

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Přijímač a vysílač širokopásmového rádiového
datového spoje v pásmu UKV

Bc. Jakub Jeřábek

Diplomová práce
2014

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Jeřábek**
Osobní číslo: **I12445**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Přijímač a vysílač širokopásmového rádiového datového spoje
v pásmu UKV**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Student si nejprve prostuduje způsoby řešení širokopásmových rádiových přijímačů a vysílačů datových spojů v UKV pásmu a seznámí se s výsledky experimentů s šířením UKV signálů v budovách. Pak provede návrh blokového schématu a základních parametrů přijímače a vysílače (PaV) podle zadání. Následovat bude řešením dostupných součástek pro realizaci těchto dílů. Navrhne zapojení PaV s konkrétními obvody a připraví experimentální pracoviště. Po zhotovení nastaví a experimentálně ověří hlavní části spoje.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Žalud V., Dobeš J.: Moderní radioelektronika, BEN - technická literatura, Praha 2006, ISBN: 80-7300-132-2.

Manuel F. Catedra, J. Perez-Arriaga: Cell Planning for Wireless Communications, Artech House, 1999.

Pechač P.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, BEN - technická literatura, Praha 2007.

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Bezoušek, CSc.
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2014**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan

L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24. 8. 2014

Jakub Jeřábek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu, prof. Ing. Pavlu Bezouškovi, CSc. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále děkuji Ing. P. Rozsivalovi, Ing. T. Zalabskému a Ing. M. Polovi, kteří mi velice pomohli při práci na experimentální části diplomové práce.

Anotace

Práce se zaměřuje na řešení širokopásmových vysílačů a přijímačů datových spojů v pásmu UKV, pro použití v budovách. Jsou provedeny návrhy blokových schémat a základních parametrů přijímače a vysílače podle stanovených kritérií. Provedena jsou i konkrétní zapojení přijímače a vysílače a experimentálně jsou ověřeny hlavní části spoje.

Klíčová slova

UWB, OFDM, UKV, přijímač, vysílač, modulátor, demodulátor, zesilovač

Title

Receiver and transmitter wideband radio data links in the UHF

Annotation

The work focuses on solving broadband transmitters and receivers data links in the UHF band for using in buildings. Thesis contains proposals of block diagrams and basic parameters of the receiver and the transmitter according to established criteria. Concrete involvements are made for the transmitter and the receiver as well and main part of the radio link is experimentally verified.

Keywords

UWB, OFDM, UHF, transmitter, receiver, modulator, demodulator, amplifier

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	13
Úvod	14
1 ZPŮSOBY ŘEŠENÍ ŠIROKOPÁSMOVÝCH DATOVÝCH SPOJŮ	15
1.1 Příklady používaných širokopásmových spojů	15
1.1.1 WiMAX	16
1.1.2 WI-FI	16
1.2 Popis modulace OFDM	19
1.2.1 OFDM v systému WiMAX	23
2 NÁVRH VLATNÍHO UWB SPOJE	25
2.1 Základní popis	25
2.2 Volba parametrů spoje.....	27
2.2.1 Výběr kmitočtového pásma	27
2.2.2 Šířka pásma	28
2.2.3 Výkon vysílače	29
2.3 Návrh vysílače	30
2.3.1 Kvadrurní modulátor:	30
2.3.2 Výkonový zesilovač:	32
2.4 Návrh přijímače	34
2.4.1 Nízkošumový zesilovač	35
2.4.2 Kvadrurní demodulátor.....	36
2.5 Návrh filtrů	38
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
3.1 Měření parametrů modulátoru	43
3.2 Měření parametrů demodulátoru	48
3.3 Měření parametrů zesilovačů.....	55
3.4 Měření spoje	69
3.4.1 Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5324.	72
3.4.2 Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5605	73
3.4.3 Demodulace signálu	74

3.4.4	Zapojení pro ADL 5370 a ADL 5324	76
3.4.5	Zapojení pro ADL 5370 a ADL 5605	79
Závěr		95
Literatura		96
Příloha A – Spektra přijatých širokopásmových signálů pro různé frekvence.....		98
Příloha B – Tabulkové hodnoty pro různé aproximace.....		104

Seznam zkratek

ASK	Amplitude Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
Ch.	Channel
CP	Charge Pump
CP	Cyclic Prefix
DAC	Digital to Analog Converter
DFT	Discrete Fourier Transform
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTFT	Discrete Time Fourier Transform
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FMCW	Frequency-Modulated Continuous Wave
FSK	Frequency Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Spécial Mobile
IF	Intermediate Frequency
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP1dB	Input 1 dB Compression Point
ISM	Industrial Scientific Medical Band
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LOS	Line Of Sight
MCM	Multi Carrier Modulation
N/A	Not Available
NC	No Connect
NF	Noise Figure
NLOS	Non Line Of Sight

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OIP3	Output Third-order intercepts point
OP1dB	Output 1 dB Compression Point
PFLL	Phase Frequency Lock Loop
PSK	Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RFIN	RF Input
RFOUT	RF Output
RMS	Root Mean Square
RTLS	Real Time Location System
SFM	Sinusoidal Frequency Modulated
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UKV	Ultra Krátké Vlny
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure Band
UWB	Ultra Wide Band
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VGA	Variable Gain Amplifier
V-P	Vysílač - Přijímač
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
W-LAN	Wireless Local Area Network
W-MAN	Wireless Metropolitan Area Networks
W-PAN	Wireless Personal Area Network
W-WAN	Wireless Wide Area Networks

Seznam obrázků

Obrázek 1: Pásmový signál	15
Obrázek 2: Uspořádání WiFi ve WLAN	17
Obrázek 3: Typický dosah bezdrátových sítí	18
Obrázek 4: Zobrazení spektra a) modulační MCM b) modulační OFDM	19
Obrázek 5: OFDM a) Průběhy jednotlivých subnosných b) Spektrum OFDM c) Spektrum subnosných	20
Obrázek 6: Cyclic prefix v OFDM	22
Obrázek 7: Modulátor OFDM	22
Obrázek 8: Demodulátor OFDM	23
Obrázek 9: Schéma spektra systému WiMAX	24
Obrázek 10: Situace UWB spoje	25
Obrázek 11: Paprskový model vícecestného šíření	26
Obrázek 12: Útlum stavebních materiálů v závislosti na frekvenci [4]	28
Obrázek 13: Přehled útlumu stavebního materiálu (900 MHz) [26]	28
Obrázek 14: Úzkopásmové vs. širokopásmové vysílání	29
Obrázek 15: Schéma vysílače	30
Obrázek 16: ADL5370 - blokové schéma [14]	31
Obrázek 17: ADL 5324 - blokové schéma [15]	32
Obrázek 18: ADL5605 - blokové schéma [17]	33
Obrázek 19: Schéma přijímače	34
Obrázek 20: ADL5521 - blokové schéma [16]	35
Obrázek 21: ADRF6850 - uspořádání pinů [13]	36
Obrázek 22: Toleranční schéma a) Pásmové propusti b) Normované Dolní propusti	38
Obrázek 23: Frekvenční charakteristika navržené PP v pásmu 400 MHz - 600 MHz	42
Obrázek 24: Frekvenční charakteristika navržené PP v pásmu 700MHz - 900MHz	42
Obrázek 25: ADL5370 - základní zapojení [14]	43
Obrázek 26: ADL 5370 - vývojová deska (TOP, BOTTOM)	44
Obrázek 27: ADL 5370 – spektrum vf signálu modulovaného jednou nosnou	45
Obrázek 28: ADL 5370 - Spektrum vyslaného vf signálu, 10 nosných s odstupem 1 MHz	47
Obrázek 29: ADRF6850 - blokové schéma [13]	49
Obrázek 30: ADRF 6850 - vývojová deska (TOP, BOTTOM)	49
Obrázek 31: ADRF 6850 - SPI interface	50

Obrázek 32: Spektrum přijatého a demodulovaného signálu.....	51
Obrázek 33: ADRF 6850 - porovnání vyslané a přijaté I a Q složky.....	52
Obrázek 34: Porovnání I, Q složek při AVG = 0 V a 0,5 V.....	53
Obrázek 35: Spektrum vyslaného a přijatého širokopásmového signálu.....	54
Obrázek 36: Porovnání Q složek vyslaného a přijatého širokopásmového signálu.....	54
Obrázek 37: Schéma měření zesílení zesilovačů.....	55
Obrázek 38: Sestavené pracoviště pro měření zesílení	56
Obrázek 39: Sestavené pracoviště pro měření parametrů S11 a S22	57
Obrázek 40: Schéma měření parametrů S11	57
Obrázek 41: ADL5324 - základní zapojení, 2110 MHz – 2170 MHz [15].....	58
Obrázek 42: ADL 5324 -vývojová deska a rozmístění součástek pro pásmo 420 MHz - 494 MHz (TOP, BOTTOM).....	59
Obrázek 43: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače pro pásmo do 3 GHz.....	60
Obrázek 44: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu 300 MHz – 800 MHz.....	60
Obrázek 45: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost parametrů S11 a S22	61
Obrázek 46: ADL 5605 - Základní zapojení pro nastavení 943 MHz [17].....	62
Obrázek 47: ADL 5605 - vývojová deska nastavení 943 MHz (TOP, BOTTOM)	62
Obrázek 48:ADL 5605 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu do 3 GHz.....	63
Obrázek 49:ADL 5605 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu 700 MHz – 1000 MHz.....	64
Obrázek 50: ADL 5605 - naměřená frekvenční závislost parametrů S11 a S22.....	64
Obrázek 51: ADL5521 - základní zapojení [16]	65
Obrázek 52: ADL 5521 vývojová deska nastavená na střední frekvenci 500 MHz (TOP, BOTTOM).....	66
Obrázek 53: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače pro pásmo do 3 GHz.....	67
Obrázek 54: ADL 5521 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu 300 MHz – 800 MHz.....	67
Obrázek 55: ADL 5521 - naměřená frekvenční závislost parametrů S11 a S22.....	68
Obrázek 56: Sestavené pracoviště - vysílací strana.....	69
Obrázek 57: Schéma - vysílací strana.....	70
Obrázek 58: Anténa: ANT-HDB-TNC [25].....	71
Obrázek 59: Sestavení pracoviště pro měření výkonové bilance	72
Obrázek 60: Sestavené pracoviště - přijímací strana.....	75
Obrázek 61: Schéma - přijímací strana.....	76
Obrázek 62: Spektrum vyslaného a demodulovaného sinusového signálu, přímé spojení .	77
Obrázek 63: Porovnání vyslané a demodulované Q složky sinusového signálu, přímé spojení.....	77
Obrázek 64: Spektrum vyslaného a demodulovaného širokopásmového signálu, přímé spojení.....	78

Obrázek 65: Porovnání vyslané a demodulované Q složky širokopásmového signálu, přímé spojení.....	78
Obrázek 66: Spektrum vyslaného a demodulovaného sinusového signálu, přímé spojení .	80
Obrázek 67: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, přímé spojení.....	80
Obrázek 68: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, přímé spojení.....	81
Obrázek 69: Porovnání vyslané a demodulované Q složky širokopásmového signálu, přímé spojení.....	81
Obrázek 70: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, po průchodu místností	82
Obrázek 71: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, místnost	83
Obrázek 72: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, místnost.	84
Obrázek 73: Porovnání vyslané a demodulované Q složky širokopásmového signálu, místnost.....	84
Obrázek 74: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, jedna zeď	85
Obrázek 75: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, jedna zeď	86
Obrázek 76: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, po průchodu jednou zdí	87
Obrázek 77: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky širokopásmového signálu, jedna zeď	87
Obrázek 78: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, po průchodu dvěma zdmi	88
Obrázek 79: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, dvě zdi	89
Obrázek 80: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, po průchodu dvěma zdmi	90
Obrázek 81: Porovnání vyslané a demodulované I složky širokopásmového signálu, dvě zdi	90
Obrázek 82: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, po průchodu podlažím	91
Obrázek 83: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, podlaží	92
Obrázek 84: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, po průchodu podlažím	93
Obrázek 85: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky širokopásmového signálu, podlaží	93

Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace signálů podle šířky pásma	15
Tabulka 2: Parametry standardů WiMAX.....	16
Tabulka 3: Standardy systému WiFi	17
Tabulka 4: Porovnání parametrů: Fixed a Mobile WiMAX	24
Tabulka 5: Rozdělení frekvenčních pásem.....	27
Tabulka 6: ADL5370 – základní parametry	31
Tabulka 7: ADL5324 – Základní parametry	32
Tabulka 8: ADL5605 – základní parametry	33
Tabulka 9: ADL5521- základní parametry.....	35
Tabulka 10: ADRF6850 – základní parametry.....	37
Tabulka 11: Tabulkové hodnoty pro Čebyšev I, zvlnění 0,1dB, N=5,7 ([11])	39
Tabulka 12: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 700 MHz – 900 MHz, N=5	40
Tabulka 13: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 700 MHz – 900 MHz, N=7	40
Tabulka 14: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 400 MHz – 600 MHz, N=5	40
Tabulka 15: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 400 MHz - 600 MHz, N=7	40
Tabulka 16: ADL 5370 – hodnoty jednotlivých produktů ve spektru.....	45
Tabulka 17: ADL 5370 - Výkonová bilance pro různé amplitudy vstupního sinusového signálu, při různých frekvencích místního oscilátoru.....	46
Tabulka 18: ADL 5370 - výkonová bilance širokopásmového signálu	47
Tabulka 19: Přepočet výkonu na jednu nosnou a rozdíl ve výkonu pro LO 300 MHz a 900 MHz.....	47
Tabulka 20: ADL5324 - doporučené součástky pro základní zapojení.....	58
Tabulka 21: ADL5324 - doporučené umístění součástek na vývojové desce	58
Tabulka 22: ADL5605 - doporučené součástky pro základní zapojení ([17]).	62
Tabulka 23: ADL5605 - doporučené vzdálenosti součástek na vývojové desce ([17]).	62
Tabulka 24: ADL5521 - doporučené umístění součástek na vývojové desce ([16]).	65
Tabulka 25: Základní parametry antény: ANT-HDB-TNC ([25])	70
Tabulka 26: Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5324, pro různé šířky pásma a různý počet nosných	73
Tabulka 27: Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5324 pro sinusový signál o různých amplitudách.....	73
Tabulka 28: Výkonová bilance zapojení ALD 5370 a ADL 5605, pro různé šířky pásma a různý počet nosných	74
Tabulka 29: Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5605 pro sinusový signál o různých amplitudách.....	74

Úvod

Předkládaná diplomová práce se zabývá řešením širokopásmových radiových přijímačů a vysílačů datových spojů v UKV pásmu. Širokopásmové systémy dnes představují časté řešení datových radiových systémů, protože dnešním hlavním požadavkem je přenosová kapacita systému, která je podle Shannon-Hartleyho vztahu přímo úměrná šířce pásma přenášeného signálu a logaritmu odstupů signálu od šumu. Kapacitu systému tak můžeme navyšovat buď zvětšením šířky pásma, nebo zvýšením odstupů signálu od šumu. Nejčastěji se setkáváme s realizací širokopásmového spoje pomocí modulace OFDM, která je v dnešní době hojně využívána a pomalu se nalézá uplatnění ve velké části radiových systémů jako například v systémech WiMAX, WIFI nebo pro přenos digitální televize, kde je potřeba přenášet velké datové toky. UWB systémy se uplatňují nejen v oblastech komunikace, ale díky svým základním principům pro využití širokého frekvenčního pásma s minimální výkonovou spektrální hustotou byly již od počátku vývoje testovány pro radiolokační systémy. Na trhu jsou již dostupné radiolokační systémy na základě implementace UWB, například radarový systém ReTWIS od firmy Retia, který dokáže detekovat i nepatrné pohyby vyvolané základními biologickými funkcemi jako je např. dýchání a je proto schopný detekovat a lokalizovat osoby skryté za většinou běžných stavebních materiálů.

Diplomová práce je členěna do tří základních kapitol. První část je zaměřena na popis a základní parametry stávajících širokopásmových systémů WIFI a WiMAX a na popis modulace OFDM a její parametry pro použití v systému WiMAX.

Druhá část diplomové práce se zabývá návrhem vlastního UWB spoje, v této kapitole je proveden návrh blokového schématu a základních parametrů přijímače a vysílače s následným popisem vybraných součástek.

V poslední části práce jsou proměřeny parametry jednotlivých vybraných součástek a nakonec je zhotoveno experimentální pracoviště, kterým jsou ověřeny hlavní části spoje.

1 ZPŮSOBY ŘEŠENÍ ŠIROKOPÁSMOVÝCH DATOVÝCH SPOJŮ

1.1 Příklady používaných širokopásmových spojů

Nejprve definujme pojem širokopásmový signál. Širokopásmový signál, je pásmový signál, který splňuje některá naše kriteria na vzhled jeho spektra, resp. vztah šířky pásma vůči střednímu kmitočtu. Dle tohoto parametru dále rozlišujeme mezi signály ultra širokopásmovými, širokopásmovými a úzkopásmovými (viz Tabulka 1).

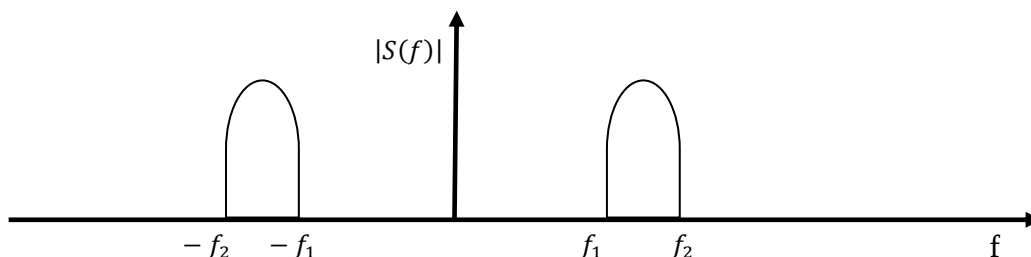
Za pásmové signály považujeme jen reálné signály, které mají omezené spektrum do určitého frekvenčního pásma a neobsahují nulový kmitočet. (viz Obrázek 1).([18])

Tedy platí:

$$S(\omega) \neq 0, \text{ pro } \omega_1 < |\omega| < \omega_2 \text{ a zároveň, } S(\omega) = 0, \text{ pro } |\omega| < \omega_1, \quad (1)$$

$$b = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{\frac{f_2 + f_1}{2}} = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (2)$$

kde f_1, f_2 jsou mezní frekvence pásmového signálu, b je relativní šířka pásma



Obrázek 1: Pásmový signál

Tabulka 1: Klasifikace signálů podle šířky pásma

Typ signálu	Anglický název	Relativní šířka pásma
Úzkopásmové signály	narrow band	$b \leq 2\%$
Širokopásmové signály	broad/wide band	$b \in (2\%, 20\%)$
Ultra širokopásmové signály	ultra-wide band	$b \geq 20\%$

1.1.1 WiMAX

Vývoj standardu 802.16 - WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) započal již v roce 1998 pro účely standardizace bezdrátového širokopásmového rozhraní pro přenos dat. Ze začátku měl standardizovat systémy pro přímou viditelnost (LOS – line of sight) pro pásmo 10-66 GHz. Výsledná definice standardu v roce 2001 zahrnovala fyzickou vrstvu s jednou nosnou frekvencí, využívající časový multiplex (TDM) a následovně v roce 2004 byl přidán tzv. Fixed WiMAX standart pro systémy bez přímé viditelnosti (NLOS – non line of sight) v pásmu 2-11 GHz s využitím fyzické vrstvy s technikou OFDM. Další dodatek byl v roce 2005 s označením 802.16e tzv. mobile WiMAX, který začal podporovat mobilitu uživatelských stanic. Souhrnný přehled parametrů jednotlivých standardů WiMAX je uveden v Tabulce 2. ([3])

Tabulka 2: Parametry standardů WiMAX

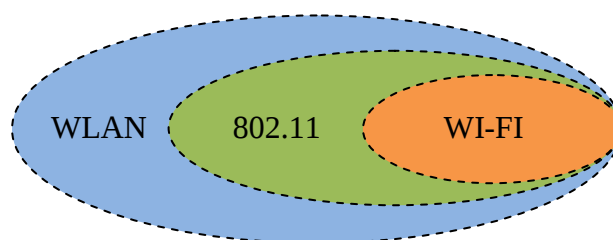
WiMAX	802.16	802.16-2004- Fixed	802.16e-2005- Mobile
Stav	dokončeno v 2001	dokončeno 2004	dokončeno 2005
Frekvenční pásmo	10 – 66 GHz	2 – 11 GHz	2 – 11 GHz (fixed) 2 – 6 GHz (mobile)
Aplikace	LOS (fixed)	NLOS (fixed)	Fixed a mobile NLOS
Technika přenosu	Jedna nosná frekvence	Jedna nosná, 256 OFDM, 2048 OFDM	Jedna nosná, OFDM s 128, 256, 512, 1024, 2048 nosnými
Modulace	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Přenosové rychlosti	32- 134,4 Mb/s	1 – 75 Mb/s	1 – 75 Mb/s
Duplex	TDD, FDM	TDD, FDM	TDD, FDM
Multiplex	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/OFDMA	Burst TDM/TDMA/OFDMA
Šířka pásma	20, 25 a 28 MHz	1.25, 1.75, 3.5, 5, 7, 8.75, 10, 14, 15 MHz	1.25, 1.75, 3.5, 5, 7, 8.75, 14, 15 MHz
Typické pokrytí	20 km	5-8 km	< 3 km

1.1.2 WI-FI

Označení WI-FI je udělováno produktům, které vyhovují standardům definovaným v 802.11 a splňující vzájemnou kompatibilitu. Motivace pro zavedení WI-FI byla snaha zbavit se potřeby budování ethernetových sítí a závislosti na kabelech, proto byl v roce 1997 definován standart 802.11 neboli tzv. „ bezdrátový ethernet “ pro bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích na krátkou vzdálenost. Tento typ sítí je označován jako WLAN (Wireless LAN). Standard 802.11 je pouze jedna z možných technologií používaných

v rámci sítí WLAN, dalšími jsou například technologie HiperLAN.

Rádiový přenos již od počátku probíhal v bezlicenčních pásmech (ISM – Industrial Scientific and Medical Bands) 900 MHz a 2,4 GHz se šířkou pásma 83,5 MHz a obsahuje 13 kanálů s odstupem 5 MHz, ale pouze 3 nepřekrývající se kanály. Maximální vyzářený výkon EIRP 100 mW a maximální přenosová rychlost 2M bit/s, což bylo nedostačující a



Obrázek 2: Uspořádání WiFi ve WLAN

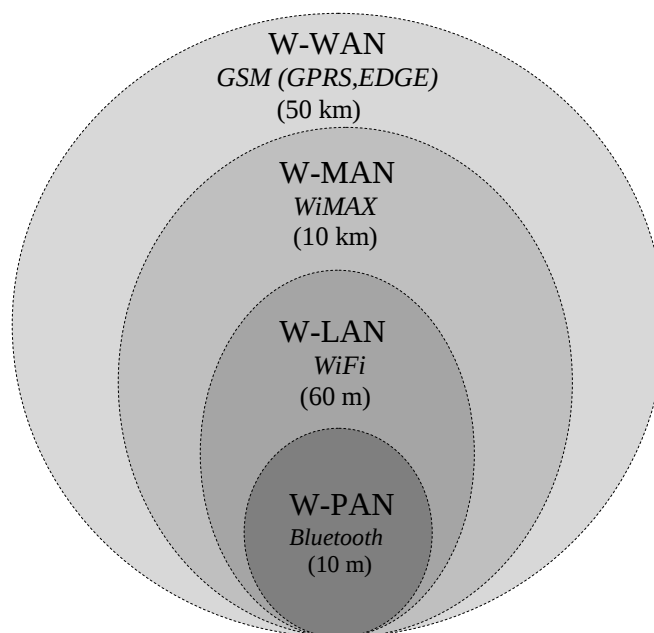
proto postupně vznikaly další doplňující standardy a bylo přidáno další bezlicenční pásmo 5 GHz, poprvé obsažené ve standardu 802.11a, kde už maximální přenosová rychlost byla 54Mb/s. K dispozici je v pásmech UNII (Unlicensed National Information Infrastructure Band) v rozsahu od 5,150 do 5,825GHz a ISM pásmo od 5,725 – 5,875 GHz. Souhrnně jsou parametry fyzické vrstvy standardu 802.11 uvedeny v Tabulce 3. ([22,23,24]).

Tabulka 3: Standardy systému WiFi

802.11 standard fyzické vrstvy						
802.11 protokol	Uvolněn	Frekvenční pásmo[GHz]	Šířka pásma[MHz]	Max. přenosová rychlost[Mbit/s]	Podpora MIMO	Modulace
-	Leden 1997	2.4	22	2	NE	DSSS, FHSS
a	Září 1999	5	20	54	NE	OFDM
b	Září 1999	2.4	22	11	NE	DSSS
g	Červen 2003	2.4	20	54	NE	OFDM, DSSS
n	Říjen 2009	2.4, 5	20, 40	600 (4x4, 40MHz)	4	OFDM
ac	Prosinec 2013	5	20, 40, 80, 160	1733 (4x4, 80 MHz)	8 (4 klient)	OFDM
				3466 (4x4, 160 MHz)		

Rozdíl mezi WiFi a WiMAX:

Obě služby byly navrženy pro širokopásmové bezdrátové komunikace, ale vlastnostmi se obě sítě liší. WiFi se zaměřuje na provoz uvnitř budov k poskytování služeb několika koncovým stanicím v rámci posledních metrů přenosu a využívá bezlicenční pásmo, zatímco WiMAX je určen pro poskytovatele služeb a jedná se o dražší technologii

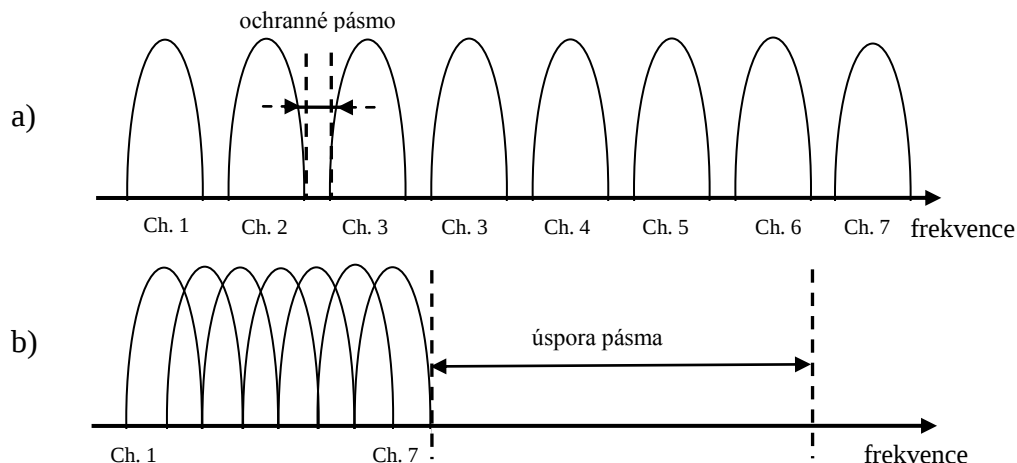


Obrázek 3: Typický dosah bezdrátových sítí

s důrazem na QoS a garanci parametrů přenosu a využívá především licencovaná pásma, pro která musí mít poskytovatel oprávnění. WiMAX není náhradou za WiFi, ale spíše doplnění v rámci radiokomunikačního řetězce. Přehled dosahů jednotlivých bezdrátových sítí je uveden na Obrázku 3.

1.2 Popis modulace OFDM

Počátek modulace OFDM je spojen s vývojem modulací s více nosnými, které jsou formou frekvenčně děleného multiplexu. Spektrum modulace OFDM oproti MCM (viz Obrázek 4) dosahuje výrazně efektivnějšího využití radiového spektra a to téměř



Obrázek 4: Zobrazení spektra a) modulace MCM b) modulace OFDM

dvojnásobně. Vstupní modulační sériový datový tok o relativně veliké rychlosti se ve vysílači převede na N paralelních pomalejších toků, které se následně namodulují na N subnosných vln o frekvencích $f_1, \dots, f_n$ se vzájemnými rozestupy $\Delta f = f_0$ a tvoří ortogonální soustavu. Tyto vlny mají v porovnání s MCM výrazně menší vzájemné rozestupy a dochází k překrytí jejich modulačních spekter. Každá ze subnosných se však nachází na kmitočtu, kde spektra ostatních modulovaných subnosných procházejí nulou (viz obr. 5), a proto nedochází k vzájemným interferencím (ICI - Inter Carrier Interference). Tyto systémy tvoří nejdůležitější skupinu MCM, označovanou jako systémy s ortogonálním frekvenčním multiplexem OFDM ([9]).

Frekvence jednotlivých subnosných jsou násobkem základní frekvence f_0 a pro n -tou subnosnou platí:

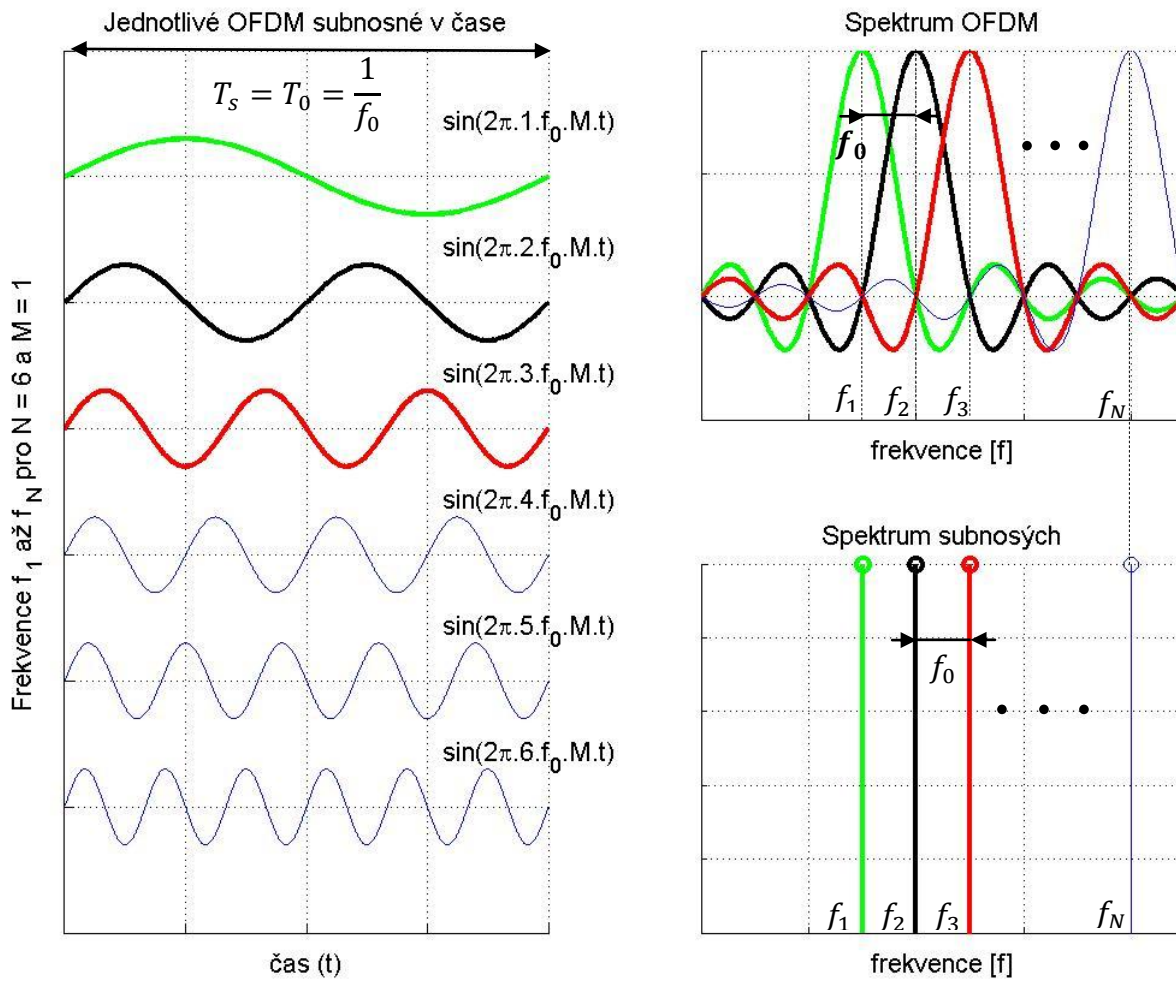
$$f_n = (n + M)f_0, \text{ kde } n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

kde T_0 je základní perioda a platí:

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \quad (4)$$

Šířka přenášeného pásma je rovna:

$$B = N \cdot f_0 \quad (5)$$



Obrázek 5: OFDM a) Průběhy jednotlivých subnosných b) Spektrum OFDM c) Spektrum subnosných

Na intervalu T_0 jsou všechny subnosné ortogonální, platí:

$$\int_t^{t+T_0} \sin(2\pi \cdot m \cdot f_0 t) \cdot \sin(2\pi \cdot n \cdot f_0 t) dt = \begin{cases} 0 & \text{pro } n \neq m \\ \frac{T_0}{2} & \text{pro } m = n \end{cases} \quad (6)$$

Signál OFDM v časové části pro k -tý symbolový interval můžeme popsat rovnicí:

$$s(k, t) = \sum_{n=1}^N c_n(k) e^{j(n+M)\omega_0 t}, \text{ pro } t \in [kT_s; (k+1)T_s) \quad (7)$$

Úpravou signálu OFDM (10) dojdeme k formální shodě se zápisem inverzní diskretní Fourierově transformace **IDFT** (8):

$$s(t_l) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cdot e^{j2\pi \frac{nl}{N}} \quad (8)$$

To nám přináší výhodu v jednoduché realizaci signálu ve vysílači pomocí IFFT a demodulaci signálu v přijímači pomocí FFT, ([18]).

Pokud by byla délka symbolového intervalu $T_S = T_0$, platilo by v bodech vzorkování t_l v k -tém symbolovém intervalu:

$$t_l = \left(kT_0 + l \frac{T_0}{N} \right) \quad (9)$$

kde: $T_0/N = T_V$... vzorkovací perioda.

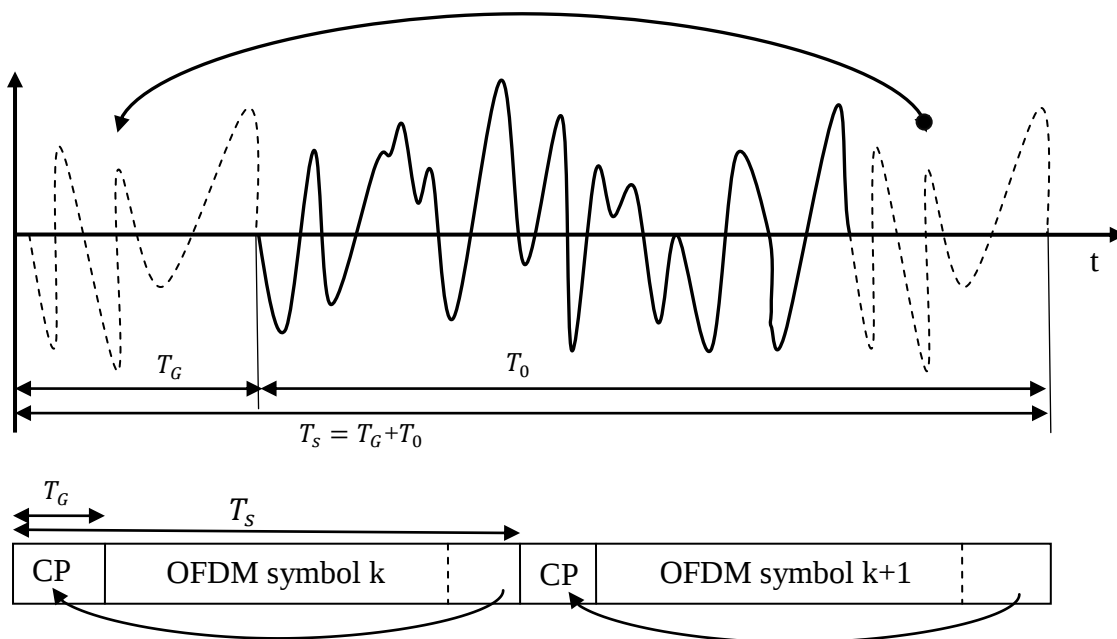
$$\begin{aligned} s(k, t_l) &= \sum_{n=1}^N c_n(k) e^{j(n+M)\omega_0 t_l} = \sum_{n=1}^N c_n(k) e^{j(n+M)\omega_0 \left(kT_0 + l \frac{T_0}{N} \right)} = \\ &= e^{jM\omega_0 \left(kT_0 + l \frac{T_0}{N} \right)} \cdot \sum_{n=1}^N c_n(k) e^{jnk\omega_0 T_0} \cdot e^{jnl\omega_0 \frac{T_0}{N}} = \\ &= \underbrace{e^{jM\omega_0 t_l}}_{\text{Nosná}} \sum_{n=1}^N \underbrace{c_n(k) \cdot e^{jnk\omega_0 T_0}}_{s_n = q_n(k)} \cdot e^{j2\pi \frac{nl}{N}} \end{aligned} \quad (10)$$

Komplexní amplitudy $q_n(k) = c_n(k) \cdot e^{jnk\omega_0 T_0}$ se vypočítají v diskrétní části modulátoru.

Problémy s OFDM

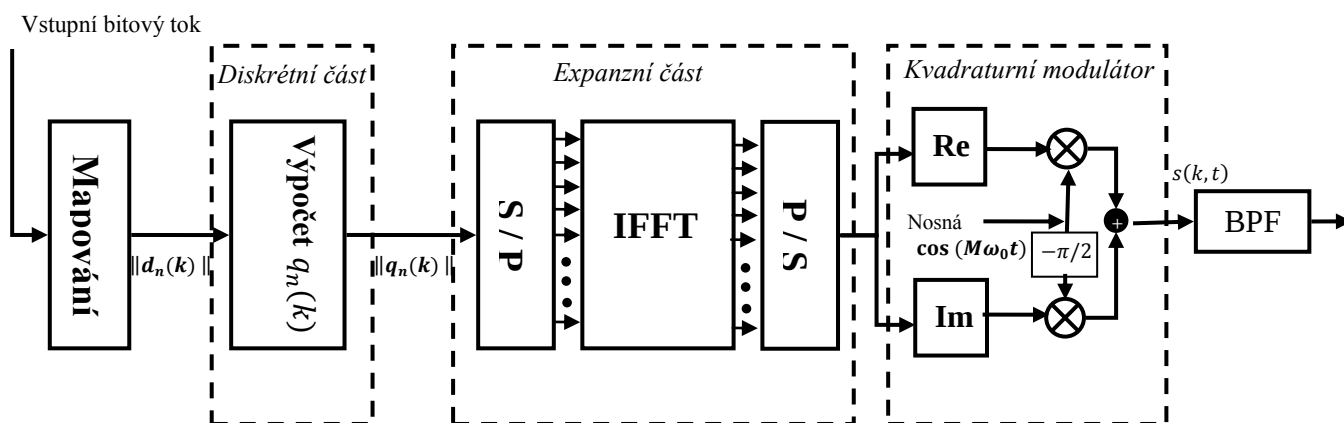
Na radiových linkách dochází často k disperzi, ta způsobuje, že jednotlivé subnosné přicházejí v různých časech a to by znemožňovalo použití DFT, protože by subnosné nesplňovaly podmínku ortogonalitu na společném intervalu délky T_0 .

Proto se symbolový interval T_S volí delší než T_0 . Poté platí, že $T_S = T_G + T_0$, kde T_G je ochranný interval (guard time) a volí se jako největší rozdíl ve zpoždění subnosných. Během T_G se vysílá opakování signálu z konce T_0 (cyclic prefix – CP znázorněn na Obrázku 6). Pak máme na přijímači v každém symbolovém intervalu opět k dispozici společný interval délky T_0 v němž jsou subnosné ortogonální, ([18]).



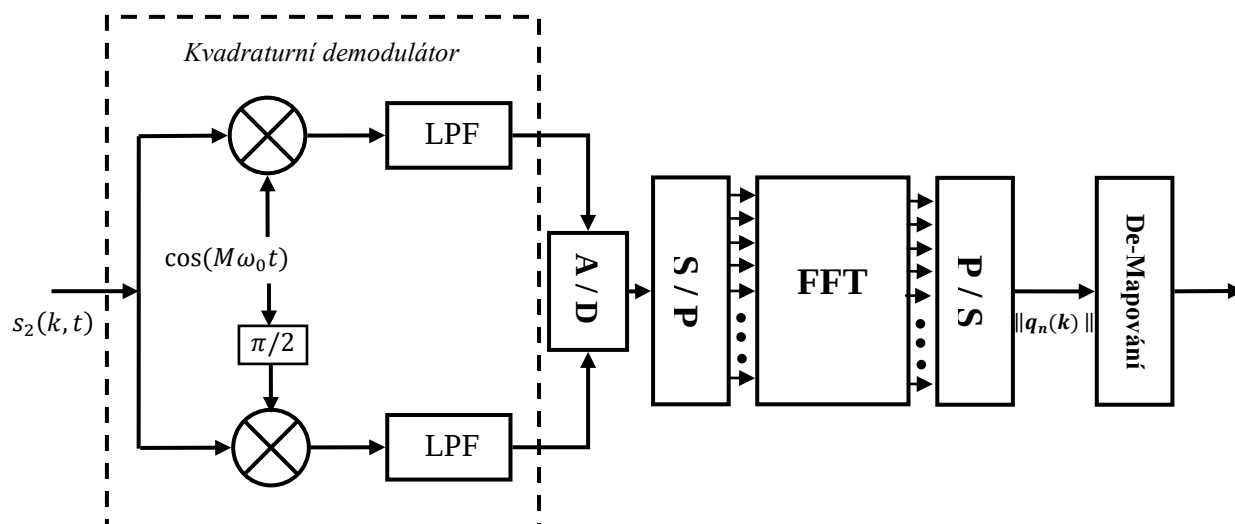
Obrázek 6: Cyclic prefix v OFDM

Praktická realizace modulátoru OFDM signálu s využitím IFFT bez CP, je zobrazeno na Obrázku 7.



Obrázek 7: Modulátor OFDM

Realizace demodulátoru OFDM s využitím FFT bez CP, schéma zobrazeno na Obrázku 8.

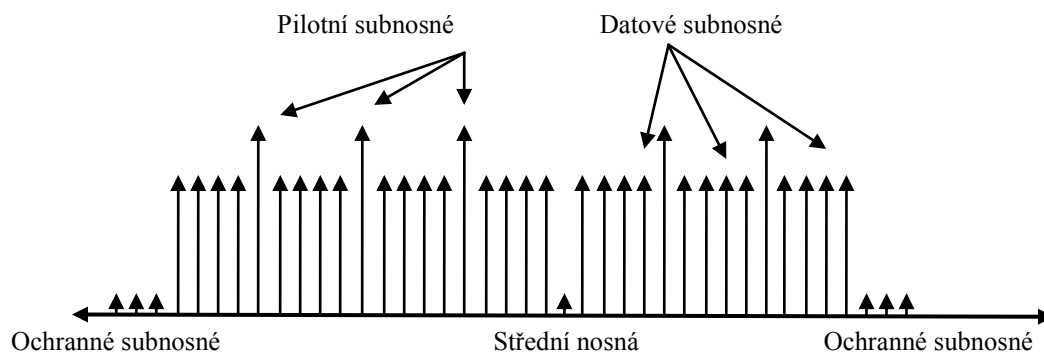


Obrázek 8: Demodulátor OFDM

1.2.1 OFDM v systému WiMAX

Parametry OFDM ve WiMAXu jsou mírně odlišné ve fixní (802.16 - 2004) a v mobilní (802.16e - 2005) verzi implementace fyzické vrstvy.

Fixní WiMAX využívá implementaci 256 FFT, kde 192 subnosných je určeno pro přenos dat a 8 tvoří pilotní subnosné pro účely odhadu parametrů přenosového kanálu a pro synchronizaci. Zbytek subnosných se nevysílá a pásmo, které zabírá, slouží k oddělení sousedních kanálů (ochranné subnosné – graficky zobrazeno na obrázku 9). Se zvyšující šířkou pásma (1,25 až 15 MHz) dochází ke zvětšení odstupů subnosných a ke zmenšení délky symbolu a to dává možnost ke zvětšení ochranného intervalu T_G a umožňuje široký rozsah nastavení ochranného intervalu, aby se docílilo odpovídajícího kompromisu mezi spektrální účinností a robustností vůči mnohacestnému šíření. Maximální robustnost je dosažena při použití délky ochranného intervalu T_G : 25% z celkové délky symbolového intervalu T_S , to odpovídá při použití pásma 3,5 MHz zpoždění do 16 μ s. Minimální nastavení ochranného intervalu T_G : 3% z celkové délky T_S pro kanály se zanedbatelným mnohacestným šířením. Souhrn parametrů pro Fixní WiMAX je uveden v Tabulce 4 ([3]).



Obrázek 9: Schéma spektra systému WiMAX

Mobilní WiMAX má proměnnou velikost FFT od 128 do 2048 a se změnou velikosti FFT se zároveň mění šířka pásma, aby odstup jednotlivých subnosných byl stále 10,94 kHz. To umožňuje konstantní dobu trvání OFDM symbolu. Hodnota 10,94 kHz byla zvolena jako dobrý kompromis mezi časovým zpožděním a Dopplerovským posuvem a umožňuje časové zpoždění do 20 μ s a rychlost pohybujících se prostředků do 125 km/h při použití v pásmu 3,5 GHz. Použití délek FFT 128, 512, 1024 a 2048 při zachování odstupe 10,94 kHz vyžaduje změnu pásma 1,25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 20 MHz. Souhrn parametrů Mobilního WiMAXu je uveden v tabulce 4 ([3]).

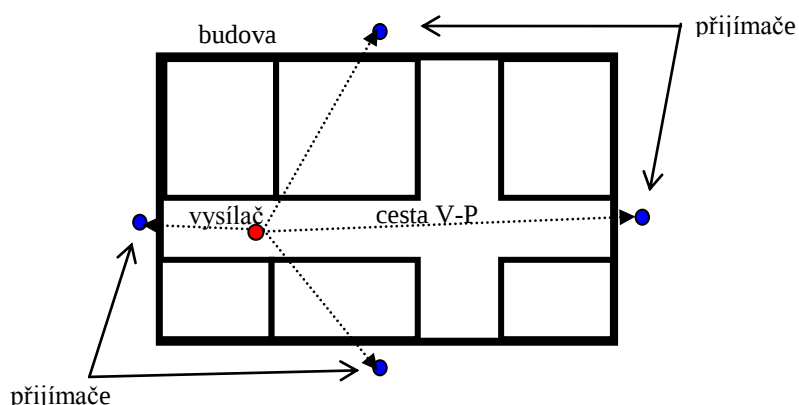
Tabulka 4: Porovnání parametrů: Fixed a Mobile WiMAX

Parametr	Fixed WiMAX	Mobile WiMAX			
Délka FFT	256	128	512	1024	2048
Počet datových subnosných	192	72	360	720	1440
Počet pilotních subnosných	8	12	60	120	240
Počet ochranných subnosných	56	44	92	184	368
Ochranný interval (T_G)	1/32, 1/16, 1/8 / 1/4				
Šířka pásma [MHz]	3,5	1,25	5	10	20
Odstup subnosných [kHz]	15,625	10,94			
Užitečný čas na symbol [μ s]	64	91,4			
T_G při 12,5% (1/8) [μ s]	8	11,4			
Trvání OFDM symbolu [μ s]	72	102,9			

2 NÁVRH VLATNÍHO UWB SPOJE

2.1 Základní popis

Řešený širokopásmový rádiový přijímač a vysílač bude součástí rádiového systému



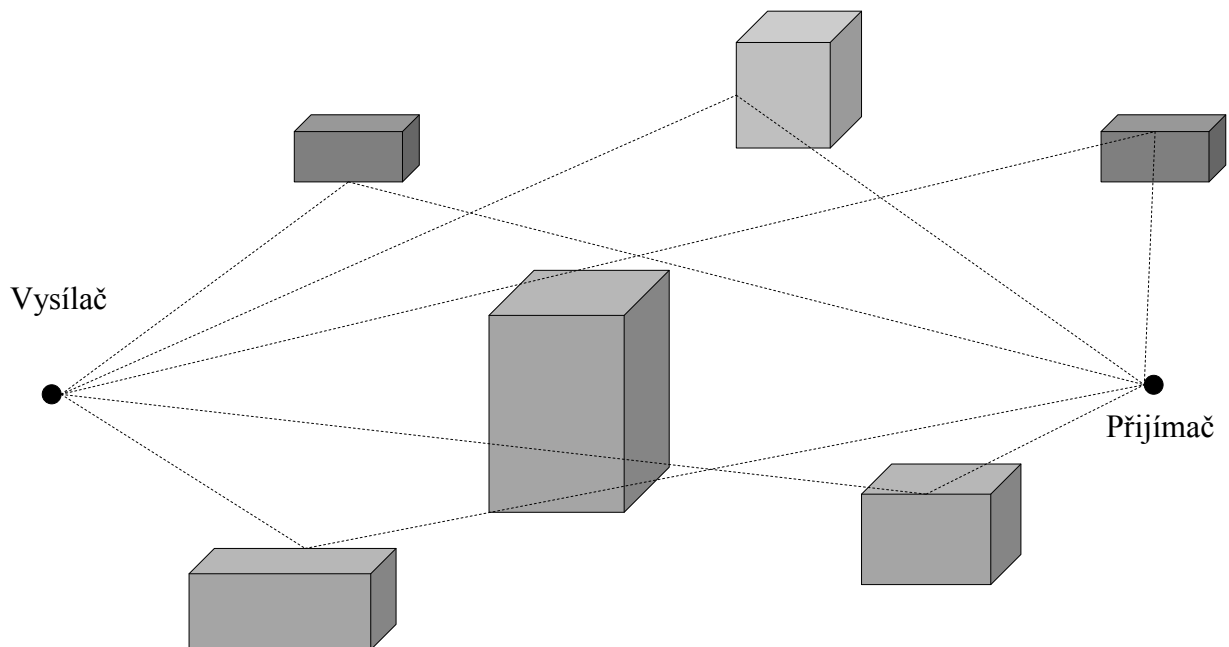
Obrázek 10: Situace UWB spoje

určování polohy RTLS (Real Time Location System) v budovách. Geometrické uspořádání rádiového systému je uvedeno na Obrázku 10. Umístění vysílače je uvnitř budovy a několika přijímačů kolem budovy, námi řešený přijímač a vysílač tvoří jednu z těchto cest (V-P). Systém bude vyhodnocovat zpoždění signálů, vyslaného vysílačem po cestách k jednotlivým přijímačům a z těchto údajů bude počítat polohu vysílače časoměrnou hyperbolickou metodou ([1, 2]).

Šíření vln v budovách

Šíření elektromagnetických vln je dáno vlnovou rovnicí, která má základ v Maxwellových rovnicích. Vlastnosti elektromagnetických vln jsou primárně určeny jejich frekvencemi, resp. vlnovou délkou. V homogenním prostředí, u něhož předpokládáme linearitu a izotropnost se šíří pouze jediná vlna a počítáme pouze s útlumem, v důsledku ztrátivosti tohoto prostředí. Uvnitř budov je velká variabilita konstrukčních prvků a různých vlastností ovlivňujících šíření signálu, které se mohou v čase měnit jako například pohyb osob, počty otevřených a zavřených dveří a oken atd.. Na těchto nehomogenitách dochází k odrazu vln, k jejich rozptylu nebo difrakci, vždy záleží na délce vlny a na konkrétním rozložení a na rozměrech překážek. V takových případech se šíření elektromagnetických vln značně komplikuje a výpočet šíření je mnohem náročnější. Za předpokladu, že vysílaná vlna dopadá na překážky o rozměrech podstatně větších než je vlnová délka, odráží se od těchto překážek a signál se tak dostává k přijímači po více cestách (vícecestné šíření - multipath). U některých služeb, např. GSM, kdy je téměř vždy potlačen přímý signál to je jediná možnost jak uskutečnit komunikaci v místech bez přímé viditelnosti, jako např. v dvorech domů, sklepech a budovách atd.. Každá cesta je charakterizována specifickým zeslabením α , zpožděním τ a fázovým posuvem φ . Mnohacestné šíření lze znázornit na

paprskovém modelu, uvedeném na Obrázku 11 a jeho vliv na vysílaný signál můžeme vyjádřit pomocí vztahu (11), ([7]).



Obrázek 11: Paprskový model vícecestného šíření

$$s_2(t) = \sum_{l=0}^L \alpha_l s_1(t - \tau_l) \quad (11)$$

Kde: α_l je komplexní amplituda l -tého paprsku, $l = 0, \dots, L$ a index $l = 0$ je obvykle přiřazen přímému paprsku

τ_l je zpoždění l -tého paprsku

$s_2(t)$ je celkový přijatý signál, $s_1(t)$ vyslaný signál

Veličiny α_l a τ_l se nazývají parametry kanálu s vícecestným šířením a vzhledem k tomu, že se okolní prostředí může v čase měnit (rozmístění překážek), případně se mohou přijímač a vysílač pohybovat, mohou se měnit i parametry kanálu, tzn. $\alpha_l = \alpha_l(t)$ a $\tau_l = \tau_l(t)$. Tyto změny způsobují kolísání úrovně signálu v místě přijímače. Pokles úrovně signálu se nazývá únik a je velmi výrazný zejména v úzkopásmových přenosech a tam, kde je přímý signál hodně zeslaben ([21, 22]).

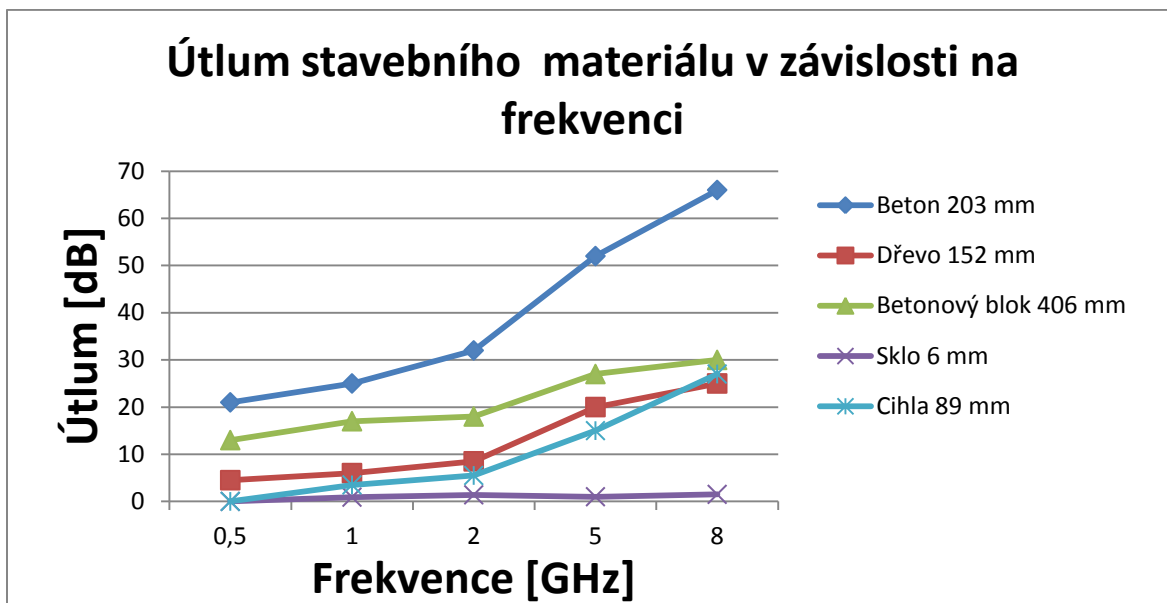
2.2 Volba parametrů spoje

2.2.1 Výběr kmitočtového pásma

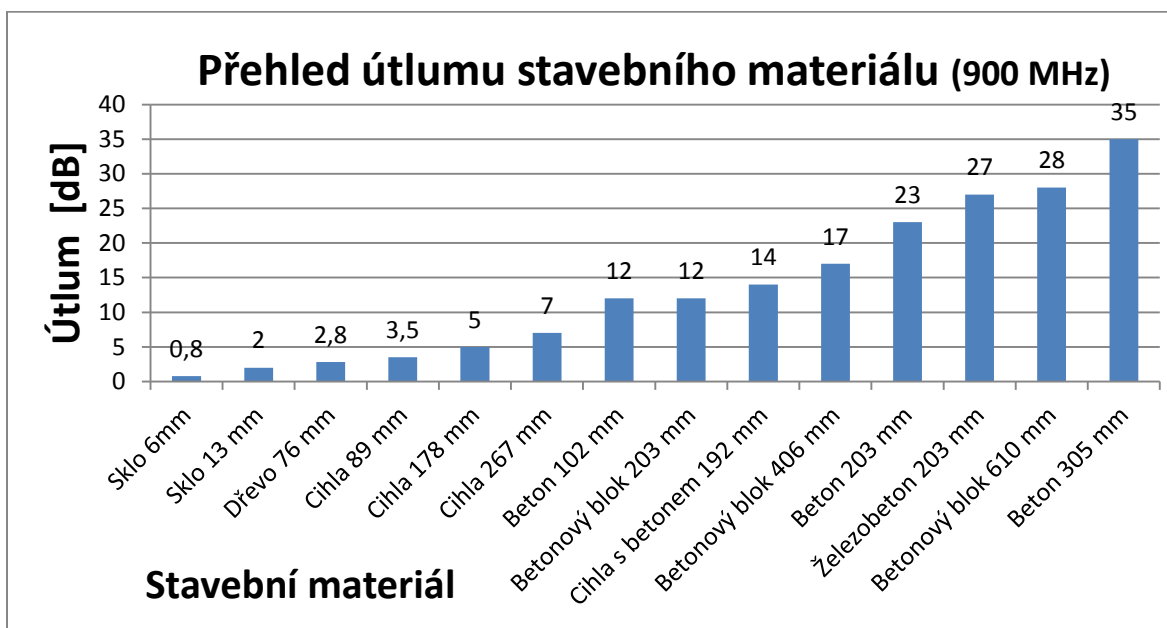
Jak již bylo zmíněno, chování elektromagnetické vlny je určeno především její vlnovou délkou. Délka vlny a rozměry objektů v prostředí, ve kterém se vlna šíří, určují, jak se bude šířená vlna tlumit, ohýbat a odrážet. Pro nás je významnou vlastností nízký útlum signálu na cestě od vysílače k přijímači. Nejnižší útlum v budovách, kde musí signál procházet zdmi, mají elektromagnetické vlny na nízkých frekvencích pod 1 GHz, na Obrázku 12, je zobrazen útlum vybraných materiálů v závislosti na frekvenci a je vidět, že se zvyšující se frekvencí útlum značně narůstá. Dále z Obrázku 13 je vidět, že útlum v budovách je silně závislý na použitém stavebním materiálu, přes který se má signál šířit, nejvíce signál utlumuje průchod silnou vrstvou betonu nebo železobetonu, naopak sklo či dřevo signál zdaleka tak netlumí. Vlny o vlnové délce delší než 1 m se však při styku s překážkami srovnatelných rozměrů ohýbají a při výpočtu dráhy paprsku ze zpoždění dochází k velkým chybám. Navíc, přesnost měření zpoždění závisí na šířce pásma signálu, kdy rozlišovací schopnost nejmenšího časového posuvu ΔT dvou signálů o stejné amplitudě je dáno šířkou hlavního laloku autokorelační funkce signálu τ_c , kdy signály, jejichž zpoždění se liší méně, než τ_c považujeme za nerozlišitelné. Mezi šířkou hlavního laloku autokorelační funkce a šířkou pásma BW je vztah $\Delta T = \tau_c = 1/BW$, takže pro uvažované použití nelze volit kmitočty nosné pod 300 MHz. Proto padla volba pásma na pásmo ultra krátkých vln (UKV) s vlnovou délkou od 1 metru do 10 centimetrů. Navíc uvedené vlnové délky umožňují konstrukci relativně malých antén. Toto frekvenční pásmo je využíváno i pro televizní vysílání, mobilní sítě a další systémy, které fungují ve stejných podmínkách. Celkový přehled rozdělení frekvenčních pásem je uveden v Tabulce 5. ([2,4])

Tabulka 5: Rozdělení frekvenčních pásem

Rozsah frekvencí	Vlnová délka	Česká zkratka	České označení vln	Anglický název	Anglická zkratka
3 – 30 kHz	100 – 10 km		velmi dlouhé	Very Low Frequency	VLF
30 – 300 kHz	10 – 1 km	DV	dlouhé	Low Frequency	LF
0,3 – 3 MHz	1000 – 100 m	SV	střední	Medium Frequency	MF
3 – 30 MHz	100 – 10 m	KV	krátké	High Frequency	HF
30 – 300 MHz	10 – 1 m	VKV	velmi krátké	Very High Frequency	VHF
0,3 – 3 GHz	10 – 1 dm	UKV	ultra krátké	Ultra High Frequency	UHF
3 – 30 GHz	10 – 1 cm		centimetrové	Super High Frequency	SHF
30 – 300 GHz	10 – 1 mm		milimetrové	Extremely High Frequency	EHF



Obrázek 12: Útlum stavebních materiálů v závislosti na frekvenci [4]



Obrázek 13: Přehled útlumu stavebního materiálu (900 MHz) [26]

2.2.2 Šířka pásma

Volba šířky pásma signálu je pro náš případ velice důležitá. Při použití úzkopásmového signálu by díky vícecestnému šíření signálu docházelo k situacím, že by se celé pásmo ocitlo v minimu přenosu a hluboký únik by tedy zcela zlikvidoval přenos a jen pomalu by se náhodným způsobem přesunul na jiné kmitočty. Další problém souvisí s tím, že se tento

spoj bude využívat pro systém určení polohy vysílače časoměrnou metodou. Vícecestné šíření zhoršuje přesnost měření zpoždění a tím i přesnost určení polohy vysílače.

Zbraní proti vícecestnému šíření představuje použití širokopásmového signálu. Ten lze realizovat pomocí různých modulací:

- Modulací úzkým impulzem
- Diskrétní modulací s jednou nosnou (např. ASK, PSK, FSK)
- Lineární frekvenční modulací FMCW nebo stupňovitou frekvenční modulací SFM
- Modulace s více nosnými (např. OFDM)

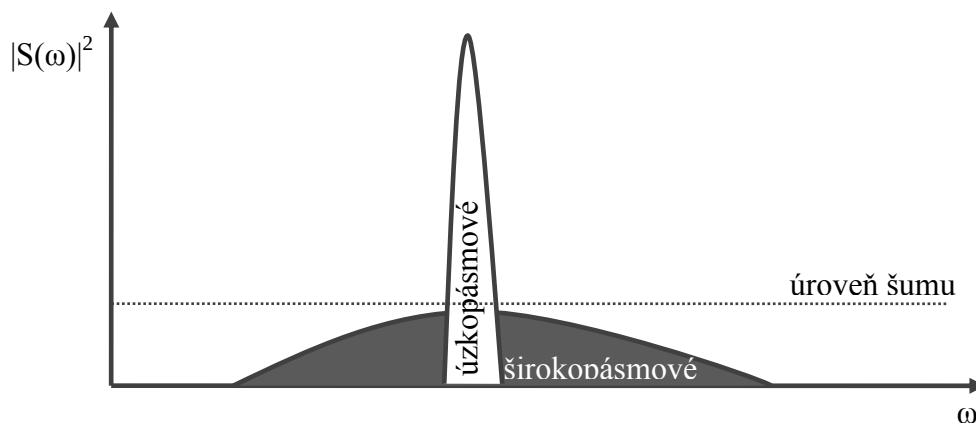
Při modulaci úzkým impulzem je zapotřebí generovat impulz o vysokém výkonu, což značně ztěžuje realizaci. Diskrétní modulace vyžadují obvody s vysokou rychlostí zpracování. Modulace FMCW a SFM tento nedostatek obcházejí směřováním s replikou vysílaného signálu, ale tato metoda je účinná pouze když je k dispozici dokonalá synchronizace vysílače a přijímače. Modulace OFDM je v tomto ohledu méně náročná.

V našem případě budeme využívat modulaci OFDM se šířkou pásma B kolem 200 MHz a s délkou symbolového intervalu $T_S = 1/f_0 = 10 \mu s$ ([1]). Počet subnosých $N = B \cdot T_S$ pak vychází vysoký až několika tisícový. Obdobný postup se například využívá v systémech WiMAX, WIFI i při přenosu signálu digitální televize ([2, 21]).

2.2.3 Výkon vysílače

Výkon vysílače bude stanoven experimentálně, až po sestavení radiového spoje v závislosti na stanovených parametrech využívající služby. Spoj bude navrhován na průchod vysílaného signálu skrz jednu, či dvě zdi na vzdálenost několik desítek metrů.

Porovnáním při stejných vysílacích výkonech v úzkopásmovém režimu je spektrální hustota soustředěna do úzkého pásma a širokopásmového režimu je spektrální hustota rozložena do širokého pásma, kde jednotlivé harmonické jsou pod úrovní šumu.



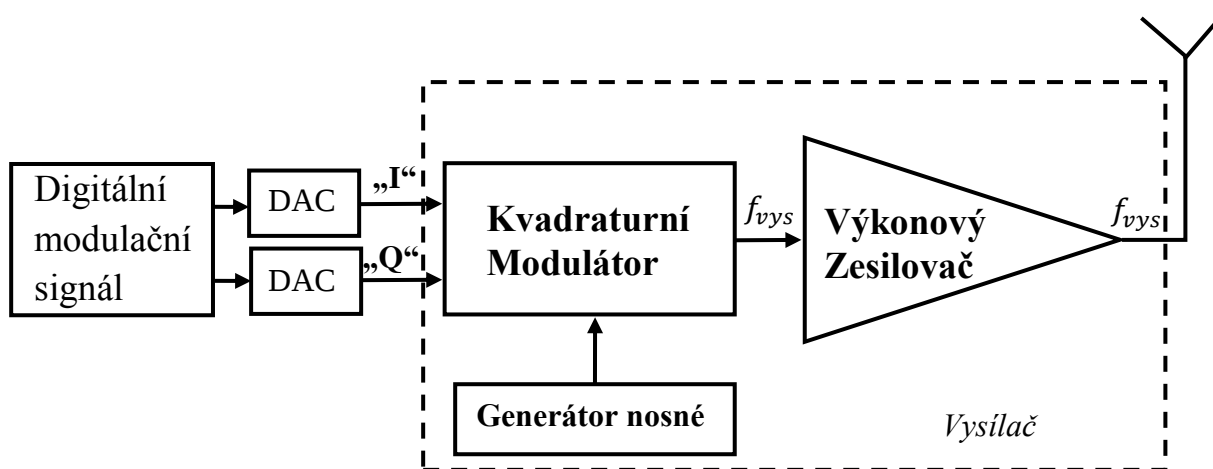
Obrázek 14: Úzkopásmové vs. širokopásmové vysílání

2.3 Návrh vysílače

Funkce vysílače:

- namodulování složek I a Q na vysokofrekvenční nosný signál
- výkonové zesílení vysokofrekvenčního signálu

Schéma návrhu vysílače je zobrazeno na Obrázku 15.



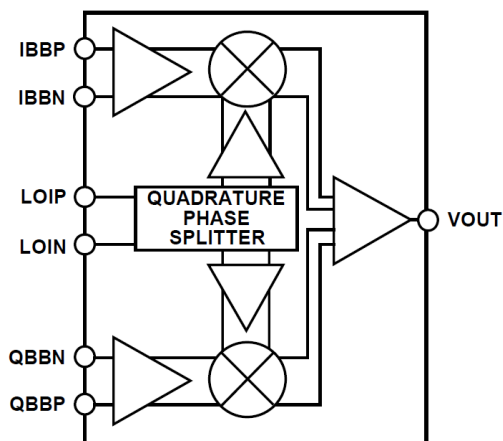
Obrázek 15: Schéma vysílače

Vybrané součástky:

2.3.1 Kvadraturní modulátor:

Analog Devices - ADL 5370 Quadrature modulator 300 MHz to 1000 MHz

Kvadraturní modulátor s fixním zesílením je určen pro využití v pásmu od 300 MHz do 1000 MHz s vynikající fázovou přesností. Poskytuje šířku pásma větší než 500MHz, čímž se skvěle hodí pro použití v širokopásmových systémech. Provádí přímou modulaci signálu ze základního pásma na vysokofrekvenční signál. Souhrnný přehled nejdůležitějších parametrů je uveden v Tabulce 6. Blokové schéma modulátoru je zobrazeno na Obrázku 16.



Obrázek 16: ADL5370 - blokové schéma [14]

Tabulka 6: ADL5370 – základní parametry

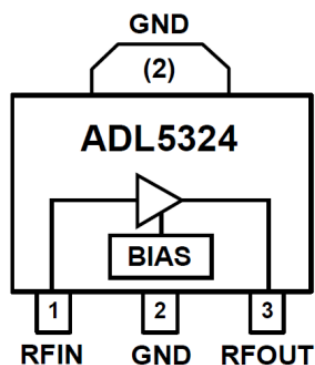
Základní parametry				
ADL5370		LO = 450MHz		
Parametr	Hodnota		Podmínky	
Frekvenční rozsah	300 – 1000MHz			
Výstupní výkon	6,2 dBm		při $V_{IQ} = 1,4$ p-p	
OP1dB	11 dBm			
Potlačení nosné	-50dBm			
Potlačení postranních pásem	-41 dBc			
Kvadrurní chyba	0,76 stupně			
Druhá harmonická	-65 dBc			
Třetí harmonická	-54 dBc			
OIP3	60 dBm			
OIP2	24 dBm			
LO				
Úroveň LO	-7 dBm	0 dBm	7 dBm	
Vstupní signál v základním pásmu				
Střední úroveň I, Q	500 mV			
Vstupní klidový proud	45 μ A			
Napájení				
Napětí	4,75V	5,25V		
Proud	205 mA			

Pro náš účel bylo za potřebí kvadrurního modulátoru pracujícího v pásmu UKV s požadavkem na specifickou šířku pásma vstupního signálu. Z nabídky Analog Device byl svými parametry nejvhodnější modulátor ADL5370. Výhodou byla dostupnost vývojové desky (evaluation board), ([14]).

2.3.2 Výkonový zesilovač:

Analog Devices - ADL5324 400 MHz to 4000 MHz ½ Watt RF Driver Amplifier

Zesilovač pracující v širokém frekvenčním pásmu od 400 MHz do 4000 MHz, s možností ovlivnění OIP3 a P1dB podle napájecího napětí ze 3,3V do 5V. Zlepšení vlastností v určitých frekvenčních pásmech se dosáhne přidáním externích součástek. Přehled základních parametrů zesilovače po frekvenčním přizpůsobení je uveden v Tabulce 7. Blokové schéma je zobrazeno na Obrázku 17.



Obrázek 17: ADL 5324 - blokové schéma [15]

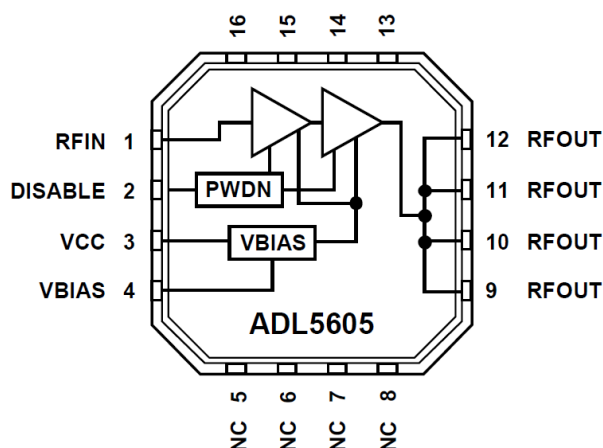
Tabulka 7: ADL5324 – Základní parametry

Základní parametry			
Parametr	3.3V	5V	Podmínky
Frekvence = 457 MHz			
Zisk	17,2 dBm	18,4 dBm	±37MHz
vs. frekvence	+ 0.0 / -0.4 dB	+ 0.0 / -0.2 dB	
OP1dB	24,2 dBm	28 dBm	
OIP3	30,1 dBm	40,1 dBm	
Šumové číslo	5,6 dB	6,8 dB	
Frekvence = 748 MHz			
Zisk	16,5 dB	17,5 dB	±20MHz
vs. frekvence	+ 0.0 / -0.2 dB	+ 0.0 / -0.2 dB	
OP1dB	24,2 dBm	28 dBm	
OIP3	36 dBm	45,8 dBm	
Šumové číslo	4 dB	5,2 dB	
Frekvence = 915 MHz			
Zisk	15,8 dB	16,8 dB	±46MHz
vs. frekvence	±0,1 dB	+0,1 / -0,3 dB	
OP1dB	24,2 dBm	27,7 dBm	
OIP3	39,3 dBm	45,6 dBm	
Šumové číslo	4,1 dB	5,1 dB	
Maximální hodnoty			
Napájecí napětí	6,5 V		
Vstupní výkon (50 Ω Impedance)	20 dBm		

Vybraný zesilovač plní v našem případě roli výkonového stupně a zesiluje výkonově vysokofrekvenční signál až na 630 mW, při předpokládaném využití zesilovače ADL5324 v pásmu kolem 500 MHz by v našem případě mělo být zesílení dostatečné. Frekvenční pásmo, ve kterém zesilovač ADL5324 pracuje, je mnohonásobně větší než bychom potřebovali, nicméně výběr zesilovačů byl nedostatečný, při našich požadavcích na šířku pásma v okolí 500 MHz. K produktu byla dostupná vývojová deska ([15]).

Analog Devices – ADL5605 700 MHz to 1000 MHz 1 W RF Amplifier

Zesilovač pracující ve frekvenčním rozsahu od 700 MHz do 1000 MHz dosahující výstupního výkonu 1W. Pracuje při napájecím napětí 5 V a proudu 307 mA a hodí se pro aplikace vyžadující režim úspory energie. Souhrn základních parametrů zesilovače je uveden v Tabulce 8. Blokové schéma zobrazeno na Obrázku 18.



Obrázek 18: ADL5605 - blokové schéma [17]

Tabulka 8: ADL5605 – základní parametry

Základní parametry		
Parametr	Hodnota	Podmínky
Frekvence = 748 MHz		
Zisk	24,3 dB	
vs. frekvence	+ 0,01 / -0,19 dB	± 20 MHz
OP1dB	31,4 dBm	
vs. frekvence	-0,68 / +0,08 dBm	± 20 MHz
OIP3	41,9 dBm	
vs. frekvence	-0,22 / 0,16 dB	± 20 MHz
Šumové číslo	4,8 dB	
Frekvence = 881 MHz		
Zisk	23 dB	
vs. frekvence	-0,03 / -0,08	± 13 MHz
OP1dB	41,3 dBm	
vs. frekvence	-0,32 / +0,40 dBm	± 13 MHz
OIP3	41,9 dBm	

vs. frekvence	-0,22 / 0,16 dB	±13MHz	
Šumové číslo	4,7 dB		
Napájení			
	Min.	Typ.	Max.
Napájecí napětí	4,75 V	5 V	5,25 V
Napájecí proud	307 mA		385 mA

Oproti již dříve vybranému zesilovači ADL5324, dosahuje ADL5605 vyššího výstupního výkonu ve frekvenční oblasti pod 1 GHz, kde již útlumy stavebních materiálů jsou vyšší než tomu je na nižších frekvencích a proto je zapotřebí signál více zesílit. Tento zesilovač je alternativou při řešení rádiového spoje na vyšších frekvencích ([17]).

2.4 Návrh přijímače

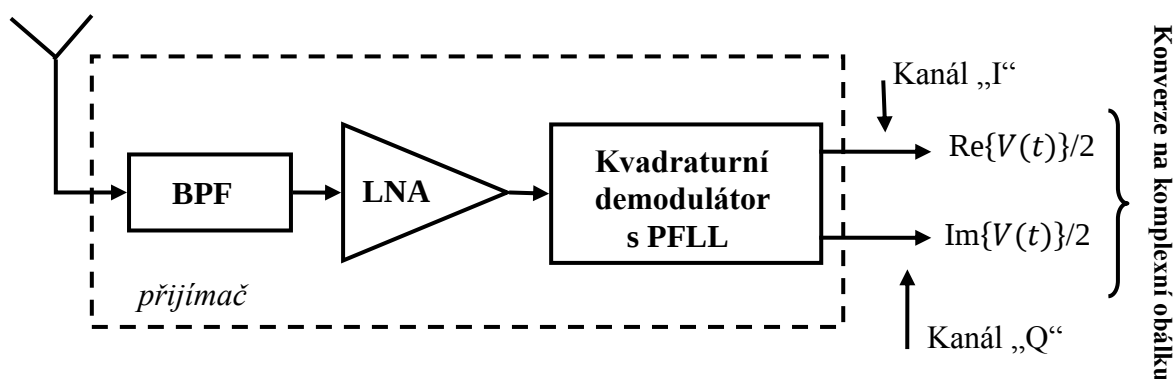
Funkce přijímače:

- Nízkošumové zesílení přijatého signálu
- Potlačení mimopásmového rušení
- Demodulace přijatého signálu a konverze na komplexní obálku

Schéma návrhu přijímače je zobrazeno na Obrázku 19.

Na vstupu přijímače je zarušený signál na vysokém kmitočtu.

Na výstupu přijímače je již zesílený signál v základním pásmu.



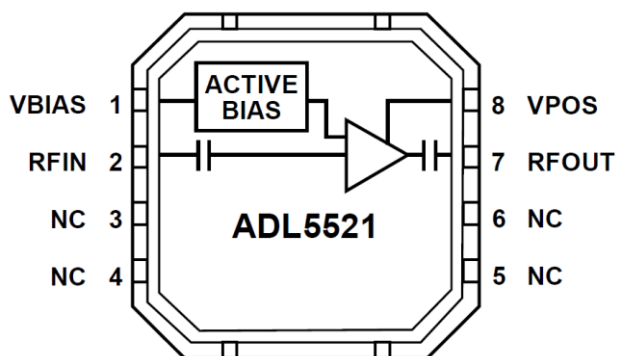
Obrázek 19: Schéma přijímače

Vybrané součástky:

2.4.1 Nízkošumový zesilovač

Analog Devices – ADL5521: 400 MHz to 4000 MHz Low Noise Amplifier

Nízkošumový zesilovač ADL5521 umožňuje použití v širokém frekvenčním pásmu od 400 MHz do 4000 MHz. Vyznačuje se vysokým ziskem a nízkým šumovým číslem. Svými vlastnostmi je vhodný pro použití v přijímačích. Optimální nastavení šumového čísla pro různá frekvenční pásma dosáhneme přidáním externích součástek. Přehled parametrů je uveden v Tabulce 9. Blokové schéma zobrazeno na Obrázku 20.



Obrázek 20: ADL5521 - blokové schéma [16]

Tabulka 9: ADL5521- základní parametry

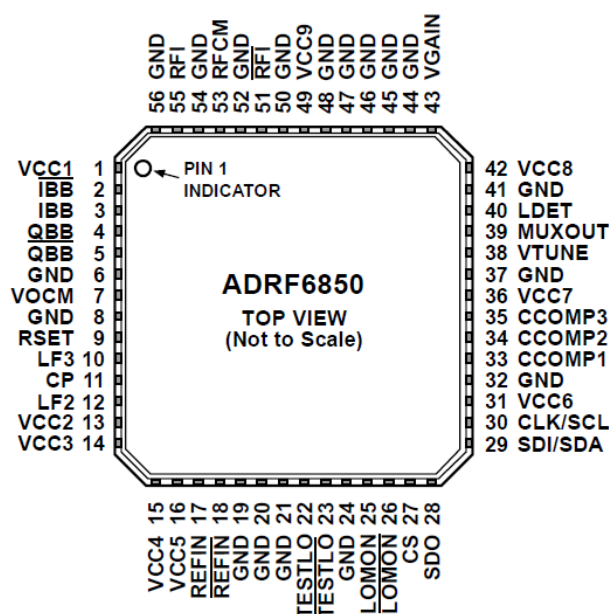
Základní parametry			
Parametr	3,3V	5V	Podmínky
Frekvence = 900 MHz			
Zisk (S21)	21 dB	21,5 dB	
vs. frekvence	$\pm 0,35$ dB	$\pm 0,37$ dB	± 50 MHz
Šumové číslo	0,8 dB	0,8 dB	
OIP3	28 dBm	34 dBm	
OP1dB	18,8 dBm	21 dBm	
Vstupní koeficient odrazu (S11)	-7,5 dB	-8 dB	
Výstupní koeficient odrazu (S22)	-10,5 dB	-11 dB	
Zpětný přenosový koeficient (S12)	-24 dB	-25,5 dB	
Napájení			
Napájecí proud	30mA (3,3 V)	60mA (5 V)	
Maximální napětí	5,5V		
Max. úroveň vstupního signálu	7 dBm		

Nízkošumový zesilovač (LNA) byl vybírán s požadavkem na dostatečně široké frekvenční pásmo a co nejlepší šumové číslo, protože na vstupu zesilovače je zeslabený a zašuměný signál, který potřebujeme před demodulací zesílit. Šumové číslo je velice důležitý parametr, protože každý obvod generuje nějaký vlastní šum, který při průchodu signálu zhoršuje poměr mezi výkonem signálu a šumu, proto na vstupu vysílače potřebujeme zesilovač s dostatečně malým šumovým číslem ([16]).

2.4.2 Kvadraturní demodulátor

Analog Devices ADRF 6850 100 MHz to 1000 MHz Integrated Broadband Receiver

ADRF6850 je integrovaný širokopásmový přijímač, který v sobě obsahuje kvadraturní demodulátor, frekvenční syntezátor a zesilovač se ziskem řízeným napětím. Zařízení pracuje pro ve frekvenčním pásmu od 100 MHz do 1000 MHz, jak v režimu uzkopásmové, tak i pro v širokopásmové aplikace. Provádí demodulaci buď do IF, nebo rovnou do základního pásma. Demodulátor obsahuje frekvenčně-fázový závěs (PFL) skládající se z N-dělicího frekvenčního syntezátoru a integrovaného oscilátoru řízeného napětím (VCO), který má frekvenční rozlišení lepší než 1Hz. Zápis do registrů, který ovlivňuje nastavení přijímače je realizován pomocí rozhraní SPI nebo I²C. Přehled základních parametrů je uveden v Tabulce 10. Uspořádání pinů ADRF 6850 je zobrazeno na Obrázku 21 ([13]).



Obrázek 21: ADRF6850 - uspořádání pinů [13]

Tabulka 10: ADRF6850 – základní parametry

Přehled parametrů				
Parametr	Hodnota			Podmínka
	Min.	Typ.	Max.	
RF vstup (RFI, $\overline{\text{RFI}}$, VGAIN)				
Frekvenční rozsah	100MHz		1000 MHz	
IP1dB	+12 dBm			zisk 0 dB
	-48 dBm			zisk 60 dB
IIP3	+22,5			zisk 0 dB
	-38 dBm			zisk 60 dB
IIP2	+40 dBm			zisk 0 dB
	-20 dBm			zisk 60 dB
Maximální zisk	60 dB			$Z_S=50\Omega$, $Z_L=100\ \Omega$
Minimální zisk	0 dB			$Z_S=50\Omega$, $Z_L=100\ \Omega$
VGAIN – vstupní impedance	20 k Ω			
Referenční charakteristiky (REFIN)				
Vstupní frekvence	10 MHz	300 MHz	dělením R aktivní	
	10 MHz	165 MHz	dělením R neaktivní	
REFIN vstupní citlivost	0,4 Vp-p	V_{CC} Vp-p		
REFIN vstupní kapacita	10 pF			
REFIN vstupní proud	$\pm 100\ \mu\text{A}$			
Nábojová pumpa (CP)				
I_{CP}				programovatelný
• Vysoký hodnota	5 mA			$R_{SET} = 4,7\ \text{k}\Omega$
• Nízká hodnota	312,5 μA			$R_{SET} = 4,7\ \text{k}\Omega$
• Absolutní přesnost	2,5 %			$R_{SET} = 4,7\ \text{k}\Omega$
VCO				
Výstup demodulovaného signálu				IBB, $\overline{\text{IBB}}$, QBB, $\overline{\text{QBB}}$,
1 dB šířka pásma				
širokopásmový mód	250 MHz			
uzkopásmový mód	50 MHz			
Bilance IQ složek				
Amplituda				
• širokopásmový mód	$\pm 0,1\ \text{dB}$			frekvence $\leq 250\ \text{MHz}$
• uzkopásmový mód	$\pm 0,1\ \text{dB}$			frekvence $\leq 33,2\ \text{MHz}$
Fáze				
• širokopásmový mód	$\pm 0,5$ stupně			frekvence $\leq 250\ \text{MHz}$
• uzkopásmový mód	$\pm 0,25$ stupně			frekvence $\leq 33,2\ \text{MHz}$
Skupinové zpoždění				
• širokopásmový mód	0,25 ns			frekvence $\leq 210\ \text{MHz}$
	0,35 ns			frekvence $\leq 250\ \text{MHz}$
• uzkopásmový mód	0,2 ns			frekvence $\leq 33,2\ \text{MHz}$
Napájení				
Napájecí napětí	3,15 V	3,3 V	3,45 V	
Napájecí proud	350 mA		440 mA	
Provozní teploty	-40 $^{\circ}\text{C}$		+ 85 $^{\circ}\text{C}$	

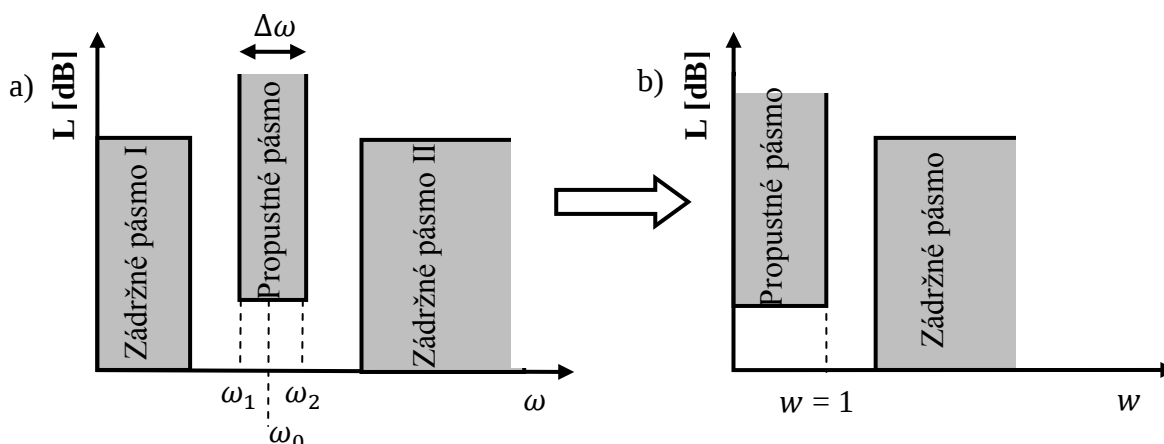
2.5 Návrh filtrů

Návrh filtru typu Pásmová propust

Na vstupu přijímače je nutné vstupní signál vyfiltrovat a propustit pouze požadované frekvenční pásmo. Protože pro náš ultra širokopásmový spoj na frekvencích UKV se šířkou pásma 200 MHz pro střední frekvence 500 MHz a 800 MHz nenabízela žádná firma filtr typu pásmové propusti, který by odpovídal našim požadavkům, rozhodl jsem se pro návrh vlastní pásmové propusti.

Postup při návrhu:

- Stanovení tolerančního schématu pásmové propusti
- Transformace na normovanou dolní propust
- Náhrada normalizované frekvence pro výpočet kapacit a indukčností
- Volba typu aproximace, řádu filtru a zjištění tabulkových hodnot pro danou aproximaci
- Výpočet jednotlivých prvků filtru
- Frekvenční analýza filtru



Obrázek 22: Toleranční schéma a) Pásmové propusti b) Normované Dolní propusti

U dolní propusti je výkonový přenos $|H(\omega)|^2$ funkcí $f\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$, kde $\frac{\omega}{\omega_c} = w$ je normalizovaná frekvence. Obecně můžeme říci, že komplexní přenosová funkce $H(\omega)$ soustavy je funkcí ryze imaginární veličiny $j\Omega$, kterou u dolnofrekvenčních propustí lze nahradit $j\Omega = jw$.

V případě pásmové propusti platí:

$$\Omega = Q \left| \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right| = \frac{|\omega^2 - \omega_0^2|}{\Delta\omega \cdot \omega} = Q \frac{\left| \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right|}{\frac{\omega}{\omega_0}} \quad 12$$

kde:

- šířka propustného pásma: $\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1$
- střední frekvence ω_0 je geometrický průměr kmitočtů ω_1 a ω_2 : $\omega_0 = \sqrt{\omega_2 \cdot \omega_1}$
- činitel jakosti zatíženého filtru: $Q = \frac{\omega_0}{\Delta \omega}$

Výpočet kapacit a indukčností

Prvky dolnofrekvenční propusti se transformovaly z cívky na sériově rezonanční obvody s rezonančním kmitočtem ω_0 a kondenzátory na paralelní rezonanční obvody se stejným rezonančním kmitočtem. Výpočet jednotlivých prvků je dán následujícími vztahy:

V sériových větvích:

$$L_n = \frac{Q Q_n R_0}{\omega_0}, \quad C_n = \frac{1}{Q Q_n R_0 \omega_0} \quad 13$$

V paralelních větvích:

$$L_m = \frac{R_0}{Q Q_m \omega_0}, \quad C_m = \frac{Q Q_m}{R_0 \omega_0} \quad 14$$

Vybraný typ aproximace: Čebyšev I - z důvodu strmého vzestupu útlumu mimo pásmo, mírné zvlnění v propustném pásmu, monotónní průběh v zádržném pásmu ([5, 19]).

Tabulka 11: Tabulkové hodnoty pro Čebyšev I, zvlnění 0,1dB, N=5,7 ([11])

Tabulkové hodnoty pro typ Čebyšev I pro prototypovou dolní propust							
0,1 dB zvlnění v propustném pásmu							
	$Q_1 (C_1, L_1)$	$Q_2 (C_2, L_2)$	$Q_3 (C_3, L_3)$	$Q_4 (C_4, L_4)$	$Q_5 (C_5, L_5)$	$Q_6 (C_6, L_6)$	$Q_7 (C_7, L_7)$
N = 5	1,1468	1,3712	1,9750	1,3712	1,1468	-	-
N = 7	1,1812	1,4228	2,0967	1,5734	2,0967	1,4228	1,1812

Výpočet hodnot kapacit a indukčností dostaneme dosazením tabulkových hodnot pro vybraný typ aproximace (viz Tabulka 10 pro typ Čebyšev I) do vztahů 13 a 14.

Výsledné hodnoty pro návrh pásmové propusti pro propustné pásmo 700 MHz – 900 MHz jsou uvedeny v Tabulce 11 pro řád filtru N=5 a v Tabulce 12 pro řád filtru N = 7.

Tabulka 12: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 700 MHz – 900 MHz, N=5

Hodnoty jednotlivých cívek a kondenzátorů pro N = 5						
	L1	L2	L3	L4	L5	R0
L [nH]	45,63	1,8424	78,583	1,824	45,63	50 Ω
	C1	C2	C3	C4	C5	Rs
C [pF]	0,88115	21,823	0,51165	21,823	0,88115	50 Ω

Tabulka 13: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 700 MHz – 900 MHz, N=7

Hodnoty jednotlivých cívek a kondenzátorů pro N = 7								
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	R0
L[nH]	46,998	1,7756	83,425	1,6056	83,425	1,7756	46,998	50 Ω
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Rs
C [pF]	0,85549	22,645	0,48195	25,041	0,48195	22,645	0,85549	50 Ω

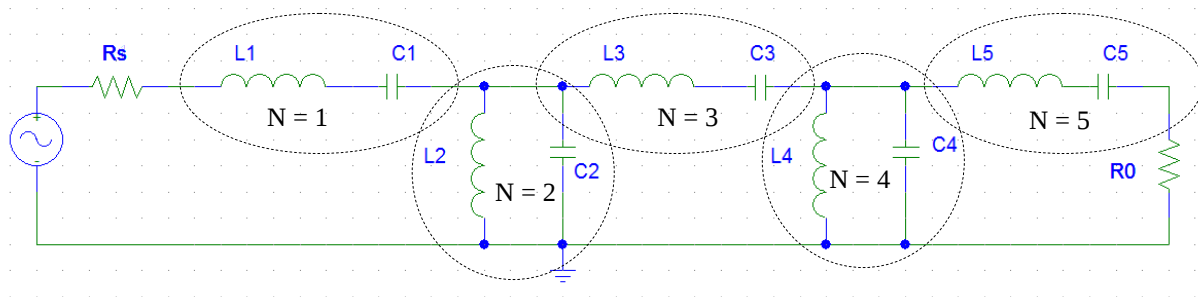
Výsledné hodnoty pro návrh pásmové propusti pro propustné pásmo 400 MHz – 600 MHz jsou uvedeny v Tabulce 14 pro řád filtru N=5 a v Tabulce 15 pro řád filtru N = 7.

Tabulka 14: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 400 MHz – 600 MHz, N=5

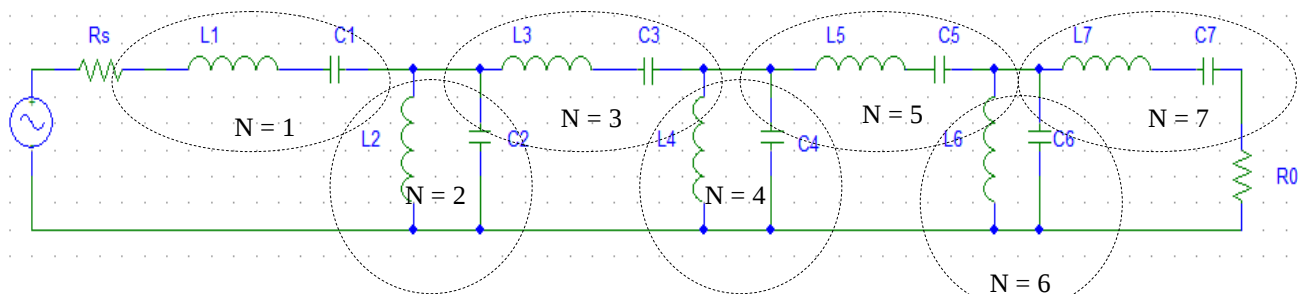
Hodnoty jednotlivých cívek a kondenzátorů pro N = 5						
	L1	L2	L3	L4	L5	R0
L [nH]	45,63	4,8362	78,583	4,8362	45,63	50 Ω
	C1	C2	C3	C4	C5	Rs
C [pF]	2,313	21,823	1,3431	21,823	2,313	50 Ω

Tabulka 15: Hodnoty kapacit a indukčností PP v pásmu 400 MHz - 600 MHz, N=7

Hodnoty jednotlivých cívek a kondenzátorů pro N = 7								
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	R0
L[nH]	46,998	4,6608	83,425	4,2147	83,425	4,6608	46,998	50 Ω
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Rs
C [pF]	0,85549	22,645	0,48195	25,041	0,48195	22,645	0,85549	50 Ω



Obrázek 19: Příčkový filtr PP se lichým počtem stupňů ($N = 5$)



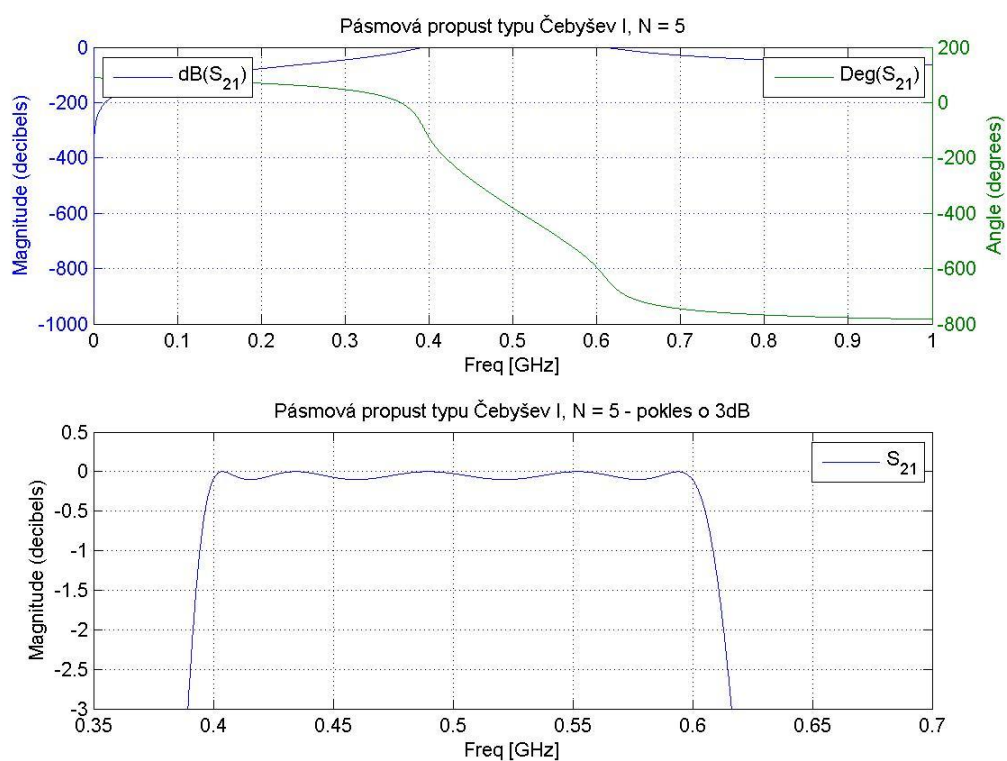
Obrázek 20: Příčkový filtr PP se lichým počtem stupňů ($N = 7$)

Grafické znázornění příčkové filtru s lichým počtem stupňů je znázorněno na Obrázku 19 pro počet stupňů $N = 5$ a na Obrázku 20 pro počet stupňů typ $N = 7$.

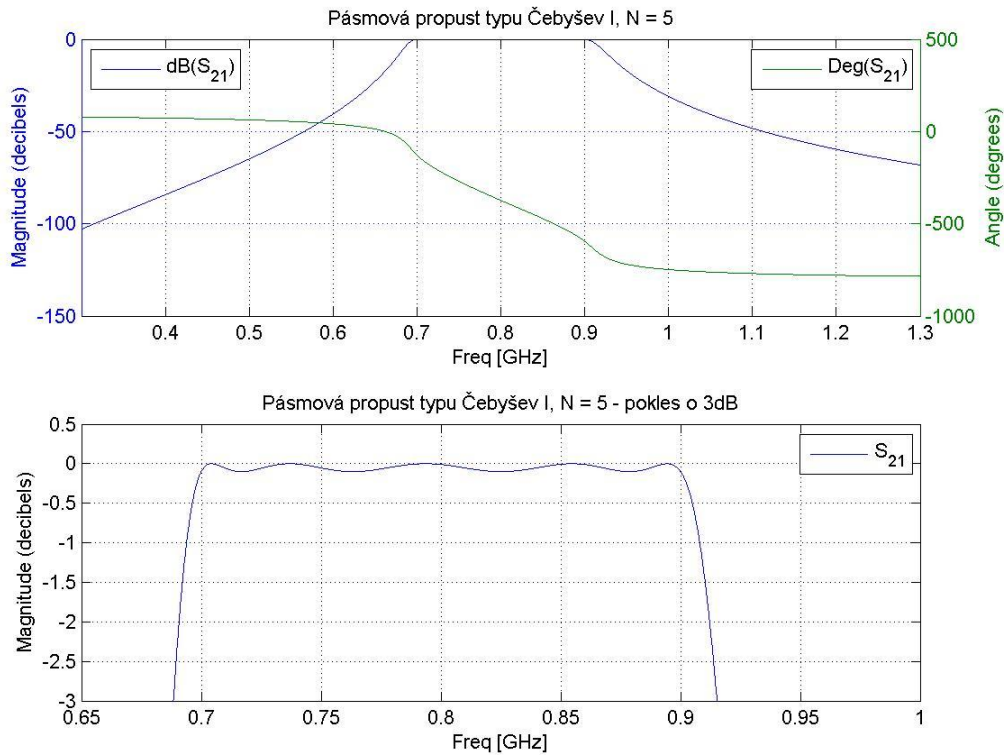
Na Obrázku 23 a 24 jsou vyneseny přenosové charakteristiky (amplitudový a fázový přenos) navržené pásmové propusti typu Čebyšev I pro počet stupňů $N = 5$ a to pro frekvenční pásma 400 MHz – 600 MHz a pro 700 MHz – 900 MHz. Zvlnění v propustném pásmu je 0,1 dB. Pro první variantu je pokles o 3 dB na frekvencích 389 MHz a 616 MHz, pro druhou variantu je na frekvencích 688 MHz a 915 MHz.

V příloze B jsou uvedeny další tabulkové hodnoty pro různé aproximace. Nejlepšího průběhu bylo dosaženo při použití aproximace Čebyšev I.

Na sestavení filtrů byly nakoupeny odpovídající součástky a navrženo mikropáskové vedení o požadovaných vlastnostech, ale z časových důvodů se nepodařilo filtry dokončit a proměřit před odevzdáním této práce.



Obrázek 23: Frekvenční charakteristika navržené PP v pásmu 400 MHz - 600 MHz



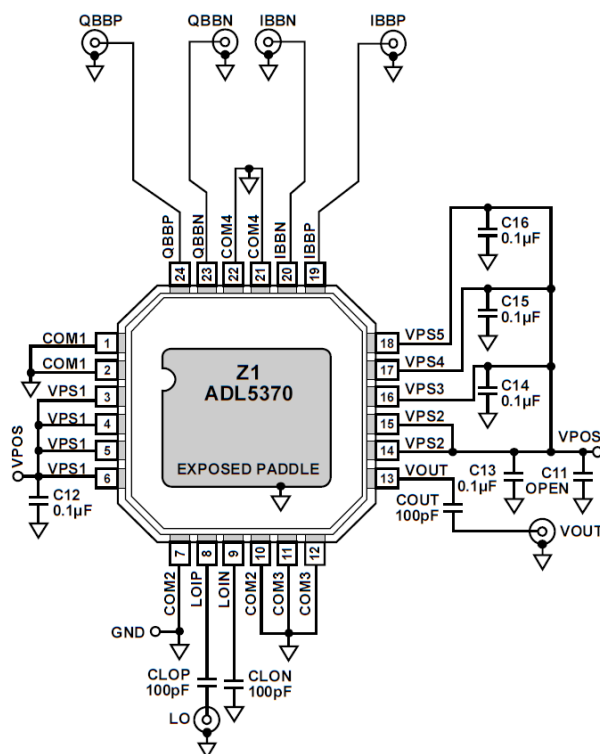
Obrázek 24: Frekvenční charakteristika navrhnuté PP v pásmu 700MHz - 900MHz

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Měření parametrů modulátoru

Analog Devices - ADL 5370 Quadrature modulator 300 MHz to 1000 MHz

Zapojení modulátoru ADL5370 na vývojové desce je zobrazeno na Obrázku 25 a na Obrázku 26 je fotografie vývojové desky.

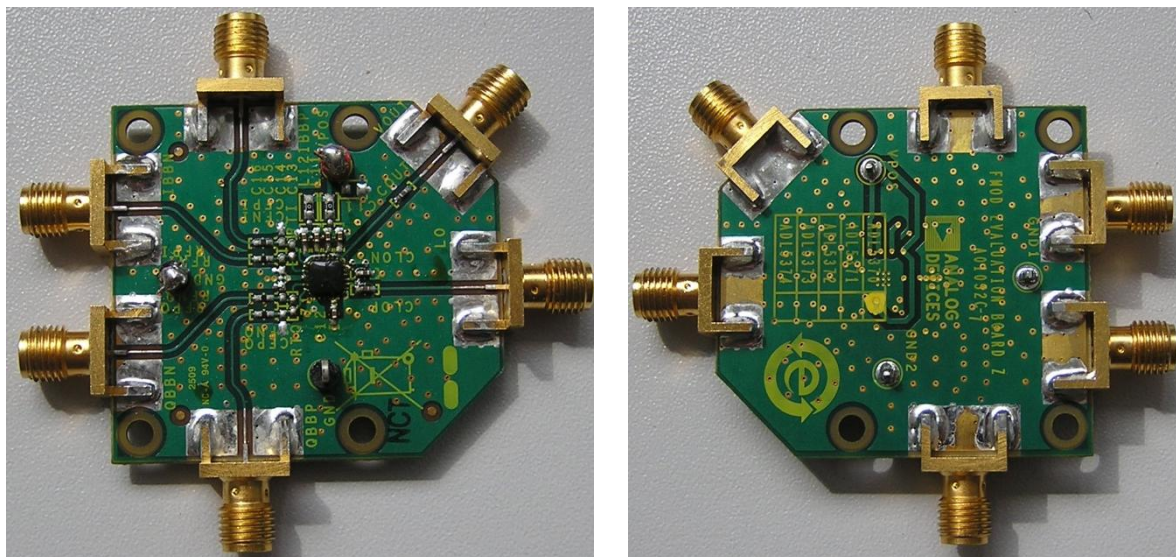


Obrázek 25: ADL5370 - základní zapojení [14]

Vstupní signál v základním pásmu: Vstupní brány pro signál v základním pásmu jsou QBBP, QBBN a IBBP, IBBN a doporučené napájení je diferenčním signálovým generátorem (nebo generátorem IQ složek) s úrovní 1,4V p-p (700 mV na každé dvojici)

Vstup LO: Vstup místního oscilátoru je na pinu LOIP a je připojen přes blokovací kondenzátor, který propouští pouze dynamické změny a zadržuje stejnosměrné napětí. Doporučená úroveň výkonu je 0 dBm a může být navýšena až na 7 dBm pro vylepšení šumových vlastností modulátoru, ale poté dochází ke zhoršení při potlačení postranních pásem. Úroveň výkonu může být i pod 0 dBm, ale má to za následek mírné zvýšení šumu v modulátoru.

RF výstup: Namodulovaný vysokofrekvenční signál je dostupný na pinu VOUT (Pin 13). Tento pin by měl být také oddělen vazebním kondenzátorem. Výstup je přizpůsoben na impedanci 50Ω ([14]).



Obrázek 26: ADL 5370 - vývojová deska (TOP, BOTTOM)

Vyhodnocení:

Použité přístroje:

Signálový generátor: Agilent technologies 81160A, 330 MHz – 500 MHz, Pulse Function Arbitrary Generator

Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSH 8, Spectrum Analyzer, 100 kHz... 8 GHz

Laboratorní zdroj: Diametral R124R50E

Signálový generátor: Rohde & Schwarz SMB 100A, Signal Generator, 100 kHz...20 GHz

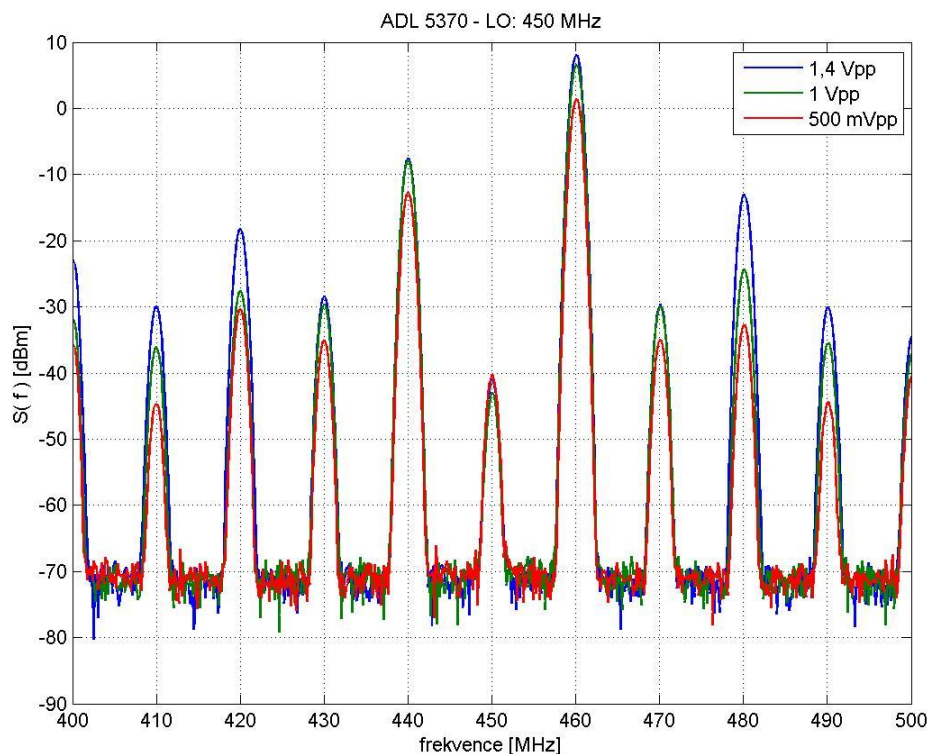
Měřič výkonu: AVG POWER SENZOR FSH-Z1

Generátor IQ složek: Rohde & Schwarz SMBV 100A, Vector signal generator

Sestavení pracoviště je obdobné, jak je uvedeno na Obrázku 56 a 57, s jediným rozdílem, že výstup modulátoru byl místo do antény přiveden na vstup spektrálního analyzátoru.

Modulátor provádí násobení vstupního signálu ω_1 o nízkém kmitočtu, se signálem místního oscilátoru o několikanásobně vyšším kmitočtu ω_0 a tím posun vstupního signálu ve spektru o ω_0 . Na výstupu jsou pak produkty kmitočtů ω_1 a ω_0 . Žádaný výstupní produkt (1,1) je na kmitočtu $\omega_1 = \omega_1 + \omega_0 = \text{HPP}$. Zrcadlový produkt (-1,1) na kmitočtu $\omega_1 - \omega_0 = \text{DPP}$ je většinou nežádoucí. Vyšší produkty (1,2), (1,3) jsou již vysoko a stačí je potlačit filtrem BPF.

Základní parametry byly ověřovány při vstupním sinusovém signálu o frekvenci 10 MHz a amplitudě 500 mVpp, 1 Vpp a 1.4 Vpp. Frekvence místního oscilátoru byla nastavena na 450 MHz s úrovní 0 dBm. (viz Obrázek 27)



Obrázek 27: ADL 5370 – spektrum vf signálu modulovaného jednou nosnou

Tabulka 16: ADL 5370 – hodnoty jednotlivých produktů ve spektru

Modulátor ADL 5370, LO = 450 MHz, vstupní sin signál o $f = 10$ MHz			
Produkt ($n \cdot \omega_1 + m \cdot \omega_0$)	500 mVpp	1 Vpp	1,4 Vpp
(1,1)	1,5 dBm	6,7 dBm	8,2 dBm
(-1,1)	-12 dBm	-7,8 dBm	-7,5 dBm
(2,1)	-34,5 dBm	-29,7 dBm	-29,4 dBm
(-2,1)	-34,8 dBm	-29,5 dBm	-28,2 dBm
(3,1)	-32,5 dBm	-24,12 dBm	-13 dBm
(-3,1)	-30,1 dBm	-27,4 dBm	-18,1 dBm
(0,1)	-39,4 dBm	-42 dBm	-40,2 dBm

Z výsledků je vidět, že se zvětšující amplitudou vstupního signálu se úroveň žádaného výstupního produktu (1,1) zvětšuje. Dochází, ale také ke zvětšení úrovně postranních pásem. Potlačení nosné je se pohybuje kolem -40 dBm a potlačení postranních pásem kolem -30 dBm.

Průměrný výkon dodaný modulátorem:

Výkon modulátoru se zvětšuje při zvětšující se amplitudě modulačního signálu, maximální amplituda na vstupu bran IBBP, IBBN, QBBN, QBPP je 2V.

Výsledky výkonu modulátoru pro sinusový signál o frekvenci 10 MHz a různých vstupních amplitudách jsou uvedeny v Tabulce 17.

Tabulka 17: ADL 5370 - Výkonová bilance pro různé amplitudy vstupního sinusového signálu, při různých frekvencích místního oscilátoru

Amplituda / Frekvence LO	500 mVpp	1 Vpp	1,4 Vpp
LO: 300 MHz:	2,90 dBm	7,56 dBm	8,64 dBm
LO: 400 MHz:	2,85 dBm	7,32 dBm	8,49 dBm
LO: 500 MHz:	2,36 dBm	7,16 dBm	8,39 dBm
LO: 600 MHz:	2,18 dBm	7,03 dBm	8,33 dBm
LO: 700 MHz:	1,96 dBm	6,87 dBm	8,23 dBm
LO: 800 MHz:	1,68 dBm	6,66 dBm	8,08 dBm
LO: 900 MHz:	1,34 dBm	6,36 dBm	7,86 dBm

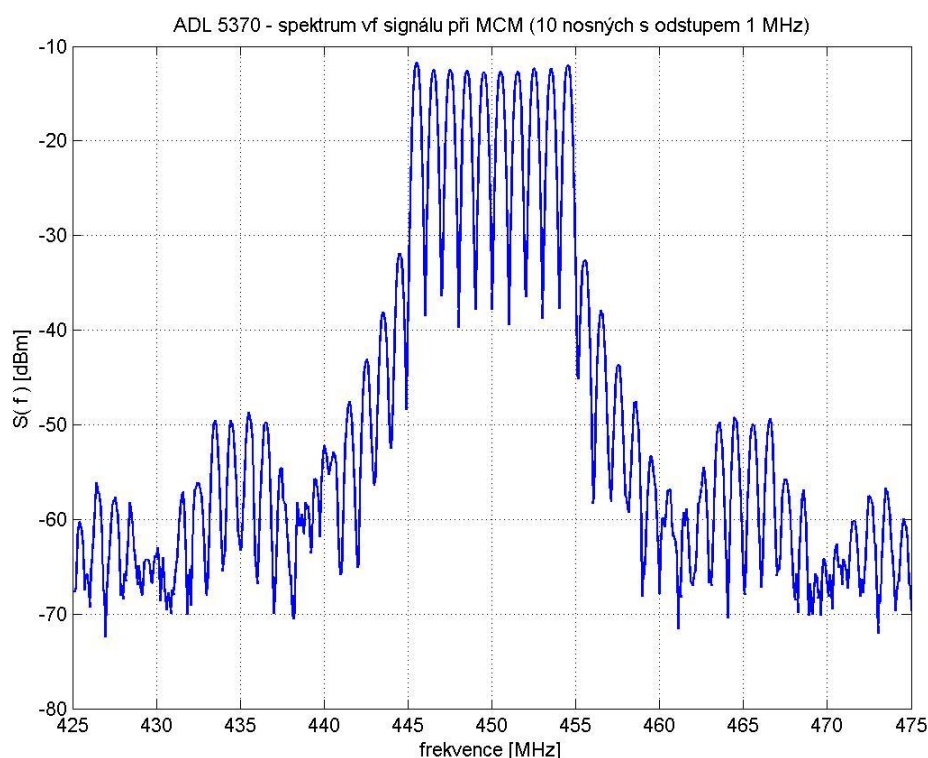
Na hodnotách v Tabulce 17 je vidět, že průměrný výkon směrem k vyšším frekvencím LO mírně klesá, to je z velké části zapříčiněno frekvenční charakteristikou kabelu, kterým byl připojen výstup modulátoru k měřiči výkonu.

Při použití modulace s více nosnými:

Výsledky výkonu modulátoru pro širokopásmový signál, o počtu 10 subnosných s ekvidistančním rozestupem 5 MHz jsou uvedeny v Tabulce 18.

Výkon jednotlivých nosných byl nastaven na hodnotu 0 dB, nastavením lze výkon měnit v rozmezí 0 dB až – 80 dB.

Větší šířky pásma respektive větší rozestupy jednotlivých nosných jsou omezeny vzorkovací frekvencí přístroje. Vektorový generátor R&S SMBV100A má omezenou šířkou pásma generovaného signálu na 60 MHz.



Obrázek 28: ADL 5370 - Spektrum vyslaného vř signálu, 10 nosných s odstupem 1 MHz

Tabulka 18: ADL 5370 - výkonová bilance širokopásmového signálu

Modulace více nosným, R&S SMBV100A, generátor IQ složek						
Počet/rozestup (Šířka pásma)	10/500kHz (5 MHz)	10 / 1MHz (10 MHz)	10 / 5MHz (50 MHz)	30/1,5MHz (45 MHz)	60/900 kHz (54 MHz)	80/700 kHz (56 MHz)
LO: 300 MHz	-1,16 dBm	-0,98 dBm	-1,22dBm	-5,95 dBm	-9,07 dBm	-10,38 dBm
LO: 400 MHz	-1,36 dBm	-1,19 dBm	-1,42dBm	-6,16 dBm	-9,27 dBm	-10,58 dBm
LO: 500 MHz	-1,58 dBm	-1,41 dBm	-1,65dBm	-6,38 dBm	-9,50 dBm	-10,80 dBm
LO: 600 MHz	-1,80 dBm	-1,64 dBm	-1,87dBm	-6,61 dBm	-9,72 dBm	-11,01 dBm
LO: 700 MHz	-2,06 dBm	-1,90 dBm	-2,13dBm	-6,87 dBm	-9,98 dBm	-11,27 dBm
LO: 800 MHz	-2,36 dBm	-2,21 dBm	-2,43dBm	-7,16 dBm	-10,28dBm	-11,57 dBm
LO: 900 MHz	-2,70 dBm	-2,55 dBm	-2,77dBm	-7,50 dBm	-10,61 dBm	-11,91 dBm

Tabulka 19: Přepočet výkonu na jednu nosnou a rozdíl ve výkonu pro LO 300 MHz a 900 MHz

Přepočet výkonu na jednu nosnou pro LO 300 MHz a 900 MHz				
Počet nosných	10	30	60	80
LO: 300 MHz	-0,122 dBm	-0,198 dBm	-0,151 dBm	-0,129 dBm
LO: 900 MHz	-0,277 dBm	-0,25 dBm	-0,177 dBm	-0,179 dBm
Celkový rozdíl výkonu mezi LO: 300 MHz a 900 MHz	-1,55 dB	-1,55dB	-1,54 dB	-1,53 dB

Na výstupní výkon má znatelný vliv celkový počet subnosných a frekvenční charakteristika kabelu, kterým byl připojen výstup modulátoru k měřiči výkonu, jehož útlum směrem k vyšším frekvencím roste.

Rozdíl ve výkonu pro jednotlivé počty subnosných pro frekvence LO 300 a 900 MHz vyšel kolem hodnoty -1,5 dB, což odpovídá útlumu kabelu, který na frekvenční charakteristice pro frekvenci 300 MHz měl úroveň -0,5 dB a na 900 MHz -2 dB. Přepočet výkonu na jednu nosnou pro nastavení LO na 300 MHz a 900 MHz vychází v rozmezí -0,12 dBm až -0,2 dBm, což odpovídá přibližně konstantnímu rozložení výkonu mezi jednotlivé nosné napříč různým počtem generovaných subnosných.

3.2 Měření parametrů demodulátoru

Analog Devices ADRF 6850 100 MHz to 1000 MHz Integrated Broadband Receiver

Integrovaný přijímač ADRF 6850 můžeme rozdělit do následujících základních bloků:

- PLL syntezátor a VCO
- Kvadrurní demodulátor
- Zesilovač s ziskem řízeným napětím (VGA)

PLL syntezátor a VCO: Fázový závěs se skládá z N- dělicího frekvenčního syntezátoru, který umožňuje rozlišení menší než 1 Hz v celém pásmu. Taktéž je integrován napětím řízený oscilátor (VCO), který se skládá ze tří oscilátorů, každý s 16 překrývajícími se pásmy, které umožňují výstupní frekvenci v rozmezí 2000 MHz až 4000 MHz. Registrem CR 28 nastavujeme dělení RFDIV (1, 2, 4, 8), které rozšiřuje frekvenční rozsah od 250 MHz (2000 MHz/8) do 4000 MHz (4000 MHz/1). Dalším dělením dostáváme plný rozsah LO od 100 MHz do 1000 MHz. Tímto způsobem pokryjeme široké pásmo kmitočtů bez velké citlivosti VCO.

Kvadrurní demodulátor má nastavitelné výstupní filtry pro úzkopásmové nastvení v rozmezí od 30 MHz do 50 MHz a pro širokopásmové nastavení filtr pro 250 MHz.

Zesilovač s proměnným ziskem (VGA): Rozsah zesilovače je přibližně 60 dB a zesílení je nastavováno napětím VGAIN. Pro zisk 0 dB nastavením VGAIN na 0 V a pro zisk 60 dB na 1,5 V ([13]).

Vyhodnocení:

Použité přístroje:

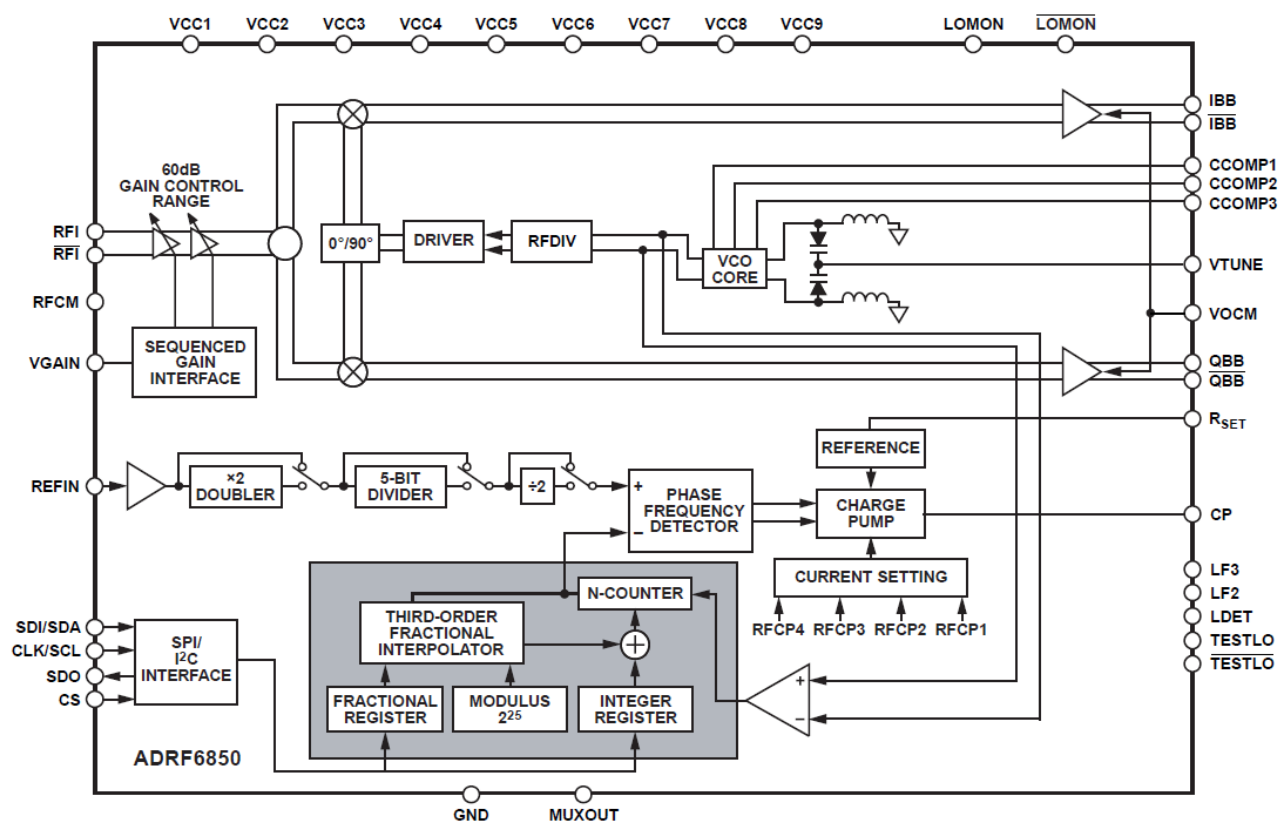
Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSL 3 Spectrum analyzer, 9 kHz... 3 GHz.

Osciloskop: Rohde & Schwarz RTO 1014

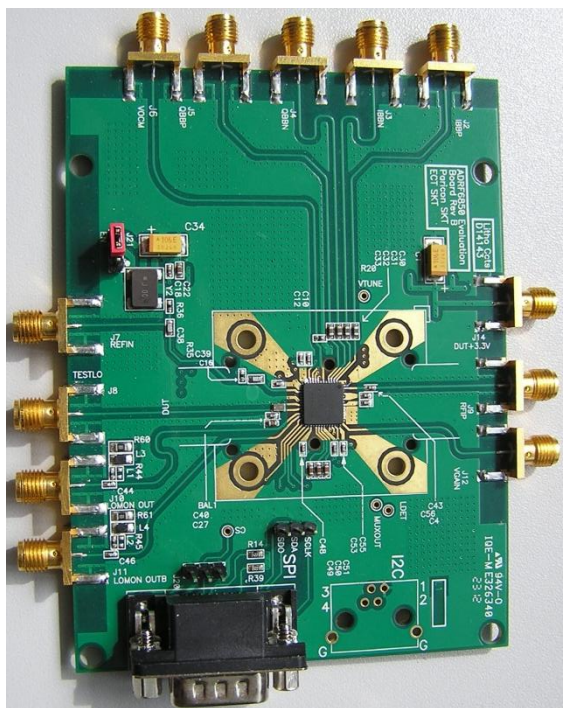
Laboratorní zdroj: Diametral P230R51D

PC: DELL s SPI interfece

Sestavení pracoviště je obdobné, jak je uvedeno na Obrázku 60, 61. Jen s rozdílem, že signál je přiveden přímo z výstupu modulátoru, nikoliv z přijímací antény.

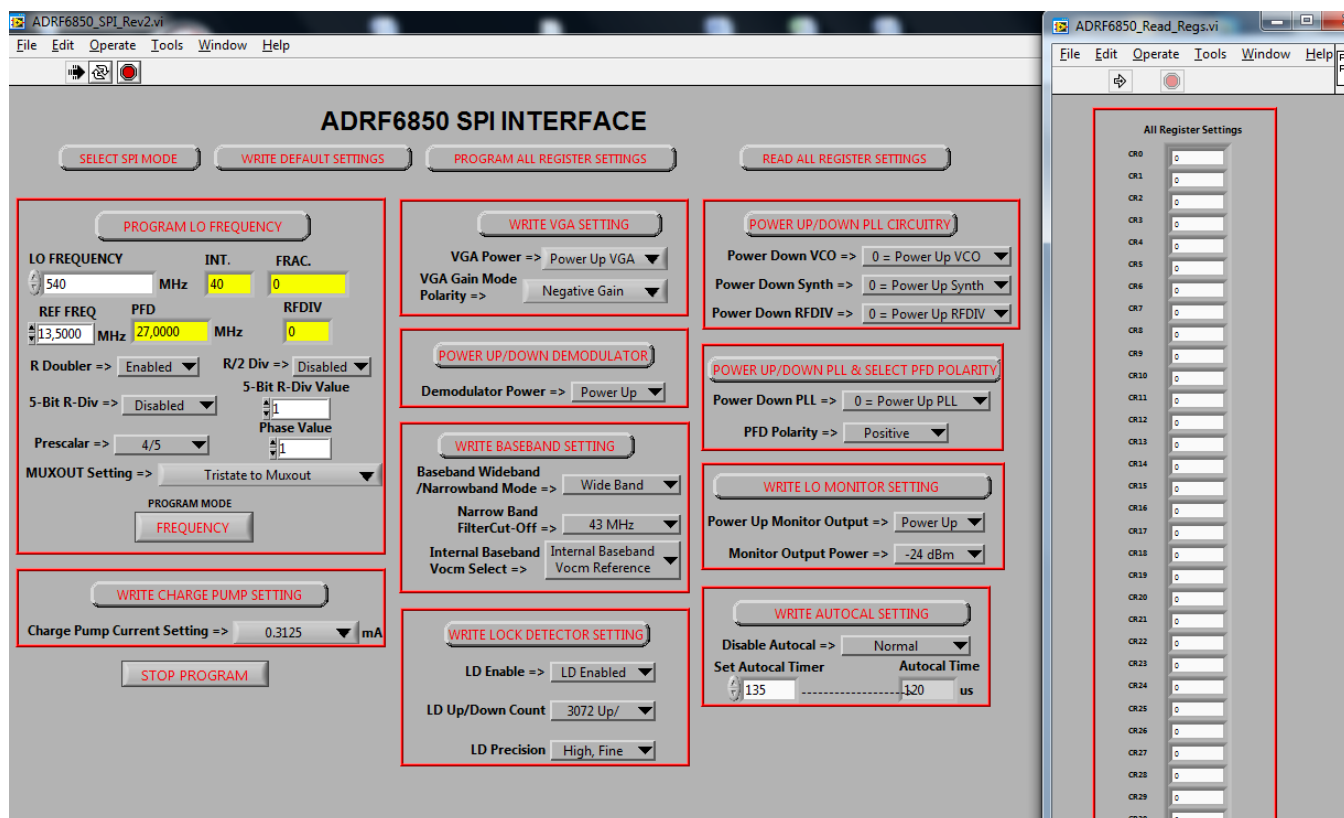


Obrázek 29: ADRF6850 - blokové schéma [13]



Obrázek 30: ADRF 6850 - vývojová deska (TOP, BOTTOM)

Všechny parametry přijímače ADRF 6850 jsou nastavovány zapsáním do jednoho z 31 registrů přes rozhraní SPI. Firma Analog Devices k vývojové desce dodává uživatelské rozhraní pro snadné nastavení do registru. Uživatelské rozhraní je zobrazeno na Obrázku 31.



Obrázek 31: ADRF 6850 - SPI interface

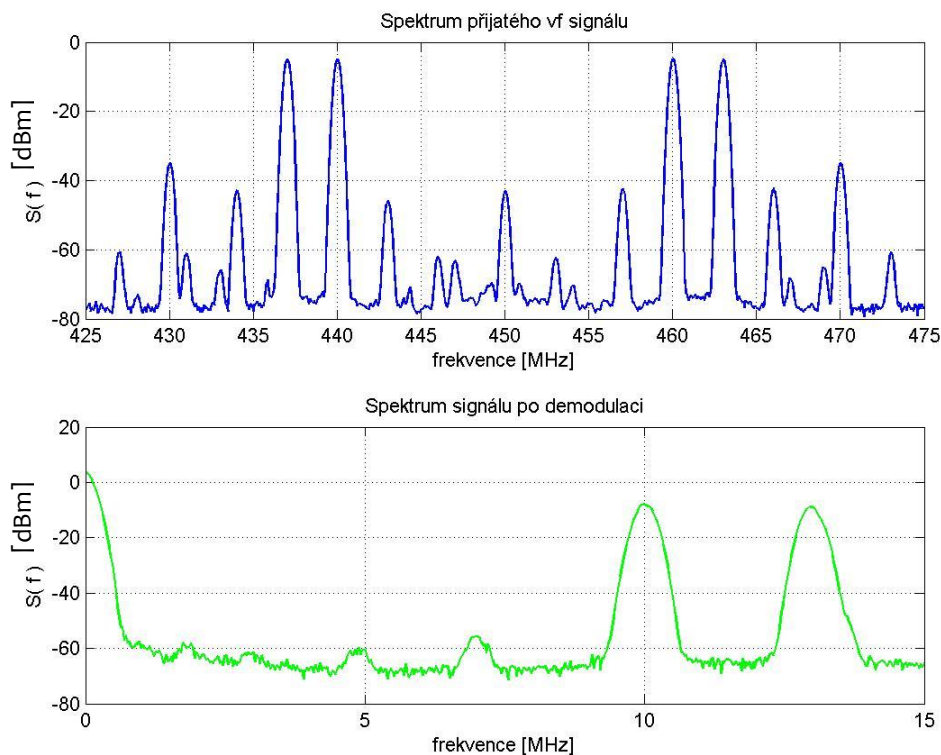
Demodulátor byl proměřován pro demodulaci sinusového signálu a pro širokopásmový signál. Nejdříve byly signály namodulovány na nosnou vlnu a výstup modulátoru byl připojen přímo na vstup demodulátoru, dále byly do této trasy postupně přidávány útlumové členy 20 dB a 30 dB.

Situace pro sinusový signál

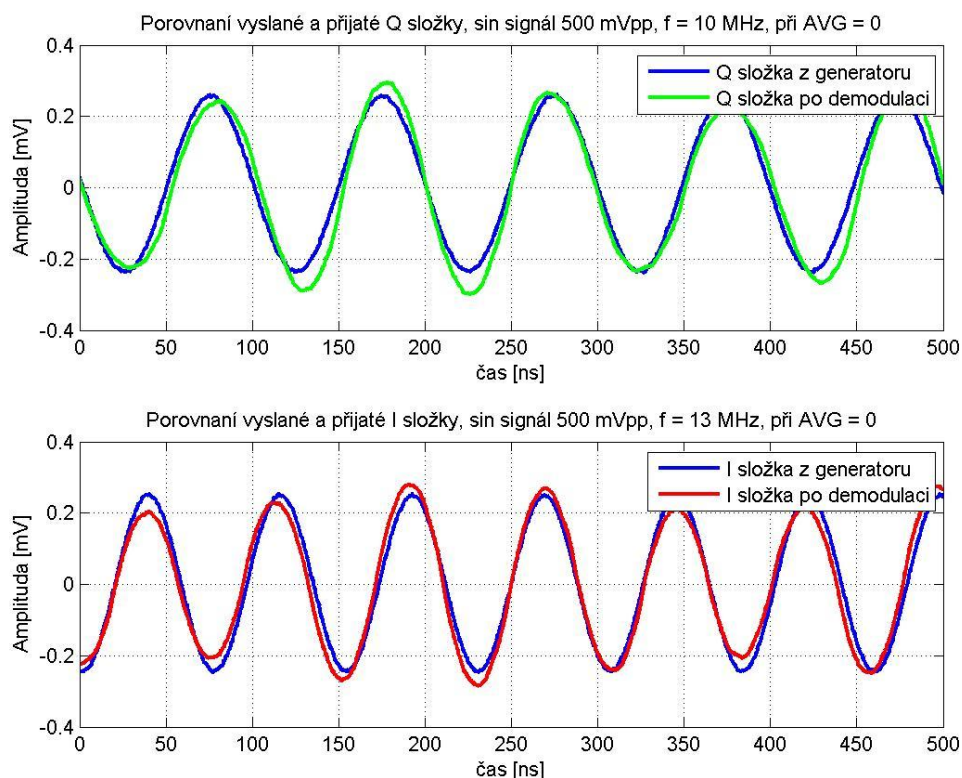
Modulátorem ADL 5370 byly I, Q složky namodulovány na vf nosnou vlnu o frekvenci 450 MHz a přivedeny na vstup demodulátoru. I a Q složky byly vytvořeny pomocí generátoru Agilent a jsou to sinusové signály o amplitudě 500 mVpp a frekvencích 10 MHz a 13 MHz. Jak na vysílací, tak na přijímací straně nebylo použito zesilovačů a zisk

demodulátoru byl nastaven na 0 dB (VGA = 0 V). Zobrazení spektra přijatého a demodulovaného signálu je na Obrázku 32.

Při měření byl výstup modulátoru přiveden přímo na vstup demodulátoru, zkreslení signálu bylo tedy minimální a nedocházelo ke ztrátám výkonu vlivem vyzařování energie anténou do prostoru. Na Obrázku 33 je porovnání I a Q složky z generátoru s I a Q složkou získanou demulací vysokofrekvenčního signálu a je vidět, že složky jsou téměř shodné.

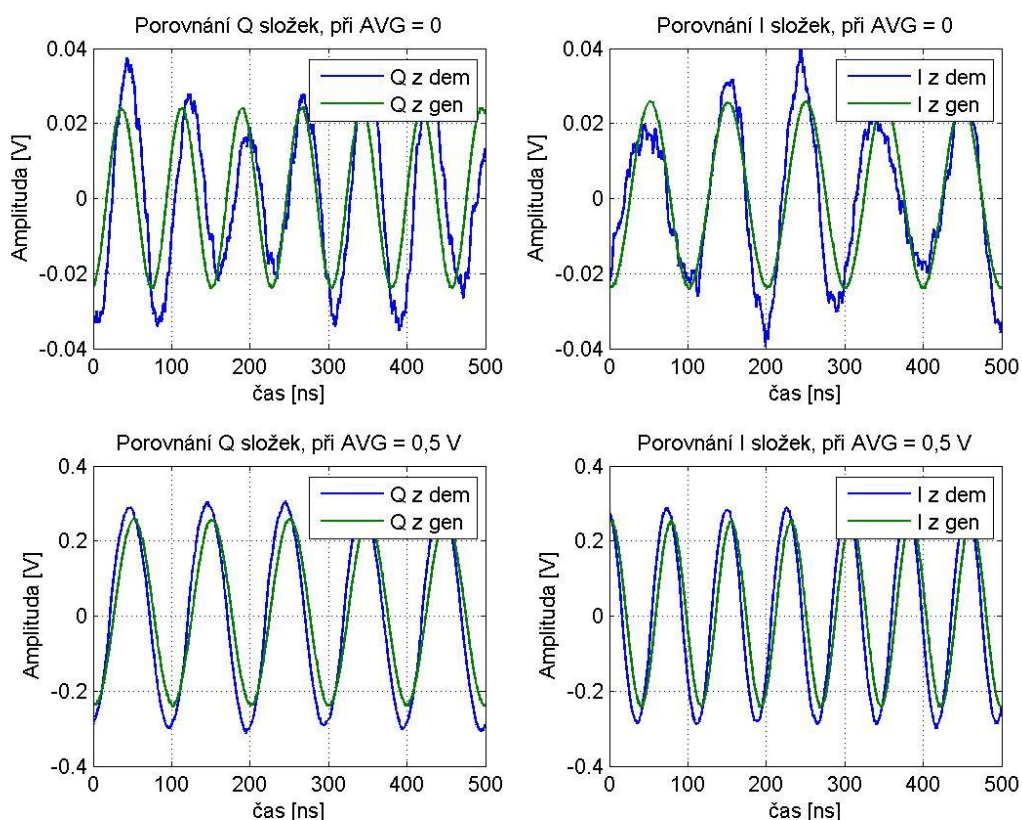


Obrázek 32: Spektrum přijatého a demodulovaného signálu



Obrázek 33: ADRF 6850 - porovnání vyslané a přijaté I a Q složky

Následně byl mezi trasu modulátoru a demodulátoru vložen útlumový člen zeslabující signál o 20 dB. Výsledek je zobrazen na Obrázku 34, kde na horních dvou grafech jsou demodulované I a Q složky o malém rozkmitu 70 mV a I a Q složky z generátoru o 10x menší amplitudě, pro lepší porovnání zkreslení složek. Ve spodních dvou grafech jsou porovnány demodulované I a Q složky, ale zesílené o 20 dB, dosaženého nastavením VGA na 0,5 V s I a Q složkami z generátoru o amplitudě 500 mVpp. Výkon demodulovaných IQ složek bez zesílení přijímaného signálu je -4 dBm, po zesílení 16 dBm. Po zesílení je demodulace složek I a Q velice dobrá a dostáváme téměř totožný signál, jako který jsme vysílali.

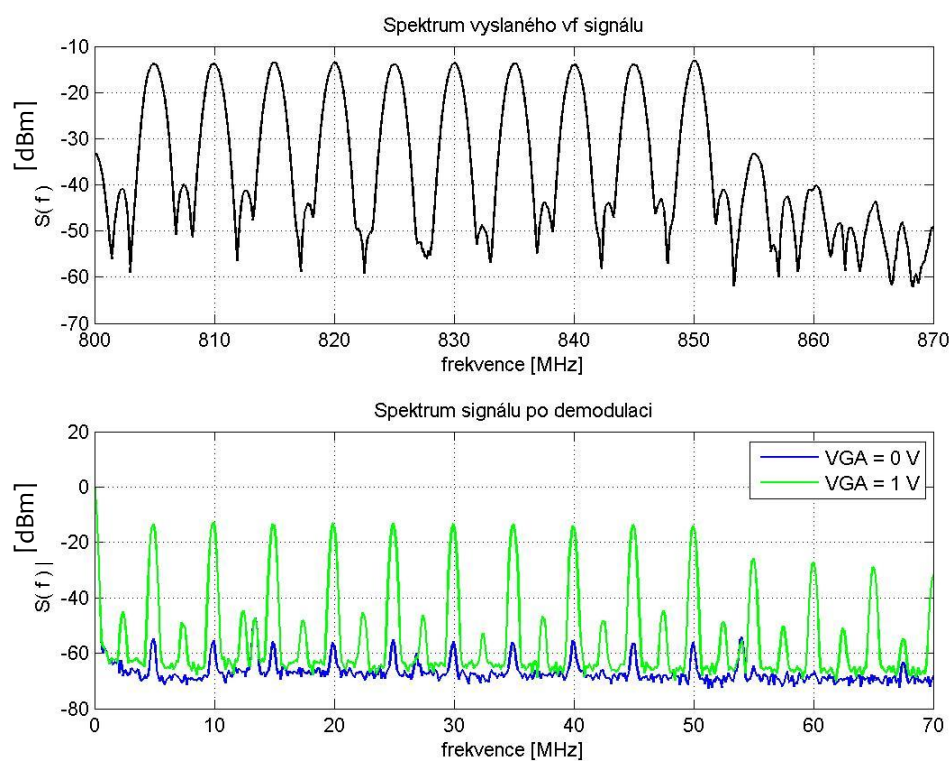


Obrázek 34: Porovnání I, Q složek při AVG = 0 V a 0,5 V.

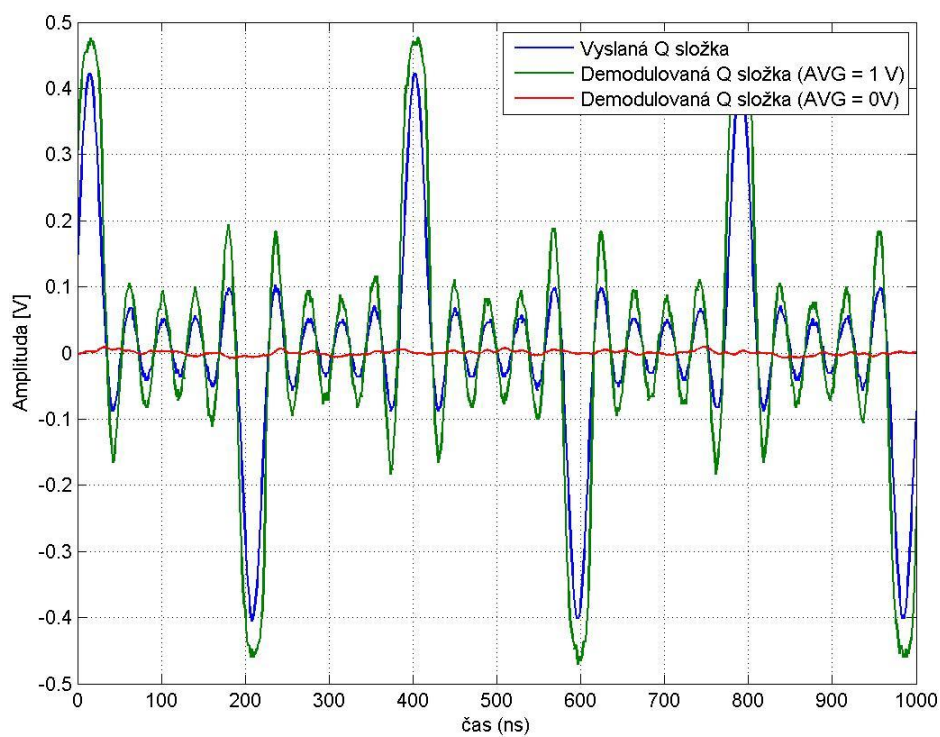
Situace pro širokopásmový signál:

Výsledek demodulace pro širokopásmový signál, 10 nosných s ekvidistantním rozestupem 5 MHz (šířka pásma 50 MHz). Na trase mezi modulátorem a demodulátorem vložen útlumový člen zeslabující signál o 30 dB. Na obrázku 36 jsou porovnány Q složky signálu, vyslaná a přijatá Q složka, před a po zesílení o 33 dB, při nastavení VGA = 1V. Výkon demodulované Q složky bez zesílení je -18 dBm, po zesílení 15 dBm a výkon Q složky z generátoru je 13 dBm.

Na Obrázku 35 je zobrazeno změřené spektrum vyslaného a demodulovaného širokopásmového signálu. Na spektru vyslaného signálu je vidět, že jednotlivé subnosné jsou na stejné úrovni, nedochází tedy k většímu zkreslení signálu modulátorem. Na spektru demodulovaného signálu je patrné, že útlumový člen zeslabuje jednotlivé subnosné s téměř konstantní hodnotou. Dále na spektru demodulovaného signálu se objevují zesílené harmonické parazitní kmitočty, ty jsou vytvářeny již při modulaci a pro zlepšení by bylo zapotřebí použít filtru a na vstupu demodulátoru je odfiltrovat.



Obrázek 35: Spektrum vyslaného a přijatého širokopásmového signálu



Obrázek 36: Porovnání Q složek vyslaného a přijatého širokopásmového signálu

Závěr: Různým nastavením napěťové úrovně zesilovače (VGA) se přijímaný signál zesiluje od 0 dB při 0V až na hodnotu 60 dB při nastavení 1,5 V.

3.3 Měření parametrů zesilovačů

U zesilovačů ADL 5324, ADL 5601 a ADL 5511 byly změřeny základní parametry, které nás nejvíce zajímají a ovlivňují plánování UWB spoje. U každého zesilovače byl změřen jeho zisk a dále parametry S11 a S22.

Použité přístroje:

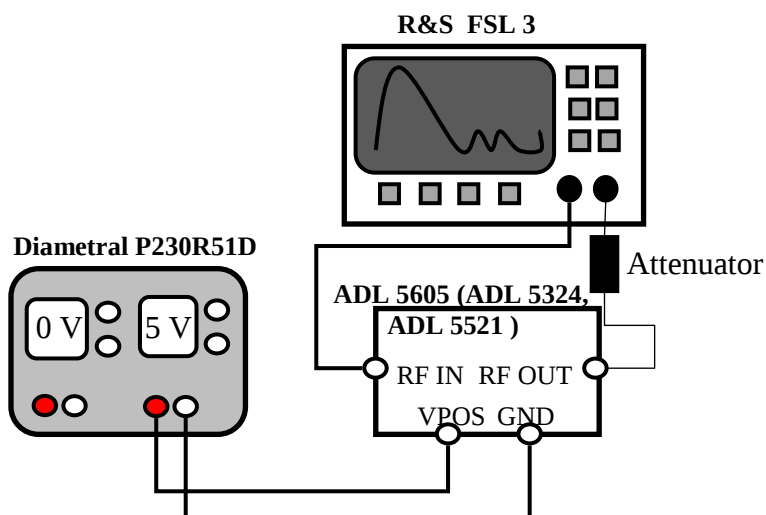
Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSL 3 Spectrum analyzer, 9 kHz... 3 GHz.

Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSH 8, Spectrum analyzer, 100 kHz... 8GHz.

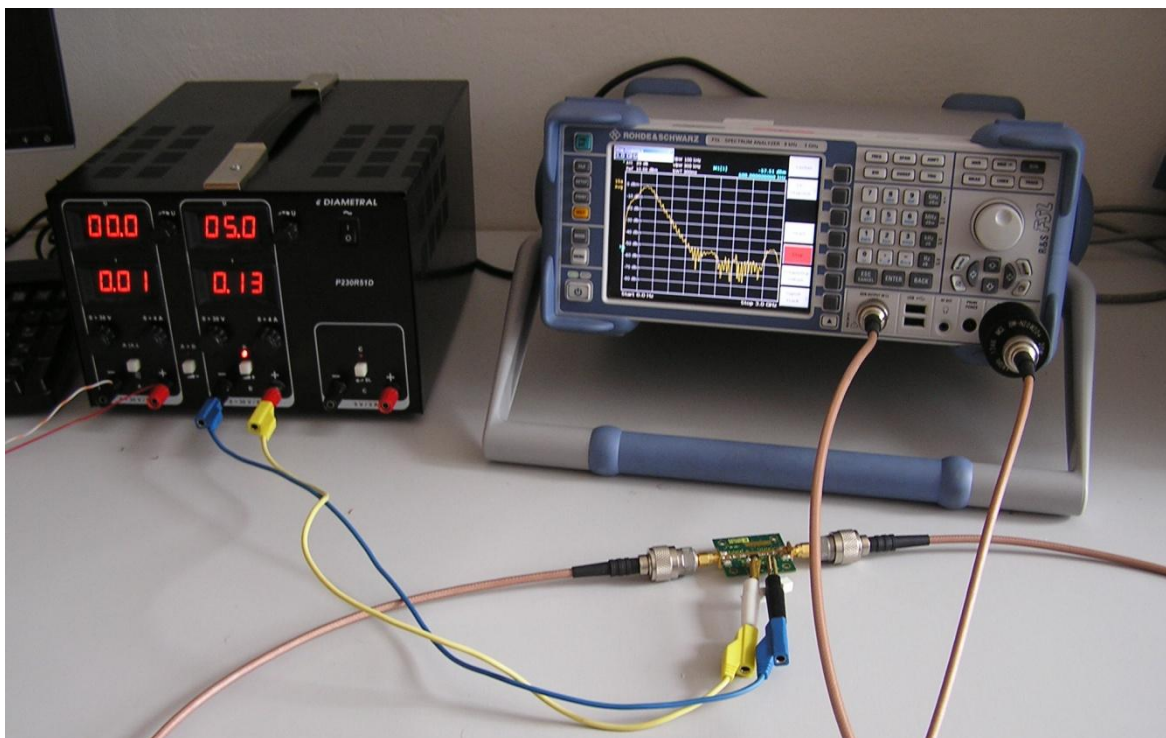
Laboratorní zdroj: Diametral P230R51D

Měření zesílení: zesílení je důležitý parametr, který nám udává v jakém poměru je výstupní signál větší, nežli je signál vstupní. Dostatečné zesílení je důležité jak pro vysílací tak i pro přijímací stranu. Obrázek pracoviště a schéma zapojení jsou uvedeny na Obrazcích 38 a 37.

Nejprve byla změřena frekvenční závislost trasy (kabely s útlumovým členem), poté byl do cesty zapojen zesilovač, na který bylo přivedeno napájecí napětí. Zisk byl vypočítán jako rozdíl frekvenční závislosti zesilovače s přivedeným napájecím napětím a frekvenční závislosti trasy.



Obrázek 37: Schéma měření zesílení zesilovačů



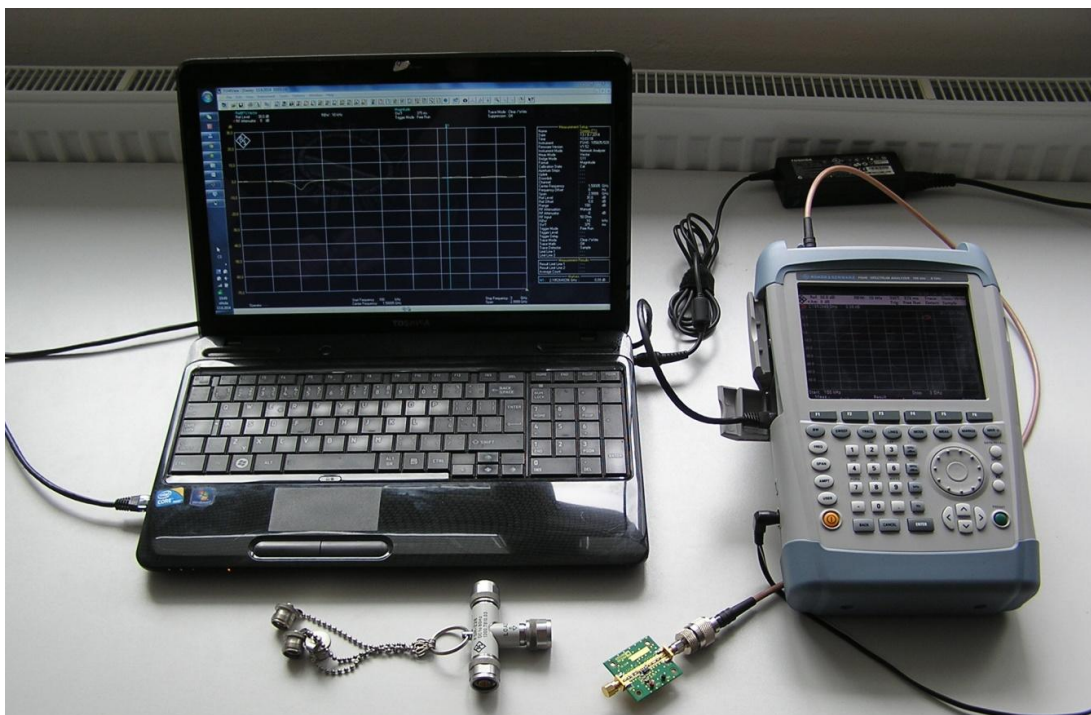
Obrázek 38: Sestavené pracoviště pro měření zesílení

Zesílení bylo měřeno přes útlumový člen (attenuator), který výkon zeslabil o 20 dB, z důvodu maximálního dodávaného vstupního výkonu do spektrálního analyzátoru, který je maximálně +30 dBm.

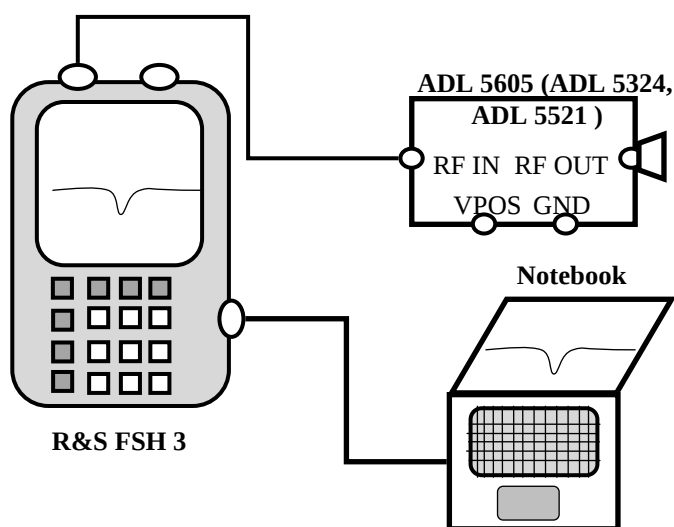
Měření parametrů S11 a S22: U rozptylových parametrů zesilovačů nás zajímá především velikost odrazu výkonu od jednotlivých bran. K tomu nám stačí pouze skalární měření parametrů zesilovače $|S_{11}|$ a $|S_{22}|$, kde parametr S11 charakterizuje koeficient odrazu od brány 1, která je vstupem RF signálu, při charakteristické impedanci vstupu $50\ \Omega$. Parametr S22 charakterizuje koeficient odrazu od brány 2, která je výstupem zesíleného RF signálu, při charakteristické impedanci výstupu $50\ \Omega$.

Měření bylo prováděno na přístroji R&S FSH 8, který přímo umožňuje měření parametrů S11 a S22, nejprve bylo potřeba přístroj kalibrovat pomocí kalibrační sady.

Obrázek pracoviště a schéma zapojení jsou uvedeny na Obrázcích 39 a 40.



Obrázek 39: Sestavené pracoviště pro měření parametrů S11 a S22

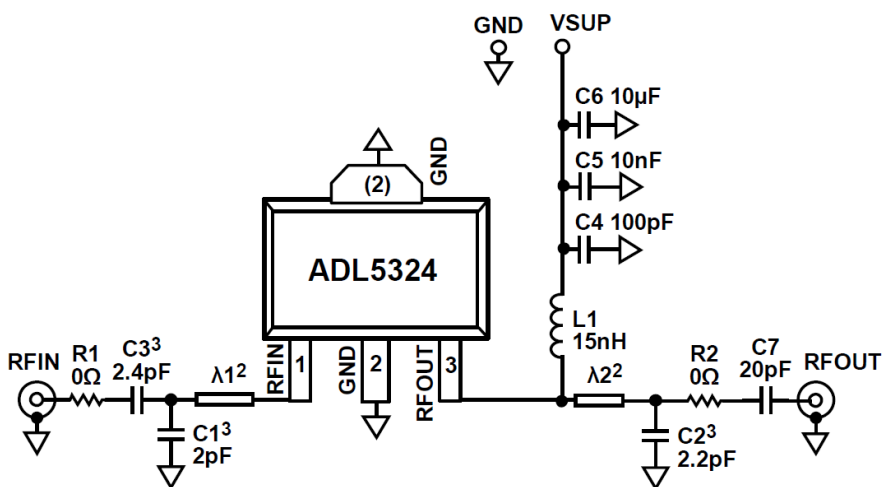


Obrázek 40: Schéma měření parametrů S11

Analog Devices - ADL5324 400 MHz to 4000 MHz ½ Watt RF Driver Amplifier

Základní zapojení pro použití zesilovače ADL5324 je zobrazeno na Obrázku 41. Toto zapojení je defaultně nastaveno na vývojové desce, které je nastaveno pro práci v pásmu 2110 MHz – 2170 MHz. Nastavení pro ostatní pásma je zobrazeno v Tabulce 20 a doporučené rozmístění součástek je zobrazeno v Tabulce 21. Vstup a výstup by měl být doplněn blokovacími kondenzátory vhodné velikosti kondenzátorů. Stejnoseměrné vstupní

napětí je přivedeno přes cívku L1, která je připojena na RFOUT (pin3). Požadované jsou také oddělovací kondenzátory C4, C5, C6, které filtrují vstupní napětí od nežádoucí AC složky. Typická proudová spotřeba je 133 mA.



Obrázek 41: ADL5324 - základní zapojení, 2110 MHz – 2170 MHz [15]

Tabulka 20: ADL5324 - doporučené součástky pro základní zapojení

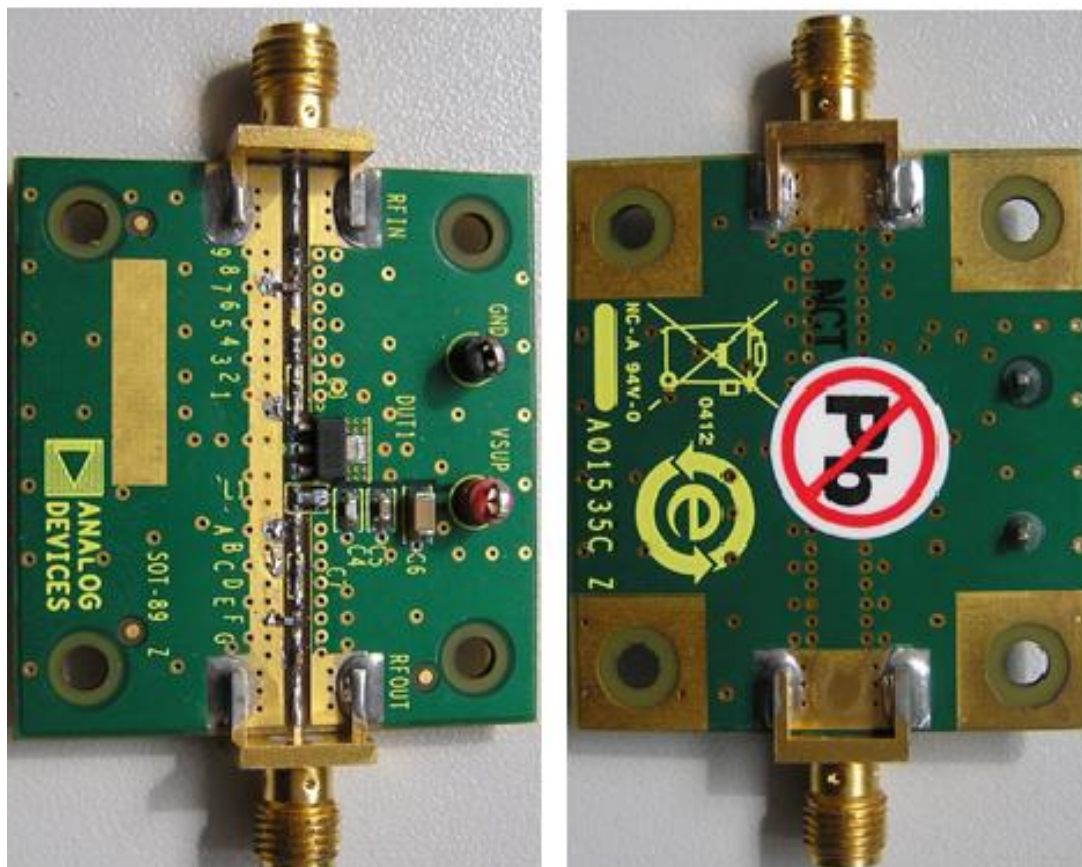
Pásmo / Součástky	420 MHz – 494 MHz	728 MHz – 768 MHz	800 MHz – 960MHz	2110 MHz – 2170 MHz
Oddělovací kondenzátory				
C3 (0402)	10 pF	10 pF ¹	10 pF ¹	2.4 pF ¹
C7 (0402)	20 pF	20 pF	20 pF	20 pF
Blokovací kondenzátory vstupního napětí				
C4 (0402)	100 pF	100 pF	100 pF	100 pF
C5 (0602)	10 nF	10 nF	10 nF	10 nF
C6 (1206)	10 μF	10 μF	10 μF	10 μF
DC Bias Inductor				
L1 (0603CS)	120 nH	18 nH	18 nH	15 nH
Ladící kondenzátor				
C1 (0402)	20 pF ¹	8 pF ¹	8 pF ¹	2 pF ¹
C2 (0402)	6.2 pF ¹	3.9 pF ¹	3.6 pF ¹	2.2 pF ¹
Propojky				
R1 (0402)	2 Ω	2 Ω	2 Ω	0 Ω
R2 (0402)	5.6 nH ²	2.4 nH ³	2.4 nH ³	0 Ω

¹ Maruta High Q capacitors, ² Add a 1.6 nH, ³ Coilcraft 0402CS

Tabulka 21: ADL5324 - doporučené umístění součástek na vývojové desce

Frekvence (MHz)	λ1 (mils)	λ1 (mils)
420 – 494	419 (= 1.064 cm)	438 (= 1.112 cm)
728 – 768	311 (= 0.789 cm)	422 (= 1.071 cm)
869 – 961	207 (= 0.525 cm)	413 (= 1.049 cm)
2110 – 2170	65 (= 0.165 cm)	193 (= 0.490 cm)

Pro nastavení vývojové desky z továrního nastavení do pásma 420 MHz – 494 MHz bylo zapotřebí vyměnit součástky podle Tabulky 20, ([15]).

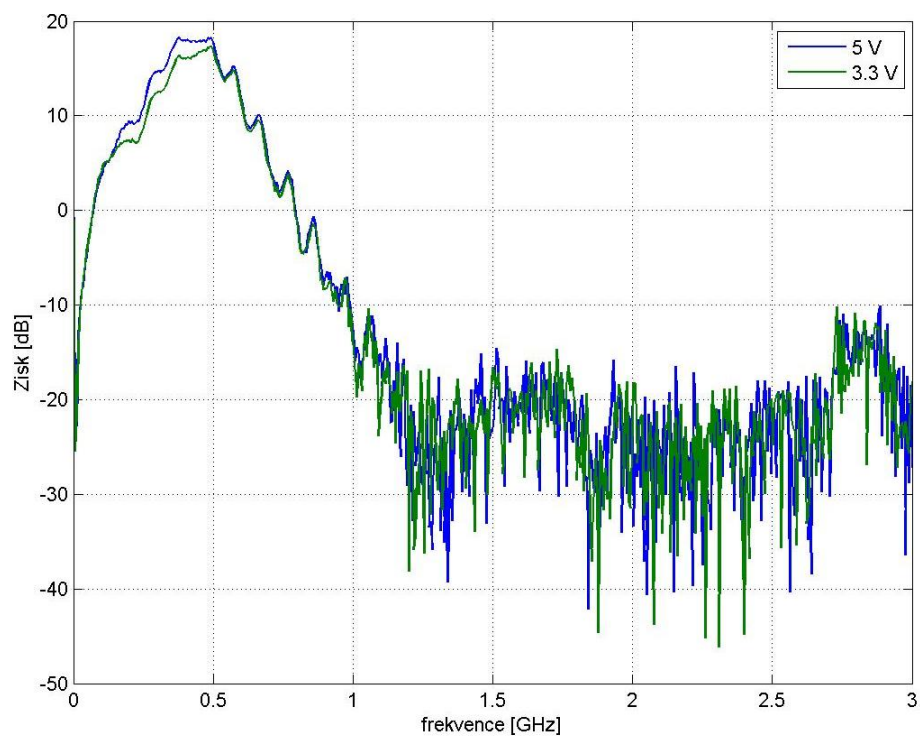


Obrázek 42: ADL 5324 -vývojová deska a rozmístění součástek pro pásmo 420 MHz - 494 MHz (TOP, BOTTOM)

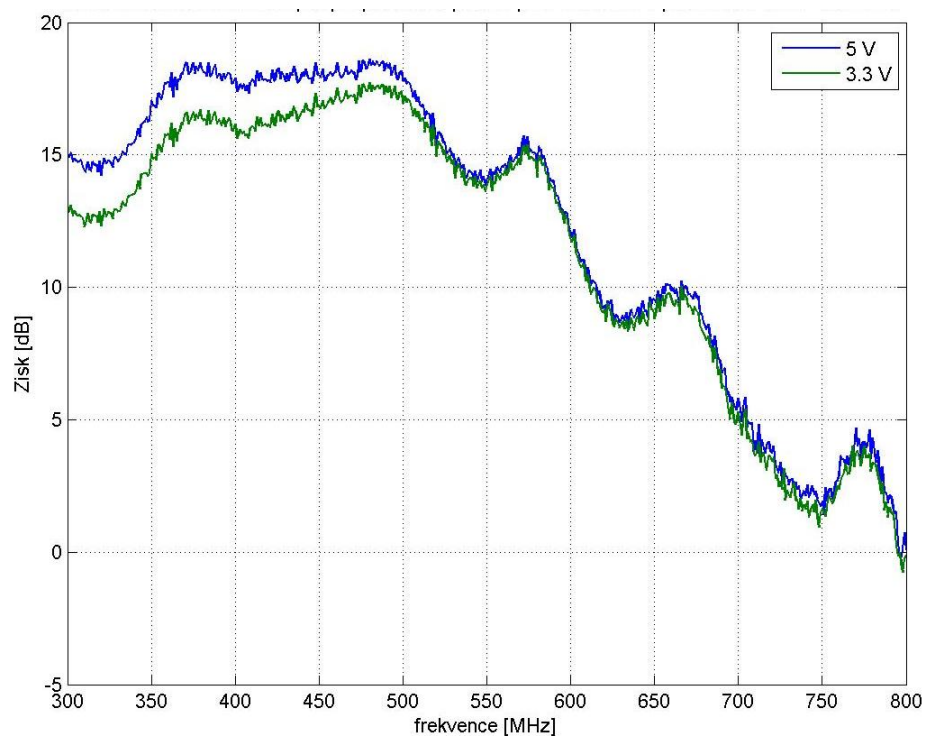
Výsledky:

U zesilovače ADL 5324 byl změřen zisk při napájecím napětí 5 V a 3,3V po přenastavavení na požadované frekvenční pásmo. Úroveň generátoru vstupního signálu byla nastavena na úroveň 0 dBm.

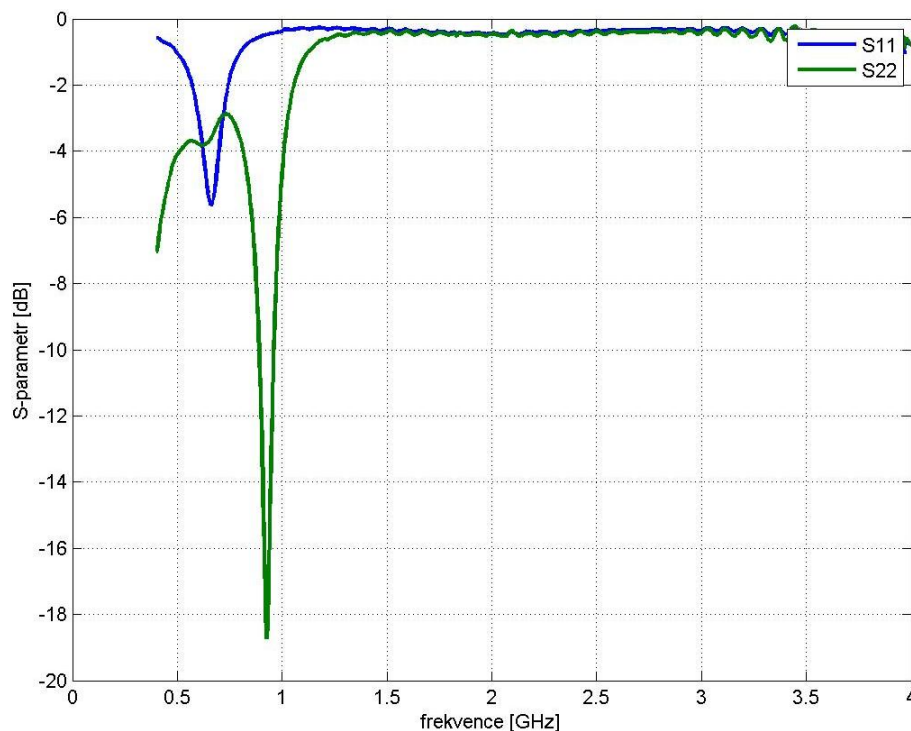
Na Obrázku 44 je vidět, že zisk zesilovače ADL 5324 pro přizpůsobení na střední frekvenci 457 MHz se pohybuje v pásmu od 350 MHz do 500 MHz při přivedeném napájecím napětí 5 V kolem hodnoty 18 dB a při napětí 3,3V je zisk v přizpůsobeném pásmu až o dva decibely menší, což odpovídá parametrům uváděných v datasheetu výrobcem. Dále z Obrázku 43 je patrné, že zisk zesilovače mimo přizpůsobené pásmo výrazně klesá a pro frekvence vyšší než 800 MHz je již záporný.



Obrázek 43: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače pro pásmo do 3 GHz



Obrázek 44: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu 300 MHz – 800 MHz



Obrázek 45: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost parametrů S11 a S22

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejmenší koeficient odrazu vstupu zesilovače je na frekvenci 660 MHz a v pásmu od 600 MHz do 720 MHz je pod úrovní -3 dB. Nejmenší koeficient odrazu od výstupu zesilovače je na frekvenci 925 MHz a v pásmu od 400 MHz do 1 GHz je pod úrovní -3 dB.

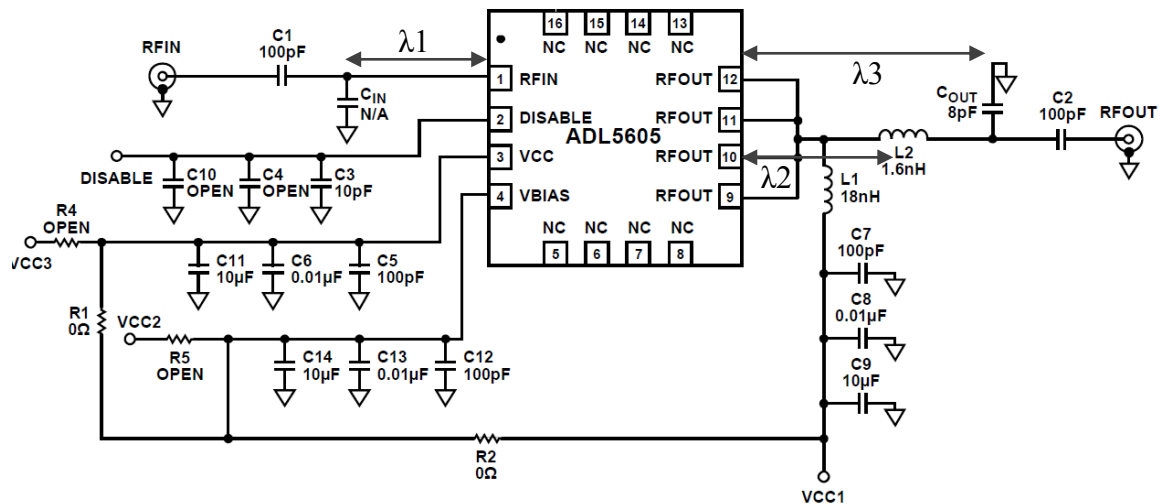
Analog Devices – ADL5605 700 MHz to 1000 MHz 1 W RF Amplifier

Základní zapojení ADL5605 je zobrazeno na Obrázku 46, kde rozmístění součástek odpovídá přizpůsobení k frekvenci 943 MHz. Stejnoseměrné napájecí napětí je přiváděno přes cívku L1, která je připojena k pinu RFOUT. Kondenzátory C1 a C2 slouží jako blokovací kondenzátory a C3 až C14 oddělovací kondenzátory, filtrující vysokofrekvenční šumovou složku ve vstupním napájení.

Vstup RF signálu je na pinu 1 a je přizpůsoben na $50\ \Omega$ jen jedním blokovacím kondenzátorem C1 a využitím indukčnosti mikropáskového vedení. Pro frekvence 881 MHz a 943 MHz není zapotřebí vstupního ladícího kondenzátoru C_{IN} . Výstup RF signálu je na pinech 9 až 12. Přizpůsobení výstupu na $50\ \Omega$ je zajištěno pomocí blokovacího kondenzátoru C2, výstupním ladícím kondenzátorem C_{OUT} a indukčností mikropáskového vedení. Pro celé frekvenční pásmo je umístění součástek C_{IN} , L2 a C_{OUT} kritické. Vzdálenosti součástek jsou dány od středu součástky k okraji ADL5605.

Celkový přehled měnicích se součástek a jejich umístění je uvedeno v Tabulce 22 a 23.

Vypnutí zesilovače se dá docílit připojením pinu DISABLE na 5 V. ([17]).



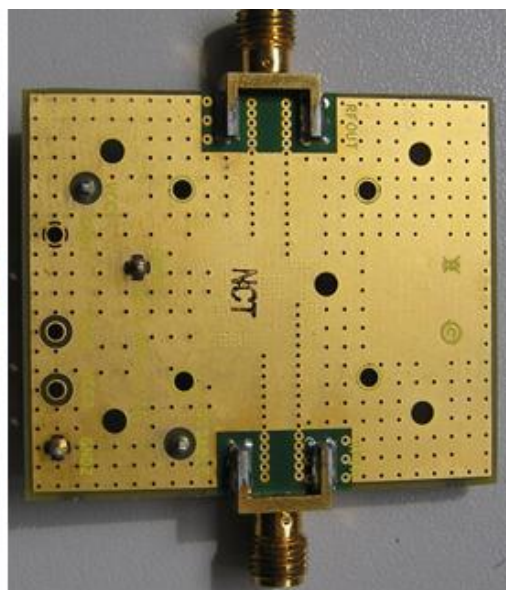
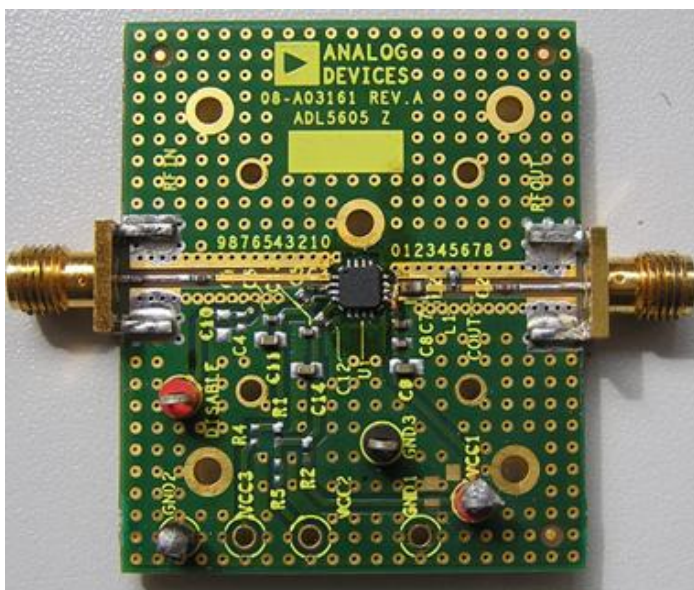
Obrázek 46: ADL 5605 - Základní zapojení pro nastavení 943 MHz [17]

Tabulka 22: ADL5605 - doporučené součástky pro základní zapojení ([17]).

Frekvence (MHz)	C_{IN} (pF)	L2 (nH)	C_{OUT} (pF)
728 - 768	2.4	2.7	12
868 - 894	N/A	1.6	8
925 - 961	N/A	1.6	8

Tabulka 23: ADL5605 - doporučené vzdálenosti součástek na vývojové desce ([17]).

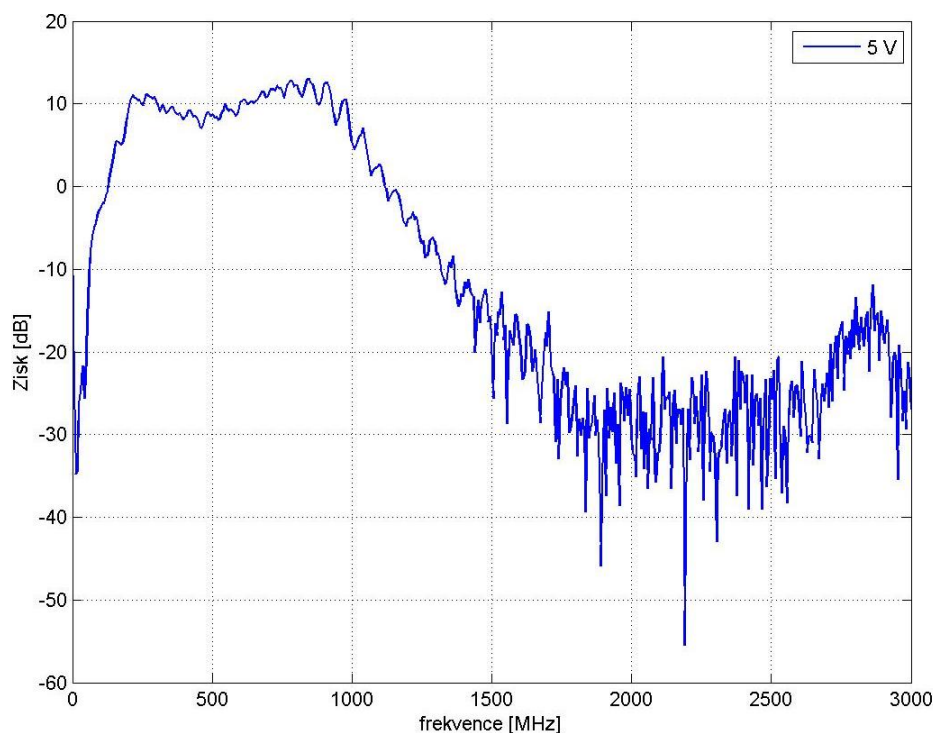
Frekvence (MHz)	λ_1 (mils)	λ_2 (mils)	λ_3 (mils)
728 - 768	63	94.5 (= 0.240 cm)	169 (= 0.429)
868 - 894	N/A	94.5	268 (= 0.680)
925 - 961	N/A	94.5	240 (= 0.609)



Obrázek 47: ADL 5605 - vývojová deska nastavení 943 MHz (TOP, BOTTOM)

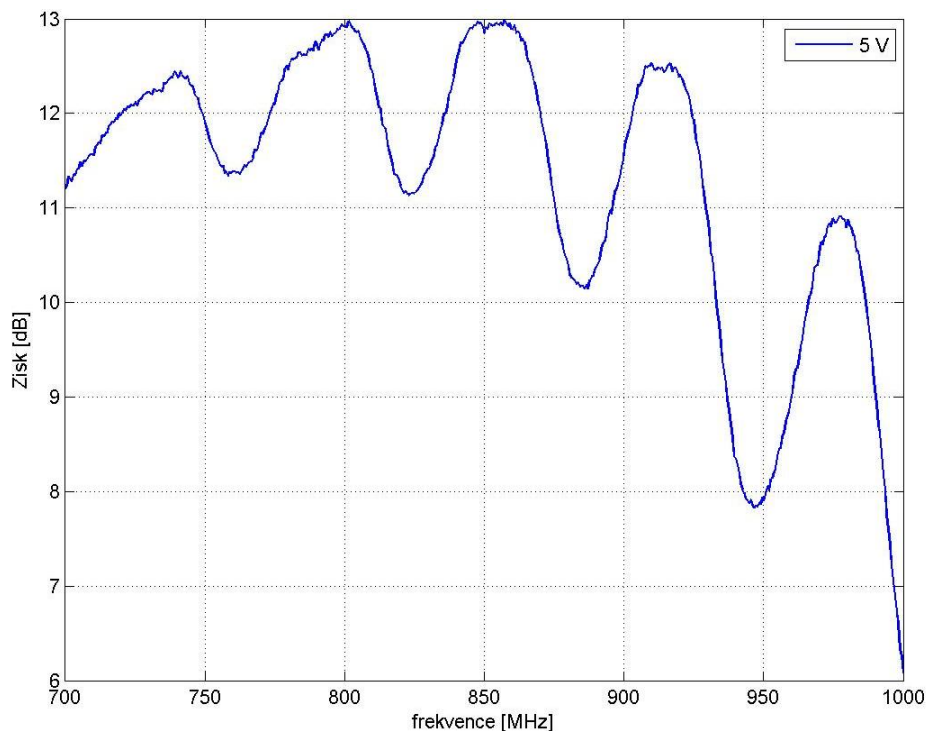
Výsledky:

Na Obrázku 48 je vykreslena frekvenční závislost zisku zesilovače ADL 5605. Zesilovač začíná pracovat již na nízkých frekvencích kolem 300 MHz, ale největší zisk dosahuje v pásmu kolem 900 MHz a dále pro frekvence nad 1,2 GHz je zisk záporný.

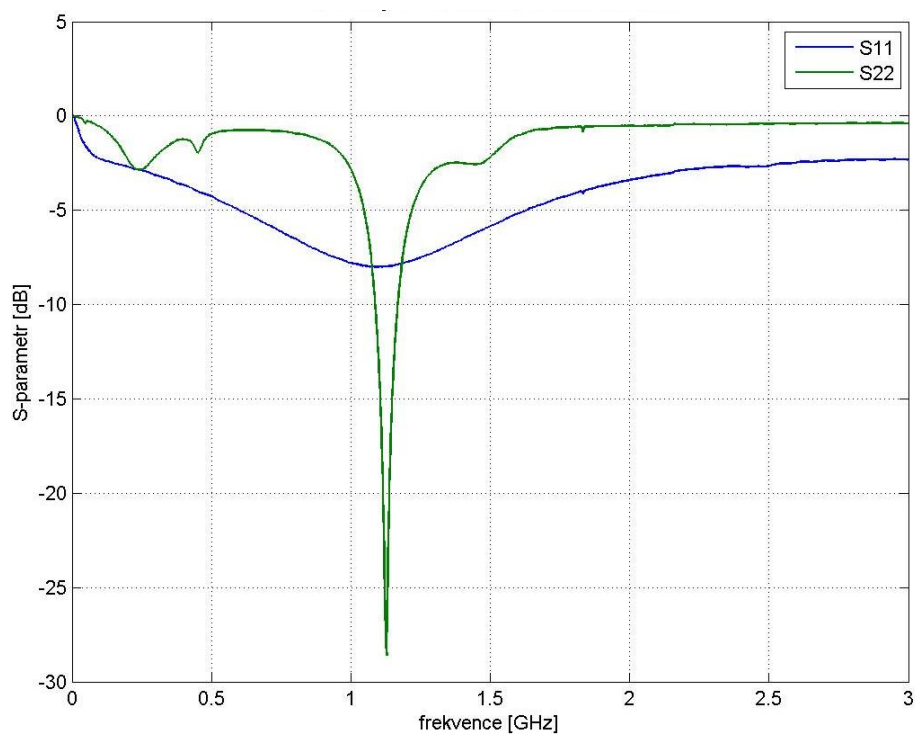


Obrázek 48:ADL 5605 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu do 3 GHz

Dle parametrů uváděných výrobcem v datasheetu by měl být zisk zesilovače v okolí střední frekvence 881 MHz roven 23 dB, námi naměřená hodnota pro tuto frekvenci je 13 dB, což je 10 dB méně, než uvádí výrobce. Tato chyba je nejspíše způsobena výměnou součástky ADL 5605, zničenou výskytem špičkového napětí, při připojení desky na napájecí napětí.



Obrázek 49: ADL 5605 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu 700 MHz – 1000 MHz



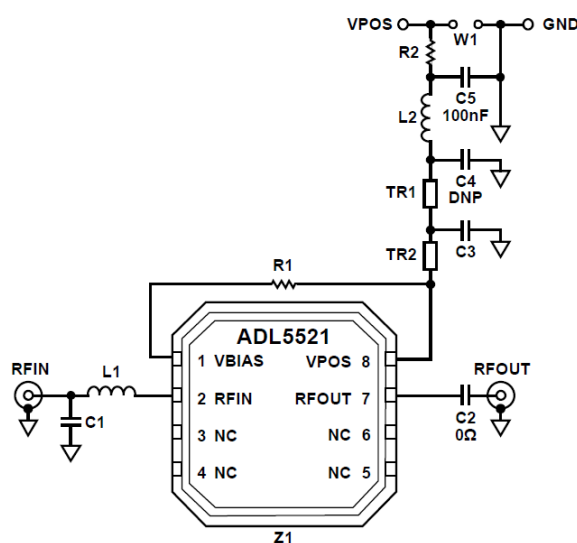
Obrázek 50: ADL 5605 - naměřená frekvenční závislost parametrů S11 a S22

Podle naměřených hodnot je nejmenší koeficient odrazu na vstupu zesilovače na frekvenci 1,076 GHz, kde dosahuje hodnoty -8 dB a v pásmu od 276 MHz do 2,157 GHz je pod úrovní -3 dB. Nejmenší koeficient odrazu od výstupu zesilovače je na frekvenci 1,129 GHz, kde dosahuje hodnoty -28,59 dB.

Analog Devices – ADL5521: 400 MHz to 4000 MHz Low Noise Amplifier

Základní zapojení ADL5523 je zobrazeno na Obrázku 51. Kondenzátor C5 slouží jako blokovací kondenzátor a cívka L1 a kondenzátor C1 provádí impedanční přizpůsobení vstupu, cívka L2 impedanční přizpůsobení výstupu. Napájecí proud se nastavuje rezistorem R1.

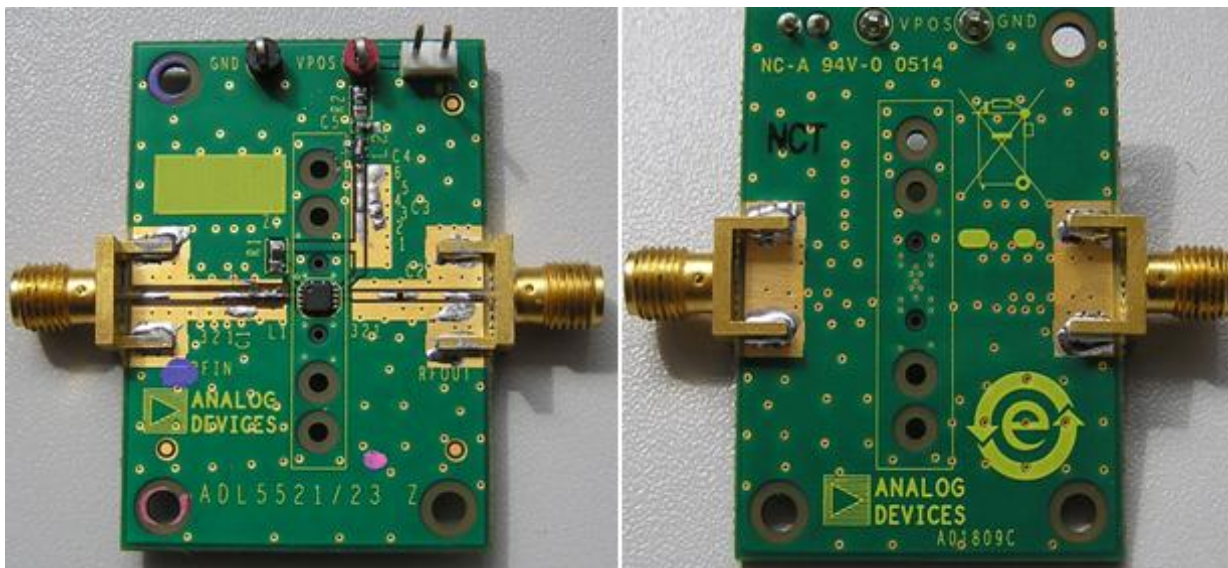
Vývojová deska byla z výroby nastavena na frekvenci 1950 MHz, a proto bylo zapotřebí její nastavení na frekvenci 500 MHz. Doporučené součástky pro základní zapojení jsou uvedeny v Tabulce 24, ([16]).



Obrázek 51: ADL5521 - základní zapojení [16]

Tabulka 24: ADL5521 - doporučené umístění součástek na vývojové desce ([16]).

Frekvence (MHz)	C1 (0402)	C2 (0402)	C3 (0402)	C4 (0402)	C5 (0402)	L1 (0403)	L2 (0403)	R1 (0603)	R2 (0603)
500	Open	0 Ω	Open	Open	100 nF	9 nH	12 nH	1.3 k Ω	0 Ω
900	2.4 pF	0 Ω	Open	Open	100 nF	8.2 nH	3.4 nH	1.3 k Ω	0 Ω
1950	1.6 pF	0 Ω	1 nF	Open	100 nF	1 nH	0 Ω	1.3 k Ω	0 Ω

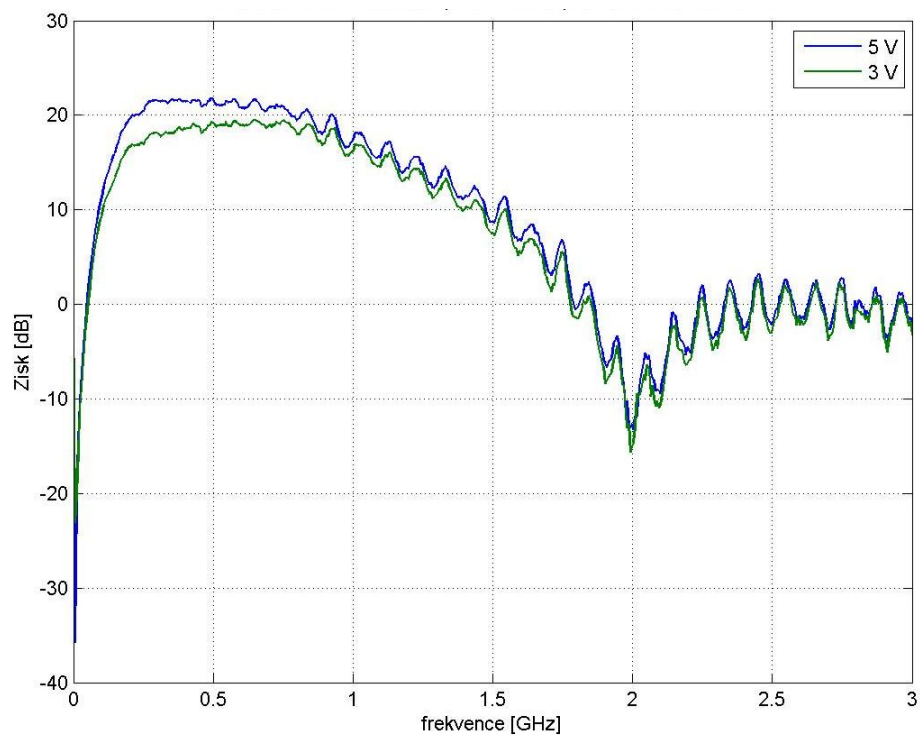


Obrázek 52: ADL 5521 vývojová deska nastavená na střední frekvenci 500 MHz (TOP, BOTTOM)

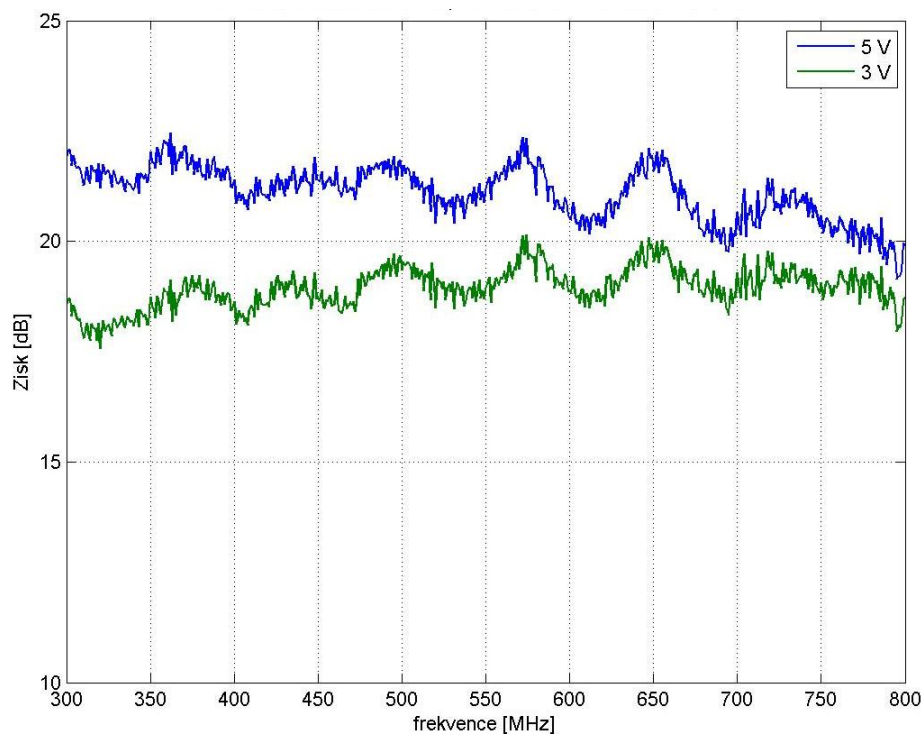
Výsledky:

U zesilovače ADL 5521 byl změřen zisk při napájecím napětí 5 V a 3 V po přenastavování na požadované frekvenční pásmo. Úroveň generátoru vstupního signálu byla nastavena na úroveň 0 dBm. Dále byly změřeny rozptylové parametry S11, S22 zesilovače.

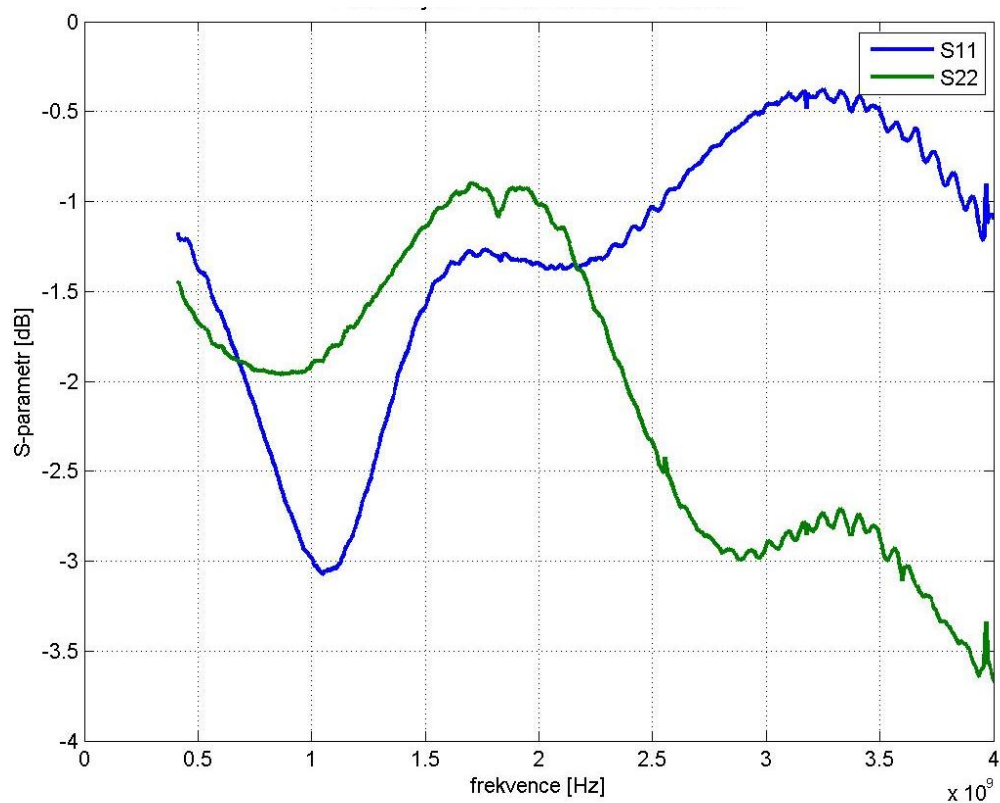
Na Obrázku 54 je vidět, že zisk zesilovače ADL 5521 pro přizpůsobení na střední frekvenci 500 MHz se pohybuje v pásmu od 300 MHz do 700 MHz při přivedeném napájecím napětí 5 V mírně nad hodnotou 21 dB a při napětí 3,3V je zisk v přizpůsobeném pásmu kolem 19 dB, což odpovídá parametrům, uváděných v datasheetu výrobcem. Dále z Obrázku 53 je patrné, že zisk zesilovače mimo přizpůsobené pásmo výrazně klesá a pro frekvence vyšší než 1,7 GHz je již záporný.



Obrázek 53: ADL 5324 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače pro pásmo do 3 GHz



Obrázek 54: ADL 5521 - naměřená frekvenční závislost zisku zesilovače v pásmu 300 MHz – 800 MHz



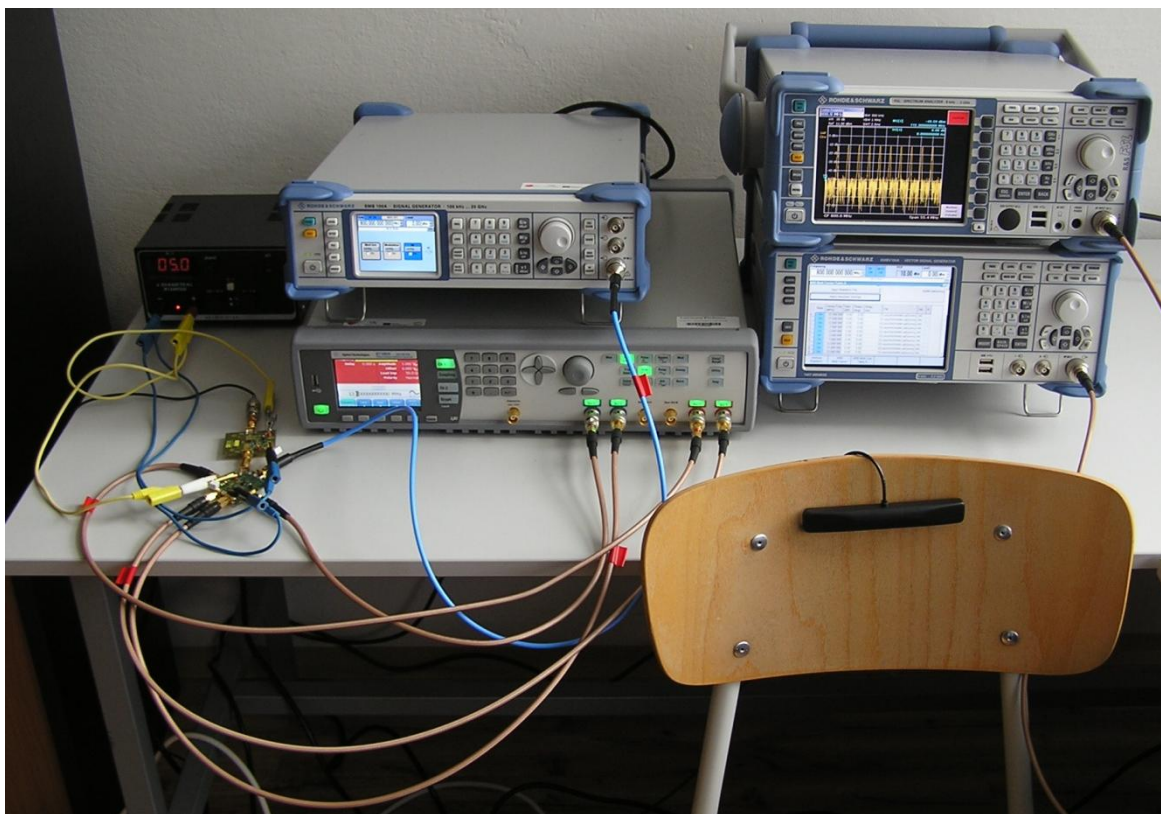
Obrázek 55: ADL 5521 - naměřená frekvenční závislost parametrů S11 a S22

Podle naměřených hodnot je nejmenší koeficient odrazu na vstupu zesilovače na frekvenci 1,076 GHz, kde dosahuje hodnoty -8 dB a v pásmu od 276 MHz do 2,157 GHz je pod úrovní -3 dB. Nejmenší koeficient odrazu od výstupu zesilovače je na frekvenci 1,129 GHz, kde dosahuje hodnoty -28,59 dB.

3.4 Měření spoje

Vysílací strana

Pro měření vysílací strany spoje bylo vybráno pásmo v okolí 800 MHz, kde nejlépe vycházely parametry pro použití antén (viz. Tabulka 25) a výkonová bilance zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 (viz. Tabulka č. 28, 29). Obdobné vlastnosti byly dosaženy i v pásmu v okolí 900 MHz, nicméně v tomto pásmu již docházela ke kolizi s pásmem využívající mobilní služba GSM a směrem k nižším kmitočtům klesal výkon zesílení a značně se zhoršovaly parametry použitých antén. Při měření byly vysílány dva typy signálů. První variantou bylo napájení bran IQ složek sinusovými signály o frekvenci 10 MHz a 13 MHz a amplitudě 1 Vpp generátorem Agilent 81160A s průměrným dodaným výkonem do antény 13,56 dBm. Druhá varianta bylo napájení širokopásmovým signálem o 10 nosných s ekvidistantním rozestupem 5 MHz vektorovým generátorem R&S SMBV 100A s průměrný výkonem dodaným do antény 5,57 dBm. Dostupné antény se hodily pouze pro proměření spoje pro frekvence kolem 800 MHz, pro měření spoje v okolí frekvence 500 MHz místního oscilátoru a zapojení modulátoru se zesilovačem ADL 5324 by bylo potřeba antén s frekvenčním rozsahem pro toto pásmo. Obrázek připraveného pracoviště a schéma pracoviště je uvedeno na Obrázcích 56, 57.



Obrázek 56: Sestavené pracoviště - vysílací strana

Použité přístroje:

Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSL 3 Spectrum analyzer, 9 kHz... 3 GHz.

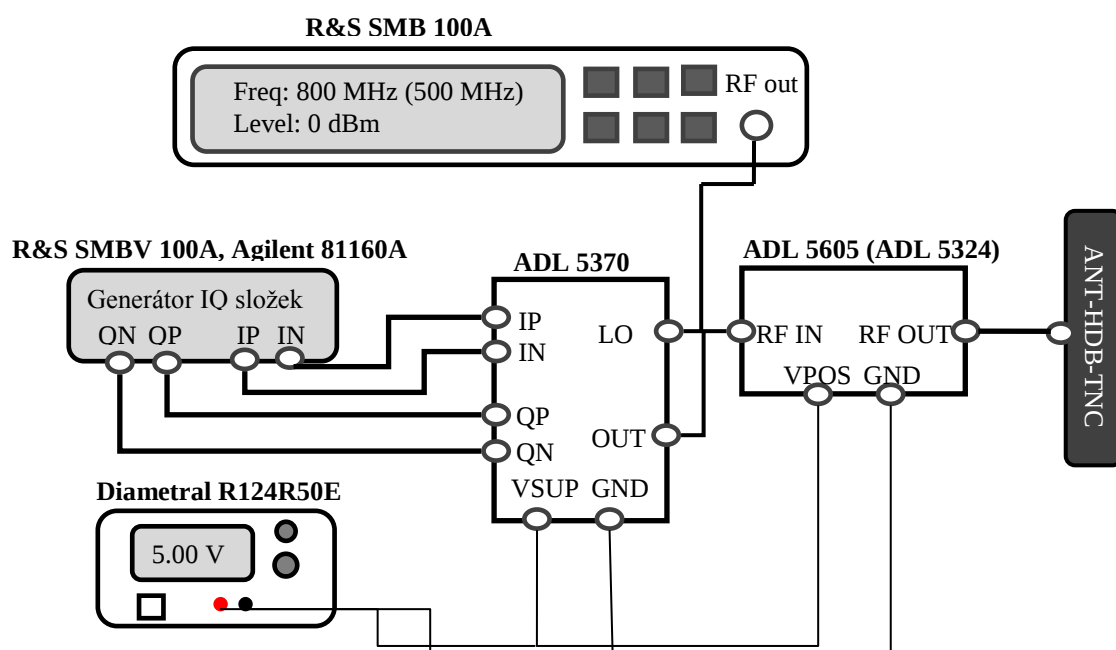
Signálový generátor: Agilent technologies 81160A, 330 MHz – 500 MHz, Pulse Function Arbitrary Generator

Laboratorní zdroj: Diametral R124R50E

Signálový generátor: Rohde & Schwarz SMB 100A, Signal Generator, 100 kHz...20 GHz

Generátor IQ složek: Rohde & Schwarz SMBV 100A, Vector signal generator

Anténa: ANT-HDB-TNC



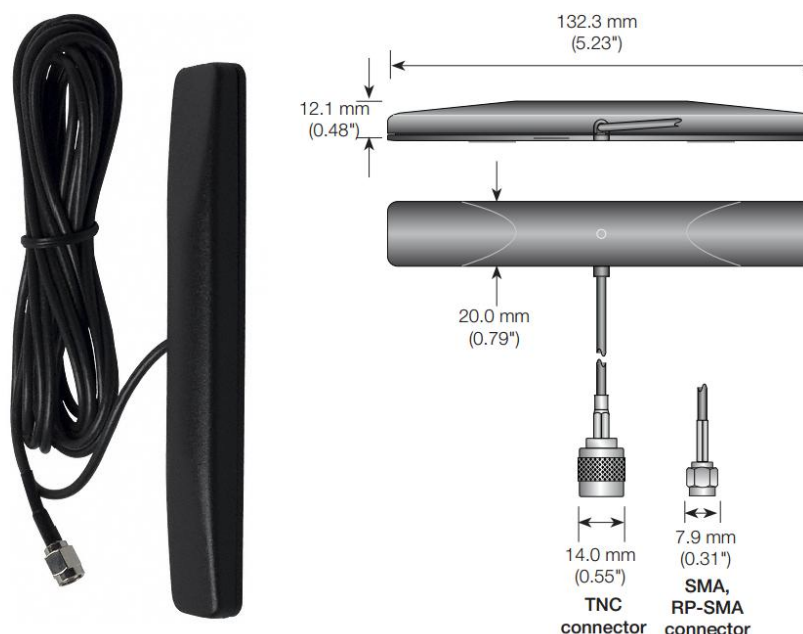
Obrázek 57: Schéma - vysílací strana

Přehled základních parametrů antény je uveden v Tabulce 28.

Tabulka 25: Základní parametry antény: ANT-HDB-TNC ([25])

ANTENA FACTOR: ANT-HDB-TNC	
Výrobce:	Linx Technologies
Frekvenční rozsah:	
• Band 1	824 – 960 MHz
• Band 2	1,71 – 1,99 GHz
• Band 3	2,40 – 2,48 GHz
Technologie:	½ Wave Antenna
VSWR:	
• Band 1	≤ 1,5 typ.
• Band 2	≤ 1,9 typ.
• Band 3	≤ 1,9 typ.
Zisk (peak)	
• Band 1	0,2 dBi
• Band 2	-3,3 dBi
• Band 3	3 dBi

Pracovní teplotní rozsah:	-40 až +80
Šířka pásma:	200 MHz
Konektor:	TNC,SMA nebo RP-SMA
Kabel:	3m RG-174 coax



Obrázek 58: Anténa: ANT-HDB-TNC [25]

Měření výkonu

Měření výkonu jednotlivých zapojení bylo provedeno měřičem výkonu FSH-Z1 od firmy Rohde & Schwarz, který je doplňkem k obvodovému analyzátoru FSH 8 od téže firmy. Frekvenční rozsah měřiče je od 10 MHz do 8GHz s výkonovým rozsahem od -67 dBm do + 23 dBm a udává efektivní (RMS) hodnotu výkonu měřeného signálu nezávisle na jeho průběhu.

Použité přístroje:

Signálový generátor: Agilent technologies 81160A, 330 MHz – 500 MHz, Pulse Function Arbitrary Generator

Laboratorní zdroj: Diametral R124R50E

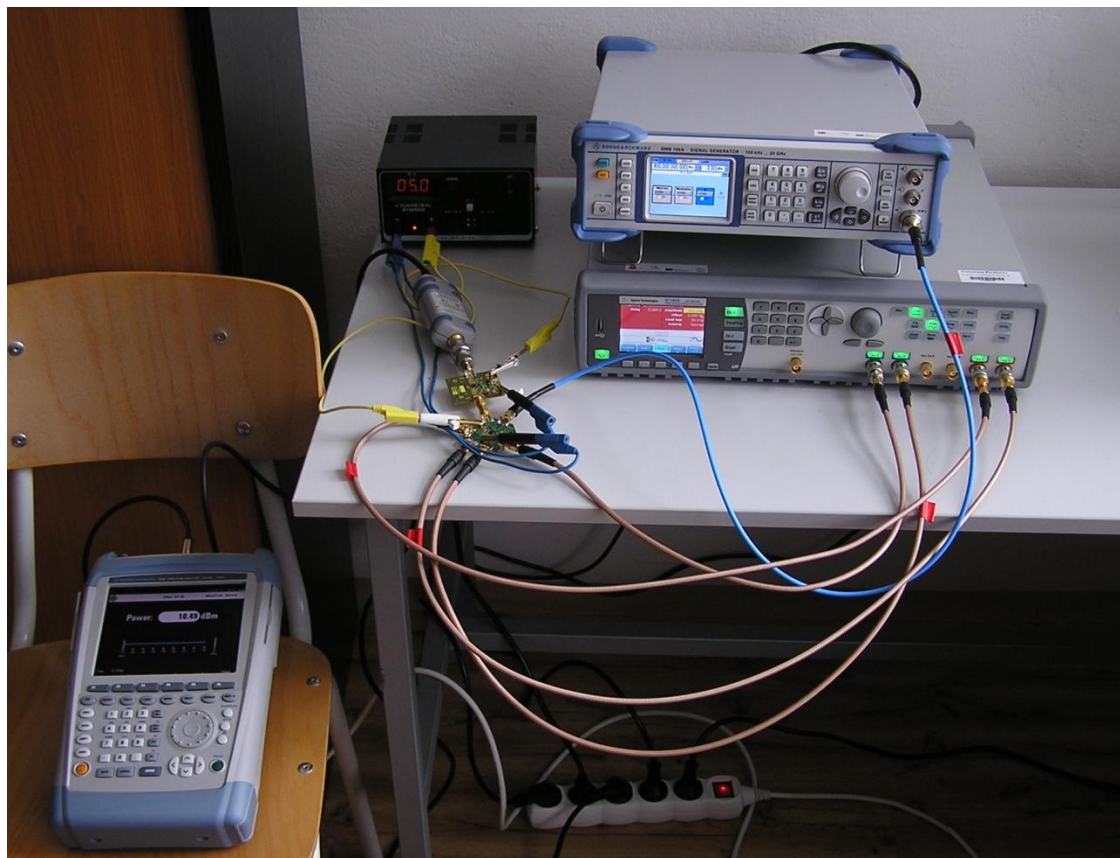
Signálový generátor: Rohde & Schwarz SMB 100A, Signal Generator, 100 kHz...20 GHz

Měřič výkonu: AVG POWER SENZOR FSH-Z1

Generátor IQ složek: Rohde & Schwarz SMBV 100A, Vector signal generator

Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSH 8, Spectrum analyzer, 100 kHz... 8GHz

Výkon (pro amplitudy 1 V_{ppp} a 1,4 V_{pp}) měřen přes útlumový člen (attenuator), který výkon zeslabil o 20 dB, z důvodu omezení maximálního dodávaného výkonu do měřiče výkonu, který je maximálně +23 dBm. Schéma pro měření výkonové bilance je obdobné jako pro schéma vysílací strany s tím rozdílem, že výstup ze zesilovače je přiveden přes měřič výkonu FSH-Z1 do R&S FSH4.



Obrázek 59: Sestavení pracoviště pro měření výkonové bilance

3.4.1 Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5324.

Sestavení pracoviště pro měření výkonové bilance zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5324 je zobrazeno na Obrázku 59.

V Tabulkách 25 a 26 jsou výsledné hodnoty výkonu zapojení pro různé frekvence místního oscilátoru a pro případ sinusového signálu, různé amplitudy I a Q složek. V případě širokopásmového signálu jsou uvedeny výkony pro různý počet nosných a různý ekvidistanční rozestup jednotlivých nosných.

Tabulka 26: Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5324, pro různé šířky pásma a různý počet nosných

Výkon vysílací strany, ADL 5370 a ADL 5324, napájecí napětí 5V						
Počet/rozestup (Šířka pásma)	10/500kHz (5 MHz)	10 / 1MHz (10 MHz)	10 / 5MHz (50 MHz)	30/1,5MHz (45 MHz)	60/900 kHz (54 MHz)	80/700 kHz (56 MHz)
LO: 300 MHz	12,20 dBm	12,16Bm	11,79dBm	7,08dBm	4,32 dBm	3,52 dBm
LO: 400 MHz	16,10dBm	16,07dBm	15,46dBm	10,78dBm	7,53 dBm	6,21 dBm
LO: 500 MHz	15,55dBm	15,51dBm	15,08dBm	10,36dBm	7,16 dBm	5,85 dBm
LO: 600 MHz	10,69dBm	10,64 dBm	10,45dBm	5,69dBm	3,38 dBm	2,34 dBm
LO: 700 MHz	3,83 dBm	3,81 dBm	3,74dBm	-0,86 dBm	-3,89 dBm	-5,14 dBm
LO: 800 MHz	-3,30 dBm	-3,33 dBm	-3,37dBm	-8,14 dBm	-11,16 dBm	-12,41 dBm
LO: 900 MHz	-9,85 dBm	-9,89 dBm	-9,94 dBm	-15,80dBm	-19,45 dBm	-20,72 dBm

- Změna úrovně LO neměla na výkon žádný znatelný vliv.

Výkonová úroveň zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5324, při napájení I a Q složek sinusovým signálem a různých amplitudách ($f = 10$ MHz).

Tabulka 27: Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5324 pro sinusový signál o různých amplitudách

Frekvence LO / Amplituda (pp)	500 mVpp	1 Vpp	1,4 Vpp
LO: 300 MHz:	16,75 dBm	21,53 dBm	22,45 dBm
LO: 400 MHz:	19,96 dBm	24, 77 dBm	25,54 dBm
LO: 500 MHz:	19,55 dBm	24,78 dBm	25,74 dBm
LO: 600 MHz:	15,18 dBm	20,54 dBm	21,94 dBm
LO: 700 MHz:	8,39 dBm	15,13 dBm	16,63 dBm
LO: 800 MHz:	1,41 dBm	5,3 dBm	7,62 dBm
LO: 900 MHz:	-5,12 dBm	-2,44 dBm	-0,78 dBm

Maximální výkon zapojení ADL 5370 a ADL 5324 je v obou měřených případech největší pro frekvence 400 MHz a 500 MHz místního oscilátoru. V případě sinusového signálu je maximum 25,54 dBm a pro širokopásmový signál je maximum 15,46 dBm pro 10 nosných s rozestupem 5 MHz. To odpovídá plánovanému nastavení zesilovače ADL 5324.

3.4.2 Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5605

Sestavení pracoviště pro měření výkonové bilance zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 je zobrazeno na Obrázku 59.

V Tabulkách 28 a 29 jsou výsledné hodnoty výkonu zapojení pro různé frekvence místního oscilátoru a pro případ sinusového signálu, různé amplitudy I a Q složek. V případě širokopásmového signálu jsou uvedeny výkony pro různý počet nosných a různý ekvidistantní rozestup jednotlivých nosných.

Tabulka 28: Výkonová bilance zapojení ALD 5370 a ADL 5605, pro různé šířky pásma a různý počet nosných

Výkon vysílací strany, ADL 5370 a ADL 5605, napájecí napětí 5V						
Počet/rozestup (Šířka pásma)	10/500kHz (5 MHz)	10 / 1MHz (10 MHz)	10 / 5MHz (50 MHz)	30/1,5MHz (45 MHz)	60/900 kHz (54 MHz)	80/700 kHz (56 MHz)
LO:300 MHz	5,64 dBm	5,58 dBm	5,39 dBm	0,86 dBm	-2,22 dBm	-3,53 dBm
LO:400 MHz	4,64 dBm	4,6 dBm	4,35 dBm	-0,36 dBm	-3,45 dBm	-4,75 dBm
LO:500 MHz	4,06 dBm	4,03 dBm	3,84 dBm	-0,83 dBm	-3,91 dBm	-5,20 dBm
LO:600 MHz	4,77 dBm	4,75 dBm	4,55 dBm	-0,09 dBm	-3,17 dBm	-4,47 dBm
LO:700 MHz	5,45 dBm	5,44 dBm	5,26 dBm	0,69 dBm	-2,39 dBm	-3,69 dBm
LO:800 MHz	5,71 dBm	5,67 dBm	5,57 dBm	1,11 dBm	-1,94 dBm	-3,23 dBm
LO:900 MHz	5,55 dBm	5,54 dBm	5,45 dBm	1,03 dBm	-2 dBm	-3,29 dBm

Výkonová úroveň zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5324, při napájení I a Q složek sinusovým signálem a různých amplitudách ($f = 10$ MHz).

Tabulka 29: Výkonová bilance zapojení ADL 5370 a ADL 5605 pro sinusový signál o různých amplitudách

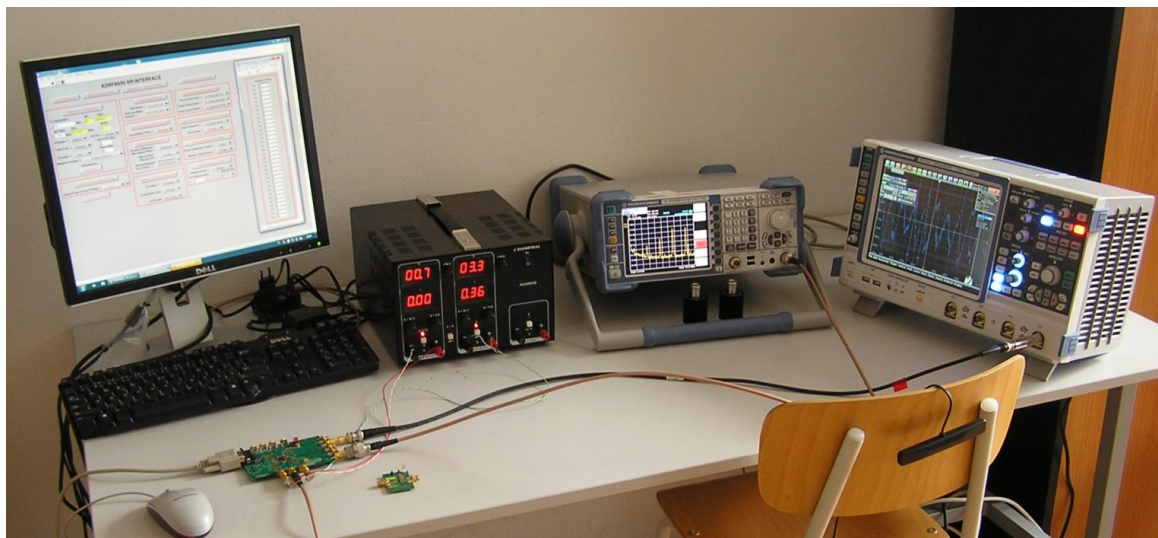
Frekvence LO / Amplituda (pp)	500 mVpp	1 Vpp	1,4 Vpp
LO: 300 MHz:	11,52 dBm	12,72 dBm	13,01 dBm
LO: 400 MHz:	9,15 dBm	9,67 dBm	9,68 dBm
LO: 500 MHz:	8,21 dBm	9,47 dBm	9,85 dBm
LO: 600 MHz:	9,75 dBm	11,04 dBm	11,5 dBm
LO: 700 MHz:	10,95 dBm	12,58 dBm	13,22 dBm
LO: 800 MHz:	11,64 dBm	13,56 dBm	14,18 dBm
LO: 900 MHz:	11,8 dBm	14,11 dBm	14,59 dBm

Průměrný výkon zapojení ADL 5370 a ADL 5324 je v obou měřených případech největší pro frekvence 800 MHz a 900 MHz místního oscilátoru. V případě sinusového signálu je maximum 14,59 dBm a pro širokopásmový signál je maximum průměrného výkonu 5,57 dBm pro 10 nosných s rozestupem 5 MHz. Výkony jsou o 10 dB menší. To je způsobeno zesilovačem ADL 5605, který místo udávaného zesílení 23 dB má pouze 13dB.

3.4.3 Demodulace signálu

Pracoviště pro demodulaci vyslaného signálu je zobrazeno na Obrázku 60, schéma zapojení na Obrázku 61. Při použití zapojení pro frekvenční pásmo kolem 800 MHz, tedy modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 na vysílací straně, nebyl na přijímací straně na vstupu přijímače ADRF 6850 použit nízkošumový zesilovač, jeho nastavení bylo konfigurováno na frekvenční rozsah kolem 500 MHz a jeho vlastnosti na vyšších frekvencích již nejsou ideální, a proto bylo použito jen zesilovače VGA integrovaného v ADRF 6850. Dále byla zapojena varianta na vysílací straně s modulátorem ADL 5370 a zesilovačem ADL 5324, jež byla konfigurována pro frekvenční pásmo kolem 500 MHz, a

při tomto zapojení bylo použito na přijímací straně nízkošumového zesilovače, ale neproměřovaly se v tomto zapojení různé trasy přijímaného signálu, protože pro měření byly dostupné pouze antény ANT-HDB-TNC, jejichž frekvenční rozsah je mimo toto pásmo. Souhrn základních parametrů antén je uveden v Tabulce 25.



Obrázek 60: Sestavené pracoviště - přijímací strana

Použité přístroje:

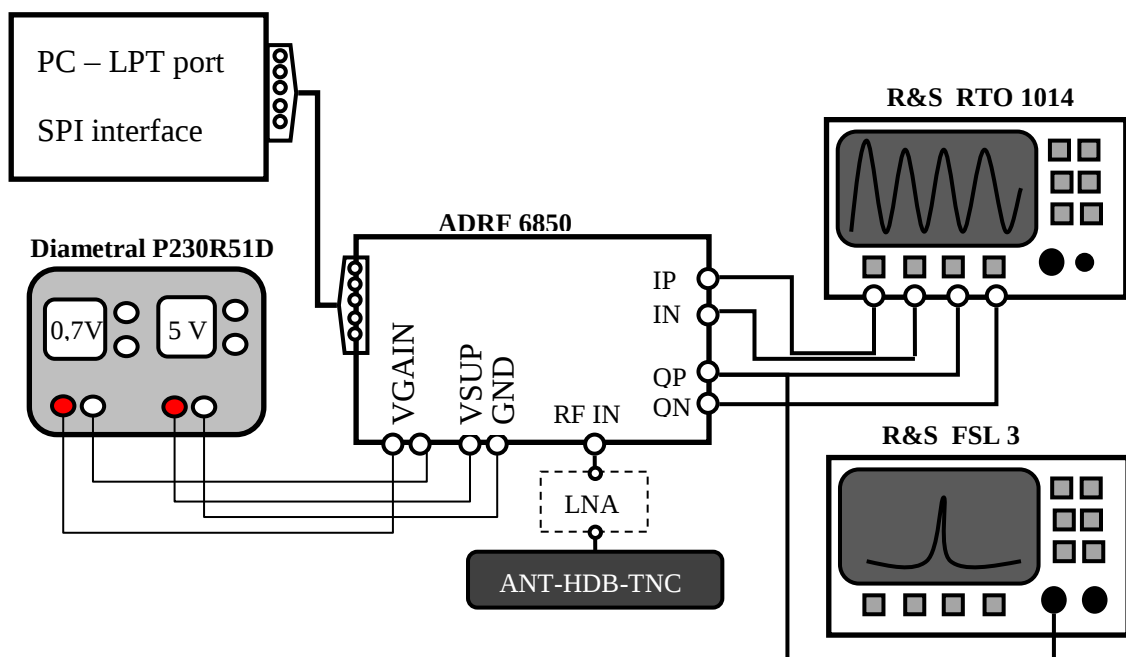
Spektrální analyzátor: Rohde & Schwarz FSL 3 Spectrum analyzer, 9 kHz... 3 GHz.

Osciloskop: Rohde & Schwarz RTO 1014

Laboratorní zdroj: Diametral P230R51D

PC: DELL s SPI interfece

Anténa: ANT-HDB-TNC



Obrázek 61: Schéma - přijímací strana

3.4.4 Zapojení pro ADL 5370 a ADL 5324

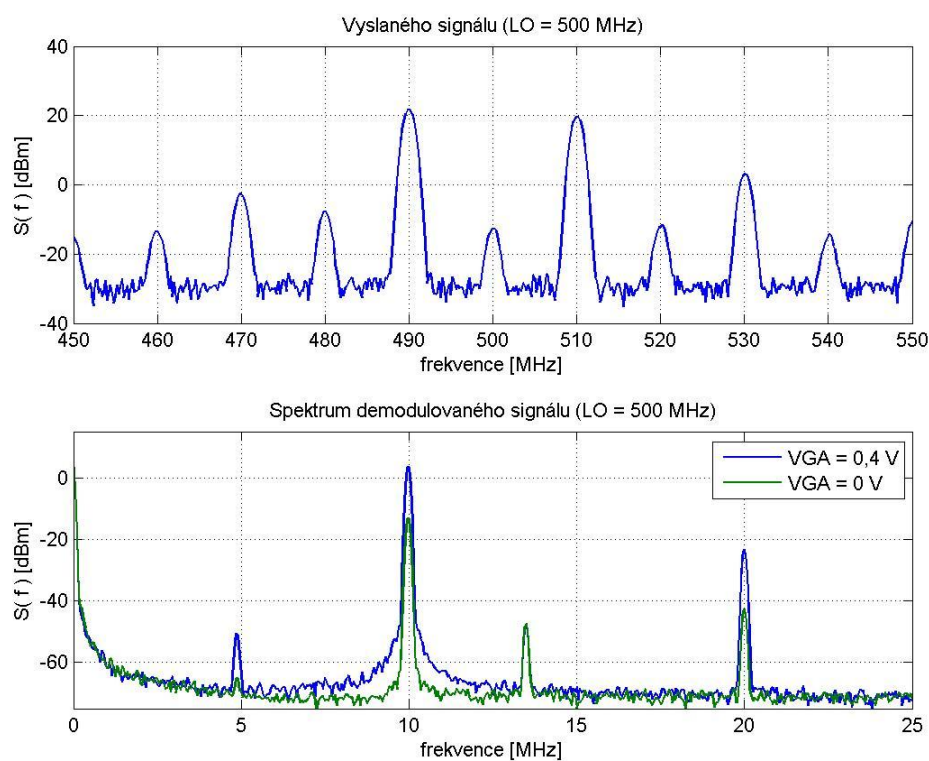
Přímé spojení vysílače a přijímače s vloženým útlumem, zeslabujícím signál o 30 dB.

Frekvence místního oscilátoru byla nastavena na hodnotu 500 MHz. Amplitudy IQ složek sinusového signálu o frekvenci 10 MHz byly 1 Vpp. Pro modulovaný širokopásmový signál bylo použito 10 subnosných vln s ekvidistantním rozestupem 5 MHz.

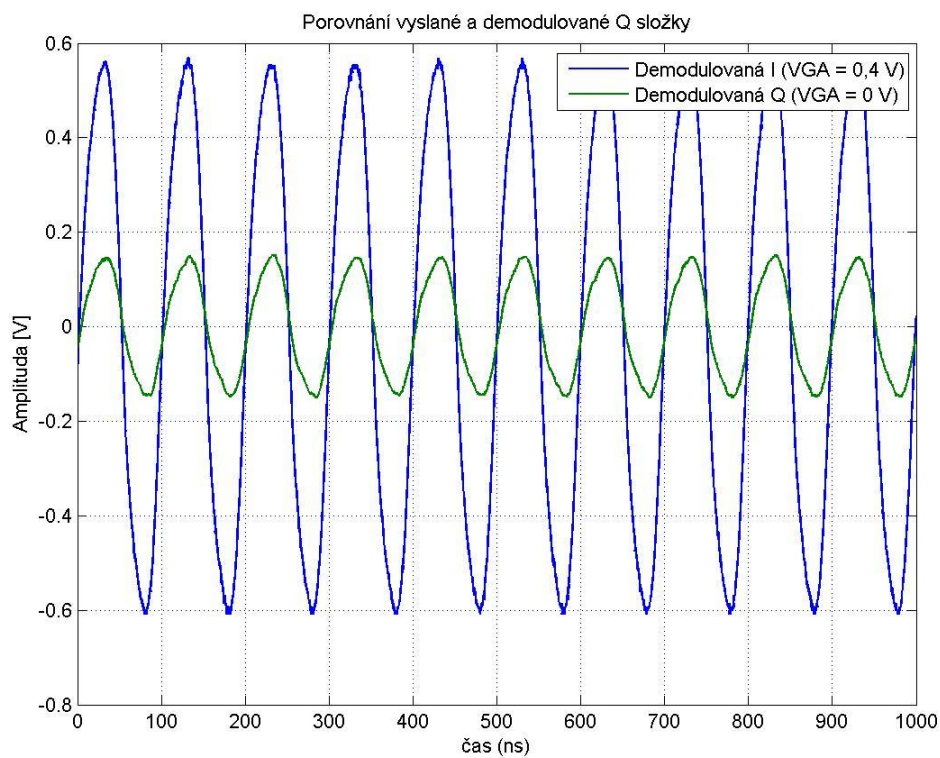
Pro zapojení ADL 5370 a ADL 5324 byla měřena pouze jedna trasa, při přímém spojení s útlumovým členem, protože pro měření byly dostupné pouze antény pro vyšší frekvenční pásmo.

- Příklad pro I a Q složky sinusový signál o frekvenci 10 MHz.

Spektrum vyslaného a demodulovaného signálu je zobrazeno na Obrázku 62. Porovnání demodulované Q složky při zesílení přijímaného signálu a bez zesílení je zobrazeno na Obrázku 63. Ve spektru demodulovaného signálu je výrazná frekvence na 13,5 MHz, která je referenčním kmitočtem a je generovaná v demodulátoru, není tedy součástí přijímaného signálu a nedochází k jejímu zesílení.



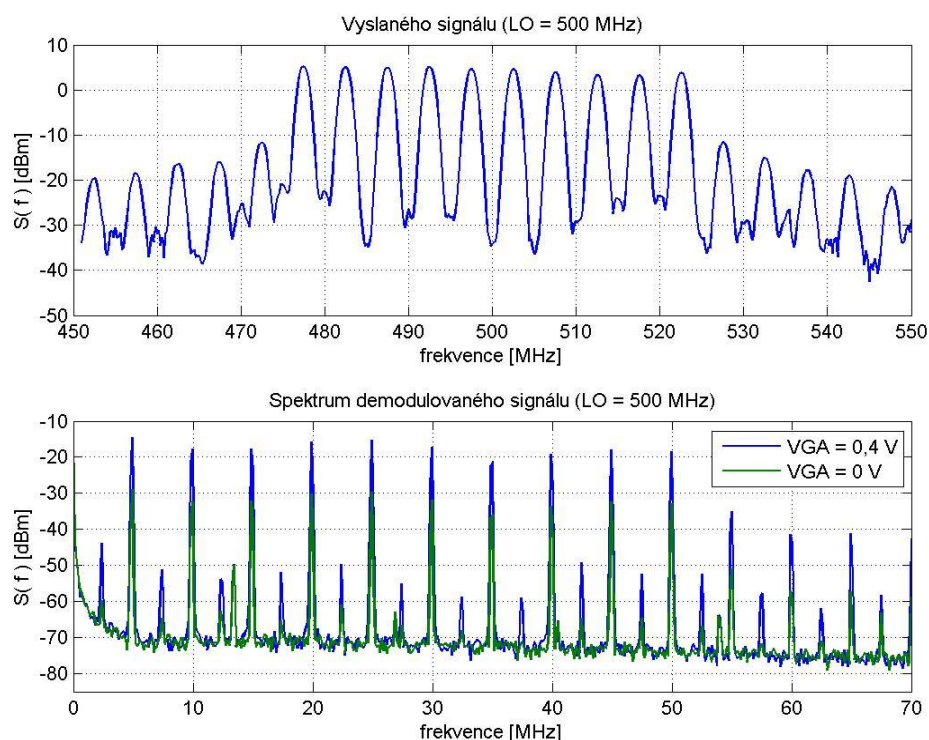
Obrázek 62: Spektrum vyslaného a demodulovaného sinusového signálu, přímé spojení



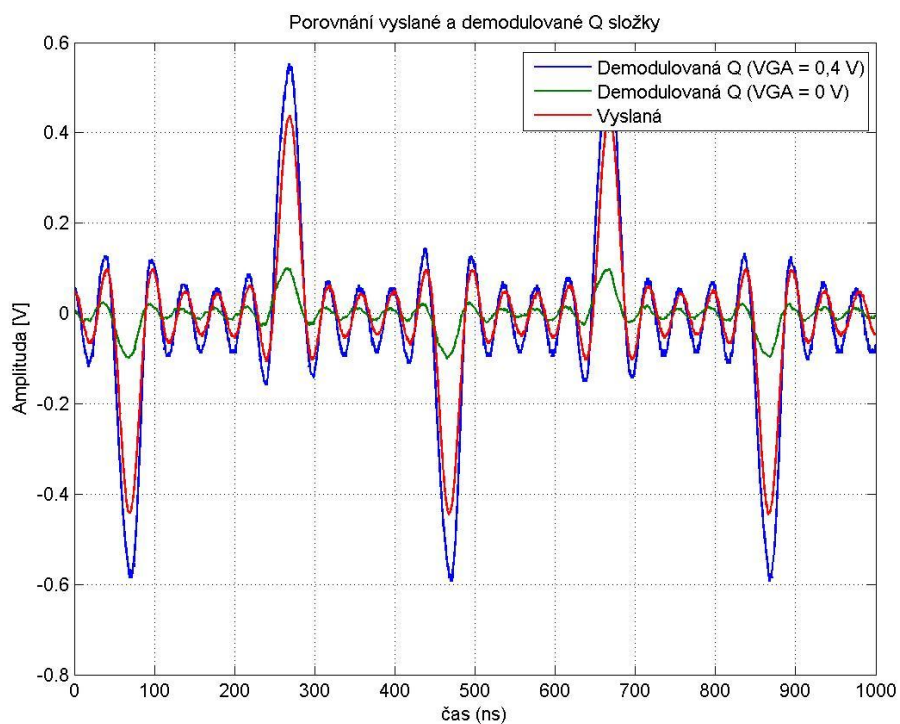
Obrázek 63: Porovnání vyslané a demodulované Q složky sinusového signálu, přímé spojení

- Pro případ širokopásmných I a Q složek

Spektrum přijatého a demodulovaného signálu uvedeno na Obrázku 64 a porovnání vyslané a demodulované Q složky je na Obrázku 65.



Obrázek 64: Spektrum vyslaného a demodulovaného širokopásmového signálu, přímé spojení



Obrázek 65: Porovnání vyslané a demodulované Q složky širokopásmového signálu, přímé spojení

Závěr z měření pro zapojení ADL 5370 a ADL 5324

Demodulace vysílaného širokopásmového signálu s výkonem 15,08 dBm a sinusového signálu s výkonem 24,78 dBm, oba signály zeslabeny vloženým útlumovým členem o 30 dB, se podařila a demodulované průběhy signálu odpovídali vyslaným průběhům.

3.4.5 Zapojení pro ADL 5370 a ADL 5605

Postupně byla provedena demodulace signálu po průchodu různými trasami:

- A. Přímé spojení vysílací a přijímací strany
- B. Po průchodu vyslaného signálu přes celou místnost
- C. Po průchodu vyslaného signálu skrz jednu zeď
- D. Po průchodu vyslaného signálu skrz dvě zdi
- E. Po průchodu vyslaného signálu skrz strop

Frekvence místního oscilátoru byla nastavena na hodnotu 800 MHz, amplitudy IQ složky sinusových signálů byly 1 Vpp. Pro modulovaný širokopásmový signál bylo použito 10 subnosných vln s ekvidistantním rozestupem 5 MHz.

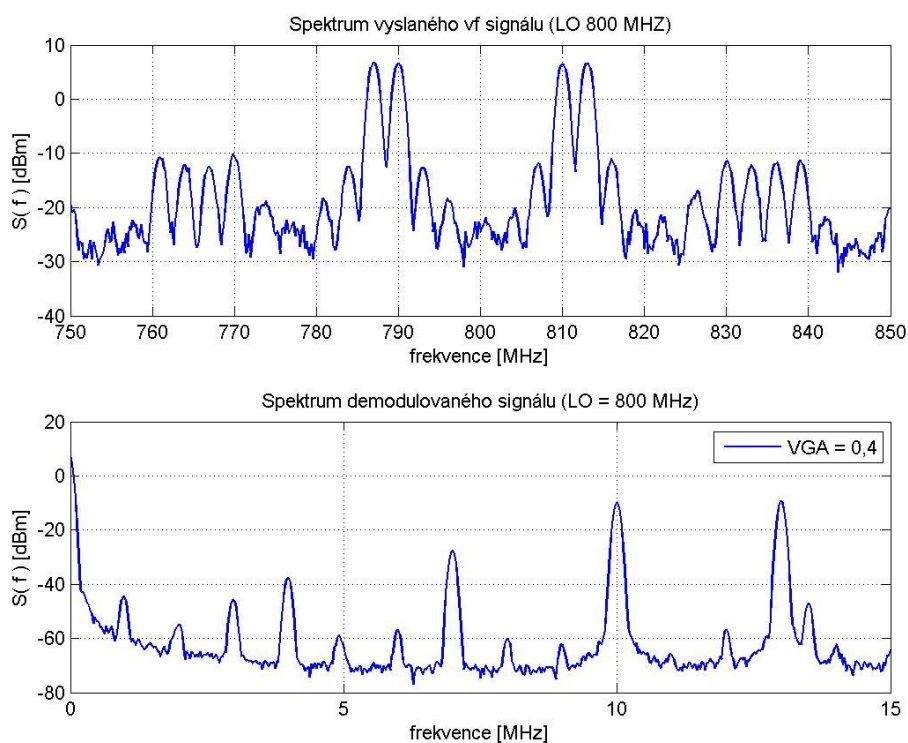
V příloze A jsou dále uvedeny spektra přijatých signálů, pro nastavení různých frekvencí místního oscilátoru, z nichž je vidět, že nejlepší výsledky jsou dosaženy při frekvenci 800 MHz.

A. Demodulace signálu pro případ přímého spojení vysílací a přijímací strany

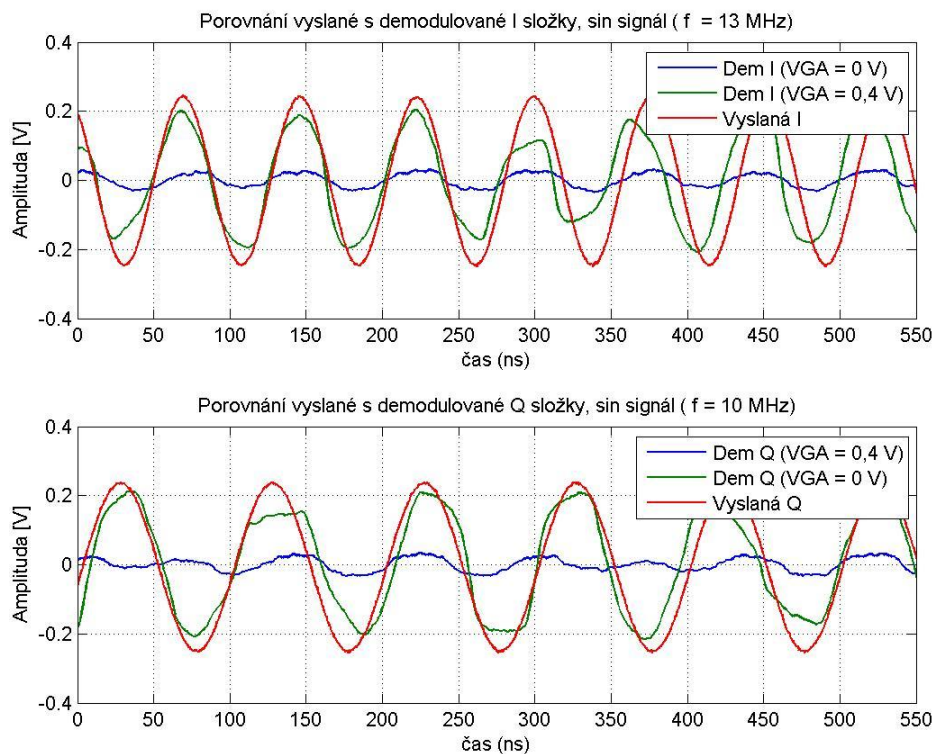
Přímé vysílače a přijímače s vloženým útlumovým členem, zeslabující signál o 30 dB.

- Případ pro I a Q složky sinusové signály o frekvencích 10 MHz a 13 MHz

Spektrum vyslaného a demodulovaného signálu je zobrazeno na Obrázku 66. Porovnání demodulované Q složky při zesílení přijímaného signálu a bez zesílení je zobrazeno na Obrázku 67.



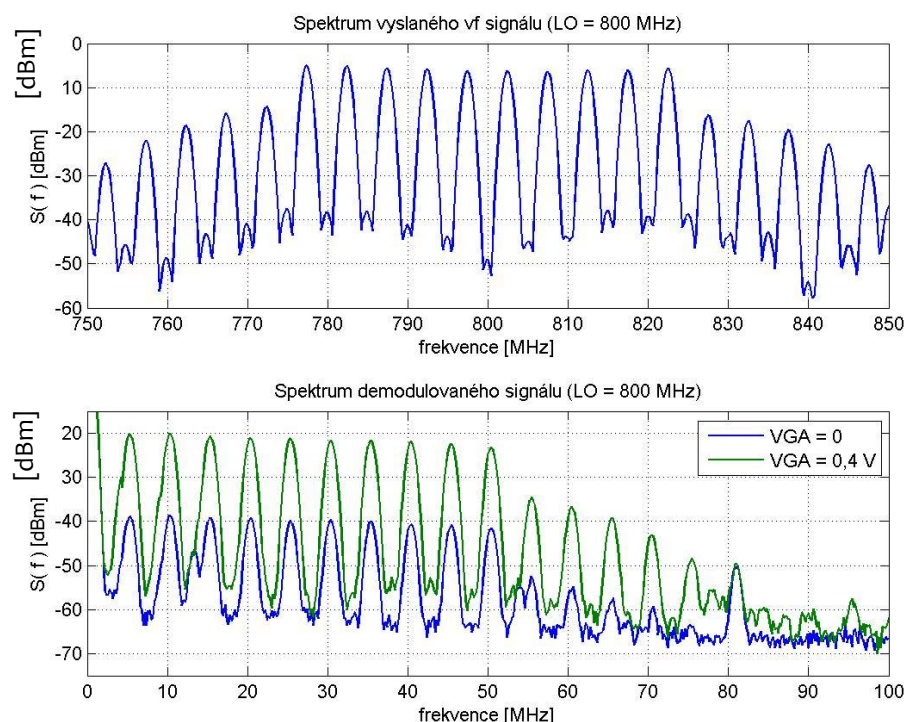
Obrázek 66: Spektrum vyslaného a demodulovaného sinusového signálu, přímé spojení



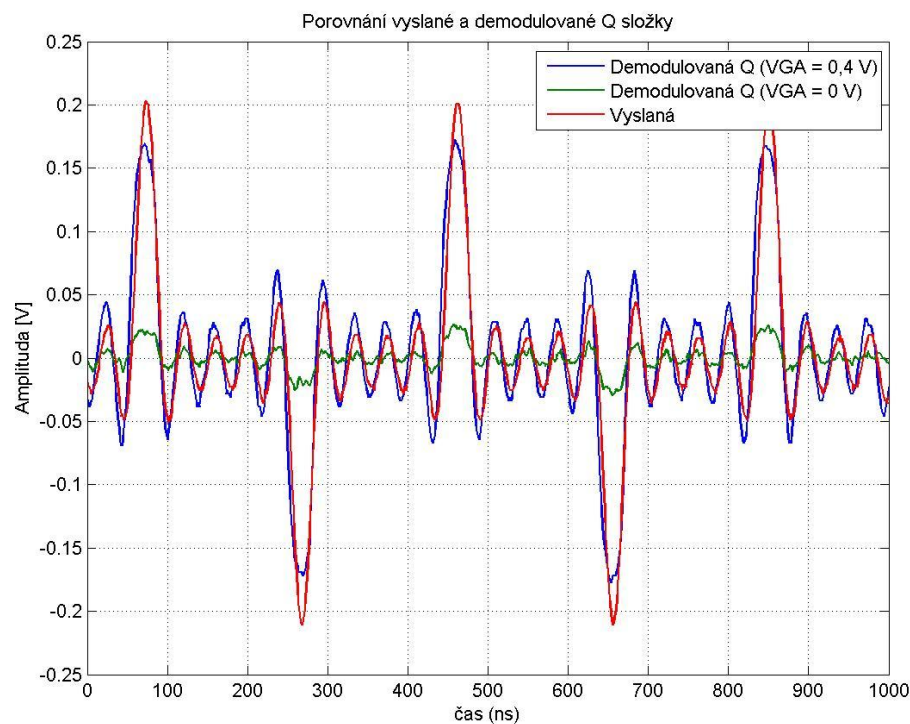
Obrázek 67: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, přímé spojení

- Pro případ širokopásmných I a Q složek

Spektrum přijatého a demodulovaného signálu uvedeno na Obrázku 68 a porovnání vyslané a demodulované Q složky je na Obrázku 69.



Obrázek 68: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, přímé spojení



Obrázek 69: Porovnání vyslané a demodulované Q složky širokopásmového signálu, přímé spojení

B. Demodulace signálu, v případě, jeli vysílač a přijímač v jedné místnosti.

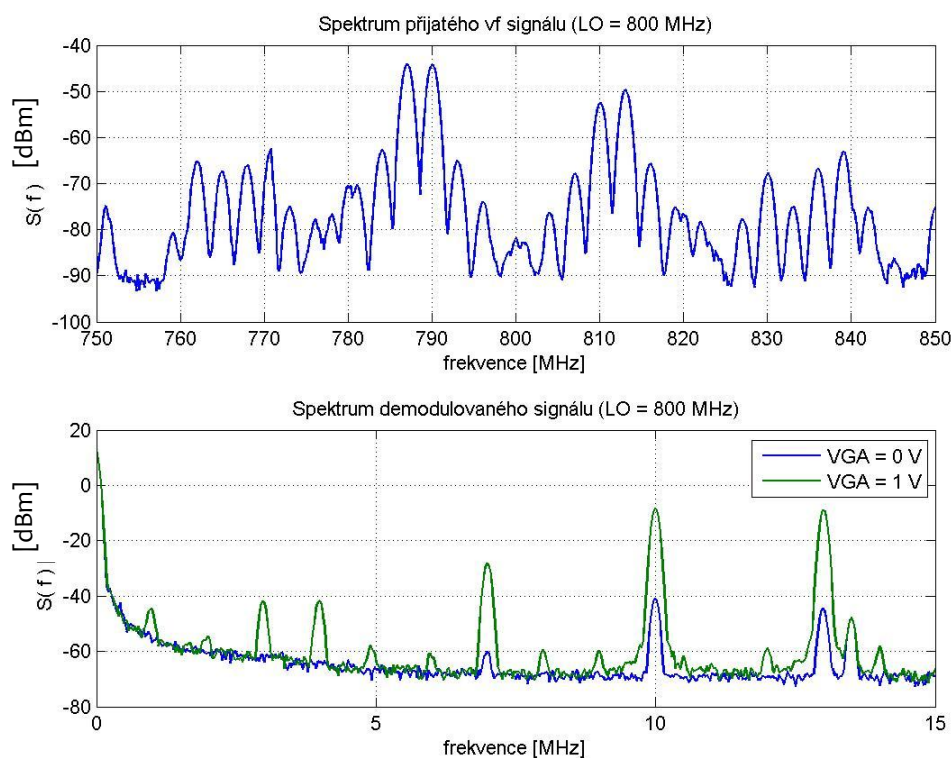
V druhém případě byla proměřena funkčnost spoje na vzdálenost 5 metrů v rámci jedné místnosti.

- Příklad pro I a Q složky sinusové signály o frekvencích 10 MHz a 13 MHz

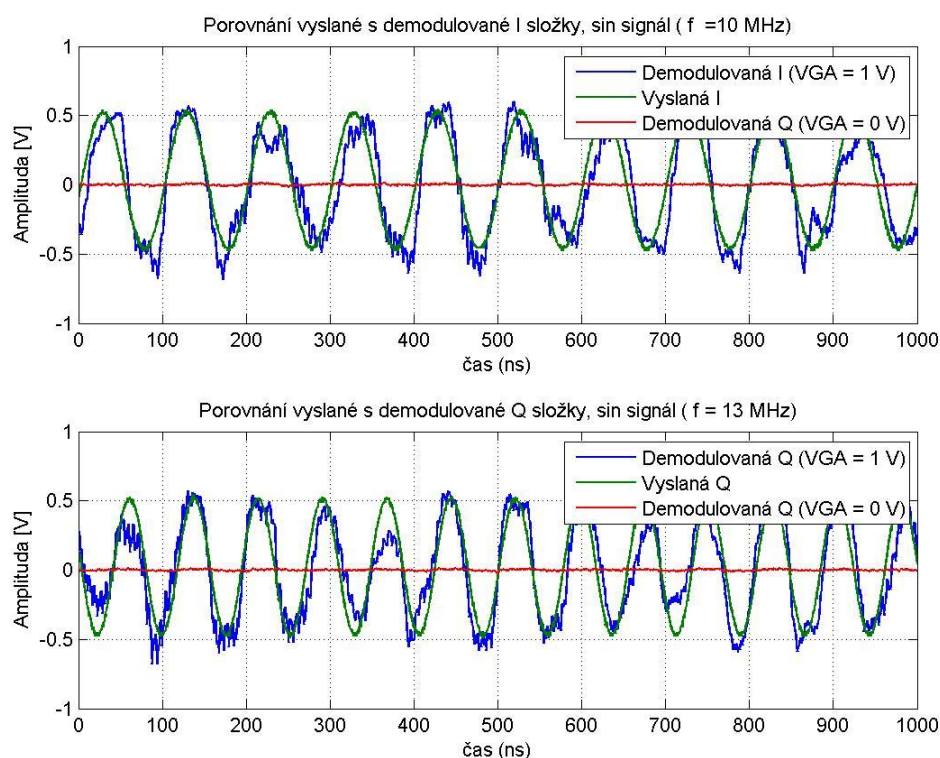
Spektra přijatého vf signálu a demodulovaného signálu bez a se zesílením přijatého signálu jsou zobrazena na Obrázku 70. Postranní laloky ve spektru přijímaného signálu jsou dostatečně potlačeny, taktéž i nosná na frekvenci 800 MHz. Ve spektru demodulovaného signálu jsou již bez zesílení znatelné modulované signály na frekvencích 13 MHz a 15 MHz. S nastaveným zesílením přijatého signálu významně rostou i parazitní harmonické kmitočty.

Výkon demodulovaných IQ složek signálu, vypočítaný z časového průběhu demodulovaného signálu bez zesílení byl -15 dBm, což představuje oproti výkonu vyslaného signálu 13,56 dBm ztrátu ve výkonu o 28,5 dB.

Na Obrázku 71 je porovnání několika period modulovaných I a Q složek signálu, při demodulaci zesíleného signálu. Demodulovaný průběh frekvenčně zcela kopíruje modulované I a Q složky. Amplituda demodulované složky je daná nastavením zesílení přijatého signálu zesilovačem řízeným napětím, nastavení na přibližně 1 V přibližně odpovídalo zesílení o 37 dB.



Obrázek 70: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, po průchodu místností

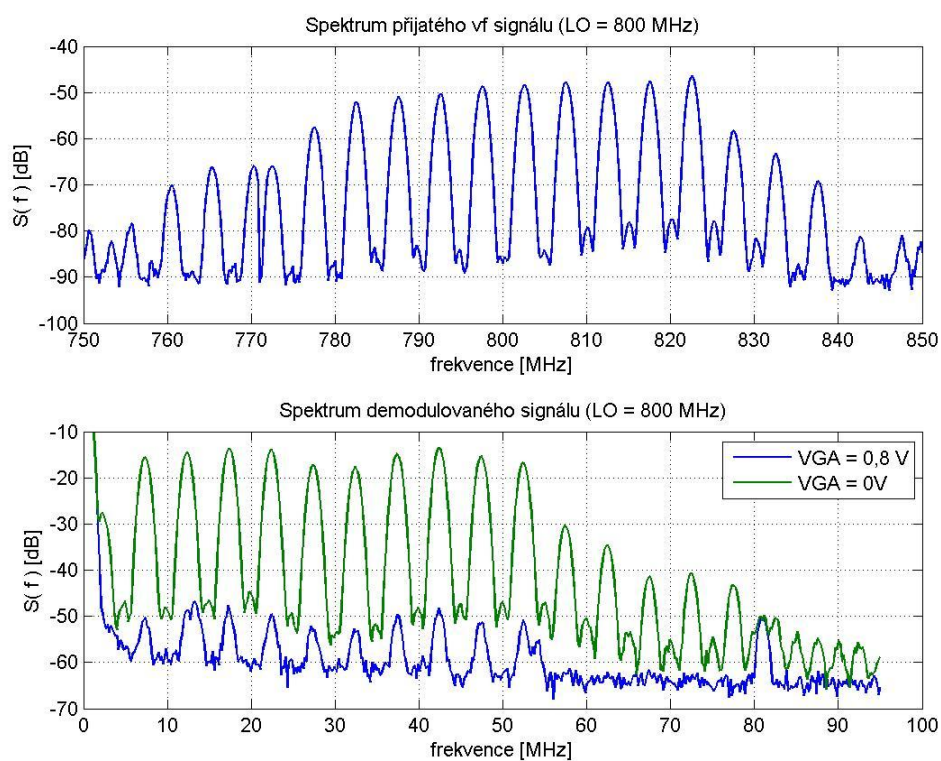


Obrázek 71: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, místnost

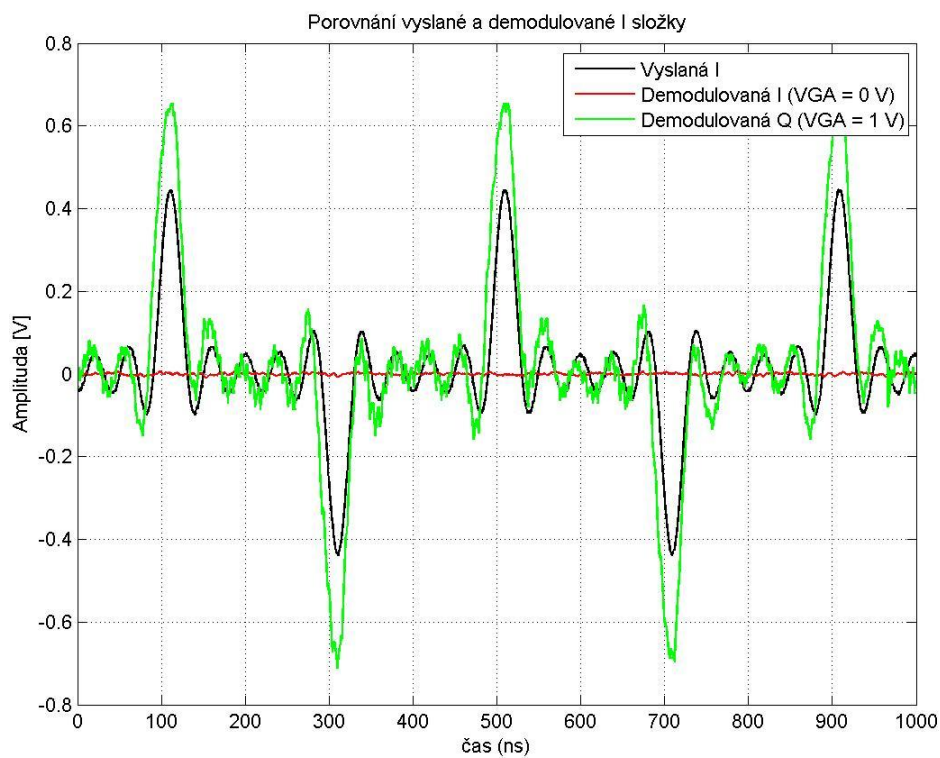
- Pro případ širokopásmných I a Q složek

Zobrazení spekter přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu je na Obrázku 72. Na spektru přijatého signálu je 10 subnosných vln o rozestupu 5 MHz, jejichž amplituda není konstantní, protože vlastnostmi antén dochází k mírnému zkreslení.

Na Obrázku 73 je opět porovnání demodulované a modulované Q složky. Vysílaný výkon byl 5,57 dBm. Zesílení přijatého signálu bylo 34 dB, což představuje nastavení na VGA na hodnotu přibližně 1 V. Z porovnání Q složek, je vidět, že demodulovaný signál velice přesně odpovídá modulovanému signálu.



Obrázek 72: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, místnost.



Obrázek 73: Porovnání vyslané a demodulované Q složky širokopásmového signálu, místnost

C. Demodulace signálu, v případě jedné zdi mezi vysílačem a přijímačem.

Třetí měření spoje bylo provedeno pro případ jedné zdi mezi vysílací a přijímací anténou na vzdálenost 5 metrů.

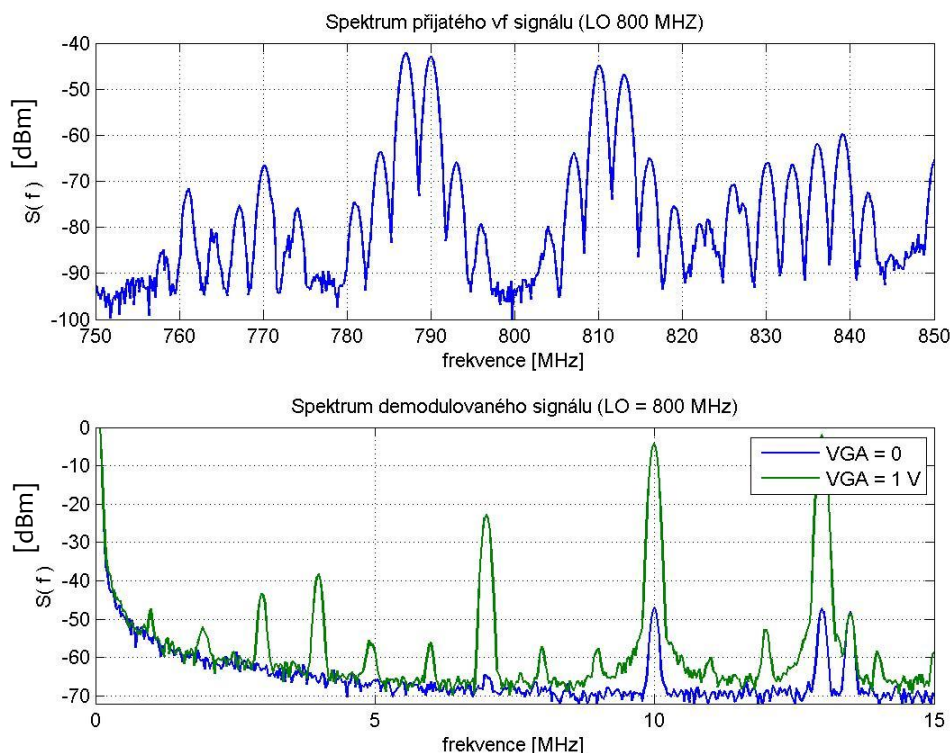
- Příklad pro I a Q složky sinusové signály o frekvencích 10 MHz a 13 MHz

Spektra přijatého vf signálu a demodulovaného signálu bez a se zesílením přijatého signálu jsou zobrazena na Obrázku 74.

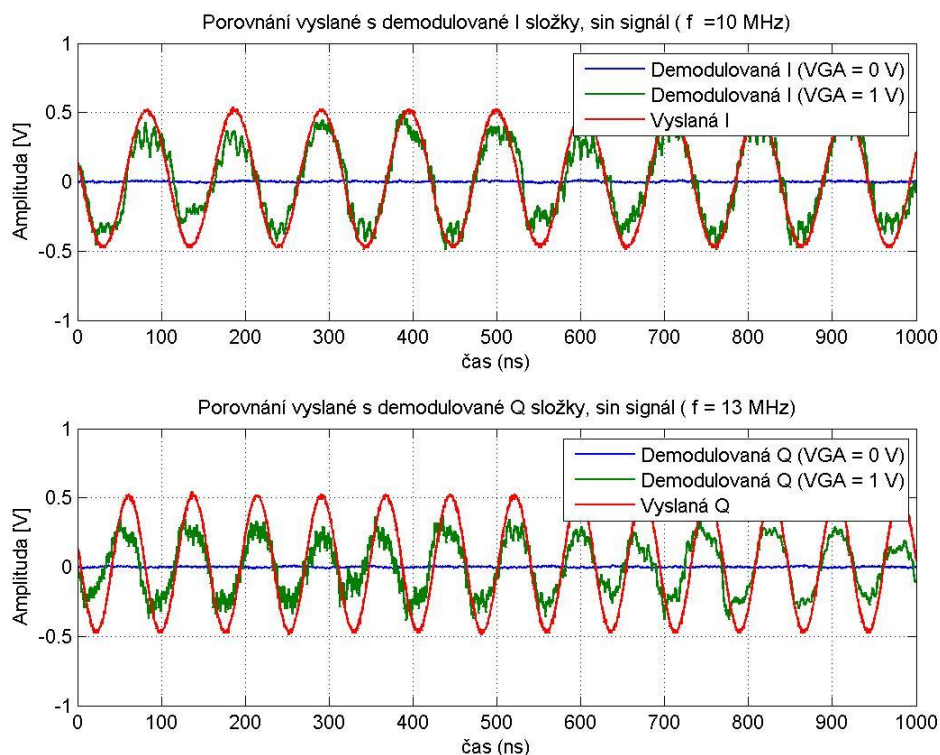
Spektrum přijatého signálu a demodulovaného signálu při nastavení vstupního zesilovače na zisk 36 dB (při nastavení VGA na 1 V). Na spektru demodulovaného signálu lze pozorovat, že zesílením se zvětšují výrazně i harmonické parazitní kmitočty.

Porovnáním I a Q složky po demodulaci zesíleného signálu se složkami modulovanými je zobrazeno na Obrázku 75.

Zesílení Q složky je 33,3 dB a zesílení I složky je 36 dB, nastavením VGA na hodnotu přibližně 1 V. Výkon demodulovaných IQ složek signálu, vypočítaný z časového průběhu demodulovaného signálu bez zesílení byl -18 dBm, což představuje oproti výkonu vyslaného signálu 13,56 dBm ztrátu výkonu o 31,5 dB. Při porovnání s útlumem v místnosti je nárůst o 3 dB. Tento nárůst by přibližně odpovídal útlumu způsobeným průchodem cihlové stěny o šířce do 10 cm.



Obrázek 74: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, jedna zed'

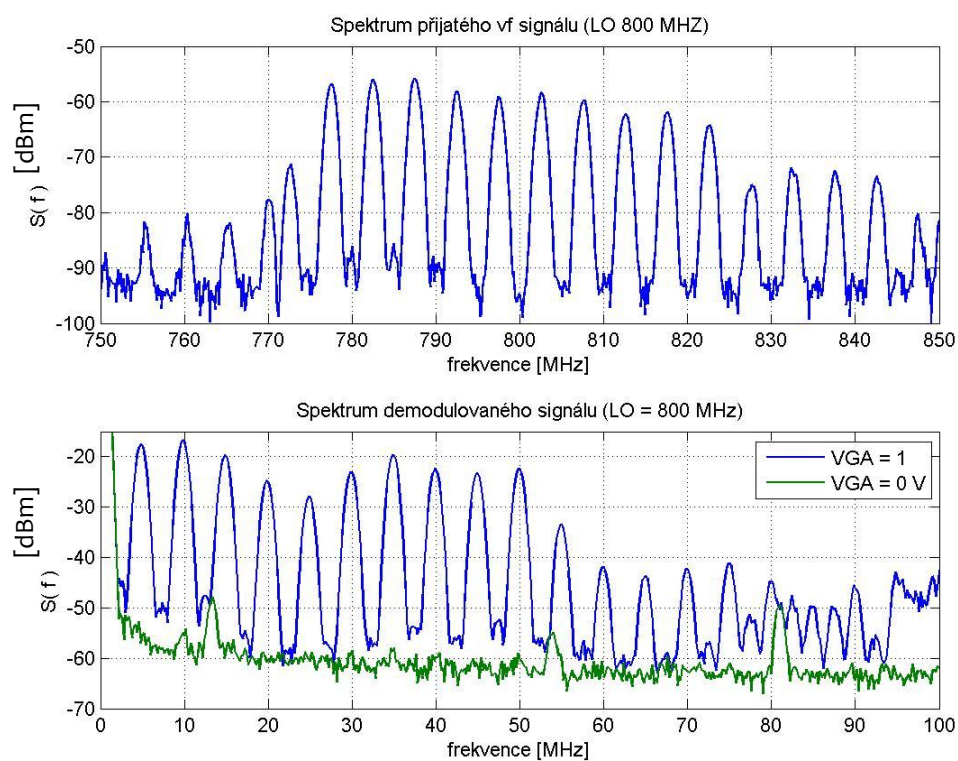


Obrázek 75: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, jedna zeď

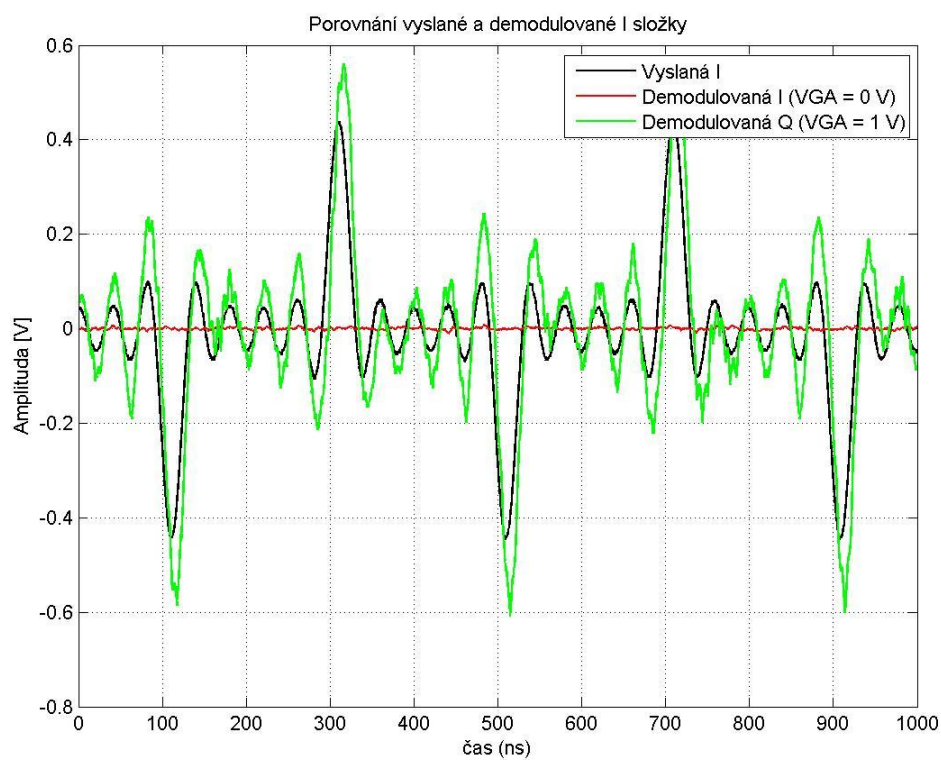
- Pro případ širokopásmných I a Q složek

Zobrazení spekter přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu je na Obrázku 76. Na spektru přijatého signálu je již znatelná nesouměrnost v amplitudách jednotlivých subnosných, která je zapříčiněná jak charakteristikami antén, tak i vlivem frekvenční závislosti překážky.

Na Obrázku 77 je zobrazeno porovnání Q složek, ale v případě průchodu širokopásmového signálu zdí. Demodulovaný signál velice přesně kopíruje modulovanou Q složku. Zesílení přijatého signálu při nastavení VGA na 1 V bylo 37,3 dB.



Obrázek 76: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, po průchodu jednou zdí



Obrázek 77: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky širokopásmového signálu, jedna zeď

D. Demodulace signálu, v případě dvou zdí mezi vysílačem a přijímačem.

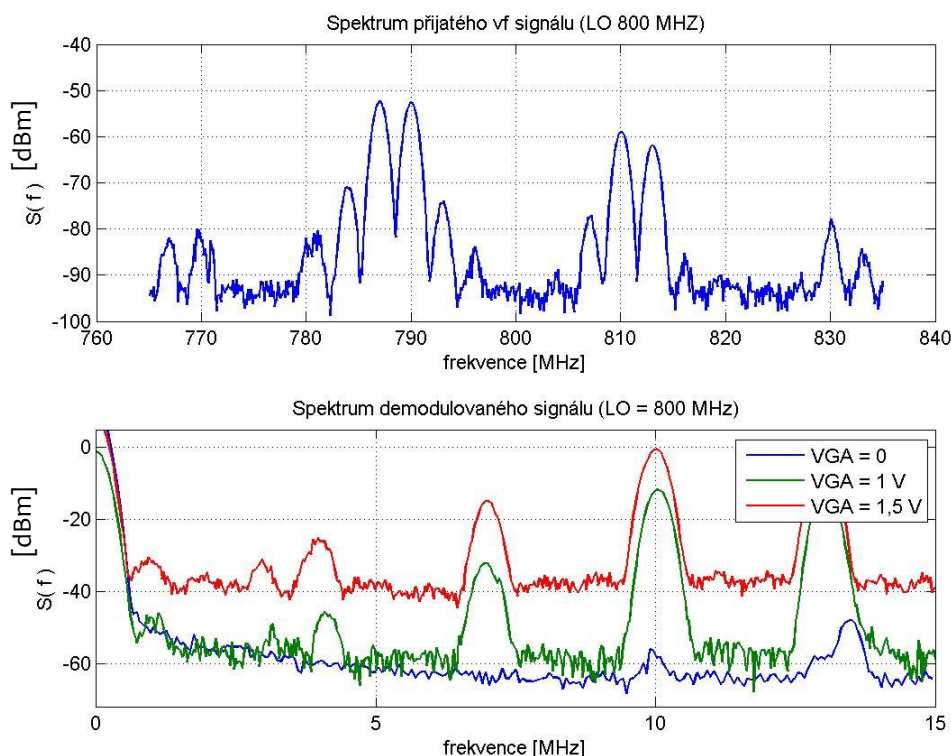
Čtvrtým případem bylo proměření spoje, pro případ dvou zdí mezi vysílací a přijímací anténou, které od sebe byly vzdáleny 15 metrů.

- Případ pro I a Q složky sinusové signály o frekvencích 10 MHz a 13 MHz

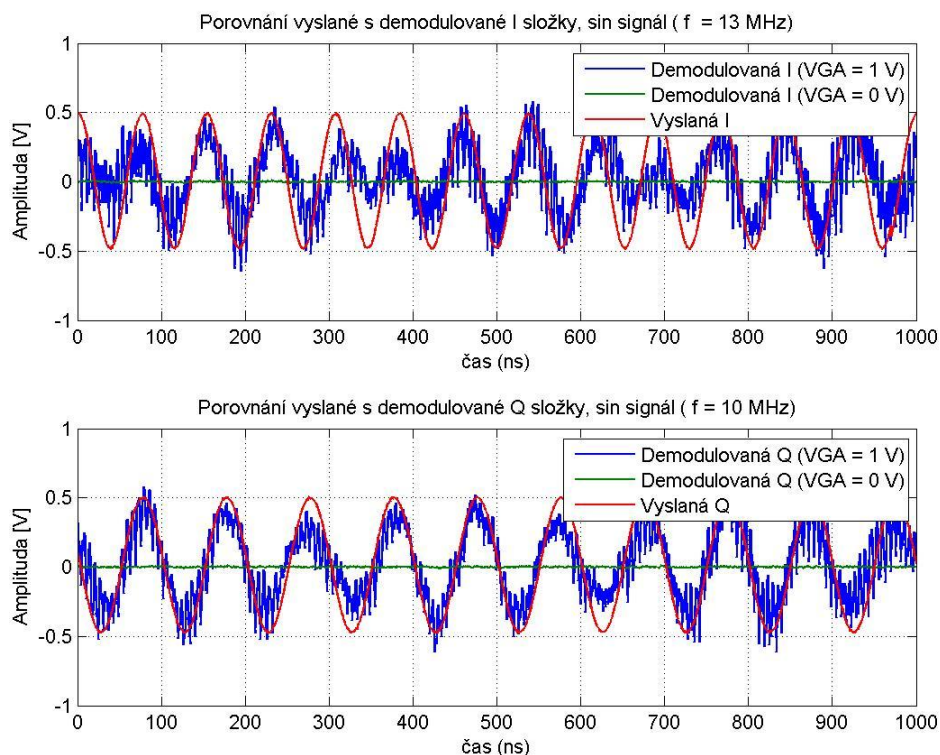
Spektrum přijatého vf signálu a signálu po demodulaci je zobrazeno na Obrázku 78. Přijatý signál byl zesilovačem zesílen o 40 dB, nastavením VGA na hodnotu 1 V. Zesílení o 60 dB bylo docíleno při nastavení na 1,5 V a na osciloskopu bylo pro tento případ nastaveno RF Attenuation na 20 dB.

Porovnáním IQ složek sinusových signálu je na Obrázku 79 vidět mírné kolísání amplitudy a proti demodulovaným složkám při průchodu jednou zdí jsou více zatíženy šumem.

Výkon demodulovaných IQ složek signálu, vypočítaný z časového průběhu demodulovaného signálu (při VGA = 0 V) byl -19,5 dBm, což představuje oproti výkonu vyslaného signálu 13,56 dBm ztrátu výkonu o 33 dB.



Obrázek 78: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, po průchodu dvěma zdmi

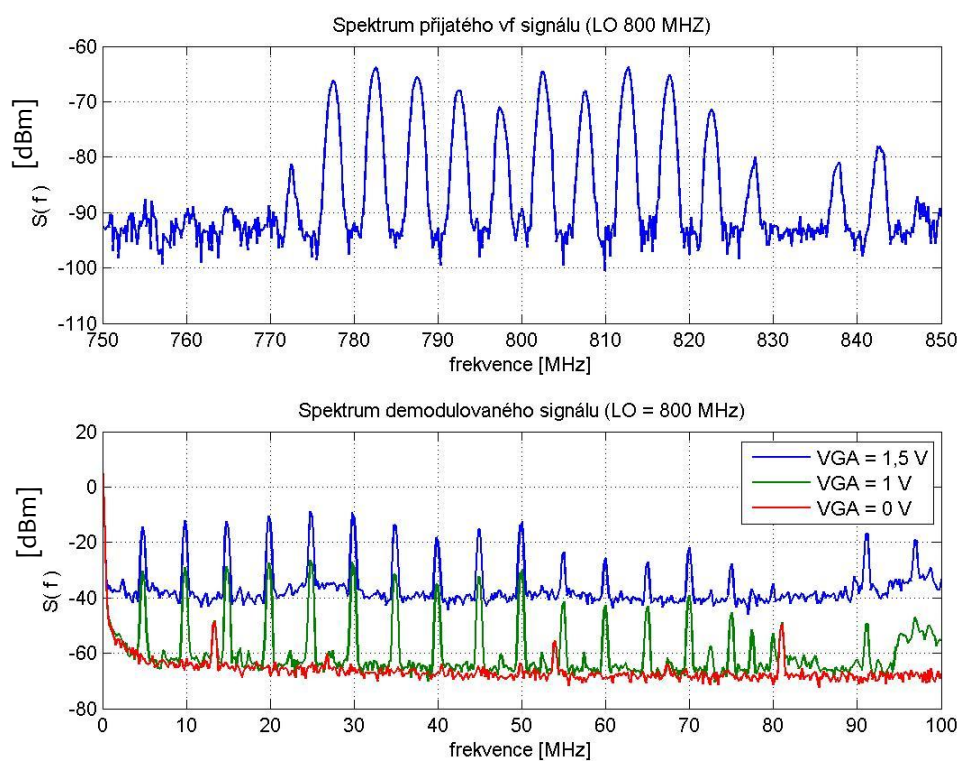


Obrázek 79: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, dvě zdi

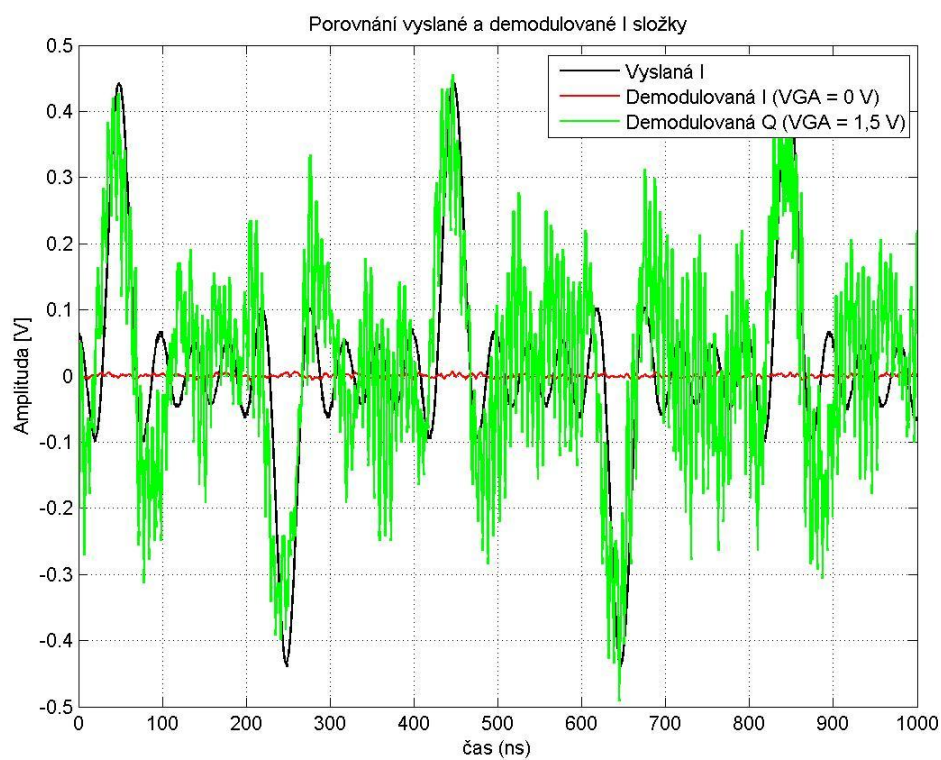
- Pro případ širokopásmných I a Q složek

Zobrazení spekter přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu je na Obrázku 80. Na spektru přijatého signálu je již znatelná nesouměrnost v amplitudách jednotlivých subnosných, která je zapříčiněná jak charakteristikami antén, tak i vlivem frekvenční závislosti překážek.

Na Obrázku 81 je zobrazeno porovnání Q složek, ale v případě průchodu širokopásmového signálu dvěma zdi je již zkreslení výrazné. Zesílení přijatého signálu zesilovačem na vstupu demodulátoru bylo o 36,2 dB



Obrázek 80: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, po průchodu dvěma zdi



Obrázek 81: Porovnání vyslané a demodulované I složky širokopásmového signálu, dvě zdi

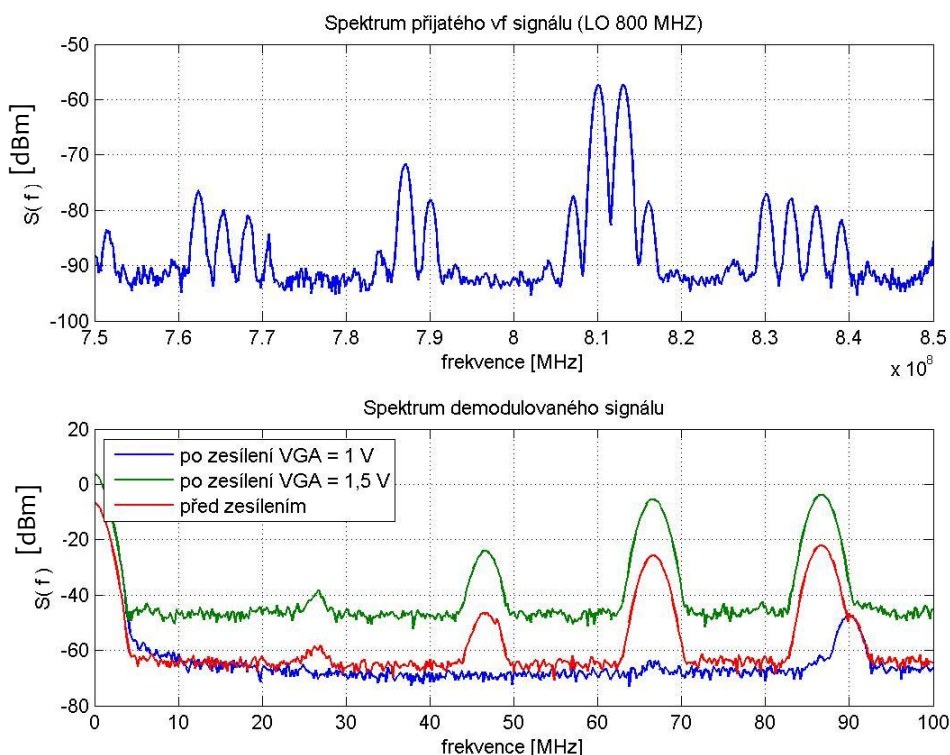
E. Demodulace signálu, v případě průchodu stropem

Posledním případem bylo proměření spoje, pro případ průchodu stropem. Vysílací a přijímací antény byly od sebe vzdáleny 3 metry.

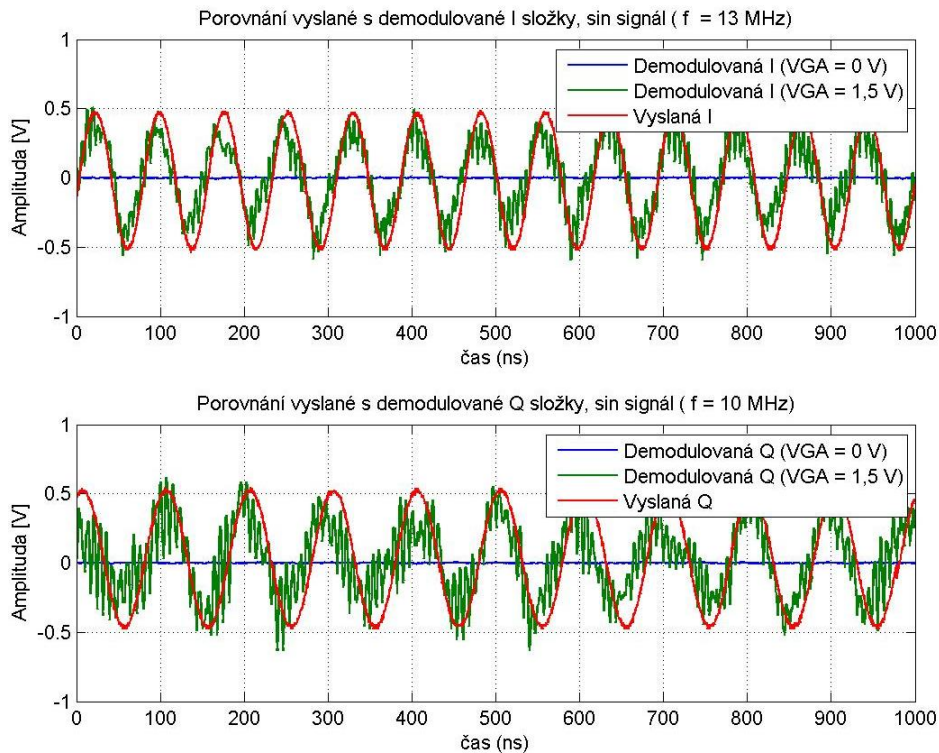
- Příklad pro I a Q složky sinusové signály o frekvencích 10 MHz a 13 MHz

Spektrum přijatého vf signálu a signálu po demodulaci je zobrazeno na Obrázku 82. Přijatý signál byl zesilovačem zesílen o 40 dB, nastavením VGA na hodnotu 1 V. Zesílení o 60 dB bylo docíleno při nastavení na 1,5 V a na osciloskopu bylo pro tento případ nastaveno RF Attenuation na 20 dB.

Porovnáním IQ složek sinusových signálu je na Obrázku 83 vidět mírné kolísání amplitudy. Výkon demodulovaných IQ složek signálu, vypočítaný z časového průběhu demodulovaného signálu (při VGA = 0 V) byl -22,5 dBm, což představuje oproti výkonu vyslaného signálu 13,56 dBm ztrátu výkonu o 36 dB.



Obrázek 82: Spektrum přijatého a demodulovaného sinusového signálu, po průchodu podlažím

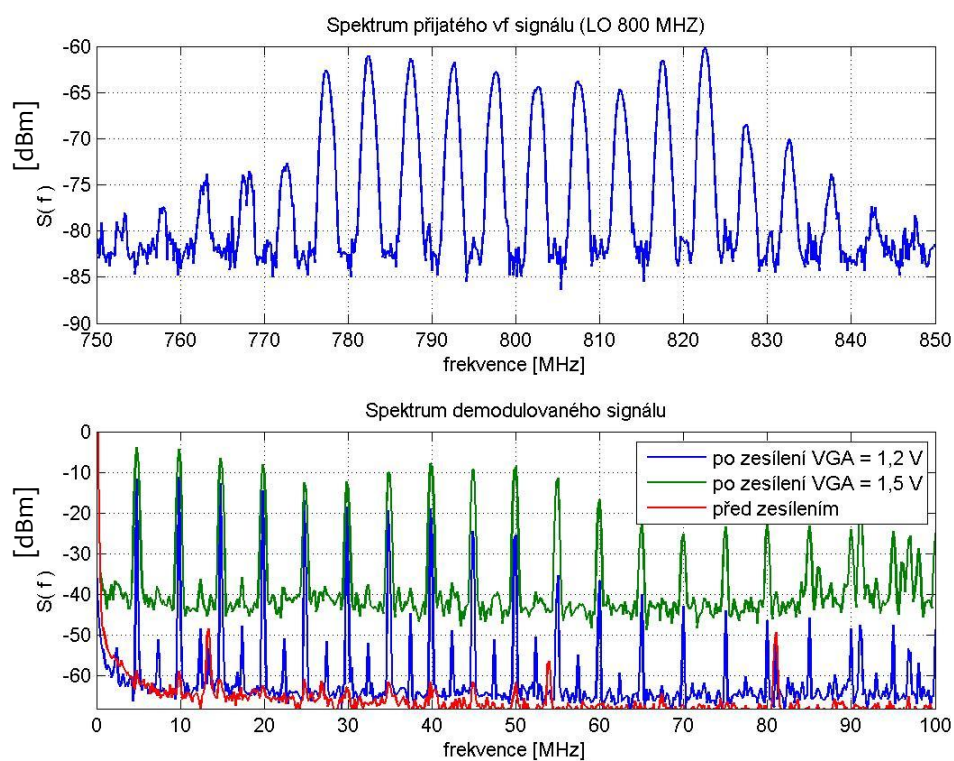


Obrázek 83: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky sinusového signálu, podlaží

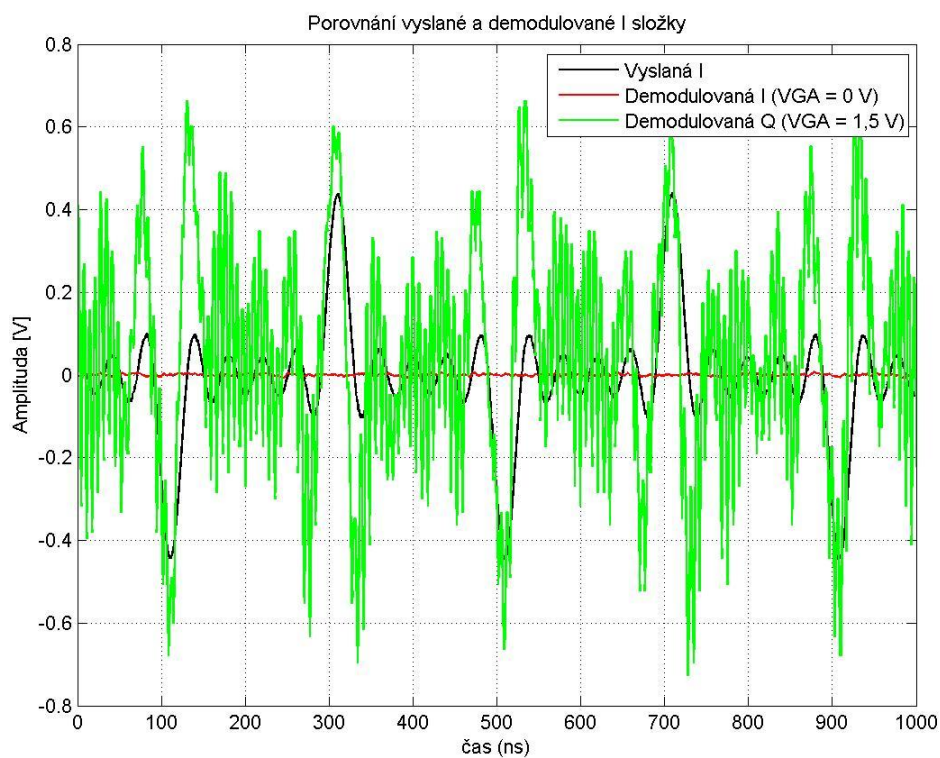
- Pro případ širokopásmných I a Q složek

Zobrazení spekter přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu je na Obrázku 84. Na spektru přijatého signálu je již znatelná nesouměrnost v amplitudách jednotlivých subnosných, která je zapříčiněná jak charakteristikami antén, tak i vlivem frekvenční závislosti překážky.

Na Obrázku 85 je zobrazeno porovnání Q složek, ale v případě průchodu širokopásmového signálu dvěma zdi je již zkreslení výrazné. Zesílení přijatého signálu zesilovačem na vstupu demodulátoru bylo o 41 dB



Obrázek 84: Spektrum přijatého a demodulovaného širokopásmového signálu, po průchodu podlažím



Obrázek 85: Porovnání vyslané a demodulované I a Q složky širokopásmového signálu, podlaží

Závěr z měření pro zapojení ADL 5370 a ADL 5605

Měření spoje proběhlo pro pět variant průchodu signálu různými překážkami.

První případ, pro demodulaci vysílaného širokopásmového signálu s výkonem 5,57 dBm a sinusového signálu s výkonem 13,56 dBm, oba signály zeslabeny vloženým útlumovým členem o 30 dB, se podařila a demodulované průběhy signálu odpovídaly vyslaným průběhům.

Pro případ průchodu signálu v místnosti a při průchodu jednou zdí, kdy vysílací a přijímací anténa byla v obou případech od sebe ve vzdálenosti 5 metrů, byla demodulace úspěšná a podařilo se rekonstruovat modulované složky jak pro situaci sinusového signálu, tak i pro širokopásmový signál.

V případě průchodu signálu přes dvě zdi, kdy vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou byla 15 metrů, pro případ sinusového signálu se podařilo velice věrně rekonstruovat IQ složky vysílaného signálu, ale pro případ širokopásmového signálu došlo již mírnému zkreslení.

Situace pro šíření signálu skrz podlaží dopadla dle očekávání nejhůře. Železobetonový strop má pro signály velký útlum, což se projevilo při demodulaci a přijímaný signál byl značně zeslaben a demodulované složky jsou velice silně zkreslené.

Vysílaný výkon pro širokopásmový signál byl dostatečný pro případ šíření signálu v místnosti a přes jednu zeď, pro průchod dvěma zdmi a podlažím by bylo zapotřebí zvýšení výkonové úrovně.

Vysílaný výkon pro sinusový signál byl dostatečný pro všechny varianty průchodu vysílaného signálu.

Dále by naměřené charakteristiky výrazně zlepšilo přidáním filtru typu pásmová propust na vstup přijímače, která se ale nestihla vyrobit do doby měření radiového spoje.

Závěr

Cílem první kapitoly byl popis vybraných používaných širokopásmových systémů WiMAX a WIFI. Pro obě služby byly vypsány základní parametry napříč používanými standarty. Dále byla detailněji popsána modulace OFDM a její využití v rámci systému WiMAX.

V druhé kapitole jsem se věnoval návrhu vlastního UWB spoje. Nejdříve je rozebrána motivace pro návrh UWB spoje, který by měl být součástí radiového systému určování polohy v budovách, kdy vysílač je umístěn uvnitř budovy a několik přijímačů kolem budovy a řešený vysílač a přijímač tvoří jednu z těchto cest. Dále je rozebrána situace pro šíření signálu v budovách, která je daleko komplikovanější, než tomu je při šíření volným prostorem. V budovách dochází k vícecestnému šíření, kdy na překážce dochází, za jistých předpokladů k odrazům a signál tak putuje k přijímači po více cestách, ale jinou amplitudou a fází, to způsobuje kolísání úrovně signálu v místě přijímače, která zejména v úzkopásmových systémech zcela znemožňuje přenos. Proto musely být vhodně nastaveny parametry spoje: Výběr kmitočtového pásma, výběr šířky pásma a vysílacího výkonu, na to základě parametrických předpokladů pro využití spoje a poznatků pro šíření signálu v budovách.

Podle stanovených parametrů byly vybrány součástky pro konkrétní zapojení vysílače a přijímače. Veškeré součástky byly zakoupeny od firmy Analog Devices, která měla nejširší výběr, a ke všem vybraným součástkám byly dostupné vývojové desky.

K přijímači byl dále navržen příčkový filtr typu pásmová propust a to pro dvě frekvenční pásma. První od 400 MHz do 600 MHz a druhé od 700 MHz do 900 MHz a to v provedeních jako 5 a 7 stupňové s výpočtem pro jednotlivé součástky filtru.

Ve třetí kapitole jsou popsána sestavená pracoviště pro proměření parametrů vybraných součástek: modulátoru ADL 5370, demodulátoru ADRF 6850 a zesilovačů ADL 5324, ADL 5605 a nízkošumového zesilovače ADL 5521. Následně bylo i sestaveno pracoviště pro vysílací a přijímací stranu a poté byl radiový spoj testován pro různé konfigurace průchodu vyslaného signálu. Závěry z těchto měření jsou uvedeny v odst. 3.4.5.

Literatura

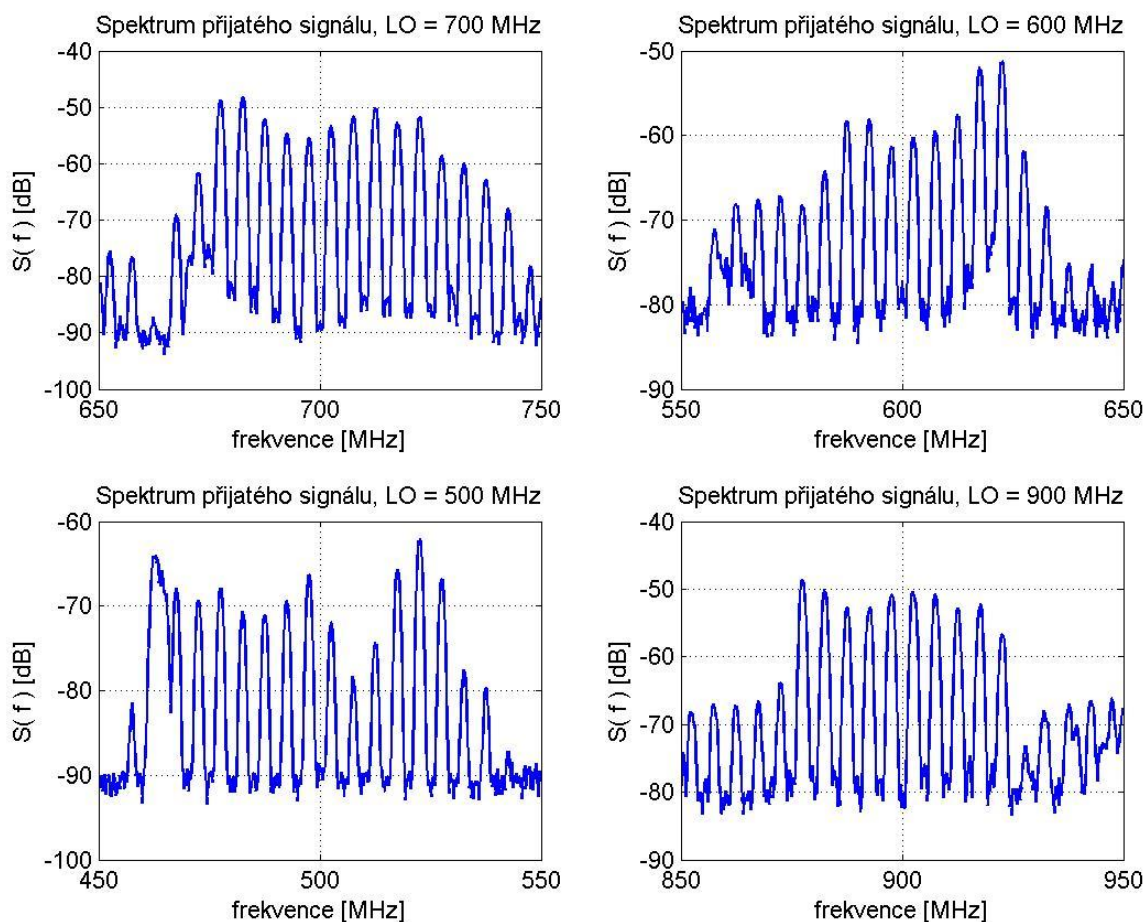
- [1] Lauterbach M., Pola M., Zaplatilek L. a Bezoušek P.: Accuracy of spectral analysis methods for precision indoor positioning system. *The 10th International Conference on Digital Technologies 2014* [online]. IEEE, 2014, s. 217-220 [cit. 2014-05-26]. DOI: 10.1109/DT.2014.6868716. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6868716>
- [2] Bezoušek P., Šedivý P.: *Radarová technika*, ČVUT Praha, 2004. ISBN 80-01-03036-9
- [3] Andrews G.J., Ghosh A., Muhamed R.: *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, 2007. ISBN 0-13-222552-2
- [4] *EMF shielding by building materials* [online]. 2014 [cit. 2014-06-28]. Dostupný z WWW: < http://www.eiwellspring.org/tech/Shielding_by_building_materials.pdf >
- [5] David M. Pozar: *Microwave Engineering*. 4th edition. ISBN 978-0-470-63155-3
- [6] Schejbal V., Bezoušek P., Čermák D., Němec Z., Fišer O., Hájek M.: *UWB Propagation through Walls*. *Radioengineering*, 15, 1, s. 17-24, (2006) 1210-2512.
- [7] Pechač P, Zvánovec S.: *Základy šíření vln pro plánování pozemních radiových spojů*. Praha: 1. vydání, BEN – technická literatura, 2007. 200s ISBN 978-80-7300-223-7
- [8] Pechač P.: *Šíření vln v zástavbě*. BEN – technická literatura, Praha 2005, 1. vydání ISBN 80-7300-186-1
- [9] Žalud V.: *Moderní radiotechnika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 767s. ISBN 80-7300-132-2
- [10] Žalud V, Dobeš J.: *Moderní radioelektronika*, BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-86056-47-3
- [11] Dostál T., Axman V.: *Elektrické filtry*, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT. Brno.

- [12] Raida Z., kolektiv autorů.: *Multimediální učebnice*, Elektromagnetické vlny a mikrovlnná technika. Dostupný z WWW:
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [13] ADRF6850 Data Sheet, Analog Devices. Dostupný z WWW:
<http://www.analog.com/en/rfif-components/modulatorsdemodulators/adrf6850/products/product.html>
- [14] ADL5370 Data Sheet, Analog Devices. Dostupný z WWW:
<http://www.analog.com/en/rfif-components/modulatorsdemodulators/adl5370/products/product.html>
- [15] ADL5324 Data Sheet, Analog Devices. Dostupný z WWW:
<http://www.analog.com/en/rfif-components/rfif-amplifiers/adl5324/products/product.html>
- [16] ADL5521 Data Sheet, Analog Devices. Dostupný z WWW:
<http://www.analog.com/en/rfif-components/rfif-amplifiers/adl5521/products/product.html>
- [17] ADL5605 Data Sheet, Analog Devices. Dostupný z WWW:
<http://www.analog.com/en/rfif-components/rfif-amplifiers/adl5605/products/product.html>
- [18] Bezoušek P.: *Signály a soustavy – přednášky*. Univerzita Pardubice 2012
- [19] Bezoušek P.: *Pokročilé analogové obvody – přednášky*. Univerzita Pardubice 2013
- [18] Bezoušek P.: *Modulátory a demodulátory – přednášky*. Univerzita Pardubice 2013
- [20] Bezoušek P.: *Technika rádiových komunikačních systémů – přednášky*. Univerzita Pardubice 2012
- [21] Bezoušek P.: *Zpracování signálu v digitálních komunikacích – přednášky*. Univerzita Pardubice 2013
- [22] Němec Z.: *Sdělovací technika – přednášky*. Univerzita Pardubice 2012
- [23] Němec Z.: *Vybrané rádiové systémy – přednášky*. Univerzita Pardubice 2011
- [24] Dobrovolný M.: *Počítačové sítě – přednášky*. Univerzita Pardubice 2012
- [25] ANT-DB1-HDP-TNC Data Sheet, Linx technologies. Dostupný z WWW:
<http://cz.mouser.com/ProductDetail/Linx-Technologies/ANT-DB1-HDP-TNC/?qs=K5ta8V%252bWhtbdcTy8V0nrA>
- [26] Mike Derby.: *Indoor Wireless Path Loss*. Dostupné z WWW:
<http://security-today.com/articles/2012/04/01/indoor-wireless-path-loss.aspx>

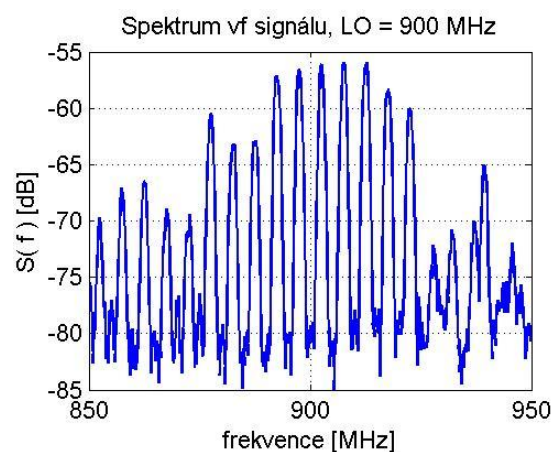
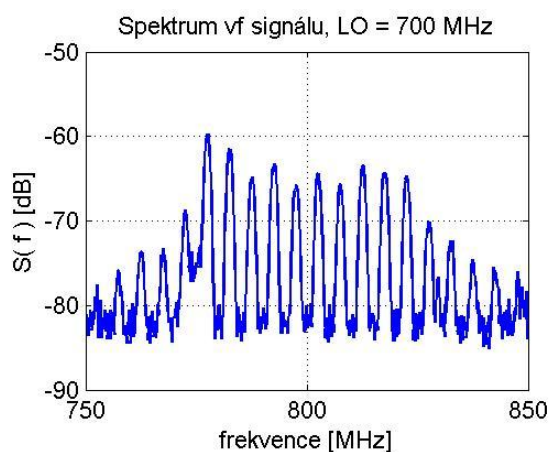
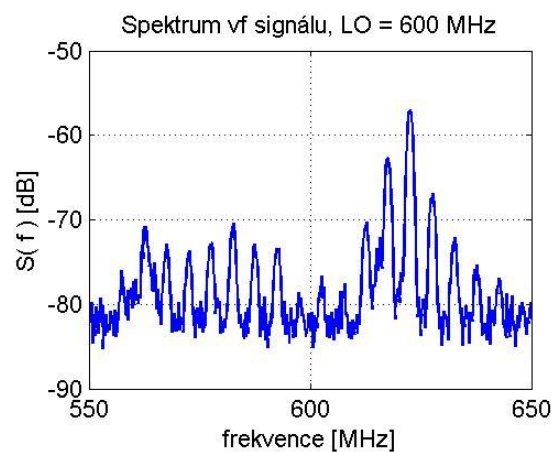
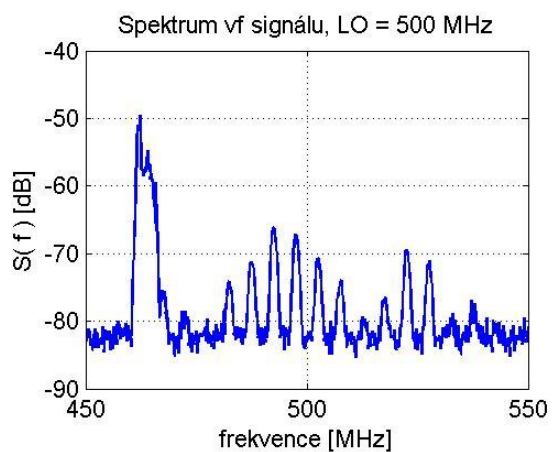
Příloha A – Spektra přijatých širokopásmových signálů pro různé frekvence

Zobrazení spektrů přijatých signálů pro různé frekvence místního oscilátoru pro zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 pro případ šíření signálu v místnosti.

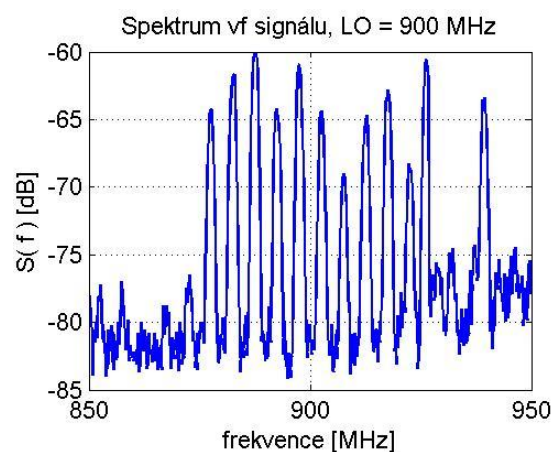
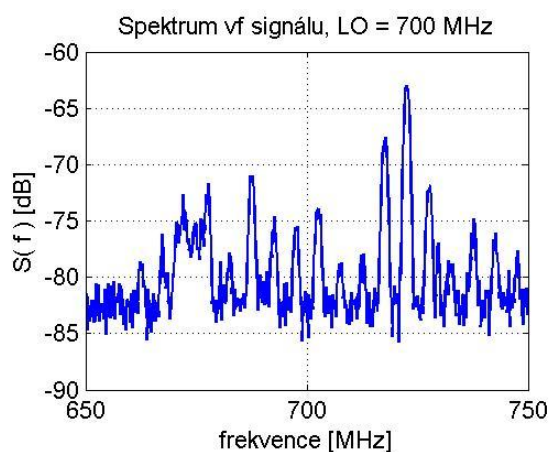
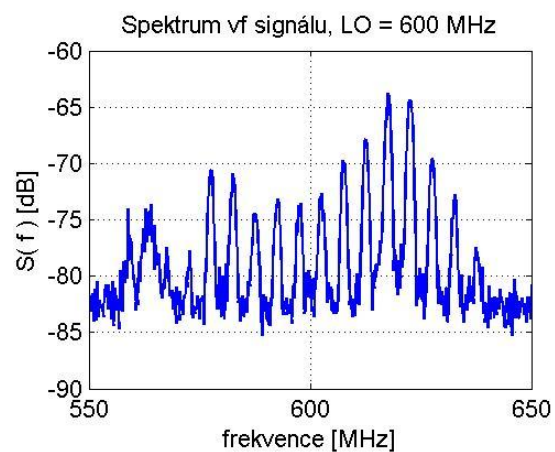
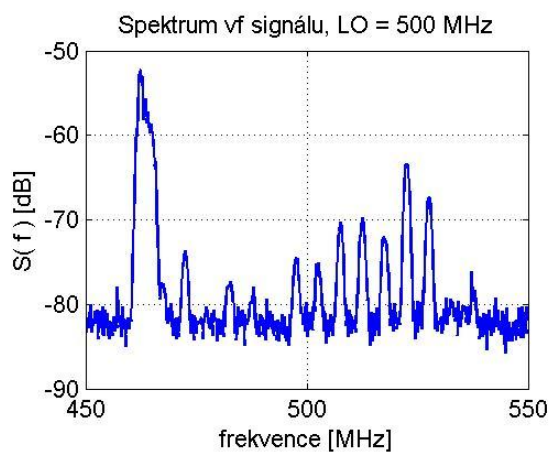
Ze spektru je vidět velká amplitudová nelinearita jednotlivých nosných pro frekvence místního oscilátoru pro frekvence nižší než 800 MHz, pro frekvenci LO = 900 MHz dochází k rušení službou GSM na frekvencích 935 MHz až 960 MHz.



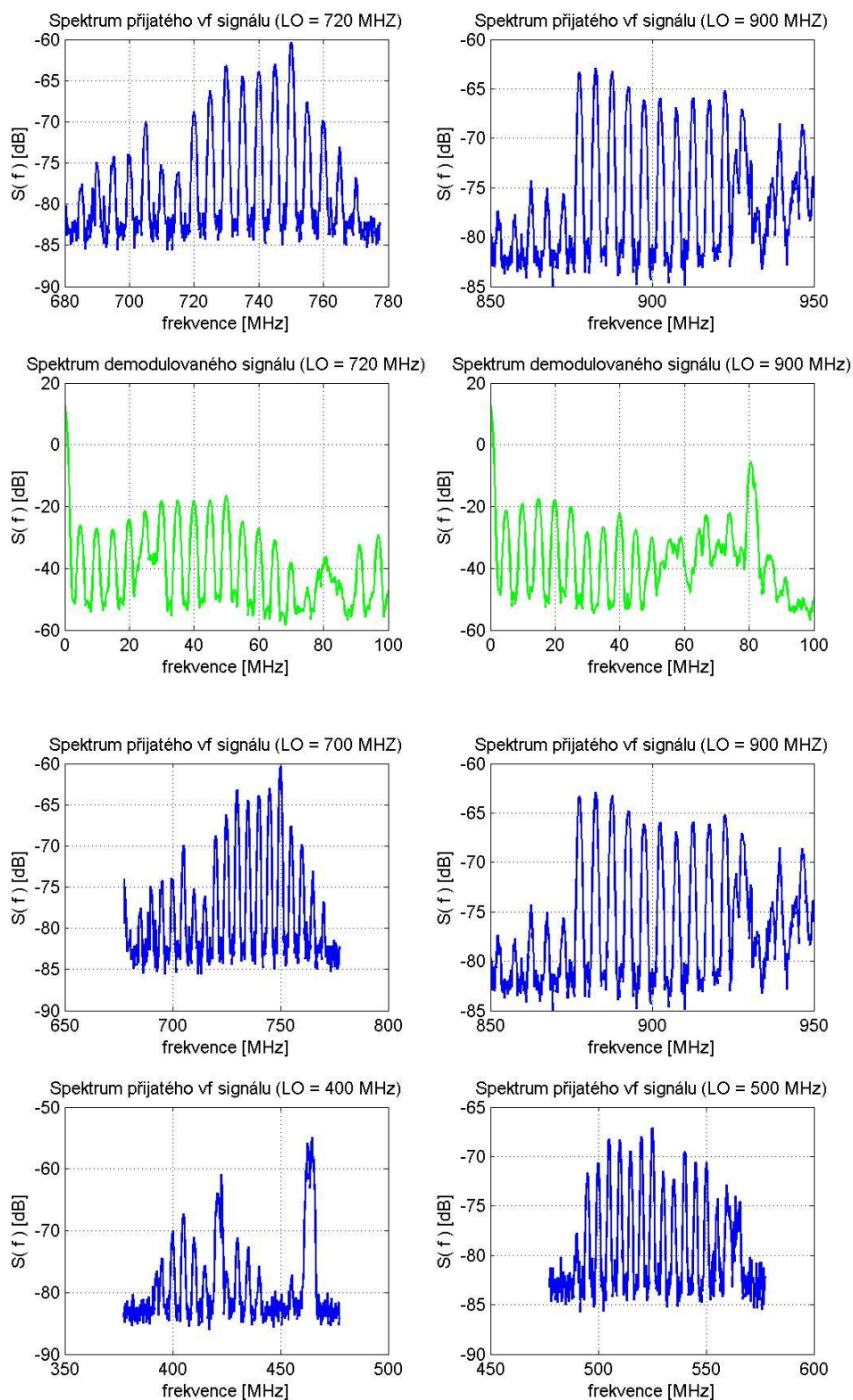
Zobrazení spekter přijatých signálů pro různé frekvence místního oscilátoru pro zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 pro případ šíření signálu přes zeď.



Zobrazení spekter přijatých signálů pro různé frekvence místního oscilátoru pro zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 pro případ šíření signálu přes dvě zdi.



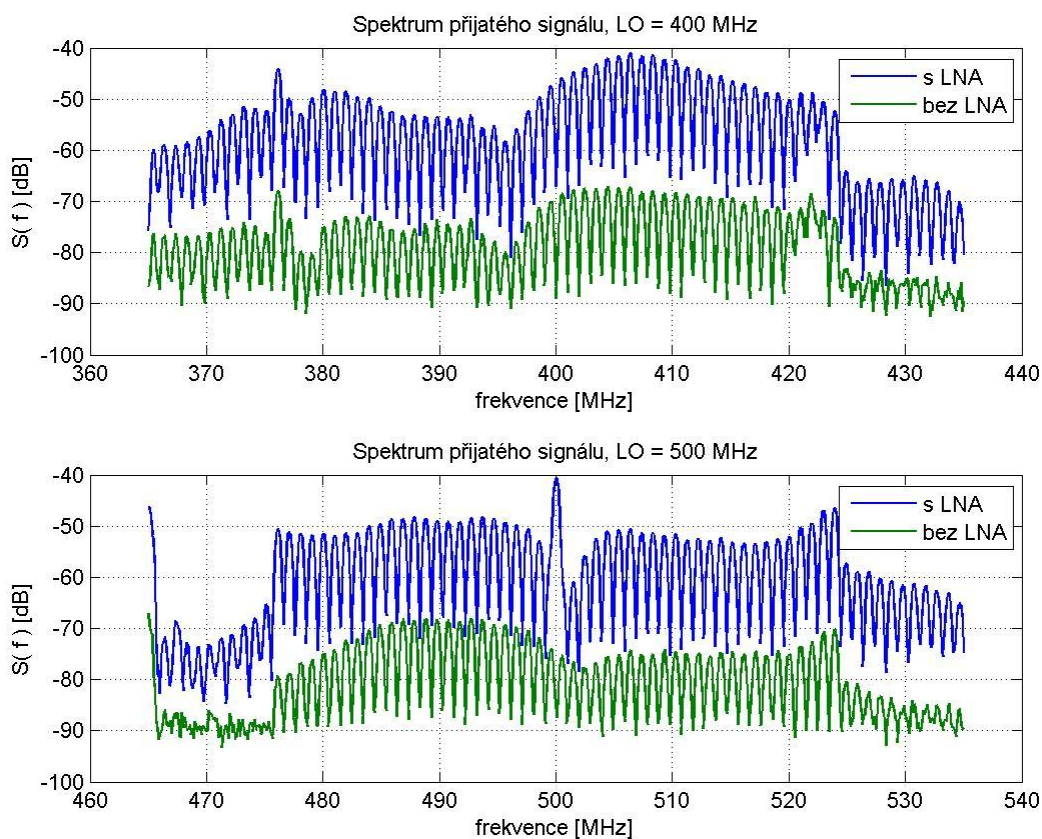
Zobrazení spekter přijatých signálů pro různé frekvence místního oscilátoru pro zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5605 pro případ šíření signálu přes podlaží.

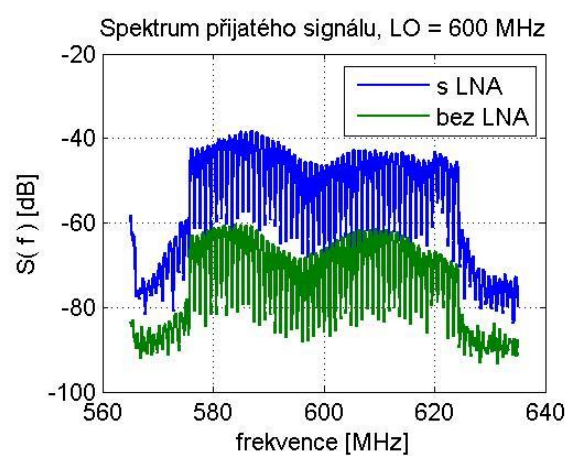
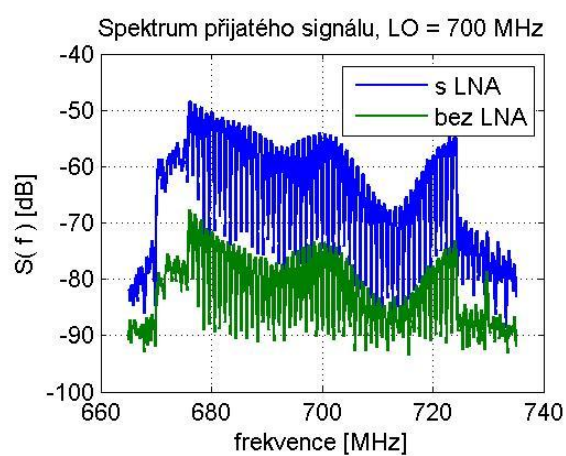
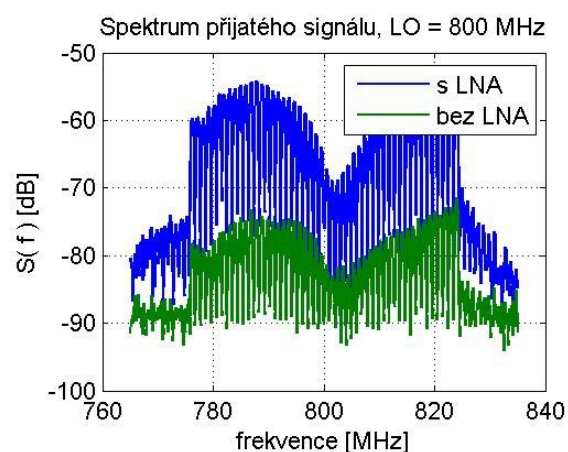
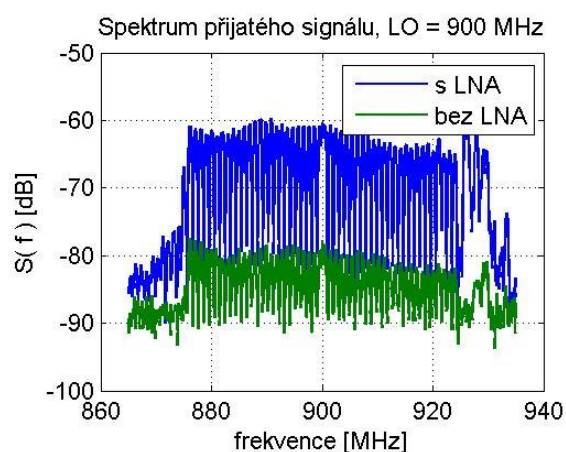


Zobrazení spekter přijatých signálů pro různé frekvence místního oscilátoru pro zapojení modulátoru ADL 5370 a zesilovače ADL 5324 pro případ šíření signálu v místnosti.

Navržen pro řešení spoje v pásmu okolo 500 MHz. Pro toto pásmo jsou nevhodné parametry dostupných antén. Podle parametrů antén v Tabulce 25, mají doporučené frekvenční pásmo nad 800 MHz, kde vysílací výkon zapojení ADL 5370 a ADL 5324 je již výrazně menší.

Ze spekter je vidět velká amplitudová nelinearita jednotlivých nosných pro frekvence místního oscilátoru pro frekvence nižší než 800 MHz, pro frekvenci LO = 900 MHz dochází k rušení službou GSM na frekvencích 935 MHz až 960 MHz.





Příloha B – Tabulkové hodnoty pro různé aproximace

Pro návrh pásmové propusti byly zkoušeny různé aproximace (Besselova, Butterworthova, Čebyševova) a vzájemným porovnáním přenosových charakteristik byla vybrána aproximace, která nejlépe vyhovovala našim požadavkům.[11]

Tabulkové hodnoty pro Besselovu aproximaci										
$K_{ZVL} 3 \text{ dB}$										
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
2	0,5746	2,1444								
3	0,3369	0,9690	2,1999							
4	0,2330	0,5714	1,0798	2,2362						
5	0,2743	0,9203	2,5639	0,6954	0,3932					
6	0,1864	0,5794	1,0966	2,5196	0,6023	0,4138				
7	0,1841	0,4766	0,7337	0,7824	2,5815	0,8424	0,2401			
8	0,1257	0,3722	0,5898	0,7400	0,9588	2,5869	0,6805	0,2952		
9	0,1581	0,4593	0,6389	0,7196	2,5911	0,9449	0,5759	0,4112	0,1436	
10	0,0885	0,2609	0,4180	0,5508	0,5655	0,7642	0,9094	2,5841	0,6814	0,2477

Tabulkové hodnoty pro Butterworthovu aproximaci										
$K_{ZVL} 3 \text{ dB}$										
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀
2	1,4142	1,4142								
3	1,000	2,000	1,000							
4	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654						
5	0,6180	1,6180	2,000	1,6180	0,6180					
6	0,5176	1,4142	1,9319	1,9319	1,4142	0,5176				
7	0,4450	1,2470	1,8019	2,000	1,8019	1,2470	0,4450			
8	0,3902	1,1111	1,6629	1,9616	1,9616	1,6629	1,1111	0,3902		
9	0,3473	1,0000	1,5321	1,8794	2,000	1,8794	1,5321	1,0000	0,3473	
10	0,3129	0,9080	1,4142	1,7820	1,9754	1,9754	1,7820	1,4142	0,9080	0,3129

Tabulkové hodnoty pro Čebyševovu aproximaci									
$K_{ZVL} 0,1 \text{ dB}$									
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
3	1,000	2,000	1,000						
5	0,6180	1,6180	2,000	1,6180	0,6180				
7	0,4450	1,2470	1,8019	2,0967	1,8019	1,2470	0,4450		
9	0,3473	1,0000	1,5321	1,8794	2,000	1,8794	1,5321	1,0000	0,3473

Tabulkové hodnoty pro Čebyševovu aproximaci									
$K_{ZVL} 0,2 \text{ dB}$									
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
3	1,2275	1,1525	1,2275						
5	1,3394	1,3370	2,1661	1,3370	1,3394				
7	1,3723	1,3182	2,2757	1,5002	2,2757	1,3182	1,3723		
9	1,3860	1,3939	2,3093	1,5340	2,3728	1,5340	2,3093	1,3939	1,3860

Tabulkové hodnoty pro Čebyševova aproximace									
$K_{ZVL} 0,5 \text{ dB}$									
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
3	1,5963	1,0967	1,5963						
5	1,7058	1,2296	2,5408	1,2296	1,7058				
7	1,7373	1,2582	2,6383	1,3443	2,6383	1,2582	1,7373		
9	1,7504	1,2690	2,6678	1,3673	2,7239	1,3673	2,6678	1,2690	1,7504

Tabulkové hodnoty pro Čebyševova aproximace									
$K_{ZVL} 1 \text{ dB}$									
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
3	2,0236	0,9941	2,0236						
5	2,1349	1,0911	3,0009	1,0911	2,1349				
7	2,1666	1,1115	3,0936	1,1735	3,0936	1,1115	2,1666		
9	2,1797	1,1192	3,1214	1,1897	3,1746	1,1897	3,1214	1,1192	2,1797

Tabulkové hodnoty pro Čebyševova aproximace									
$K_{ZVL} 3 \text{ dB}$									
N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
3	3,3487	0,7117	3,3487						
5	3,4813	0,76191	4,5375	0,76191	3,4813				
7	3,5185	0,7722	4,6390	0,8038	4,6390	0,7722	3,5185		
9	3,5339	0,77604	4,6691	0,8118	4,7270	0,8118	4,6691	0,77604	3,5339