazuje obr. 5.7.



Obr. 5.8: Levý bok monitoru s řadou konektorů a připojenou anténou

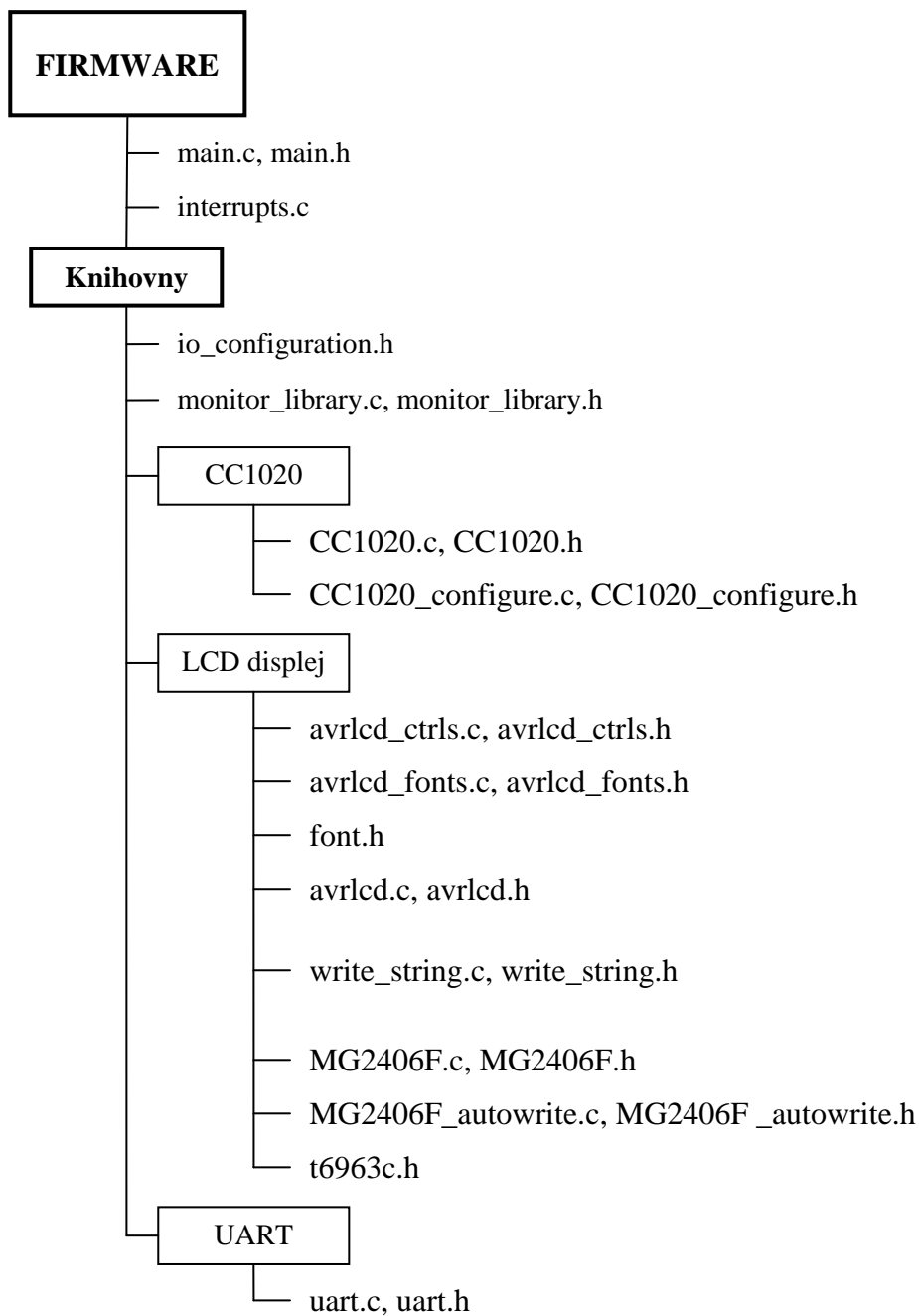
Čelní panel je osazen tlačítkem a rotačním kodérem na pravé straně a přepínačem napájení a LED diodou informující o nabíjení na levé straně. Všechny prvky jsou v provedení „do panelu“. Pro usnadnění obsluhy přístroje uživatelem je přístroj vybaven popiskami (viz obr. 5.8). Plně sestavený radiokomunikační monitor představuje obr. 5.9.



Obr. 5.9: Čelní pohled na zhotovený radiokomunikační monitor

6 FIRMWARE

Řídicí program, který je vykonáván mikrokontrolérem, byl vytvořen v programovacím jazyce C. Pro vývoj programu bylo využito programovací prostředí AVR Studio 4.18 [11] společně s kompilátorem avr-gcc a balíkem funkcí avr-libc 1.67 [13]. Uložení programu do paměti mikrokontroléru umožnil programátor BiProg [25] přes rozhraní ISP. Zdrojové soubory firmwaru popisuje obr. 6.1.



Obr. 6.1: Zdrojové soubory programu mikrokontroléru

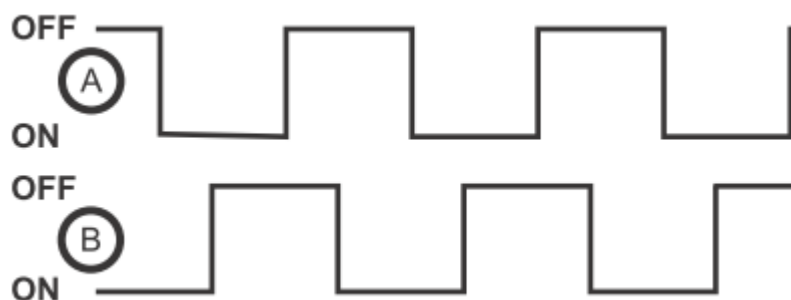
Soubor `main.c` obsahuje hlavní část programu. Obsluha přerušení je prováděna v části `interrupts.c`. Ostatní zdrojové soubory lze označit jako knihovny funkcí. `io_configuration.h` představuje definici vstupně/výstupních pinů dle připojených obvodů. Zdrojový soubor `monitor_library.c` společně s příslušným hlavičkovým souborem definuje většinu měřicích funkcí radiokomunikačního monitoru jako je zobrazení spektra signálů v pásmu 868 MHz, určení kmitočtové odchylky AFC nebo měření napětí digitalizovaného A/D převodníkem. Knihovna obsahuje také některé inicializační funkce a vysokoúrovňové zpracování komunikace přes USB. Zbylé knihovny slouží buď ke spolupráci s transceiverem CC1020, grafickým LCD displejem nebo spravují jednotku sériové komunikace UART.

6.1 Obsluha stisknutí tlačítka

Řídící program musí reagovat na pokyny uživatele, který ovládá radiokomunikační monitor tlačítky na hlavním panelu. Při stisku tlačítek dochází k nežádoucím zákmitům, které je třeba v programu ignorovat. Jinak by program reagoval na několikanásobné stisknutí tlačítka, přestože bylo tlačítko uživatelem stisknuto jen jednou.

Program řeší odstranění zákmitu tlačítka periodickým vzorkováním vstupu. Vstupními logickými hodnotami je plněn posuvný registr. Za stisk tlačítka pak lze považovat situaci, kdy je nejstarší hodnota v registru rovna logické 1 a všechny nové hodnoty jsou logická 0 (sestupná hrana bez zákmitů).

Rozhodnutí o otočení rotačním kodérem je poněkud odlišné od detekce stisku tlačítka. Kodér má dva vnitřní spínače A a B, které se spínají (stav ON) a rozspínají (stav OFF) při rotaci osy kodéru (viz obr. 6.2). Pořadí spínání A a B určuje směr rotace. V klidu jsou oba spínače rozepnuty. Při rotaci doleva sepne nejdříve spínač A a se zpožděním pak spínač B. Při rotaci vpravo je tomu naopak.



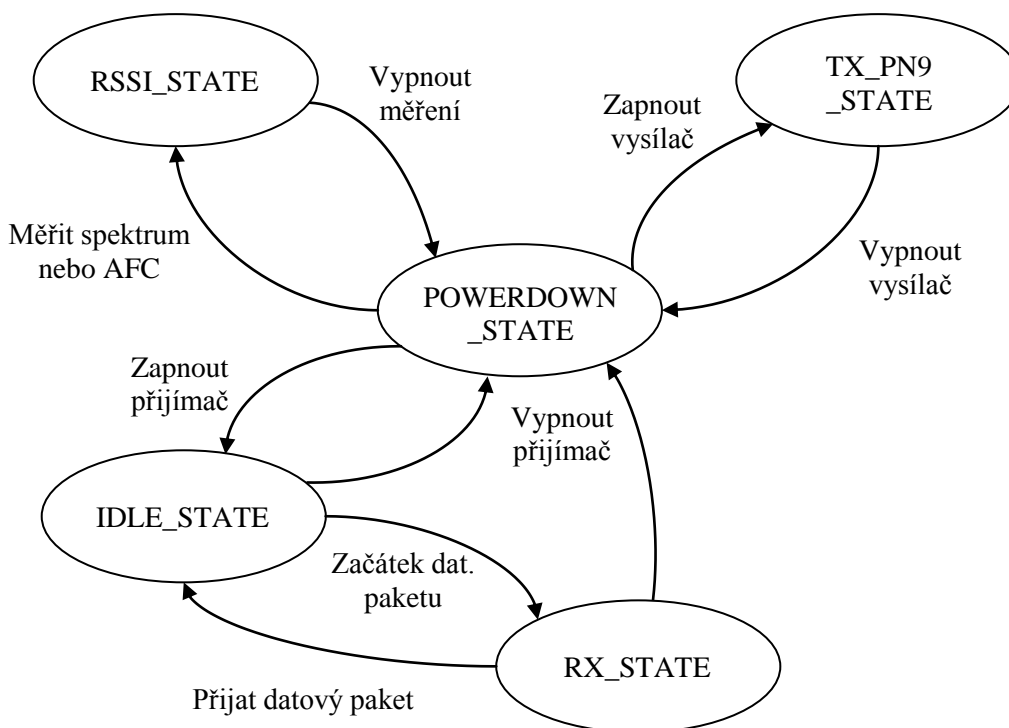
Obr. 6.2: Změna stavu spínačů rotačního kodéru při točení voličem vpravo (převzato z [35])

Směr otáčení je v programu řešen detekcí sestupné hrany na výstupu A a následným rozhodnutím dle logické hodnoty na výstupu B. Popsaný kód je vykonáván při obsluze přerušení přetečení čítače/časovače 2. Perioda přetečení je volena 2,2 ms s ohledem na maximální délku zákmitů 5 ms, kterou udává výrobce rotačního kodéru. Aktuálně stisknuté tlačítko je reprezentováno proměnnou `button`. Relevantní reakce monitoru na stisk tlačítka je řešena v hlavní části programu ve funkci `main()`.

6.2 Řízení transceiveru CC1020

Činnost integrovaného obvodu CC1020 je řízena pomocí osmibitových konfiguračních registrů. Po zapnutí napájení obvodu je nutné celkem 33 registrů naprogramovat pomocí sériového rozhraní SPI, aby obvod vykonával požadovanou funkci. Postupně jsou odesílány šestnáctibitové pakety, přičemž každý paket obsahuje adresu jednoho konfiguračního registru a jeho obsah. Předmětem programování je například nastavení pracovního kmitočtu v pásmu 868 MHz a parametrů FSK demodulátoru. Hodnoty registrů může mikrokontrolér kdykoli měnit a tak efektivně řídit činnost transceiveru. Vytvoření konfiguračních dat usnadňuje aplikace SmartRF Studio [36] poskytovaná výrobcem transceiveru.

CC1020 podporuje programování s taktovacím kmitočtem až 10 MHz. Rychlost programování je tak omezena ze strany mikrokontroléru na 3,6864 MHz. To je maximální pracovní kmitočet pro SPI jednotku a odpovídá polovině kmitočtu hodinového signálu mikrokontroléru.



Obr. 6.3: Schéma stavového automatu řízení transceiveru CC1020

Při tvorbě firmwaru byl využit zdrojový kód z aplikačních poznámek AN023 [37] a AN025 [38], který je psán v jazyce C a určen pro mikrokontrolér typu PIC16F876 společnosti Microchip [39]. Kód byl přepracován a použit jako základ souborů firmwaru `CC1020.c`, `CC1020_configure.c` a odpovídajících hlavičkových souborů. Název souboru `CC1020_configure.c` napovídá, že obsahuje především přehled nastavení konfiguračních registrů transceiveru. Soubor `CC1020.c` implementuje kromě základů komunikace s transceiverem také funkce pro přechody mezi jednotlivými funkčními stavy obvodu. Ty jsou vyjádřeny stavovým automatem (viz obr. 6.3).

Pokud není požadavek na provoz transceiveru, setrvává obvod CC1020 v úsporném režimu (`POWERDOWN_STATE`), při kterém má minimální spotřebu. Stav `TX_PN9_STATE` odpovídá vysílání vysokofrekvenčního signálu modulovaného pseudonáhodnou posloupností dat. `RSSI_STATE` slouží pro potřeby měření, kdy je zapnut přijímač, ale nejsou zpracovávána demodulovaná data. Pro příjem dat přenášených bezdrátově slouží `IDLE_STATE` a `RX_STATE`. Přijímač v posloupnosti přijatých dat hledá začátek datového paketu (`IDLE_STATE`). Po jeho nalezení přejde do `RX_STATE`, datový paket přijme a uloží do paměti.

Demodulovaná data přijímá mikrokontrolér pomocí dvou vodičového rozhraní DCLK a DIO. Při sestupné hraně hodinového signálu DCLK je vyvoláno přerušení INT2 a v jeho obsluze je čtena logická úroveň na pinu DIO představující jeden bit demodulované sekvence dat. Přijatá data jsou při přerušení vyhodnocena a je rozhodnuto o případné změně stavu z `IDLE_STATE` na `RX_STATE` nebo naopak. Požadavek na změnu stavu může také vzejít z toho, když uživatel zvolí jiný pracovní režim v menu monitoru. Samotná změna stavu stavového automatu je provedena v hlavní smyčce programu.

6.3 Ovladače grafického LCD displeje

Funkce pro vykreslování textu a grafiky na displeji jsou rozděleny do hierarchické struktury zdrojových souborů. Většina kódu pochází z bakalářské práce Knihovna grafických prvků pro mikrokontrolery Atmel AVR a grafické displeje od Miroslava Skopala [40]. Knihovna byla dle potřeby upravena. Doplnující funkce a inspiraci poskytl také navazující projekt Doplnění knihovny pro grafický displej autorů Lukáše Drbohlava a Petra Frecera [41].

Nejnižší vrstvu ovladače tvoří zdrojové soubory `MG2406F.c` a `MG2406F_autowrite.c`, které implementují mazání displeje, výpis textu pomocí generátoru znakové sady řadiče a vykreslení libovolného bodu na displeji funkcí `pixel()`.

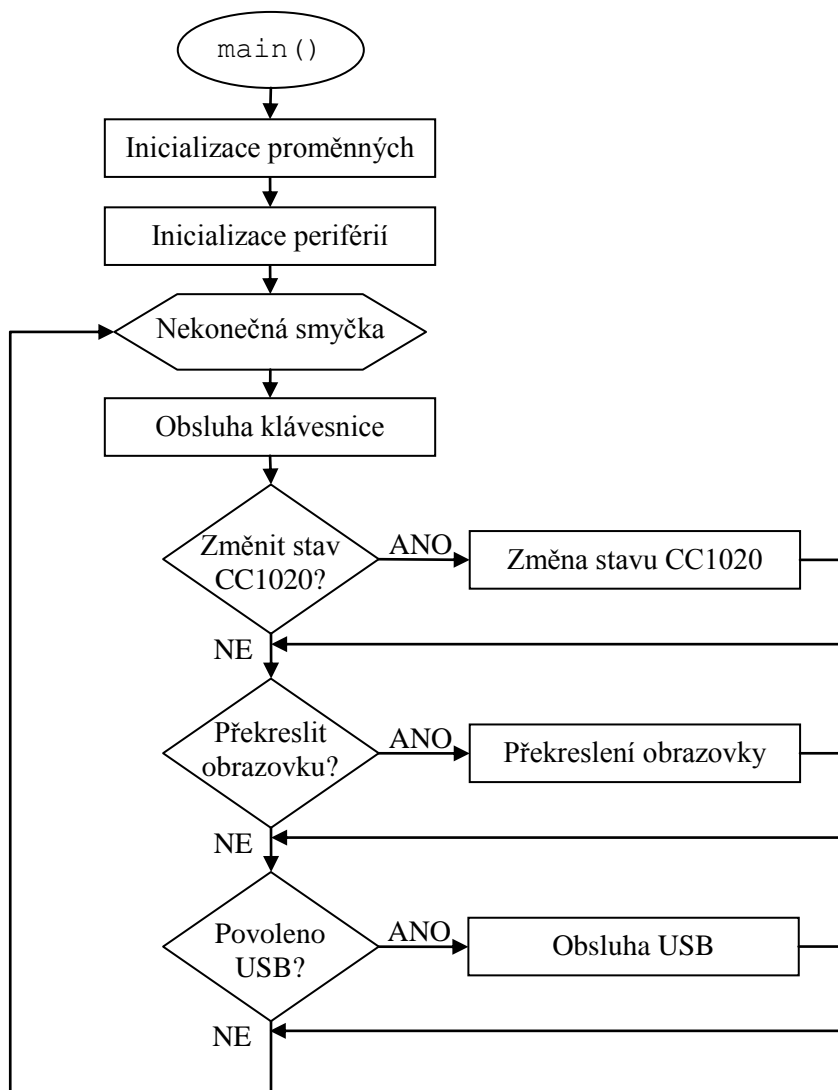
Kreslení geometrických tvarů a dále pak nabídek s uživatelsky definovaným fontem zprostředkovávají vyšší vrstvy řadiče tvořené soubory `avr_lcd.c`, `avr_lcd_fonts.c`, `avr_lcd_ctrls.c`.

6.4 Hlavní část programu

Základní strukturu firmwaru tvoří funkce `main()` ze zdrojového souboru `main.c`. Po zapnutí napájení mikrokontroléru se provede inicializace programových proměnných a nastavení periférií. Program po té přejde do nekonečné smyčky. Běh programu vystoupí z nekonečné smyčky jen při obsluze přerušení. Přehled o hlavní části programu dává vývojový diagram (obr. 6.4).

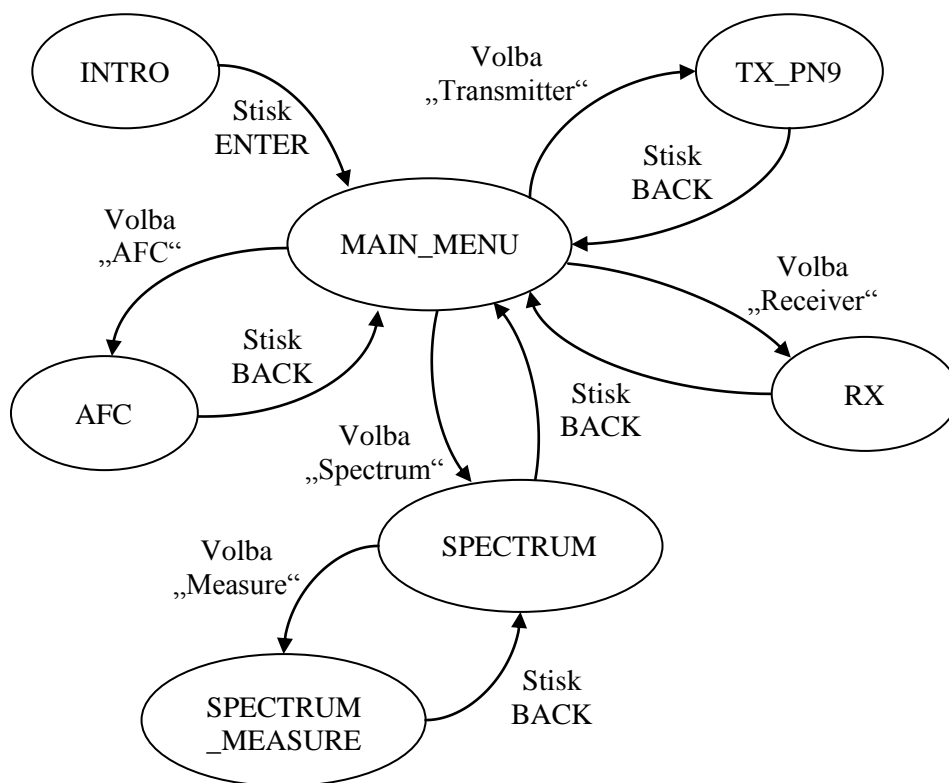
V části „Obsluha klávesnice“ se vytváří reakce na pokyny uživatele. Rozhoduje se o pohybu v nabídkách menu, o aktuálním stavu transceiveru, popřípadě se nastavují stavové proměnné, které se vážou k následující činnosti monitoru. Chod radiokomunikačního monitoru je reprezentován stavovým automatem. Graficky je tento

automat popsán na obr. 6.5. Přechody mezi jednotlivými stavy automatu jsou prováděny obsluhou klávesnice.



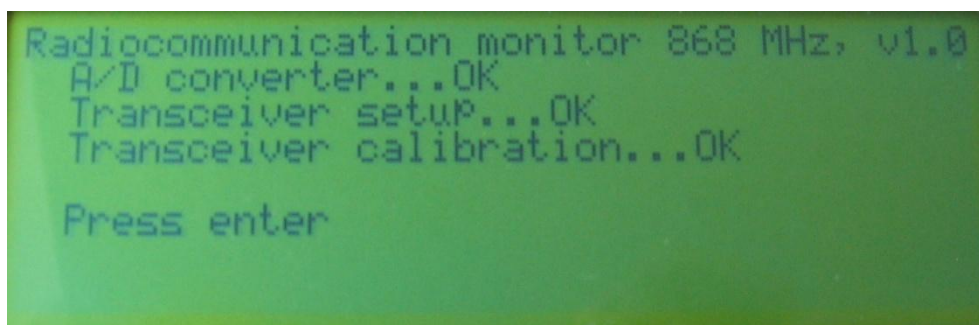
Obr. 6.4: Vývojový diagram funkce main()

O aktuálně zvoleném stavu monitoru je uživatel informován LCD displejem. Ten se překresluje na vyžádání. Většinou jako reakce na vstup od uživatele. Obsluha sériové komunikace přes USB je prováděna jen s povolením. To je uděleno v režimu RX. V ostatních stavech není USB komunikace využita.



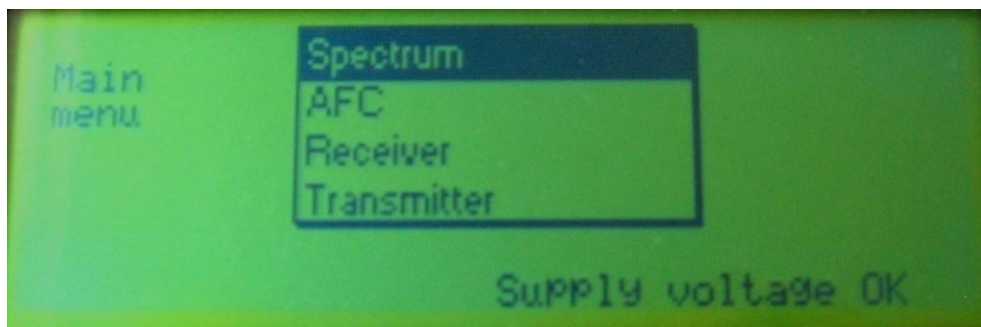
Obr. 6.5: Schéma stavového automatu činnosti radiokomunikačního monitoru

Úvodní inicializace programových proměnných a nastavení periférií představuje stav INTRO. Odpovídá mu úvodní obrazovka, která informuje o proběhlých akcích a vyzývá uživatele k pokračování stiskem tlačítka ENTER (viz obr. 6.6). Případný neúspěch některé z operací je symbolizován slovem FAILED namísto OK.



Obr. 6.6: Úvodní obrazovka

Nabídkou hlavního menu (obr. 6.7) lze procházet za pomoci otočného ovladače. Položka se potvrzuje tlačítkem ENTER. Návrat do hlavního menu lze provést stiskem BACK. Text v pravé dolní části obrazovky informuje, zda je velikost napájecího napětí dostatečná, popřípadě zda právě dochází k nabíjení baterií za pomoci interní nabíječky. Údaje o napětí programu zprostředkovává A/D převodník.



Obr. 6.7: Hlavní menu

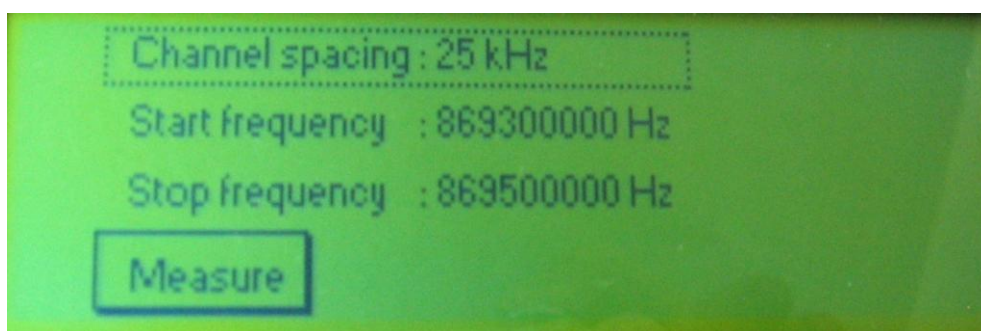
6.5 Zobrazení spektra v pásmu 868 MHz

Prvořadou funkcí radiokomunikačního monitoru je zobrazit přehled vysílačů v pásmu 863 MHz – 870 MHz. Rádiové spektrum je měřeno za pomoci obvodu CC1020. Ten je přepnut do funkce přijímače, postupně se přeladuje a měří sílu přijatého signálu (RSSI). Naměřené hodnoty jsou průběžně zobrazovány v grafu.

Výkon signálu je kvantifikován programem mikrokontroléru za pomoci vzorce

$$P [\text{dBm}] = 1,5 \cdot \text{RSSI} - 3 \cdot \text{VGA_SETTING} - \text{RSSI_Offsett}, \quad (6.1)$$

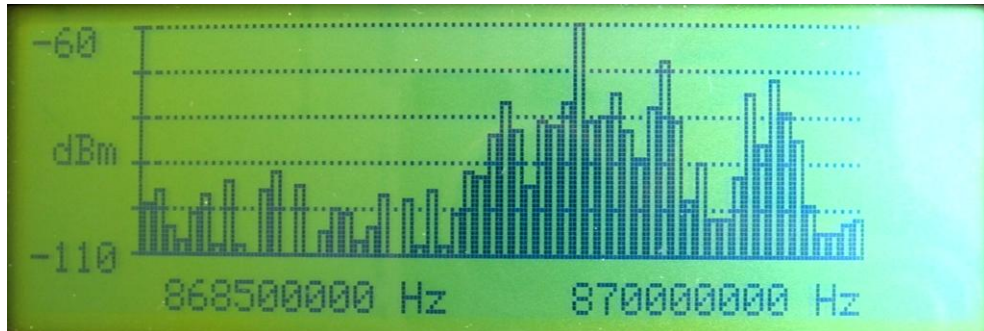
kde RSSI je hodnota čtená ze stavového registru CC1020 udávajícího sílu signálu. VGA_SETTING odpovídá nastavení zesílení signálu v přijímači a RSSI_Offset je hodnota měnící se v závislosti na zvolené šířce pásma mezifrekvenčního filtru. Hodnota RSSI je pro dosažení větší přesnosti měření průměrována, a to jak hardwarově uvnitř CC1020, tak softwarově. Algoritmus měření byl navrhován v souladu s aplikační poznámkou AN030 [42], kde je mimo jiné věnována pozornost době ustálení hodnoty RSSI po přeladění přijímače.



Obr. 6.8: Volba parametrů pro měření spektra

Po vybrání volby „Spektrum“ v hlavním menu je možné zvolit parametry měření spektra (viz obr. 6.8). Každý parametr lze editovat po potvrzení tlačítkem ENTER. Procházení nabídek je řešeno obdobně jako mezi obrazovkami pomocí stavového automatu. Kanálová rozteč („Channel spacing“) se nabízí v hodnotách 12,5 kHz, 25 kHz, 50 kHz a 100 kHz. Při výběru počátečního a koncového kmitočtu měření je

počítáno se zvolenou kanálovou roztečí a hodnoty kmitočtů jsou tak celočíselnými násobky kanálové rozteče. S potvrzením volby „Measure“ dojde k započítí měření (změna stavu ze SPECTRUM na SPECTRUM_MEASURE).



Obr. 6.9: Zobrazení měřeného spektra

Spektrum je reprezentováno sloupcovým grafem závislosti výkonu signálu na kmitočtu (viz obr. 6.9). Maximální zobrazený výkon je -60 dBm a minimální hodnota výkonu je -110 dBm. Tento rozsah je dán schopnostmi RSSI (viz tab. 3.2). Počet měřených hodnot je shora omezen na 95. Omezení je způsobeno konečným rozlišením displeje. Každý sloupec představuje jeden komunikační kanál dle zadané rozteče kanálů. Během měření se sloupce zleva doprava průběžně překreslují a přizpůsobují svou výšku měřeným hodnotám.

6.6 Měření kmitočtové odchylky přijímaného signálu

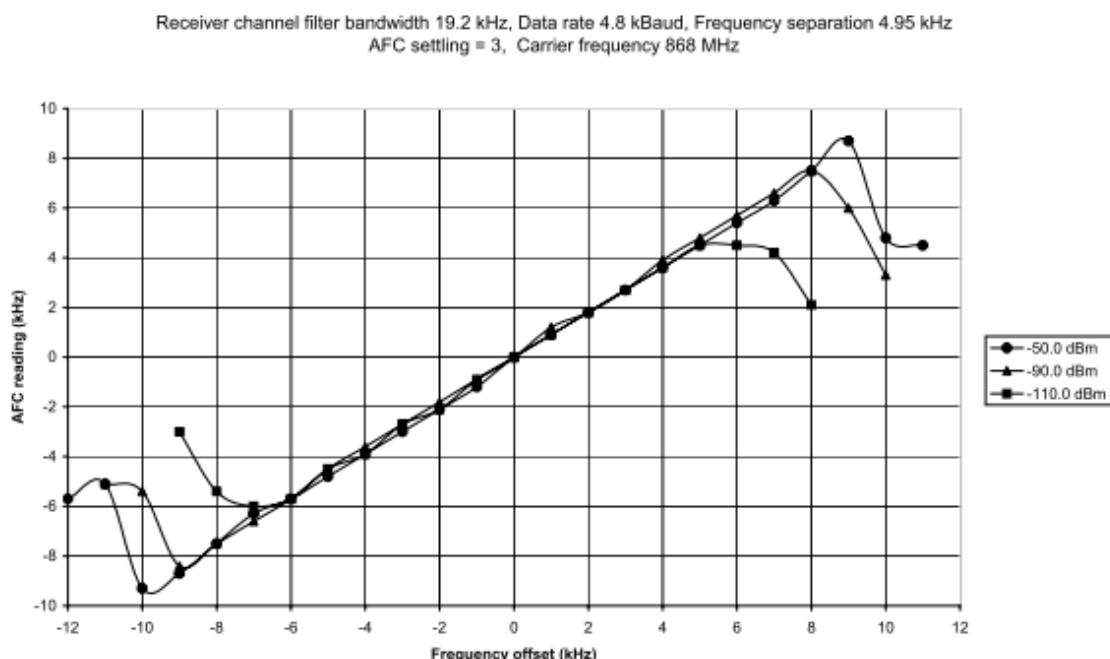
Transceiver CC1020 umožňuje měřit odchylku kmitočtu přijímaného vysokofrekvenčního signálu od kmitočtu přijímače. S pomocí měřené hodnoty lze doladit hodnotu lokálního oscilátoru (technika AFC). AFC je funkční jen při užití modulace FSK, protože CC1020 porovnává, zda kmitočet lokálního oscilátoru leží uprostřed dvou kmitočtů modulovaného FSK signálu.

Kmitočtová odchylka je dána vzorcem

$$\Delta F = \frac{\text{AFC} \cdot \text{Baud_rate}}{16}, \quad (6.2)$$

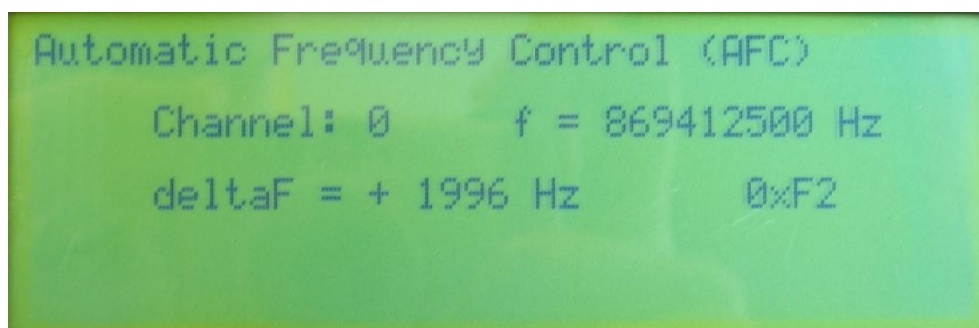
kde AFC je hodnota registru v transceiveru s měřenou hodnotou odchylky a Baud_rate je symbolová rychlost, se kterou pracuje demodulátor. Měřená hodnota AFC je hardwarově průměrována. Při symbolové rychlosti 2400 Baud je kmitočtové rozlišení odchylky 150 Hz.

Při implementaci měření kmitočtové odchylky byla využita aplikační poznámka AN029 [43]. Schopnosti AFC uvádí obr. 6.10. Z obrázku je patrné, že indikace kmitočtové odchylky je funkční v plném rozsahu šířky mezifrekvenčního filtru pro signály s výkonem alespoň -90 dBm.



Obr. 6.10: Závislost indikované kmitočtové odchylky na skutečné odchylce (převzato z [43])

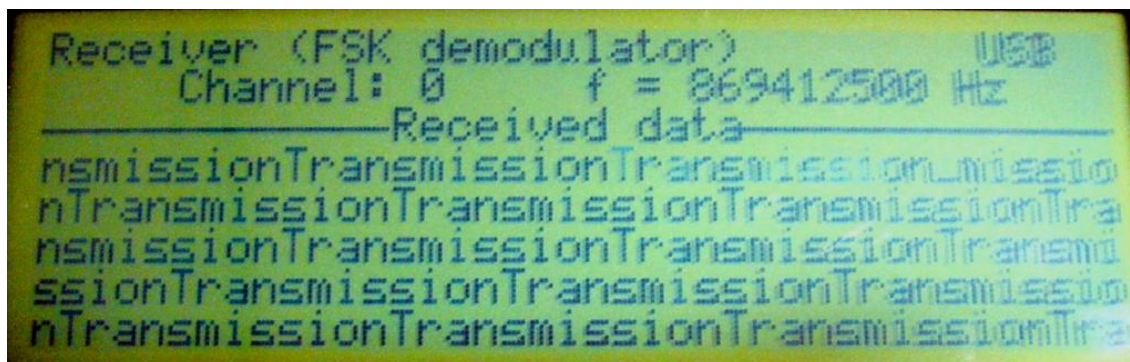
V režimu měření kmitočtové odchylky (viz obr. 6.11) je možné zvolit jeden z osmi rádiových kanálů, se kterými pracují komunikační moduly uvedené v kapitole 4.



Obr. 6.11: Ukazatel kmitočtové odchylky přijímaného signálu

6.7 Implementace FSK demodulátoru

Radiokomunikační monitor je schopen přijímat vysokofrekvenční signál s modulací FSK. Nastavení parametrů demodulátoru jsou ve shodě s formátem vysílání komunikačních modulů (viz kapitola 4). Uživatel může otočným voličem vybrat rádiový kanál. Při příjmu paketu se zobrazí text „Received data“ a demodulovaná data se začnou vypisovat na displej. Program v režimu příjmu využívá stavy `IDLE_STATE` a `RX_STATE` pro řízení obvodu CC1020. Ukázkou funkce přijímače představuje kontinuální příjem datového paketu obsahujícího slovo „Transmission“ (obr. 6.12).

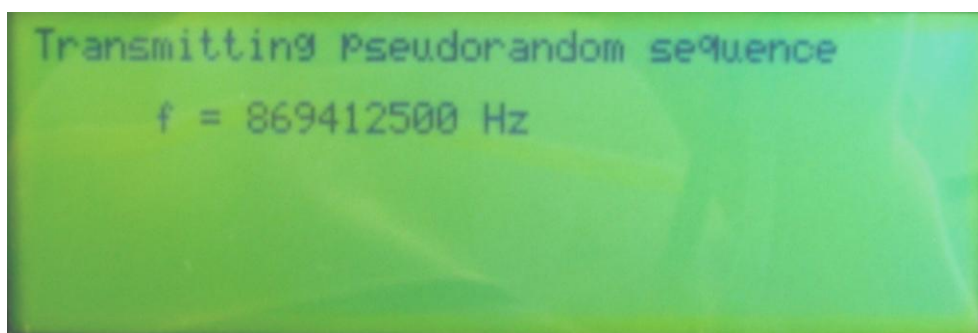


Obr. 6.12: Radiokomunikační monitor v režimu přijímače

Demodulovaná data je možné přenést pomocí USB rozhraní k dalšímu zpracování do osobního počítače. Po aktivaci režimu přijímače a propojení radiokomunikačního monitoru a počítače kabelem USB je třeba zaslat monitoru po virtuální sériové lince znak 'C'. Příjem znaku je radiokomunikačním monitorem potvrzen vypsáním textu USB v pravém horním rohu LCD displeje. Spojení je sestaveno a přijímač odesílá do PC demodulovaná data. Spojení je možné ukončit zasláním znaku 'D' ze strany PC.

6.8 Vysílač pseudonáhodných dat

Doplňující funkci nad rámec zadání diplomové práce představuje vysílač vysokofrekvenčního signálu modulovaného pseudonáhodnými daty (obr. 6.13). Firmware setrvávající ve stavu TX_PN9 umožňuje volbu vysílacího kmitočtu s krokem 25 kHz. Nastavení modulace je kompatibilní s komunikačními moduly. Výstupní výkon vysílače je 0 dBm.



Obr. 6.13: Volba kmitočtu nosné vlny vysílače

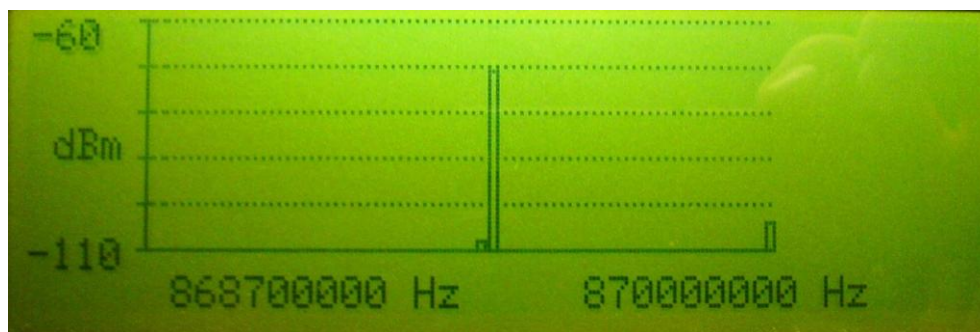
Funkce vysílače lze s výhodou použít pro určení přesnosti kmitočtu generovaného transceiverem CC1020. Generovaný signál lze použít k měření síly signálu a kmitočtové odchylky jinými přístroji osazenými obvodem CC1020 nebo podobným.

7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

V následujících odstavcích je provedena úvaha o přesnosti měřících funkcí radiokomunikačního monitoru. Měřením je také stanoven proudový odběr zařízení.

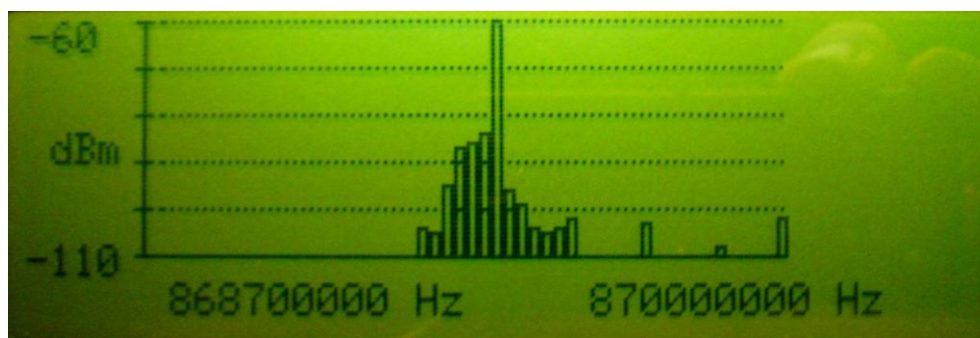
7.1 Měření spektra

Při experimentálním měření bylo prokázáno, že parametry ukazatele RSSI jsou ve shodě s údaji udávanými výrobcem transceiveru (viz tab. 3.2). Potvrdil se předpoklad velmi dobré citlivosti obvodu CC1020. Transceiver dokáže detekovat vysokofrekvenční signály o výkonu jen -110 dBm. Maximální detekovaná hodnota je ukazatelem RSSI saturována na přibližně -55 dBm, což odpovídá katalogovému listu CC1020 (pro kanálovou rozteč 12,5 kHz až 150 kHz). V případě, že nemá přijímaný signál velkou kmitočtovou odchylku a leží ve středu kanálu, je chyba měření síly signálu ± 1 dB, čímž je překonán údaj výrobce předpokládající přesnost ± 3 dB.



Obr. 7.1: Spektrum se signálem o výkonu -70 dBm

Rozsah RSSI vytváří částečnou nevýhodu pro radiokomunikační monitor, který není schopen rozlišit úrovně silných signálů. Spektrum silného signálu navíc proniká do vedlejších kanálů a měřením tak nemusí být možné jednoznačně určit kmitočet vysílače. Příkladem je detekce signálů o úrovních -70 dBm a -60 dBm vytvořených vysokofrekvenčním generátorem na kmitočtu 869,4125 MHz (obr. 7.1 a obr. 7.2), kde lze pozorovat tendenci nárůstu výkonu v okolních kanálech.



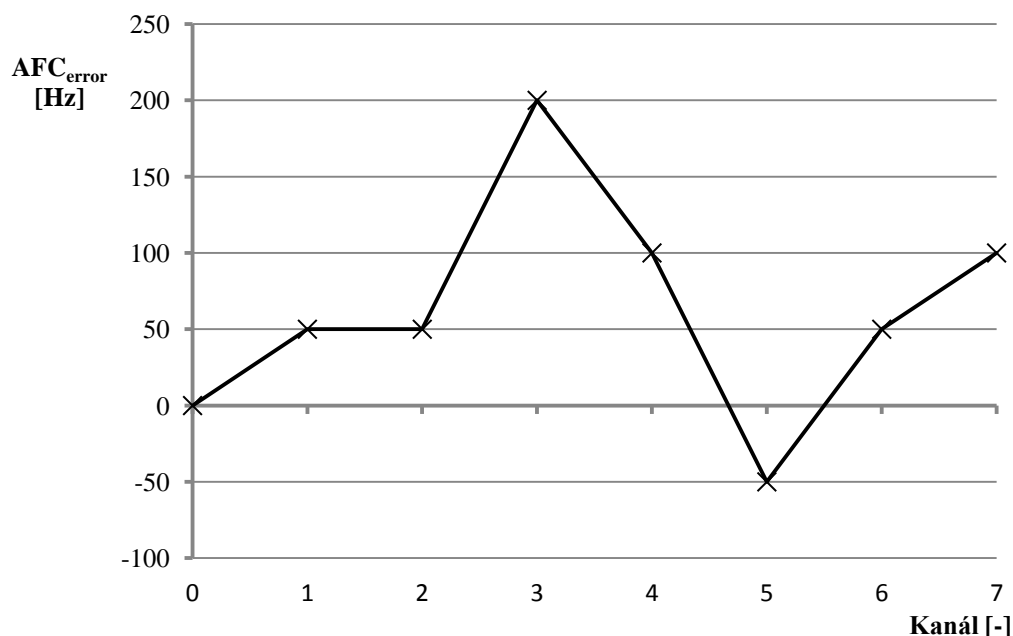
Obr. 7.2: Spektrum se signálem o výkonu -60 dBm

7.2 Přesnost AFC

Při experimentálním určování přesnosti měření kmitočtové odchylky byl jako zdroj signálu použit komunikační modul (viz kapitola 4). Pro všechny rádiové kanály byl postupně změřen kmitočet vysílače a kmitočet přijímače. Byla určena teoretická hodnota kmitočtové odchylky a porovnána s kmitočtovou odchylkou udávanou radiokomunikačním monitorem (viz tab. 7.1 a obr. 7.3). Měření kmitočtu přijímače bylo provedeno aktivací volby vysílače s pseudonáhodnou posloupností. Hodnota kmitočtu byla odečítána z průběhu spektra měřeného spektrálním analyzátozem Rohde&Schwarz FSL3 (9 kHz – 3 GHz) [44].

Tab. 7.1: Měření přesnosti ukazatele kmitočtové odchylky

Rádiový kanál	Kmitočet vysílače [MHz]	Kmitočet přijímače [MHz]	Teoretická kmitočtová odchylka [kHz]	Kmitočtová odchylka (AFC) [kHz]	Chyba AFC [Hz]
0	869,4128	869,4146	-1,80	-1,80	0
1	869,4378	869,4398	-2,00	-1,95	50
2	869,4631	869,4651	-2,00	-1,95	50
3	869,4881	869,4898	-1,70	-1,50	200
4	869,5134	869,5150	-1,60	-1,50	100
5	869,5384	869,5397	-1,30	-1,35	-50
6	869,5638	869,5649	-1,10	-1,05	50
7	869,5889	869,5896	-0,70	-0,60	100



Obr. 7.3: Graf závislosti chyby měření kmitočtové odchylky na rádiovém kanálu

Maximální změřená chyba AFC je 200 Hz, což překvapivě převyšuje rozlišení AFC (150 Hz). Odchylku lze přisuzovat chybě měření, kterou je zatíženo určování kmitočtu nosné vlny ze spektra FSK modulovaného signálu.

Kmitočtová odchylka byla z displeje monitoru odečítána až po ustálení hodnoty. To proběhlo někdy okamžitě, jindy si vyžádalo několik sekund.

7.3 Spotřeba radiokomunikačního monitoru

Měření spotřeby radiokomunikačního monitoru shrnuje tab. 7.2. Z hodnoty napájecího napětí a odebíraného proudu byl vypočten příkon.

Tab. 7.2: Spotřeba radiokomunikačního monitoru

Stav	Napájecí napětí [V]	Odebíraný proud [mA]	Příkon [W]
Napájení z baterií	7,0	43	0,30
Externí napájení	12,8	43	0,55
Externí napájení (aktivní nabíječka)	12,8	167	2,14

Odhadovaná doba t_{bat} , po kterou lze zařízení provozovat bez externího napájení je dána vztahem

$$t_{\text{bat}} = \frac{C}{I_{\text{bat}}} = \frac{1300 \text{ mAh}}{43 \text{ mA}} \doteq \underline{30 \text{ h}}, \quad (7.1)$$

kde I_{bat} je změřený proud tekoucí monitorem při napájení z baterií. Odhadovaná doba je téměř dvojnásobkem odhadu, který byl uveden v podkapitole 5.8.1 a vycházel z maximálního teoretického proudového odběru.

8 ZÁVĚR

Po teoretickém úvodu zabývající se bezlicenčními rádiovými pásmy a modulacemi vysokofrekvenčního signálu byl v práci představen transceiver CC1020 a jeho využití. Pro radiokomunikační monitor pro ISM pásmo 868 MHz byla vytvořena koncepce, která byla následně rozpracována do konkrétního obvodového návrhu. Byla vyrobena deska plošných spojů, osazena součástkami a zastavěna do vyhovující konstrukční krabičky. Pro mikrokontrolér byl napsán řídicí program, ve kterém je implementováno mimo jiné měření spektra v pásmu 868 MHz, indikace kmitočtové odchylky vysílače a FSK demodulace přijímaného signálu.

Radiokomunikační monitor je vybaven velkým přehledným LCD displejem. Má intuitivní ovládání a díky rozměrům a použití baterií je snadno přenositelný. Nad rámec zadání má přístroj vysílač náhodné sekvence dat. Přesnost měření výkonu signálů je velmi dobrá, stejně jako přesnost indikace kmitočtové odchylky.

Firmware je zkompileován s optimalizací na velikost a zabírá v programové paměti mikrokontroléru 64,7 % z 32 kB. Zbylé místo by mohlo být využito při dalším vývoji radiokomunikačního monitoru. Stejně tak transceiver CC1020, rozhraní USB a externí paměť Flash nabízí prostor pro implementaci nových funkcí. Může jimi být pokročilá analýza přijímaných dat nebo schopnost monitoru vysílat datové signály a pracovat jako rádiový modem.

Doporučením pro případ vývoje nové platformy radiokomunikačního monitoru by byla volba výpočetně zdatnějšího mikrokontroléru pro zvýšení grafického výkonu. Přesnost signálů generovaných transceiverem CC1020 a tím i absolutní přesnost kmitočtové odchylky by se zvýšila, kdyby byl krystal pro obvod CC1020 nahrazen obvodem s teplotně kompenzovaným oscilátorem.

Text práce je doplněn zdrojovými soubory firmwaru, které lze nalézt na přiloženém DVD. Všechny body zadání práce byly splněny. Radiokomunikační monitor je plně funkční, připravený k měření nebo příjmu vysokofrekvenčních signálů pásma 868 MHz.

LITERATURA

- [1] *Český telekomunikační úřad* [online]. ČTÚ, 2008 - [cit. 1. května 2010]. Dostupné na www: <<http://www.ctu.cz/>>
- [2] *ISM applications* [online]. ITU, 2008 - [cit. 1. května 2010]. Dostupné na www: <<http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>>
- [3] *European Telecommunication Standards Institute* [online]. ETSI, 2011- [cit. 1. května 2010]. Dostupné na www: <<http://www.etsi.org/WebSite/homepage.aspx>>
- [4] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2007-4* [online]. ČTÚ, 2007 - [cit. 1. května 2010]. Dostupné na www: <http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok_2007/VO_R_10_03_2007_4.pdf>
- [5] PROKEŠ, A. *Komunikační systémy*. Elektronické skriptum. Brno: VUT v Brně, 2004.
- [6] PROKEŠ, A. *Komunikační systémy - přednášky*. Brno: VUT v Brně, 2010.
- [7] *CC1020: Low-Power RF Transceiver for Narrowband Systems*. [online]. Texas Instruments Inc., 2010 - [cit. 1. května 2010]. Dostupné na www: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1020.pdf>>
- [8] ŠEBESTA, J. a kol. *Vývoj univerzálního softwaru a mikroprocesorové řídicí jednotky pro systém na zónové měření. Závěrečná zpráva projektu NBÚ č. ST20072008026*, 2008.
- [9] *Evaluation Kit EvB 4.3* [online]. And-Tech, 2011 - [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <<http://www.and-tech.pl/en/evaluation-kit-evb-43>>
- [10] *Terminal - com port development tool* [online]. 2011 - [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <<https://sites.google.com/site/terminalbpp/>>
- [11] *AVR Studio 4 Description* [online]. San Jose: Atmel Corporation, 2011 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=2725>
- [12] WEDDINGTON, E., SOKOLOV, A., WUNSCH, J., MARQUES, P. *WinAVR* [online]. 2011 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <<http://sourceforge.net/projects/winavr/>>
- [13] MICHALKIEWICZ, M., WUNSCH, J., WEDDINGTON, E., SOKOLOV, A., XMELKOV, D., *avr-libc 1.6.7* [online]. 2011 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <<http://www.nongnu.org/avr-libc/>>
- [14] FLEURY, P. *UART Library* [online]. 2005 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/group__pfleury__uart.html>
- [15] FLEURY, P. *LCD HD44780 Library* [online]. 2006 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/group__pfleury__lcd.html>
- [16] FLEURY, P. *I2C (TWI) Master Software Library* [online]. 2005 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/group__pfleury__ic2master.html>
- [17] *AS169-73LF* [online] Skyworks, 2006 – [cit. 11. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/200105E.pdf>>

- [18] *CC1020EMX Reference Design* [online] Texas Instruments Inc., 2006 – [cit. 12. května 2012]. Dostupné na www: <http://www.ti.com/tool/CC1020EMX_REFDES>
- [19] *T6963C Dot Matrix LCD Controller LSI* [online] Toshiba, 2002 – [cit. 12. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/toshiba/1908.pdf>>
- [20] *KS0108B 64ch Segment Driver for Dot Matrix LCD* [online] Samsung Electronics – [cit. 12. května 2012]. Dostupné na www: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/37323/SAMSUNG/KS0108B.html>>
- [21] *MG2406F series* [online]. Everbouquet, 2011 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <<http://www.everbouquet.com.tw/MG2406F.htm>>
- [22] *FT232R USB UART I.C.* [online]. Glasgow: Future Technology Devices International, 2010 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf>
- [23] *AT45DB081D DataFlash* [online] San Jose: Atmel Corporation, 2012 – [cit. 12. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.atmel.com/Images/doc3596.pdf>>
- [24] *8-bit Microcontroller ATmega32L* [online] San Jose: Atmel Corporation, 2011 – [cit. 31. prosince 2011]. Dostupné na www: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf>
- [25] POVALAČ, A. *AVR ISP Programátor BiProg – ÚREL verze* [online] Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/dilna/BiProg/biprogram_urel.pdf>
- [26] *LE00AB/C Series, Very Low Drop Voltage Regulators with Inhibit* [online] STMicroelectronics, 2005 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.gme.cz/dokumentace/934/934-021/dsh.934-021.1.pdf>>
- [27] *LF00 Series, Very Low Drop Voltage Regulators with Inhibit* [online] STMicroelectronics, 2003 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.gme.cz/dokumentace/934/934-039/dsh.934-039.1.pdf>>
- [28] MATYÁŠ, P. *Analyzátor signálu v televizních kabelových rozvodech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. Diplomová práce.
- [29] BELZA, J. *Nabíječka akumulátorů 9 V* [online] 2004 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.belza.cz/charge/nab9v.htm>>
- [30] *LM117, LM217, LM317* [online] STMicroelectronics, 2011 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.gme.cz/dokumentace/331/331-004/dsh.331-004.1.pdf>>
- [31] *BSS 83 P Small-Signal-Transistor* [online] Mnichov: Infineon Technologies, 2003 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.gme.cz/dokumentace/915/915-008/dsh.915-008.1.pdf>>
- [32] *CD4541BC Programmable Timer* [online] Fairchild Semiconductor, 2002 – [cit. 13. května 2012]. Dostupné na www: <<http://www.gme.cz/dokumentace/953/953-102/dsh.953-102.1.pdf>>
- [33] *Chip Inductors* [online] Coilcraft, 2012 – [cit. 14. května 2012]. Dostupné na www: <<http://coilcraft.com/smind.cfm>>
- [34] *Krabičky pro elektronická zařízení, II. vydání* [online] Kozlovice: A&A, výroba, obchod a servis, s.r.o., 2012 – [cit. 14. května 2012]. Dostupné na www: <<http://krabicky.cz/katalog/katalog.pdf>>

- [35] *P-RE20S – Rotační kodér s mechanickým kontaktem* [online] Praha: GM electronic, spol. s r.o., 2012 – [cit. 14. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.gme.cz/dokumentace/532/532-086/dsh.532-086.1.pdf): <<http://www.gme.cz/dokumentace/532/532-086/dsh.532-086.1.pdf>>
- [36] *SmartRF Studio 6.13.1* [online] Texas Instruments, 2010 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.ti.com/litv/zip/swrc046s): <<http://www.ti.com/litv/zip/swrc046s>>
- [37] SUNDET, T., ROGNDALLEN, A. *AN023 CC1020 Microcontroller Interfacing* [online] Oslo: Chipcon AS, 2003 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.ti.com/lit/an/swra069/swra069.pdf): <<http://www.ti.com/lit/an/swra069/swra069.pdf>> a <<http://www.ti.com/litv/zip/swra069>>
- [38] SUNDET, T., TORVMARK, K. H., *AN025 CC1020 RF Modem* [online] Oslo: Chipcon AS, 2003 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.ti.com/lit/an/swra067/swra067.pdf): <<http://www.ti.com/lit/an/swra067/swra067.pdf>> a <<http://www.ti.com/litv/zip/swra067>>
- [39] *PIC16F87X* [online] Microchip Technology Inc., 2001 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf): <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf>>
- [40] SKOPAL, M. *Knihovna grafických prvků pro mikrokontrolery Atmel AVR a grafické displeje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2008. Bakalářská práce.
- [41] DRBOHLAV, L., FREČER, P. *Doplnění knihovny pro grafický displej* [online] Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.urel.feec.vutbr.cz/MIA/2011/Drbohlav/): <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MIA/2011/Drbohlav/>>
- [42] HELLAN, S., STENGEL, O. *AN030 CC1020/CC1021 Received Signal Strength Indicator* [online] Oslo: Chipcon AS, 2005 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.ti.com/lit/an/swra062/swra062.pdf): <<http://www.ti.com/lit/an/swra062/swra062.pdf>>
- [43] HELLAN, S., STENGEL, O. *AN029 CC1020/CC1021 Automatic Frequency Control (AFC)* [online] Oslo: Chipcon AS, 2004 – [cit. 15. května 2012]. Dostupné na [www](http://www.ti.com/lit/an/swra063/swra063.pdf): <<http://www.ti.com/lit/an/swra063/swra063.pdf>>
- [44] *R&S FSL Spectrum Analyzer* [online] Mnichov: Rohde&Schwarz GmbH & Co. KG, 2008 – [cit. 16. května 2012]. Dostupné na [www](http://www2.rohde-schwarz.com/file_11624/FSL_bro_en.pdf): <http://www2.rohde-schwarz.com/file_11624/FSL_bro_en.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

S	Amplituda
t	Čas
f	Kmitočet
φ	Fáze
Δf	Kmitočtový zdvih
B	Šířka pásma
$n(t)$	Modulační funkce
$u(t)$	Funkce obdélníkového pulzu
T_s	Šířka pulzu, symbolová perioda
C	Kapacita baterie
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
ISM	Industrial Science Medical, pásmo pro průmyslové, vědecké a lékařské účely
ITU	International Telecommunication Union
OSN	Organizace spojených národů
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WiFi	Wireless Fidelity
SRD	Short Range Device, zařízení krátkého dosahu
CEPT	Konference evropských správ pošt a telekomunikací
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum, přímá metoda rozprostření spektra
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum, metoda rozprostření spektra s kmitočtovým skákáním
RC	Radio Controlled, rádiově řízený
PC	Personal Computer, osobní počítač
RFID	Radio Frequency Identification Applications, rádiová identifikační zařízení
AM	Amplitudová modulace
FM	Kmitočtová modulace
PM	Fázová modulace
ASK	Amplitude Shift Keying, amplitudové klíčování

FSK	Frequency Shift Keying, kmitočtové klíčování
PSK	Phase Shift Keying, fázové klíčování
NRZ	Non Return to Zero, druh linkového kódu
I	In phase, ve fázi
Q	Quadrature, kvadrurní
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying, čtyřstavové fázové klíčování
MSK	Minimum Shift Keying, FSK s kontinuální fází
UHF	Ultra High Frequency, ultra krátké vlny
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové rozhraní pro periferie
OOK	On-off Keying, druh ASK modulace
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying, FSK s použitím Gaussova filtru
LNA	Low Noise Amplifier, nízkošumový zesilovač
PA	Power Amplifier, výkonový zesilovač
ADC	Analog to Digital Conversion, analogově-digitální převod
IF	Intermediate Frequency, mezifrekvence
AFC	Automatic Frequency Control, automatická korekce kmitočtu
RSSI	Received Signal Strength Indicator, ukazatel síly přijatého signálu
CSMA	Carrier Sense Multiple Access, mnohonásobný přístup s detekcí nosné
I ² C	Inter-Integrated Circuit, komunikační sběrnice mezi integrovanými obvody
ISP	In-System Programming, programování mikrokontroléru na DPS, ne samostatně v programátoru
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter, univerzální asynchronní přijímač / vysílač
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, typ znakové sady
LCD	Liquid Crystal Display, displej z tekutých krystalů
ppm	Parts per Million, miliontina
HEMT	High Electron Mobility Transistor, technologie výroby tranzistoru
SMA	SubMiniature version A, vysokofrekvenční konektor
IP3	Third-order Intercept Point, bod zahrazení
DPS	Deska plošných spojů
VID	Vendor Identity, označení výrobce
PID	Product Identity, označení produktu

EEPROM Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory,
elektricky mazatelná a programovatelná paměť určená pro čtení

NIMH Nikl-metal hydridový akumulátor

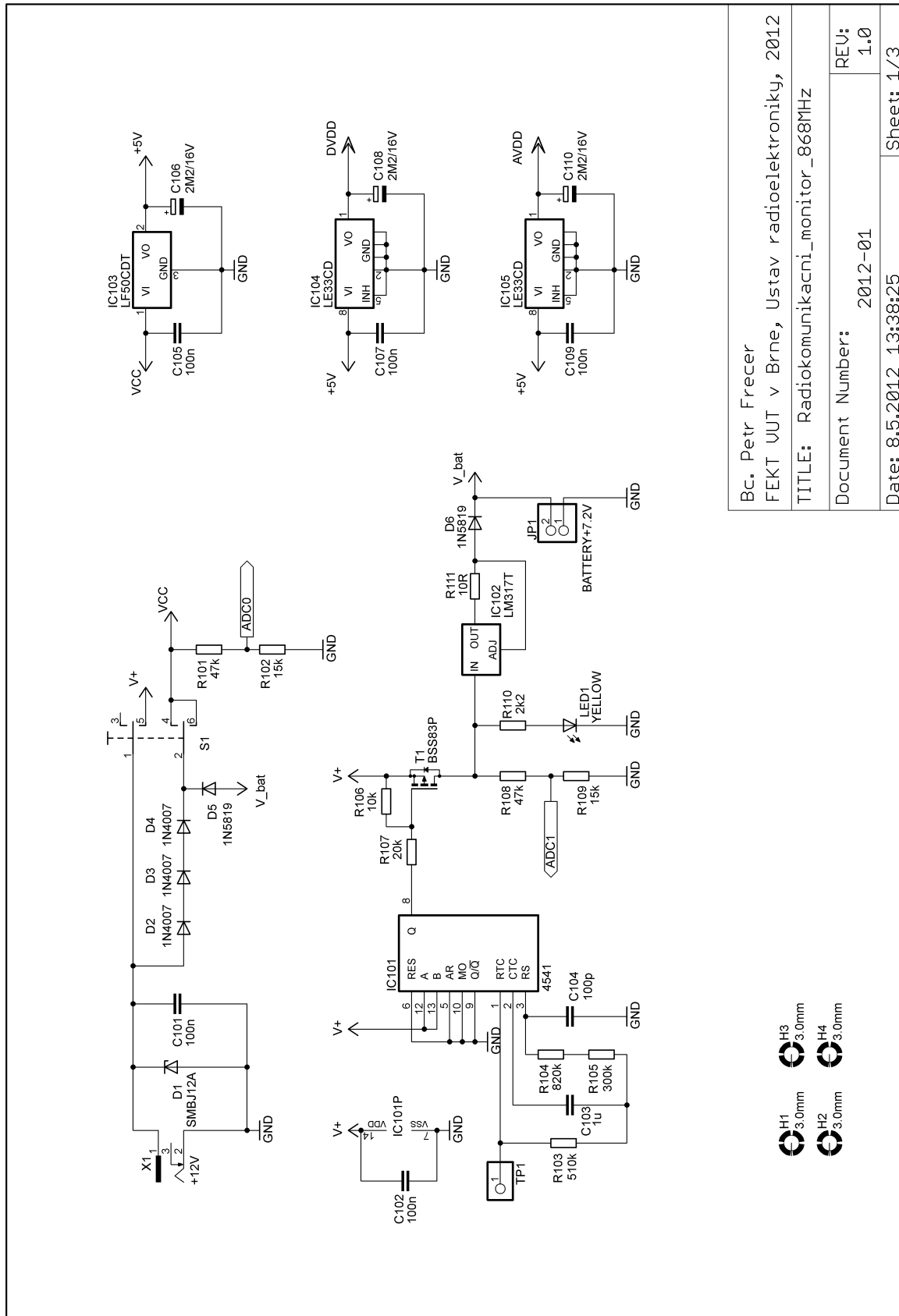
SMD Surface-Mount Device, součástka pro povrchovou montáž

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh a realizace zařízení	50
A.1	Obvodové zapojení napájení radiokomunikačního monitoru.....	50
A.2	Obvodové zapojení řídicí části radiokomunikačního monitoru.....	51
A.3	Obvodové zapojení transceiveru CC1020	52
A.4	Deska plošného spoje – top	53
A.5	Deska plošného spoje – bottom	53
A.6	Osazená deska plošného spoje – top.....	54
A.7	Osazená deska plošného spoje – bottom.....	54
A.8	Seznam součástek	55

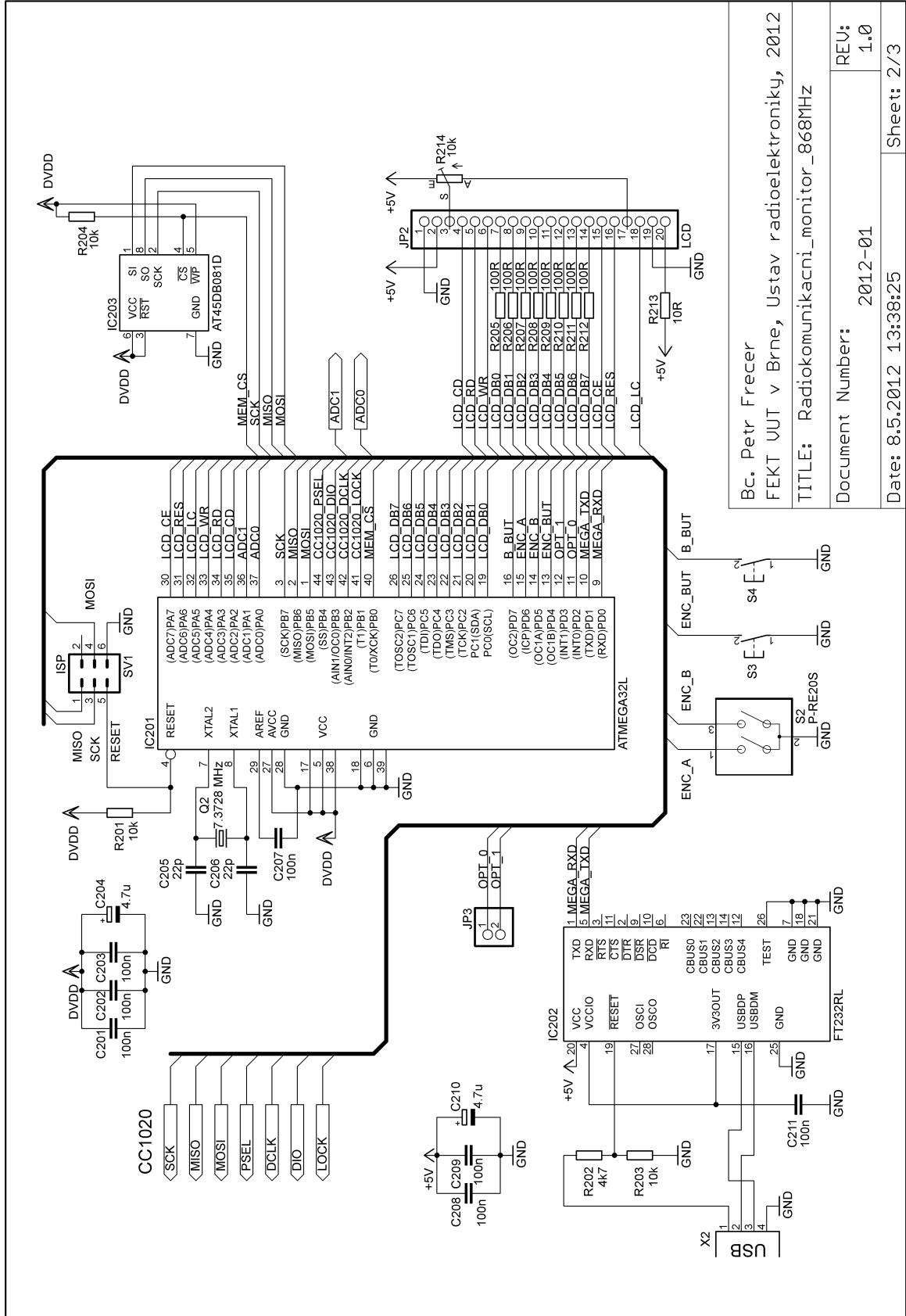
A NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení napájení radiokomunikačního monitoru



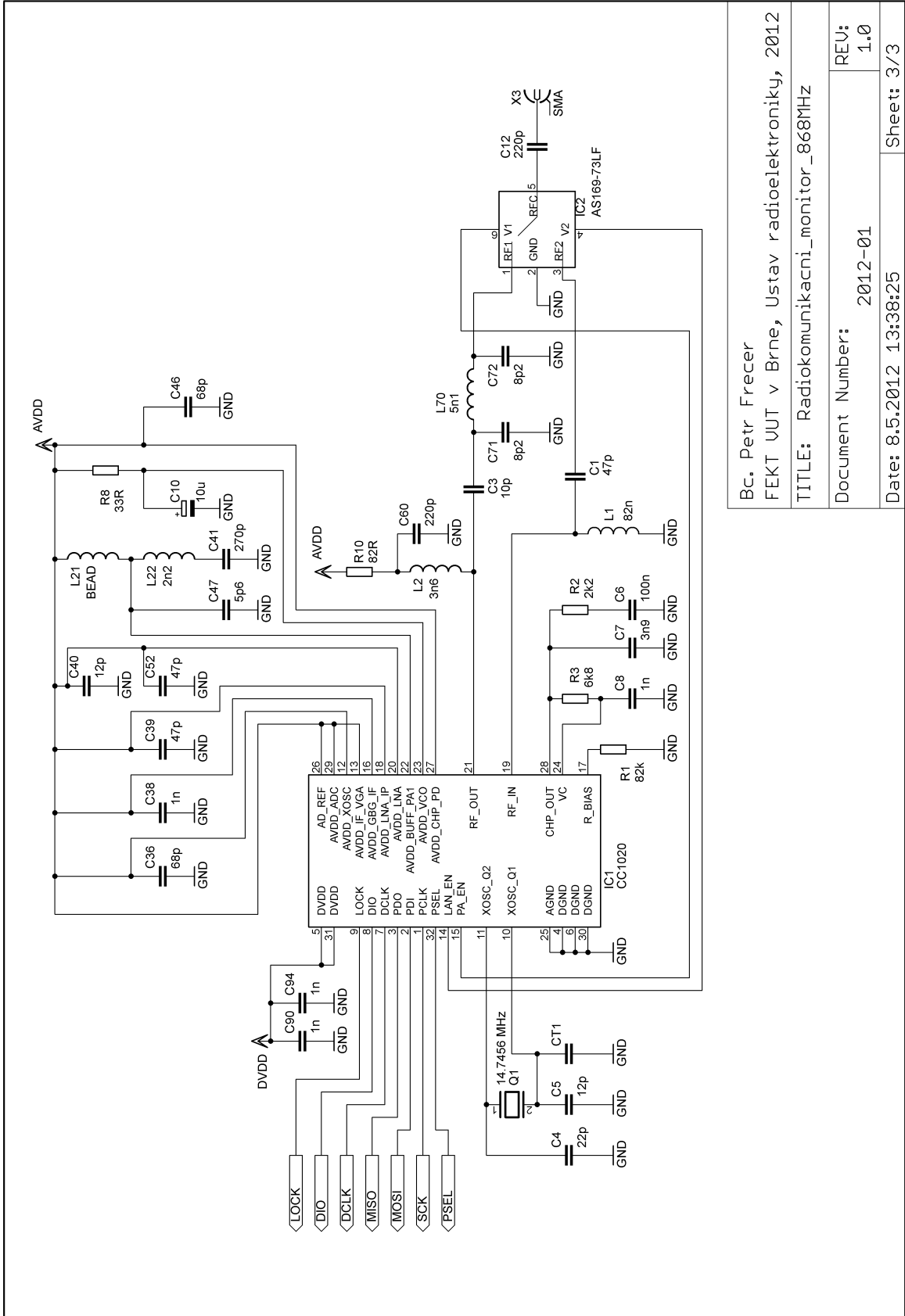
Bc. Petr Frečer FEKT UUT v Brně, Ústav radioelektroniky, 2012	
TITLE: Radiokomunikacni_monitor_868MHz	
Document Number:	2012-01
REV:	1.0
Date: 8.5.2012 13:38:25	Sheet: 1/3

A.2 Obvodové zapojení řídicí části radiokomunikačního monitoru



Bc. Petr Frečer
 FEKT UUT v Brně, Ústav radioelektroniky, 2012
 TITLE: Radiokomunikační_monitor_868MHz
 Document Number: 2012-01
 REV: 1.0
 Date: 8.5.2012 13:38:25
 Sheet: 2/3

A.3 Obvodové zapojení transceiveru CC1020



Bc. Petr Frečer
 FEKT UUT v Brně, Ústav radioelektroniky, 2012
 TITLE: Radiokomunikační_monitor_868MHz
 Document Number: 2012-01
 Date: 8.5.2012 13:38:25
 REV: 1.0
 Sheet: 3/3

A.8 Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1, C39, C52	47 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C3	10 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C4	22 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C5, C40	12 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C6	100 nF	C0805	Keramický kondenzátor
C7	3,9 nF	C0805	Keramický kondenzátor
C8, C38, C90, C94	1 nF	C0805	Keramický kondenzátor
C10	10 μ F / 16 V	SMC_A	Tantalový kondenzátor
C12, C60	220 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C36, C46	68 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C41	270 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C47	5,6 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C71, C72	8,2 pF	C0805	Keramický kondenzátor
CT1		C0805	Keramický kondenzátor
C101, C102, C105, C107, C109	100 nF	C0805	Keramický kondenzátor
C103	1 μ F	C1206	Keramický kondenzátor
C104	100 pF	C0805	Keramický kondenzátor
C106, C108, C110	2,2 μ F / 16 V	SMC_A	Tantalový kondenzátor
C201 – C203, C207 – C209, C211	100 nF	C0805	Keramický kondenzátor
C204, C210	4,7 μ F / 16 V	SMC_A	Tantalový kondenzátor
C205, C206	22 pF	C0805	Keramický kondenzátor
D1	SMBJ12A	SMB	Transil (14 V / 600 W)
D2 – D4	1N4007	MELF	Univerzální dioda
D5, D6	1N5819	MELF	Schottkyho dioda
IC1	CC1020	QFN32	Transceiver
IC2	AS169-73LF	SOT26	Vysokofrekvenční přepínač
IC101	CD4541BC	SO14	Programovatelný časovač
IC102	LM317T	TO-220	Napěťový regulátor
IC103	LF50CDT	DPAK	Napěťový regulátor (5 V / 0,5 A)
IC104, IC105	LE33CD	SO08	Napěťový regulátor (3,3 V / 0,1 A)
IC201	ATmega32L	TQFP44	Mikrokontrolér
IC202	FT232RL	SSOP28	Převodník USB/UART
IC203	AT45DB081D	SO08	Externí paměť Flash
JP1		pin 1x2	Konektor baterie

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
JP2		pin 1x20	Konektor LCD displeje
JP3		pin 1x2	Konektor
L1	82 nH	L0805	Cívka
L2	3,6 nH	L0603	Cívka
L21		3 mm	Feritová perla
L22	2,2 nH	L0603	Cívka
L70	5,1 nH	L0603	Cívka
LED1	YELLOW	3 mm	LED dioda
Q1	14,7456 MHz	HC49U-S	Krystal
Q2	7,3728 MHz	HC49/U3H	Krystal
R1	82 k Ω (1 %)	R0805	Rezistor
R2	2,2 k Ω	R0805	Rezistor
R3	6,8 k Ω	R0805	Rezistor
R8	33 Ω	R0805	Rezistor
R10	82 Ω	R0805	Rezistor
R101, R108	47 k Ω	R0805	Rezistor
R102, R109	15 k Ω	R0805	Rezistor
R103	510 k Ω	R0805	Rezistor
R104	820 k Ω	R0805	Rezistor
R105	300 k Ω	R0805	Rezistor
R106	10 k Ω	R0805	Rezistor
R107	20 k Ω	R0805	Rezistor
R110	2,2 k Ω	0204/7	Rezistor
R111, R213	10 Ω (0,4 W)	0204/5	Rezistor
R201, R203, R204	10 k Ω	R0805	Rezistor
R202	4,7 k Ω	R0805	Rezistor
R205 – R212	100 Ω	R0805	Rezistor
R214	10 k Ω	CA6V	Odporový trimr
S1	WSG 3300	pin 2x3	Dvoupólový dvoupolohový přepínač
S2, S3	P-RE20S	pin 1x3, 1x2	Rotační kódér s tlačítkem
S4	P-M312 RT	pin 1x2	Tlačítko
SV1	MLW06G	ML6	ISP konektor (6 pinů)
T1	BSS83P	SOT23	Unipolární tranzistor (p-kanál)
TP1		pin 1x1	Testovací bod
X1	DS-241B		Napájecí konektor 2,1 mm
X2	USB1X90B PCB		USB B konektor
X3	SMA-PCB Z		SMA konektor