

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Martin Uhlík

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole

Kompaktní radarový senzor 11 GHz

Květen 2018

Autor: Bc. Martin Uhlík

Vedoucí práce: Doc. Ing. Přemysl Hudec, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Datum: 22.05.2018

.....

podpis autora

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Uhlík** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **392969**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Bezdrátové komunikace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Kompaktní radarový senzor 11 GHz

Název diplomové práce anglicky:

Compact Radar Sensor 11GHz

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte problematiku radarových senzorů typu CW a FMCW. Navrhněte a realizujte strukturu s následujícími parametry:

- o Pracovní pásmo 10,5 - 11,5 GHz
- o Možnost funkce v režimu CW i FMCW se zdvihem až 500 MHz
- o Stabilizace frekvence a generace lineárního frekvenčního rozmitání pomocí PLL, nastavení přes USB
- o Výstupní výkon min. 15dBm
- o IQ výstupy přijímače
- o Kompaktní provedení se všemi mikrovlnnými obvody na 1 stíněné DPS
- o Vstupní/výstupní konektory SMA

Seznam doporučené literatury:

- [1] Golio M.: The RF and Microwave Handbook, CRC Press 2001
- [2] Seoktae K., Nguyen C.: Millimeter-Wave Doppler Velocimetry for Low-Velocity Measurement, MTT-S Digest 2004, pp. 663-666.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Přemysl Hudec, CSc., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.10.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2018/2019

doc. Ing. Přemysl Hudec, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Tato práce se zabývá teoretickým a praktickým návrhem CW kompaktního radarového senzoru na frekvenci 11 GHz s potlačením šumu. Potlačení šumu bylo provedeno pomocí použití fázového závěsu. Navržené blokové schéma je připraveno pro praktické užití a implementaci. Navržené blokové schéma obsahuje konkrétní obvody od daných výrobců, které jsou v současnosti na trhu. Funkční bloky tohoto schématu a jejich funkce jsou popsány v části této práce. V další části práce je popsána praktická realizace tohoto zařízení včetně výroby. Následuje popis oživování a řešení problémů, které se postupně objevily. Po vyřešení problémů je provedeno měření ověřující funkčnost tohoto kompaktního senzoru a shrnutí parametrů senzoru.

Klíčová slova:

CW, FMCW, radar, ADF obvody, Analog Devices, OrCad návrh, HMC, DPS

Summary:

This diploma thesis deals with the theory and practical design CW compact radar sensor on the frequency 11 GHz with noise suppression. Noise suppression was done using Phase Locked Loop. Designed block diagram is ready for implementation and practical use. Designed block diagram is consist of concrete circuits from given producer, which are currently on the market. Functional blocks of this block diagram and their functions are described in the part of this project. In the next part of this thesis is described practical realization consist of production. Folow describe of put into operation and solving problems which gradually emerged. After resolution this problems is done measure for verification of functionality this compact sensor and summary of sensor parameters.

Index Terms:

CW, FMCW, radar, ADF circuits, Analog Devices, OrCad Design, HMC, DPS

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	8
Seznam použitých symbolů.....	9
1. Úvod.....	11
2. Cíl práce.....	11
3. Popis technologie CW radarového senzoru.....	12
3.1. Technologie FMCW radaru.....	13
3.2. Dopplerův jev.....	15
4. Bloky senzoru.....	15
4.1. Fázový závěs PLL.....	15
4.1.1. Fázový šum.....	16
4.2. Napětím řízený oscilátor VCO (Voltage Controlled Oscillator).....	17
4.3. Přesný zdroj kmitočtu (reference).....	18
4.4. Směšovač.....	18
4.4.1. Rušivé odezvy a dynamický rozsah.....	20
4.5. Zesilovač.....	20
4.6. Mikrovlňná vedení.....	21
4.6.1. Mikropáskové vedení.....	22
4.7. Filtry.....	23
4.7.1. Mikropáskové filtry.....	24
4.7.1.1. Pásmová propust.....	24
4.8. Dělič výkonu typu Wilkinson.....	25
4.9. Atenuátor.....	26
5. Ochrana proti elektrostatickému výboji ESD.....	27
5.1. Navržená ochrana proti ESD.....	27
6. Navržené blokové schéma a princip funkce.....	28
6.1. Výkonová rozvaha.....	29
Praktická část.....	31
7. Mikrovlňný substrát.....	31
8. Návrh mikropáskové pásmové propusti.....	31
9. Návrh wilkinsonova děliče.....	33
10. Návrh vedení.....	34
11. Napájení.....	35
12. Návrh schématu v programu OrCad.....	35
13. Soupiska součástek.....	36
14. Postup návrhu layoutu v programu OrCad.....	37
14.1. Návrh pájecí plošky.....	37
14.2. Návrh pouzdra součástky.....	39

14.3.	Návrh pouzdra mikrovlnné mikropáskové pásmové propusti	40
14.4.	Návrh prokovu (Via)	41
14.5.	Layout celé desky	41
14.6.	Generace výrobních dat	45
15.	Vyrobená deska DPS a osazení.....	47
16.	Ožívování senzoru	49
17.	Řízení fázového závěsu a generace RF signálu.....	50
18.	Hotový senzor	54
19.	Měření.....	55
20.	Použitý software	60
21.	Závěr.....	61
	Reference	62
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek.....	66
	Příloha A - Schéma	67
	Příloha B - Soupiska materiálu	71
	Příloha C - Osazovací plán	73
	Příloha D - Technická specifikace a návod k použití.....	74
	Příloha E - Pohled shora na hliníkový stínící obrobek.....	76
	Příloha F - Obsah přiloženého CD	77

Seznam použitých zkratek

CW	Kontinuální vlna (Continuous Wave)
FMCW	Frekvenčně modulovaná CW (Frequency Modulated Continuous Wave)
PLL	Fázový závěs (Phase Lock Loop)
VCO	Napětím řízený oscilátor (Voltage controlled Oscillator)
ADF	Výrobní označení PLL obvodu
RF	Vstupní signál (Radio Frequency)
LO	Signál lokálního oscilátoru (Local Oscillator)
IF	Mezifrekvenční signál (Intermediate Frequency)
IP3	Bod zahrazení (Intercept Point) (3.řádu)
LNA	Nízkošumové zesilovače (Low Noise Amplifier)
A/D	Analog/digital převodník
D/A	Digital/analog převodník
NF	Šumové číslo (Noise Figure)
TCXO	Teplotně komp. krystalový oscilátor (Temperature Compensated Cr. Osc.)
VCXO	Napětově řízený krystalový oscilátor (Voltage Controlled Crystal Osc.)
AM	Amplitudová modulace (Amplitude Modulation)
FM	Frekvenční modulace (Frequency Modulation)
PM	Fázová modulace (Phase Modulation)
SNR	Odstup signál šum (Signal to Noise Ratio)
SMA	Subminiaturní verze A
HP	Horní propust
ESD	Elektrostatický výboj (Electrostatic discharge)
DPS	Deska plošných spojů
EPAD	Exposed Pad
VNA	Vektorový analyzátor (Vector network analyser)
LE	Latch Enable
CLK	Hodiny (Clock)
USB	Rozhraní USB (Universal Serial Bus)

Seznam použitých symbolů

c	Rychlost světla
d	Vzdálenost cíle od senzoru
t_d	Zpoždění signálu
f_M	Mezifrekvenční signál
f_{bi}	Rozdíl okamžitých frekvencí
f_D	Dopplerův kmitočet
f	Kmitočet
w_x	Rychlost zdroje
P_{SSB}	Spektrální hustota výkonu
P_c	Výkon nosné
$S_c(f)$	Fázový šum
f_0	Vlastní frekvence
$L_{konverz}$	Konverzní ztráty
P_{RF}	Vstupní VF (vysokofrekvenční) signál
P_{OUT}	Výstupní výkon
f_{prac}	Pracovní (generovaný) kmitočet
$f_{nominal}$	Nominální kmitočet
τ_i	Zpoždění
Δf	Změna frekvence
Δf_L	Rozsah zachycení
Δf_H	Rozsah držení
w	Šířka vedení
h	Tloušťka substrátu
t	Tloušťka pokovení
ϵ_r	Permitivita substrátu
λ_g	Vlnová délka na vedení
Z_v	Impedance vedení
ϵ_{ef}	Efektivní permitivita
λ_0	Vlnová délka ve vzduchu
w_f	Šířka pásku s nenulovým pokovem
w_{ef}	Efektivní šířka pásku
ω	Úhlový kmitočet
μ	Permeabilita
σ	Vodivost
δ	Hloubka vniku

T	Přesah substrátu
L	Indukčnost
C	Kapacita
R	Odpor
λ	Vlnová délka
K	Útlum

1. Úvod

V současné době nejsou kompaktní radarové senzory příliš rozšířeny a to především kvůli technologické náročnosti univerzálního řešení. Existují jednotlivé bloky na principu stovebnice, kde jsou jednotlivé bloky typu zesilovač, filtry, oscilátor atd. seskládány do kaskády. Takovéto řešení však není kompaktní. Kompaktní řešení lze však navrhnout přímo na jedné desce plošného spoje a zajistit tak elegantní řešení v zadaném frekvenčním pásmu. Díky tomuto návrhu je možné celé zařízení implementovat do jednoho krytu a dále připojovat již jen napájení, antény a A/D (D/A) převodníky, které připraví přijaté signály ke zpracování. Takovéto řešení je vhodné implementovat do větších systému kvůli své malé velikosti.

2. Cíl práce

Cílem této práce je prostudování problematiky CW radarových systémů a návrh radarového senzoru. Je nutné uvážit zadané parametry senzoru a parametry jednotlivých bloků senzoru. Důležitým aspektem je potlačení fázového šumu, kterého je nutné dosáhnout. Dále po návrhu konkrétního řešení tuto variantu fyzicky vyrobí, oživit a odzkoušet.

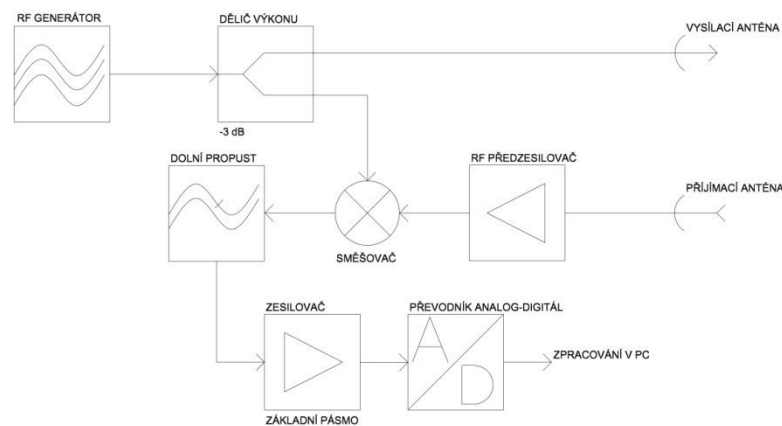
Výsledkem práce je praktická realizace tohoto radarového senzoru na desce DPS připravená k využití pro školní účely.

3. Popis technologie CW radarového senzoru

Jedná se o systém s kontinuálním vysíláním, což přináší technologické omezení na použití pro měření na malých vzdálenostech. Dynamika přijatého a vyslaného signálu pro radary na vysoké vzdálenosti se pohybuje i nad hodnotami 100 dB. Pokud je v jedné chvíli vysílaný signál vysoké úrovně, na přijímací anténu tento signál také pronikne s vysokou intenzitou, kterou není možné efektivně odizolovat a může vést až ke zničení citlivých bloků přijímače. Z toho vyplývá omezení na vysílaný výkon v kontinuálním režimu radaru a tím je omezena i maximální použitelná vzdálenost senzoru. Pro vysoké vzdálenosti se tedy využívají pulzní radary. V práci bude dále uvažován radar s kontinuální vlnou (CW) pro měření na malých vzdálenostech.

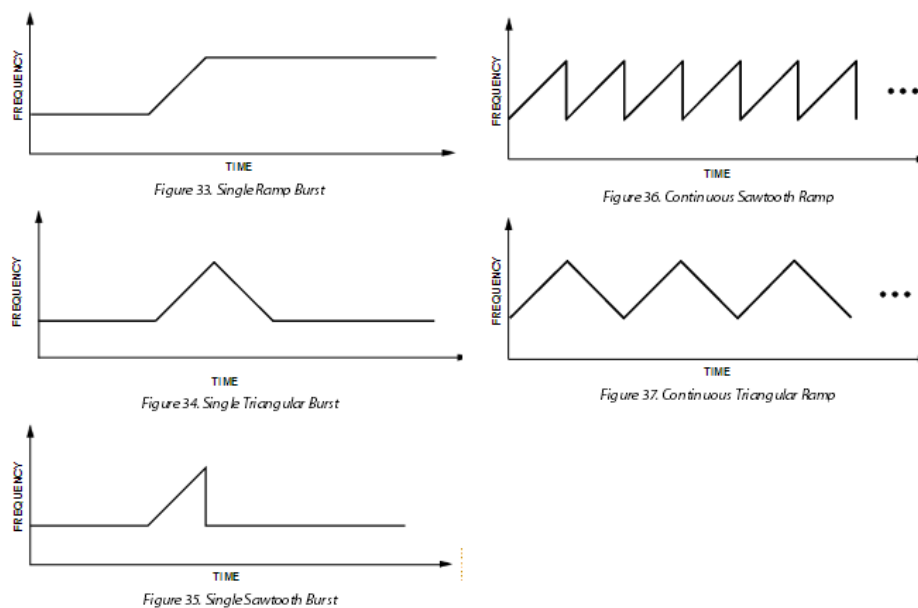
Radary se spojitým signálem CW vysílají spojitý signál o konstantní frekvenci pomocí vysílací antény. Signál se odrazí od cíle na přijímací anténu a je dále zpracován. Frekvence přijatého signálu se liší od frekvence vyslané o tzv. Dopplerův kmitočet, který je závislý na rychlosti a směru pohybujícího se cíle. Z takto získaného signálu lze získat informaci o rychlosti cíle, ale nelze získat informaci o vzdálenosti, protože není určen fixní čas začátku vysílání.

Zjednodušené blokové schéma CW radaru je na obrázku 3.1. Generovaný signál je rozdělen děličem výkonu do dvou větví. Z jedné větve vede signál k vysílací anténě, poté je vzduchem přenesen na přijímací anténu. Zde je signál v případě potřeby zesílen a ve směšovači je smísen se signálem z druhé větve výkonového děliče. Za směšovačem je již signál v základním pásmu. Dále projde dolní propustí pro odfiltrování vyšších složek signálu a je převeden do digitální podoby k počítačovému zpracování.



Obr. 3.1 - Blokové schéma CW radaru

CW radar může generovat různé signály. Může to být například trojúhelník, pila, osamocený trojúhelník, jeden pilový zub atd. Na obrázku 3.2 lze vidět možné průběhy generovaného signálu.



Obr. 3.2 - Možné průběhy generovaného signálu, (převzato z [2])

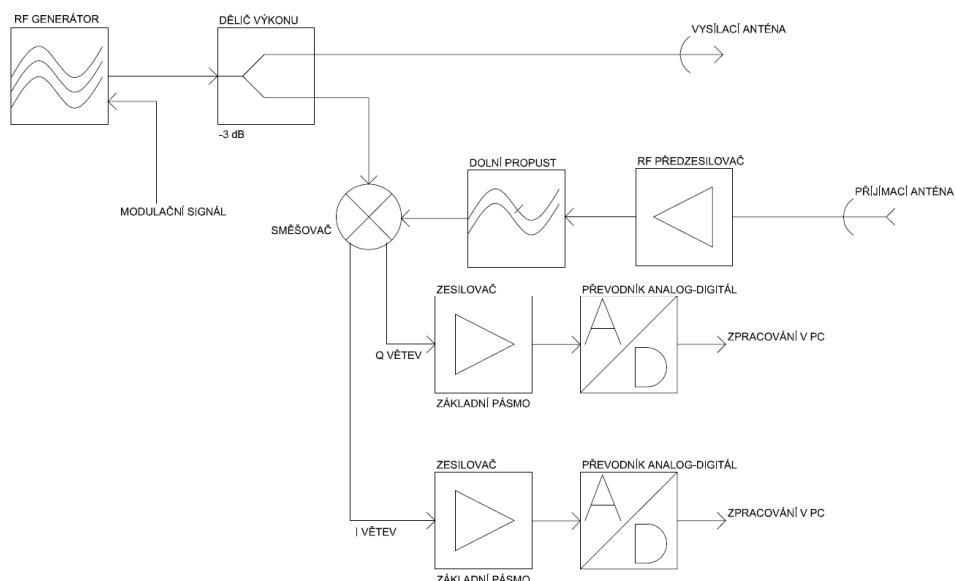
3.1. Technologie FMCW radaru

Radary se spojitým frekvenčně modulovaným signálem FMCW vysílají signál pomocí vysílací antény. Frekvence vysílaného signálu v určitém časovém intervalu lineárně roste. Signál se odrazí od cíle na přijímací anténu. Přijatý signál je zpožděný o určitý časový úsek t_d , který je potřebný k překonání vzdálenosti mezi cílem a senzorem. z tohoto časového zpoždění t_d , lze dle vztahu 3.1.1 spočítat vzdálenost cíle

$$t_d = \frac{2 \cdot d}{c} \quad (3.1.1)$$

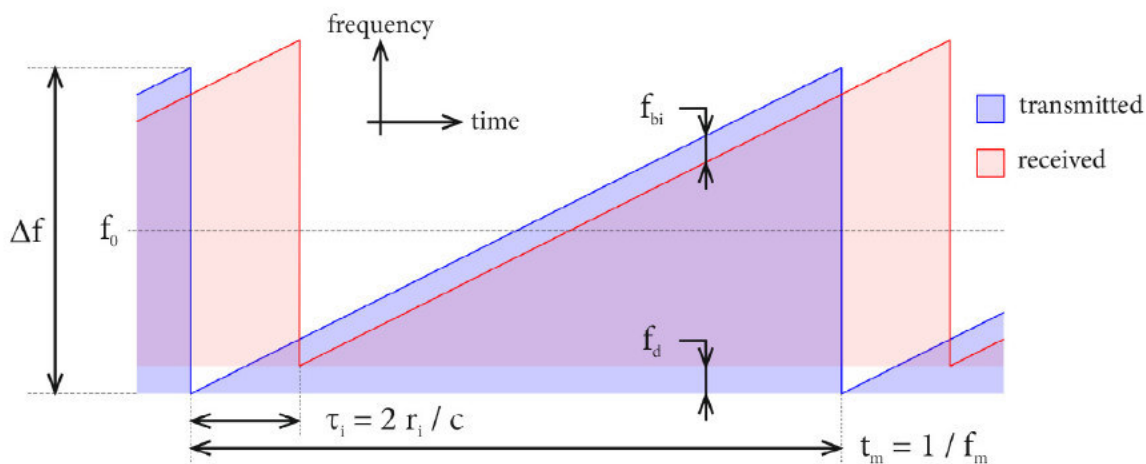
kde d je vzdálenost od cíle a c rychlost světla.

Zjednodušené blokové schéma FMCW radaru je na obrázku 3.1.1. Hlavním rozdílem oproti CW radaru je možnost frekvenčně modulovat signál vycházející z RF generátoru.



Obr. 3.1.1 - Blokové schéma FMCW radaru

Vysílaný signál je v okamžiku přijetí signálu odraženého od cíle již na známé vyšší frekvenci viz obr. 3.1.2. Při realizaci rozdílu okamžitých frekvencí vyslaného a přijatého signálu vznikne mezifrekvenční signál f_M z něhož je možné určit rychlost cíle.



Obr. 3.1.2 - Přijatý signál FMCW radaru od pohybujícího se cíle (převzato z [1])

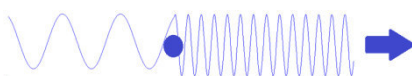
Z obrázku 3.1.2 je patrné určení zpoždění, v obrázku značené jako τ_i a určení mezifrekvenčního signálu jako rozdíl okamžitých kmitočtů f_{bi} , vlastní frekvence vysílání je značena jako f_0 a celková změna frekvence je Δf .

3.2. Dopplerův jev

Tento jev je využíván u CW radarů. Popisuje změnu přijatého a vyslaného kmitočtu při nenulové vzájemné rychlosti vysílače a cíle. Změna frekvence je popsána pomocí vztahu 3.2.1 pro Dopplerův kmitočet,

$$f_D = f * \frac{c}{c \pm w_x} \quad (3.2.1)$$

kde c je rychlost šíření vlny v daném prostředí, w_x je rychlost cíle a f je vysílaný kmitočet. Ve vztahu je $-$ pro přibližující se zdroj a $+$ pro vzdalující se zdroj. Z toho vyplývá, že pro přibližující se zdroj Dopplerův kmitočet roste a pro vzdalující se klesá. Na obrázku 3.2.1 je možné vidět měnící se vlnovou délku vlivem Dopplerova posuvu.



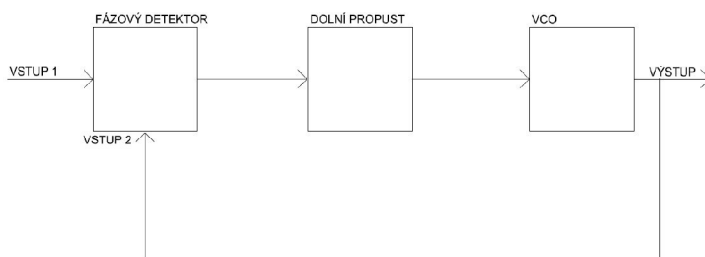
Obr3.2.1 - Vliv Dopplerova posuvu na vlnovou délku

4. Bloky senzoru

4.1. Fázový závěs PLL

Elektronický systém používaný k demodulaci signálů PM, AM a FM, dělení a násobení frekvence, frekvenční synchronizaci a dalším aplikacím.

System je zobrazen na obrázku 4.1.1 a obsahuje fázový detektor, dolní propust a oscilátor řízený napětím VCO.

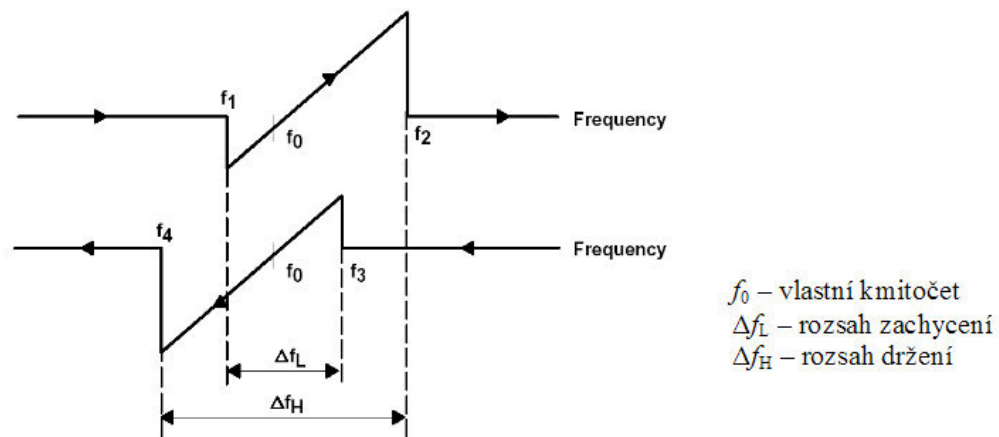


Obr. 4.1.1 - Blokové schéma PLL

Pokud na vstup 1 fázového detektoru není přivedeno žádné napětí, působí pouze referenční napětí generované v oscilátoru VCO na vstupu 2. Po průchodu signálu z fázového detektoru dolní propustí je přítomno určité stejnosměrné napětí, které je přivedeno na řídicí vstup VCO. Toto napětí má konstantní hodnotu a proto kmitá VCO na konstantní frekvenci označované jako vlastní frekvence. Po přivedení napětí na vstup 1 fázového detektoru o jisté frekvenci se bude na výstupu detektoru tvořit napětí závislé na rozdílu fází a případně i frekvencí obou vstupních napětí. Toto napětí je přefiltrováno dolní propustí a přichází na vstup VCO. Při splnění nutných podmínek je oscilátor VCO tímto napětím přeladován tak dlouho až se jeho fáze i frekvence téměř rovnají frekvenci a fázi vnějšího signálu. Tomuto jevu se říká zavěšení.

Fázový záměr má dva pracovní stavy a to tzv. režim zachycování tj. dosažení synchronního stavu (acquisition) a režim sledování tj. setrvání v synchronním stavu (tracking).

Na obrázku 4.1.2 jsou vidět tyto dva režimy. Pokud frekvence roste a přibližuje se k vlastnímu kmitočtu VCO, PLL nejprve není synchronizován. Po dosažení kmitočtu f_1 se zachytí a je v synchronním režimu. Při dalším zvyšování frekvence je dále synchronizovaný až do dosažení frekvence f_2 , kdy nastává rozpad synchronizace. Obdobně z druhé strany při snižování frekvence se PLL synchronizuje až po klesnutí na hodnotu f_3 a zůstane synchronizovaný až do frekvence f_4 a poté se synchronizace rozpadá. V obrázku 4.1.2 jsou vidět obě pásma a to pásmo zachycení a držení (sledování).



Obr. 4.1.2 - Pracovní režimy PLL (převzato z [3])

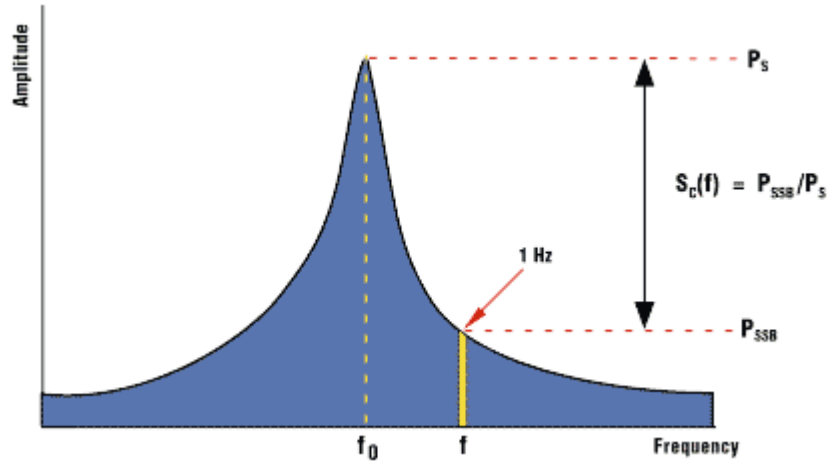
4.1.1. Fázový šum

Vzniká kvůli přirozené tendenci oscilátorů zesilovat šum který je v blízkosti jejich oscilační frekvence. Čím blíže je kmitočet šumu k frekvenci oscilátoru tím více se zesílí. Šum takto zesílený oscilátorem je fázový šum. Hlavním problémem fázového šumu je výskyt poblíž frekvence oscilátoru a tudíž není možnost ho zcela vyfiltrovat.

Fázový šum je definován vztahem

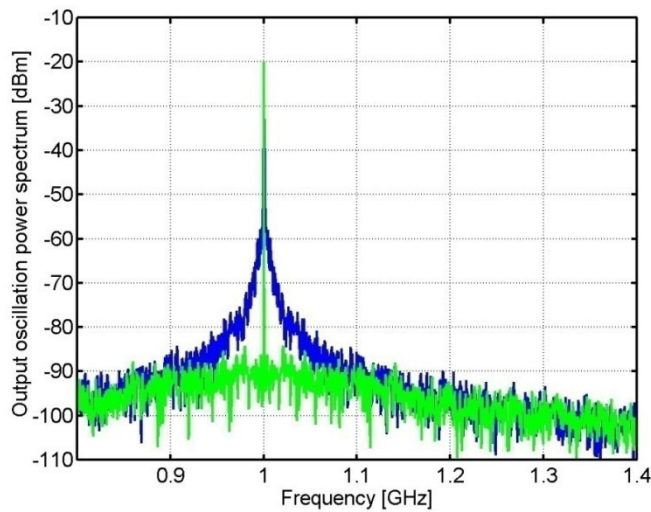
$$S_c(f) = 10 * \log\left(\frac{P_{SSB}}{P_c}\right) \text{ [dBc/Hz]} \quad (4.1.1.1)$$

kde P_{SSB} je spektrální hustota výkonu signálu (výkon v pásmu 1 Hz) na ofsetovém kmitočtu (např 100Hz) a P_c je výkon nosné signálu s kmitočtem f_0 . Jednotka dBc/Hz vyjadřuje poměrné vyjádření vztažené k výkonu nosné. Na obrázku 4.1.1.1 je graficky zobrazená definice fázového šumu.



Obr. 4.1.1.1 - Definice fázového šumu (převzato z [4])

Na obrázku 4.1.1.2 je vidět vliv použití PLL na fázový šum. Nosný kmitočet je 1 GHz, modrý průběh znázorňuje případ oscilátoru zatíženého fázovým šumem (volně běžící oscilátor). Zelený průběh znázorňuje fázový šum po zapojení fázového závěsu PLL. Při použití fázového závěsu je fázový šum v okolí pracovní frekvence v určitém pásmu daném vlastnostmi PLL „vykousán“.



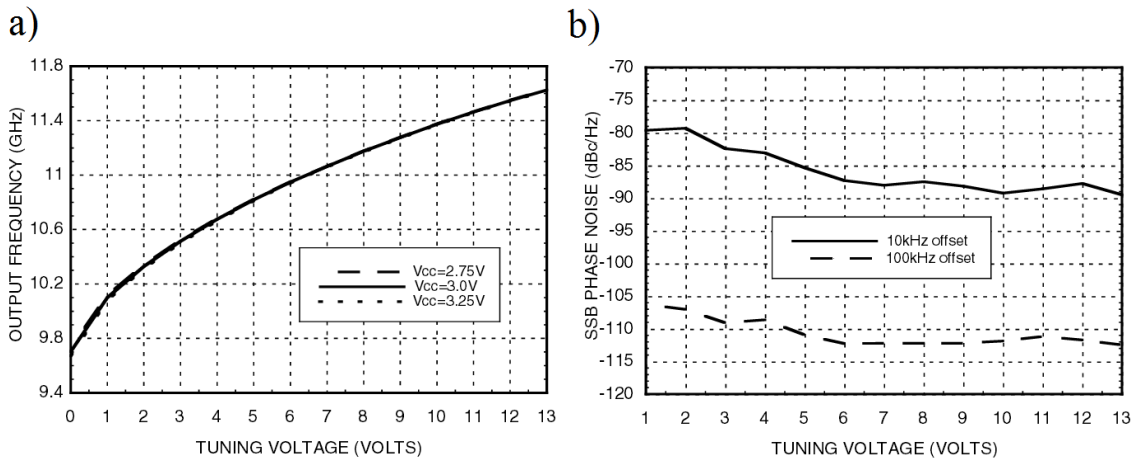
Obr. 4.1.1.2 - Fázový šum bez PLL a s PLL (převzato z [5])

4.2. Napětím řízený oscilátor VCO (Voltage Controlled Oscillator)

Jedná se o oscilátor, který je řízen pomocí ladícího napětí. Toto ladící napětí umožňuje změnu výstupní frekvence oscilátoru v určitém rozsahu kolem vlastní frekvence f_0 oscilátoru. Ve většině případů, je požadována lineární změna frekvence při změně ladícího napětí. Jako každý jiný obvod i na VCO jsou kladeny určité požadavky. Dále je uveden výčet několika základních.

Rozsah ladícího napětí, maximální výstupní výkon, frekvenční rozsah, odstup dalších harmonických, fázový šum, teplotní stabilita a další. Na obrázku 4.2.1 a) je znázorněna

závislost výstupní frekvence na ladícím napětí a na 4.2.1 b) závislost fázového šumu na ladícím napětí reálného obvodu od firmy Analog Devices.



Obr.4.2.1 – a) Závislost frekvence na ladícím napětí, b) Závislost fázového šumu na ladícím napětí (převzato z [6])

4.3. Přesný zdroj kmitočtu (reference)

Kvůli vyšší stabilitě referenčního kmitočtu použitého k řízení použitých obvodů je použit teplotně kompenzovaný krystalový oscilátor TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator). TCXO má malé rozměry a je levný. Základním blokem TCXO je napětím řízený krystalový oscilátor VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator). Ten je připojen k obvodu citlivému na teplotu, který udává malé napěťové korekce k udržení stabilní frekvence.

Přesnost kmitočtu je udávána pomocí relativní odchylky pracovního (generovaného) kmitočtu f_{prac} od nominálního $f_{nominal}$ dle vztahu 4.3.1

$$Přesnost = \frac{f_{prac} - f_{nominal}}{f_{nominal}} \cdot 10^6 [ppm] \quad (4.3.1)$$

Při porovnání přesnosti obyčejných krystalů a obyčejných krystalových oscilátorů s teplotně kompenzovanými TCXO je rozdíl cca 1 řád. Obyčejné krystalové mají cca 20-50ppm oproti TCXO s 2-10ppm.

Existují ještě přesnější teplotně stabilizované krystalové s přesností až 0,1 ppm. Ty nejsou v práci použity a nebudou tudíž dále popsány.

4.4. Směšovač

Jedná se o nelineární obvod užívaný k přeměně určitého signálu jedné frekvence f na signál s jinou frekvencí f_{MF} (tzv. mezifrekvenční kmitočet). Směšovač se skládá z místního oscilátoru generujícího pomocný oscilační kmitočet f_0 a z vlastního směšovače, který vytváří z těchto dvou kmitočtů f a f_0 kmitočet mezifrekvenční f_M .

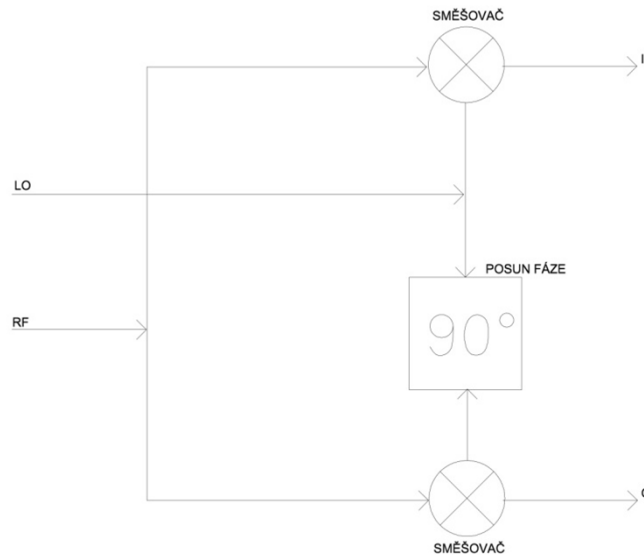
Směšovač obsahuje dále výstupní pasivní filtr, který potlačuje nežádoucí směšovací produkty a případně i další filtry v jiných branách směšovače. Vstupní signál se běžně označuje RF (Radio Frequency), signál místního oscilátoru se označuje jako LO (Local Oscillator) a mezifrekvenční signál jako IF (Intermediate Frequency).

Rovnice (4.4.1) popisuje mezifrekvenční signál, který obsahuje součtovou nebo rozdílovou frekvenci obou signálů ze kterých vzniká a to:

$$f_{MF} = f \pm f_0 \quad (4.4.1)$$

pokud je ve vztahu + jedná se o frekvenční konvertor nahoru (Up-Convertor), resp. – konvertor dolů (Down-Convertor).

Principiální schéma IQ směšovače je na obrázku 4.4.1. Vstupní RF signál se rozbočí pomocí děliče na dva stejné signály a přivede se na vstupy dvou směšovačů. Signál lokálního oscilátoru se také rozbočí na dva stejné signály, ale ke směšovačům je jeden veden přímo a druhý je fázově zpožděn o 90°. Na výstupech jsou pak dva signály s rozdílnou fází (ideálně přesně 90°). Z toho vyplývá zobrazení těchto signálů jako kruh. V praxi díky nedokonalému posouvání fáze může kruh přejít v elipsu.



Obr. 4.4.1 –Blokové schéma směšovače

Konverze frekvence se používá především u heterodynních rádiových přijímačů, kde se provádí většinou konverze dolů na nižší IF kmitočty. Nalézají, ale i uplatnění u rádiových vysílačů, kde se nejčastěji provádí konverze nahoru.

Obvodově se směšovače dělí na asymetrické směšovače (unbalanced), vyvážené směšovače (single balanced) a dvojitě vyvážené směšovače (double balanced). Různé obvodové zapojení mají různé výhody. Vyvážená zapojení mají výhodu v tom, že na IF výstupu mají potlačeny určité nežádoucí směšovací produkty a některé varianty i parazitní fázový, případně amplitudový šum oscilátoru. Tyto nežádoucí produkty by se jinak transponovaly do IF signálu. Další výhodou je zlepšená izolace mezi branami směšovače.

Důležité parametry směšovače jsou frekvenční rozsah RF/LO a IF, konverzní ztráty, izolace bran a IP3 bod.

Konverzní ztráty lze vypočítat jako

$$L_{\text{konverz}} = P_{\text{RF}} - P_{\text{OUT}} \text{ [dB]} \quad (4.4.2)$$

kde P_{RF} je vstupní VF výkon a P_{OUT} je výstupní výkon směšovače. Konverzní ztráty závisí hlavně na výkonu lokálního oscilátoru, který je pro správnou funkci směšovače řádově větší než vstupní výkon P_{RF} .

Izolace bran je důležitá především kvůli pronikání signálu do vstupního zesilovače před směšovačem nebo až do antény. Toto vyzařování je u směšovačů velmi sledováno, protože může způsobovat rušení nebo dokonce ohrožení provozu jiných radiokomunikačních zařízení.

Bod IP3 (zahrazení směšovače) je určen průsečíkem idealizované přímky dané rušivé složky (se strmostí 3:1) se základní užitečnou složkou. Pomocí tohoto průběhu lze analogicky jako u zesilovačů stanovit horní hranici dynamického rozsahu směšovače bez rušivých složek. Tato hranice je v bodu, kde uvažované rušivé složky 3. řádu právě vystupují nad šumové pozadí). [7]

4.4.1. Rušivé odezvy a dynamický rozsah

Kromě žádoucího mezifrekvenčního signálu se vytváří další nežádoucí produkty směšování označované jako rušivé odezvy (spurious responses). Tyto produkty vznikají z vyšších harmonických vstupních signálů f a z harmonických oscilátoru f_0 .

Frekvence těchto nežádoucích produktů jsou dány vztahem :

$$f_{\text{MF}} = mf + nf_0 \quad (4.4.1.1)$$

kde m, n jsou celá čísla (m označuje řád harmonické vstupního signálu a číslo n řád harmonické oscilačního signálu). Pomocí správného frekvenčního plánu směšovače je možné tyto rušivé odezvy většinou potlačit. Výhodou dvojitě vyvážených zapojení je, že automaticky potlačují rušivé odezvy podle vztahu (4.4.1.1), v případě že číslo m nebo n , případně obě jsou sudá. Většina jednoduše vyvážených zapojení potlačuje jen některé rušivé odezvy.

Užitečný signál reálného oscilátoru obsahuje postranní pásma parazitního fázového šumu a amplitudového šumu, který je však často zanedbatelný. Pokud jsou tyto rušivé signály v pásmu užitečného vstupního signálu f , tak dojde rovněž k jejich směšování se signálem LO a tím se zhorší šumové vlastnosti směšovače. Tyto šumové složky potlačují všechny dvojitě vyvážené směšovače a některé jednoduše vyvážené. [7]

4.5. Zesilovač

Elektronický obvod, který zesílí signál ze vstupu na výstup. Mezi hlavní parametry patří frekvenční rozsah, zisk, maximální vstupní výkon, výstupní bod zahrazení, šumové číslo a další.

Vysokofrekvenční a mikrovlnné zesilovače mají často vysokou frekvenční selektivitu, protože jsou určeny pro činnost v určitém frekvenčním pásmu.

V této práci jsou použity standardní zesilovače i nízkošumové zesilovače, tzv. LNA (Low Noise Amplifier). Hlavním parametrem LNA zesilovače je šumové číslo NF, zisk a linearita. Šumové číslo zahrnuje tepelný šum i šum z ostatních zdrojů. Typické hodnoty NF pro LNA jsou 0,5 až 1,5dB. Typický zisk LNA je 10 až 20dB. Výhodou LNA je ne-degradace poměru signál/šum SNR.

4.6. Mikrovlnná vedení

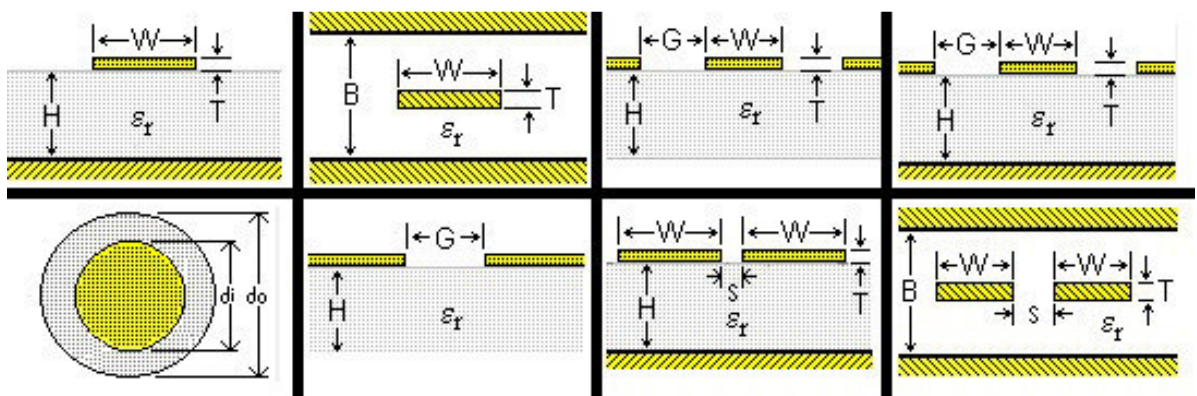
Důležitý prvek mikrovlnné techniky, který spojuje jednotlivé funkční bloky daného zařízení. Vedení lze realizovat na vhodném substrátu pomocí plošných spojů (planární vedení), vlnovody a koaxiálními kabely. V práci bude použito hlavně planární vedení, a proto bude nyní rozebráno.

Základem planárního vedení je tenký substrát ze speciálního nízkoztrátového dielektrika. Na jedné straně je většinou umístěna zemní rovina (ne vždy) a na druhé se vytváří obrazce daného vedení. Celá struktura bývá umístěna do kovového krytu, který stíní vnější elektromagnetické pole a zároveň chrání vedení před vnějšími vlivy (vlhkost, mechanické poškození, atd.).

Dielektrikum vyplňuje jen malou část vedeného elektromagnetického pole, a proto jsou ztráty planárních vedení velmi malé. Z pásek lze dále vytvářet pasivní mikrovlnné obvody jako děliče, filtry, směrové vazby atd..

Variant provedení vedení je více a jsou zobrazeny na obrázku 4.6.1. Pásek může být umístěn uprostřed substrátu a na vnějších stěnách je zemní rovina, nebo pásek na povrchu substrátu z obou stran obklopen zemí, případně vázané varianty. Dále je možné štěrbinové vedení, kdy je elektromagnetická vlna vedena štěrbinou mezi dvěma zemními rovinami.

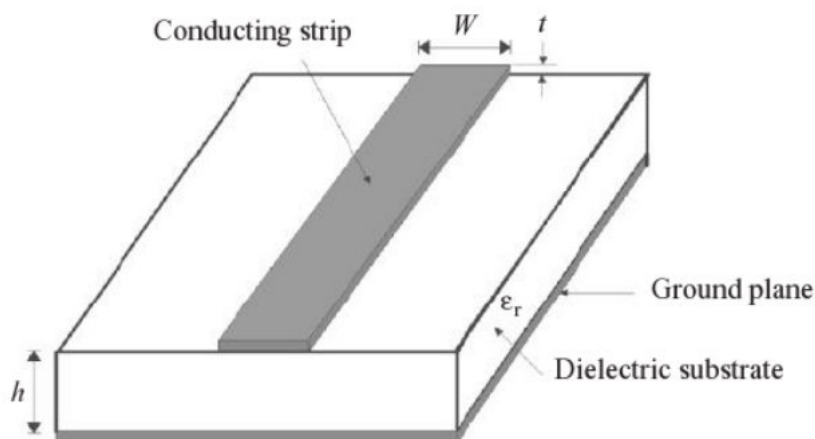
Nejpodstatnější druh vedení pro tuto práci je vedení mikropáskové, které bude rozebráno dále.



Obr. 4.6.1 Typy planárních vedení od levého horního rohu mikropáskové, symetrické páskové, koplanární, koplanární zemněné, koaxiální, štěrbinové, vázané mikropáskové a vázané symetrické vedení (převzato z utility TXLINE 2003 programu AWR)

4.6.1. Mikropáskové vedení

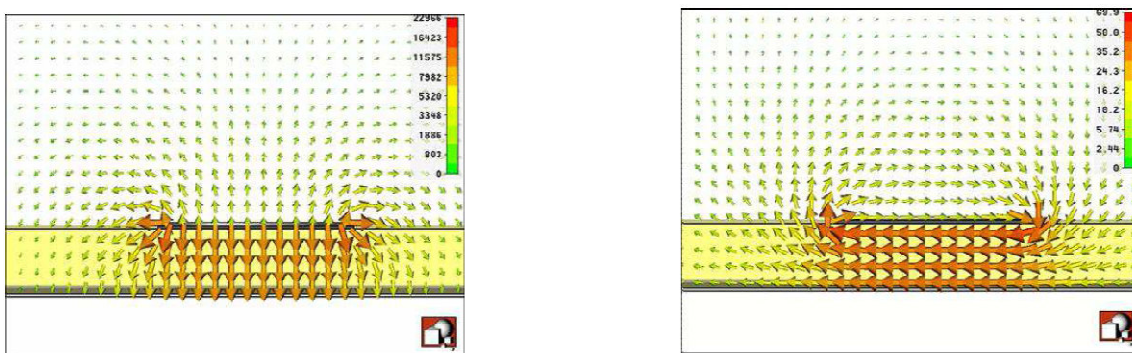
Patří do skupiny planárních vedení. Na tenkém nízkoztrátovém dielektrickém substrátu je na jedné straně zemní roviny a na druhé je vodivý motiv (většinou pruh mědi) daného vedení. Mikropáskové vedení je nakresleno na obrázku 4.6.1.1, kde w značí šířku vedení, h tloušťku substrátu, t tloušťku pokovení a ϵ_r je permitivita použitého substrátu.



Obr. 4.6.1.1 – Mikropáskové vedení (převzato z [8])

Rozložení elektromagnetického pole je zřejmé z obrázku 4.6.1.2, kde je zobrazen příčný řez vedením. Vlevo je zobrazena E složka pole a vpravo H složka. Předpoklad pro toto rozložení je, že rozměry vedení jsou mnohem menší než vlnová délka na vedení λ_g a to:

$$w, h \ll \lambda_g \quad (4.6.1.1)$$



Obr. 4.6.1.2 – Rozložení elektromagnetického pole na mikropáskovém vedení (převzato z [9])

Charakteristická impedance lze vypočítat dle vztahu ([9])

$$Z_v = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \frac{h}{w_f} \quad (4.6.1.2)$$

kde h je tloušťka substrátu, ϵ_{ef} je efektivní permitivita, w_f je šířka pásku po uvážení nenulové tloušťky pokovení t a lze spočítat dle vztahu:

$$w_f = \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{8h}{w_{ef}} + \frac{w_{ef}}{4h}\right)} \quad w/h \leq 1$$

$$w_f = w_{ef} + 2,42 \cdot h - 0,44 \cdot \frac{h^2}{w_{ef}} + h \cdot \left(1 - \frac{h}{w_{ef}}\right)^6 \quad w/h \geq 1 \quad (4.6.1.3)$$

kde w_{ef} je:

$$w_{ef} = w + \Delta w \quad (4.6.1.4)$$

$$\Delta w = 1,25 \cdot \frac{t}{\pi} \cdot \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right) \quad w/h \geq \frac{1}{2\pi}$$

$$\Delta w = 1,25 \cdot \frac{t}{\pi} \cdot \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t}\right) \quad w/h \leq \frac{1}{2\pi} \quad (4.6.1.5)$$

a efektivní permitivita lze spočítat například dle vztahu:

$$\varepsilon_{ef} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2 \quad (4.6.1.6)$$

kde λ_g je vlnová délka na vedení a λ_0 je vlnová délka ve vzduchu.

Pro nízký útlum vedení je nutné dodržet podmínku tloušťky pokovení větší než 5-ti násobek hloubky vniku. To je možné spočítat dle vztahu:

$$t > 5 \cdot \delta = 5 \cdot \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (4.6.1.7)$$

kde $\omega=2\pi f$, μ je permeabilita substrátu a σ je vodivost substrátu.

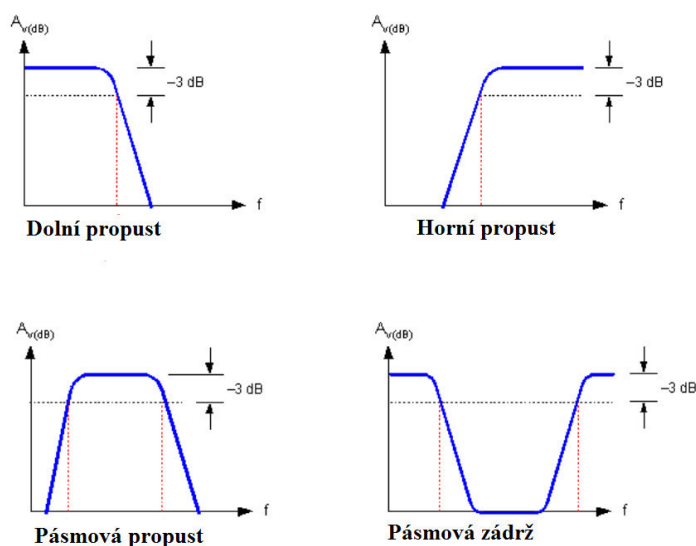
Pro praktické užití se doporučuje přesah země se substrátem v poměru T/w alespoň 2, kde T je přesah substrátu od hrany pásku v případě země větší než substrát poměr T/w alespoň 0,5.

Rozměry železného boxu, v kterém bude mikropáskové vedení umístěno se doporučují následovně. Vzdálenost bočních stěn od pásku alespoň $5w$ a vodorovných stěn alespoň $5h$.

Z mikropáskového vedení lze realizovat několika způsoby kapacitory a indukty.

4.7. Filtry

Jsou elektronické obvody sloužící k odfiltrování určitých frekvencí. Podle těchto frekvencí se dělí na dolní propust, horní propust, pásmovou propust a pásmovou zádrž jak je ukázáno na obrázku 4.7.1, kde je zobrazen přenos jednotlivých typů filtrů. V blokovém schématu se vyskytují většinou kvůli odfiltrování nežádoucích produktů nelineárních prvků. Dále se můžou dělit podle realizace, řádu filtru na aktivní/pasivní atd..



Obr.4.7.1 Přenos filtrů

Mikrovlnné filtry lze realizovat pomocí vhodně zvolených speciálních struktur přímo na plošném spoji. O této možnosti bude pojednáno níže.

4.7.1. Mikropáskové filtry

Mikrovlnné mikropáskové filtry jsou důležitou součástí mikrovlnné techniky, protože poskytují parametry, které nelze dosáhnout pomocí filtru složených z klasických elementů L,C. Tyto filtry se používají i na velice vysokých frekvencích, kde je již délka vlny tak malá, že je srovnatelná s rozměry samotných cívek a kondenzátorů a ty tedy není možné použít. Cívky na takto vysokých kmitočtech mají velmi vysoké ztráty ve feritovém jádře a nezanedbatelné mezi závitové kapacity.

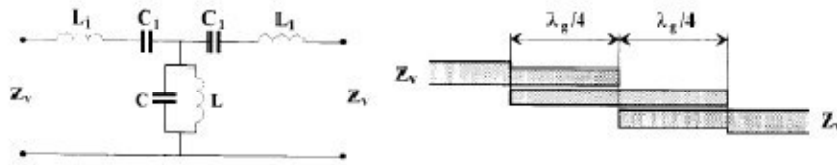
Výsledná indukčnost tedy nemusí být hlavní vlastností součástky. Kapacity mají při těchto frekvencích značné ztráty v dielektriku a vlastní indukčnost přívodů kondenzátoru může převládat nad kapacitou.[8]

Z výše uvedených důvodů je jasné, že použití mikropáskových filtrů pro vysoké frekvence je výhodné. Jedná se o řešení, které lze zadat rovnou při výrobě plošného spoje. Filtry jsou jen vhodně zvolené vodivé motivy na daném substrátu. Z toho vyplývá i výrobní jednoduchost.

4.7.1.1. Pásmová propust

Tento filtr se skládá z půlvlnných rezonátorů, které jsou vázány pomocí čtvrtvlnných vázaných vedení. Toto uspořádání dovozuje realizovat poměrně velké mezery mezi jednotlivými rezonátory, což usnadňuje realizaci filtru. Jedno z možných uspořádání je na obrázku (4.7.1.1.1). Toto uspořádání je lepší než sériové uspořádání, kde je problém s přesným nastavením vazebních mezer.

Podle počtu půlvlnných rezonátorů lze určit řád filtru.

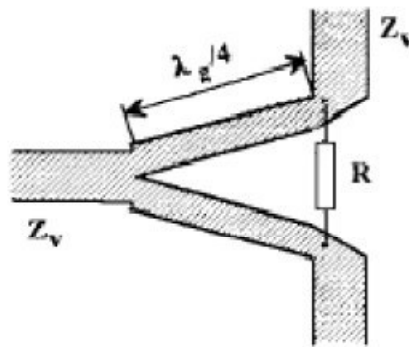


Obr. 4.7.1.1.1 Pásmová propust (převzato z [9])

Tento filtr je navržen pomocí programu AWR Microwave Office. Postup návrhu je následující. Na daném substrátu se napočítá pomocí nástroje TXLINE vlnová délka na dané frekvenci a vedení které má impedanci 50Ω . Dále se nakreslí schéma z úseků vedení, kde se nastaví všechny vedení na impedanci rovnou 50Ω a délky vedení na $\lambda/4$. Poté se pomocí nástrojů pro optimalizaci optimalizují délky a šířky jednotlivých dvojic vázaného vedení.

4.8. Dělič výkonu typu Wilkinson

Jedná se o obvod, který rozbočuje výkon až na n částí. Při planárním provedení lze výkon rozbočit na dvě části. Provedení je velice jednoduché, zahrnuje dvě čtvrtvlnná vedení a jeden rezistor. Praktické provedení pomocí mikropáskového vedení je na obr 4.8.1.



Obr. 4.8.1 Wilkinsonův dělič (převzato z [9])

Pro výpočet impedancí platí následující vztah:

$$Z_{i1} = Z_{i2} = \sqrt{2} \cdot Z_v \quad (4.8.1)$$

kde Z_v je impedance připojeného vedení. Odpor R se volí 100Ω .

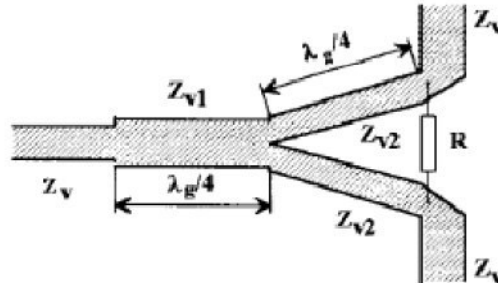
Při buzení do vstupní brány (vlevo) se výkon dělí na dvě části a odpor R se neuplatní, protože obě místa jeho přizpůsobení jsou na stejném potenciálu. Tento odpor R zlepšuje izolaci mezi dvěma výstupními branami (vpravo).

Při buzení do jedné z výstupních bran prochází výkon na vstupní bránu, ale na druhou výstupní bránu neproniká.

To je způsobeno celkovou délkou trasy z výstupní brány na výstupní bránu, která je $\lambda/2$. Tento signál se přičte k signálu pronikajícímu přes odpor R , který je v protifázi a navzájem se vykompenzují.

Pro správnou funkci je nutné dodržení délky vedení $\lambda/4$ a zanedbatelné parazitní vlastnosti odporu R (musí mít zanedbatelné rozměry vůči vlnové délce).

Pro zvětšení frekvenčního pásma, v kterém má dělič vhodné vlastnosti (odrazy, průchozí útlum) lze použít kompenzovaný wilkinsonův dělič znázorněný na obrázku (4.8.2).



Obr. 4.8.2 Kompenzovaný wilkinsonův dělič (převzato z [9])

Pro výpočet impedancí platí následující vztahy:

$$Z_{v1} = \frac{1}{\sqrt[4]{Z_v}} \quad (4.8.2)$$

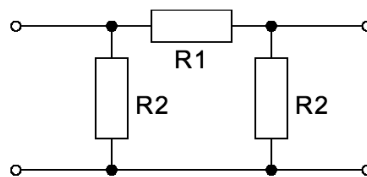
$$Z_{v2} = \sqrt[4]{2} \cdot Z_v \quad (4.8.3)$$

kde Z_v je impedance připojeného vedení. Odpor R se volí 100Ω .

Ke standardnímu wilkinsonovu děliči je připojen další úsek $\lambda/4$ vedení před vstupní bránu, který zajišťuje lepší impedanční přizpůsobení vstupní brány.

4.9. Atenuátor

Jako atenuátor je v práci použit Π článek. Π -článek je symetrický útlumový článek využívaný ve vysokofrekvenční technice znázorněný na obrázku 4.9.1.



Obr. 4.9.1 Π článek

Článek je možné navrhovat pro různé impedance na vstupu a výstupu a nebo pro stejné, což je případ této práce a dále bude rozebrán.

V případě stejných impedancí na vstupu i výstupu jsou rezistory R_2 stejné hodnoty. Hodnoty rezistorů lze vypočítat dle vztahu:

$$R_1 = Z_v \cdot \left(\frac{K^2 - 1}{2K}\right) \quad (4.9.1)$$

$$R_2 = Z_v \cdot \left(\frac{K + 1}{K - 1}\right) \quad (4.9.2)$$

Kde Z_v je impedance připojeného vedení a K je hodnota požadovaného útlumu v lineární míře za podmínky rovných impedancí na vstupu a výstupu.

5. Ochrana proti elektrostatickému výboji ESD

Kvůli vysoké citlivosti mikrovlnných obvodů na elektrostatický výboj ESD (Electrostatic discharge) je nutná jejich ochrana při manipulaci, osazování i přepravě. Zařízení citlivá na ESD se označují značkou na obrázku 5.1.



Obr. 5.1. Značení ESD citlivých zařízení

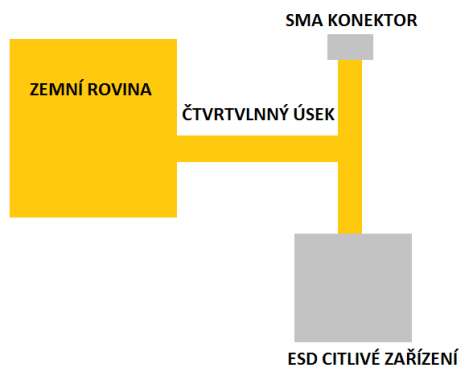
Elektrostatický výboj je jev při kterém dochází k přenosu elektrického náboje při kontaktu dvou předmětů na různém potenciálu. Např. citlivá součástka a ruka staticky nabitého člověka. ESD může způsobit zničení nebo nepředvídatelné závady na citlivých obvodech.

Hlavní zásady při práci se zařízením citlivým na ESD jsou:

1. Uzemnění pracovníka (vodivé oblečení, boty, uzemňovací náramek)
2. Uzemnění pracovních nástrojů, přístrojů a pracovního povrchu
3. Odstranění všech potencionálně nebezpečných materiálů (izolantů), např. strečové folie
4. Umístění citlivých zařízení do vhodných ochranných obalů při skladování i přepravě

5.1. Navržená ochrana proti ESD

Kvůli možnosti nechtěného doteku živého vodiče na SMA konektorech je navržena ochrana využívající transformačních vlastností vedení. Zde je využito čtvrtvlnného úseku vedení na jednom konci připojeného na mikropáskové vedení v blízkosti konektoru a na druhém konci je čtvrtvlnný úsek uzemněn. Transformační vlastnosti vedení způsobí že zkrat s nulovou impedancí se po čtvrtvlnném úseku vedení jeví jako otevřený konec s nekonečnou impedancí pro mikrovlnné signály. Z hlediska stejnosměrného je tedy živý vodič přímo zkratován na zem a elektrostatický výboj se nedostane na vstupy citlivých obvodů. Navržená ochrana je na obrázku 5.1.1. Délka čtvrtvlnného úseku na 11 GHz byly spočítána pomocí utility TXLINE na 4,07mm.



Obr. 5.1.1. Navržená ESD ochrana

6. Navržené blokové schéma a princip funkce

Navržené blokové schéma včetně typů obvodů je znázorněno na obrázku 5.1. Základem senzoru je fázový závěs ADF4159 od firmy Analog Devices. Parametry použitých obvodů budou popsány dále. Tento obvod je řízen pomocí mikrokontroléru a generuje řídicí signál pro obvod VCO HMC513LP5E rovněž od firmy Analog Devices. Obvod VCO je schopný generovat frekvence v pásmu 10,43-11,46 a 5,215-5,73 GHz. Poloviční kmitočet je použit jako referenční vstup PLL ADF4159. Atenuátor v cestě je zde kvůli výkonovým limitům obvodu PLL. Pro zamezení šíření nežádoucí frekvenční složky okolo 5GHz je za VCO vložena horní propust, která odfiltruje právě tuto nežádoucí složku.

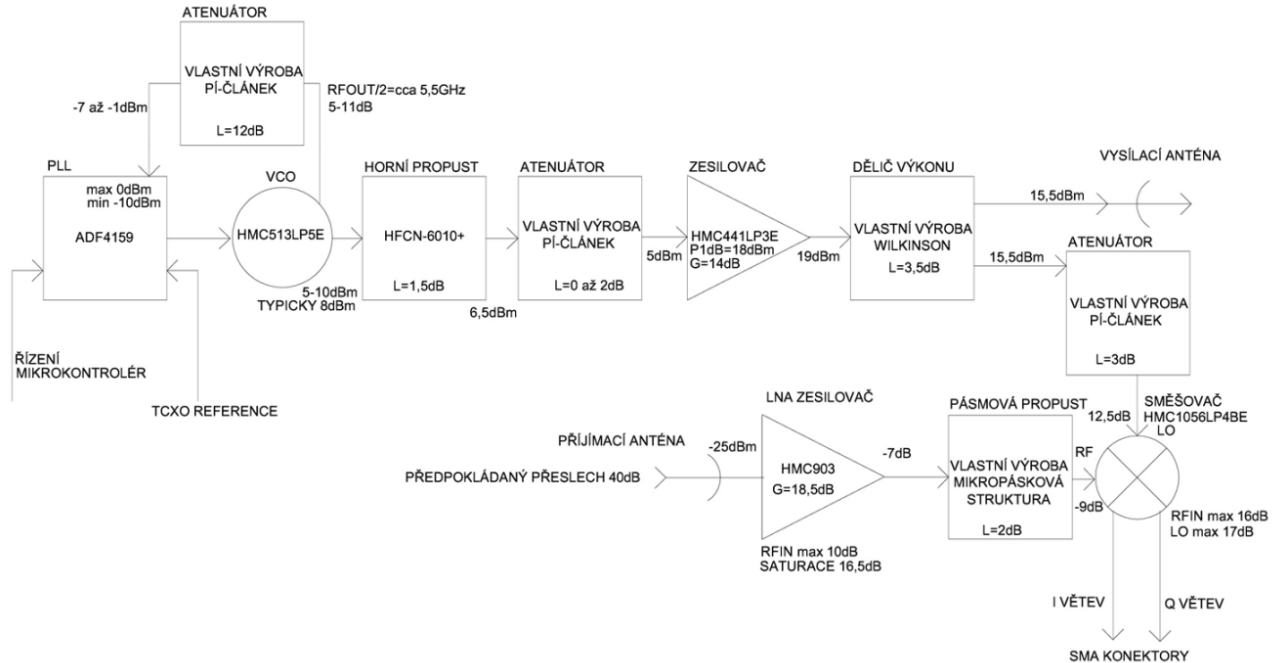
Horní propust je keramický filtr HFCN-6010+ od firmy Mini-Circuits (v případě potřeby útlumu již od nižších frekvencí je možno použít filtr HFCN-8400D+, který lze vyměnit pin za pin na DPS). V řetězci následuje atenuátor, který je zhotoven pomocí 3 SMD resistorů a v layoutu je s ním počítáno. V případě potřeby bude v senzoru umístěn, případně může být přemostěn pomocí resistoru 0Ω . O umístění rozhodne výkonová rozvaha celého zařízení. Hlavním kritériem je potřebné rozmezí výkonu na vstupu LO směšovače. Za atenuátorem následuje možnost externího vstupu (pomocí přemostění 0Ω rezistorem) a dále zesilovač HMC441LP3E od firmy Analog Devices, který v kombinaci s předchozím atenuátorem zajišťuje požadovanou hodnotu výkonu na vstupu LO směšovače.

Nyní je signál rozbočen pomocí navrženého Wilkinsonova děliče výkonu do dvou větví a to vysílací a větve pro řízení směšovače. Směšovač je HMC1056LP4BE od firmy Analog devices.

Ve vysílací větvi za wilkinsonovo děličem výkonu je umístěn SMA launch end konektor. Kombinace atenuátoru a zesilovače před wilkinsonovým zesilovačem je zodpovědná za vysílanou úroveň výkonu. Hodnota vysílaného výkonu je shora omezena nařízením Českého telekomunikačního úřadu ČTÚ. Nyní je signál přiveden na vysílací anténu.

Po přenosu je signál přijat přijímací anténou. Dá se předpokládat nízká úroveň přijatého výkonu a musí být tedy zesílen. Pro zamezení zhoršení poměru SNR je použit nízkošumový LNA zesilovač HMC903 od firmy Analog Devices. po tomto zesílení následuje pásmová propust v mikropáskové struktuře. Pásmová propust je navržena na frekvenci kolem 11 GHz a je realizována pomocí mikropáskové struktury popsané v předchozí kapitole. Pásmová propust je zde kvůli čistotě přijímaného spektra.

Pásmová propust zajišťuje, aby na RF vstup směšovače nepronikaly jiné spektrální složky a nevznikaly tak po směšování nechtěné produkty. Po sesměšování RF vstupu a LO vstupu lze na výstupech směšovače odebírat složky I a Q, které jsou od sebe vzájemně posunuty o 90°. Tyto výstupy jsou vyvedeny na dva SMA konektory a bude následovat externí zpracování, které již není v rozsahu této práce.



Obr. 5.1 - Navržené blokové schéma

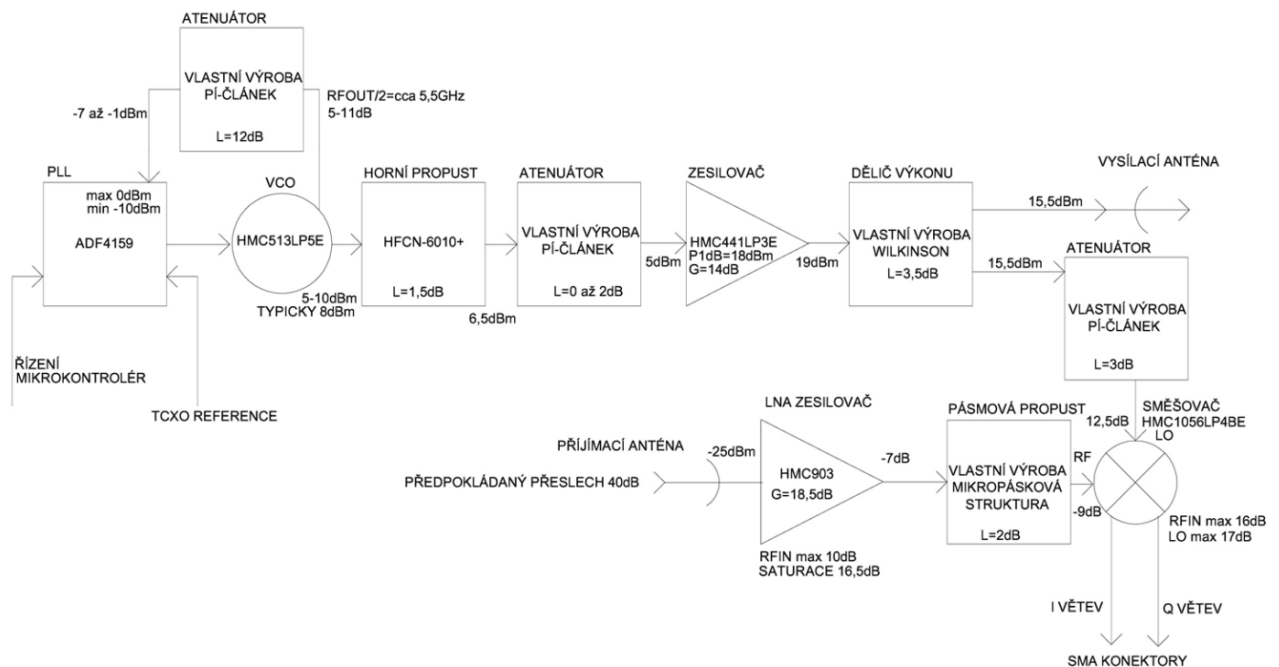
6.1. Výkonová rozvaha

Blokové schéma senzoru s odhadovanými výkonovými úrovněmi je na obrázku 5.1.1. Smyčka fázového závěsu generuje řídicí napětí pro napěťově řízený oscilátor VCO cca 4-11V pro rozsah 10,43 až 11,46GHz. VCO generuje RF signál v úrovni 5 až 10dBm, uvažovaná hodnota je 8dBm (typická dle datasheetu). Z VCO je na výstupu na poloviční frekvenci výkon 5-11dBm. Ten je veden na vstup RFinA, který musí mít rozsah -10 až 0dBm. Z tohoto důvodu je v cestě zařazen 12dB atenuátor (pí-článek) Na výstupu základní frekvence VCO následuje horní propust (HP) HFCN-6010+ s průchozím útlumem kolem 1,5dB na frekvencích blízkých k 11GHz. Z toho plyne výkon za HP 6,5dB. Zesilovač HMC441LP3E má zisk 14dB a bod 1dB komprese 18dBm, saturace nastává při 20dBm. Proto je nutné mezi HP a zesilovačem umístit atenuátor, aby nebyl zesilovač přebuzen a nedocházelo ke zkreslení a generaci nežádoucích produktů. Atenuátor bude v hodnotě 0 až 2dB, bude nutné odzkoušet, aby na výstupu zesilovače byl maximální možný výkon bez zkreslení. Nelze teoreticky napočítat z důvodu rozsahu generovaného signálu na výstupu VCO a nenulových útlumů vedení. Za zesilovačem následuje dělič výkonu typu wilkinson. útlum děliče je uvažován 3,5dB, ideální hodnota je 3dB, ale ta je v praxi nerealizovatelná.

Po tomto započítání lze uvažovat na výstupním konektoru výkon 15,5dB, což zadání splňuje. Pro vyšší výkon by musel být použit jiný zesilovač s vyšší hodnotou saturace a jednodécibellovou kompresí signálu.

Ke druhé větvi wilkinsonova děliče výkonu je připojen attenuátor s hodnotou 3dB. Ten je zde umístěn kvůli ochraně vstupů směšovače HMC1056LP4BE, který má na LO vstupu maximální úroveň signálu před zničením 17dB a bez attenuátoru by zde bylo 15,5dB. Attenuátor je pí-článek, který je možný ovládat výměnou hodnot rezistorů a nastavit tak ideální hodnotu elektrického odporu.

Předpokládaný přeslech mezi anténami je 40dB, což při vysílaných 15,5dBm, dává na konektoru přijímací antény cca -25dBm. Nyní je potřeba slabý signál zesílit s co nejnižším šumem nízkošumovým zesilovačem (LNA). LNA HMC903 má zisk 18,5 dB. Na výstupu LNA bude tedy výkon -7dBm, což je hluboko pod saturací LNA. Následuje mikropásková pásmová propust s odhadovaným průchozím útlumem cca 2dB. Za pásmovou propustí je RF vstup směšovače na kterém je výkon -9dB, což vyhovuje z hlediska maximálního výkonu na RF vstupu, který je 16dB.



Obr. 5.1.1 - Blokové schema s odhadovanými výkonovými úrovněmi

Praktická část

7. Mikrovlnný substrát

První volbou byl zvolen substrát Rogers RO4003C s vybranými parametry udanými v tabulce 1. Jedná se o dvouvrstvou variantu, kdy v ideálním případě jsou všechny motivy umístěny v horní vrstvě a v dolní vrstvě je pouze zemní rovina.

ROGERS RO4003C		
Permitivita	3,38	[-]
Návrhová permitivita	3,55	[-]
Ztrátový činitel	0,0027	[-]
Tloušťka substrátu	0,203	[mm]
Tloušťka pokovení	0,035	[mm]

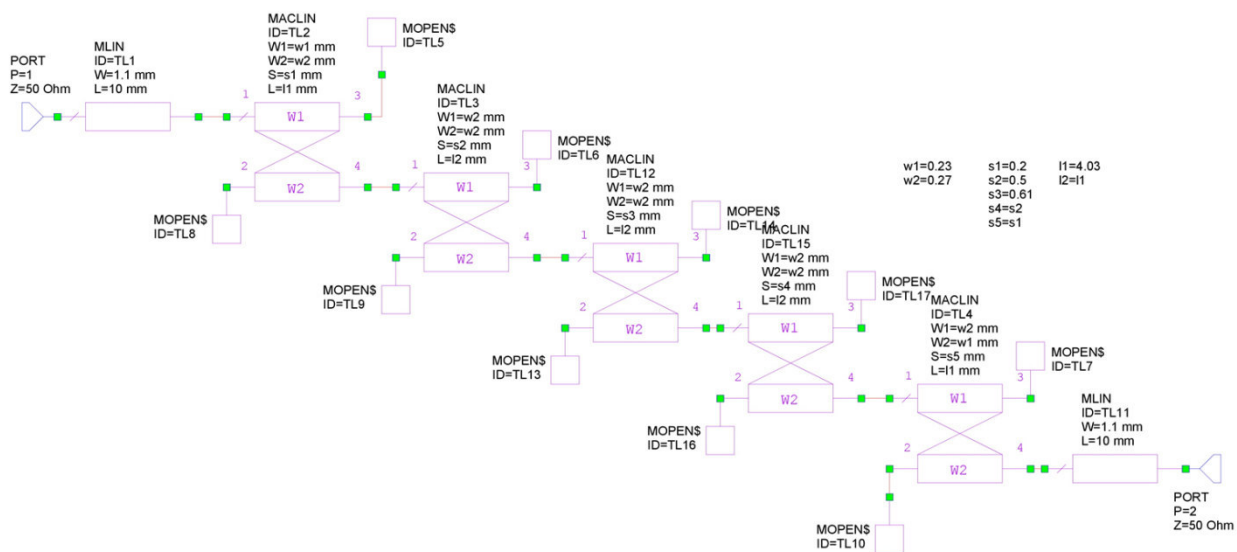
Tabulka 1 - Vybrané parametry substrátu RO4003C

Zde se brzy odhalil problém. Návrh wilkinsonova děliče byl bez potíží a snadno zrealizovatelný, ale nebylo možné navrhnout pásmovou propust, která by byla technologicky vyrobitelná. Vycházely zde příliš malé šířky štěrbin mezi vázanými vedeními a to v řádech setin až desetin milimetru. Technologické možnosti např. firmy PragoBoard, kde byla deska DPS vyrobena jsou však při tloušťce pokovení 35 μ m nedostatečné. Minimální izolační mezera je 0,15mm s podleptáním 40 μ m. Ani s využitím optimalizace v softwaru AWR nebylo dosaženo vyrobitelných výsledků. Proto byla změněna tloušťka substrátu na 0,508mm.

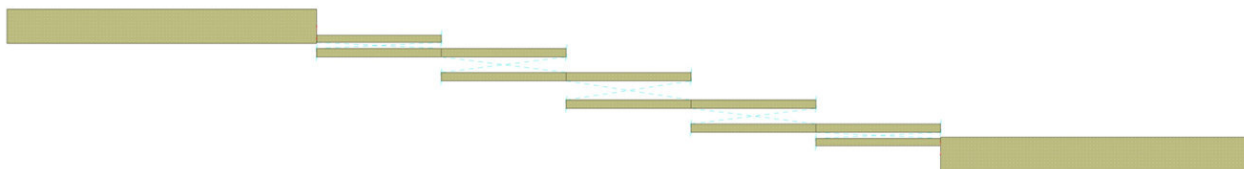
Při této tloušťce je již pásmová propust vyrobitelná. Nastal ovšem problém při návrhu wilkinsonova děliče, protože šířky pásku nyní vycházejí větší a vlnová délka je malá. Proto má kruhová struktura wilkinsonova děliče malý průměr a jednotlivé větve jsou blízko sebe. I přes tento problém bylo přikročeno k této tloušťce substrátu, aby bylo možné DPS vyrobit.

8. Návrh mikropáskové pásmové propusti

V programu AWR Microwave studio 10 byla navržena pásmová propust. Nejprve pomocí utility TXLINE byly spočteny šířky 50 Ω mikropáskových vedení a poté délky čtvrtvlnných vázaných vedení. Po tomto výpočtu byly nastaveny proměnné a to šířka pásků a štěrbina mezi nimi. Hodnoty byly zvoleny tak, aby byla struktura symetrická z důvodu lehčího případného doladění vlastní realizace na DPS pomocí obroušení nebo dopájení potřebného úseku. Naladění propusti bylo dosaženo pomocí optimalizátoru a následně finálně doladěno pomocí nástroje Tune ve kterém se měnila postupně šířka pásků a šířka štěrbin mezi nimi. Na závěr byla provedena malá korekce pomocí změny délky vedení. Navržená pásmová propust obsahuje celkem 5 vazeb mezi vedeními a je naladěná na celé pásmo, které je schopné genereovat VCO HMC513. Navržená pásmová propust je na obrázku 8.1. a její layout na obrázku 8.2.

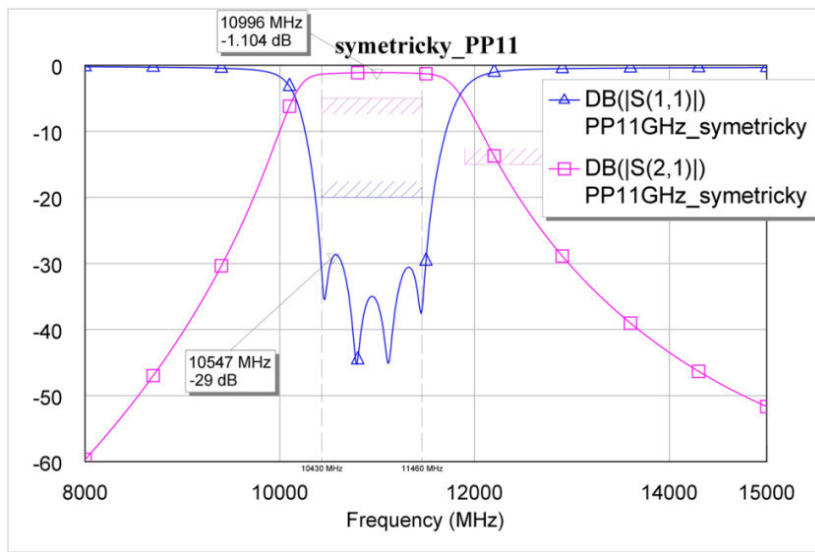


Obr. 8.1. Navržená pásmová propust s rozměry v softwaru AWR



Obr. 8.2. Navržená pásmová propust - layout

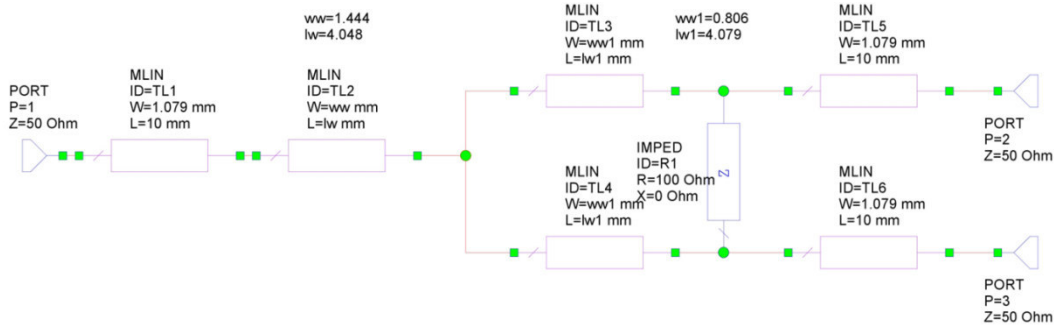
Z hlediska parametrů byl sledován přenos charakterizován pomocí s_{21} a odraz pomocí s_{11} . V propustném pásmu byl požadován co nejnižší útlum a hodnota odrazů s_{11} alespoň -20dB . Výsledný odraz je většinou pod -30dB a průchozí útlum je okolo $-1,1\text{dB}$. Výsledná charakteristika je na obrázku 8.3.



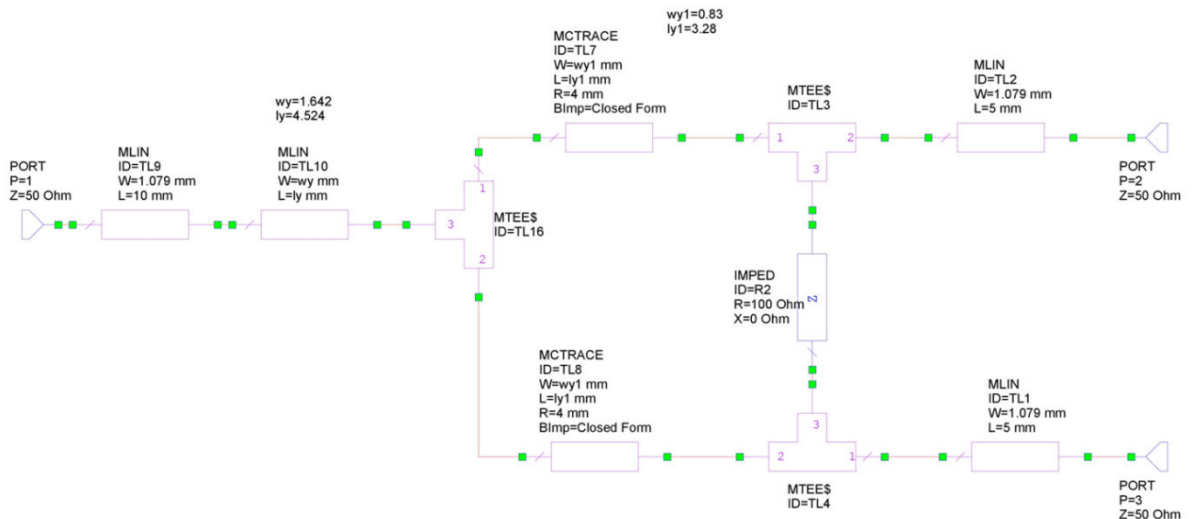
Obr. 8.3. Navržená pásmová propust - parametry

9. Návrh wilkinsonova děliče

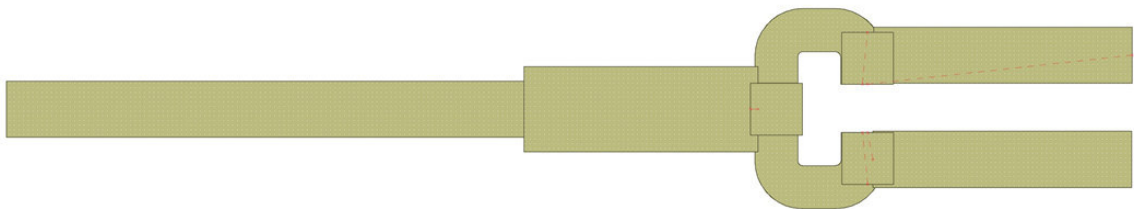
Navržen byl kompenzovaný wilkinsonův dělič. Návrh děliče je o dost jednodušší než návrh propusti. Stačí zde vypočítat příslušné parametry a ty lehce doladit v softwaru AWR pomocí nástroje Tune. Nejprve byl vypočítán teoretický dělič na obrázku 9.1 v základní struktuře jak byl popsán v kapitole 4.8. a poté pomocí prvků MCTRACE zakulacen. Tento prvek je součástí tzv. 2,5D simulátoru a počítá tedy i s geometrickým uspořádáním děliče. Toto uspořádání je na obrázku 9.2 a layout na obrázku 9.3.



Obr. 9.1. Teoretický dělič v základní struktuře

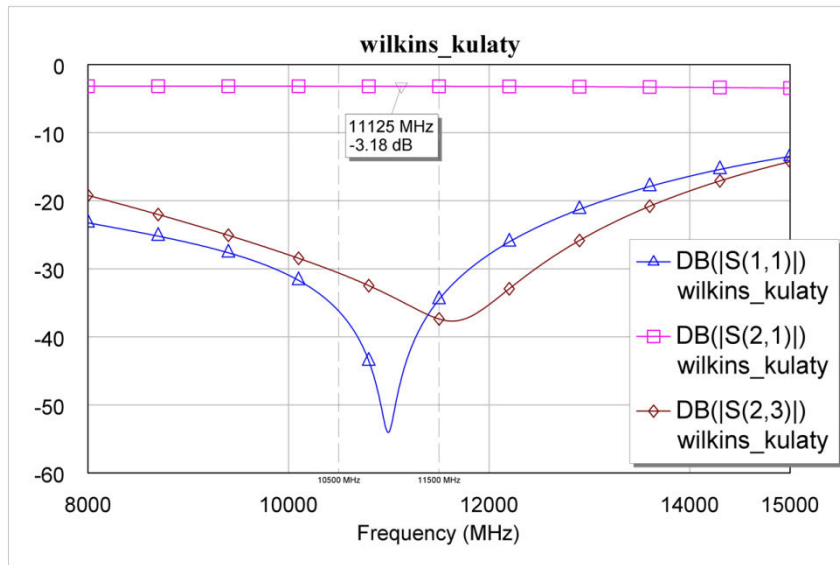


Obr. 9.2. Navržený kruhový dělič



Obr. 9.3. Navržený kruhový dělič - layout

Sledované parametry byly přenos ze vstupní brány na výstupní, který se ideálně blíží 3dB. Navržené řešení má přenos kolem 3,2dB, což lze považovat za dobrou hodnotu. Odrazy jsou v celém pásmu pod -30dB a přenos mezi výstupními branami neboli izolace bran je přes 30dB. Výsledné parametry jsou na obrázku 9.4.

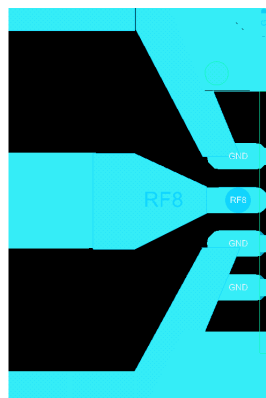


Obr. 9.4. Navržený kruhový dělič - parametry

10. Návrh vedení

Na desce DPS je použito mikropáskové stíněné vedení šířky 1,1mm, které má impedanci 50Ω . To přináší problém s připojením integrovaných obvodů, které mají šířky pinu kolem 0,2mm. Při šířce vedení 0,3mm, což je možná šířka pájecí plošky je impedance mikropáskového vedení rovna cca 93Ω . To je problém z důvodu definování vlastností a parametrů součástek. Výrobci parametry definují při připojení součástek na vedení, které má 50Ω a při nedodržení této hodnoty může nastat zásadní změna parametrů nebo i nefunkčnost součástky.

Tento negativní jev lze částečně obejít postupným zužováním pásku a zároveň zmenšováním šířky štěrbin, zobrazeno na obrázku 10.1. Vzniklé zúžení lze počítat jako stíněné koplanární vedení. Při šířce pásku 0,3mm a štěrbině 0,15mm (technologické minimum) je impedance koplanárního zemněného vedení 67Ω . To představuje zlepšení o 26Ω . Kolem mikropáskového vedení se šířkou 1,1mm je štěrbina 1,4mm pro impedanci 50Ω . Elektromagnetické pole tedy převládá mezi páskem a zemí. Při dalším zvyšování rozměru štěrbin se impedance již téměř nemění. Tato varianta je ve všech mikrovlnných spojích na navrhované DPS.



Obr. 10.1. Zužování pásku a štěrbin pro udržení hodnoty impedance

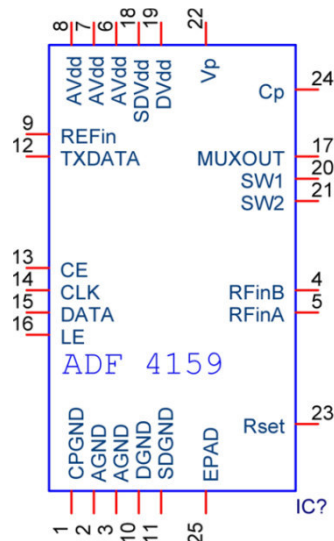
11. Napájení

Napájení zařízení je z celkem 3 napěťových hladin a to +5V,+7V a +14V. Tyto napěťové hladiny jsou připojeny na ochranu diodu, která ochrání zařízení před prepólováním. Dále je zapojen lineární stabilizátor vytvářející stabilní požadované napěťové hladiny. Stabilizátory jsou zapojeny dle doporučení výrobců v datasheetech. Ze stabilizátoru jsou již napěťové hladiny rozvedeny k jednotlivým obvodům u kterých jsou ještě přidány kondenzátory pro udržení stálého napájecího napětí při impulsním odběru proudu.

12. Návrh schématu v programu OrCad

Informace o softwaru OrCad byly čerpány ze zdrojů [10] a [11]

Schéma bylo navrženo a nakresleno v programu OrCad 16.6 v nástroji Capture. Pro kreslení schématu je nejprve nutné nakreslit schematické značky součástek a umístit je do vlastní knihovny. Značky lze kreslit jako libovolné tvary ke kterým se umístí příslušné piny, které mají své číslo a název. Příklad vytvořené schematické značky fázového závěsu ADF4159 je na obrázku 12.1. Značky jsou vytvořeny podle datasheetu a rozpisu pinů. OrCad umožňuje nepřipojené piny hromadně definovat vlastností NC a výčtem čísel nezapojených pinů. Takto byly všechny značky vytvořeny, což ale při následné tvorbě layoutu vytvořilo problém s připojováním nezapojených pinů na zem. Proto jsou některé značky nevhledné s mnoha zemními piny.



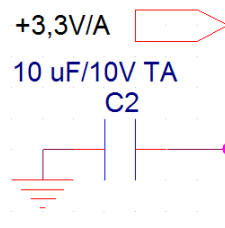
Obr. 12.1. Ukázka schematické značky fázového závěsu ADF4159

Po nakreslení schematických značek a vytvoření knihovny je nutné nastavení cesty ke knihovně a lze součástky rozmístit a pospojovat. Po kompletaci schématu lze přejít k tvorbě layoutu. Kompletní navržené schéma je zobrazeno v příloze A kvůli své obsáhlosti.

Problémem je, že OrCad není přímo určen pro mikrovlnnou techniku. Mikrovlnné struktury jsou zde poněkud obtížněji realizovatelné a proto některé struktury např. mikropásková pásmová propust je ve schématu zakreslena jako součástka.

Wilkinsonův dělič je jen symbolicky a je vytvořen až v layoutu. Tyto nestandardní situace jsou popsány v kapitole o tvorbě layoutu.

Kompletní schéma je z důvodu přehlednosti a velkého množství součástek rozděleno do tří listů. V prvním listu nazvaném RF zdroj je kompletní generace RF signálu na 11GHz. To obsahuje fázový závěs, konvertory 5V logiky mikrokontroléru na 1,8V logiku pro řízení PLL. Dále referenční oscilátor, blokování napájení, smyčku pro řízení VCO a samotné VCO. Na druhém listu nazvaném TX a RX je zbylá část schématu kromě napájení. Napájení je samostatně na listu ZDROJE. Pro propojení listů mezi sebou je nutné propojit příslušné spoje pomocí portu se stejným jménem. To bylo zdlouhavým problémem, protože původně byly spoje propojeny pomocí návěští samotného spoje, což ovšem není v OrCadu možné. Ukázka propojovacího portu mezi listy je na obrázku 12.2.



Obr. 12.1. Ukázka propojovacího portu +3,3V/A mezi listy

13. Soupiska součástek

Kompletní soupiska součástek je umístěna v příloze B, z důvodu obsáhlosti a přehlednosti hlavního textu. V tabulce 2 je uveden příklad soupisky pro polovodičové prvky a integrované obvody. V tabulce je uveden popis (název) obvodu, číslo součástky ve schématu, případně velikost pouzdra, dále číslo pod kterým součástku eviduje prodejce Mouser.com a počet kusů dané součástky. Po zadání čísla na stránkách prodejce je možné snadno součástku identifikovat a případně dokoupit.

Soupiska kondenzátorů navíc obsahuje použité dielektrikum. Pro mikrovlnné využití byly použity kondenzátory s keramickým dielektrikem NP0/C0G, případně tantalové kondenzátory. V ostatních případech byly použity kondenzátory s dielektrikem X7R, pokud byl zásadní rozdíl v ceně. Při podobné ceně byly použity stejné kondenzátory jako v mikrovlnné části kvůli usnadnění v podobě snížení portfolia součástek.

POLOVODIČE				
Popis	Součástka	Pouzdro	Číslo Mouser	počet
LED	D1	402	604-APHHS1005SURCK	1
SCHOTTKY	U2,U3,U4,U5,U9,U10,U12,U13	-	821-SK24A	8
LD29080PT33R	IC14, IC15, IC16	-	511-LD29080PT33R	3
AP2120	IC13, IC18	-	621-AP2120N-1.8TRG1	2
LD29080PTR	IC17, IC19	-	511-LD29080P	2
L4940D2T12-TR	U17	-	511-L4940D2T12-TR	1
OSC_REF	IC1	-	449-LFTCXO075792CUTT	1
KONVERTORY	IC5,IC6,IC7,IC8	-	512-NC7SZ08P5X	4
ADF4159	IC2	-	ADF4159CCPZ	1
OZ	IC3	-	584-OP184ESZ	1
HMC513LP5	IC4	-	VZOREK	1
HMC1056LP4BE	IC9	-	584-HMC1056LP4BE	1
HMC441	IC10	-	584-HMC441LP3E	1
HMC903	IC11	-	584-HMC903LP3E	1
HFCN-6010+	IC12	-	ZÁSOBY VEDOUCÍHO	1

Tabulka 2 - Část soupisky součástek s integrovanými obvody a polovodičovými prvky

14. Postup návrhu layoutu v programu OrCad

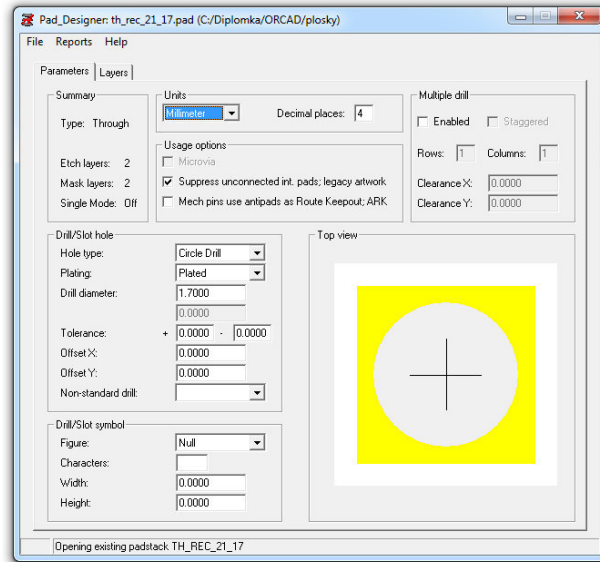
Před tvorbou layoutu je nutné definovat všem součástkám příslušná pouzdra. Pouzdro se skládá z geometrických rozměrů samotné součástky a pájecí plošky na desce DPS. Pouzdra jsou vytvářena podle rozměrů součástek v datasheetech výrobců. Pro povrchovou montáž součástek SMD (surface mount device) bylo přednostně užíváno pouzdro 0402. To je použito pro všechny rezistory. Kapacitory mají v případě potřeby větší pouzdra z důvodu nedostupnosti kapacitoru požadovaných vlastností v pouzdře 0402 nebo z důvodu příliš vysoké ceny. Izolační mezery byly zvoleny 0,2mm. V následujícím textu bude popsána kompletní tvorba pouzdra a samotného layoutu kompletní desky plošných spojů.

14.1. Návrh pájecí plošky

Samotná pájecí ploška se navrhuje pomocí utility PadDesigner v programu OrCad. Při známých rozměrech a způsobu montáže (SMD, klasické osazení s vrtanou dírou skrz..) lze přistoupit k tvorbě plošky. Důležitým parametrem v nastavení jsou jednotky. Nastaveny mohou být především milimetry nebo milly. Kde přepočítání je následující, 1mm=40milů. Tento parametr je nutné ohlídat, protože může způsobit zásadní chybu a nemožnost následného připojení součástky.

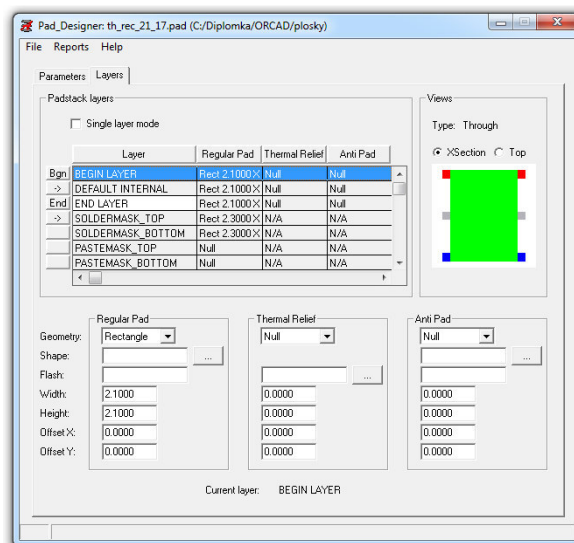
Dále následuje definování vrtaného otvoru. Lze nastavit tvar kruh, případně při povrchové montáži nedefinovat vrtaný otvor.

Ukázka nastavení pro vrtaný otvor zemního pinu fázového závěsu ADF4159, tzv. EPAD (Exposed Pad) je na obrázku 14.1.1. EPAD je čtvercový pin zesponu pouzdra, který musí být připojen na zemní roviny. Vrtaný otvor je zde pro případné osazování mikropájkou pomocí "prostrčení" hrotu mikropájkky z druhé strany DPS. Při pájení např. horkým vzduchem by zde vrtaný otvor být nemusel.



Obr. 14.1.1. Ukázka vrtaného otvoru pro EPAD fázového závěsu ADF4159

Dále následuje definování vlastní plošky (tvary a rozměry) v různých vrstvách. dále bude popsán případ pro výše uvedenou plošku EPADu s vrtaným otvorem fázového závěsu ADF4159. Ve vrstvě BEGIN LAYER je definována měděná ploška požadované velikosti ve vrchní vrstvě DPS. Stejně tak je definována měděná ploška ve spodní vrstvě END LAYER a případně ve vnitřní vrstvě DEFAULT INTERNAL při vícevrstvých DPS. Dále následuje definice nepájivé masky a to v horní a spodní vrstvě označované jako SOLDERMASK_TOP respektive SOLDERMASK_BOTTOM. U nepájivé masky je nutné z technologických důvodů nastavit na každé straně rozměr o 0,1mm větší než je rozměr měděné plošky. V případě čtvercové plošky EPADU je rozměr stran 2,1mm z toho vyplývá rozměr nepájivé masky 2,3mm. Ukázka definice vrstev EPADu je na obrázku 14.1.2.



Obr. 14.1.2. Ukázka definice vrstev pro EPAD fázového závěsu ADF4159

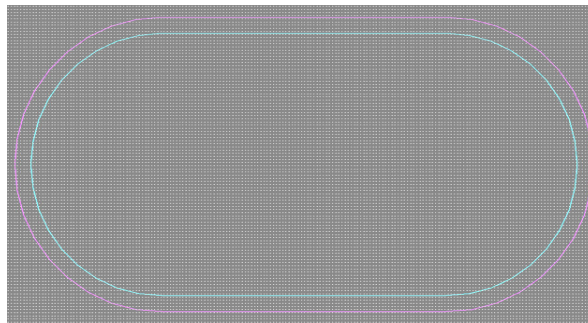
Obdobně pro definici SMD plošek, kde je možné zjednodušení zaškrtnutím políčka Single layer mode. Stačí definovat pouze vrchní (BEGIN) vrstvu, a nepájivou masku vrchní vrstvy (SOLDERMASK_TOP), případně pájecí pastu (PASTEMASK_TOP).

Navržené pájecí plošky je vhodné mít v určité složce, v této práci je to složka ORCAD/plosky. Dále je vhodný jednoznačný název určující způsob montáže (SMD, vrtaný otvor..) a rozměry. V práci je použito značení např. smd_o_07x04. Kde smd označuje způsob montáže, o označuje oblong (obdélník se zakulacenými rohy) a 07x04 je šířka x výška v mm*10. Zde šířka 0,7mm a výška 0,4mm.

Obdobně rec značí čtverec a cir kruh. Pro označení vrtaných otvorů je smd zaměněno za th. Např. th_cir_17x13 označuje kruhový vrtaný otvor průměru 1,3mm s měděnou ploškou průměru 1,7mm.

Toto značení je výhodné pro zrychlení práce, kdy pokud je potřeba konkrétní ploška je z názvů jasné, zda li se dá použít již existující ploška nebo je potřeba vytvořit plošku novou.

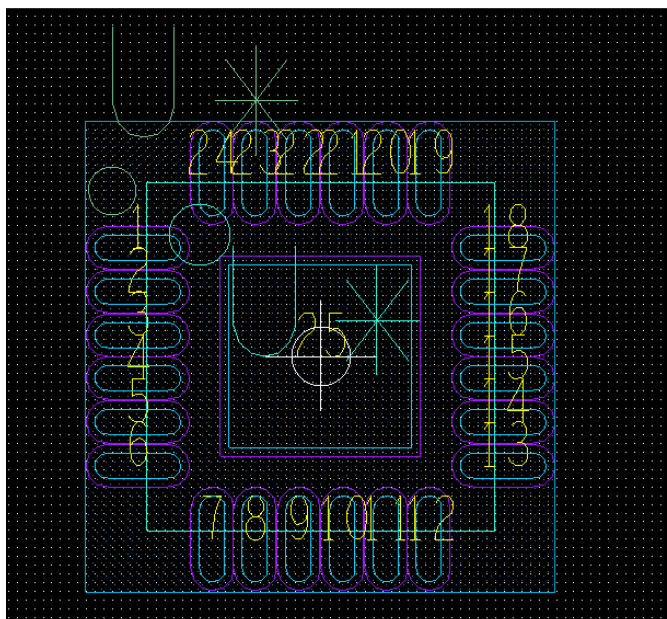
Ukázka výsledné plošky je na obrázku 14.1.3. Světle modrá barva označuje měděnou plošku a růžová označuje nepájivou masku, která je všude okolo takto ohraničené plochy.



Obr. 14.1.3. Ukázka pájecí plošky tvaru oblong

14.2. Návrh pouzdra součástky

Pro návrh pouzdra je nutné znát fyzické rozměry vlastní součástky, velikosti a rozteče pinů a mít navrženy pájecí plošky. Vše lze snadno zjistit z datasheetů výrobců, někteří udávají navíc i doporučený layout příslušné součástky. Po této přípravě nastává vlastní návrh pouzdra. Pouzdra byla navržena v softwaru OrCad 16.6. v nástroji OrCAD PCB Designer Professional w/PSpice. Při tvorbě nového pouzdra jsou dvě možnosti tvorby. Použití vytvoření pouzdra za pomoci průvodce nebo vytvoření celé součástky od základů. Průvodce umí vytvořit standardní pouzdra jako SMD, DIP, SOIC, TH DISCRETE apod. Kde to bylo možné, tak byl z důvodu zjednodušení návrhu používán právě tento průvodce. Pokud nebylo možné vytvořit tímto způsobem celé pouzdro, ale jen část, byl stejně průvodce použit a tento polotovar dodělán. To je příklad pouzdra QFN24 pro fázový závěs ADF4159. Zde průvodce vytvoří po zadání rozměrů a počtu pinů pouzdro bez zemního EPADu. Ten byl posléze doplněn ručně a tím bylo doděláno pouzdro. Pouzdro QFN pro PLL ADF4159 je na obrázku 14.2.1. Druhý způsob a to kompletní tvorba pouzdra bude popsán dále u tvorby mikrovlnných motivů.



Obr. 14.2.1. Pouzdro QFN24 pro PLL ADF4159 s doplněným EPADem

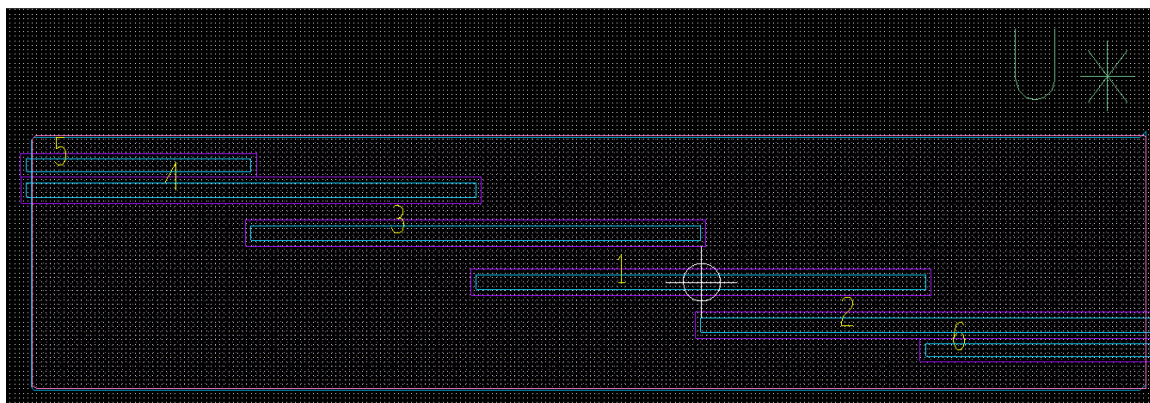
Prvním krokem po vytvoření části pouzdra je nastavení rastru (grid). Pro případ standardních součástek byl ve většině případů používán rastr 0,1mm, pro mikrovlnné motivy rastr až 0,01mm.

Pouzdro QFN24 se skládá z několika součástí a vrstev. Samotný obrys součástky je v třídě PACKAGE GEOMETRY a to ve vrstvách SLIKSCREEN_TOP a ASSEMBLY_TOP. Kde první vrstva označuje servisní potisk, v obr. 14.2.1. označeno zelenou barvou a druhá vrstva je pro osazovací výkres, v obr. 14.2.1. označeno světle modrou barvou. V těchto vrstvách jsou i popisy (reference) součástek a to v třídě RefDes na zmíněném obrázku to je nápis U*. Dále je nutné přidat vyplněný útvar například obdélník v třídě PACKAGE GEOMETRY a vrstvách PLACE_BOUND_TOP a DFA_BOUND_TOP. První vrstva zaručuje, aby se součástky neskládaly přes sebe a druhá, aby byly dodrženy rozestupy mezi součástkami. Obě vrstvy ohraničují součástku včetně jejích pinů a jsou tedy o tuto velikost větší než samotná součástka.

14.3. Návrh pouzdra mikrovlnné mikropáskové pásmové propusti

Pásmovou propust by bylo možné vytvořit i přímo až při tvorbě layoutu desky, to by ale přineslo problém s případným posouváním propusti a proto byla vytvořena jako samostatná součástka se svým pouzdem.

Pokud by byly vytvářeny jednotlivé čtvrt vlnné pásky jako piny (pájecí plošky) mohlo by snadno dojít ke špatnému překrytí, nebo jiné rozměrové nepřesnosti, navíc by bylo větší množství pinů. Proto bylo vytvořeno 6-ti pinové pouzdro se 4-mi půl vlnnými vedeními a 2-mi čtvrt vlnnými vedeními pro připojení součástky. Ve schématu jsou jen 2 piny a zbylé nejsou zobrazeny a pomocí vlastnosti NC označeny za nepřipojené. Pouzdro pásmové propusti je na obr. 14.3.1. Celá struktura je opět ohraničena příslušnými vrstvami proti překrytí a umístění jiné součástky do prostoru propusti.



Obr. 14.3.1. Pouzdro mikropáskové pásmové propusti

14.4. Návrh prokovu (Via)

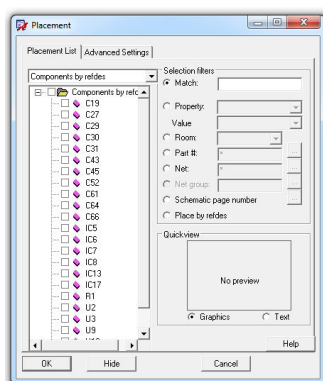
Důležitým prvkem DPS je prokov neboli via. Jde o spoj mezi vrstvami, případně mezi spodní a horní vrstvou u dvouvrstvých desek. Prokovů bylo hojně využíváno v okolí mikrovlnných vedení pro zamezení šíření vlny mezi zemní rovinou zespodu desky a rozlitou mědí z horní strany. Rovněž byly použity na okrajích desky, aby do desky a z desky nemohlo pronikat rušení.

Jeden prokov byl umístěn u libovolné součástky umístěné na zem a poté rozkopírován po zbytku DPS. Vkládat lze po jednom nebo v obrazcích s počtem řádků a sloupců, toho bylo využito na rozsáhlých oblastech.

Prokov byl zvolen s průměrem vrtané díry 0,4mm a průměrem mědi 0,8mm. Tyto rozměry jsou vyrobiteľné bez zvýšené ceny za technologickou náročnost.

14.5. Layout celé desky

Pro přechod ze schématu do layoutu je nutné přiřadit každé součástce ve schématu přiřadit tzv. footprint nebo-li obraz na desce plošných spojů. Pro přiřazení lze přejít ke generaci netlistu. Před vytvořením netlistu se ve schématu kontrolují návrhová pravidla jako je připojení všech pinů součástek, přiřazení footprintů, zda se shoduje pouzdro a schematická značka. Nelze, aby pouzdro a schematická značka měli různý počet pinů. V práci se tento případ několikrát vyskytuje, ale je ošetřen. Jedná se o nezapojené piny a proto nejsou ve schematické značce viditelné, ale jsou definovány pomocí vlastnosti NC. Po úspěšném vygenerování netlistu se po vybrání otevře OrCAD PCB Designer Professional w/PSpice. Opět je nutné nastavit rastr, v práci je 0,01mm pro přesné umístění elementů. Prvním krokem by se zdálo být nastavení velikosti desky DPS, avšak lze definovat až na závěr a proto není zatím definována. První úkol je rozmístění součástek. Součástky se rozmísťují ze seznamu neumístěných součástek podle svých referencí. Tento seznam je vidět na obrázku 14.4.1. Po zaškrtnutí příslušné součástky a kliknutím na plochu návrhu se vybraná součástka umístí a zmizí ze seznamu. Tento postup je nutné provádět až do doby prázdného seznamu.



Obr. 14.4.1. Seznam neumístěných součástek

Pro rozmístění součástek se využívá několik metod. Metoda schématu rozmístí součástky jako ve schématu a následně rozmístění optimalizuje. Další metodou rozmístění je metoda konektorů. Nejprve se rozmístí vstupní a výstupní konektory a následně se vyplňuje prostor mezi nimi.

Další metodou, která byla zároveň použita v práci je metoda centrální součástky. Při této metodě jsou součástky rozmisťovány postupně okolo nejsložitějšího obvodu.

V práci to byl PLL ADF4159, z důvodu největšího počtu zapojených vývodů a to 22. Poté byly zapojovány vývody s jednou či dvěma součástkami, poté mikrovlnné cesty a následně zbytek.

Výsledná DPS měla mít z dolní strany pouze zemní rovinu a SMA konektory a z horní vše ostatní. To je bohužel u některých integrovaných obvodů nerealizovatelné a proto je několik spojů i ze spodní strany desky. Spoje ze spodní strany jsou vedeny tak, aby nikde neprocházeli pod mikrovlnným vedením nebo v jeho okolí a neovlivňovaly tak mikrovlnnou trasu. Z mikrovlnného hlediska by kompaktnost zemní roviny neměla být narušena. Na horní straně desky je všude kde je to možné rozlita měď, která je připojena na zem.

Součástky jsou rozmístěny po funkčních celcích, které budou rozděleny pruhem země a na něm navíc mechanickou hliníkovou přepážkou nad deskou. Jednotlivé celky jsou LNA, pásmová propust, směšovač, wilkinsonův dělič a zbylé obvody pro generaci RF signálu a napájení.

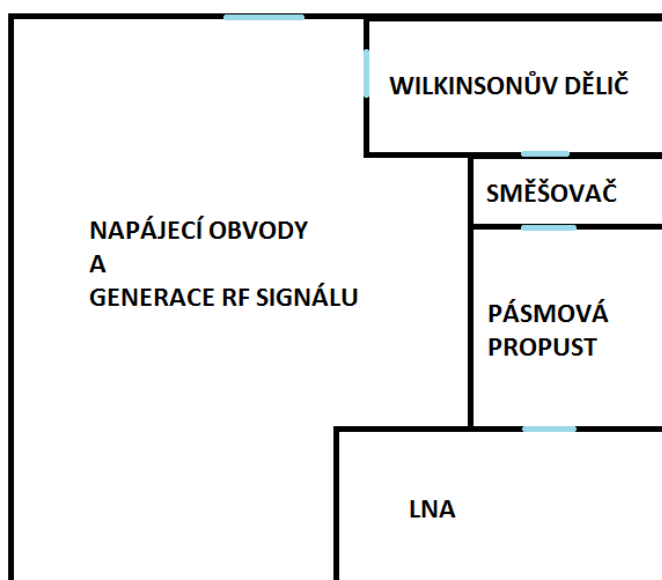
Jak již bylo rozebráno v kapitole 10 je vedení před součástkami zúženo společně se zemí. Takovýto motiv OrCad nakreslit neumí a proto muselo být vedení rozděleno na více úseků. První úsek vedení o tloušťce pájecí plošky pinu je krátký úsek, poté skokově přejde v definovanou plnou tloušťku a těsně před další součástkou je opět zúženo na tloušťku pinu. Nyní jsou součástky propojeny, ale vedení má skokové změny. Ty se odstraní pomocí namalování příslušného vyplněného tvaru. Často byla použita volba polygon, kdy se nakreslí obrys vyplněné oblasti. Oblast je nutné definovat zda je rozlitou mědí, dutinou, plným tvarem apod. Také je nutné nastavit název oblasti pro návrhové připojení oblastí. Pokud se vedení jmenuje např. RF8, musí se takto jmenovat i kreslená oblast. Příklad takovéto oblasti je na obrázku 14.4.2.



Obr. 14.4.2. Domalovaný přechod z jedné šířky vedení na druhý

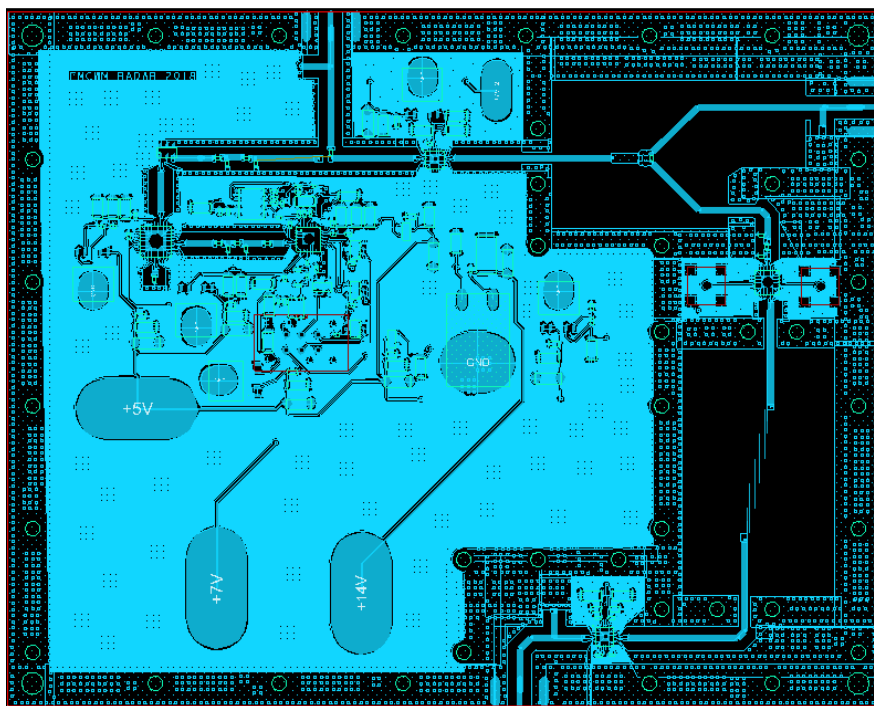
Po domalování přechodů se domalovala zem kolem vedení s názvem GND.

Na obrázku 14.4.3. je vidět přibližné rozmístění oddělených sekcí na desce. Modře jsou znázorněny průchody mezi sekcemi. Tyto ohraničení jsou po obvodu desky v šířce 7mm a na ploše desky v šířce 5mm. Na tyto pásy mědi připojené na zem budou po osazení našroubovány hliníkové stěny a proto jsou v zemních páslech připraveny díry na šrouby M3,5 v rozích desky a M2,5 jinde. V rozích jsou díry M3,5 připraveny pro distanční sloupky a zbylé díry M2,5 pro spojení DPS a hliníkových stěn.



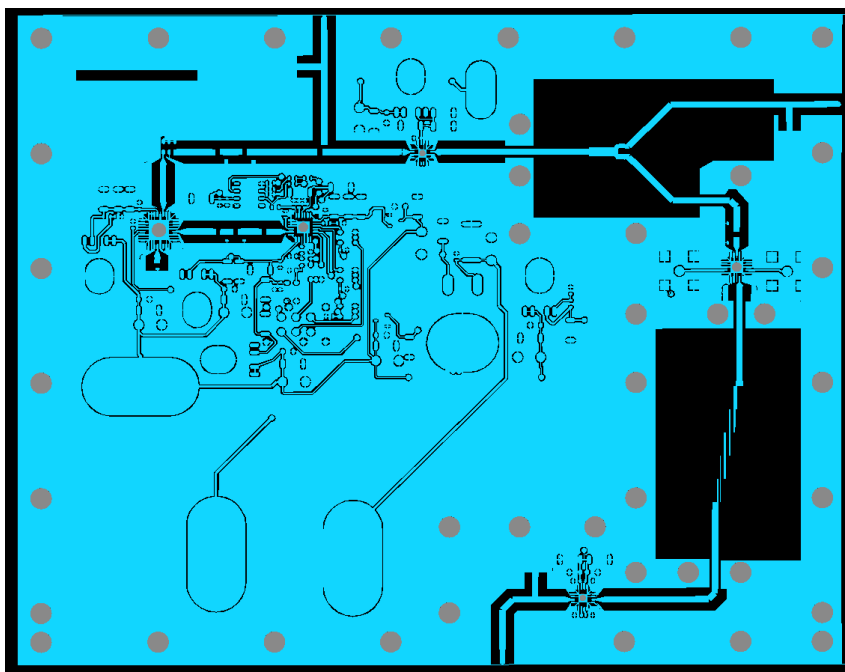
Obr. 14.4.3. Přibližné rozmístění oddělených sekcí na desce

Díry bylo nutné do layoutu nějak umístit. Díry nebyly umístěny jako elektrické symboly, ale jako mechanické. Pro mechanický symbol stačí navrhnout plošku o daných rozměrech a tu poté umístit stejně jako součástky, jen ji lze najít v záložce mechanické symboly. Mechanický symbol lze umístit kamkoliv. Díry byly v rámci možností umístěny do rastru pokud to bylo možné. Přesné rozmístění děr je vidět na desce DPS a výrobním výkresu hliníkových stěn v příloze E. Pohled na výslednou desku ve vrstvě mědi z horní strany je na obrázku 14.4.4.



Obr. 14.4.4. Pohled na vrstvu mědi z horní strany DPS

Na obrázku 14.4.4. jsou domalované obrazce mědi připojené na zem nevyplněné, pro lepší představu je obrázek 14.4.5. Na tomto obrázku je pohled z nástroje 3D Wiew, kde jsou všechny měděné plochy plně vybarveny.



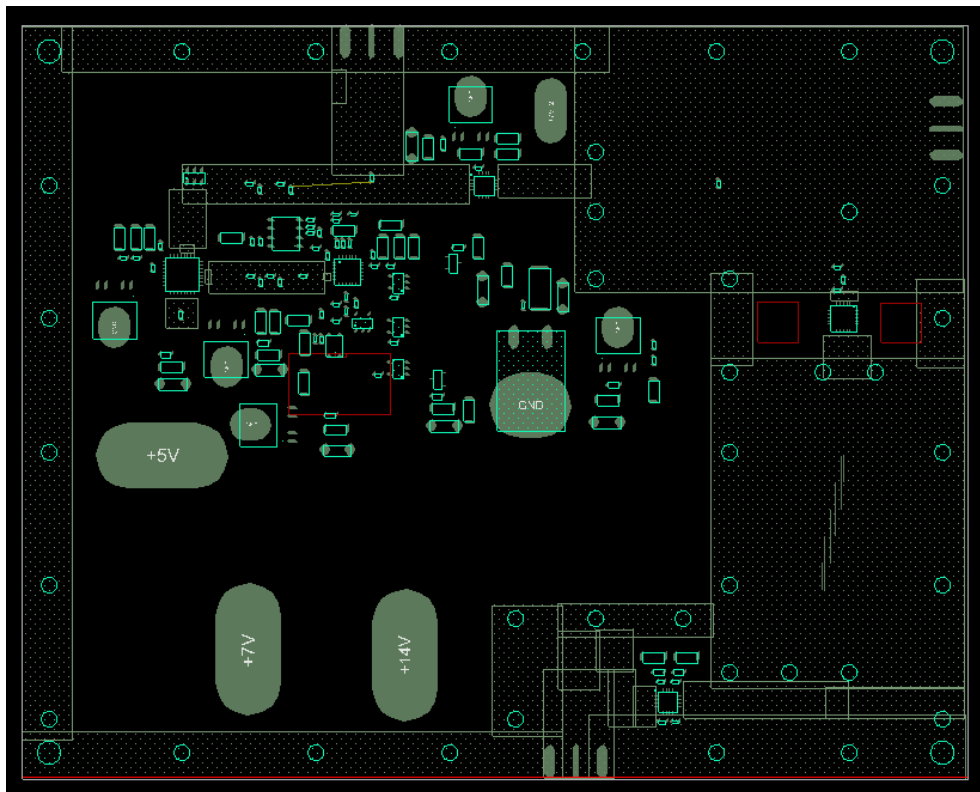
Obr. 14.4.5. Pohled na vrstvu mědi z horní strany DPS v nástroji 3D Wiew

Po dokončení návrhu je nutné definovat velikost desky, pokud nebyla definována na začátku návrhu. V práci se jedná o jednoduchou obdélníkovou desku rozměrů

142x113mm. Tato deska se tedy nakreslila obdélníkem ve třídě Board Geometry a vrstvě Outline.

K dokončení návrhu zbývá definovat pozice nepájivé masky, pokud je potřeba. Nepájivá maska nesmí být nikde přes mikrovlnná vedení aby nezměnila vlastnosti vedení. Dalším místem bez masky jsou plochy pod hliníkovými stěnami. Zde není maska z důvodu dobrého elektrického spojení hliníkových stěn se zemí na všech místech spojení.

Nepájivá maska je v Orcadu definována inverzně, tzn. kde je v layoutu definována tato vrstva, tam maska není. Defaultně je nepájivá maska po celé ploše DPS. Masku lze kreslit např. pomocí vyplněného tvaru ve třídě Board Geometry a vrstvě Soldermask_Top. Definované oblasti nepájivé masky na horní straně desky jsou na obrázku 14.4.6.



Obr. 14.4.6. Pohled na vrstvu nepájivé masky z horní strany DPS

14.6. Generace výrobních dat

Po kompletním návrhu layoutu desky je nutné vytvořit výrobní data pro výrobce DPS. Výrobní data se skládají ze souboru vrtačky a gerberu. Gerber obsahuje vybrané vrstvy spoje jako měď, potisk, nepájivá maska apod. Soubor vrtačky obsahuje průměry děr, počet daných děr a souřadnice pro souřadnicovou vrtačku. Úvodní část dat pro vrtačku je na obrázku 14.6.1. Název souboru pro vrtačku je název layoutu-z vrstvy-do vrstvy.drl. Tedy v práci je to senzor-51-1-4.drl. Tzn. že všechny vrtané díry jsou z vrstvy 1 do vrstvy 4. Podle definice vrstev v OrCadu je to tedy vrtaný otvor z horní vrstvy do spodní.

```

M48
METRIC
T01C.4064
T02C.9
T03C1.1
T04C1.3
T05C1.7
T06C2.5
T07C3.7
;LEADER: 12
;HEADER:
;CODE : ASCII
;FILE : sensor-51-1-4.drl for ... layers TOP and BOTTOM
;T01 Holesize 1. = 0.406400 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 3701
;T02 Holesize 2. = 0.900000 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 6
;T03 Holesize 3. = 1.100000 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 8
;T04 Holesize 4. = 1.300000 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 2
;T05 Holesize 5. = 1.700000 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 2
;T06 Holesize 6. = 2.500000 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 1
;T07 Holesize 7. = 3.700000 Tolerance = +0.000000/-0.000000 PLATED MM Quantity = 42
%
G90
T01
X000162000Y-001242300
X000172000Y-001242300
X000182000Y-001242300
X000192000Y-001242300
X000202000Y-001242300
X000212000Y-001242300
X000222000Y-001242300
X000232000Y-001242300
X000242000Y-001242300
X000252000Y-001242300
X000262000Y-001242300
X000272000Y-001242300
X000282000Y-001242300
X000292000Y-001242300

```

Obr. 14.6.1. Úvodní data pro souřadnicovou vrtačku

Gerbery v této práci obsahují následující vrstvy:

- TOP a BOT - Vedení spojů na horní a dolní straně
- PLT a PLB - Potisk součástek a spojů
- SMT a SMB - Nepájivá maska na horní a dolní straně (Solder Mask)
- SPT a SPB - Pájecí pasta na horní a dolní straně (Solder Paste)
- MILL - Vrstva obrysu pro frézu

Začátek gerberu pro vrstvu TOP obsahující vedení spojů a měděné obrazce v horní vrstvě je na obrázku 14.6.2. OrCad vygeneruje soubory s názvem vrstev a formátu .art, tyto soubory je nutné přejmenovat dle požadavků výrobce a přepsat formát .art na .gbr.

```

G04 ===== begin FILE IDENTIFICATION RECORD =====*
G04 Layout Name: C:/Diplomka/ORCAD/senzor/senzor-51.brd*
G04 Film Name: TOP*
G04 File Format: Gerber RS274X*
G04 File Origin: Cadence Allegro 16.6-s017*
G04 Origin Date: Mon Apr 23 09:37:23 2018*
G04 *
G04 Layer: VIA CLASS/TOP*
G04 Layer: PIN/TOP*
G04 Layer: ETCH/TOP*
G04 *
G04 Offset: (0.0000 0.0000)*
G04 Mirror: No*
G04 Mode: Positive*
G04 Rotation: 0*
G04 FullContactRelief: No*
G04 UndefLineWidth: 8.0000*
G04 ===== end FILE IDENTIFICATION RECORD =====*
%FSAX45Y45*MOMM*%
%IR0*IPPOS*OFA0.00000B0.00000*MIA0B0*SFA1.00000B1.00000*%
%ADD260,1.X.5*%
%ADD230,.61X1.*%
%ADD390,3.2X.7*%
%ADD160,1.6X.7*%
%ADD43R,.23X4.03*%
%ADD140,.7X1.6*%
%ADD44R,.27X8.06*%

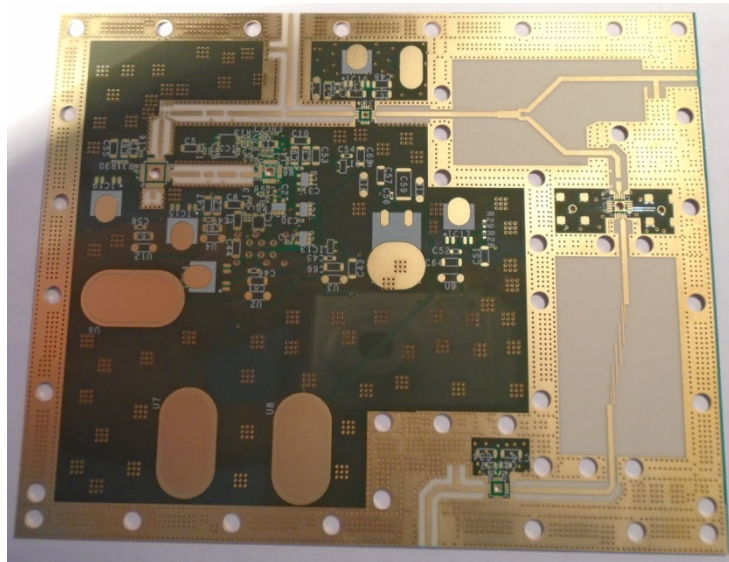
```

Obr. 14.6.2. Úvod gerberu pro vrstvu TOP

Po sestavení výrobních dat se tato data odešlou výrobcí s poptávkou výroby. V případě této práce je výrobcem DPS firma PragoBoard. Gerber soubory mají názvy, tak jak je uveden výčet vrstev výše.

15. Vyrobená deska DPS a osazení

Na obrázku 15.1 je zobrazena vyrobená deska DPS. Na desce bylo po prohlédnutí odhaleno několik chyb. První chybou bylo neodmaskování pod zemní částí SMA launch end konektorů. To bylo vyřešeno odškrábáním nepájivé masky pomocí skalpelu. Druhou chybou bylo neprovrtnání otvorů pro SMA konektory v pravé části nad pásmovou propustí. Provrtnán byl pouze otvor pro střední vodič, čtyři zemní vodiče nebylo možné zapájet. Bylo vyřešeno následným provrtáním otvorů a odškrábání nepájivé masky opět pomocí skalpelu. Osazovací plán je v příloze C.



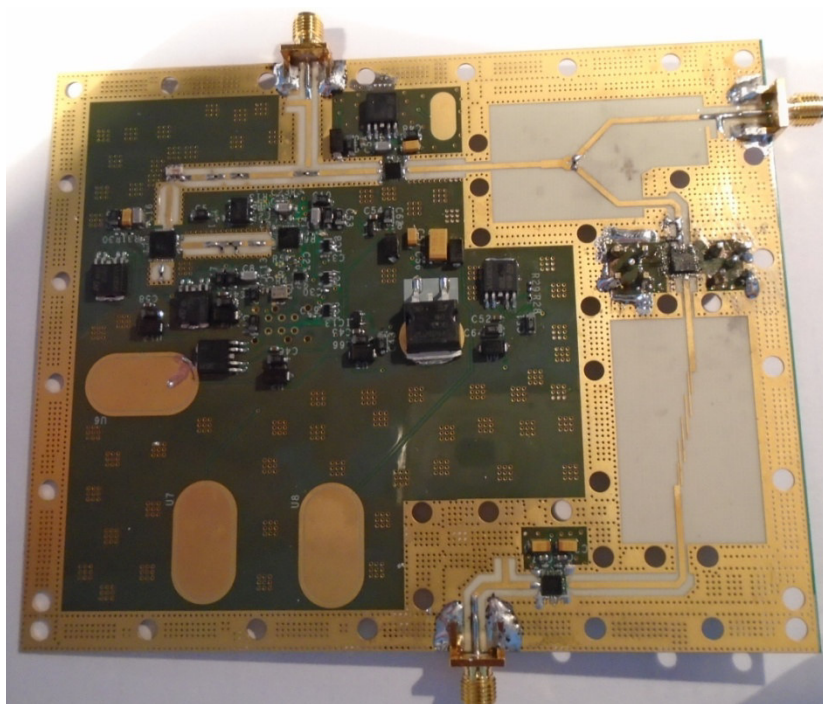
Obr. 15.1. Vyrobená deska

Mikrovlnné integrované obvody byly osazeny následujícím postupem. Nejprve byl pocínován zemní pin (EPAD) na spodní straně obvodu. Poté byl zacínován otvor v místě EPADu na desce a nanášeno tavidlo. Po této přípravě byl obvod přibližně umístěn na své místo. Následovalo vložení hrotu pájky zesponu desky do zacínovaného otvoru a prohřátí celé oblasti. Při roztavení cínu se integrované obvody na dobře navrženém EPADu samy srovnají. Následuje použití tavidla a zapájení ostatních pinů. Po zapájení obvodů byla provedena optická kontrola pomocí mikroskopu. Tímto způsobem se povedlo připájet 4 z 5 mikrovlnných obvodů. Jeden obvod byl připájen našikmo a jednu stranu nebylo možné připájet. Oprava byla provedena pomocí nahřátí horkým vzduchem a srovnáním pomocí pinzety.

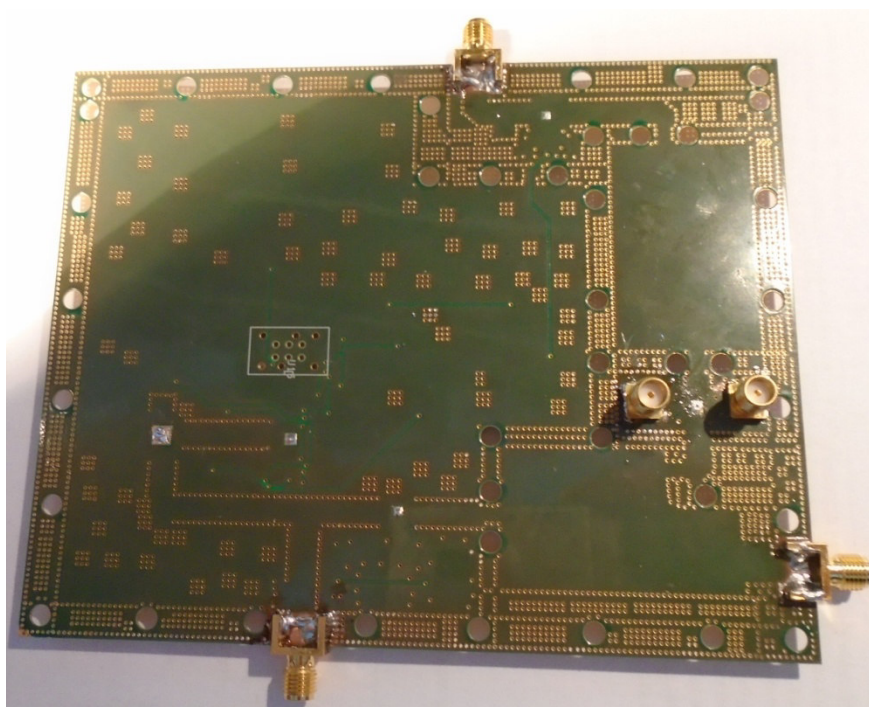
Při osazování se objevily problémy s velikostí některých pouzder. Např. operační zesilovač ve smyčce fázového závěsu se nevešel na své místo a byly mu ohnuty nohy k sobě. Referenční oscilátor má v návrhu pouzdra prohozená čísla pinů a proto nebylo

možné ho připájet. Připájen je na napájecím pinu a zbylé dva zapojené piny jsou spojeny s deskou pomocí slabých drátků.

Osazená deska je na obrázku 15.2 z horní strany a na obrázku 15.2. z dolní strany.



Obr. 15.2. Osazená deska z horní strany



Obr. 15.3. Osazená deska z dolní strany

16. Oživování senzoru

Na osazenou desku v místě napájecích plošek byly připájeny napájecí kabely, které byly připojeny k laboratornímu zdroji. Na zdrojích byly nastaveny proudové ochrany a proudová ochrana zafungovala na napěťové hladině 14V. Nejprve byla deska a připájené součástky zkontrolovány, zda v nějakém místě nevznikl zkrat. Zkrat nebyl nalezen a po přistoupení kontroly zapojení dle layoutu byla odhalena příčina. Příčinou byl přepólovaný tantalový kondenzátor C5, který byl přepólováním zničen. Po výměně tohoto kondenzátoru již proudová ochrana nezapůsobila. Nyní byl připojen spektrální analyzátor na výstupní konektor určený pro vysílací anténu. Na konektoru byl změřen na frekvenci 11,44GHz RF výkon 0dBm, podle výpočtu by zde mělo být 15,5dBm. To vedlo k podezření, zda zesilovač v trase za VCO zesiluje. Pro ověření bylo využito externího vstupu s SMA konektorem po přepájení propojky. Na tento externí vstup byl připojen vektorový analyzátor VNA se známým výkonem a frekvencí. Z toho lze vypočítat přenos celé trasy a byla ověřena funkčnost zesilovače.

Protože na výstupu byl RF signál, bylo usouzeno, že VCO je funkční. Proto následovalo ověření horní propusti v trase za VCO a před zesilovačem. Prvním pokusem bylo vyjmutí propusti a propojení vedení. To hodnotu výkonu na výstupu značně zvětšilo a proto byla horní propust buď vadná, nebo zaměněna s pásmovou propustí jiného frekvenčního rozsahu. Po výměně pásmové propusti za jinou bylo dosaženo úrovně výstupního RF signálu +13dBm. To lze považovat za správnou hodnotu s ohledem na orientační výpočet s hodnotou 15,5dBm.

Nyní následovalo ověřování funkce přijímací trasy a to LNA a směšovače. Přijímaný signál byl simulován vybuzením opět pomocí VNA se známou frekvencí a výkonem. Spektrální analyzátor byl připojen na IQ výstupy směšovače. Na očekávané frekvenci byl očekávaný signál, ale místo očekávané úrovně kolem -40dBm zde bylo pouze -60dBm. Směšovač je pasivní a bylo tedy nutné zkontrolovat, zda zesiluje LNA. Pomocí výpočtu vyšel LNA jako útlumový člen. Po kontrole zapojení a připájení bylo změřeno napájecí napětí. Napájecí napětí mělo hodnotu 4,5V místo napočítaných 3,5V. To je mezní hodnota pro HMC903 a LNA byly zničeno. Problém s napájením vznikl kvůli chybnému výpočtu poměru rezistorů, který řídí výstupní napětí lineárních stabilizátorů. Rezistory R28, R29 a R30 byly vyměněny za odpovídající hodnoty a LNA objednáno a poté vyměněno.

Po výměně a následném zapojení se výstupní výkon IQ výstupů na požadovaném kmitočtu stále nezvětšil. Při větším rozsahu spektrálního analyzátoru se objevila složka kolem 1GHz s amplitudou kolem -10dBm. Po přiblížení předmětu poblíž LNA se tato složka posouvala. Z tohoto poznatku bylo možné odvodit, že LNA kmitá. Prvním krokem bylo ověřování přízpusobení na vstupech a výstupech pomocí atenuátoru. To k výsledku nevedlo a LNA stále kmitalo. Dalším krokem byl předpoklad, že napájecí napětí LNA není dostatečně čisté. Do napájecí trasy poblíž LNA byl tedy záměr doplnit tlumivku. Tu bohužel nebylo kam připojit a proto bylo napájecí vedení mezi kondenzátory přeřízáno pomocí skalpelu a tlumivka připájena přímo na kondenzátory. Po opětovném měření LNA stále kmitalo. Následná kontrola pod mikroskopem opět nic neodhalila. Další možná příčina je zemnění. Bylo proto znovu prohráno napájení zemního EPADu, a pečlivě zkontrolovány ostatní země. Toto bylo příčinou kmitání LNA a po opravě zemnění již LNA funguje dle očekávání.

Po připravení řídicího programu proběhlo ověření na osciloskopu viz. kapitola 17, obrázek 17.4. Ověřováno bylo zda řídicí signály nepřesahují úroveň 5V. Po tomto ověření

byly řídicí signály připojeny k desce a fázovému závěsu. Ani po opakovaných pokusech se výstup PLL neměnil, stále zde bylo napětí kolem 2V, následný operační zesilovač v saturaci na napájecím napětí 12V a VCO tedy stále vysílalo kmitočet 11,44GHz. Prvním krokem ke zjištění závady bylo proměření voltmetrem zda na všech napájecích pinech je příslušné napětí. Napájecí napětí bylo na všech pinech v požadovaných hodnotách. Po měření řídicích impulsů za AND hradly NC7SZ08P5X pomocí osciloskopu bylo zjištěno, že se nepravidelně po chvíli objevují na řídicích pinech PLL při přepnutí úrovně překmity až v úrovni 5,2V. Výrobce hradel přitom v datasheetu udává, že napětí na výstupu hradel není závislé na vstupním napětí a dosáhne maximálně úrovně napájecího napětí samotného hradla, zde 1,8V. Tyto překmity zároveň pronikaly do napájecí hladiny a poté se šířily do všech čtyř hradel na desce. Prvotním pokusem bylo zatížit kondenzátor na výstupu stabilizátoru hladiny 1,8V paralelním rezistorem připojeným k zemi. Toto řešení bylo bez výsledku a překmity se stále objevovaly. Překmity byly nejspíše způsobeny parazitními kapacitami hradel. Dále následovalo připojení podélných rezistorů 750Ω do trasy mezi vstupní konektor desky a výstup programovací desky NHduino UNO. Po této úpravě již nebyly překmity zaznamenány. Překmity pravděpodobně způsobily destrukci PLL, který má maximální úroveň napětí na digitálních pinech 2,1V. Obvod se tedy stal nepoužitelným.

Po této úpravě, kdy již překmity nebyly zaznamenány byl PLL vyměněn. Pomocí řídicího programu byl PLL nahrán, ale na výstupu nebyl signál. Po připojení osciloskopu na všechny řídicí piny PLL bylo zjištěno na pinu DATA trvalá přítomnost napětí +1,8V a registry tudíž nemohly být nahrány. Z této hladiny +1,8V jsou napájena pouze tato čtyři řídicí hradla. Z tohoto důvodu bylo podezření na zkrat mezi hladinou +1,8V a řídicím vodičem DATA. Po ohledání desky na zkrat vzniklý při pájení a konstrukční vady bylo objeveno křížení vodičů +1,8V a řídicím vodičem DATA. Z důvodu že OrCad není určen pro mikrovlnné aplikace obsahoval stovky chyb při elektrické kontrole a tato skutečná chyba byla přehlédnuta. Oprava byla provedena přerážnutím vodiče DATA a tím oddělení od hladiny +1,8V a následně vodič DATA propojen pomocí drátové propojky mezi prokvy tohoto vodiče.

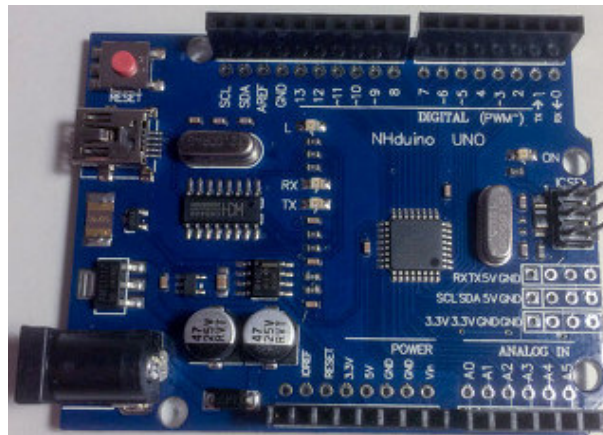
Po odstranění výše uvedených závad je již zařízení plně funkční.

17. Řízení fázového závěsu a generace RF signálu

Řízení fázového závěsu je provedeno nahráním registrů. Registrů je 7 a k tomu se 3 registry nahrávají dvakrát se změnou jednoho bitu. Celkem je tedy nutné nahrát 10 registrů. Registr obsahuje celkem 32 bitů a je detailně popsán v datasheetu. Pro řízení fázového závěsu jsou použity 3 piny. Jsou to piny Latch enable (LE), DATA a hodiny (CLK). Pro zahájení zápisu musí být na pinu LE logická 0 a pro ukončení logická 1. Data se do registrů zapisují, pokud je na CLK pinu logická 1. Logika obvodu PLL je v napěťové hladině 1,8V a proto jsou na vstupu připojena logická hradla. Konkrétně AND hradla napájená z hladiny 1,8V, která mohou fungovat s logikou na vstupu 1,8V až 5V.

Dle zadání práce je vyžadováno připojení kontroléru pomocí USB. Proto bylo zvoleno NHduino Uno. O programování NHduina pojednává zdroj [12]. Jedná se o prefabrikovanou desku obsahující mikroprocesor AtMega 328P dále obvody paměti,

převodníků apod. NHduino lze připojit pomocí USB k počítači a snadno programovat pomocí vlastního jazyku Wiring. NHduino je zobrazeno na obrázku 17.1. Pro naprogramování registrů je nutné ovládat pouze digitální piny a jejich logické úrovně.



Obr. 17.1. Deska NHduino

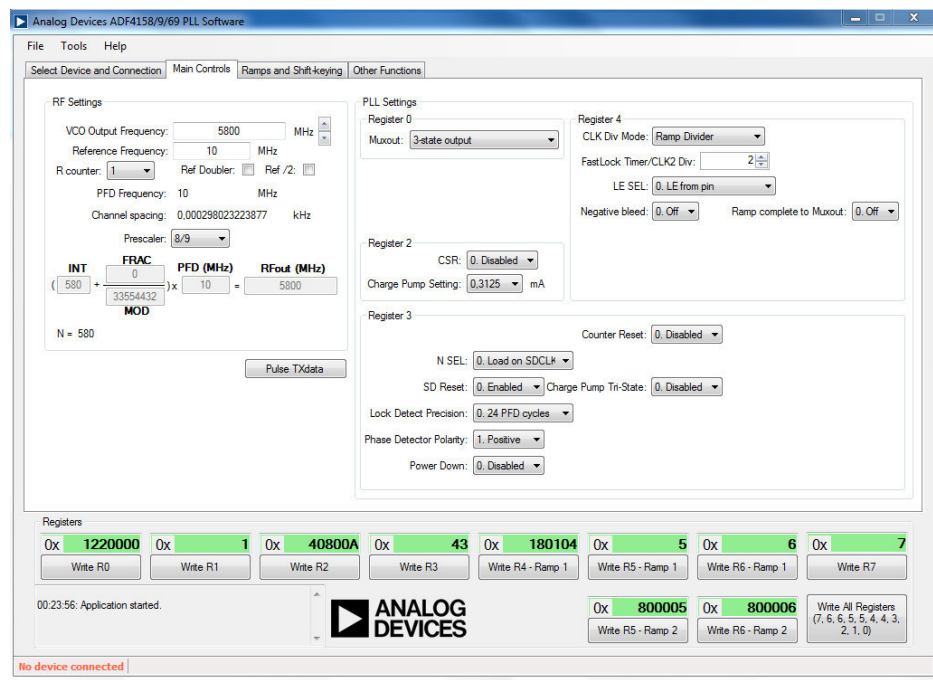
Samotný program obsahuje definici proměnných (nahrávaných registrů), definici pinů, cyklus pro postupné nahrávání. Postup nahrávání registrů je popsán v datasheetu a je v pořadí od R7 do R0. Proměnné představující registry jsou definovány jako pole obsahující 32 hodnot. Dále následuje cyklus, který postupně prochází pole hodnotu po hodnotě. V tomto cyklu je rozhodovací algoritmus, zda je na daném místě logická 1 nebo 0. Podle obsahu pole na daném místě je rozhodnuto o úrovni high nebo low na pinu data. Po nastavení pinu na danou hodnotu je umístěna prodleva a poté jsou hodiny nastaveny na hodnotu high. Tím je bit registru zapsán, následuje opět prodleva a poté přepnutí hodin zpět na úroveň low. Část programu obsahující cyklus pro nahrání jednoho registru je na obrázku 17.2.

```
digitalWrite (10, HIGH); // vypnutí zápisu do chipu
delay (100); // čekání na start programu
digitalWrite (10, LOW); //start zápisu dat
delay (10); // čekání na přípravu zápisu

for (int i = 0; i < 32; i++)
{
  if (R07[i] == 1)
  {
    digitalWrite (13, HIGH); // PIN DATA na HIGH úroveň
    delay (cas1);
    digitalWrite (12, HIGH); // PIN CLOCK na HIGH úroveň (zápis do registru)
    delay (cas2);
    digitalWrite (12, LOW); // PIN CLOCK na LOW úroveň (nezapisuje do registru)
    delay(cas3);
  }
  else
  {
    digitalWrite (13, LOW); // PIN DATA na LOW úroveň
    delay (cas1);
    digitalWrite (12, HIGH); // PIN CLOCK na HIGH úroveň (zápis do registru)
    delay (cas2);
    digitalWrite (12, LOW); // PIN CLOCK na LOW úroveň (nezapisuje do registru)
    delay(cas3);
  }
}
```

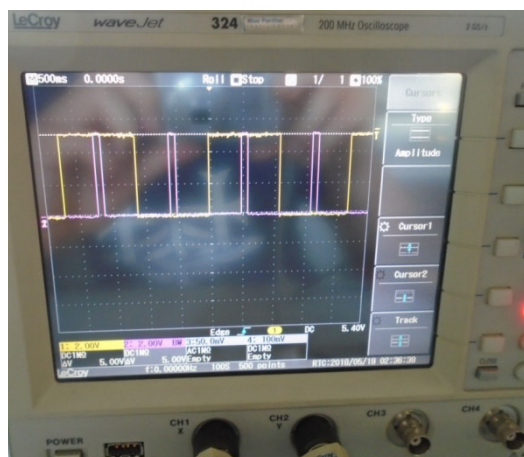
Obr. 17.2. Část programu nahrávající jeden registr

Pro definici hodnot jednotlivých registrů lze použít dvou metod. Vyhledat daný registr v datasheetu a dle popisu určit jeho obsah. Druhou jednodušší možností je využití programu ADF4158-9 od Analog Devices. V tomto programu je nutné vybrat typ obvodu a dále funkční vlastnosti a parametry. Ukázka programu je na obrázku 17.3. Po definici všech potřebných parametrů je zobrazen obsah registrů v hexadecimální soustavě. Tyto hodnoty jsou převedeny do binární soustavy a vloženy do proměnných v řídicím programu. Toto řešení nebylo funkční a proto bylo použito zároveň softwaru ADF4158-9 se souběžnou kontrolou a případným doplněním dle datasheetu.



Obr. 17.3. Ukázka programu ADF4158-9 od Analog Devices

Program byl vyvíjen a testován pomocí nepájivého pole a LED diod. Kde jednoduše rozsvícená dioda reprezentuje logickou 1 a zhasnutá logickou 0. Po napsání programu byl řídicí signál zobrazen pomocí osciloskopu. Toto zobrazení je na obrázku 17.4. Na obrázku žlutá stopa reprezentuje signál na pinu data a růžová na pinu hodin. Je patrné, že hodiny jsou aktivovány, až když jsou data bezpečně nastavena.

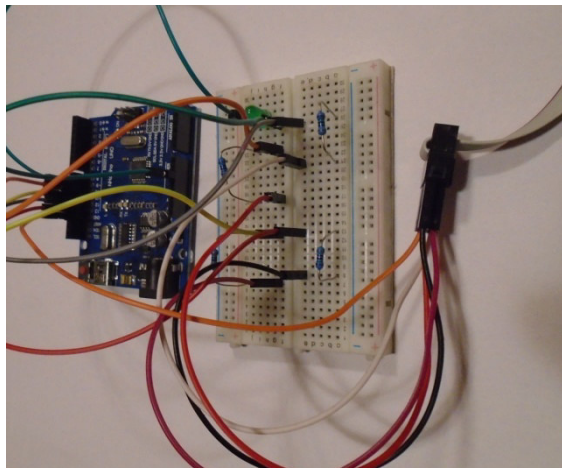


Obr. 17.4. Průběh signálů na pinu DATA a CLK

Připojení NHduina k desce je realizováno pomocí plochého kabelu a PFL konektorů. NHduino lze napájet i přímo z desky, kde je přivedena na plochý kabel s řídicími signály i napěťová hladina +7V. Zapojení NHduina k desce je na obrázku 17.5. Zapojení je vedeno přes podélné odpory 750Ω v nepájivém poli na plochý konektor PFL. V nepájivém poli je zapojena LED dioda, která svým rozsvícením indikuje konec nahrávání registrů do PLL a tedy zahájení funkce PLL, pod dobu nahrávání je zhaslá.

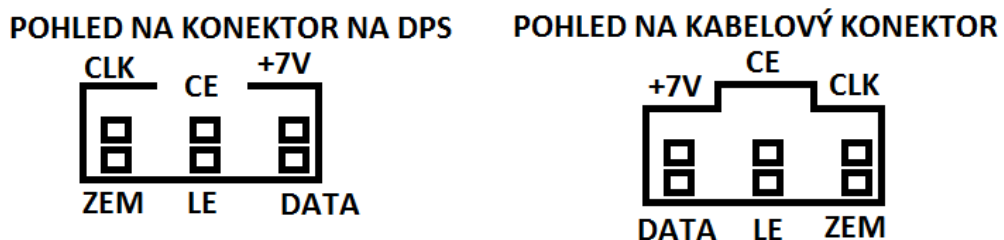
Zapojení do desky NHduina je následující:

- PIN DATA - PIN 13
- PIN CLK - PIN 12
- PIN CE - PIN 11
- PIN LE - PIN 10
- INDIKACE - PIN 9



Obr. 17.5. Připojení desky NHduino k plochému kabelu k desce DPS

Zapojení pinů na desce a na kabelu je zobrazeno na obrázku 17.6. Hladina +7V je výstupní napětí z desky.



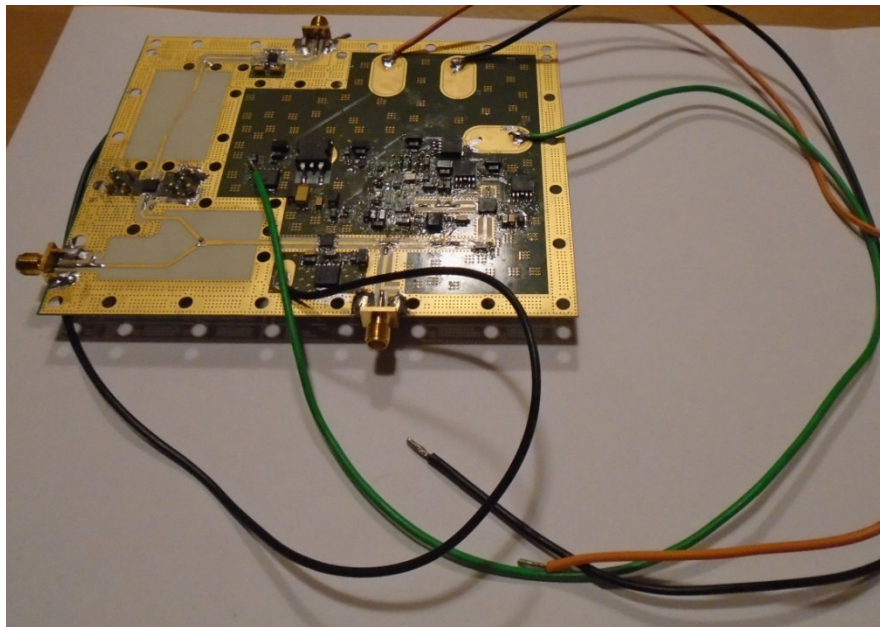
Obr. 17.6. Zapojení pinů na konektor na desce a na kabelu

18. Hotový senzor

Hotový senzor tedy osazený, oživený, naprogramovaný a ověřený má v režimu CW na výstupu po odečtení útlumu kabelu a externích předřadných atenuátorů kvůli ochraně vstupů spektrálního analyzátoru hodnotu výkonu +13dBm. Napájení je provedeno pomocí 3 napájecích hladin a to +14V, +7V a +5V. Senzor obsahuje 3 SMA launch end konektory pro RF signál, a to vstup pro externí generátor(po přepájení propojky), výstupní RF signál a vstupní RF signál. Výstupní signál může být v rozsahu VCO a to 10,43-11,46GHz. Dále deska obsahuje dva SMA konektory jako IQ výstupy ze směšovače určené pro zpracování v budoucí aplikaci. Rozsah signálu IQ výstupů je DC-4GHz.

Pro řízení je obsažen plochý PFL konektor na který se připojí v současné době externí programovací deska NHduino. V budoucí aplikaci bude pravděpodobně umístěno přímo na desce se zdroji a zpracováním signálů ze směšovače. Řízení je možné provádět pomocí změny hodnot v registrech PLL. Tato změna se provádí v řídicím programu výměnou hodnot v poli příslušného registru. Řízení je prováděno přes rozhraní USB a po nahrání programu je již uložen v desce NHduino i po odpojení napájení (lze kdykoliv přehrát).

V budoucnu bude k desce DPS přiložen hliníkový obrobek stínící jednotlivé sekce senzoru. V současné době dochází k přeslechům vlivem neoddělených sekcí. Pohled shora na hliníkový obrobek je v příloze E. Hotový senzor je na obrázku 18.1.

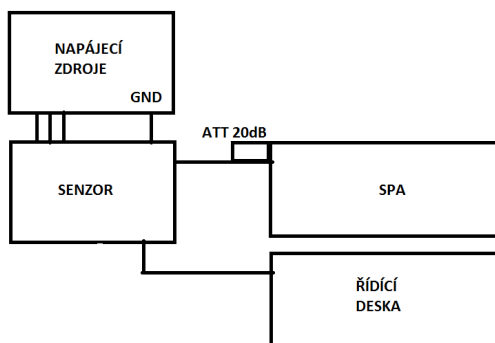


Obr. 18.1. Hotový senzor

19. Měření

Pro měření byly použity dva laboratorní zdroje a to TSZ 75 a VOLTcraft. Napájení ze zdrojů bylo v hladinách +5V, +7V a +14V.

Pro měření RF signálu byl použit spektrální analyzátor Agilent E44448A. Při měření výstupního RF signálu bylo používáno blokové schéma zobrazené na obrázku 19.1. Na vstupu spektrálního analyzátoru je umístěn 20dB atenuátor, protože dle předpokladu by na výstupu mohlo být až 15,5 dB. Tento útlum není ve změřených hodnotách započten a hodnoty jsou o tento útlum nižší. Útlum měřicího kabelu mezi SPA a senzorem je cca 3dB.



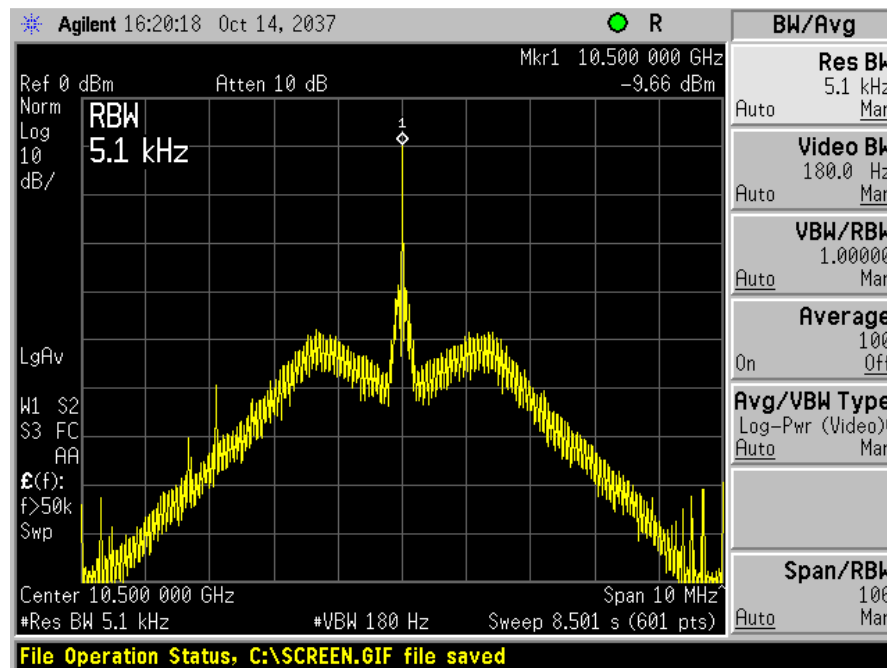
Obr. 19.1. Měření RF výstupu - blokové schéma

Měření RF výstupu proběhlo pro dvě různá nastavení CW a to CW 10,5GHz a CW 11,11GHz. Obsah registrů nutný pro tyto varianty je na obrázku 19.2. V komentářích je i jedna frekvence zkoušená navíc k měřeným.

```
int R00[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; // 10,5GHz
//int R00[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; // 11,207 GHz
//int R00[] = {0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; // 11,11GHz
int R01[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //1
int R02[] = {0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //
int R03[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //
int R04[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0}; //
int R44[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0}; //
int R05[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0}; //
int R55[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0}; //
int R06[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0}; //
int R66[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0}; //
int R07[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0}; //
```

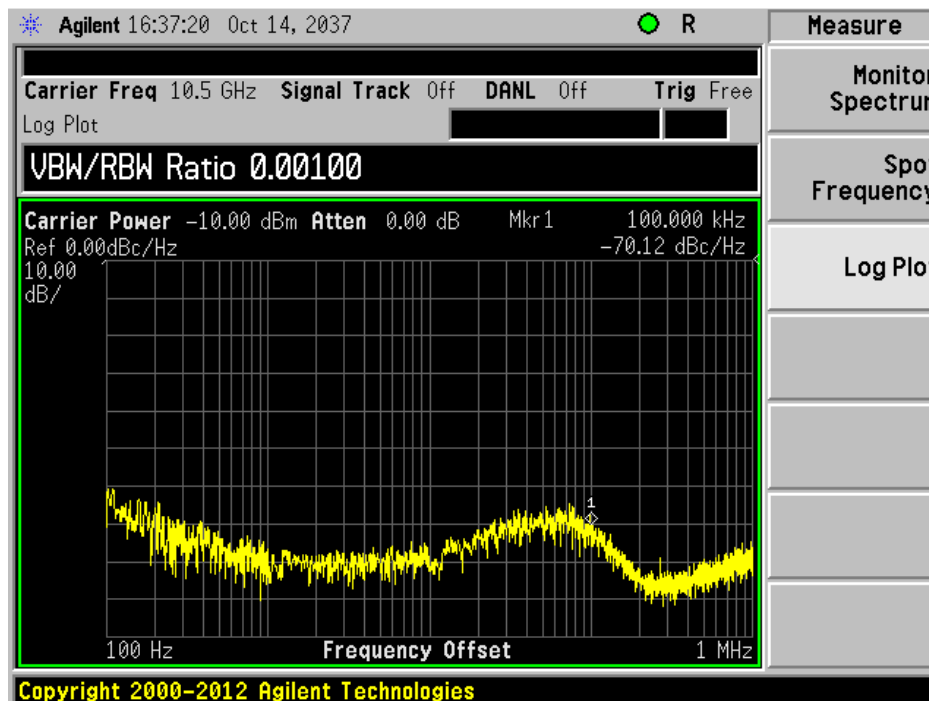
Obr. 19.2. Obsah registrů pro vybrané frekvence CW

Pro CW na frekvenci 10,5GHz byla změřena po odečtení externích útlumů úroveň cca 13dBm. Změřené spektrum této konfigurace je na obrázku 19.3.



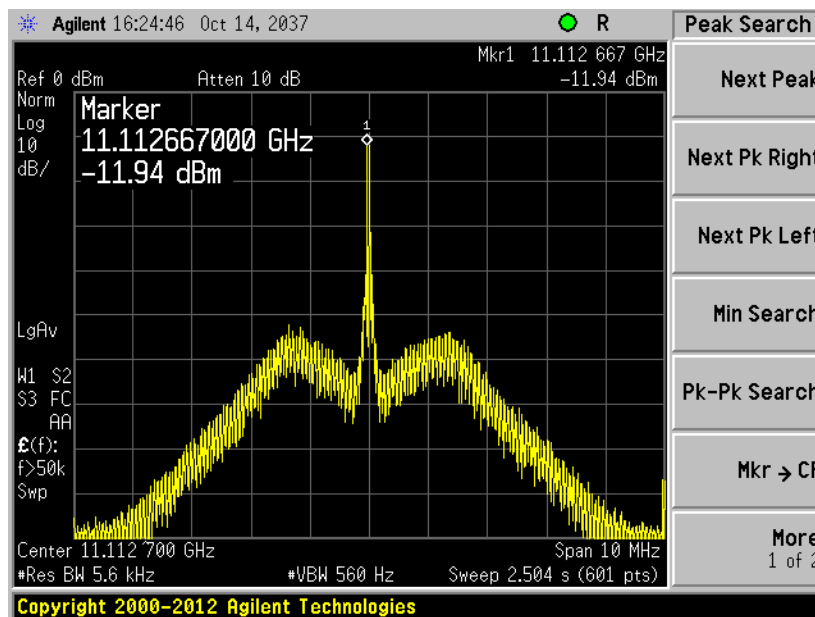
Obr. 19.3. Změřené spektrum pro CW 10,5GHz

Fázový šum v této konfiguraci je znázorněn na obrázku 19.4. Fázový šum byl optimalizován pomocí smyčky PLL a vyzkoušeno bylo několik různých variant. Celý senzor není zatím stíněn hliníkovým obrobkem a proto do něho proniká i okolní rušení.

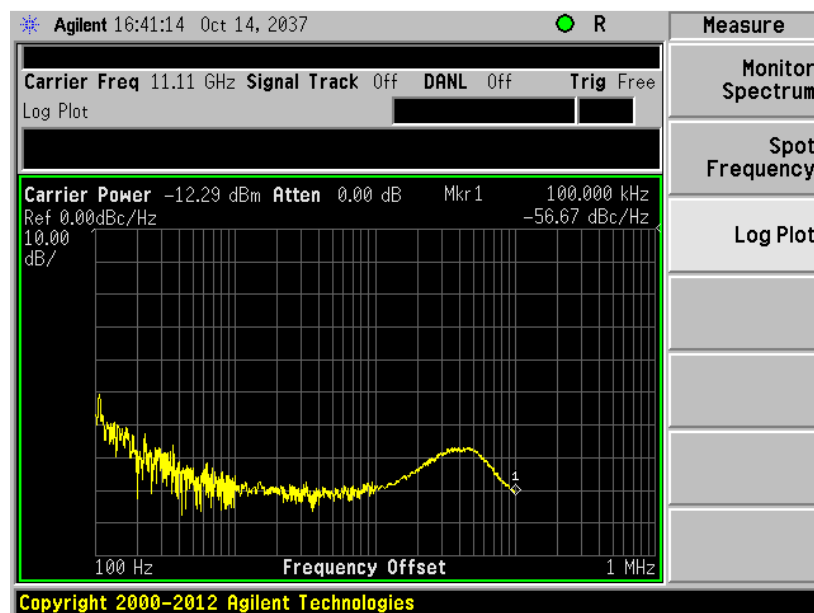


Obr. 19.4. Změřený fázový šum pro CW 10,5GHz

Stejnou metodou jako výše byl změřen výstupní RF signál a fázový šum pro CW na 11,11GHz. Změřené hodnoty jsou na obrázku 19.5 a 19.6.

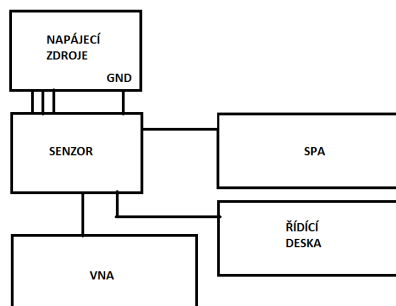


Obr. 19.5. Změřené spektrum pro CW 11,11GHz



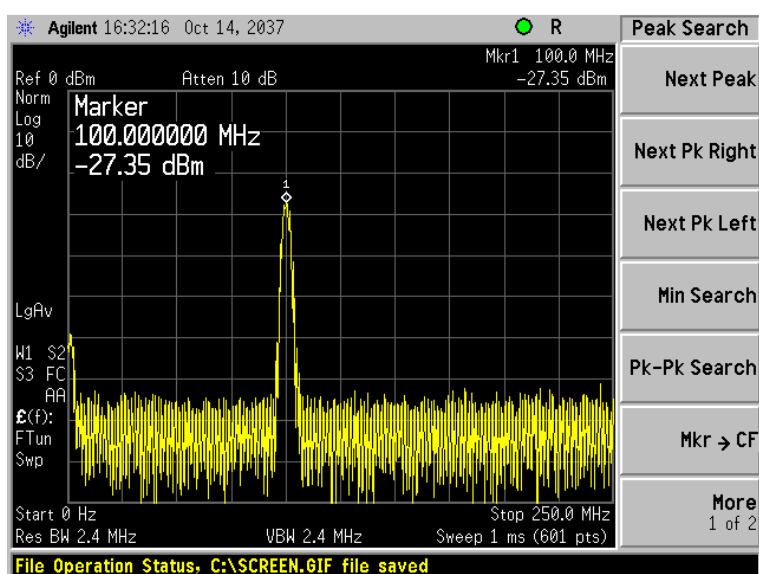
Obr. 19.6. Změřený fázový šum pro CW 11,11GHz

Pro měření funkčnosti směšovače byl vstup spektrálního analyzátoru externě odtlumen a připojen na IQ výstupy směšovače. Přijímací konektor senzoru byl připojen na VNA. VNA budil přijímací konektor pomocí CW na 10,6GHz. Výkon na přijímacím konektoru byl -30dBm. Senzor byl nastaven na frekvenci 10,5GHz. Blokové schéma pro měření signálů na směšovači je na obrázku 19.7.



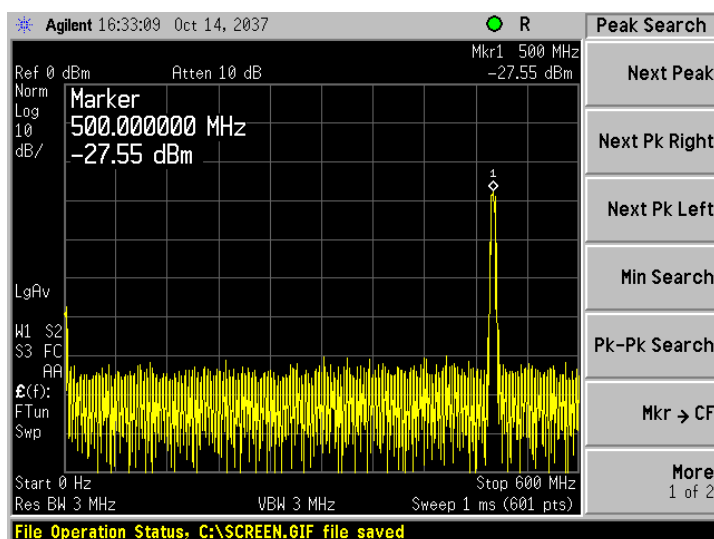
Obr. 19.7. Blokové schéma pro měření signálů na směšovači

Na směšovači byl změřen tedy signál na frekvenci 100MHz. Změřený signál na směšovači je na obrázku 19.8.



Obr. 19.8. Změřený signál na směšovači pro CW 10,5GHz a buzení 10,6GHz

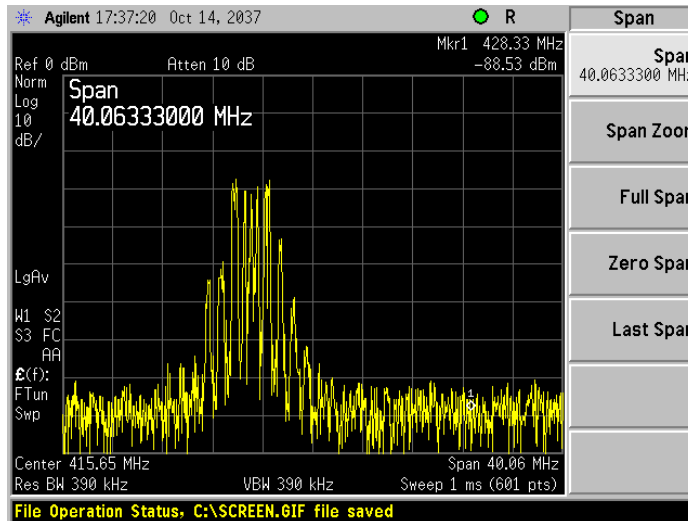
Stejně tak byl změřen signál na IQ výstupech směšovače i pro buzení 11GHz. Tento signál je na obrázku 19.9.



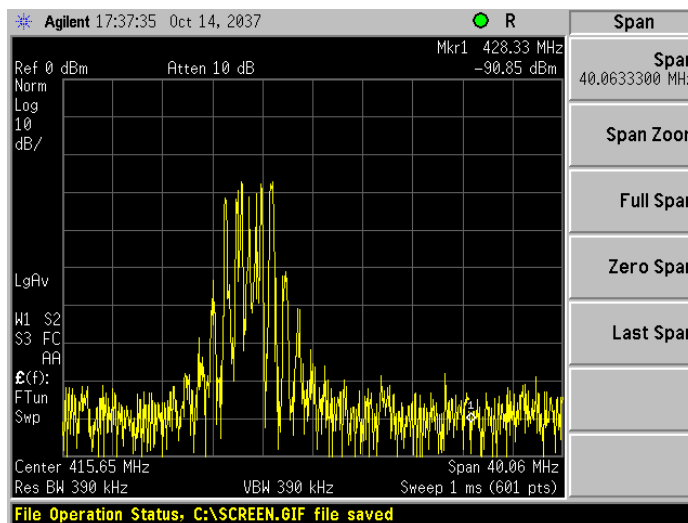
Obr. 19.9. Změřený signál na směšovači pro CW 10,5GHz a buzení 11GHz

Stejným způsobem bylo ověřeno měřením i pro CW 11,11GHz. Zde již pro přehlednost a duplicitu není uvedeno.

Měření FMCW již nebylo z technických a časových důvodů provedeno. Byl změřen pouze signál na směšovači pro FMCW 10,5-11GHz s CW buzením z VNA. Signál na směšovači je na obrázcích 19.10 a 19.11. Signál na určité frekvenci střídavě byl přítomen a nebyl. To vede na předpoklad že FMCW funguje.

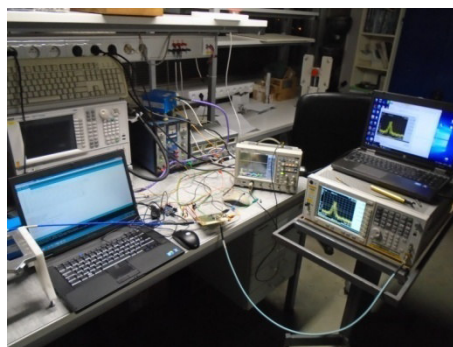


Obr. 19.10. Změřený signál na směšovači pro FMCW



Obr. 19.11. Změřený signál na směšovači pro FMCW

Foto měřícího pracoviště je na obrázku 19.12.



Obr. 19.12. Foto měřícího pracoviště

20. Použitý software

V práci bylo použito množství softwaru. Pro návrh mikropáskové pásmové propusti a wilkinsonova děliče to byl software AWR Microwave Studio 10 včetně utility TXLINE. Pro návrh smyčky PLL byl použit software od Analog Devices ADIsimPLL4.30 ve kterém byly zkoušeny a simulovány různé varianty smyček. Pro tvorbu schématu a kreslení schematických značek byl použit OrCAD Capture. Pro návrh pájecích plošek byla využita utilita OrCADu PadDesigner. Návrh Layoutu a pouzder součástek byl proveden v PCB Designer Professional w/PSpice. Programování (nahrávání registrů) bylo provedeno v jazyku Wiring v programu Arduino IDE. Obsah registrů byl zjišťován s pomocí programu od Analog Devices ADF4158-9. Hliníkový obrobek a bloková schémata byly kresleny v programu AutoCad 2014. Dále byly využity editory MS Word a Excel 2017.

21. Závěr

V úvodu práce je základní teorie ohledně CW i FMCW radarů. Následuje přehled stavebních bloků použitých pro stavbu tohoto kompaktního senzoru. Po shrnutí základní teorie o funkčních blocích je navrženo blokové schéma a provedena výkonová rozvaha. V praktické části je navržen a popsán postup návrhu mikrovlnných vedení, wilkinsonova děliče výkonu a mikropáskové pásmové propusti pomocí softwaru AWR Microwave studio . Po tomto návrhu bylo navrženo schéma a připravena soupiska součástek. Následně byly vytvořeny pájecí plošky a poté kompletní pouzdra součástek. Část práce je věnována popisu problematiky přenosu mikrovlnných motivů do layoutu v programu OrCAD. V programu OrCAD je postupně vytvořen celý návrh desky plošných spojů včetně výrobních dat. Výrobní data byla následně odeslána do výroby. Po obdržení vyrobených desek plošných spojů byla deska kombinací několika ručních osazovacích technik osazena součástkami. Při osazování bylo objeveno několik návrhových chyb, které byly úspěšně odstraněny. Chyby byly například, neprovrtané otvory pro zemní nohy SMA konektorů, neodmaskovaná spodní plocha desky pod konektory SMA, otočené piny na pouzdře apod. Po osazení byla deska oživována a při oživení se projevil některé další chyby. Po prvním připojení se sepnula proudová ochrana, která odhalila přepólovaný tantalový kondenzátor. Dále byla odhalena vadná nebo zaměněná pásmová propust, zkrat mezi napájením a řídicím vodičem a špatně připájená zem, která způsobila následné kmitání zesilovače. Všechny tyto chyby se podařilo odstranit. V příloze je layout a výrobní data pro původní verzi i nová verze s opravenými dosud známými chybami. Dále byl úspěšně vytvořen řídicí program, který nahrává obsah registrů do fázového závěsu a tím řídí nastavitelné parametry výstupního signálu. Po naprogramování bylo provedeno měření, které otestovalo a potvrdilo kompletní funkčnost celého senzoru v režimu CW na několika frekvencích. Měření FMCW již nebylo z časových a technických důvodů kompletně provedeno. Podle změřených hodnot, ale senzor frekvenčně rozmítá a měl by tedy fungovat i v tomto režimu. Senzor je schopný pracovat v pásmu 10,43-11,46GHz s výstupním výkonem kolem +13dBm. Nastavitelný je pomocí externí programovací desky přes sběrnici USB včetně možnosti režimu CW a FMCW. Na desce jsou vyvedeny IQ výstupy přijímače na konektory SMA. Všechny mikrovlnné obvody jsou umístěny na jedné desce v souladu se zadáním práce. Vyšší hodnoty fázového šumu jsou zřejmě způsobeny nestíněním desky, které se bude teprve vyrábět. Kvůli předpokladu budoucího využití práce ve škole pro předváděcí účely je přiložena technická specifikace a návod k ovládání senzoru. I přes značnou náročnost práce jako je orientace v mnoha softwarech, znalost více oborů (mikrovlnná technika, návrh DPS, programování), praktická zručnost při osazování je výsledkem funkční výrobek připravený k budoucímu využití a navázání nízkofrekvenčními obvody pro zpracování přijatého signálu.

Reference

- [1] ROUVEURE, Raphaël, Patrice FAURE a Marie-Odile MONOD. PELICAN: Panoramic millimeter-wave radar for perception in mobile robotics applications, Part 1: Principles of FMCW radar and of 2D image construction. *Robotics and Autonomous Systems* [online]. **2016**, 1-16 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: databáze Elsevier
- [2] ADF4159(Rev-E) - ADF4159.pdf. *Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4159.pdf>
- [3] VÁGNER, Petr. *PLL syntezátor v pásmu X*. Brno, 2005, 75 s. Dostupné také z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/esl/files/Projects/StudentProjects/Vagner/diplomka.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ing. Petr Kutin.
- [4] Phase-locked loops for high-frequency receivers and transmitters-Part 2 | Analog Devices. *Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/pll-for-high-frequency-receivers-and-transmitters-2.html>
- [5] Research History of Alfio Zanchi. *Politecnico di Milano: home* [online]. Milano [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://home.deib.polimi.it/samori/Alfio.Zanchi/Research.html>
- [6] Hmc513 (v04.0811) - hmc513.pdf. *Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc513.pdf>
- [7] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [8] HONG, Jia-Sheng. *Microstrip filters for RF/microwave applications*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 9780470937280.
- [9] HOFFMANN, Karel. *Microwave Circuits and Subsystems A2M17MOS: Microwave Planar Circuits*. Praha, 2016, 217 s. Dostupné také z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/41770/mod_resource/content/1/Microwave%20circuits%20and%20Subsystems%20lecture%20slides.pdf
- [10] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

[11] Záhřava, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2000. 81 s. ISBN 80-01-02193-9.

[12] VODA & TÝM HW KITCHEN, Zbyšek. PRŮVODCE SVĚTEM ARDUINA [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://arduino.cz/?s=pruvodce+svetem+arduina>.

Seznam obrázků

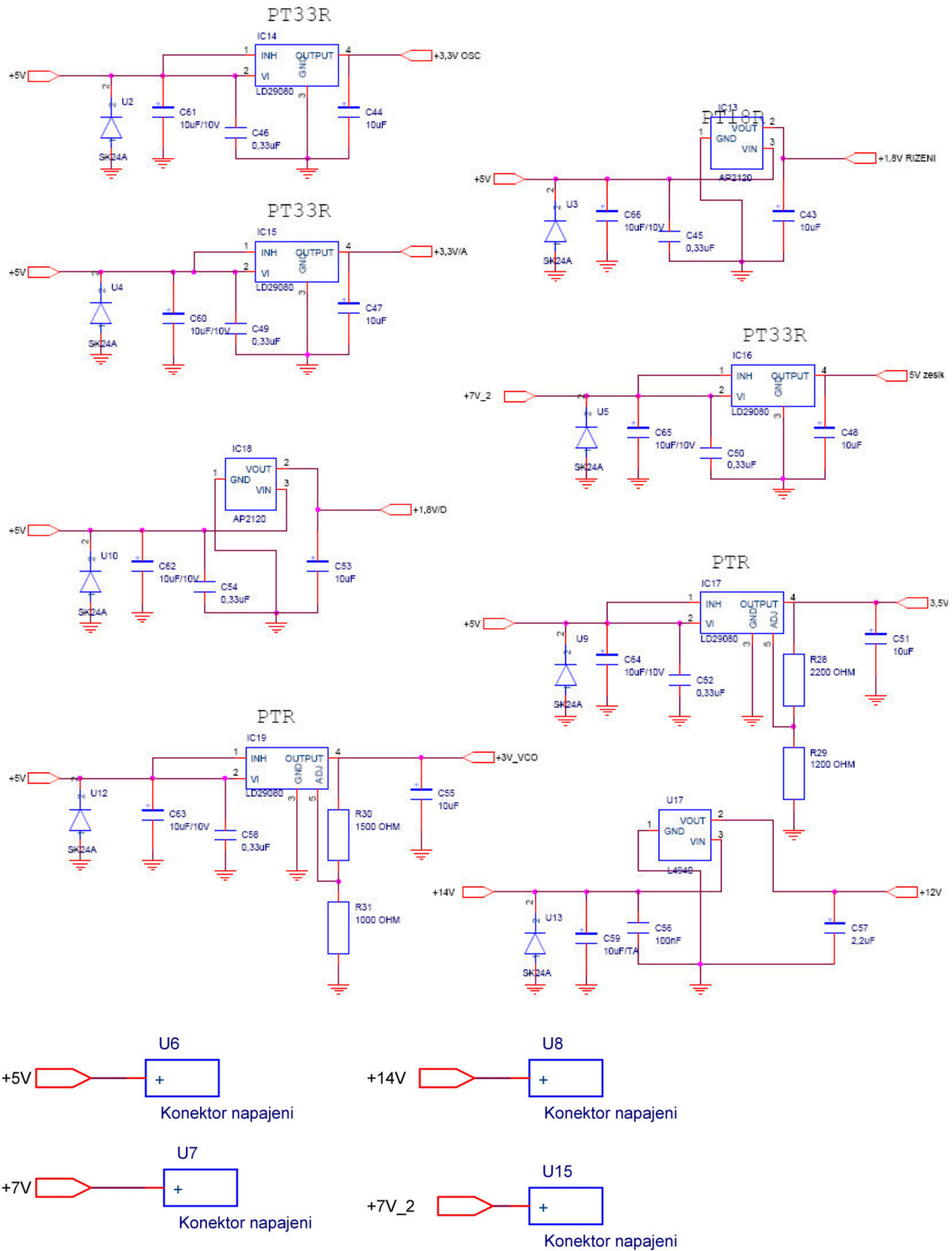
Obr. 3.1 - Blokové schéma CW radaru	12
Obr. 3.2 - Možné průběhy generovaného signálu, (převzato z [2])	13
Obr. 3.1.1 - Blokové schéma FMCW radaru	14
Obr. 3.1.2 - Přijatý signál FMCW radaru od pohybujícího se cíle (převzato z [1])	14
Obr.3.2.1 - Vliv Dopplerova posuvu na vlnovou délku	15
Obr. 4.1.1 - Blokové schéma PLL	15
Obr. 4.1.2 - Pracovní režimy PLL (převzato z [3])	16
Obr. 4.1.1.1 - Definice fázového šumu (převzato z [4])	17
Obr. 4.1.1.2 - Fázový šum bez PLL a s PLL(převzato z [5])	17
Obr.4.2.1 – a) Závislost frekvence na ladícím napětí, b) Závislost fázového šumu na ladícím napětí (převzato z [6])	18
Obr. 4.4.1 –Blokové schéma směšovače	19
Obr. 4.6.1 Typy planárních vedení od levého horního rohu mikropáskové, symetrické páskové, koplanární, koplanární zemněné, koaxiální, štěrbinové, vázané mikropáskové a vázané symetrické vedení (převzato z utility TXLINE 2003 programu AWR)	21
Obr. 4.6.1.1 – Mikropáskové vedení (převzato z [8])	22
Obr. 4.6.1.2 – Rozložení elektromagnetického pole na mikropáskovém vedení (převzato z [9])	22
Obr.4.7.1 Přenos filtrů	24
Obr. 4.7.1.1.1 Pásmová propust (převzato z [9])	25
Obr. 4.8.1 Wilkinsonův dělič (převzato z [9])	25
Obr. 4.8.2 Kompenzovaný wilkinsonův dělič (převzato z [9])	26
Obr. 4.9.1 Pí článek	26
Obr. 5.1. Značení ESD citlivých zařízení	27
Obr. 5.1.1. Navržená ESD ochrana	28
Obr. 5.1 - Navržené blokové schéma	29
Obr. 5.1.1 - Blokové schéma s odhadovanými výkonovými úrovněmi	30
Obr. 8.1. Navržená pásmová propust s rozměry v softwaru AWR	32
Obr. 8.2. Navržená pásmová propust - layout	32
Obr. 8.3. Navržená pásmová propust - parametry	32
Obr. 9.1. Teoretický dělič v základní struktuře	33
Obr. 9.2. Navržený kruhový dělič	33
Obr. 9.3. Navržený kruhový dělič - layout	33
Obr. 9.4. Navržený kruhový dělič - parametry	34
Obr. 10.1. Zužování pásku a štěrbin pro udržení hodnoty impedance	34
Obr. 12.1. Ukázka schematické značky fázového závěsu ADF4159	35

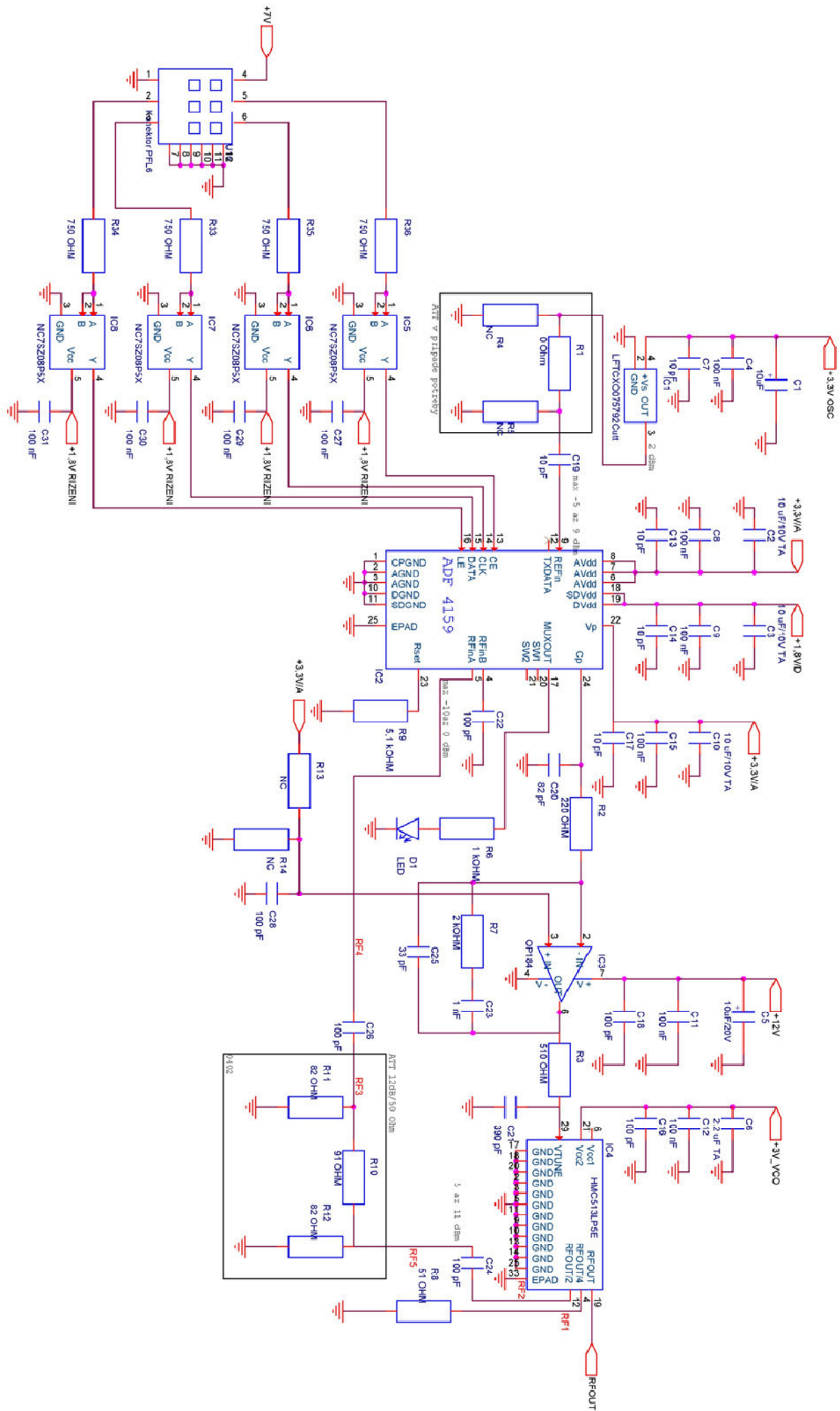
Obr. 12.1. Ukázka propojovacího portu +3,3V/A mezi listy	36
Obr. 14.1.1. Ukázka vrtaného otvoru pro EPAD fázového závěsu ADF4159	38
Obr. 14.1.2. Ukázka definice vrstev pro EPAD fázového závěsu ADF4159	38
Obr. 14.1.3. Ukázka pájecí plošky tvaru oblong	39
Obr. 14.2.1. Pouzdro QFN24 pro PLL ADF4159 s doplněným EPADem	40
Obr. 14.3.1. Pouzdro mikropáskové pásmové propusti	41
Obr. 14.4.1. Seznam neumístěných součástek	42
Obr. 14.4.2. Domalovaný přechod z jedné šířky vedení na druhý	43
Obr. 14.4.3. Přibližné rozmístění oddělených sekcí na desce	43
Obr. 14.4.4. Pohled na vrstvu mědi z horní strany DPS	44
Obr. 14.4.5. Pohled na vrstvu mědi z horní strany DPS v nástroji 3D Wiew	44
Obr. 14.4.6. Pohled na vrstvu nepájivé masky z horní strany DPS	45
Obr. 14.6.1. Úvodní data pro souřadnicovou vrtačku	46
Obr. 14.6.2. Úvod gerberu pro vrstvu TOP	46
Obr. 15.1. Vyrobená deska	47
Obr. 15.2. Osazená deska z horní strany	48
Obr. 15.3. Osazená deska z dolní strany	48
Obr. 17.1. Deska NHduino	51
Obr. 17.2. Část programu nahrávající jeden registr	51
Obr. 17.3. Ukázka programu ADF4158-9 od Analog Devices	52
Obr. 17.4. Průběh signálů na pinu DATA a CLK	52
Obr. 17.5. Připojení desky NHduino k plochému kabelu k desce DPS	53
Obr. 17.6. Zapojení pinů na konektora desce a na kabelu	53
Obr. 18.1. Hotový senzor	54
Obr. 19.1. Měření RF výstupu - blokové schéma	55
Obr. 19.2. Obsah registrů pro vybrané frekvence CW	55
Obr. 19.3. Změřené spektrum pro CW 10,5GHz	56
Obr. 19.4. Změřený fázový šum pro CW 10,5GHz	56
Obr. 19.5. Změřené spektrum pro CW 11,11GHz	57
Obr. 19.6. Změřený fázový šum pro CW 11,11GHz	57
Obr. 19.7. Blokové schéma pro měření signálů na směšovači	58
Obr. 19.8. Změřený signál na směšovači pro CW 10,5GHz a buzení 10,6GHz	58
Obr. 19.9. Změřený signál na směšovači pro CW 10,5GHz a buzení 11GHz	58
Obr. 19.10. Změřený signál na směšovači pro FMCW	59
Obr. 19.11. Změřený signál na směšovači pro FMCW	59
Obr. 19.12. Foto měřícího pracoviště	59

Seznam tabulek

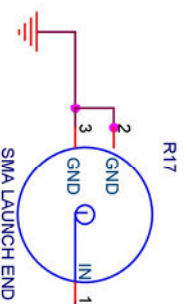
Tabulka 1 - Vybrané parametry substrátu RO4003C	31
Tabulka 2 - Část soupisky součástek s integrovanými obvody a polovodičovými prvky	37

Příloha A - Schéma





EXTERNI VSTUP



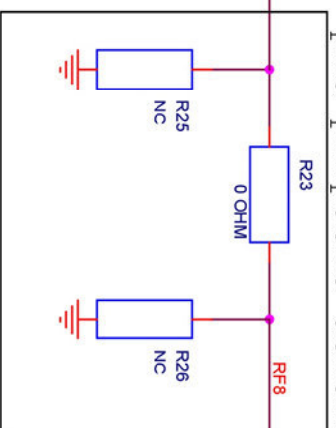
MOZNOST EXTERNIHO VSTUPU RF

5-10dB typicky 8dB

pro pripadne utlumeni

0 dB

- 3dB



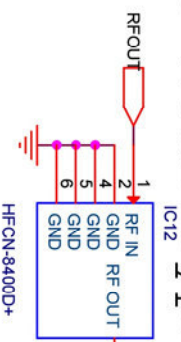
5dB

RFIN max
G=14dB

WILKINS

16dB

16dB



R22
0 OHM

R23
0 OHM

R25
NC

R26
NC

R19
NC

19dB

IC-10

11

17

RF9

15

9

7

Vdd

gnd1

gnd2

RF IN

RF OUT

EPAD

1

3

4

6

10

21

22

MC441LP3E

5V zasilk

C32

4,7uF 1A

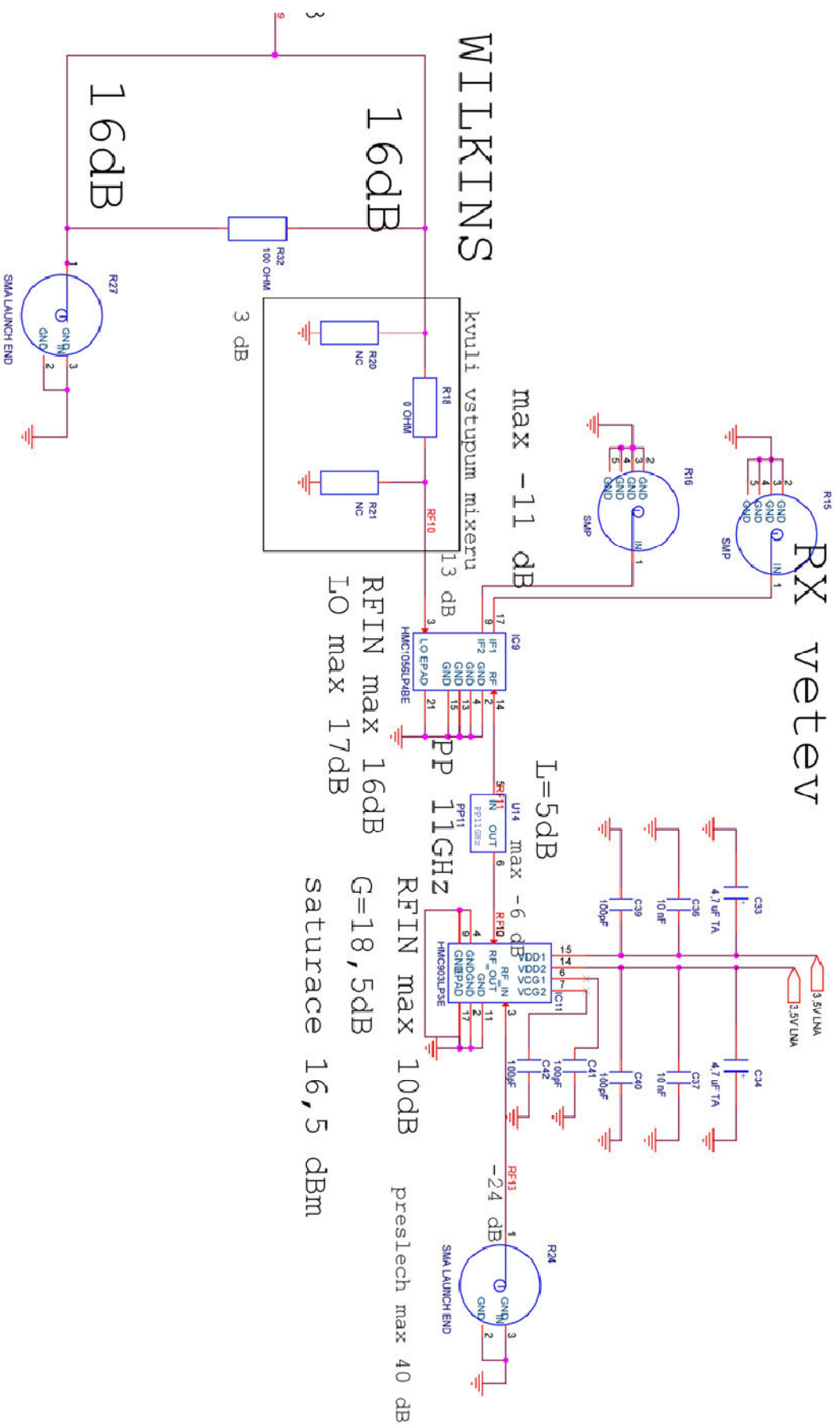
C35

100nF

C38

100pF

R32
100



TX vetev

Příloha B - Soupiska materiálu

Kondenzátory				
Keramika NP0/COG				
Hodnota	Součástka	Pouzdro	Číslo Mouser	Počet
100pF	C16, C18, C22, C24, C26, C28, C38,C39, C40, C41, C42	402	710-885012005046	11
100nF	C8, C9, C12, C15, C35	1206	81-GRM31C5C2A104JA1L	5
10nF	C36, C37	603	80-C0603X103K3GEC	2
10pF	C7, C13, C14, C17,C19	402	710-885012005040	5
82pF	C20	402	81-GRM1555C1H820JA1J	1
390pF	C21	402	81-GRM1555C1H391JA1J	1
33pF	C25	402	77-VJ0402A330JXACBC	1
1nF	C23	402	710-885012205025	1
Tantal				
2,2uF	C6, C57	1206	581-TAJA225K020R	2
4,7uF	C32, C33, C34	1206	581-TAJA475K025RNJ	3
10uF	C1 C2, C3, C5, C10, C43, C44, C47, C48, C51, C53, C55, C60, C61, C62, C63, C64, C65, C66	1206	647-F931C106KAA	19
10uF	C59	2312	581-TAJC106K020	1
Keramika X7R				
100nF	C4, C11, C27, C29, C30, C31, C56	402	963-TMK105B7104MV-FR	7
Keramika X5R				
0,33uF	C45, C46, C49, C50, C52, C54, C58	603	810-C0603X5R1A334K0C	7

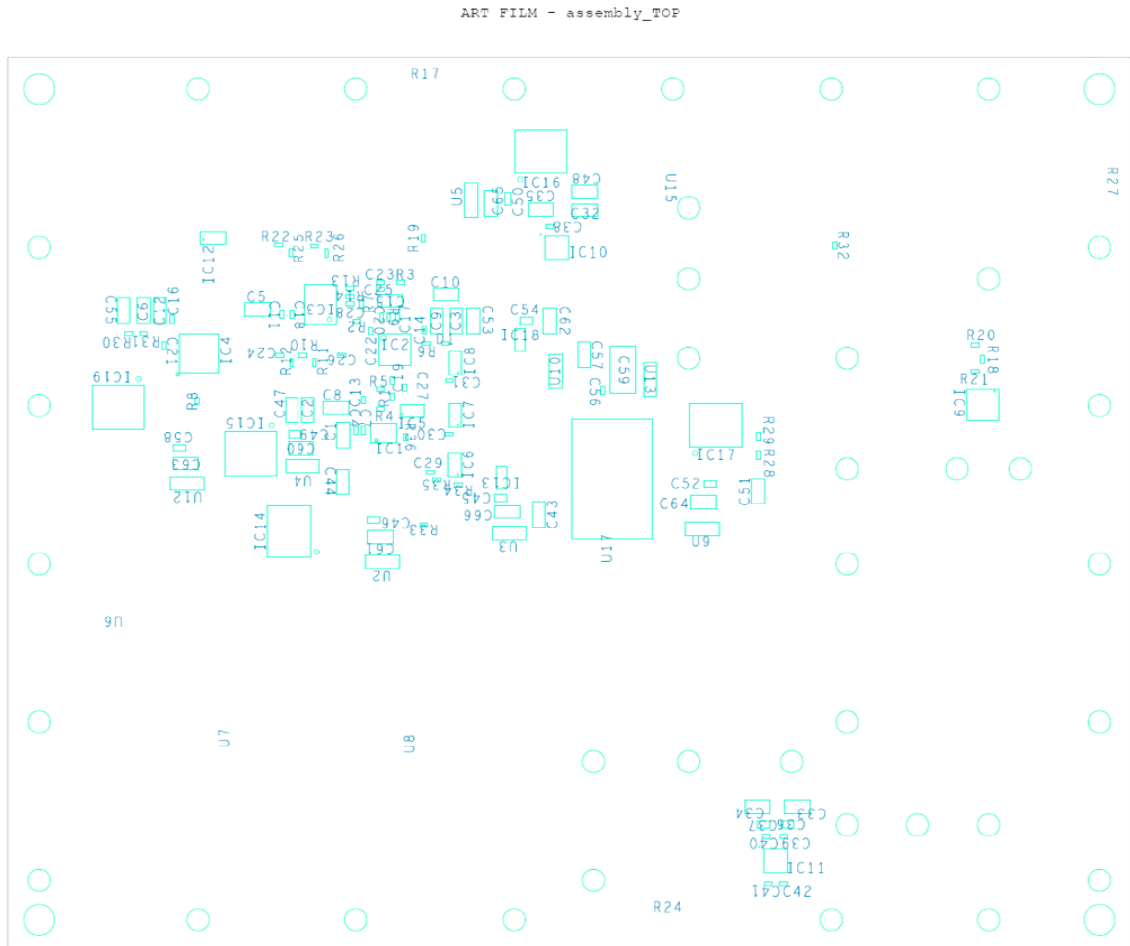
Konektory				
Popis	Součástka	Pouzdro	Číslo Mouser	počet
SMA	R15, R16	-	476-19S102-400L5	2
SMA LAUNCH END	R17, R24, R27	-	523-132415	3
PFL6	Na kabel	-	-	2
PFL6	Do DPS	-	-	2

Rezistory				
Hodnota	Součástka	Pouzdro	Číslo Mouser	počet
0 Ohm	R1, R18, R22, R23	402	667-ERJ-2GEOR00X	3
100 OHM	R32	402	71-CRCW0402100RFKEDC	1
18 OHM	R18	402	667-ERJ-2GEJ180X	1
51 OHM	R8	402	71-RCS040251R0FKED	1
82 OHM	R11,R12	402	667-ERJ-2GEJ820X	2
91 OHM	R10	402	667-ERJ-2GEJ910X	1
220 OHM	R2	402	71-RCS0402220RJNED	1
NC	R4, R5, R13, R14, R20, R21, R25, R26	402	667-ERJ-2GEJ331X	8
510 OHM	R3	402	667-ERJ-2GEJ511X	1
750 OHM	R33, R34, R35, R36	402	-	4
1,2 KOHM	R29		-	1
1 KOHM	R6, R31	402	667-ERJ-2GEJ102X	3
2 KOHM	R7	402	667-ERJ-2GEJ202X	1
1,5 KOHM	R30	402	667-ERJ-2GEJ242X	1
2,2 KOHM	R28	402	667-ERJ-2GEJ272X	1
5,1 KOHM	R9	402	667-ERJ-2GEJ512X	1

POLOVODIČE				
Popis	Součástka	Pouzdro	Číslo Mouser	počet
LED	D1	402	604-APHHS1005SURCK	1
SCHOTTKY	U2,U3,U4,U5,U9,U10,U12,U13	-	821-SK24A	8
LD29080PT33R	IC14, IC15, IC16	-	511-LD29080PT33R	3
AP2120	IC13, IC18	-	621-AP2120N-1.8TRG1	2
LD29080PTR	IC17, IC19	-	511-LD29080P	2
L4940D2T12-TR	U17	-	511-L4940D2T12-TR	1
OSC_REF	IC1	-	449-LFTCXO075792CUTT	1
KONVERTORY	IC5,IC6,IC7,IC8	-	512-NC7SZ08P5X	4
ADF4159	IC2	-	ADF4159CCPZ	1
OZ	IC3	-	584-OP184ESZ	1
HMC513LP5	IC4	-	VZOREK	1
HMC1056LP4BE	IC9	-	584-HMC1056LP4BE	1
HMC441	IC10	-	584-HMC441LP3E	1
HMC903	IC11	-	584-HMC903LP3E	1
HFCN-6010+	IC12	-	-	1

Příloha C - Osazovací plán

Osazení z horní strany



Příloha D - Technická specifikace a návod k použití

Na následujícím obrázku je rozvržení konektorů a napájecích hladin. Napájecí hladina je na desce obsažena 2x. Napěťové hladiny nepřesáhnout! Hlavně hladina +14V NESMÍ být překročena hrozí proražení kondenzátoru!!!

Proudové pojistky na zdroji nastavit následovně:

+14V -> 0,2A

+7V -> 0,2A

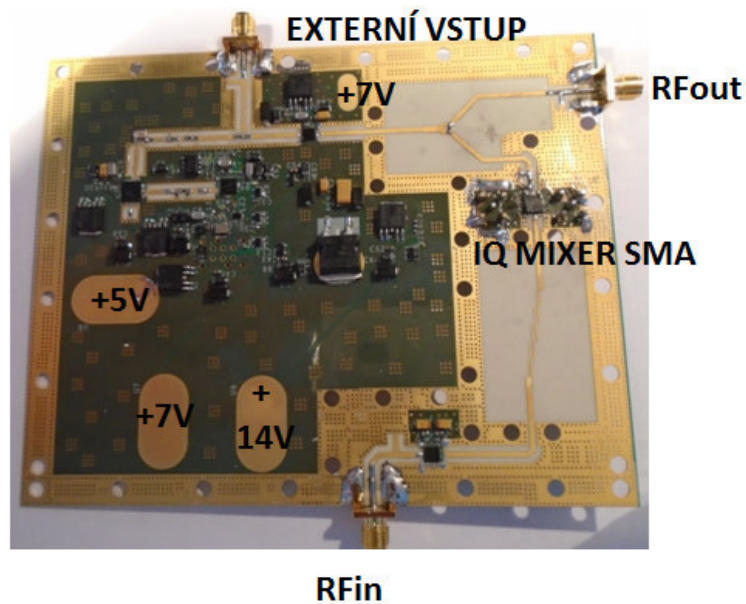
+5V -> 0,8A

Externí vstup je možný použít po přepájení propojky na mikropásku. Max. vstupní výkon na tomto vstupu je -10dBm.

Na výstupu RFout je výkon cca +13dBm.

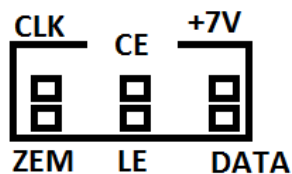
Max. vstupní výkon na RFin je -10dBm.

IQ MIXER SMA jsou výstupní konektory ze směšovače.

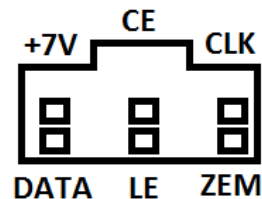


Ovládání přes kabel a popis řídicích pinů v konektorech:

POHLED NA KONEKTOR NA DPS

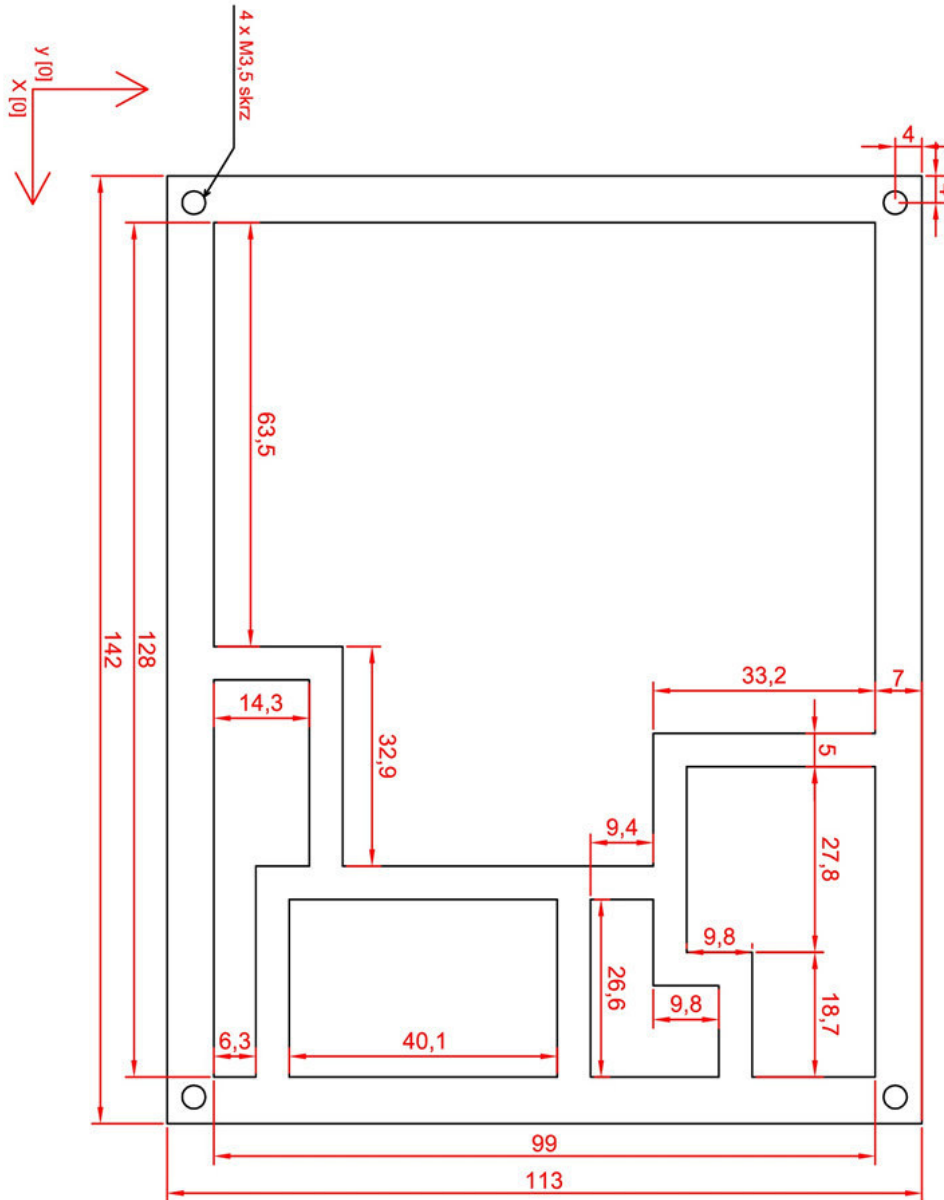


POHLED NA KABELOVÝ KONEKTOR



Na pin +7V se napětí nepřipojuje, je to napěťový výstup pro budoucí využití na desce řízení.

Příloha E - Pohled shora na hliníkový stínící obrobek



Díry M2,5 skrz	
x[mm]	y[mm]
4	89
4	69
4	49
4	29
4	9
138	89
138	69
138	49
138	29
138	9
24	109
44	109
64	109
84	109
104	109
124	109
24	4
44	4
64	4
104	4
124	4

Díry M2,5 skrz	
x[mm]	y[mm]
74	24
74	16
86	94
86	85
86	75
86	24
99	24
106	75
106	61
106	49
106	29
106	16
124	85
120	61
128	61
115	16
124	16

Příloha F - Obsah přiloženého CD

Na CD jsou přiloženy následující přílohy:

- TEXT-----složka obsahující výsledný text
- ADISIM-----složka obsahující návrh smyčky PLL
- DATASHEET-----složka obsahující vybrané datasheety
- ORCAD-----složka obsahující CADovské soubory
 - plosky-----složka pájecích plošek
 - pouzdra-----složka pouzder součástek
 - senzor-----složka layoutu (senzor 52.brd) a schematu (PLL.obj)
 - výrobní data_v3-----původní výrobní data (vyrobené DPS)
 - výrobní data_v4-----opravené chyby - nová výrobní data
- PP_a_WILKINSON-----složka se soubory pásmové propusti a děliče výkonu
- SOUCASTKY.xlsx-----soupiska součástek v Excelu
- DIPLOMKA.OLB-----knihovna schematických značek pro OrCad
- SOFTWARE-----složka s použitým freeware softwarem (instalace)
 - CW_10_5GHz-----složka s příkladem CW
 - FMCW_11_11-----složka s příkladem FMCW
 - CH341SER-----složka s ovladači k NHduino
- OBROBEK.pdf-----výkres s pohledem shora na hliníkový obrobek