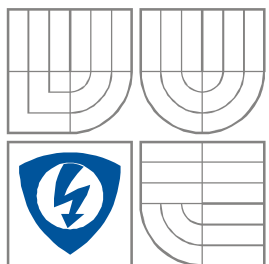


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

EXPERIMENTÁLNÍ RUŠIČKA PRO GSM SÍŤ

EXPERIMENTAL GSM JAMMER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jiří Charvát

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO, 2009

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Charvát
Bytem: Na Svobodě 448, Velká Bystřice, 783 53
Narozen/a (datum a místo): 26. června 1984 v Olomouci

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Experimentální rušička pro GSM síť

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. května 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato práce popisuje komunikaci v síti GSM, způsob jak ji rušit a návrh rušičky pro toto pásmo. Práce je hlavně zaměřena na návrh rušičky s volitelnou šířkou pásma rušení a volitelnou úrovní výstupního výkonu. Nastavení požadovaných parametrů rušičky se děje pomocí ovládacího panelu s displejem LCD. Je zde uveden podrobný popis jednotlivých funkčních bloků a propojení mezi nimi. V konečné fázi jsou uvedeny naměřené výsledky navržené rušičky.

Klíčová slova

GSM, rušička, buňková síť, BTS, uplink, downlink, ARFCN, timeslot, burst, VCO, PLL, AVR, XR2206, MAX2623, ADF4112, ADL5330, AD5263, MAR-8, HSMP3810, ADL5542, SLD-1026CZ

Abstract

This thesis describes GSM communication, the method of its jamming and design of a jammer for this band. This document is mainly focused on design of the jammer with the variable bandwidth of jamming and the variable level of output power. Requested parameters of jamming are set by a control panel with a LCD display. In this document there is a detailed description of each function block and connection between them. At the end of this thesis there are released measured results of designed jammer.

Keywords

GSM, jammer, cellular network, BTS, uplink, downlink, ARFCN, timeslot, burst, VCO, PLL, AVR, XR2206, MAX2623, ADF4112, ADL5330, AD5263, MAR-8, HSMP3810, ADL5542, SLD-1026CZ

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Experimentální rušička pro GSM sítě 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 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 autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Frýzovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	5
1 Komunikace v mobilním systému GSM	6
1.1 Frekvenční dělení přístupu	7
1.2 Časové dělení přístupu	8
2 Rušení signálu GSM-900	9
3 Funkce rušičky pro pásmo GSM-900.....	11
3.1 Blokové schéma rušičky.....	11
3.1.1 Napětím řízný oscilátor VCO.....	12
3.1.2 Smyčka fázového závěsu PLL	13
3.1.3 Dolní propust.....	14
3.1.4 Generátor trojúhelníku	15
3.1.5 Generátor šumu	17
3.1.6 Analogová sčítačka	17
3.1.7 Odbočnice.....	18
3.1.8 Výkonový zesilovač	20
3.1.9 Řízený zesilovač AGC	21
3.1.10 Mikrokontrolér AVR.....	22
3.1.11 Ovládací panel a LCD	25
4 Praktická realizace rušičky	27
4.1 Hardware	27
4.2 Software	30
5 Měření	32
5.1 Měření dílčích bloků	32
5.1.1 Řídící deska	32
5.1.2 Napětím řízený oscilátor	33
5.1.3 Zesilovač AGC	35
5.1.4 Výkonový zesilovač	36
5.2 Měření vlastností celého zařízení	37
Závěr	39
Literatura.....	40
Seznam příloh	41

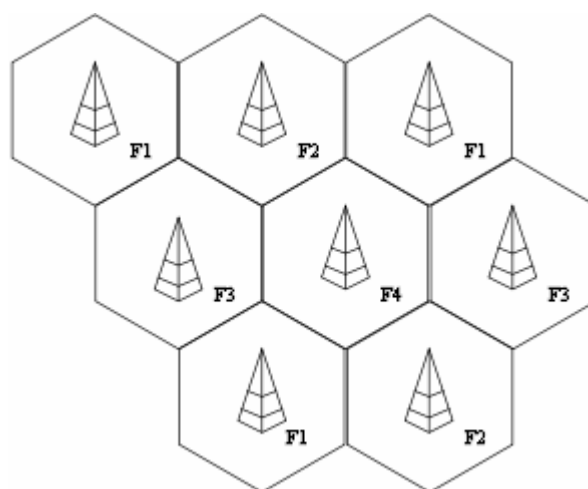
Úvod

Za normálních podmínek je snahou poskytnout uživatelům sítě GSM co nejkvalitnější pokrytí s minimálním výskytem „hluchých“ míst. Jsou však oblasti, jako například vojenské prostory, kde se pokrytí signálem záměrně z bezpečnostních důvodů nedělá. Tyto prostory mají velkou rozlohu a znemožnění komunikace je zde provedena absencí přípojných bodů. Existují také případy, kdy je potřebné nebo žádoucí znemožnit spojení pomocí sítě GSM. Důvody mohou být bezpečnostní (věznice, lomy, nemocnice, ovládání zařízení na dálku pomocí mobilního telefonu) nebo s ohledem na rušení (školy, konference, přijímací řízení). V těchto případech se hodí použít rušičku rádiového signálu GSM s omezeným dosahem místo manipulace s vysílači, která zabere spoustu času. Oproti tomu je instalace rušičky chvilková záležitost.

V tomto dokumentu je v kapitole 1 popsán princip komunikace v síti GSM a její specifikace pro pásmo 900MHz. Uvádí obsazené frekvenční pásmo a způsob přístupu mobilní stanice do sítě. Druhá kapitola uvádí způsob rušení. Ve třetí kapitole je rozebrán návrh rádiové rušičky s podrobným popisem všech dílčích částí. Čtvrtá kapitola pojednává o praktické realizaci dílčích bloků, propojení mezi nimi a vytvoření komunikace s uživatelem. V poslední páté kapitole jsou uvedeny naměřené výsledky jak jednotlivých bloků, tak i celého zařízení.

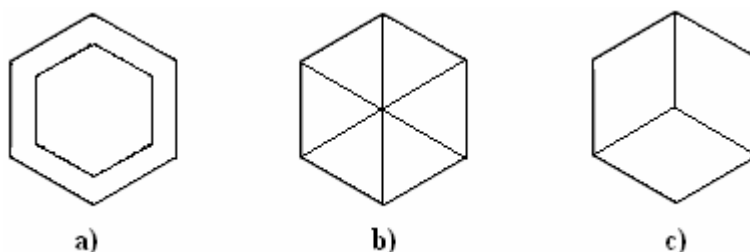
1 Komunikace v mobilním systému GSM

System GSM (Global System for Mobile communications, původně Groupe Spécial Mobile), je nejrozšířenějším standardem pro mobilní komunikaci. Jedná se o tzv. buňkový systém, což znamená, že mobilní stanice (telefon) komunikuje se sítí pomocí přípojného bodu, který se nazývá BTS (Base Transceiver Station). Každá buňka má přidělenou svou vlastní frekvenci. Tento způsob komunikace je velmi výhodný tam, kde máme přiděleno poměrně úzké frekvenční pásmo, máme zajistit spojení velkého počtu účastníků a navíc pokrýt spojením co největší oblast. Na obrázku 1.1 je ukázán způsob pokrytí území pomocí buňkového systému s využitím pouze čtyř nosných frekvencí. V reálných systémech je nutno použít více frekvencí, protože signál je rušivý až do vzdálenosti 6krát větší než je poloměr buňky. Stejnou frekvenci tak můžeme použít až za touto hranicí. Teoreticky je možno tímto způsobem pokrýt nekonečně velké území s využitím úzkého frekvenčního pásma.



Obr.1.1 Rozdělení území pomocí buněk
(převzato z [1])

System GSM je navržen pro maximální poloměr buňky až 35km. Tento dosah je prakticky využitelný pouze v řídkce osídlené oblasti. Ve městech a blízko nich je poloměr buněk výrazně menší (i do sta metrů). V některých případech jako například stadiony, koncertní haly, nádraží mají svou vlastní BTS. Pro zvýšení kapacity se může buňka dále rozdělit na sektory s odlišnými nosnými frekvencemi. Některé způsoby takového dělení ukazuje obrázek 1.2.

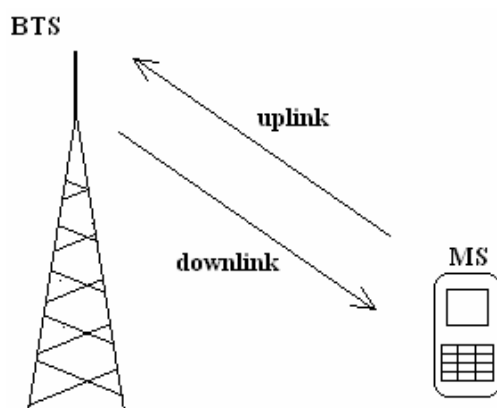


Obr.1.2 Možné způsoby dělení buněk na menší části, a) deštníkový, b,c) další možné rozdělení BTS do sektorů

Dělení buněk je výhodné jak z hlediska pokrytí většího počtu účastníků, tak i z hlediska ekonomického, kdy na jednom stožáru je umístěno více vysílačů. Obrázek 1.2a ukazuje

deštníkový způsob pokrytí, který je používán převážně ve městech. Jeden vysílač s velkým dosahem vykryvá „hluchá“ místa na hranicích menších buněk. Tím je zaručena stálá dostupnost sítě.

Pro přístup mobilní stanice do sítě je použito jak frekvenčního, tak i časového dělení. Frekvencí je děleno území do buněk, a také zajištění duplexní (oboustranné) komunikace. Směr od mobilní stanice (MS) k BTS se nazývá *uplink* a od BTS k mobilní stanici *downlink* jak naznačuje obrázek 1.3.



Obr.1.3 Duplexní komunikace mezi mobilní stanicí a BTS

1.1 Frekvenční dělení přístupu

Mobilní systém GSM v současné době využívá několik pásem. Jako první bylo v Evropě využito pásmo 900MHz označované jako P-GSM (Primary GSM) využívající pásmo 890MHz až 960MHz. Později bylo pásmo rozšířeno o 10MHz „dolů“ a toto pásmo je označované jako E-GSM (Extended GSM). S rostoucím počtem uživatelů již kapacita tohoto pásma nestačila a bylo zavedeno pásmo 1800MHz. Vyšší nosná frekvence dovoluje použít širší pásmo a tudíž spojit více účastníků. Celkově se v systému GSM používá více pásem, než jen tyto dvě. Jejich použití se liší na zemi, popřípadě světadíle, ve kterém je tento systém využíván. V tabulce 1.1 jsou uvedena jednotlivá frekvenční pásma i s duplexním rozdělením.

Tab.1.1 Některé pásma GSM

Systém	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]	Země kde se používá
GSM-850	824,0-849,0	869,0-894,0	Americký kontinent,...
P-GSM-900	890,0-915,0	935,0-960,0	Evropa, Asie, Austrálie, Jižní Amerika,...
E-GSM-900	880,0-915,0	925,0-960,0	Evropa, Asie, Austrálie, Jižní Amerika,...
DCS-1800	1710,0-1785,0	1805,0-1880,0	Evropa, Asie, Austrálie, Americký kontinent,...
PCS-1900	1850,0-1910,0	1930,0-1990,0	Evropa, Severní Amerika

Jak již bylo uvedeno výše, přístup k jednotlivým BTS je řešen pomocí frekvenčního multiplexu. Každé subpásmo (uplink, downlink) u P-GSM je rozděleno do 124 kanálů s šířkou pásma 200kHz. E-GSM má o 10MHz větší šířky subpásem, což představuje 50 kanálů navíc. Rozteč duplexních párů je 45MHz. Číslo kanálu se označuje jako ARFCN

(Absolute Radio Frequency Channel Number). Konkrétní frekvence daného duplexního páru se vypočte podle vzorců 1 až 3. Vzorec 1 platí pro P-GSM a vzorec 2 pro E-GSM. Výraz 3 pro uplink je společný oběma.

$$f_{uplink} = 890 + 0,2 \cdot n \quad [MHz] \quad 0 < n < 124 \quad (1)$$

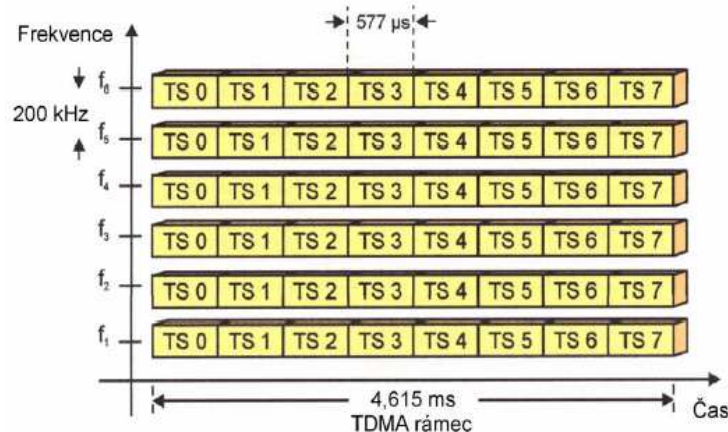
$$f_{uplink} = 890 + 0,2(n - 1024) \quad [MHz] \quad 975 < n < 1023 \quad (2)$$

$$f_{downlink} = f_{uplink} + 45 \quad [MHz] \quad n = ARFCN \quad (3)$$

1.2 Časové dělení přístupu

Pro zvýšení počtu účastníků je rovněž zaveden i časový multiplex. Každý ARFCN kanál je rozdělen do osmi tzv. *timeslotů*. To znamená, že stejnou frekvenci může využívat až 8 účastníků. Teoreticky lze tak dosáhnout až $8 \cdot 124 = 992$ účastnických kanálů.

Doba trvání jednoho timeslotu je $577\mu s$. Všech 8 timeslotů tvoří tzv. TDMA rámeček s dobou trvání $4,615ms$. Pro lepší představu je na obrázku 1.4 ukázáno jak frekvenční tak i časové dělení přístupu.



Obr.1.4 Frekvenční a časové dělení přístupu
(převzato z [2])

Do každého timeslotu se vkládají vlastní data, *bursty*. Obsahují signalizační, řídicí synchronizační, hovorová a další data. Délka burstu je $156,25\text{bitu}$. Užitečných je jen 147 bitů, ostatní jsou ochranné. Celkem jsou čtyři druhy burstů. Normální, korekční, synchronizační a přístupový. Jejich složení je na obrázku 1.5.

normální	t	57 x data	26 x train	57 x data	t	g	
frekvenční korekce	t	142 x nula				t	g
synchronizační	t	39 x bity	64 x training	39 x bity	t	g	
přístupový	et	41 x synchro	36 x bity	t	68,25b guard		

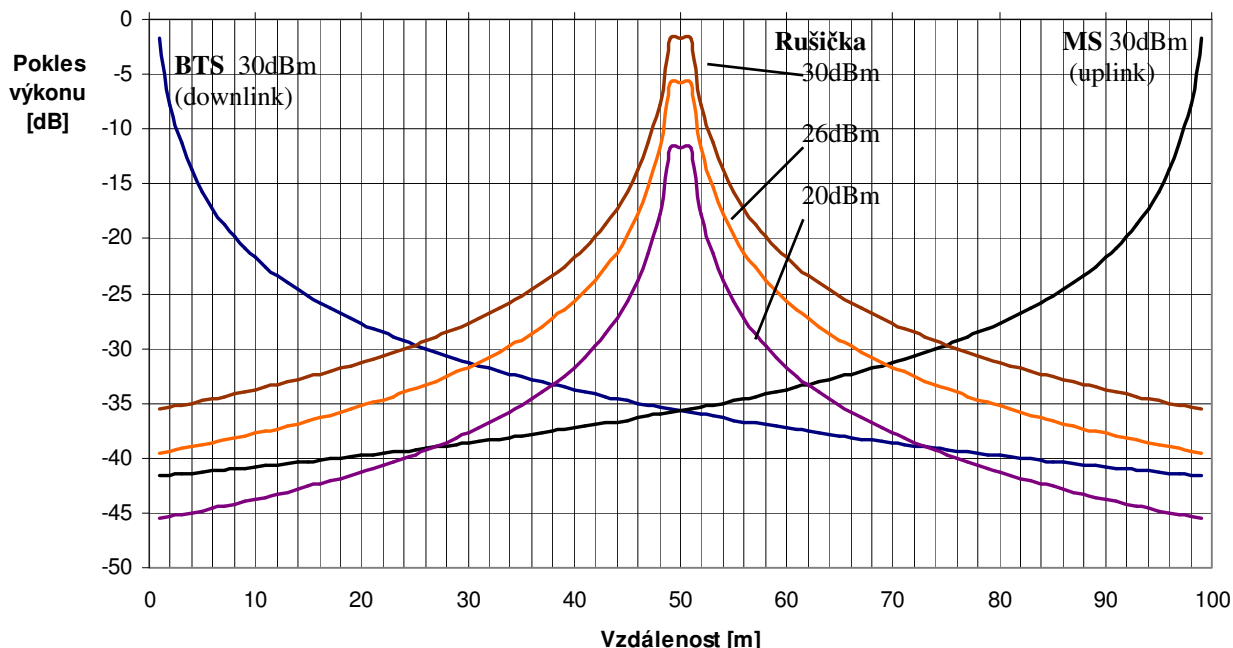
Obr.1.5 Typy burstů
(převzato z [3])

2 Rušení signálu GSM-900

Cílem rušení radiového signálu je vysílat cizí signál na stejné frekvenci jakou používá vysílač (přijímač), který chceme rušit. Pro rušené zařízení to pak vypadá, jakoby se výrazně zvýšila úroveň šumu a jeho přijímač pak není schopen rozpoznat užitečný signál. Abychom tímto způsobem rušili mobilní síť GSM, musíme zvýšit úroveň šumu v celém rozsahu kanálů ARFCN. To je z toho důvodu, že nevíme které kanály jsou v daném místě dostupné mobilní stanici. Kdybychom rušili pouze BTS s nejsilnějším signálem, mobilní stanice by se mohla přepojit na některou ze „slabších“ BTS a tím by vlastně k žádnému rušení komunikace nedošlo.

K rušení spojení mezi MS a BTS systému GSM-900 není nutné vysílat rušivý signál v celém pásmu (880-960MHz), ale stačí rušit pouze jedno ze subpásem (uplink, downlink). Tím bude vyřazena obousměrná komunikace a mobilní stanice tak nebude schopná se zaregistrovat do sítě. Z hlediska výkonu rušivého signálu je výhodnější vysílat rušení v pásmu pro uplink (925-960MHz), protože v tomto pásmu vysílá pouze mobilní stanice a to s výkonem maximálně jednotek wattů, zatímco BTS může mít výkon i několik desítek wattů. Předpokládá se tak umístění rušičky v blízkosti BTS.

Při použití rušení obou subpásem, lze dosáhnout stejného rušení i s výrazně nižším vysílacím výkonem rušičky. Pro ilustraci je zde uveden obrázek 2.1, který představuje pokles přijímaného výkonu s rostoucí vzdáleností. Jsou uvedeny průběhy pro různé vysílací výkony rušičky. Křivky jsou pouze orientační. Předpokládají šíření vln volným prostředím bez odrazů a izotropní zářiče.



Obr.2.1 Orientační pokles vysílacích výkonů v závislosti na vzdálenosti

Pro jednoduchost vysílají jak BTS tak i mobilní stanice se stejným výkonem 30dBm. Rušička je umístěna přesně mezi nimi. Pokud bude vysílat se stejným výkonem jako BTS (MS) bude potlačen jak uplink tak i downlink. Výkonová křivka rušičky je stále nad úrovní výkonu BTS (MS). Pokud snížíme výkon rušičky, v určité vzdálenosti bude již mít rušení

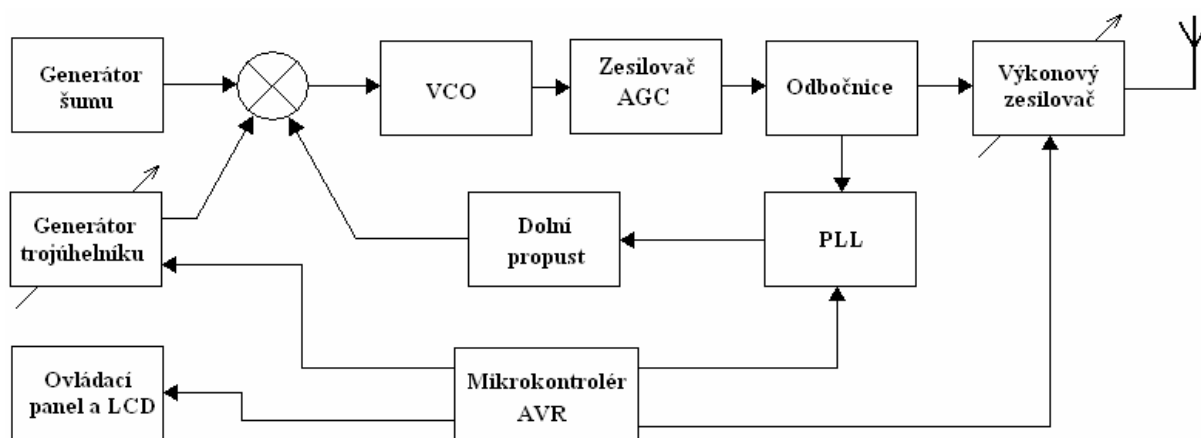
nižší úroveň než je BTS (MS) a k rušení nedojde. V reálných podmínkách však bude rušička blíže k jednomu z nich, předpokládejme že k mobilní stanici MS. Na obrázku 2.1 se tak výkonové křivky rušičky posunou více doprava a tím bude vyšší poměr rušivého signálu k signálu užitečnému od BTS (downlink). Stejného efektu rušení tak dosáhneme i s nižším výkonem. Z tohoto důvodu je výhodné vysílat rušivý signál pro uplink i pro downlink. Jednoduše řečeno pokud bude rušička blízko mobilní stanice, bude se rušit slabý signál od BTS. Pokud bude rušička blíže BTS, bude rušen slabý signál od mobilní stanice.

3 Funkce rušičky pro pásmo GSM-900

Rádiová rušička je vlastně obyčejný vysílač s frekvenční modulací. Frekvenční zdvih je dán požadovanou šířkou rušeného pásma. Tvar modulačního signálu má zpravidla trojúhelníkový průběh s přídatným zašuměním. Změnou amplitudy a stejnosměrné složky modulačního signálu lze měnit středovou (nosnou) frekvenci a počet rušených kanálů okolo nosné. Zde se nabízí použití mikroprocesoru jako řídicí jednotky, která na základě požadovaných rušených kanálů spočítá příslušné frekvence (viz kapitola 1.1) a podle toho nastaví modulační signál.

3.1 Blokové schéma rušičky

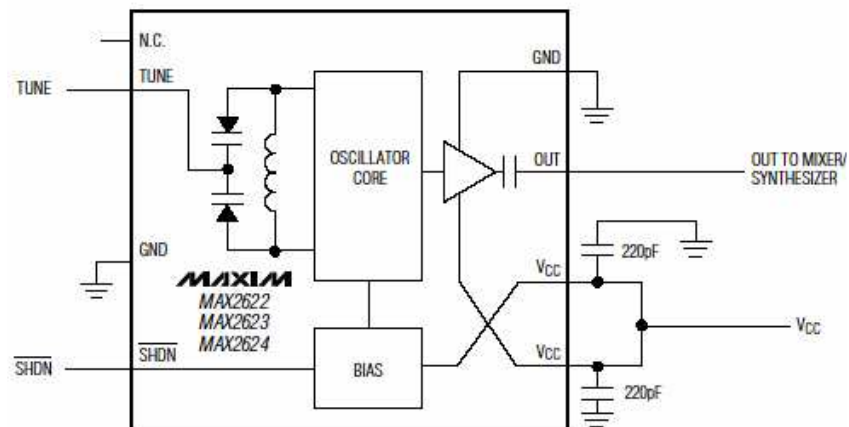
Funkční blokové schéma je na obrázku 3.1. Jádrem celé rušičky je napětím řízený oscilátor VCO (Voltage Controlled Oscillator). Stabilitu a přesné nastavení kmitočtu je zajištěno pomocí zpětnovazební smyčky s fázovým závěsem PLL (Phase Locked Loop), jehož referenční frekvence je odvozena od přesného krystalového oscilátoru. To zajistí nastavení přesné středové frekvence, okolo které se má rušit. Rozmítání je zde provedeno pomocí generátoru trojúhelníkového průběhu s nastavitelnou amplitudou. Tím je zajištěno rušení v požadované šířce pásma. Stejnosměrná složka z PLL a trojúhelníkový průběh jsou přivedeny do analogové sčítačky a tím se vytvoří modulační signál, který řídí VCO. K modulačnímu signálu se přidává aditivní šum k lepšímu rušení v daném pásmu. Teoreticky pokud by frekvence rozmítání byla stejná jako maximální přenosová rychlost ve standardním GSM (asi 270kbit/s čili frekvence rozmítání 270kHz), nebylo by nutné použít přídatný šum. Z výstupu VCO je pomocí odbočnice signál rozdělen na vstup fázového závěsu a nastavitelného výkonového zesilovače, který signál zesílí na potřebnou úroveň. Celé zařízení je řízeno pomocí mikrokontroléru AVR, který nastavuje smyčku fázového závěsu PLL (středovou frekvenci), amplitudu a frekvenci generátoru trojúhelníku (šířku rušeného pásma) a zesílení výkonového zesilovače (úroveň výstupního signálu). Nastavení parametrů rušičky uživatelem je zajištěno pomocí ovládacího panelu a LCD displeje.



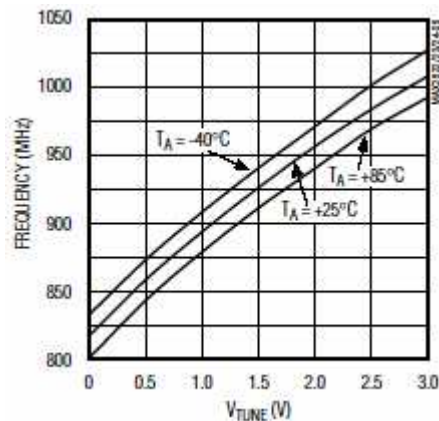
Obr.3.1 Blokové schéma rušičky GSM

3.1.1 Napětím řízný oscilátor VCO

Jako oscilátor je zde použit VCO firmy Maxim [4] MAX2623. Vnitřní blokové schéma i s doporučeným zapojením je na obrázku 3.2. Je přeladitelný zhruba od 800MHz do 1000MHz. Strmost ladění je velmi vysoká, až 100MHz/V, což je výhodné protože nepotřebujeme velká ladící napětí. Oscilátor je tak, ale více náchylný na rušení. Indukovaným rušivým napětím na vstupu bude výstupní frekvence „ujíždět“ od nastaveného kmitočtu. Pro tuto aplikaci rádiové rušičky je tahle skutečnost spíše příznivá. Závislost výstupní frekvence na ladícím napětí je na obrázku 3.3.



Obr.3.2 Vnitřní blokové schéma oscilátoru MAX2623
(převzato z [4])

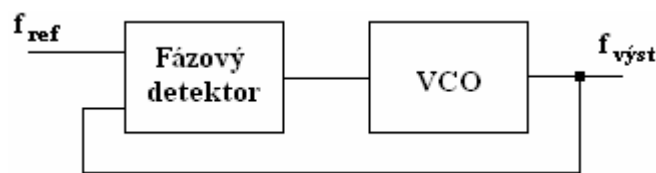


Obr.3.3 Převodní charakteristika VCO
(převzato z [4])

Velkou výhodou tohoto VCO je jeho dostupnost při návrhu prototypů. Výrobce dodává vzorky zdarma. Nevýhodou tohoto oscilátoru je poměrně malý výstupní výkon (-3dBm). Naproti tomu napětím řízené oscilátory firmy MicroCircuits [5] mají výstupní výkon až 7dBm, ale jsou podstatně dražší (až 30USD) a těžko dostupné.

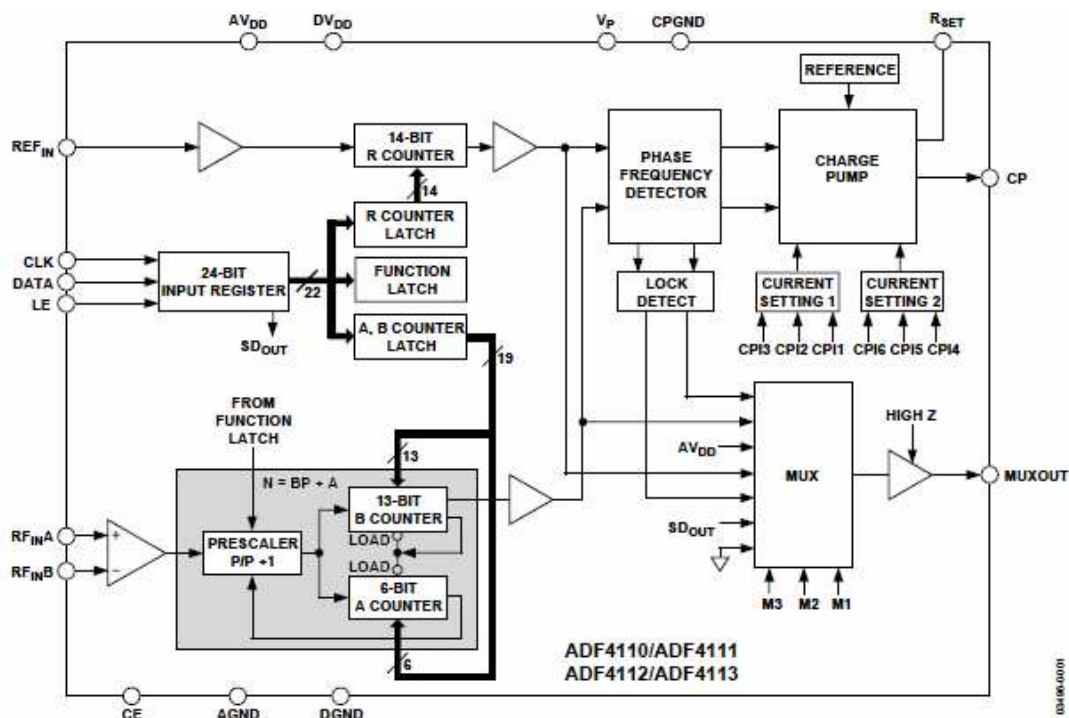
3.1.2 Smyčka fázového závěsu PLL

Fázový závěs slouží k přesné synchronizaci oscilátoru k nějaké referenční frekvenci. Na obrázku 3.4 je principiální schéma smyčky fázového závěsu PLL. Základem je fázový detektor, který porovnává fázi (frekvenci) dvou oscilátorů. Referenční kmitočet f_{ref} je velmi přesný (stabilní) a k němu se snažíme synchronizovat frekvenci VCO. Pokud jsou oba kmitočty stejné a mají i stejné fáze, na výstupu fázového detektoru je nulové chybové napětí. Jakmile dojde k nějaké odchylce, rozladění VCO, objeví se na výstupu fázového detektoru chybové napětí, které doladí frekvenci VCO tak, aby byla opět synchronní s referenčním kmitočtem. Pokud zařadíme do zpětné vazby děličku kmitočtu s poměrem dělení N , bude výstupní frekvence N -krát větší než je referenční kmitočet. Bude-li dělička programovatelná, získáme tak frekvenční syntézu.



Obr.3.4 Smyčka fázového závěsu

V tomto projektu je jako smyčka fázového závěsu použit kompletní frekvenční syntezátor ADF4112 firmy Analog Device [6]. Frekvenční rozsah tohoto obvodu je 200MHz až 3GHz. Vstupní citlivost je -15dBm při napájecím napětí 3V a vstupní impedanci 50Ω. Má v sobě integrován fázový detektor, dvě programovatelné děličky kmitočtu a detekce správného zavěšení smyčky. Výstup chybového napětí fázového detektoru je zde řešen pomocí nábojové pumpy s volitelným výstupním proudem. Převod proudu na napětí se děje pomocí filtru, který zároveň slouží jako dolní propust (viz kapitola 3.1.3). Vnitřní blokové schéma zapojení je na obrázku 3.5.

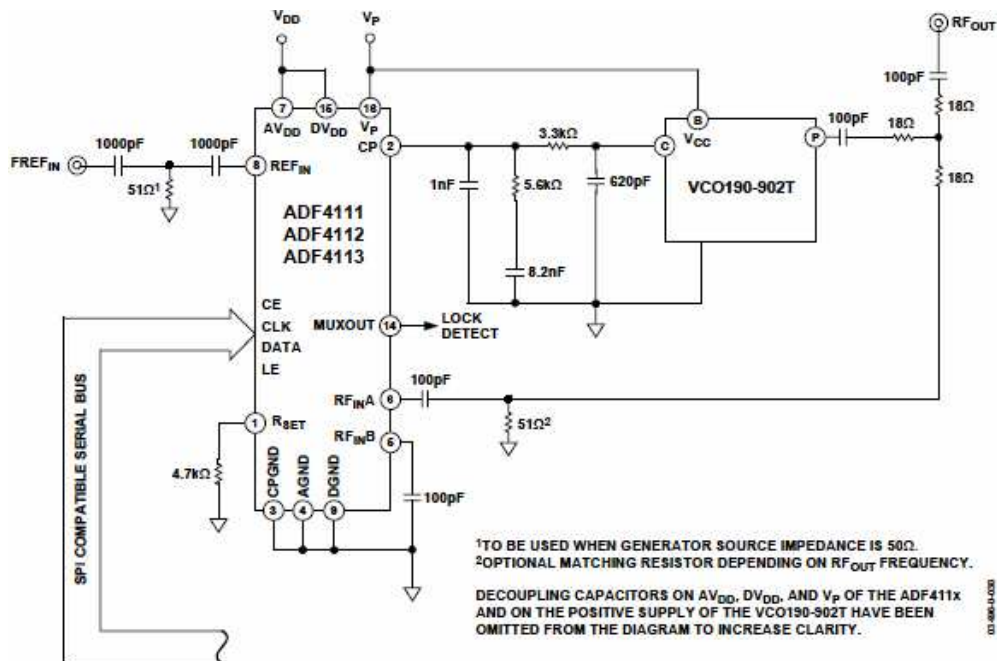


Obr.3.5 Vnitřní blokové schéma frekvenčního syntezátoru ADF4112

(převzato z [6])

Řízení obvodu se děje pomocí sériového rozhraní SPI. Dělicí poměry předděliček, výstupní proud nábojové pumpy a dalších parametrů obvodu se ukládají do čtyř 24bitových registrů. Struktura a význam jednotlivých bitů je uvedena v příloze A.

Pro jednoduchý návrh celé smyčky fázového závěsu poskytuje výrobce pomocný software ADIsimPLL [6], který podle zadaných parametrů (frekvence, frekvenční krok, strmost VCO, rozsah řídicího napětí VCO, atd.) vypočítá hodnoty potřebné k nastavení všech řídicích registrů. Podle zvoleného typu filtru (řád, aktivní/pasivní) spočítá hodnoty všech součástí. Výrobce doporučuje schéma zapojení lokálního oscilátoru základnové stanice GSM je na obrázku 3.6.

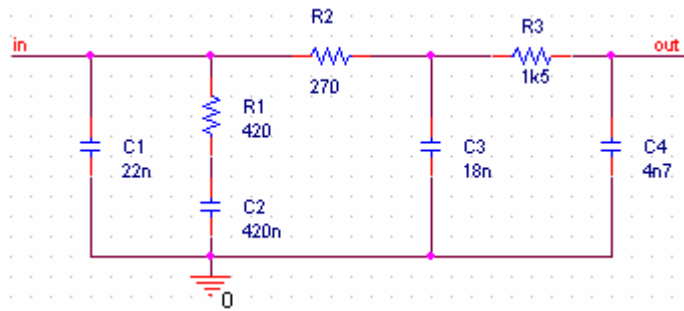


Obr.3.6 Výrobce doporučené schéma zapojení
(převzato z [6])

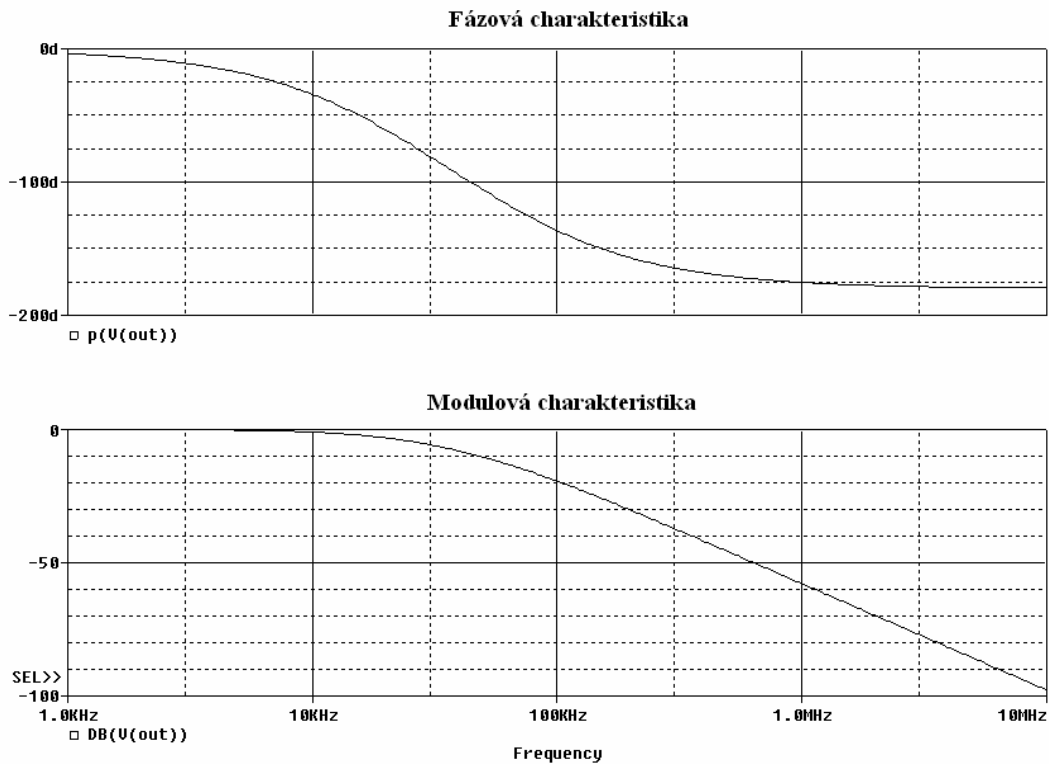
3.1.3 Dolní propust

K zajištění stabilní středové frekvence, je nutné, aby na vstup VCO bylo přivedeno stejnosměrné nebo jen pomalu se měnící napětí, které doladí případnou odchylku. Bude-li však výstupní frekvence VCO modulovaná, bude výstupní napětí fázového detektoru odpovídat modulačnímu signálu a nebude tak zajištěna potřebná stabilita. Proto se mezi fázový detektor a vstup VCO zařadí dolní propust, která propustí pouze pomalu se měnící složky a vyšší frekvence potlačí. Mezní frekvence tohoto filtru by měla být menší než má modulační signál.

Na obrázku 3.7 je zapojení dolní propusti podle doporučení výrobce. Průběhy fázové a modulové frekvenční charakteristiky získané simulátorem PSpice firmy Cadence [7] jsou na obrázku 3.8. Mezní frekvence pro uvedené hodnoty součástí je asi 20kHz se strmostí -40dB na dekádu. To zaručí dostatečné potlačení vysokofrekvenčních složek chybového napětí fázového detektoru.



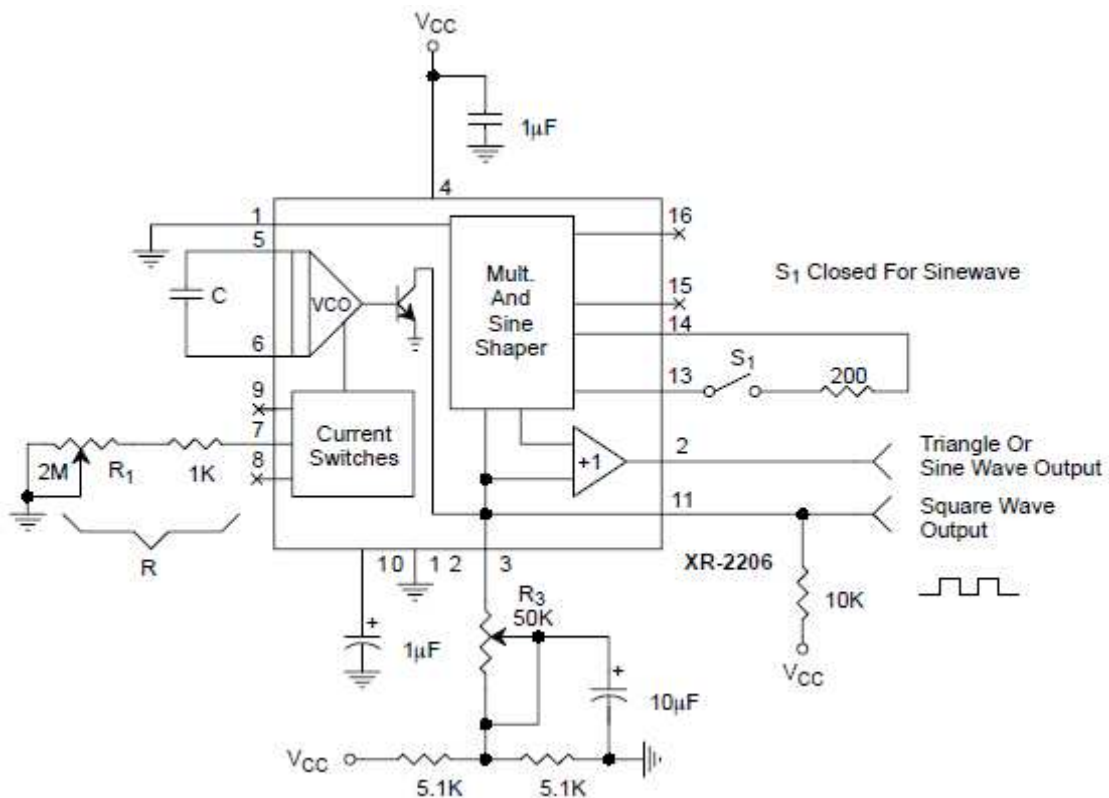
Obr.3.7 Schéma zapojení filtru fázového závěsu



Obr.3.8 Frekvenční charakteristiky filtru fázového závěsu

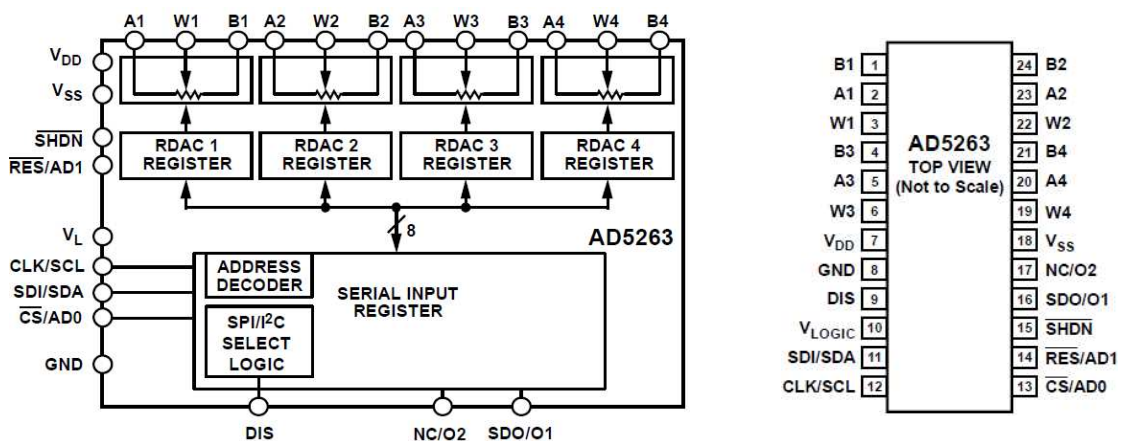
3.1.4 Generátor trojúhelníku

Jako tvar modulačního signálu je nejvhodnější trojúhelníkový průběh. Výsledné rušené pásmo tak bude rušeno rovnoměrně na všech frekvencích. Pro tento účel byl zvolen monolitický generátor funkcí XR2206 od firmy EXAR [13]. Generuje signál jak trojúhelníkového, tak i sinusového a obdélníkového průběhu. Poskytuje možnost modulací AM a FM, změny velikosti amplitudy, offsetu, střídá. Frekvenční rozsah je od 1Hz až po 1MHz, a to s minimální skreslením a poměrně stabilní amplitudou při přeladování. Na obrázku 3.9 je zobrazeno vnitřní blokové schéma a základní zapojení obvodu. Pro účely řízení frekvence a amplitudy generátoru trojúhelníku slouží vstupy 1,3(amplituda) a 7(frekvence). Pinem 3 nastavíme maximální potřebnou amplitudu a další změny její se děje pomocí pinu 1, který slouží k amplitudové modulaci. Tento způsob dovoluje tyto parametry řídit stejným napětím.



Obr. 3.9 Vnitřní blokové zapojení spolu se základním zapojením generátoru funkcí [převzato z 13]

Jak již bylo zmíněno, frekvence a amplituda je zde řízena stejnosměrným napětím. Zde se nabízí použití digitálního potenciometru AD5263 firmy Analog Devices. Obsahuje čtyři potenciometry řízené po sběrnici I2C nebo SPI v 256 krocích. Vyrábějí se v hodnotách 20k Ω , 50k Ω a 200k Ω . Maximální dovolený proud, který potenciometrem může protékat je 3mA, což pro tuto aplikaci postačuje. Vnitřní blokové schéma dvojitého digitálního potenciometru a zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 3.10.



Obr.3.10 Vnitřní struktura a zapojení vývodů dvojitého digitálního potenciometru (převzato z [6])

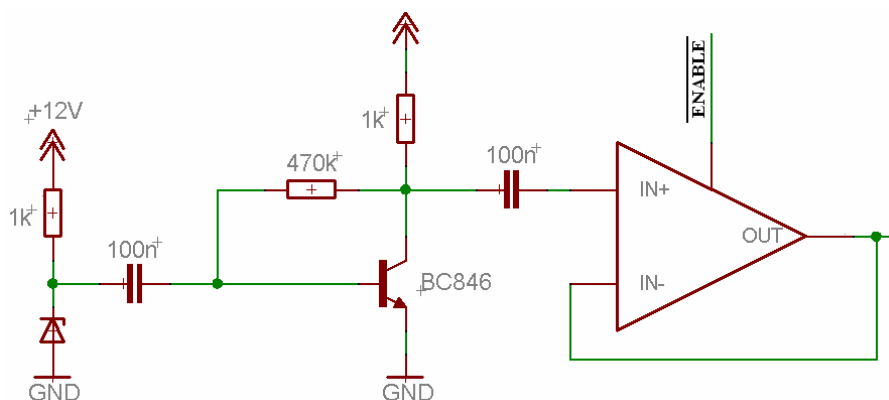
Adresace a způsob řízení pomocí sběrnice je ukázáno na obrázku 3.11. Nejprve se pošle byte s adresou obvodu na sběrnici. Ta se skládá s z části pevně stanovenou výrobcem a částí, kterou si zvolí uživatel pomocí pinů AD0 a AD1 přivedením logických 1 nebo 0. V instrukčním bytu se bity A0 a A1 volí potenciometr, který se má nastavit. Zapsáním log 1 na pozici RS se nastaví běžec potenciometru do poloviny rozsahu. Nastavením SD na log.1 dojde k „uspání“ obvodu a pomocí bitů O₁ a O₂ se řídí výstupní piny O₁ a O₂, kterými lze ovládat další zařízení. Zbýlými dvěma potenciometry bude možno nastavovat zesílení zesilovačů a nastavení stejnosměrné složky modulačního signálu pro VCO (viz. níže).

S	0	1	0	1	1	AD1	AD0	W	A	X	A1	A0	RS	SD	O1	O2	X	A	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	A	P
Slave Address Byte								Instruction Byte								Data Byte												

Obr.3.11 Způsob řízení digitálního potenciometru AD5263

3.1.5 Generátor šumu

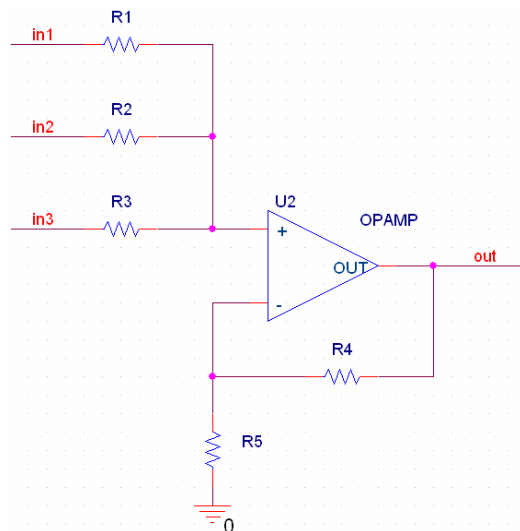
Pro vytvoření šumového signálu se zde využívá jevu, který vzniká na PN přechodu Zenerovy diody zapojené v závěrném směru. Vzniká zde lavinový šum. Zenerovy diody s vyšším závěrným napětím mají i vyšší úroveň šumu. Prakticky se používají diody s prahovým napětím okolo 5 až 7V. Zapojení takového generátoru šumu je na obrázku 3.12. Šum získaný z PN přechodu se vazebním kondenzátorem přivede na vstup tranzistoru, který funguje jako zesilovač. Pracovní bod tranzistoru je zde nastaven pomocí dvou rezistorů. Takto vzniklý signál se posílí napěťovým sledovačem, aby tranzistor nebyl příliš zatěžován a navíc tento napěťový sledovač slouží i jako vypínač generátoru šumu.



Obr.3.12 Schéma zapojení generátoru šumu

3.1.6 Analogová sčítačka

K vytvoření modulačního signálu je potřeba nějakým způsobem spojit signál z PLL, generátoru trojúhelníku a šumu. Sečtení všech tří signálů je provedeno pomocí operačního zesilovače ve funkci součtového zesilovače podle schématu na obrázku 3.13. Velikost výstupního napětí je odvozeno pomocí vzorců 4 až 7. Změnou velikosti odporu R₄ je možno součet napětí dále zesílit.



Obr.3.13 Schéma zapojení analogové sčítačky

$$I_{out} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (4)$$

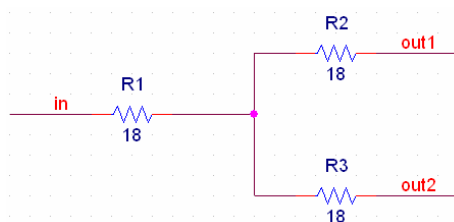
$$\frac{U_{out}}{R_4 + R_5} = \frac{U_1}{R_1 + R_5} + \frac{U_2}{R_2 + R_5} + \frac{U_3}{R_3 + R_5} \quad (5)$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = R \quad (6)$$

$$U_{out} = \frac{R_4 + R_5}{R + R_5} \cdot (U_1 + U_2 + U_3) = k \cdot (U_1 + U_2 + U_3) \quad (7)$$

3.1.7 Odbočnice

Vysokofrekvenční signál z výstupu VCO je potřeba rozdělit do dvou větví. Jedna vede k výkonovému výstupnímu zesilovači a druhá do zpětnovazební smyčky PLL. Jednou z variant je rozdělit výkon pomocí rezistorů jak naznačuje obrázek 3.14. Hodnoty odporů předpokládají použití v obvodu s charakteristickou impedancí 50Ω . Nevýhodou této odbočnice je její velký jak průchozí tak vazební útlum. Velmi výhodná je jeho velká širokopásmovost a frekvenční nezávislost.

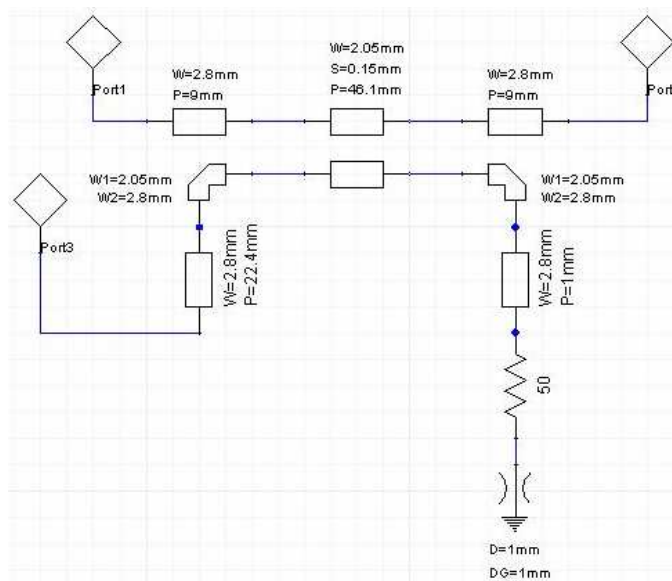


Obr.3.14 Odporový dělič výkonu

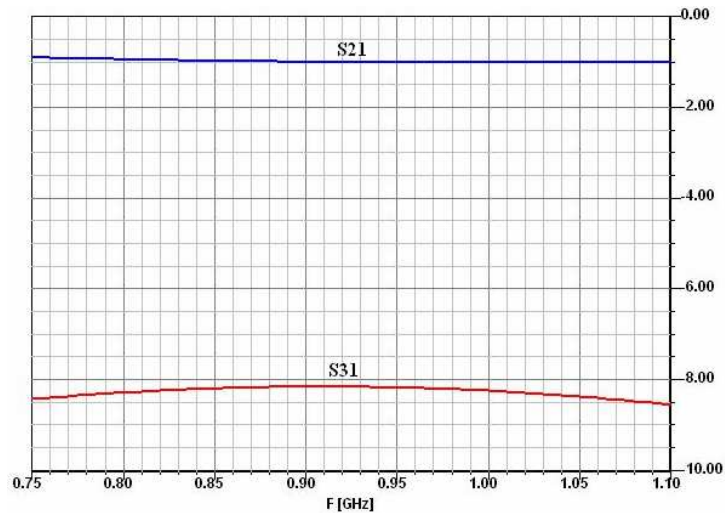
Další způsob rozdělení výkonu je použit čtvrtvlnného vázaného mikropáskového vedení jak naznačuje obrázek 3.15. V přímé větvi je signál utlumen málo, ve vázaném vedení je úroveň signálu zmenšena o vazební útlum. Na obrázcích 3.16 a 3.17 je ukázka simulace takovéto odbočnice simulátorem Ansoft Designer. Průchozí útlum je 1dB a výkon na odbočnici 8dB. Vezmeme-li v úvahu výstupní výkon VCO -3dBm, bude na výstupu přímé větve -6dBm a na výstupu odbočnice -11dBm. To s rezervou vyhovuje vstupní citlivosti fázového detektoru která je -15dBm. Nevýhoda tohoto řešení jsou velké rozměry pro pásmo 900MHz, výrazná frekvenční závislost a úzkopásmovost.



Obr.3.15 Mikropáskový dělič výkonu



Obr.3.16 Schéma mikropáskové odbočnice v programu Ansoft Designer

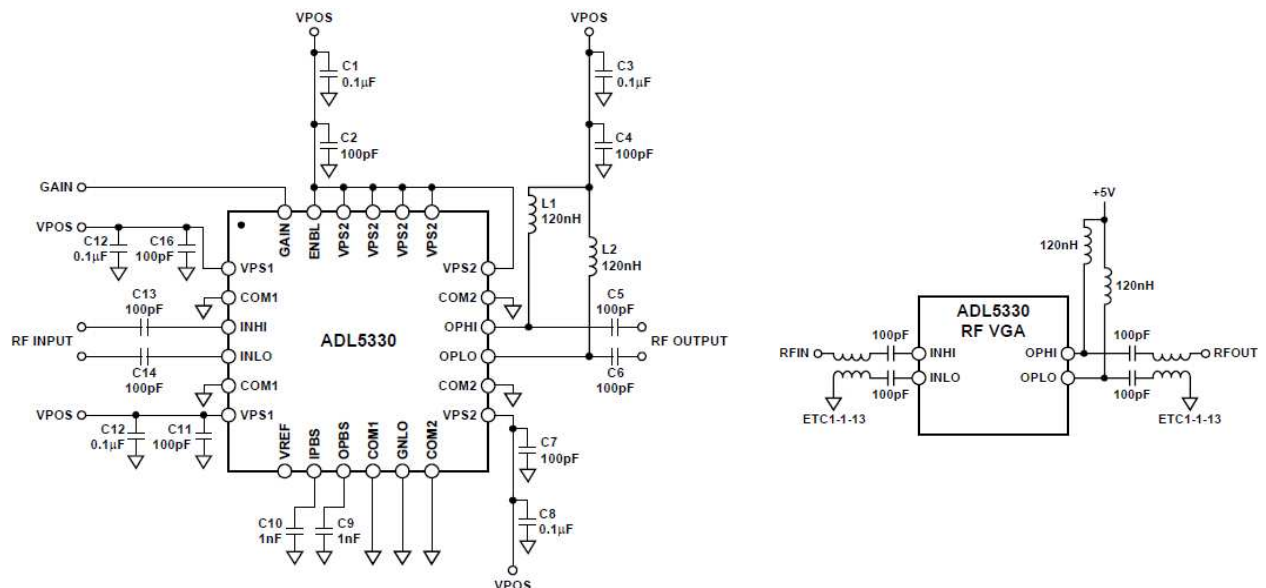


Obr.3.17 Průchozí a vazební útlum mikropáskové odbočnice

3.1.8 Výkonový zesilovač

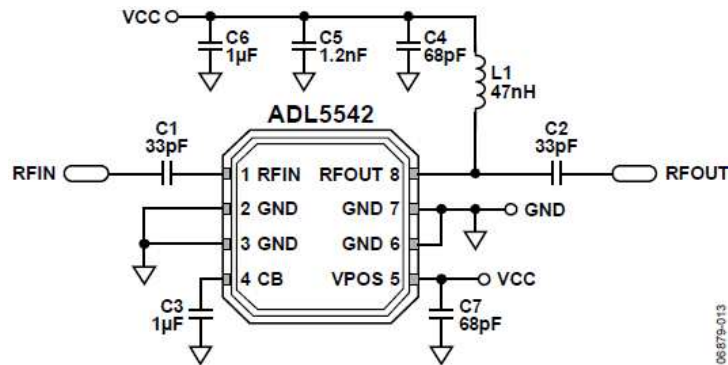
Aby byla úroveň rušivého signálu dostatečná k přerušení komunikace mobilní stanice se sítí, je nutné výstupní signál s VCO (odbočnice) potřebně zesílit. Výstupní výkon by měl být říditelný s maximální úrovní alespoň 30dBm. Bude tak možné volit si poloměr rušené oblasti.

V tomto zařízení je použit integrovaný vysokofrekvenční zesilovač firmy Analog Device ADL5330. Jeho zesílení je možno řídit stejnosměrným napětím, a to v rozsahu od -34dB do +22dB. Maximální výstupní výkon, který lze tímto obvodem získat je 27dBm. Na obrázku 3.18 je zobrazeno jeho základní zapojení. Jelikož má zesilovač symetrický vstup u výstup, je nutné pro lepší vlastnosti zařadit symetrizační transformátory (baluny).



Obr.3.18 Základní zapojení vysokofrekvenčního zesilovače se symetrizací (převzato z [6])

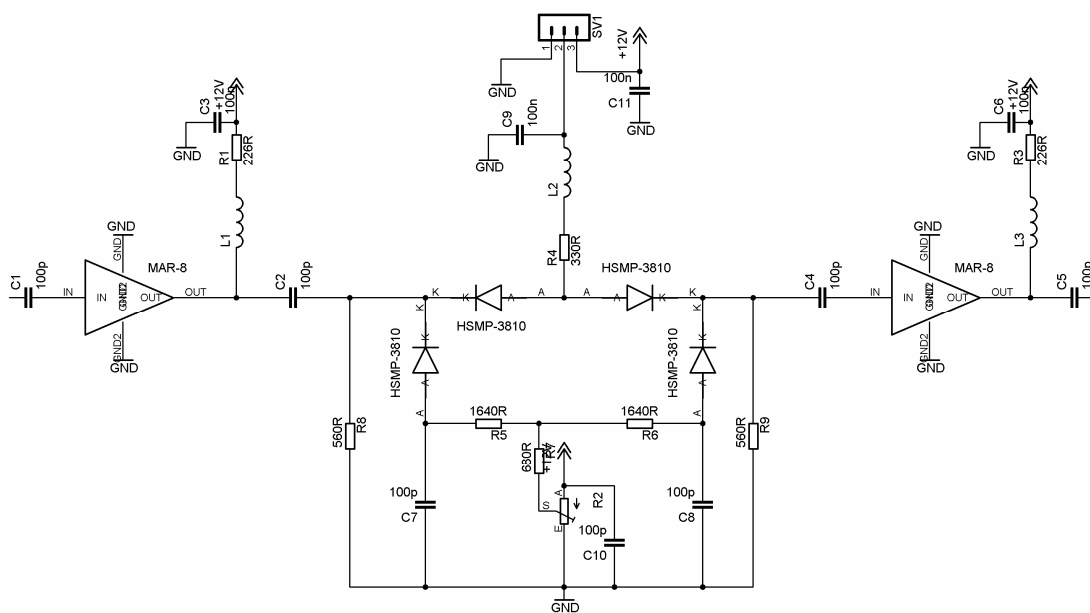
Protože zesílení tohoto zesilovače není dostatečné k zajištění potřebného výkonu na výstupu, je za něj zařazen ještě jeden zesilovač s pevným ziskem. K tomuto účelu se hodí například ADL5542. Tento zesilovač má pevné zesílení 20dB a frekvenční rozsah až do 6GHz. Jeho zapojení je zobrazeno na obr.3.19. Takto vzniklá kaskáda by měla teoreticky poskytnout zesílení řízené od -4dB do +42dB.



Obr.3.19 Zapojení zesilovače
(převzato z [6])

Jinou možností je použít vysokofrekvenční výkonový tranzistor. Takový je například tranzistor SLD-1026CZ od firmy RFMD [10]. Je vyroben technologií LDMOS a má velmi velký frekvenční rozsah od 10MHz až do 2700MHz s výstupním výkonem až 3W. V celém rozsahu frekvencí poskytuje výrobce podrobné vlastnosti i příklady zapojení. Maximální zisk na frekvenci 915MHz je 19dB.

3.1.9 Řízený zesilovač AGC

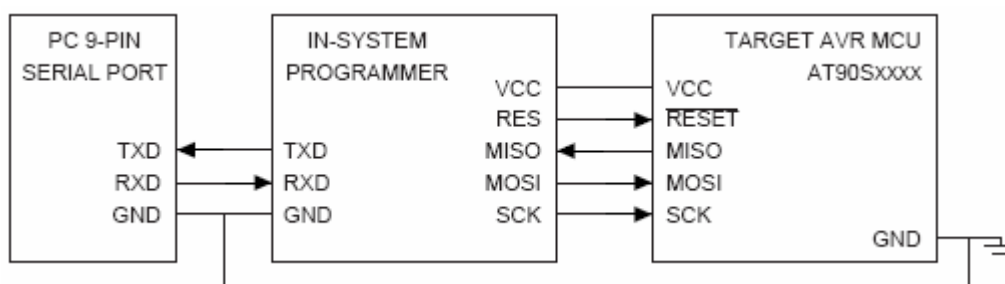


Obr.3.20 Schéma zapojení řízeného zesilovače

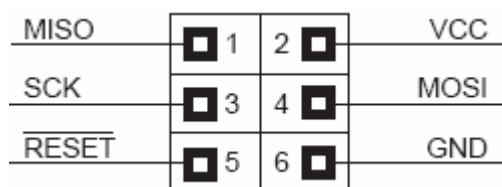
V důsledku rozmítání oscilátoru VCO dochází k poklesu úrovně výstupního výkonu. Čím bude rozmítané pásmo širší, tím nižší bude úroveň. Protože bude šířka pásma volitelná, bude se různě měnit i výkon. Proto je za oscilátor zařazen říditelný zesilovač, jehož zesílení se bude nastavovat podle použité šířky pásma. Tím se docílí konstantní úroveň na výstupu odbočnice bez ohledu jak široké pásmo se bude rušit. Schéma zapojení takového zesilovače je na obrázku 3.20. Skládá se ze dvou monolitických zesilovačů MAR-8 zapojených do kaskády. Mezi ně je vložen řízený atenuátor složený z PIN diod. Každý ze zesilovačů má zisk 22dB a minimální vložný útlum atenuátoru je 7dB. Tímto způsobem je možné řídit zesílení od 0 až do 37dB.

3.1.10 Mikrokontrolér AVR

Pro řízení celé rádiové rušičky je vhodné zvolit mikrokontrolér typu AVR. Ty mají tu výhodu, že patří do skupiny procesorů, které lze programovat přímo v zapojení a není nutné ho vyjmát a zapojovat do programátoru. Obecně se tento způsob programování nazývá ISP (In-System-Programmable). Programování probíhá pomocí 6 vodičů. MOSI (Master-Out-Slave-In) přenáší data z programátoru do mikrokontroléru, MISO (Master-In-Slave-Out) z mikrokontroléru do programátoru, SCK je hodinový signál, RESET a napájecí vodiče V_{CC} a GND. Napájecí vodiče jsou tu z důvodu společné země ale také proto, že programátor může být napájen přímo z programovaného zařízení nebo naopak. Blokové schéma propojení programátoru a mikrokontroléru je na obrázku 3.21. Výrobce doporučuje i rozmístění programovacích pinů v cílovém zařízení, které se má programovat. To je z důvodu kompatibility mezi různými programátory a cílovými zařízeními. Rozmístění takového konektoru je naznačeno na obrázku 3.22.



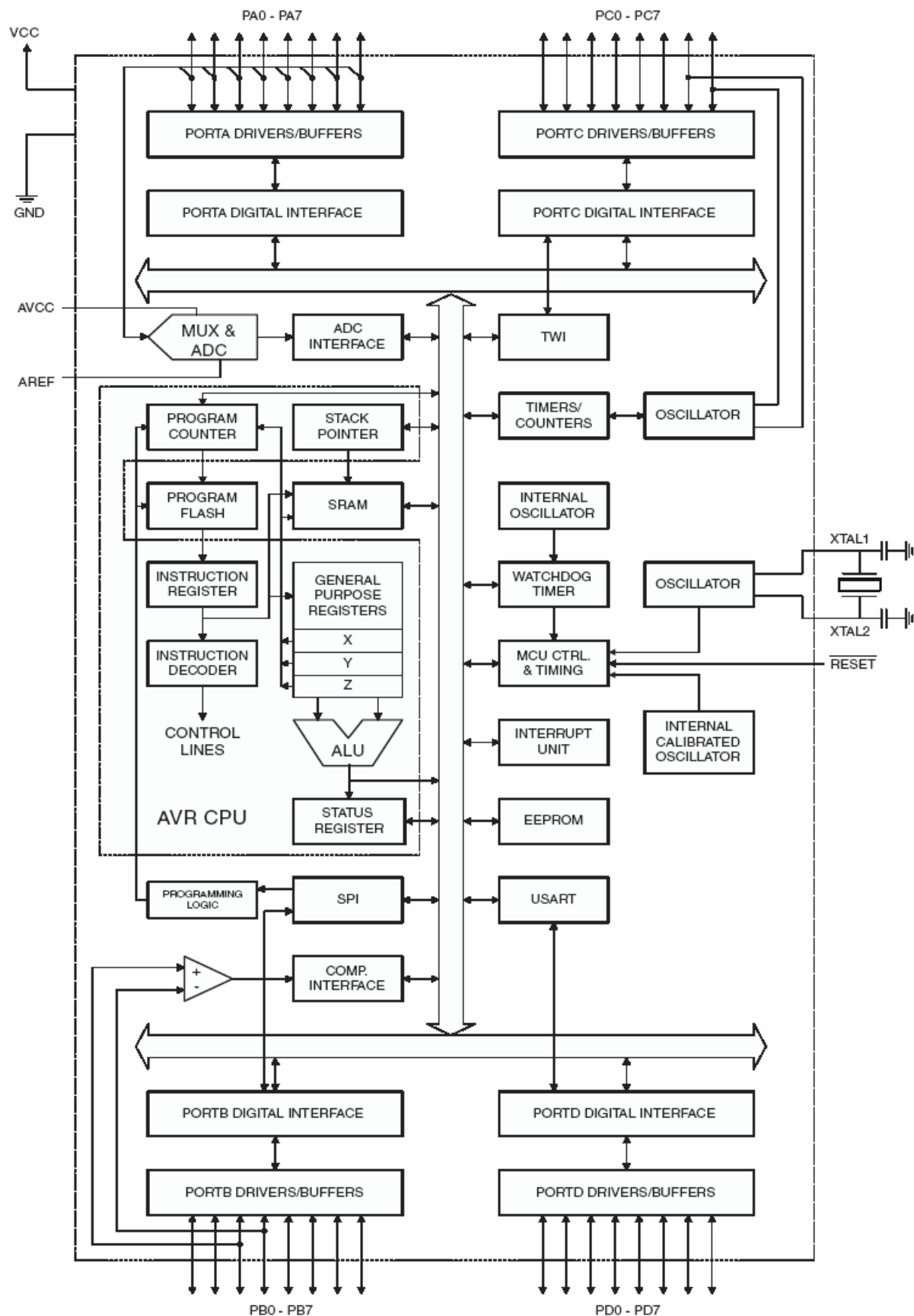
Obr.3.21 Propojení ISP programátoru a mikrokontroléru
(převzato z [11])



Obr.3.22 Doporučené zapojení ISP konektoru
(převzato z [11])

Programování probíhá tak, že programátor aktivuje vstupní signál $\overline{\text{RESET}}$ mikrokontroléru a tím spustí programovací mód. Ten odpojí všechny vnitřní periferie spojené s programovacími vodiči a zpřístupní SPI (Seriál-Peripheral-Interface) rozhraní. Dále mikrokontrolér čeká na zapsání instrukcí (vlastní programování).

Typ mikrokontroléru v této aplikaci je zvolen mikrokontrolér ATmega16 firmy Atmel [11]. Jeho vnitřní blokové schéma je na obrázku 3.23. Obsahuje 16kB paměti programu, 32 8bitových registrů, 10bitový AD převodník multiplexovaný na 8 kanálů, dva 8bitové čítače/časovače a jeden 16bitový, sériovou komunikaci UART, má vnitřní obvod pro komunikaci po sběrnici I2C, pulsní šířkovou modulaci PWM, analogový komparátor a další. S vnějším okolím mikrokontrolér komunikuje pomocí čtyř vstupně/výstupních portů(bran). Každý port má 8 bitů z nichž každý bit může být zvlášť definován jako vstupní nebo výstupní. Vývody portů jsou společné s ostatními periferiemi (např. port A a AD převodník, piny 0 a 1 portu D a sériové rozhraní UART, atd.). Pokud je některé z těchto zařízení využíváno, jsou tyto vývody odpojeny od portu a jsou propojeny s danou periferií. Není možné je pak využívat jako vstupně/výstupní piny.



Obr.3.23 Blokové schéma mikrokontroléru ATmega16
(převzato z [11])

3.1.11 Ovládací panel a LCD

K ovládní celé rušičky postačí tři tlačítka. Jedno tlačítko bude přepínat mezi parametry (hodnoty frekvencí a výstupní výkon) a pomocí zbylých dvou se bude měnit hodnota těchto parametrů.

Jako zobrazovací jednotku jsem zvolil LCD displej MC1602E-SYL [12] o rozměrech 16x2 znaky. Zvolený displej LCD obsahuje radič HD44780 firmy HITACHI [12], který je dnes již standardem. Obsahuje svou vlastní znakovou sadu, takže není nutné znaky „kreslit“ na display pomocí mikrokontroléru, ale stačí poslat pouze číslo znaku a radič ho sám vykreslí. Znaková sada je zobrazena na obrázku 3.24.

MSB \ LSB	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
xxxx0000	(1)			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	~	!
xxxx0001	(2)	!	1	A	Q	a	q									
xxxx0010	(3)	"	Z	B	R	b	r									
xxxx0011	(4)	#	3	C	S	c	s									
xxxx0100	(5)	\$	4	D	T	d	t									
xxxx0101	(6)	%	5	E	U	e	u									
xxxx0110	(7)	&	6	F	V	f	v									
xxxx0111	(8)	'	7	G	W	g	w									
xxxx1000	(1)	(8	H	X	h	x									
xxxx1001	(2))	9	I	Y	i	y									
xxxx1010	(3)	*	:	J	Z	j	z									
xxxx1011	(4)	+	;	K	L	k	l									
xxxx1100	(5)	,	<	L	¥	l	l									
xxxx1101	(6)	-	=	M	J	m	j									
xxxx1110	(7)	.	>	N	^	n	^									
xxxx1111	(8)	/	?	O	_	o	_									

Obr.3.24: znaková sada LCD displeje
(převzato z [12])

Tento displej obsahuje i podsvícení LED diodami. LED diody není nutné chránit vnějšími rezistory, protože ty jsou již obsaženy v modulu. Intenzita světla se řídí velikostí řídicího napětí, takže je možné ho řídit mikrokontrolérem pulsně-šířkovou modulací (PWM) a šetřit tak případné napájecí baterie.

Tab.3.1 Význam jednotlivých bitů LCD displeje

Číslo pinu	Název pinu	Význam	Číslo pinu	Název pinu	Význam
1	GND	Společná zem	9	DB2	Datový bit 2
2	Vcc	Napájení +5V	10	DB3	Datový bit 3
3	Vee	Nastavení kontrastu	11	DB4	Datový bit 4
4	RS	Data (H) / Instrukce(L)	12	DB5	Datový bit 5
5	R/W	Čtení / Zápis	13	DB6	Datový bit 6
6	E	Povolení komunikace	14	DB7	Datový bit 7
7	DB0	Datový bit 0	15	A	Anoda LED
8	DB1	Datový bit 1	16	K	Katoda LED

Ke komunikaci mikrokontroléru s LCD slouží piny 4 až 14. Piny 4,5,6 jsou řídicí signály. Pin 4 RS (Register select) určuje, zda se jedná o instrukci nebo data. Pin 5 R/W (Read/Write) vybírá čtení nebo zápis dat či instrukcí. Pin 6 E (Enable) spouští vykonání instrukce. Piny 7 až 14 jsou piny datové, které slouží k přenosu dat nebo instrukcí. LCD podporuje dva druhy komunikací. Buď pomocí 8 datových (DB0 až DB7) nebo 4 datových bitů (DB4 až DB7). V našem zařízení je použita 4bitová komunikaci. Zbývající datové piny (DB0 až DB3) jsou připojeny ke GND. Při 4bitové komunikaci se nejprve odešle horní polovina bytu a poté dolní polovina. Pro navázání komunikace mikrokontroléru s LCD je nutné nejprve do LCD poslat řídicí slova (byty), které nastaví počet datových bitů, rozlišení displeje, posun kurzoru, zapnutí nebo vypnutí kurzoru, zapnutí displeje. Nakonec se celý displej smaže, nastaví kurzor do levého horního rohu a LCD je připraveno pro užívání. Jak vypadají jednotlivá řídicí slova a jejich význam je uvedeno v tabulce 3.2. Tabulka 3.3 uvádí příklad posloupnosti instrukcí pro nastavení displeje pro 4bitovou komunikaci, 2 řádky, rozlišení 5x8 znaků, pohyb kurzoru doprava, vypnutí zobrazení kurzoru, smazání displeje a nastavení kurzoru do levého horního rohu. Signál E (povolení) zde není uveden, protože ten se nastavuje až po nastavení všech bitů (řídicích i datových). Tím dojde k vykonání instrukce (nebo zobrazení znaku).

Tab.3.2: Řídicí slova pro zahájení komunikace s LCD

RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0	Význam
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Nastaví 4bitovou komunikaci
0	0	0	0	1	0	N	F	x	x	Rozlišení N=0/1:1řádek/2řádky F=0/1:5x8znaků/5x10 znaků
0	0	0	0	0	0	0	1	ID	S	Pohyb kurzoru ID=0/1: doleva/doprava; S=0/1: posun displeje/bez posuvu
0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	D=0/1:zap/vyp displeje; C=0/1:zap/vyp kurzoru; B=0/1: blikání/svícení kurzoru
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Vymazání displeje

Tab.3.3 Příklad sekvence instrukcí pro nastavení displeje

RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0	Význam
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4bitová komunikace
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2 řádky; rozlišení znaku 5x8
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Pohyb kurzoru doprava bez posuvu displeje
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	Vypnutí zobrazení kurzoru
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Vymazání displeje

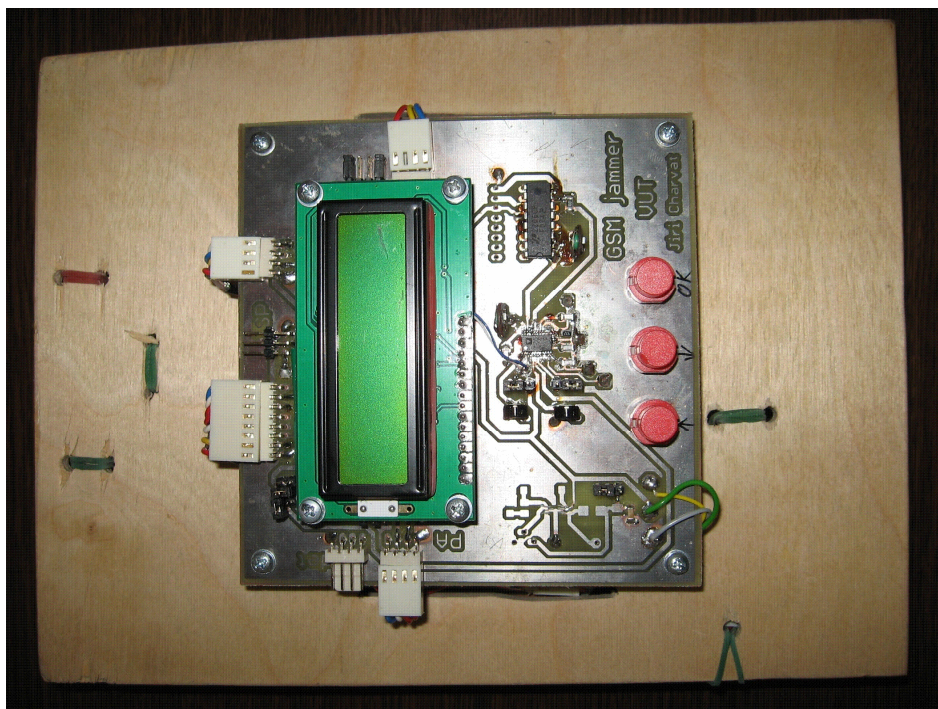
4 Praktická realizace rušičky

Při praktické realizaci byla řešena zvláště řídicí a zvláště vysokofrekvenční část. Všechny desky plošných spojů jsou z oboustranně plátovaného materiálu FR4. Vysokofrekvenční části jsou navíc umístěny do plechových krabiček kvůli stínění. Obslužný software mikrokontroléru řídí všechna nastavení parametrů rušení podle uživatelského menu. Pro interakci s uživatelem je použit displej spolu se třemi tlačítky.

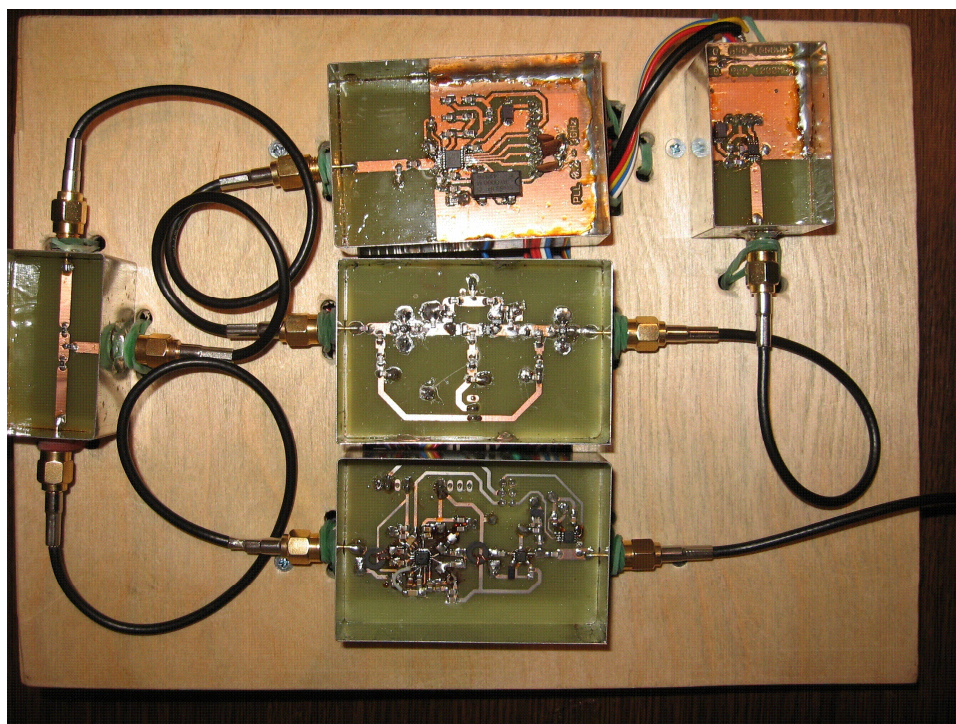
4.1 Hardware

Do řídicí části jsou zahrnuty bloky generátoru trojúhelníkového průběhu, generátor šumu, analogová sčítačka, mikrokontrolér AVR a je zde nachystaný prostor pro měnič napětí z 5 na 12V potřebných k napájení. Řízení prakticky celého zařízení (s výjimkou PLL) probíhá pomocí stejnosměrných napětí, jejichž velikost nastavujeme pomocí čtyřkanálového digitálního potenciometru AD5263 (viz výše) nebo pulzní šířkovou modulací uvnitř mikrokontroléru. Těmito pěti řídicími signály lze nastavovat frekvenci, amplitudu a stejnosměrnou složku generátoru trojúhelníku a zesílení obou vysokofrekvenčních zesilovačů. Deska řídicí části dále obsahuje několik přepínačů (jumperů) k možnosti volby způsobu řízení (např. nastavení středové frekvence pomocí PLL nebo „natvrdo“ stejnosměrným předpětím), a dále k volbě rozsahu velikostí řídicích napětí (5/12V). Jsou zde připraveny vstupy pro případné měření analogového signálu nebo digitálního popřípadě čítání impulsů. K vnějším periferiím se řízení připojuje pomocí plochých kabelů, a to s každou periferií zvláště kvůli případné modifikaci. Schéma zapojení a motivy desky plošných spojů jsou v příloze B.

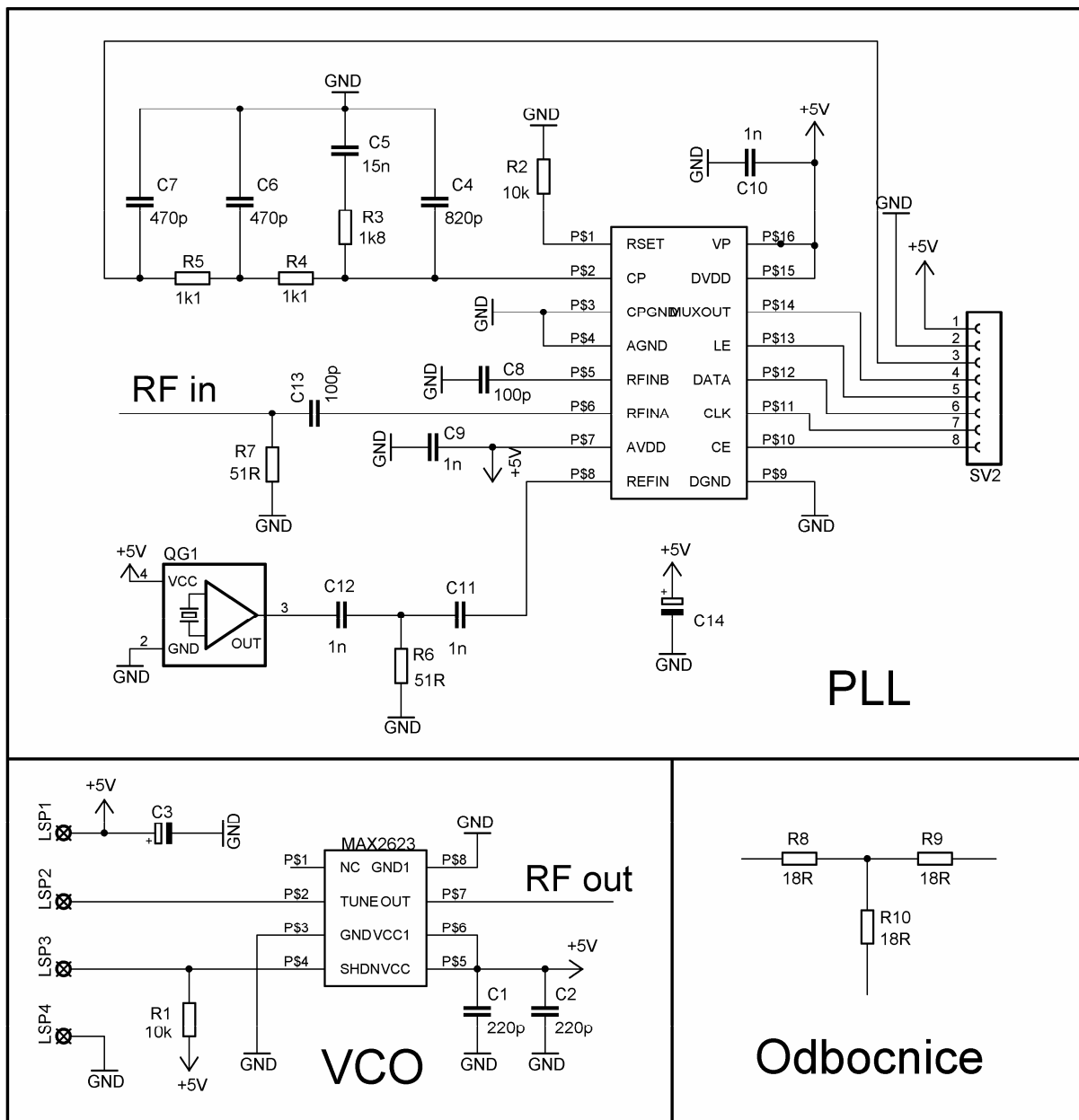
Vysokofrekvenční část je řešena blok po bloku samostatně z důvodu snadného měření a případnou jednoduchou změnu bloků. Patří sem VCO, oba zesilovače, fázový závěs PLL s dolní propustí a odbočnice. Zapojení všech těchto bloků odpovídá doporučením výrobce popsaným výše. Na obrázku 4.3 jsou zobrazena schémata zapojení bloků PLL, VCO a děliče výkonu. Obrázky 4.4 až 4.6 ukazují motivy plošných spojů k příslušným schématům. Schémata a obrazce plošných spojů zesilovačů jsou uvedeny v příloze C. Celkově sestavená rušička je ukázána na obrázcích 4.1 a 4.2. Řídicí deska spolu s displejem a ovládacími tlačítky je na obrázku 4.1 a vysokofrekvenční část na obrázku 4.2



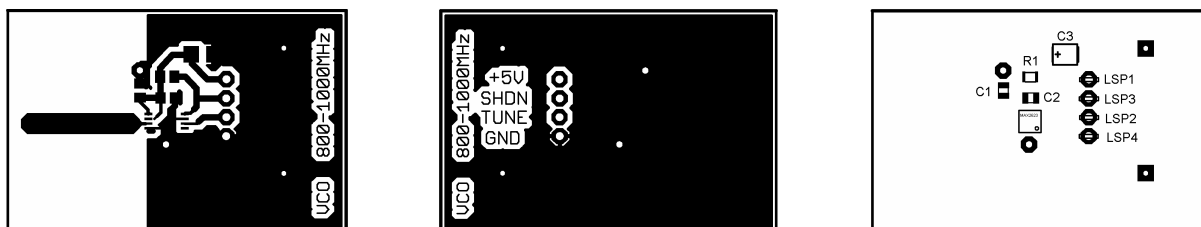
Obr.4.1 Řídící část rušičky



Obr.4.2 Vysokofrekvenční část rušičky



Obr.4.3 Schéma zapojení bloků PLL, VCO a děliče výkonu

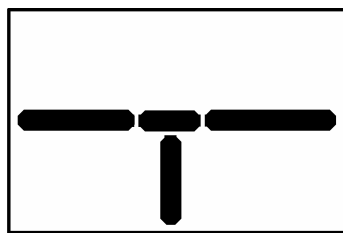


strana součástek

strana spojů

rozmístění součástek

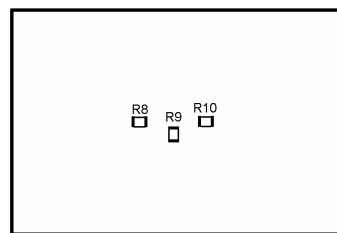
Obr.4.4 Motiv desky plošných spojů VCO, rozměry 45x30mm



horní strana

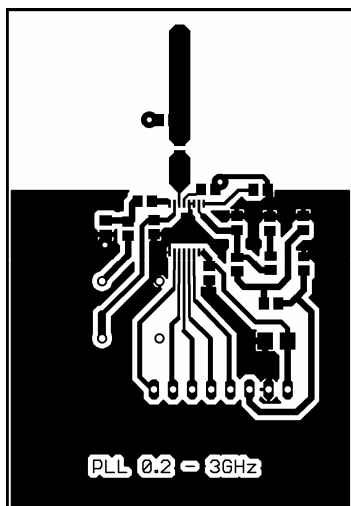


dolní strana

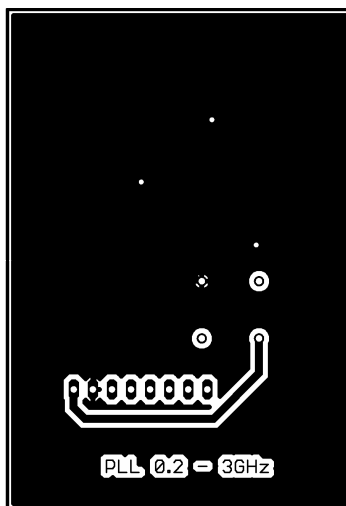


rozmístění součástek

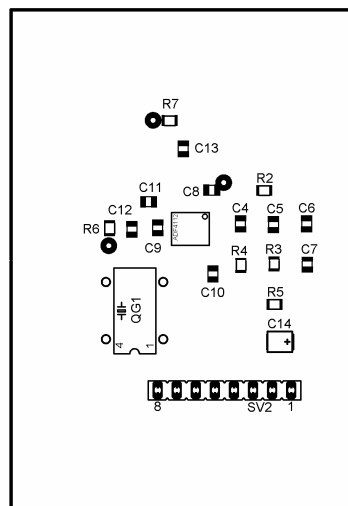
Obr.4.5 Motiv desky plošných spojů děliče výkonu, rozměry 45x30mm



strana součástek



strana spojů



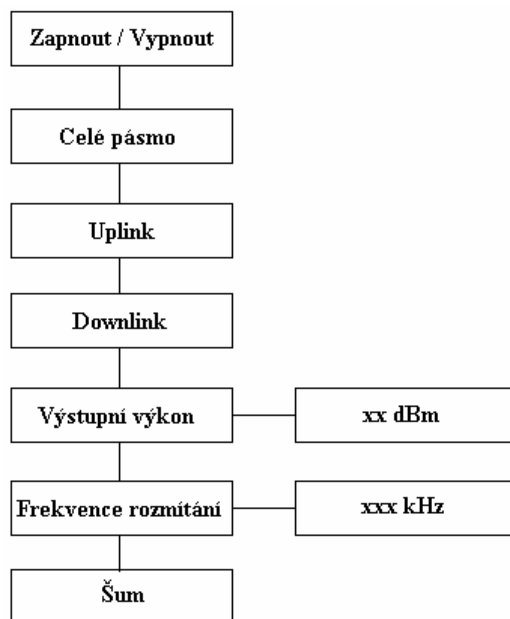
rozmístění součástek

Obr.4.6 Motiv desky plošných spojů fázového závěsu, rozměry 67x46mm

4.2 Software

Obslužný software mikrokontroléru slouží jako rozhraní mezi uživatelem a nastavením parametrů rušení. Všechny nastavené hodnoty se ukládají do vnitřní paměti EEPROM v mikrokontroléru. Při zapnutí přístroje se načtou hodnoty uložené při poslední změně nastavení v předchozího provozu. Obslužné menu přístroje má strukturu podle obrázku 4.7. Pohyb v menu se děje pomocí dvou tlačítek *nahoru/dolů* a potvrzovacího tlačítka *OK*. Položka **Zapnout / Vypnout** obsluhuje zesilovače. Připojíme-li napájení přístroje, načtou se z posledního nastavení, ale zesilovače zůstávají vypnuté. Pokud zvolíme **Zapnout**, parametry zesilovačů se nastaví podle původních hodnot uložených v EEPROM. Dále následují volby rušeného pásma. Buďto **Celé pásmo**, **Uplink** nebo **Downlink**. Položkou **Výstupní výkon** se volí velikost úrovně výstupního výkonu v jednotkách dBm. **Frekvence rozmitání** nastavuje

rychlost změny frekvence v daném pásmu tzv. sweep. **Šum** přidává k modulačnímu signálu (trojúhelníku se stejnosměrnou složkou) ještě náhodný signál.



Obr.4.7 Obslužné menu přístroje

5 Měření

V této kapitole jsou uvedeny naměřené vlastnosti navržených a postavených bloků uvedených v blokovém schématu v kapitole 3.1. Jsou zde uvedeny případné řešení některých nedostatků. Dále jsou uvedeny konečné vlastnosti a dosah rušení celého sestaveného přístroje.

5.1 Měření dílčích bloků

Během stavby jednotlivých bloků probíhalo i jejich kontrolní měření. Přestože všechny byly stavěny podle doporučení výrobce, docházelo někdy i ke značným rozdílům oproti teoretickým předpokladům. V následujících podkapitolách je uveden podrobnější popis vlastností každého bloku zvlášť.

5.1.1 Řídící deska

Řídící deska obsahující, všechny bloky potřebné pro řízení vysokofrekvenčních částí, pracovala bez větších problémů. Jedním z nedostatků byla u generátoru trojúhelníkového průběhu nemožnost nastavit minimální úroveň výstupního signálu na nulu při nesymetrickém napájecím napětí. Tento problém byl vyřešen zavedením záporným stejnosměrným napětím na vstup analogové sčítačky, které toto nenulové napětí kompenzoval. Záporné napětí bylo získáno použitím obvodu MAX232 jako napěťového invertoru a následnou filtrací výstupního napětí.

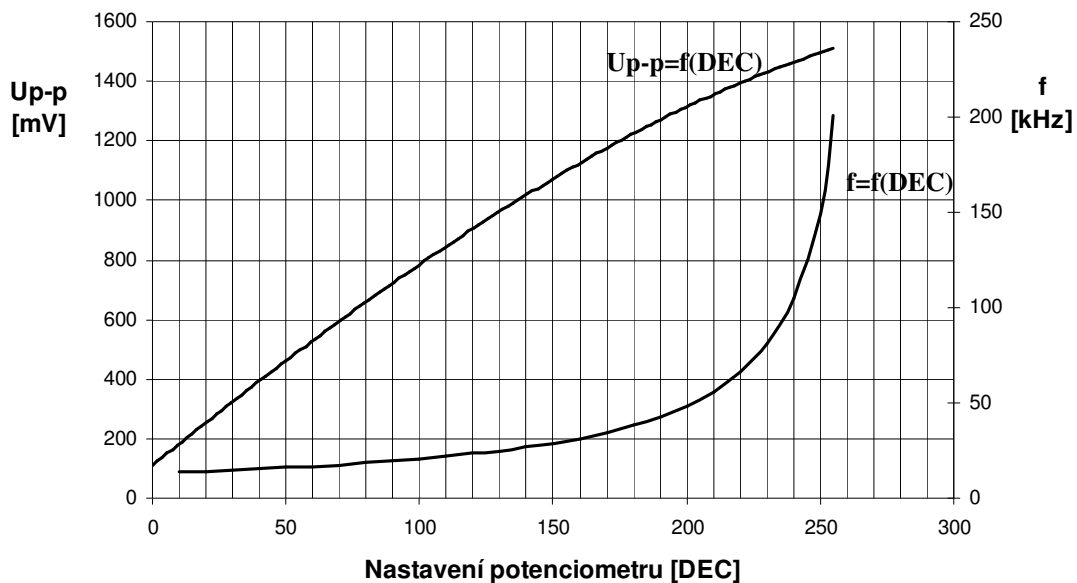
Druhý problém nastal při řízení zesílení zesilovače AGC, obsahující říditelný atenuátor z PIN diod, pomocí digitálního potenciometru. Odběr řídicího napětí zesilovače byl asi 18mA, zatímco potenciometr mohl maximálně poskytnout pouze 3mA. Řešení tohoto problému spočívalo v posílení řídicí cesty napěťovým sledovačem.

Schémata zapojení uvedených úprav jsou uvedeny v příloze B v celkovém zapojení řídicí části. Na motivu desky však již uvedeny nejsou, protože byly řešeny samostatně na univerzální desce a k řídicí desce poté připojeny pomocí kabelů.

Naměřenou závislost nastavení frekvence a napětí špička-špička trojúhelníkového signálu za analogovou sčítačkou je uvedeno v tabulce 5.1 a grafu 5.1. Je zřejmé že nastavení frekvence je silně nelineární a proto je vhodné použít aproximaci polynomem, podle kterého se bude požadovaná frekvence přepočítávat. Nastavení frekvence není ale tak kritické jako nastavení napětí, které řídí šířku rozmítaného pásma VCO. Tohle napětí by mělo mít nejlépe lineární závislost. I zde však bude nutný určitý přepočet.

Tab.5.1 Závislost frekvence a rozkmitu napětí generátoru trojúhelníku

DAC	f [kHz]	Up-p [mV]	DAC	f [kHz]	Up-p [mV]
0	13,30	125	140	28,00	1037
10	14,00	172	150	30,00	1000
20	14,58	234	160	32,90	1140
30	15,13	344	170	36,40	1180
40	15,80	422	180	40,20	1220
50	16,40	430	190	45,00	1270
60	17,00	500	200	51,80	1320
70	18,20	600	210	60,00	1340
80	19,00	680	220	72,00	1400
90	20,28	750	230	90,00	1450
100	21,30	760	240	120,00	1470
110	22,60	850	250	179,00	1490
120	24,20	917	255	223,00	1500
130	25,80	980			



Graf 5.1 Závislost frekvence a rozkmitu napětí generátoru trojúhelníku

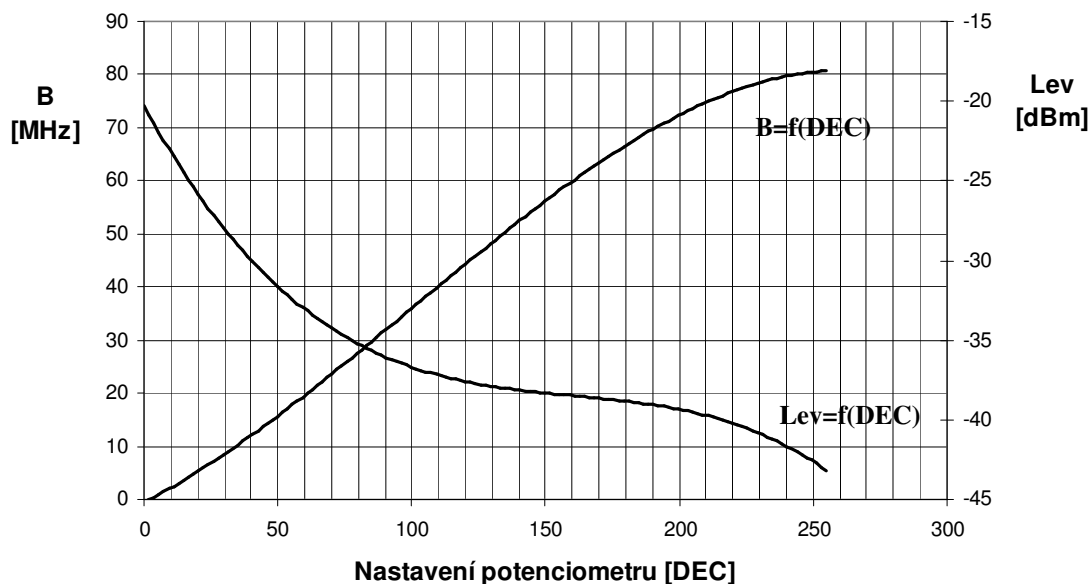
5.1.2 Napětím řízený oscilátor

Výrobce napětím řízeného oscilátoru MAX2235 udává výstupní úroveň signálu minimálně -3dBm. To platí pouze je-li generovaná jedna frekvence nebo velmi úzké pásmo. Není-li navíc výstupní signál čistý, ale má harmonické složky, je výkon mezi ně rozdělen a v požadovaném pásmu 800 až 1000MHz je úroveň výkonu ještě nižší. Začneme-li frekvenci rozmnítat, klesne úroveň signálu úměrně šířce pásma, ve které je VCO rozlaďován. V tomto případě až o 30dB. Závislost šířky pásma a úrovně výstupního výkonu na nastavení

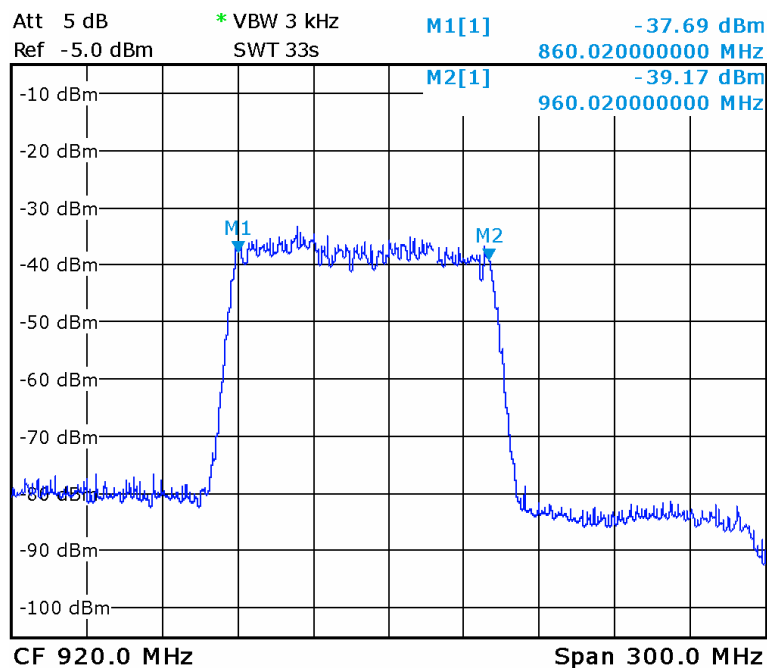
digitálního potenciometru je v tabulce 5.2 a grafu 5.2. Opět bude nutná aproximace při nastavování požadované šířky pásma. Spektrum výstupního signálu VCO při šířce pásma 100MHz je zobrazeno na obrázku 5.1

Tab. 5.2 Závislost šířky pásma a úrovně výkonu VCO

DAC	Lev [dBm]	B [MHz]	DAC	Lev [dBm]	B [MHz]
0	-17	1,0	140	-38	53,5
10	-22	2,0	150	-38	57,7
20	-29	4,4	160	-38	60,0
30	-32	8,0	170	-38	63,0
40	-31	12,0	180	-39	66,0
50	-31	14,9	190	-40	69,5
60	-32	19,7	200	-40	71,8
70	-34	22,5	210	-41	73,0
80	-35	27,3	220	-41	76,0
90	-36	31,0	230	-41	79,0
100	-36	37,0	240	-42	80,0
110	-36	41,0	250	-42	80,0
120	-37	45,0	255	-42	82,0
130	-38	48,9			



Graf 5.2 Závislost šířky pásma a úrovně výkonu VCO



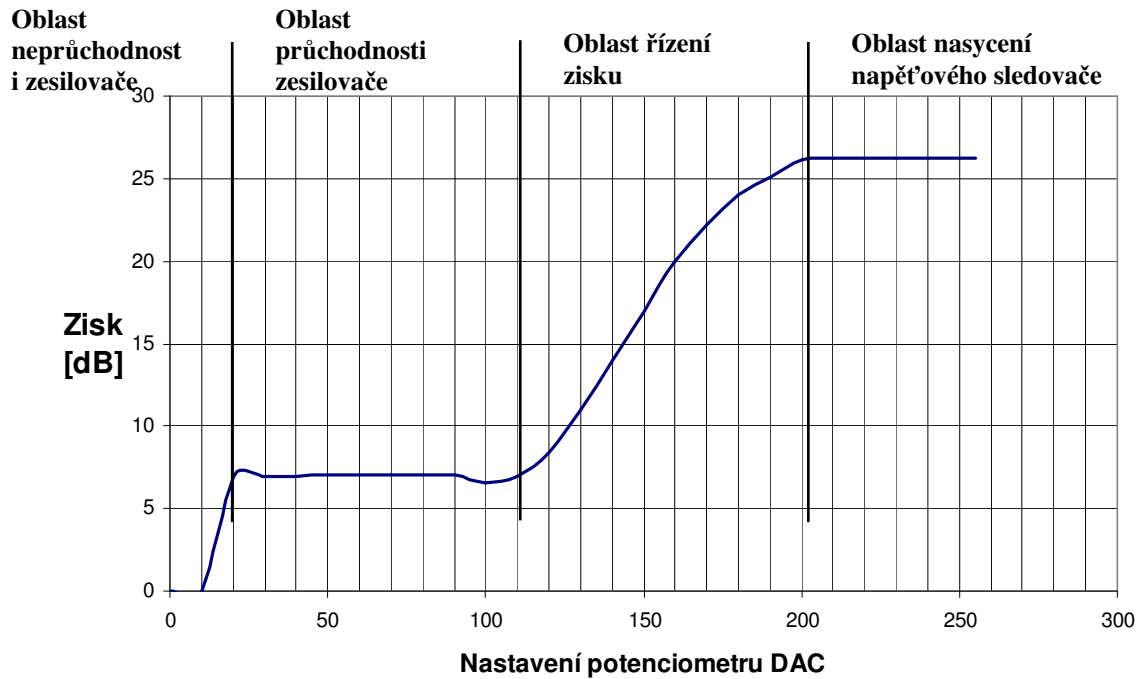
Obr.5.1 Spektrum VCO při buzení trojúhelníkovým průběhem

5.1.3 Zesilovač AGC

Teoretické zesílení zesilovače AGC by mělo být asi 33dB. Prakticky jsme však dosáhly asi 28dB. Důvodem toho je omezená velikost řídicího napětí attenuátoru. Zisk 33dB odpovídá 12V řídicího napětí, ale napěťový sledovač je schopen dodat asi jen 10V. Dynamika zesílení je říditelná asi od 6dB do oněch 28dB. Attenuátor není propustný od nulového řídicího napětí. Do určité meze je tak zesilovač neprůchodný. Závislost zesílení je v tabulce 5.3 a grafické vyjádření v grafu 5.3. Jsou zde vyznačeny i pracovní oblasti zesilovače.

Tab.č.5.3 Závislost zesílení na nastavení potenciometru

DAC	Zisk [dB]	DAC	Zisk [dB]
0	0,00	140	14,00
10	0,00	150	17,00
20	6,95	160	20,00
30	6,95	170	22,15
40	6,95	180	24,00
50	7,05	190	25,10
60	7,05	200	26,10
70	7,05	210	26,25
80	7,05	220	26,25
90	7,05	230	26,25
100	6,60	240	26,25
110	6,90	250	26,25
120	8,35	255	26,25
130	11,00		



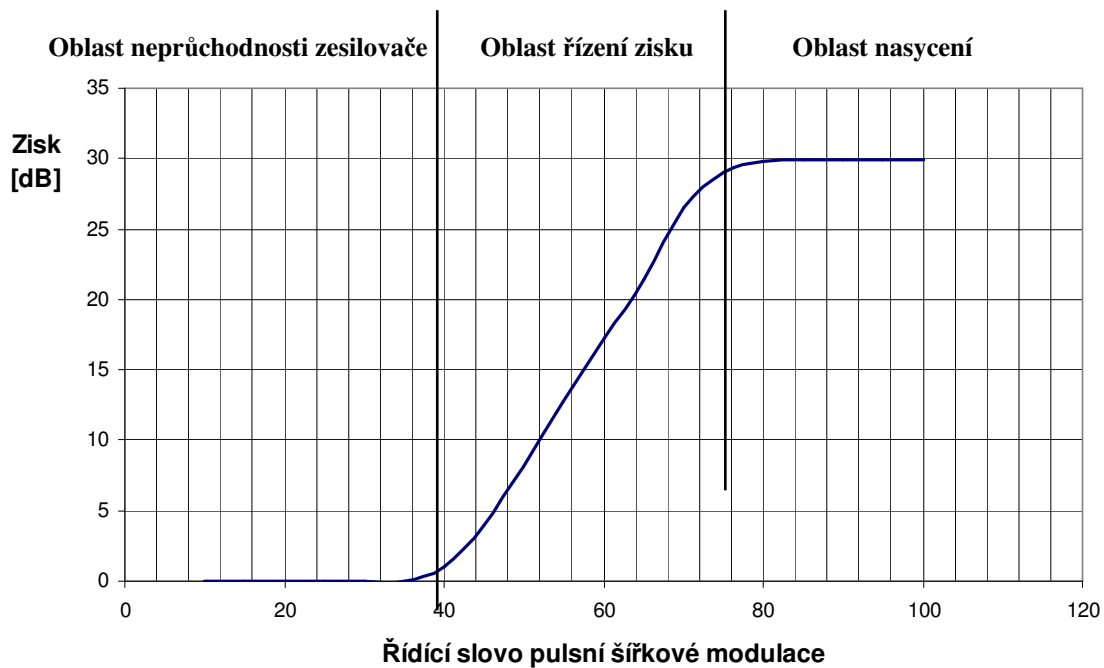
Graf 5.3 Závislost zesílení na nastavení potenciometru

5.1.4 Výkonový zesilovač

Koncový zesilovač jako jediný není řízen digitálním potenciometrem, ale pulzní šířkovou modulací mikrokontroléru s následnou filtrací střední složky. Není tak možné řídit zesílení v celém rozsahu 255 kroků. Maximální zesílení tohoto zesilovače je asi 30dB. Snížení oproti teoretickým 42dB je zřejmě útlum na symetrizačních členech. I tento zesilovač nepracuje od nulového řídicího napětí a je neprůchodný. Teprve od asi 0,2V zesilovač začíná pracovat. Maximální hodnota řídicího napětí je asi 1,5V. Překročení této hodnoty by mělo za následek zničení. Závislost zisku na řídicích hodnotách generátoru pulzní šířkové modulace je v tabulce 5.4 a grafu 5.4. Jsou zde opět vyznačeny pracovní oblasti.

Tab. 5.4 Závislost zisku na řídicím slovu

DAC	Zisk [dB]	DAC	Zisk [dB]
30	0,00	65	21,50
35	0,00	70	26,50
40	1,00	75	29,00
45	4,00	80	29,80
50	8,15	85	30,00
55	12,75	90	30,00
60	17,25	95	30,00



Graf 5.4 Závislost zisku na řídicím slovu

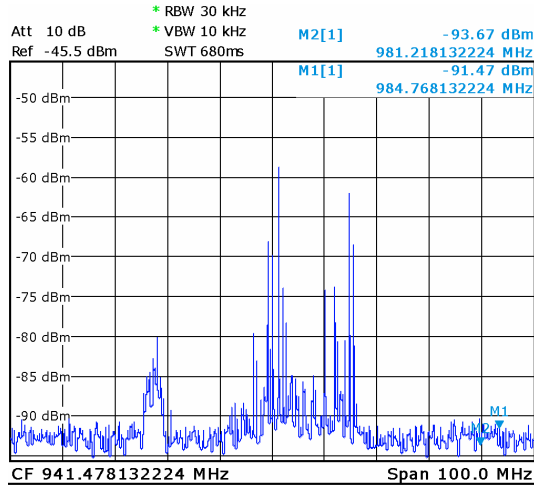
5.2 Měření vlastností celého zařízení

Při měření samostatných bloků byl použit spektrální analyzátor s 50Ω impedancemi. Po propojení všech bloků došlo k mírným změnám v jejich vlastnostech. Hlavně se projeví vlastnosti zesilovačů, kterým se snížil výkon. Nejpravděpodobnější příčinou byl zřejmě rozdíl ve vstupních a výstupních impedancích a tím vzniklo nepřizpůsobené spojení.

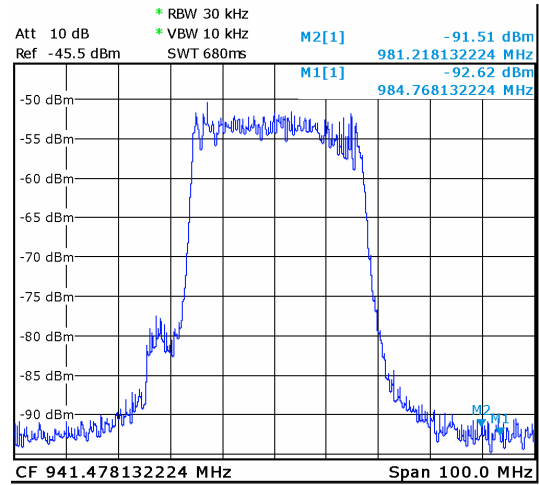
Maximální výstupní vysílací výkon, který byl dosažen, byl asi 3dBm. Tato hodnota je při nastavení rozmítání v celém pásmu. Při použití rušení jen v jednom ze subpásem (uplink, downlink) se výkon o pár dB zvýší. Navržený koncový zesilovač se jako výkonový příliš nehodí. Vhodnější by bylo použít ještě výkonový vysokofrekvenční tranzistor. Při nastavení vysokých zesílení již dochází k limitacím a kompresím a vzniků vyšších harmonických.

Při testování účinnosti rušičky bylo nastaveno zesílení zesilovačů na maximum, aby bylo rušení co možná nejvyšší. Na obrázku 5.2 je zobrazeno spektrum kanálů downlinku GSM pro pásmo 900MHz. Po zapnutí rušičky se toto spektrum překrylo rušivým signálem, tak jak zobrazuje obrázek 5.3, a mobilní telefon se tak nemohl spojit se stanicí BTS. Účinnost rušení však velmi závisí na rozmístění mobilního telefonu, BTS a rušičky. Čím silnější signál má BTS, tím blíže musí být rušička k mobilnímu telefonu. Jinak nebude dostatečné překrytí spekter užitečného signálu se signálem rušivým a nedojde k přerušení spojení. Tuhle skutečnost ilustrují obrázky 5.4 a 5.5. Tyhle obrázky jsou pořízeny pomocí servisního mobilního telefonu a ukazují dostupné kanály ARFCN (zde jako kanál BCCH) spolu s jejich úrovněmi přijímaného výkonu v místě měření. Obrázek 5.4 zobrazuje šest kanálů s nejsilnějším signálem v nejbližším okolí. Je-li zapnuta rušička, kanály se slabým signálem zmizí a zůstanou pouze ty, které převyšují úroveň rušivého signálu. Tuto situaci ukazuje

obrázek 5.5. V tomto případě je rušení neúčinné a je nutné buďto rušičku přiblížit k mobilnímu telefonu nebo zvýšit vysílaný výkon.



Obr.5.2 Spektrum kanálů BTS



Obr.5.3 Spektrum rušivého signálu



Obr.5.4 Dostupné kanály



Obr.5.5 Dostupné kanály při zapnutém rušení

Závěr

V této práci je popsán způsob rušení komunikace mezi mobilní stanicí a přípojným bodem sítě GSM. Využívá se zde zdánlivého zvýšení šumu v daném frekvenčním pásmu. Základem navržené rušičky je zde napětím řízený oscilátor MAX2623, který je rozmítán pomocí signálu s trojúhelníkovým průběhem. Tento průběh je vytvořen pomocí monolitického generátoru s obvodem XR2206, který je řízen pomocí přídavných obvodů, které zajistí potřebnou amplitudu, frekvenci a stejnosměrnou složku. Výstupní frekvence je tu stabilizována pomocí smyčky fázového závěsu s obvodem ADF4112, jehož stabilita je odvozena z přesného krystalového oscilátoru. Výstupní rozmítaný signál z oscilátoru se nakonec zesílí na potřebnou úroveň pomocí integrovaného vysokofrekvenčního výkonového zesilovače. Řízení jednotlivých bloků (pokud je to možné) zajišťuje mikrokontrolér AVR ATmega16. Pomocí něj se nastavují vlastnosti trojúhelníkového průběhu (tím i šířka rušeného pásma), a také vlastnosti fázového detektoru. Počítá se zde i s volitelnou úrovní výstupního výkonu. Nastavení všech těchto parametrů je uživateli umožněno pomocí tří tlačítek a LCD displeje o velikosti 16x2 znaků.

Po sestavení navrženého zapojení rušičky bylo provedeno kontrolní měření jednotlivých funkčních bloků. Při měření byly zjištěny některé nedostatky, které pokud to bylo možné, byly částečně nebo úplně odstraněny. Týká se to hlavně generátoru trojúhelníkového signálu, který měl příliš velkou stejnosměrnou složku. Další nedostatky byly u vysokofrekvenčních zesilovačů, které měli menší zesílení než byl teoretický předpoklad.

Při návrhu rušičky byla snaha o umožnění volby rušení pouze určitých kanálů, nejlépe třeba i jeden kanál ARFCN. Při této koncepci, kdy se rozmítá nosná vlna, nebylo možné tohoto dosáhnout kvůli malému frekvenčnímu rozlišení při volbě šířky pásma. Prakticky bylo dosaženo nejmenší šířky pásma asi 1MHz, což odpovídá asi pěti kanálům ARFCN. Řešením tohoto problému by mohla být změna koncepce rušičky, kdy by se potřebné spektrum kanálů připravilo v základním pásmu, a pak se následně směřováním přeneslo do požadovaného pásma 900MHz.

Při měření účinnosti rušení bylo zjištěno, že má smysl rušit jen pásmo, ve kterém mobilní telefon přijímá (downlink). Velmi také záleží na rozmístění a velikostech výkonových úrovní soustavy mobilní telefon – rušička - stanice BTS. Pokud je v místě dosahu stanice se silným signálem a rušička nemá potřebnou úroveň výkonu, nemusí vždy dojít k výpadku spojení. V tomto případě je nutné rušičku dát blíže k mobilnímu telefonu nebo zvýšit vysílaný výkon.

Literatura

- [1] WIKIPEDIA. *Cellular network – Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. Wikipedia 2001-2008 [cit. květen 2008]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network>
- [2] HANUS, Stanislav; *Rádiové a mobilní komunikace*. Brno: Ústav radioelektroniky FEKT VUT, 2006 [cit. květen 2008]. Elektronická skripta
- [3] BURDA, Jiří; *Základy mobilních systémů a GSM* [online]. Olomouc: VOŠ a SPŠE. [cit. květen 2008]. Dostupné z WWW: <<http://www.mobilnisystemy.cz/data/abs.pdf>>
- [4] MAXIM. *Maxim Integrated Products, Inc official website* [online]. Sunnyvale: 1983-2007 [cit. červen 2006]. Dostupné na WWW: <<http://www.maxim-ic.com>>.
- [5] MINI-CIRCUIT. *Mini-Circuits RF/IF Designer's Guide* [online]. New York: MiniCircuits 1969-2008 [cit. květen 2008]. Dostupné z WWW: <<http://www.minicircuits.com>>.
- [6] ANALOG DEVICES. *Analog Devices, Inc* [online]. Norwood: Analog Devices, Inc 1995-2008 [cit. květen 2008]. Dostupné na WWW: <<http://www.analog.com>>.
- [7] CADENCE. *Cadence Design Systems* [online]. San Jose: Cadence [cit. květen 2008]. Dostupné na WWW <<http://www.cadence.com>>.
- [8] NEHUDEK, Adam. *Popis časovače 555* [online]. [cit. květen 2008]. Dostupný z WWW: <<http://nehudek.wz.cz/elektro/555.php>>.
- [9] LINEAR TECHNOLOGY. *Linear Technology – Linear Home Page* [online]. Milpitas: Linear Technology 2007 [cit. květen 2008]. Dostupné na WWW: <<http://www.linear.com/>>
- [10] RFMD. *RF Solutions & Wireless Communications Technology: RFMD* [online]. Greensboro: RFMD 1991-2008 [cit. květen 2008]. Dostupné na WWW: <<http://www.rfmd.com/Index.asp>>
- [11] ATMEL. *Atmel official web site* [online]. San Jose: Atmel Corporation. 2002 [cit. červen 2006]. Dostupný z WWW: <<http://www.atmel.com>>.
- [12] ALLDATASHEET. *100% Free Datasheet Search Site* [online]. Alldatasheet 2003-2007 [cit. červen 2006]. Dostupný z WWW: <<http://www.alldatasheet.com>>.
- [13] EXAR. *EXAR official web site* [online]. Fremont: EXAR power connectivity. 2000-2009 [cit. květen 2009]. Dostupný z WWW: <<http://www.exar.com>>.

Seznam příloh

Příloha A: Řídící registry fázového detektoru a frekvenčního syntezátoru ADF4112

Příloha B: Schéma zapojení a deska plošných spojů řídicí části rušičky GSM

Příloha C: Schémata zapojení a desky plošných spojů vysokofrekvenčních zesilovačů