

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

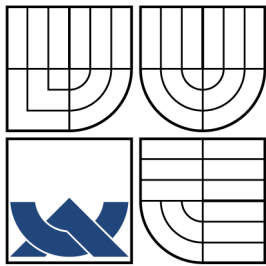
SMĚŠOVAČ VYSOKOFREKVENČNÍCH SIGNÁLŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

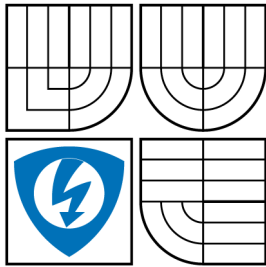
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN KOLÁŘ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SMĚŠOVAČ VYSOKOFREKVENČNÍCH SIGNÁLŮ RADIO-FREQUENCY MIXER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan KOLÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2010

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO
uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Jan Kolář
Bytem: Ostřešany č. p. 186, 530 02 Pardubice 2
Narozen (datum a místo): 2.6.1987, Pardubice
(dále jen autor)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
(dále jen nabyvatel)

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Směšovač vysokofrekvenčních signálů
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.
Ústav: Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: neuvedeno

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v¹:

- tištěné formě — počet exemplářů 2
- elektronické formě — počet exemplářů 1

¹hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Čl. 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy

(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením §47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

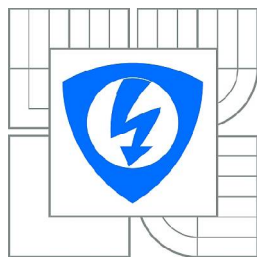
Čl. 3
Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

Nabyvatel

Autor



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jan Kolář

ID: 109674

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Směšovač vysokofrekvenčních signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznámte s vlastnostmi vysokofrekvenčních směšovačů. Zejména se zaměřte na možnosti jejich realizací a také na měření jejich parametrů. Na základě tohoto studia navrhnete jednoduchý vysokofrekvenční směšovač dvou signálů. Realizujte vámi navržený směšovač, alespoň jako první vzorek a ověřte základní funkčnost vámi navrhovaného řešení.

Provedte realizaci vlastního směšovače. Celou konstrukci opatřete vhodnou krabičkou s vhodným typem vysokofrekvenčních konektorů. S vámi realizovaným směšovačem navrhnete laboratorní úlohu. Dále navrhnete automatizované měření v prostředí VEE, pomocí kterého bude možné proměřit spektrum signálů na výstupu směšovače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HANUS, S., SVAČINA, J., Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika. Elektronický učební text, 208 stran, www.feec.vutbr.cz.

[2] Agilent technologies. Mixers, Frequency Converters & Modulators. [online], [cit. dne 8.5.2009], dostupné na <http://www.home.agilent.com/agilent/application.jspx?nid=-34522.0.00&lc=eng&cc=US>.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je popsat hlavní parametry směšovačů spolu s jejich principiálním měřením. Jsou zde uvedeny přístroje a metody, pomocí nichž lze parametry měřit. U vybraných parametrů jsou uvedeny i jejich typické hodnoty. Dále jsou v této práci uvedeny možnosti realizace směšovačů jak z hlediska použitých součástek, tak i z hlediska obvodového zapojení. Součástí práce je i sestavení funkčního směšovače, změření jeho parametrů a návrh laboratorní úlohy a automatizovaného měření směšovače v prostředí Agilent VEE

KLÍČOVÁ SLOVA

Směšovač, princip směřování, parametry a měření, konstrukce směšovačů, MACA-242H+, Agilent VEE

ABSTRACT

This bachelor's thesis is aimed to describe main parameters of mixers and principle of their measurement. There are presented devices and methods by which mixers can be measured. There are mentioned typical values of these parameters. The realisations of mixers are also described in this bachelor's thesis. The realisation is focussed on particular parts and circuit design. The part of this thesis is aimed to construct a working mixer and to measure its parameters. Also there is mentioned a design of laboratory exercise and an automated measurement setup done in Agilent VEE.

KEYWORDS

Mixer, mixing principle, parameters and measurement, construction of mixers, MACA-242H+, Agilent VEE

KOLÁŘ J. *Směšovač vysokofrekvenčních signálů*. Brno: Vysoké učení technické. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Počet stran s. 46. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Směšovač vysokofrekvenčních signálů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a dále pak Ing. Petru Vágnerovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Urbancovi, Ph.D. za další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	1
1 Funkce a parametry směšovače	3
1.1 Princip směšování	3
1.2 Parametry a jejich měření	4
1.2.1 Konverzní ztráty a vzájemná izolace bran	4
1.2.2 Šumové vlastnosti	5
1.2.3 Dynamický rozsah a intermodulační zkreslení	6
2 Konstrukce směšovačů	10
2.1 Asymetrické směšovače	10
2.1.1 Diodový směšovač	10
2.1.2 Směšovač s dvojhradlovým tranzistorem MOSFET	11
2.2 Vyvážené směšovače	12
2.2.1 Dvojitě vyvážené diodové směšovače	12
2.2.2 Dvojitě vyvážené tranzistorové směšovače	17
2.2.3 Mikrovlnné vyvážené směšovače	18
2.3 Směšovače s potlačením zrcadlového signálu	19
3 Realizace směšovače	21
3.1 Popis směšovače	21
3.2 Návrh desky plošného spoje	22
4 Měření parametrů směšovače	24
4.1 Automatizované měření	24
4.1.1 Stručná charakteristika prostředí Agilent VEE	24
4.1.2 Konverzní ztráty	24
4.1.3 Vzájemná izolace bran	26
4.1.4 Bod 1 dB komprese	29
4.1.5 Spektrum signálu na výstupu směšovače	30
4.2 Ruční měření	31
4.2.1 PSV na vstupních branách	31
4.2.2 Bod zahrazení IP3	33
5 Závěr	35
Literatura	37

Seznam symbolů, veličin a zkratk	38
Seznam příloh	40
A Návrh laboratorní úlohy pro předmět MREM	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Dynamické rozsahy směšovače	7
1.2	Spektrum složek při dvojsignálovém buzení	8
2.1	Asymetrický diodový směšovač	11
2.2	Směšovač s dvojhradlovým tranzistorem MOSFET	12
2.3	Dvojitě vyvážený diodový směšovač	13
2.4	Průběh výstupního signálu dvojitě vyváženého diodového směšovače .	14
2.5	Spektrum výstupního signálu dvojitě vyváženého diodového směšovače	15
2.6	Průběh výstupního signálu jednoduchého vyváženého diodového směšovače	16
2.7	Spektrum výstupního signálu jednoduchého vyváženého diodového směšovače	16
2.8	Dvojitě vyvážený tranzistorový směšovač	17
2.9	Vyvážený směšovač s hybridním členem 180°	18
2.10	Směšovač se samočinným potlačením zrcadlového signálu	20
3.1	Schéma zapojení směšovače MACA-242H+	22
3.2	Předloha pro výrobu DPS	23
3.3	Pohled na desku ze strany součástek	23
4.1	Počáteční nastavení spektrálního analyzátoru	25
4.2	Naměřené konverzní ztráty směšovače	26
4.3	Vzájemná izolace bran LO a RF	27
4.4	Vzájemná izolace bran LO a IF změřená za filtrem	28
4.5	Vzájemná izolace bran LO a IF před za filtrem	28
4.6	Kmitočtová charakteristika filtru	29
4.7	Přenosová charakteristika	30
4.8	Spektrum výstupního signálu	31
4.9	PSV na RF vstupu	32
4.10	PSV na LO vstupu	33
4.11	Bod zahrazení IP3	34
A.1	Schéma zapojení směšovače MACA-242H+	42

SEZNAM TABULEK

1.1	Třídy kruhově vyvážených diodových směšovačů	7
4.1	Naměřené hodnoty výkonů intermodulačních složek 3. řádu	33

ÚVOD

V radioelektronice mají své nezastupitelné místo měniče kmitočtu vysokofrekvenčních signálů. Tyto měniče nacházejí své uplatnění zejména v přijímací a vysílací technice a mohou být využívány jako součásti modulátorů DSB signálů, demodulátorů SSB signálů, fázových detektorů, elektronických atenuátorů apod. Měníče kmitočtu se skládají ze samotného směšovače, který transformuje signál nesoucí informaci z jednoho frekvenčního pásma do druhého, pomocného oscilátoru a filtrů, které upravují signály na vstupu a výstupu směšovače.

Směšovač je nelineární trojbran. Na jeho vstupní bránu RF (Radio Frequency) je přiváděn signál, jenž se směšuje s pomocným signálem přiváděným z oscilátoru na bránu LO (Local Oscillator). Směšováním těchto signálů vzniká součtová a rozdílová složka mezifrekvenčního signálu, která je odebírána z výstupní brány IF (Intermediate Frequency). Rozdílová složka má nižší frekvenci než vstupní signál a je využívána zejména u přijímačů. Směšovače, které takto transformují signál do nižšího frekvenčního pásma, se označují jako Down-Converter. Rozdílová složka se využívá například u satelitního příjmu, kdy je nevhodné, někdy i nemožné, vést anténou přijímaný signál o velmi vysoké frekvenci pomocí kabelového vedení. Další uplatnění Down-Converteru můžeme nalézt v přijímacích obvodech televizí a rádií. Tyto obvody se označují jako heterodynní. Pomocný oscilátor se zde ladí tak, aby rozdílová složka měla vždy stejnou frekvenci a nesla informaci požadovaného televizního, či rádiového kanálu. Naopak součtová mezifrekvenční složka je využívána zejména u vysílačů. Užitečný signál je v nich namodulován na nosnou o nízkém kmitočtu, což zaručuje dobrou linearitu, a pomocí směšovače označovaném jako Up-Converter je signál převeden do vyššího frekvenčního pásma, ve kterém je pak vysílán.

Tato bakalářská práce je rozdělena celkem do čtyř hlavních kapitol. V první kapitole jsou popsány fyzikální principy, na kterých směšovače pracují. Současně jsou zde uvedeny hlavní parametry směšovačů a principiálně je popsáno, jak lze tyto parametry změřit, či vypočítat. Druhá kapitola je zaměřena na realizaci směšovačů jak z hlediska použitých součástek, tak z hlediska jejich konstrukce. Jsou zde uvedeny základní zapojení ve formě asymetrických a symetrických směšovačů. Na konci kapitoly je uveden i princip směšovače s potlačením zrcadlového kanálu. U každého zapojení jsou popsány klady i nedostatky jednotlivých zapojení. Třetí a čtvrtá kapitola jsou stěžejní části této bakalářské práce a na rozdíl od prvních dvou kapitol, které mají teoretický charakter, jsou zaměřeny prakticky. Třetí kapitola této práce je věnována samotné realizaci směšovače. Jsou zde popsány základní informace o použitém směšovači, celkovém zapojení a jeho konstrukci. Rovněž je zde uveden i postup návrhu desky plošného spoje. Čtvrtá a zároveň i poslední kapitola této práce se za-

bývá měření parametrů realizovaného směšovače. Naměřené parametry směšovače jsou zhodnoceny a srovnány s výrobcem udávanými hodnotami.

Součástí této práce je i vytvoření automatizovaného měření vybraných parametrů směšovače v prostředí Agilent VEE a návrh laboratorní úlohy s takto vytvořeným měřením.

1 FUNKCE A PARAMETRY SMĚŠOVAČE

1.1 Princip směšování

Jak již bylo řečeno v úvodu, požadovaná mezifrekvenční složka vzniká směšováním vstupního a oscilačního signálu. Frekvenci této mezifrekvenční složky lze spočítat podle vztahu

$$f_{mf} = mf_s \pm nf_o, \quad (1.1)$$

kde f_s je kmitočet vstupního signálu a f_o je kmitočet signálu přiváděného z pomocného oscilátoru. Koeficienty m a n jsou celá čísla, jejichž součet určuje řád výsledného mezifrekvenčního produktu. Užitečné jsou pouze produkty druhého řádu, kdy $m = n = 1$. Ostatní produkty jsou nežádoucí, neboť způsobují zkreslení výsledného signálu, a je proto nutné je potlačit například použitím filtrů, nebo vhodnou konstrukcí směšovače. Znehodnocení signálu může rovněž nastat tak, že se na výstup bude dostávat signál, který se nachází na zrcadlovém kmitočtu. Je-li kmitočet vstupního užitečného signálu nižší, než kmitočet oscilátoru, má zrcadlový kmitočet hodnotu $f_o + f_{mf}$. Směšováním s kmitočtem oscilátoru se pak informace nesená na zrcadlovém kmitočtu přetransformuje do pásma mezifrekvence a způsobí její znehodnocení. Rušivě rovněž působí silný mezifrekvenční signál přivedený na vstup. Tento signál se vlivem nedokonalé izolace mezi branami RF a IF utlumí a objeví se na výstupu.

Podle fyzikálního principu směšování lze směšovače dělit na aditivní a multiplikativní. U aditivních směšovačů dochází, jak je patrné z názvu, ke směšování signálů přivedením součtu těchto signálů na nelineární prvek, který je obecně dán charakteristikou

$$i = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 + \dots + a_nu^n. \quad (1.2)$$

Konstanty a_i zde určují tvar výsledné charakteristiky nelineárního prvku a u jsou napětí přivedená na nelineární prvek. Pro vznik užitečné mezifrekvenční složky, tedy produktu druhého řádu, je nejdůležitější kvadratický člen charakteristiky. Dosadí-li se do (1.1) za u součet vstupního signálu $U_s \cos(\omega_s t)$ a oscilačního signálu $U_o \cos(\omega_o t)$, je možné matematicky odvodit, že součástí rozkladu kvadratického členu bude člen

$$u = 2U_s U_o \cos(\omega_s t) \cos(\omega_o t). \quad (1.3)$$

Součástí kvadratického členu ze vztahu (1.2) jsou rovněž dvě složky, jenž mají kmitočet roven dvojnásobku kmitočtu vstupního a oscilačního signálu a je tedy možné

je filtrací potlačit. Podle goniometrických pravidel se může rovnice (1.3) upravit do tvaru

$$u = U_s U_o [\cos(\omega_s + \omega_o)t + \cos(\omega_s - \omega_o)t]. \quad (1.4)$$

Tento vztah názorně ukazuje, že výsledný mezifrekvenční signál je tvořen součtovou i rozdílovou složkou obou vstupních signálů (1.1). Obě složky by měly mít teoreticky stejnou úroveň, ale vlivem frekvenční závislosti konverzních ztrát se jejich velikost liší. Amplituda mezifrekvenčního signálu je přímo úměrná součinu amplitud vstupního a oscilačního signálu. Přivede-li se tedy na vstup směšovače slabý signál, je nutné do směšovače přivést silný oscilační signál, aby bylo dosaženo požadované úrovně signálu na výstupu [3].

Hlavní výhoda aditivních směšovačů je v jejich jednoduchosti. Na druhou stranu jejich největší nedostatek je ten, že vytvářejí velké množství nežádoucích složek. Každý člen nelineární charakteristiky vytváří směšovací produkty daného řádu. To znamená, že kubický člen vytváří složky třetího řádu apod. Z tohoto hlediska se jako nejvhodnější nelineární charakteristika hodí charakteristika kvadratická.

Druhou skupinou směšovačů jsou směšovače multiplikatívni u nichž dochází přímo k násobení signálu podle (1.3). Hlavní součástí tohoto typu směšovače je parametrický lineární prvek, na jehož jeden vstup je přiveden oscilační signál, který mění strmost daného prvku, a na druhý vstup je přiveden vstupní signál. Spektrum výstupního signálu je chudší na produkty vyšších řádů, což je hlavní výhoda oproti směšovačům aditivním. Multiplikatívni směšovače jsou konstrukčně o něco složitější a hlavně je obtížné je realizovat pro použití při vyšších frekvencích.

1.2 Parametry a jejich měření

1.2.1 Konverzní ztráty a vzájemná izolace bran

Jedním ze základních parametrů směšovačů jsou konverzní (směšovací) ztráty L_c [dB]. Udávají rozdíl mezi výkonovou úrovní vstupního užitečného signálu a úrovní výstupního mezifrekvenčního signálu. Směšovací ztráty nejsou v kmitočtovém rozsahu směšovače konstantní, ale kmitočtově závislé, a zároveň jsou i závislé na výkonové úrovni přivedeného oscilačního signálu. S rostoucí úrovní oscilačního signálu roste i velikost mezifrekvenčního signálu a konverzní ztráty klesají. U aktivních směšovačů můžeme hovořit o konverzním zisku A_c , který je dán převrácenou hodnotou konverzních ztrát.

Velmi důležitým parametrem směšovačů je vzájemná izolace jeho bran L_i [dB], tedy schopnost potlačit signál vstupující do jedné brány, tak aby na ostatních branách měl co nejmenší úroveň. Rozdíl úrovní signálu mezi branami se udává

v jednotách dB, je frekvenčně závislý a rovněž závisí na velikosti oscilačního signálu. Nejdůležitější jsou ve směšovači izolace mezi branami LO — RF a LO — IF. Izolace mezi oscilátorovou a mezifrekvenční branou je důležitá proto, aby silný signál z oscilátoru nepronikal na výstup a nezatěžoval další obvody. Velké izolace mezi oscilátorovou a vstupní branou je požadována proto, aby oscilační signál nepronikal do vstupních obvodů a hlavně do antény. Signál by pak mohl být anténou vyzařován do okolí a rušit komunikaci nebo provoz ostatních radiokomunikačních zařízení.

Vzájemná izolace bran se měří tak, že se na bránu LO přivede oscilační signál určité frekvence a úrovně, na bránu RF (IF) se připojí spektrální analyzátor. Brána IF (RF) musí být impedančně přizpůsobená. Ze spektrálního analyzátoru se pak zjistí úroveň oscilačního signálu, která se odečítá od úrovně signálu na vstupu LO. Výsledek udává vzájemnou izolaci bran.

Radioelektronická zařízení se konstruují tak, aby jejich vstupy i výstupy měly impedanci 50Ω . Díky nedokonalosti vstupních obvodů směšovačů, například transformátorů u vyvážených směšovačů, není tato impedance zaručena v celém pracovním rozsahu kmitočtů. Toto nepřizpůsobení je v katalogových listech udáváno jako poměr stojatých vln PSV ($VSWR$ – Voltage Standing Wave Ratio) v závislosti na frekvenci. PSV se dá na dané bráně měřit PSV-metrem, vektorovým voltmetrem nebo vektorovým obvodovým analyzátozem při ostatních branách zakončených impedancí 50Ω . Je ale nutné dbát na to, aby byl vstup směšovače symetrický. Při nesymetrickém vstupu je potřeba použít symetrizační článek, který ale v závislosti na jeho kvalitě může výsledek měření zkreslit.

1.2.2 Šumové vlastnosti

Šumové vlastnosti jakýchkoliv dvojbranů se vyjadřují pomocí šumového činitele, který patří mezi nejdůležitější charakteristiky popisující jejich vlastnosti. Na vstup dvojbranu se přivádí užitečný signál spolu se šumem v poměru P_{si}/P_{ni} a na výstupu dostáváme opět užitečný signál se šumem v poměru P_{so}/P_{no} . Výsledný šumový činitel F je pak dán vztahem

$$F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}}. \quad (1.5)$$

Toto číslo udává, kolikrát se zhorší poměr signálu k šumu po průchodu dvojbranem. V praxi se pak po zlogaritmování udává jako šumové číslo v dB.

U směšovačů je situace poněkud složitější, protože signál i šum se mohou do směšovače dostávat jak požadovaným frekvenčním kanálem, tak i kanálem zrcadlovým, případně kanálem s kmitočtem mezifrekvence. Je-li na obou kanálech přítomen šum spolu se signálem, například u širokopásmového signálu, využívá se

k popisu šumových vlastností dvoukanálové šumové číslo F_{DSB} (Dual-Side Band) a jeho hodnotu je možné vypočítat podle vztahu (1.5). Pakliže je ale zpracováván úzkopásmový signál, jehož užitečné spektrum se nachází jen v jednom kanále, a v druhém kanále je přítomen pouze šum, dochází ke zhoršení šumových vlastností. Tyto vlastnosti jsou pak popsány jednocanálovým šumovým číslem F_{SSB} (single-side band). Pro přepočet mezi F_{SSB} a F_{DSB} se používá vztah

$$F_{SSB} = 2F_{DSB} - 1. \quad (1.6)$$

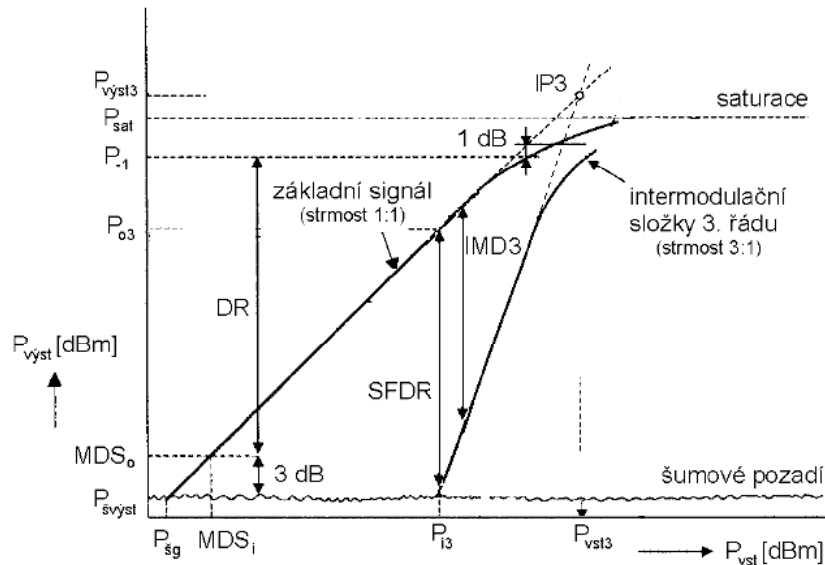
Z (1.6) plyne, že jsou-li šumová čísla směšovače mnohem větší než jedna, lze jedničku ve vztahu zanedbat a pak bude jednocanálové šumové číslo dvojnásobně větší než dvojkanálové šumové číslo. V logaritmické míře to znamená, že bude větší o 3 dB.

1.2.3 Dynamický rozsah a intermodulační zkreslení

Dynamický rozsah DR (Dynamic Range) směšovače udává rozmezí výkonů přivedených na jeho vstup, při kterém je závislost mezi výkonem vstupního signálu o frekvenci f_s a výstupního výkonu mezifrekvenčního signálu s frekvencí f_{mf} stále lineární. Zdola je dynamický rozsah ohraničen hodnotou MDS (Minimum Detectable Signal), která má hodnotu o 3 dB vyšší, než je šumové pozadí. Při zvyšování vstupního výkonu roste převodní charakteristika se strmostí 1:1 a od určitého bodu se začíná odchylovat od ideálního průběhu. Místo, kde se charakteristika odchýlí o -1 dB, je označováno jako bod jednodediblové komprese. Výstupní výkon v tomto bodě P_{-1} je pak horní hranicí dynamického rozsahu. Při další zvyšování vstupního výkonu již charakteristika není lineární a dochází k saturaci a vzniku nežádoucích složek signálu. Při ještě větším zvýšení vstupního výkonu hrozí zničení směšovače. Všechny výše zmíněné parametry jsou uvedeny na obr. 1.1.

Bod P_{-1} rovněž charakterizuje schopnost směšovače zpracovávat silné signály. Podle vstupní souřadnice bodu P_{-1in} , která určuje maximální vstupní výkon, se dělí směšovače do jednotlivých tříd (tab. 1.1) [5]. S velikostí vstupního výkonu úzce souvisí velikost výkonu signálu dodávaného z pomocného oscilátoru. Jednotlivé třídy směšovačů jsou označeny hodnotou P_{LO} [dBm].

Kromě dynamického rozsahu se u směšovačů rozeznává ještě dynamický rozsah bez intermodulačního zkreslení 3. řádu $SFDR$ (Spurious-Free Dynamic Range). Tento rozsah je zdola ohraničen šumovým pozadím a zhora výkonem, při kterém se začínají objevovat intermodulační složky 3. řádu, které mají stejnou výkonovou úroveň jako šum. Při přivedení dvou signálů, například užitečného signálu f_s a rušivého signálu f_r , na vstup směšovače (tzv. dvousignálové buzení) vznikne na výstupu kromě dvou



Obr. 1.1: Dynamické rozsahy směřovače

třída směšovače	P_{-in} [dB]
7	1
10	4
13	7
17	10
17S	14
23	15
23S	21
27	24

Tab. 1.1: Třídy kruhově vyvážených diodových směšovačů

rozdílových a dvou součtových mezifrekvenčních složek celkem osm intermodulačních složek 3. řádu podle vztahů

$$f_3 = |f_o \pm (2f_s \pm f_r)| \quad \text{a} \quad f_3 = |f_o \pm (2f_r \pm f_s)|. \quad (1.7)$$

Nacházejí-li se užitečný a rušivý signál kmitočtově blízko sebe, objeví se dva intermodulační produkty 3. řádu poblíž rozdílových mezifrekvenčních složek a dva poblíž součtových mezifrekvenčních složek (obr. 1.2). Tyto produkty pak způsobují rušení. Zbylé čtyři intermodulační složky vzniknou kmitočtově daleko od mezifrekvenčních složek a je snadné je filtrací odstranit.

Při zvyšování výkonové úrovně vstupních signálů se zvyšuje i úroveň intermodulačních složek. Díky kubickému členu v převodní charakteristice (1.2) součástky,

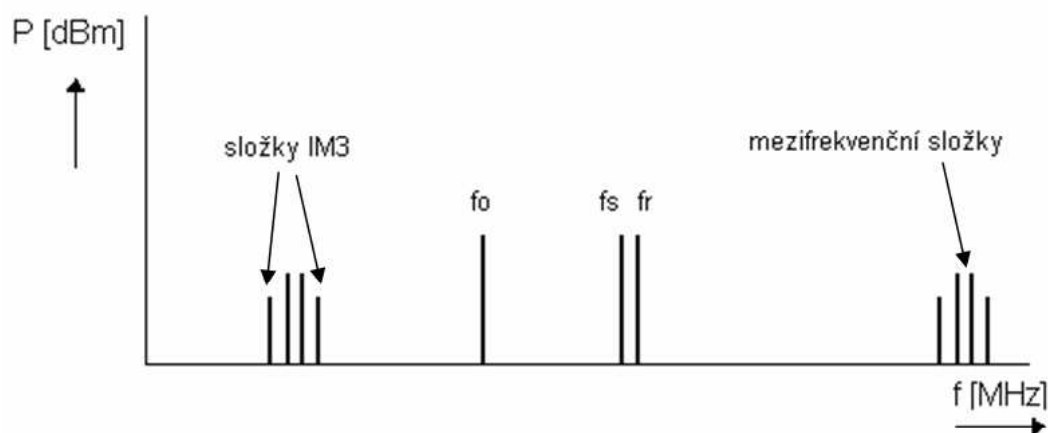
kteřá se podílí na směšování, roste výkon těchto složek se strmostí 3 : 1. Průsečík ideální převodní charakteristiky a převodní charakteristiky složek 3. řádu se nazývá bod zahrazení IP3 (Intercept Point) a udává velikost vstupních (výstupních) úrovní signálů, kdy by mezifrekvenční složky a intermodulační složky 3. řádu měly stejnou výkonovou úroveň. Tento bod je však pouze teoretický a nelze jej změřit přímo. Jeho velikost udává schopnost směšovače zpracovávat silné signály, aniž by došlo ke zkreslení výstupního signálu intermodulačními složkami 3. řádu. Vstupní souřadnice bodu IP3 dnes u běžných směšovačů dosahují hodnot 25 dBm. Existují i speciální směšovače, jejichž vstupní souřadnice bodu IP3 dosahují hodnot až 40 dBm. Obdobně lze nalézt i body zahrazení intermodulačních produktů vyšších řádů.

Z geometrické situace na obr. 1.1 lze vyjádřit závislosti mezi vstupním signálem a bodem IP3. Změří-li se výkonový odstup intermodulačních produktů od výkonu užitečného signálu $IMD3$ v lineárních částech obou závislostí, může se souřadnice bodu IP3 vypočítat podle vztahů

$$IP3_{IN} = P_{RF} + 0,5IMD3 \quad [\text{dBm, dBm, dB}] \quad a \quad (1.8)$$

$$IP3_{OUT} = P_{RF} - L_c \quad [\text{dBm, dBm, dB}], \quad (1.9)$$

kde (1.6) P_{RF} je vstupní výkon, při kterém byl změřen odstup $IMD3$ a L_c jsou konverzní ztráty směšovače.



Obr. 1.2: Spektrum složek při dvojsignálovém buzení

Všechny výše uvedené parametry směšovače se dají zjistit graficko-početní metodou z převodních charakteristik. Převodní charakteristika směšovače pro základní složku se měří tak, že je na vstupu zvyšována úroveň vstupního signálu o frekvenci f_s a na výstupu směšovače se měří úroveň mezifrekvenční složky f_m . Z průběhu této

charakteristiky lze určit bod jednodécibellové komprese P_{-1} a vstupní a výstupní hodnoty dynamického rozsahu DR . Po vynesení převodních charakteristik základní složky signálu a intermodulačních složek 3. řádu do společného grafu, se dají zjistit vstupní a výstupní parametry rozsahu $SFDR$ a bodu zahrazení $IP3$. Tuto charakteristiku lze získat tak, že se na vstup přivedou přes slučovač dva frekvenčně blízké signály, jejichž úroveň je postupně zvyšována. Na výstupu se pak měří úroveň intermodulačních složek třetího řádu. U konkrétního směšovače lze tyto parametry vyčíst z jeho katalogového listu.

2 KONSTRUKCE SMĚŠOVAČŮ

V dnešní době jsou směšovače vyráběny jako integrované obvody. V pouzdře mohou být realizovány jako monolitické integrované obvody na jenom čipu, nebo formou diskretních součástek. Směšovače můžeme dělit na aktivní a pasivní. U aktivních směšovačů je pro jejich správnou funkci nutné přivést na daný vstup vnější napájecí napětí. Z hlediska použití nelineárního prvku pak rozeznáváme směšovače diodové a tranzistorové.

Obě skupiny mají své specifické vlastnosti. Jednou z hlavních výhod diodových směšovačů je jejich velký dynamický rozsah, jehož se využívá například u spektrálních analyzátorů, kde je potřeba zpracovávat signály různých výkonových úrovní. Šumové číslo je u diodových směšovačů přibližně rovno jejich konverzním ztrátám, protože se tyto směšovače chovají z pohledu přenosu signálu jako atenuátory. U aktivních tranzistorových směšovačů je šumové číslo větší, než kdyby byl aktivní prvek (tranzistor) použit v zesilovači. Diodové směšovače jsou také na rozdíl od tranzistorových směšovačů použitelné i na velmi vysokých frekvencích nad 100 GHz. V tranzistorové technice se takto vysokých kmitočtů prozatím nepodařilo dosáhnout.

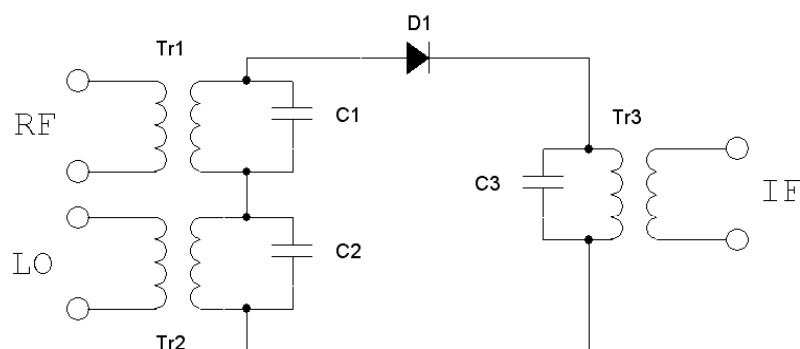
Tranzistorové směšovače mohou být realizovány tranzistory bipolárními i unipolárními. Bipolární tranzistory nacházely uplatnění na počátku rozvoje radioelektroniky a dnes se využívají jen zřídka. Přejechod báze-emitor má, stejně jako u diody, exponenciální charakteristiku, která je podle (1.2) tvořena teoreticky nekonečným množstvím členů. To způsobuje, že na výstupu vzniká velké množství nežádoucích intermodulačních složek. Tyto směšovače jsou použitelné pouze při zpracování signálu o nízké výkonové úrovni, která se zároveň moc nemění, například při příjmu televizního signálu ze stacionárních družic. Příznivější je situace u tranzistorů FET, které mají všeobecně lepší parametry. Jejich převodní charakteristika je téměř kvadratická a proto u nich nevzniká tolik nežádoucích složek.

2.1 Asymetrické směšovače

2.1.1 Diodový směšovač

Asymetrické směšovače (Unbalanced) patří obvodově k nejjednodušším zapojením. Na obr. 2.1 je uvedeno zjednodušené zapojení aditivního diodového směšovače. Vstupní signál je do obvodu přiveden přes transformátor $Tr1$, jehož sekundární vedení tvoří s kondenzátorem $C1$ paralelní rezonanční obvod. Tento obvod je naladěn na frekvenci f_s a blízké okolí a pro ostatní frekvence tvoří zkrat. Signál z oscilátoru se tak teoreticky nemůže objevit na vstupu brány RF. Pro přivedení oscilačního signálu platí analogicky stejné podmínky jako pro vstupní signál. Součet obou signálů je

pak přiveden na diodu D1, kde jejich směřováním vzniká velké množství intermodulačních složek. Rezonanční obvod tvořený kondenzátorem C3 a primárním vedením transformátoru Tr3 je naladěn na kmitočet požadované mezifrekvenční složky, která je odebrána za sekundárního vedení toho transformátoru. Tento rezonanční obvod tvoří zároveň zkrat pro vstupní a oscilační signál. Asymetrické diodové směšovače jsou sice konstrukčně jednoduché, ale mají značné nevýhody. A to malou izolaci mezi branami a velké množství nežádoucích intermodulačních složek. Rozsah frekvencí přivedených na vstup je také značně omezen kvalitou rezonančních obvodů. Zejména jejich šířkou přenášeného pásma.

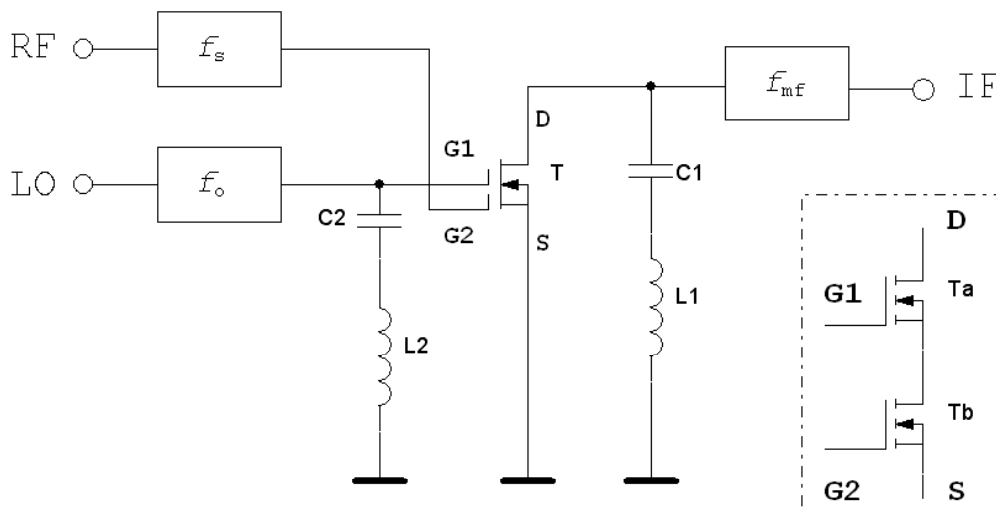


Obr. 2.1: Asymetrický diodový směšovač

2.1.2 Směšovač s dvojhradlovým tranzistorem MOSFET

Mnohem lepších parametrů dosahuje směšovač, jehož principiální zapojení je uvedeno na obr. 2.2. Jedná se o aditivní směšovač s dvojhradlovým tranzistorem MOSFET. Tento směšovač se vyznačuje malými nelinearitami a zvýšenou izolací mezi branami. Má vysoký dynamický rozsah a díky jeho stabilitě není potřeba provádět neutralizaci. Jejich šumové číslo spolu s konverzním ziskem jsou však horší než u zapojení s obyčejnými tranzistory JFET nebo MOSFET. Pro popis funkce je vhodné rozdělit tranzistor T na dva pomyslně kaskádně zapojené tranzistory Ta a Tb. Na vstup G1 horního tranzistoru Ta pracujícího jako emitorový sledovač je přiveden oscilační signál, který je dále přenesen na kolektor (drain) spodního tranzistoru Tb. Spodní tranzistor, označovaný jako kolektorově buzený směšovač, pak zajišťuje vlastní směšování. Horní tranzistor Ta zároveň funguje jako zesilovač mezifrekvenčního signálu. Protože tento zesilovač pracuje v zapojení se společnou bází, musí být jeho vstup pro mezifrekvenční signál dobře uzemněn. O toto uzemnění se stará sériový rezonanční obvod tvořený kondenzátorem C2 a cívkou L2. Na výstup směšovače je zapojen druhý sériový rezonanční obvod složený z kondenzátoru

C1 a cívky L1, který tvoří zkrat pro vstupní a oscilační signál. Těmito rezonančními obvody (filtry) je dosaženo velké vzájemné izolace bran. Na jednotlivé brány je možno dále připojit filtry, které potlačí nežádoucí složky signálu. V minulých desetiletích tyto směšovače figurovaly díky dobrému poměru složitosti a funkce převážně ve vstupních obvodech televizních a VKV přijímačích [1].



Obr. 2.2: Směšovač s dvojhradlovým tranzistorem MOSFET

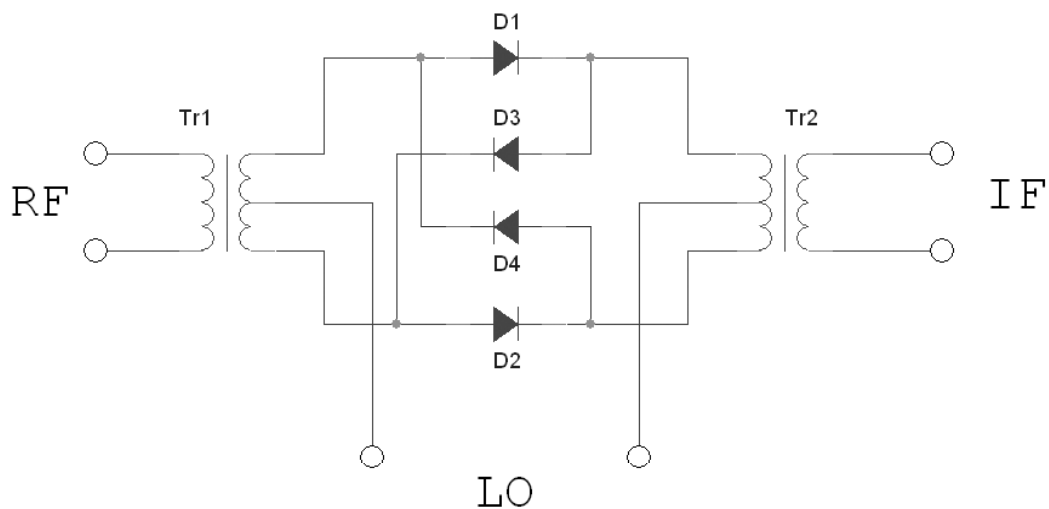
2.2 Vyvážené směšovače

Tyto směšovače mají oproti asymetrickým směšovačům celou řadu výhod. Mezi hlavní výhody se řadí větší izolace mezi branami a větší dynamický rozsah. Kromě jednoduchých vyvážených směšovačů (single-balanced) existují i dvojitě vyvážené směšovače (double-balanced) a trojitě vyvážené směšovače (triple-balanced, nebo double-double-balanced). Lze říci, že dvojitě vyvážené směšovače mají lepší vlastnosti, než vyvážené směšovače. A zároveň trojitě vyvážené směšovače mají lepší vlastnosti, než dvojitě vyvážené směšovače. V této práci jsou uvedeny příklady pouze jednoduchých a dvojitě vyvážených směšovačů.

2.2.1 Dvojitě vyvážené diodové směšovače

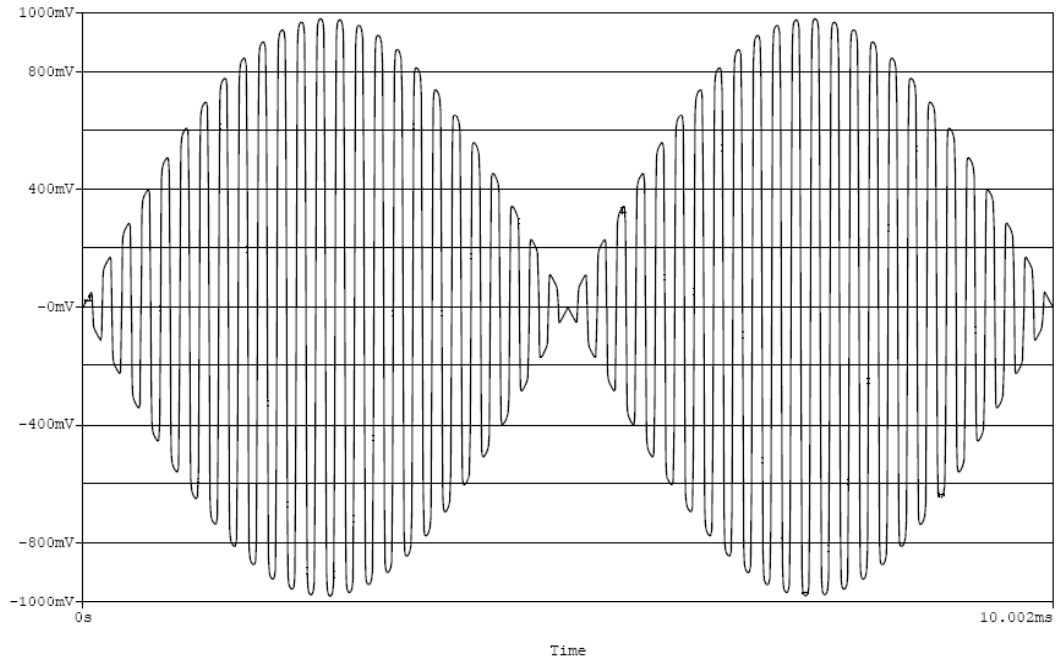
Dvojitě vyvážené diodové směšovače patří pro svoji jednoduchost a velmi dobré parametry mezi nejrozšířenější směšovače. Typické zapojení směšovačů je uvedeno na obr. 2.3. Směšovač se skládá ze čtveřice diod, které by měly mít co nejshodnější parametry, a dvou transformátorů. Je nutné, aby obě poloviny sekundárního vinutí

transformátoru na bráně RF a primárního vinutí transformátoru na bráně IF byly shodné z důvodu dobré izolace mezi branami. Tyto podmínky není vždy možné v praxi dodržet. Se zvyšujícím se kmitočtem roste vliv asymetrie transformátorů a rozdíl kapacit přechodů diod a vzájemná izolace bran se zhoršuje. Izolace bran se může zhoršovat se směrnici i 5 dB/okt. Pro relativně nízké kmitočty v řádu desítek a stovek MHz se používají transformátory vinuté pomocí drátů. Pro vyšší kmitočty se pak používají transformátory tvořené například mikropáskovým vedením vinutým v několika vrstvách desky plošného spoje.



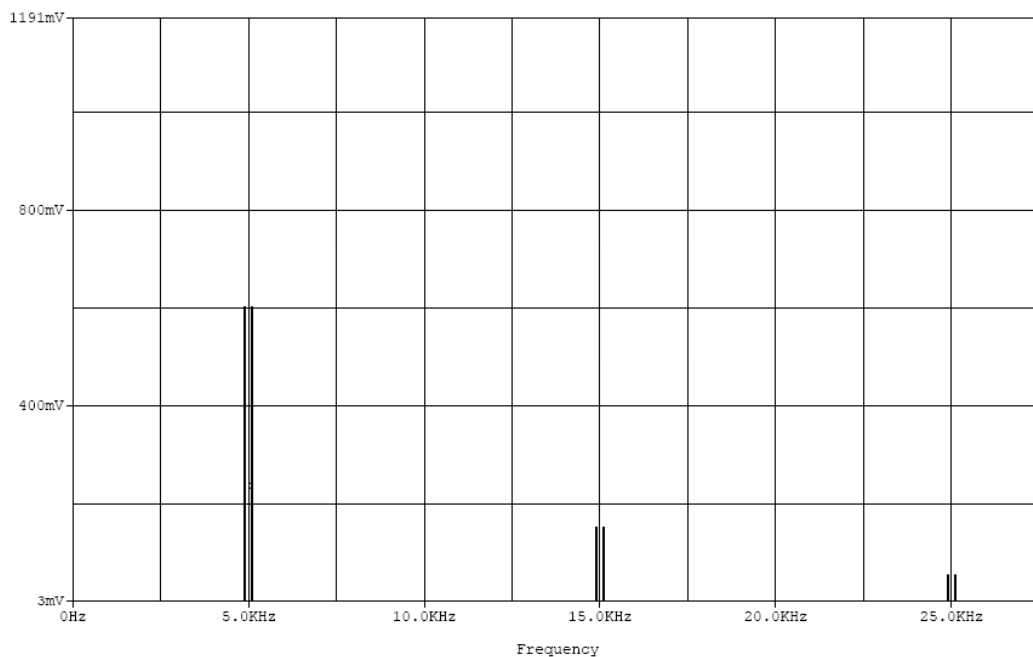
Obr. 2.3: Dvojitě vyvážený diodový směšovač

Funkce dvojitě vyváženého diodového směšovače je následující. Pomocný oscilátor v tomto zapojení pracuje jako spínač diod, přes které se pak prochází užitečný signál z brány RF. Při jedné půlperiodě oscilačního signálu prochází signál přes obě poloviny sekundárního vinutí transformátoru Tr1 a vytváří na nich úbytky napětí. Jsou-li obě poloviny dokonale symetrické, vytvoří se na nich úbytky napětí o stejné velikosti, ale opačné polarity. Na vstup transformátoru se tak tento signál nemůže indukci dostat. Rovněž se zde neobjeví ani vyšší harmonické složky oscilačního signálu. Signál pak dál prochází obvodem a spíná diody D1 a D2. Dále prochází přes obě poloviny primárního vinutí transformátoru Tr2 a jsou-li obě poloviny dokonale symetrické, naindukuje se opět, stejně jako u Tr1, signál na bránu LO. V druhé půlperiodě prochází signál nejprve přes primární vinutí transformátoru Tr2, spíná diody D3 a D4 a nakonec prochází přes sekundární vinutí transformátoru Tr1. Na výstupní bráně má pak signál průběh zobrazený na obr. 2.4. Tento průběh vznikne vynásobením vstupního a oscilačního signálu, jedná se tedy o směšovač multiplikativní. V tomto případě se jedná o průběh, kdy se na bránu LO přivádí signál o kmitočtu 5 kHz a na bránu RF signál o kmitočtu 100 Hz.



Obr. 2.4: Průběh výstupního signálu dvojitě vyváženého diodového směšovače

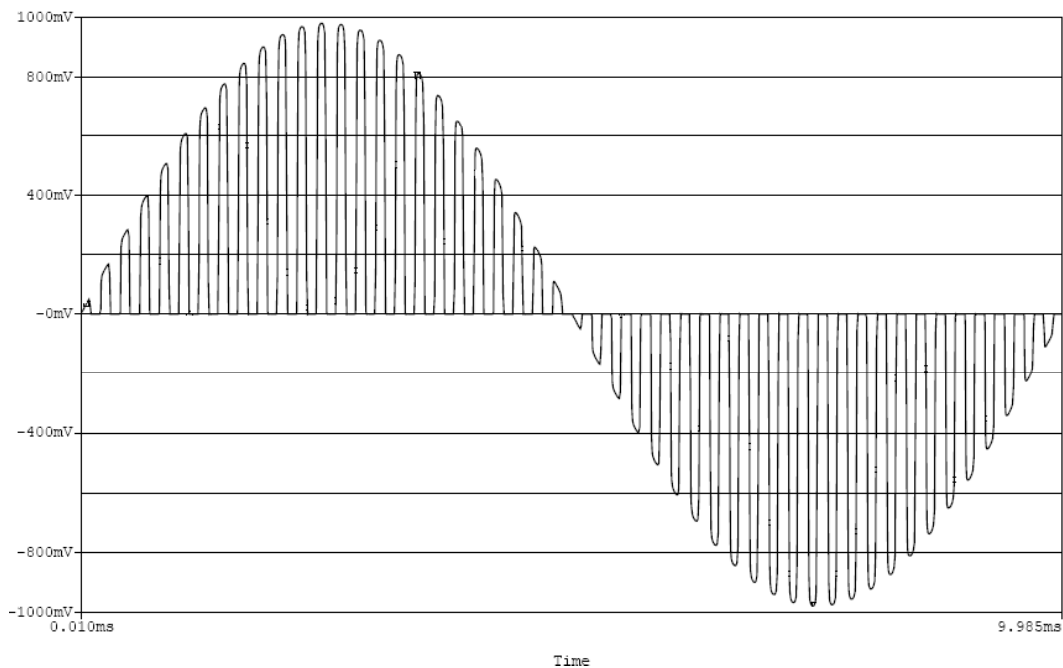
Použitím Fourierovy transformace na tento průběh lze zobrazit spektrum výstupního signálu (obr. 2.5). Z průběhu můžeme pozorovat, že se ve výstupním spektru nenachází spektrální čáry odpovídající oscilačnímu a vstupnímu signálu. Tyto signály jsou v tomto případě dokonale potlačeny, stejně jako jejich vyšší harmonické složky. Potlačeny jsou i intermodulační složky vázané na sudé harmonické složky vstupního signálu a liché harmonické složky oscilačního signálu. V praxi nemusí tato ideální situace nastat a na výstupu lze naměřit nenulové hodnoty těchto signálů. Ve spektru jsou dominantní spektrální čáry na kmitočtech 4900 Hz a 5100 Hz. Jedná se o rozdílovou a součtovou mezifrekvenční složku. V okolí lichých násobků frekvence oscilátoru lze pozorovat spektrální čáry na kmitočtech daných vztahem $nf_0 \pm f_s$, kde n jsou lichá celá čísla. Tyto složky výstupního signálu lze filtrací snadno potlačit. Na obr. 2.6 a obr. 2.7 je pro srovnání uveden průběh výstupního signálu a jeho spektrum vzniklé pomocí jednoduchého vyváženého směšovače. Toto zapojení vychází ze zapojení dvojitě vyváženého diodového směšovače (obr. 2.3) s tím rozdílem, že v něm nejsou zapojeny diody D3 a D4. V jedné půlperiodě oscilačního signálu jsou sepnuty diody D1 a D2 a prochází přes ně vstupní signál. V druhé půlperiodě jsou obě diody pólovány v závěrném směru a žádný signál přes ně neprochází. Výstupní napětí je v tomto okamžiku nulové. Z pohledu na spektrum výstupního signálu je patrné, že obsahuje mnohem větší množství složek, než spektrum výstupního signálu dvojitě vyváženého diodového směšovače. Rovněž je patrné, že na výstup proniká i vstupní signál, což je opět nežádoucí.



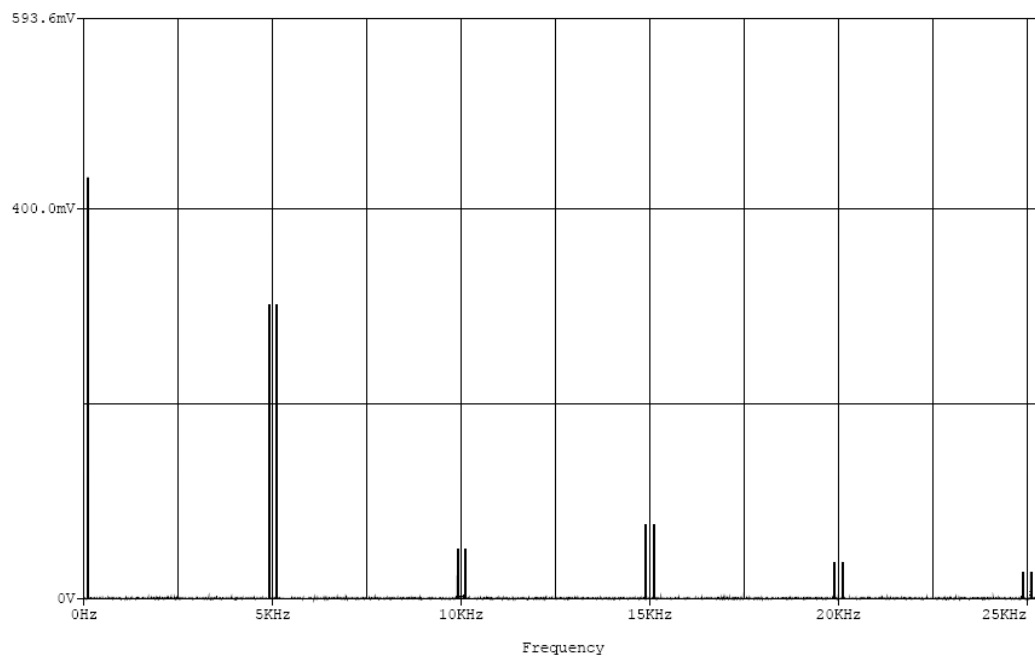
Obr. 2.5: Spektrum výstupního signálu dvojitě vyváženého diodového směšovače

Drobnou nevýhodou dvojitých vyvážených diodových směšovačů je fakt, že kvůli přítomnosti transformátoru na výstupu nelze použít tento směšovač pro aplikace pracující se stejnosměrnou složkou. Rovněž je třeba větší úrovně oscilačního signálu pro správnou funkci, protože jsou v zapojení použity místo dvou diod, jako u jednoduše vyváženého směšovače, diody čtyři. Oscilační signál tedy musí být schopen sepnout větší prahové napětí. Tato nevýhoda je ale vykompenzována větším dynamickým rozsahem, protože je na jednotlivých diodách poloviční napětí, než u dvoudiodového vyváženého směšovače.

Směšovač v tomto zapojení může pracovat rovněž jako modulátor DSB (Double Side Band). Na bránu LO se přivádí nosná signálu a na bránu RF modulační signál. Z brány IF se odebírá amplitudově modulovaný signál s dvěma postraními pásmy a s potlačenou nosnou.



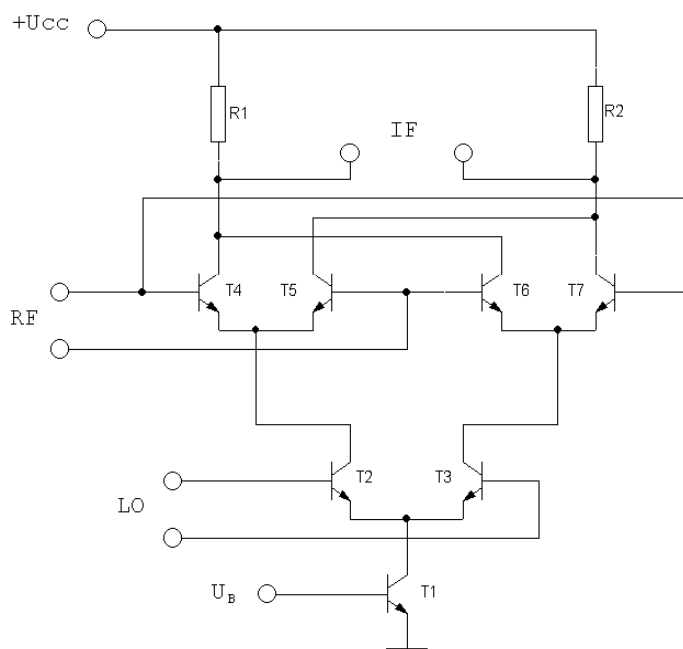
Obr. 2.6: Průběh výstupního signálu jednoduchého vyváženého diodového směšovače



Obr. 2.7: Spektrum výstupního signálu jednoduchého vyváženého diodového směšovače

2.2.2 Dvojitě vyvážené tranzistorové směšovače

Oproti diodovým vyváženým směšovačům tvořeným diskretními součástkami mají tranzistorové směšovače tu výhodu, že je možné je vyrobit na jednom substrátu jako monolitický integrovaný obvod. Tím se zaručí, že všechny tranzistory mají přibližně stejné parametry a je tak zaručena správná funkce a velmi dobrá vzájemná izolace bran. Na obr. 2.8 je uvedeno zjednodušené principiální schéma dvojitě vyváženého tranzistorového směšovače označovaného též jako Gilbertova buňka. Toto zapojení bylo původně vyvinuto jako analogová násobička dvou signálů. V tomto zapojení funguje Gilbertova buňka jako téměř dokonalý multiplikativní směšovač, který na svém výstupu vytváří pouze součtovou a rozdílovou složku vstupního a oscilačního signálu. [1, 2]



Obr. 2.8: Dvojitě vyvážený tranzistorový směšovač

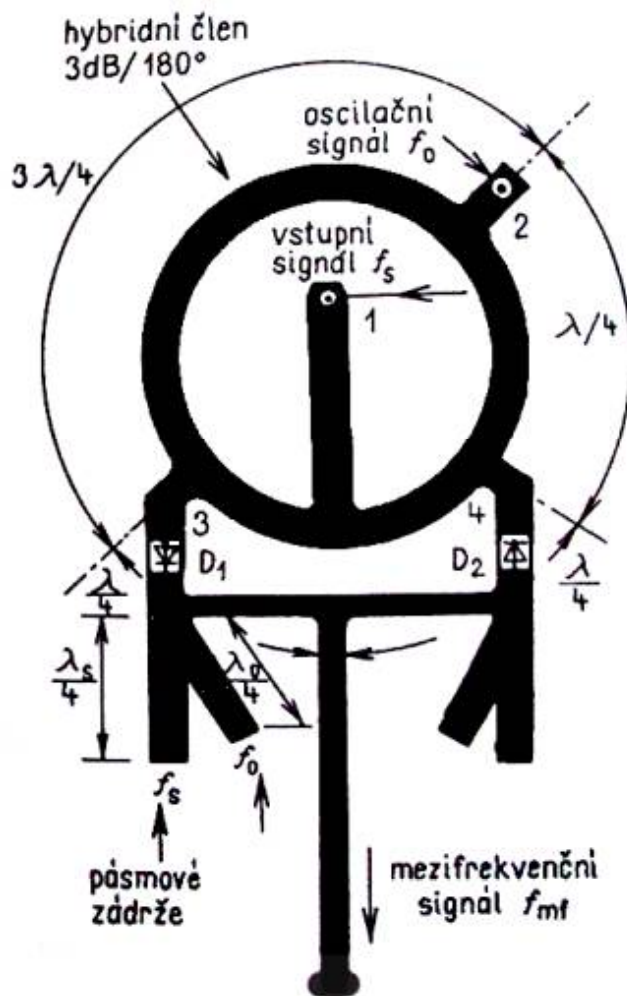
Ze zapojení je patrné, že se směšovač skládá ze sedmi bipolárních tranzistorů. Tranzistory T2 – T7 jsou seskupeny tak, že tvoří celkem tři diferenciální stupně. Tranzistor T1 zde tvoří zdroj proudu. Předností tohoto zapojení je to, že směšovač díky použití diferenciálních zesilovačů vykazuje místo konverzních ztrát jistý zisk, a hlavně má výbornou vzájemnou izolaci bran. Dobré izolace mezi branou LO a IF je dosaženo následovně: Oscilační signál budí tranzistory T2 a T3 v protifázi. Vzhledem k tomu, že je na jejich společný emitor zapojen zdroj konstantního proudu, jsou proudy tekoucí jejich kolektory stejné, ale opačně orientované. Tyto proudy dále budí do emitorů tranzistory T4 a T6, jejichž kolektorové proudy jsou rovněž v protifázi a na rezistoru R1 se pak neobjeví žádné oscilační napětí. Stejná situace se opakuje

i u tranzistorů T5 a T7. Vzájemné izolace mezi branami RF a LO je dosaženo podobným způsobem. Vstupní signál budí tranzistory T4 a T6 rovněž v protifázi, takže proud tekoucí jejich kolektory je konstantní a na rezistoru R1 se vstupní napětí neobjeví. Stejný případ nastává i u tranzistorů T5 a T7.

Nedostatkem zapojení uvedeného na obr. 2.8 je to, že brány LO a RF jsou buzeny symetricky a z výstupní brány IF je odebírán signál rovněž symetricky. Z tohoto důvodu je nutné zapojení doplnit o vhodné symetrizační členy.

2.2.3 Mikrovlnné vyvážené směřovače

Pro pásmo centimetrových a kratších vln, kdy již není u směšovačů vhodné použít transformátotů, se vyrábějí mikrovlnné směšovače, jejichž obvody jsou tvořeny mikropáskovým vedením. Příkladem takových směšovačů mohou být směšovače s třideciblovými hybridními členy 90° nebo 180° .



Obr. 2.9: Vyvážený směšovač s hybridním členem 180°

Na obr. 2.9 je uvedeno zapojení směšovače s hybridním členem 180° [1]. Stosmdesátistupňový hybridní člen je označován proto, že fáze signálů vystupujících z bran 3 a 4 je právě 180° nebo 0° . Vstupní signál přivedený na bránu 1 se dělí na dvě poloviny, které pokračují po kruhovém segmentu opačnými směry. Na brány 3 a 4 se dostávají ve stejné fázi, sčítají se, a působí tak na směšovací diody. Na bránu 2 se obě poloviny signálu dostanou v protifázi a vyruší se. Takto je dosaženo dokonalé izolace mezi branou RF a LO. Oscilační signál z brány 2 se rovněž dělí na poloviny a postupuje po kruhovém segmentu. Na směšovací diody se signál opět dostává ve fázi, čímž budí obě diody a vytváří tak mezifrekvenční signál. Bezprostředně za směšovací diody jsou zapojeny čtvrtvlnné úseky vedení, které jsou zakončeny naprázdno, a proto na vstupu představují zkrat. Tyto úseky jsou vyladěny na frekvenci vstupního a oscilačního signálu. Signály s těmito kmitočty jsou tak těsně za směšovacími diodami zkratovány a nemohou se tak dostat na mezifrekvenční výstup [1].

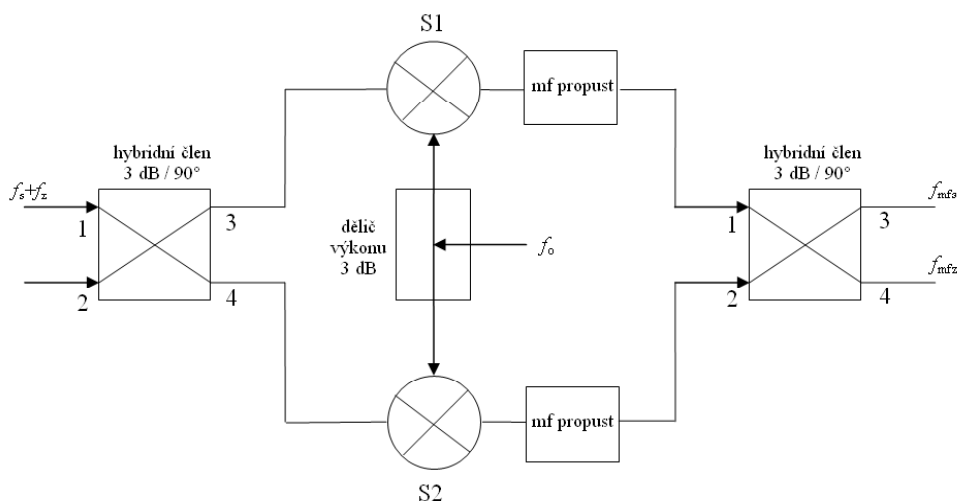
Tyto se vyskytují často v konvertorech u parabolických antén při příjmu televizního signálu. Z principu činnosti hybridních členů je jasné, že oscilační signál musí být naladěn na jednu pevnou hodnotu a vstupní signál nesmí být širokopásmový. Jinak by došlo ke značnému zhoršení vzájemné izolace bran a činnosti směšovače.

2.3 Směšovače s potlačením zrcadlového signálu

Kromě užitečného vstupního signálu se na směšování může podílet i signál, který se nachází na zrcadlovém kmitočtu. Tento signál se rovněž transformuje do pásma mezifrekvence a znehodnocuje tak výsledný signál (kap 1.1). Signál nesený na zrcadlovém kmitočtu je tak nutné dostatečně potlačit. U úzkopásmových systémů využívajících vysoké mezifrekvence může být tento signál potlačen použitím vhodných filtrů na vstupu směšovače. Nejčastěji se jedná o dolní propust. U širokopásmových systémů s nízkou mezifrekvenčí ale nelze touto cestou zrcadlový signál dostatečně potlačit. Pro jejich potlačení se používají speciálně konstruované směšovače s potlačením zrcadlového signálu IRM (Image Reject Mixer) [2].

Jedno z možných zapojení je znázorněno na obr. 2.10. Vstupní signál, který je tvořen součtem užitečného a zrcadlového signálu, je přiveden na vstup 1 třídecibellového hybridního kvadrurního členu. Tento člen funguje tak, že se na výstupu 3 objeví součet signálu ze vstupu 1 a fázově posunutého signálu ze vstupu 2. Na výstupu 4 se analogicky objeví součet signálu z vstupu 2 a fázově posunutého signálu ze vstupu 1. Třídecibellový hybridní kvadrurní člen obrací fázi o 90° . Signály z výstupů 3 a 4 pak pokračují na vstup směšovačů. Tyto směšovače by měli mít přibližně stejné parametry. Oscilační signály vstupující do obou směšovačů musí být ve fázi, proto je vhodné použít jeden zdroj oscilačního signálu a dělič výkonu. Vý-

stupní signály směšovačů procházejí mezifrekvenčními filtry, kde se potlačí součtové mezifrekvenční složky, a vstupují do druhého třídecibellového hybridního kvadraturního členu. Matematickým rozбором [1] lze dokázat, že díky fázovým poměrům se na výstupu 3 hybridního členu objeví mezifrekvenční složka vzniklá směřováním užitečného signálu s oscilačním a na výstupu 4 se objeví mezifrekvenční složka vzniklá směřováním zrcadlového signálu s oscilačním.



Obr. 2.10: Směšovač se samočinným potlačením zrcadlového signálu

Vlivem toho, že fázové poměry nejsou v praxi ideální, není ani potlačení mezifrekvenční složky na výstupu 3 dokonalé. V praxi však neklesá pod 20 dB. Výhodou tohoto zapojení je proti jednoduchým směšovačům i zpracování o 3 dB silnějších signálů. Na druhou stranu je ale rovněž nutné použít oscilační signál s větší výkonovou úrovní. Zhruba 2–3 dB. Rovněž se zlepšuje i šumové číslo směšovače, neboť se na výstupu neobjevuje šum z pásma na zrcadlového kmitočtu.

3 REALIZACE SMĚŠOVAČE

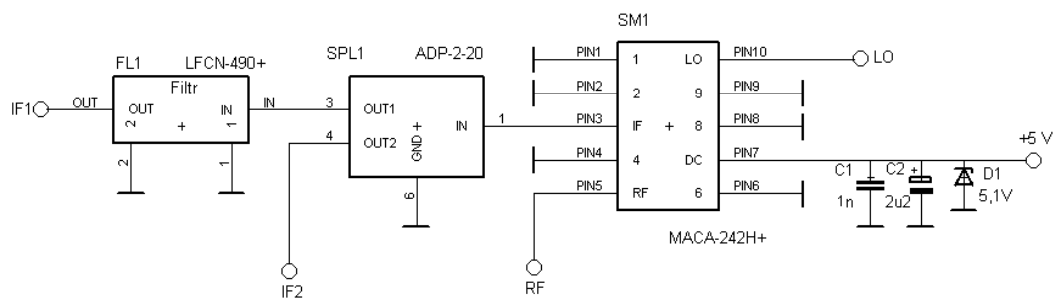
3.1 Popis směšovače

Pro samotnou realizaci směšovače byl vybrán integrovaný obvod MACA-242H+[8] od firmy Mini-Circuits. Jedná se o dvojitě vyvážený aktivní směšovač pracující v pásmu 750–2400 MHz. Frekvenčním rozsahem je tedy určen například pro konstrukce meteorologických radarů, GSM aplikace nebo například pro přijímače pracující v televizním UHF pásmu. Další charakteristické parametry tohoto směšovače jsou následující:

- maximální výkon RF signálu: 20 dBm
- maximální výkon LO signálu: 10 dBm
- maximální výstupní proud: 40 mA
- pracovní teplota: -40–85 °C
- konverzní ztráty: 6,1 dB
- bod jednodécibellové komprese P_{-1} : typ. 10 dBm
- vzájemná izolace bran LO–RF: min. 4 dB, typ. 20 dB
- vzájemná izolace bran LO–IF: min. 28 dB, typ. 55 dB
- rozsah kmitočtů na výstupu: 0–500 MHz
- napájecí napětí: 5 V (110 mA)

Zapojení směšovače je znázorněno na obr. 3.1. Vstupní signály jsou přivedeny přímo k pinům RF a LO směšovače. Z výstupu IF samotného směšovače je veden signál na vstup děliče výkonu ADP-2-20 [10], který pracuje v pásmu 20–2000 MHz. Z jednoho výstupu děliče výkonu dostáváme signál, který prochází přes filtr dolní propusti [9] s mezní frekvencí 490 MHz na výstup IF1. Tento filtr slouží k potlačení nežádoucích frekvenčních složek na výstupu a zároveň ke zlepšení vzájemné izolace bran LO a IF. Z druhého výstupu se pak signál dostává přímo na výstup IF2. Toto zapojení tedy umožňuje změřit spektrum signálu vystupujícího z IF výstupu před i za filtrem, viz kap. 4.1.3. Na vstup DC směšovače je přivedeno skrz průchodkový kondenzátor 1 nF, který je připevněn na kovové krabičce, napájecí napětí +5 V, které napájí zesilovač oscilačního signálu zabudovaného v integrovaném obvodu. Díky tomuto zesilovači není nutné přivádět silný oscilační signál. Paralelně ke vstupu DC

je připojen keramický kondenzátor, který filtruje vysokofrekvenční složky z napájení, tantalový kondenzátor, který slouží jako zásobník energie při náhodných proudových špičkách, a zenerova dioda sloužící ke stabilizaci napájecího napětí a ochraně proti napěťovým špičkám.

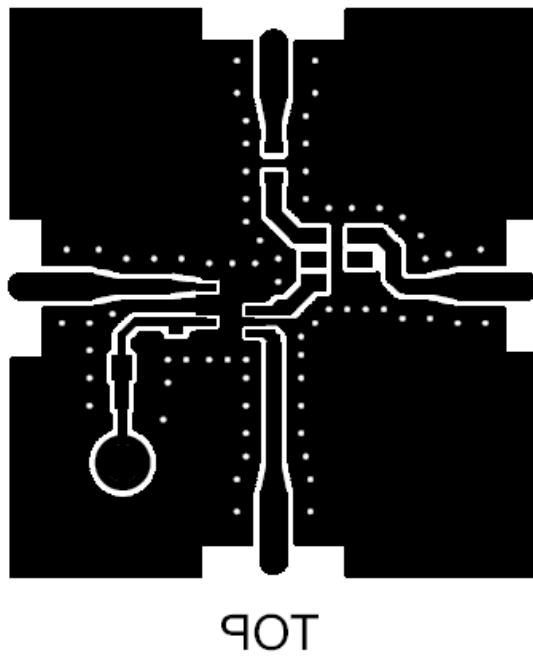


Obr. 3.1: Schéma zapojení směšovače MACA-242H+

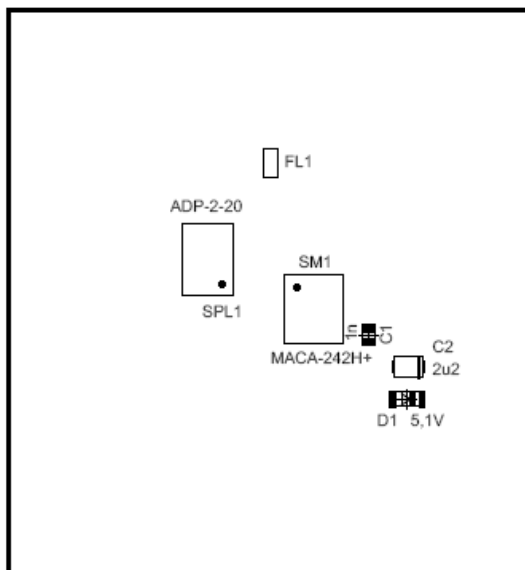
3.2 Návrh desky plošného spoje

Pro realizaci desky plošného spoje (DPS) byla použita deska s typovým označením ARLON 25N. Jedná se materiál vhodný pro konstrukci DPS pro vysokofrekvenční aplikace. Deska z tohoto materiálu má tloušťku 1,52 mm a její relativní permitivita je 3,38. Na základě těchto parametrů byla programem [6] vypočítána šířka vedení a izolační vzdálenost mezi signálovou cestou a zemí. Šířka vedení vyšla 1,5 mm a izolační vzdálenost vyšla 1,27 mm. Impedance vedení je tak v tomto případě rovna 55Ω a PSV nabývá hodnoty 1,1. Tato hodnota je velice uspokojivá. Vzhledem k tomu, že šířka vedení by byla pro naletování konektorů typu N malá, bylo nutné šířku cesty trychtýřovitě rozšířit. Vliv tohoto rozšíření na impedanční poměry vedení by neměl být příliš velký. Možnou alternativou k materiálu ARLON 25N byl materiál FR4, který by svými parametry umožňoval provedení užších cest a izolačních mezer, což by bylo výhodné při vedení cest mezi jednotlivými součástkami a zároveň by to umožnilo cesty lépe přivést k samotnému směšovači, který má jednotlivé vývody velmi blízko sebe. Na druhou stranu by ale byl větší problém s naletováním konektorů typu N.

Na obr. 3.2 je uvedena předloha pro výrobu DPS. Jedná se o vrchní stranu desky. Spodní strana desky je celá vylitá mědí a tvoří zem, která je se zemí na vrchní straně spojena prokovy. Na obr. 3.3 je uveden pohled na DPS ze strany součástek. Ani jedna z předloh není v poměru 1:1 a nelze tedy předlohy pro výrobu z této práce kopírovat, či tisknout!



Obr. 3.2: Předloha pro výrobu DPS



Obr. 3.3: Pohled na desku ze strany součástek

4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ SMĚŠOVAČE

Tato kapitola je rozdělena celkem do dvou částí. První část se zabývá automatizovaným měřením parametrů v prostředí Agilent VEE. Tato měření jsou navržena pro laboratorní úlohu v předmětu Radioelektronická měření a jsou koncipována tak, aby se pomocí nich dala změřit řada parametrů směšovače s využitím minimálního počtu přístrojů. Tato měření jsou uložena na CD, které je rovněž součástí této práce. Pomocí tohoto měření jsou tak změřeny konverzní ztráty, vzájemná izolace bran, bod 1 dB komprese a spektrum signálu na výstupu směšovače. Pro tato měření byly vybrány následující přístroje:

- spektrální analyzátor HP E7404A
- signální generátor HP 8656B ($f_{max} = 990 \text{ MHz}$)
- signální generátor Agilent 83752A ($f_{max} = 20 \text{ GHz}$)
- zdroj napětí Manson SDP2405

Druhá část této kapitoly je zaměřena na měření parametrů směšovače, které již není prováděno automatizovaně, ale přístroje jsou zde ovládány obsluhou ručně. Tato část se zabývá měřením PSV na vstupních bránách směšovače a měřením bodu IP3, viz kap. 1.2.3.

4.1 Automatizované měření

4.1.1 Stručná charakteristika prostředí Agilent VEE

Agilent VEE je vývojové prostředí pro rychlou tvorbu automatizovaných měření. Samotné programování je na rozdíl od práce ve známých jazycích C++, Delphi apod., kde je programování textové, prováděno graficky. To znamená, že se na pracovní plochu vkládají z knihoven objekty plnící různé funkce, pomocí nichž je program sestaven. Samotné prostředí umí komunikovat s počítači připojenými přístroji pomocí sběrnic RS-232, GPIB, LAN a USB. Komunikace s přístroji je prováděna pomocí knihovny VISA, která je součástí balíčku Agilent IO Libraries Suite. Tento balíček je dodáván se všemi přístroji firmy Agilent, které jsou schopny komunikovat s PC pomocí jedné z výše uvedených sběrnic [7].

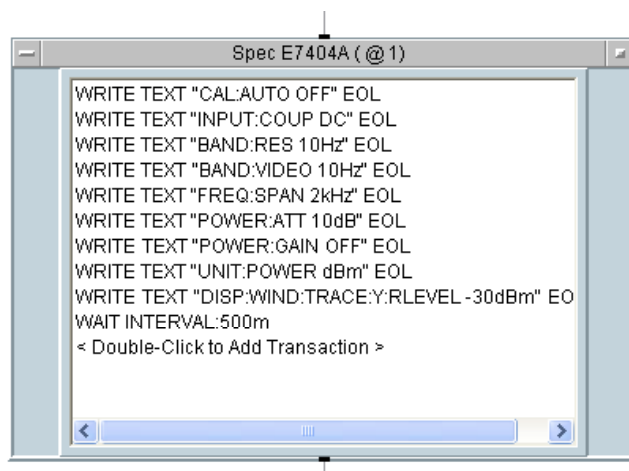
4.1.2 Konverzní ztráty

Konverzní ztráty jsou jedním z nejvýznamějších parametrů směšovačů a určují výkonový rozdíl mezi vstupním signálem RF a výstupním signálem IF, viz kap. 1.2.1.

Na samotném počátku měření se inicializují přístroje a nastaví se jejich základní parametry. Jako zdroj LO signálu je zde použit signální generátor HP8656B, u kterého se nastaví frekvence na pevnou hodnotu 900 MHz. Největší důraz je kladen na správně nastavení parametrů spektrálního analyzátoru HP E7404A. Jeho nastavené parametry jsou následující:

- vazba: DC
- šířka pásma filtrů RES a VIDEO: 10 Hz
- atenuátor: 10 dB
- zisk: 0 dB
- jednotky na ose y: dBm
- referenční úroveň: -30 dBm.
- rozpětí frekvenční osy (SPAN): 2 kHz

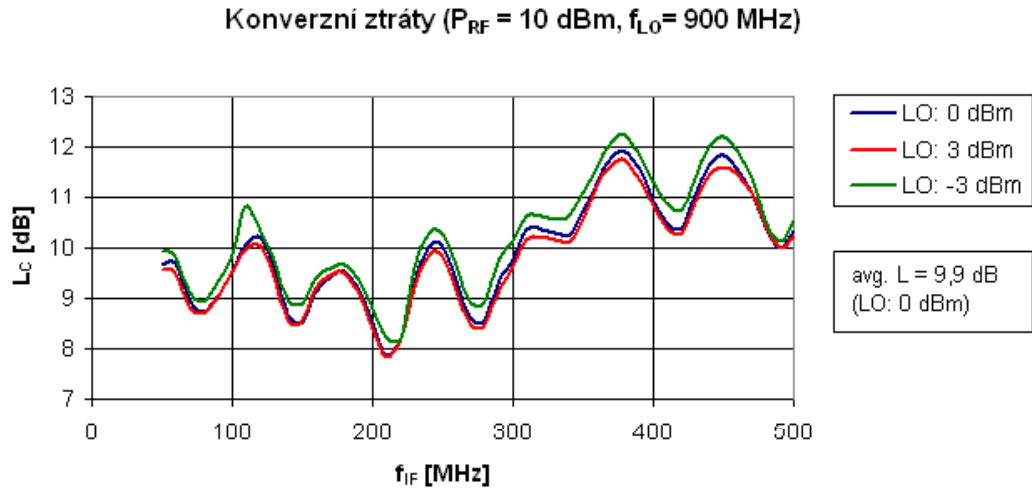
Tyto parametry jsou nastaveny programově, viz obr. 4.1.



Obr. 4.1: Počáteční nastavení spektrálního analyzátoru

Uživatel si před spuštěním samotného měření může ovládacími prvky zvolit výkon LO signálu v rozmezí -3 až +3 dBm a výkon RF signálu v rozmezí -10 až +10 dBm. Samotné měření probíhá tak, že se celkem pro n hodnot nastaví generátor RF signálu (v tomto případě se jedná o signální generátor Agilent 83752A) na požadovanou frekvenci a spektrální analyzátor se přeladí na hodnotu mezifrekvence. Poté program čeká po dobu 1500 ms, aby se měřené hodnoty ustálily. Po uplynutí této doby je na spektrálním analyzátoru umístěn kurzor do maxima zobrazeného

průběhu, o němž se předpokládá, že určuje výkon hledané mezifrekvenční složky. Tato hodnota se zapíše do grafu a celý proces opakovaně pokračuje pro další frekvence. Na obr. 4.2 jsou vidět naměřené průběhy konverzních ztrát pro tři hodnoty oscilačního signálu.



Obr. 4.2: Naměřené konverzní ztráty směšovače

Při zpracovávání naměřených výsledků musel být brán zřetel na ztráty děliče výkonu, které činí 3,8 dB pro frekvence 20–200 MHz a 4,0 dB pro frekvence 200–1000 MHz [10]. Výsledné charakteristiky byly tedy vypočítány jako rozdíl naměřených hodnot a ztrát děliče výkonu.

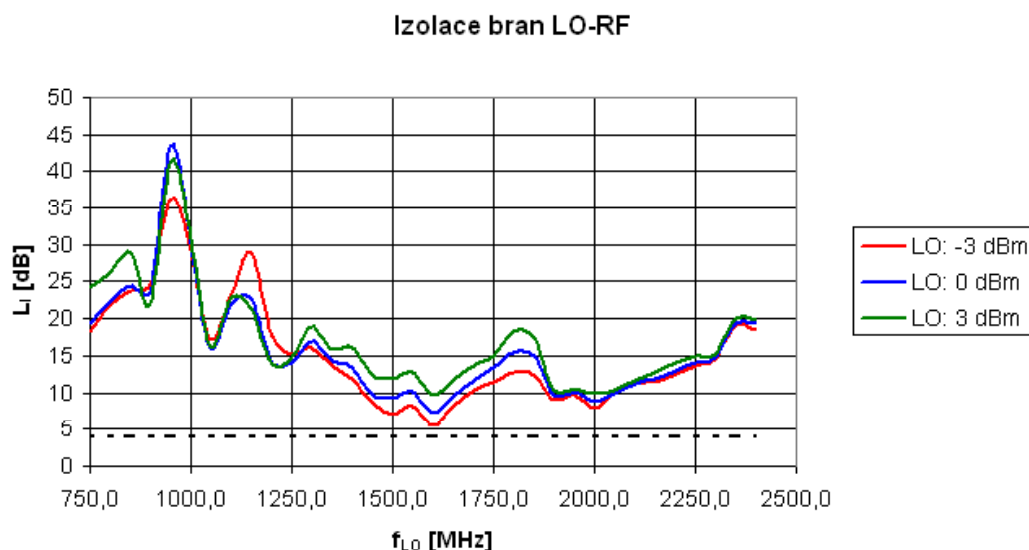
Z výsledných naměřených charakteristik je patrné, že konverzní ztráty jsou silně závislé na frekvenci a zároveň i na výkonové úrovni oscilačního signálu. Průměrná hodnota ztrát je 9,9 dB pro výkon oscilačního signálu 0 dBm. Výrobce udávaná průměrná hodnota konverzních ztrát je 6,1 dB a maximální hodnota 9,8 dB. Z tohoto je patrné, že vzniklá chyba se pohybuje okolo hodnoty 4 dB, což není hodnota ideální, ale stále ještě přijatelná. Při tomto měření nebyl brán zřetel na útlum použitých kabelů a konektorů. Předpokládá se však, že útlum těchto komponent je malý a příliš neovlivní výsledné hodnoty.

4.1.3 Vzájemná izolace bran

Toto měření je principiálně velmi podobné s předchozím měřením konverzních ztrát. Uživatel si zde však oproti předchozímu měření může zvolit pouze úroveň oscilačního signálu, a to v rozmezí opět -3 až 3 dBm. Před započítáním měření je nutné se rozhodnout, mezi kterými bránami se bude zjišťovat jejich izolace. Vstupní brána je

vždy brána LO a jako výstupní brána může být zvolena brána RF, IF1 nebo IF2. Ostatní brány musí být impedančně přizpůsobeny.

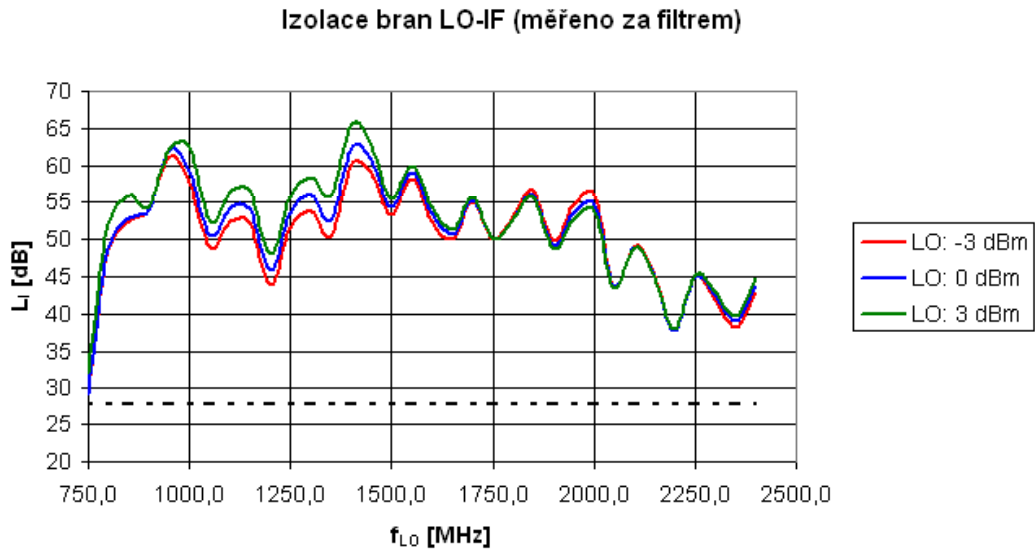
Na začátku měření se opět inicializují používané přístroje. Samotné měření opět probíhá v n bodech. V každém bodu měření je nastaven generátor Agilent 83752A, který je zde tentokrát přítomen jako zdroj LO signálu, na danou frekvenci. Spektrální analyzátor je přeladěn na shodnou frekvenci a stejně jako při měření konverzních ztrát je odečtena maximální hodnota výkonu spektrální složky na výstupu. Tímto způsobem je proměřen celý rozsah vstupních frekvencí směšovače.



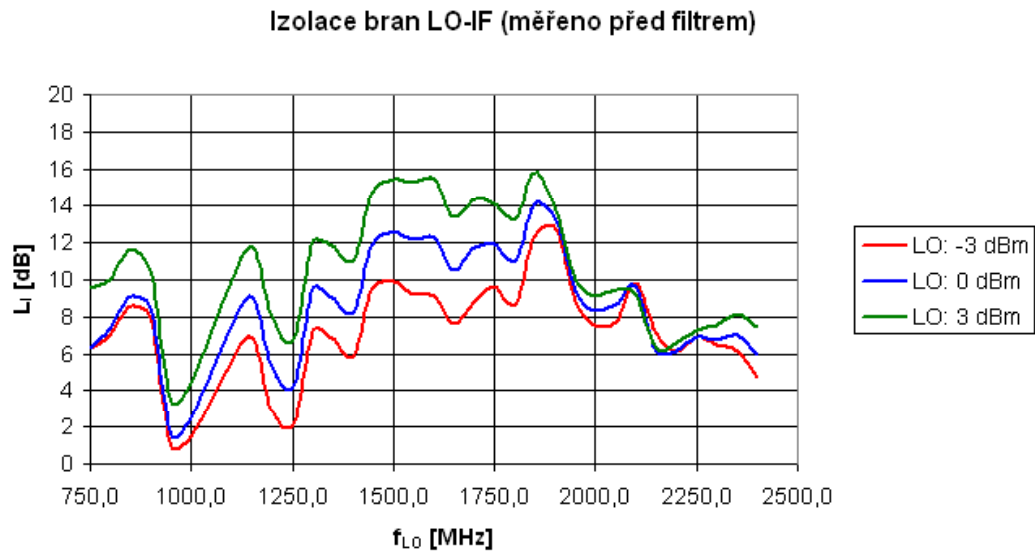
Obr. 4.3: Vzájemná izolace bran LO a RF

Na obr. 4.3 jsou vidět naměřené průběhy vzájemné izolace bran LO a RF, které jsou již opět upravené v závislosti ztrát děliče výkonu podle [10]. Z měření opět plyne, že stejně jako konverzní ztráty je i vzájemná izolace bran závislá na frekvenci a výkonu oscilačního signálu. V grafu je silnou čárkovanou čarou vyznačena mez, pod kterou by podle výrobce vzájemná izolace brány LO a RF neměla nikdy klesnout. Tato mez má hodnotu 4 dB. Výrobce udává typickou hodnotu izolace LO a RF brány je 20 dB. Z grafu je patrné, že ani v nejnepříznivějším případě, tedy při frekvencích okolo 1600 MHz a výkonu oscilačního signálu -3 dBm, není tato mez překročena.

Změřeny byly rovněž závislosti vzájemné izolace bran LO a IF na kmitočtu a výkonu oscilačního signálu, a to před i za výstupním dolnofrekvenčním filtrem, viz kap. 3.1. Na obr. 4.4 jsou vyneseny průběhy vzájemné izolace bran, které jsou měřeny za filtrem. Na obrázku je opět vynesena silnou čárkovanou čarou mez, pod kterou neklesá ani jeden z naměřených průběhů. Tato mez má hodnotu 28 dB. Výrobce udává typickou hodnotu této izolace je 55 dB.



Obr. 4.4: Vzájemná izolace bran LO a IF změřená za filtrem

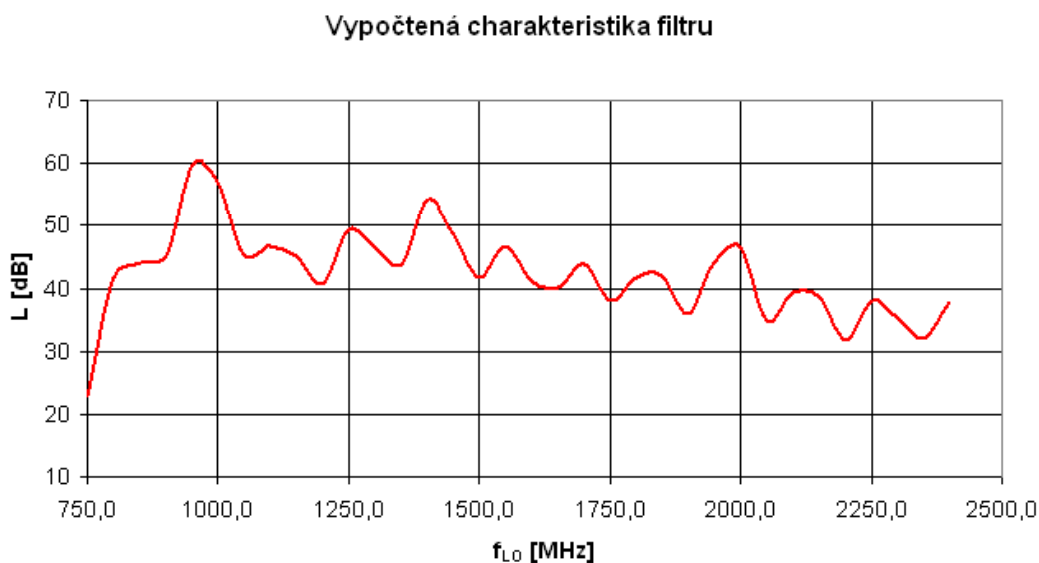


Obr. 4.5: Vzájemná izolace bran LO a IF před za filtrem

Z průběhu vzájemné izolace bran LO a IF změřené před filtrem je na obr. 4.5 vidět, že izolace nedosahuje ani hodnoty 17 dB a že v nejhorsím případě klesá na hodnotu 1 dB. Je tedy znát, že filtr na výstupu směšovače má své opodstatnění.

Z průběhů izolace bran LO a IF byla vypočítána i kmitočtová charakteristika filtru. Charakteristika byla vypočtena tak, že se pro všechny tři hodnoty výkonů oscilačního signálu určily hodnoty odpovídající rozdílům průběhů před i za filtrem. Následně byly tyto hodnoty zprůměrovány a vyneseny do grafu, viz obr. 4.6. Z prů-

běhu kmitočtové charakteristiky je patrné, že útlum filtru se pohybuje okolo hodnoty 45 dB a se zvyšující se frekvencí klesá.



Obr. 4.6: Kmitočtová charakteristika filtru

4.1.4 Bod 1 dB komprese

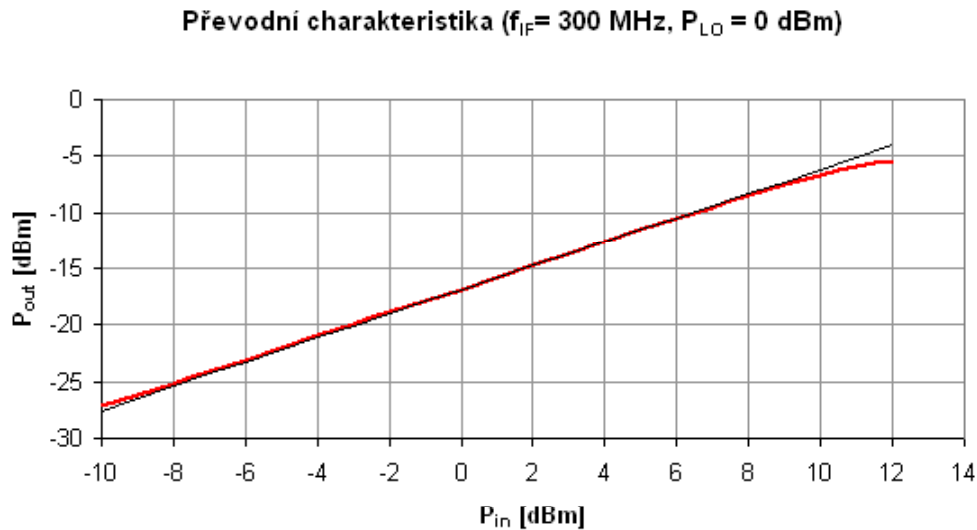
Při měření převodní charakteristiky, a tedy i bodu jednodécibellové komprese, je zapojení přístrojů shodné se zapojením pro měření konverzních ztrát. Pro určení bodu jednodécibellové komprese je nutné znát závislost výstupního výkonu na vstupním výkonu v lineární části průběhu. Toho lze dosáhnout vypočtením rovnice přímky

$$y = kx + c, \tag{4.1}$$

kde k je směrnice přímky a c je posun na ose y . Tato rovnice přímky se v programu počítá hned po inicializaci přístrojů. Pro výpočet směrnice přímky se na RF generátoru nastavily postupně hodnoty 0 a 3 dBm a spolu z hodnotami odečtenými ze spektrálního analyzátoru se z nich vypočítala její velikost. Pro posun na ose y byla použita hodnota odečtená ze spektrálního analyzátoru pro vstupní hodnotu RF signálu 0 dBm. Samotné měření probíhalo tak, že se na RF generátoru postupně nastavovaly hodnoty od -10 dBm s krokem 0,5 dBm směrem k vyšším hodnotám a na spektrálním analyzátoru se odečítala hodnota výstupního výkonu. Zároveň se z výkonu RF generátoru a rovnice přímky počítala teoretická hodnota výstupního výkonu. Při dosažení odchylky mezi teoretickou a naměřenou hodnotou větší než 1 dB se měření přerušilo. Poslední zobrazená hodnota v grafu pak odpovídá přímo

bodu 1 dB komprese. Z průběhu na obr. 4.7 je patrné, že bod jednodecibelové komprese má hodnotu přibližně 12 dBm, což je hodnota srovnatelná s 10 dBm, kterou uvádí výrobce.

S bodem jednodecibelové komprese úzce spjat i dynamický rozsah směšovače. Ten však nebyl měřen, neboť vlastní šum směšovače je značně nižší než šum použitých přístrojů a tudíž nemohl být změřen. Při použití jiných přístrojů by se tak jeho hodnota změnila.



Obr. 4.7: Přenosová charakteristika

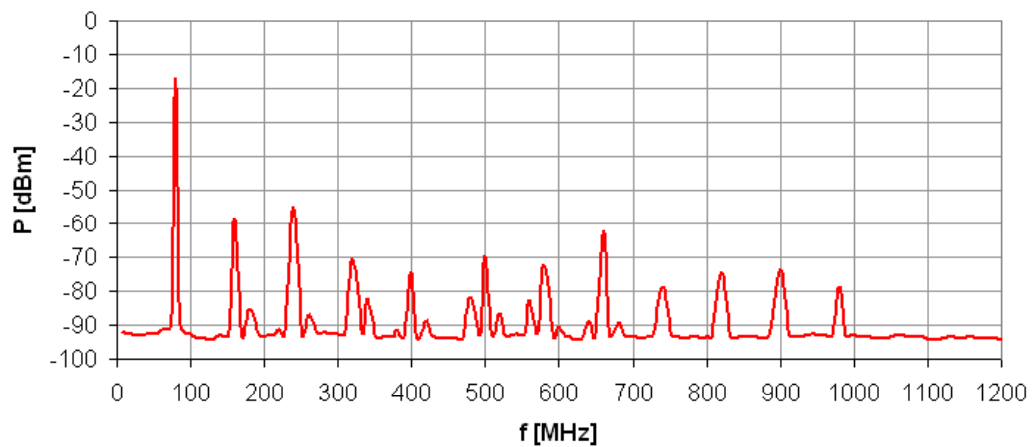
4.1.5 Spektrum signálu na výstupu směšovače

Součástí této bakalářské práce je i vytvoření programu pro zobrazení spektra výstupního signálu. Uživatel si v programu může nastavit frekvenci a výkon RF a LO signálu. U LO signálu je ale frekvenční rozsah shora omezen použitým generátorem na 990 MHz. Po spuštění programu s určitým krokem přeladuje spektrální analyzátor a odečítá vždy maximální zobrazenou hodnotu. V tomto případě je analyzátor přeladován v rozsahu 10–1200 MHz s krokem 10 MHz a šířkou zobrazeného pásma (SPAN) rovněž 10 MHz. Při měření je tak prohledáno celé spektrum výstupního signálu. Program vykazuje jistou nedokonalost v případě, kdy by se vyskytovaly dvě špičky signálu velmi blízko sebe. Program by pak do grafu zakreslil špičku s vyšší úrovní. Tento problém lze snadno vyřešit jemnějším přeladováním analyzátoru, avšak na úkor časové náročnosti měření. Při tomto měření bylo rovněž nutné nastavit jiné filtry oproti minulým měřením. Jako vhodné filtry se ukázaly filtry $RES = 120$ kHz a $VIDEO = 1$ kHz.

Na obr. 4.8 je zobrazeno spektrum výstupního signálu měřeného na výstupu IF1. Tento průběh byl naměřen při nastavení následujících parametrů:

- $f_{LO} = 900$ MHz
- $f_{RF} = 980$ MHz
- $P_{LO} = 0$ dBm
- $P_{RF} = 10$ dBm

**Spektrum výstupního signálu ($P_{RF} = 10$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm,
 $f_{RF} = 980$ MHz, $f_{LO} = 900$ MHz)**



Obr. 4.8: Spektrum výstupního signálu

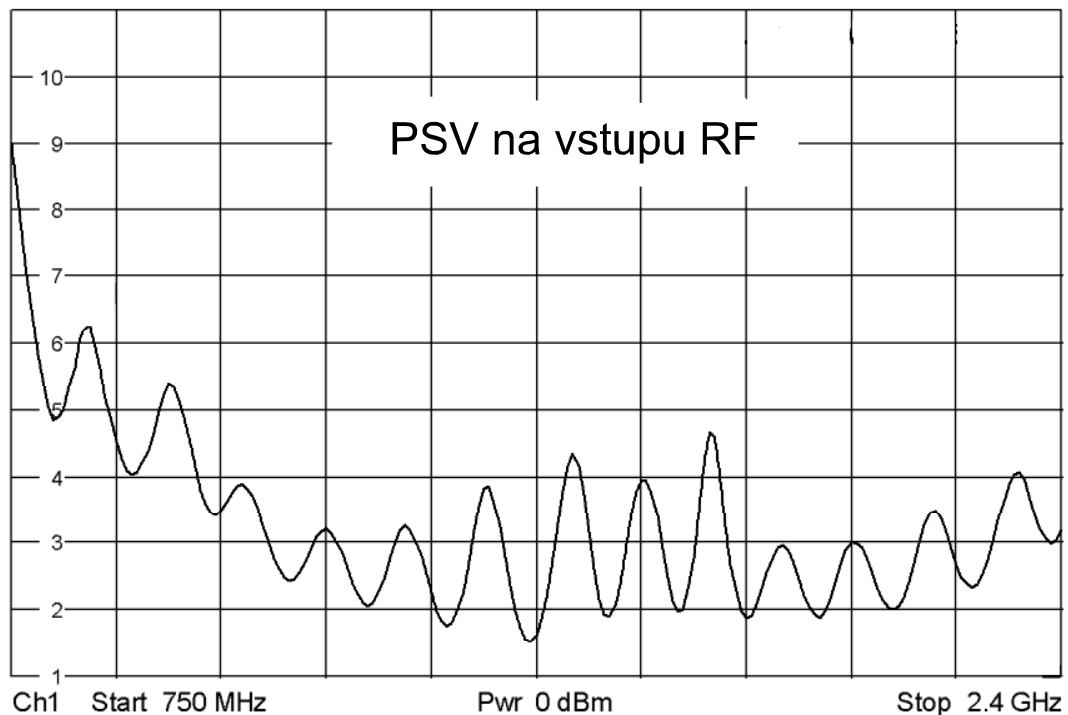
Ze spektra je dobře vidět, že se mezifrekvence nachází na hodnotě 80 MHz a má nejvyšší úroveň. Ve spektru jsou partné i složky nacházející se na násobcích mezifrekvece, tedy na frekvencích 160 MHz, 240 MHz, 320 MHz apod. Druhá složka se nachází na frekvenci 240 MHz a oproti užitečnému signálu je utlumena přibližně o 40 dB. Tato složka by tedy neměla příliš ovlivňovat výsledný průběh. V průběhu je vidět i značné množství složek vzniklých podle vztahu 1.1. Tyto složky se ale nacházejí téměř na úrovni šumu.

4.2 Ruční měření

4.2.1 PSV na vstupních branách

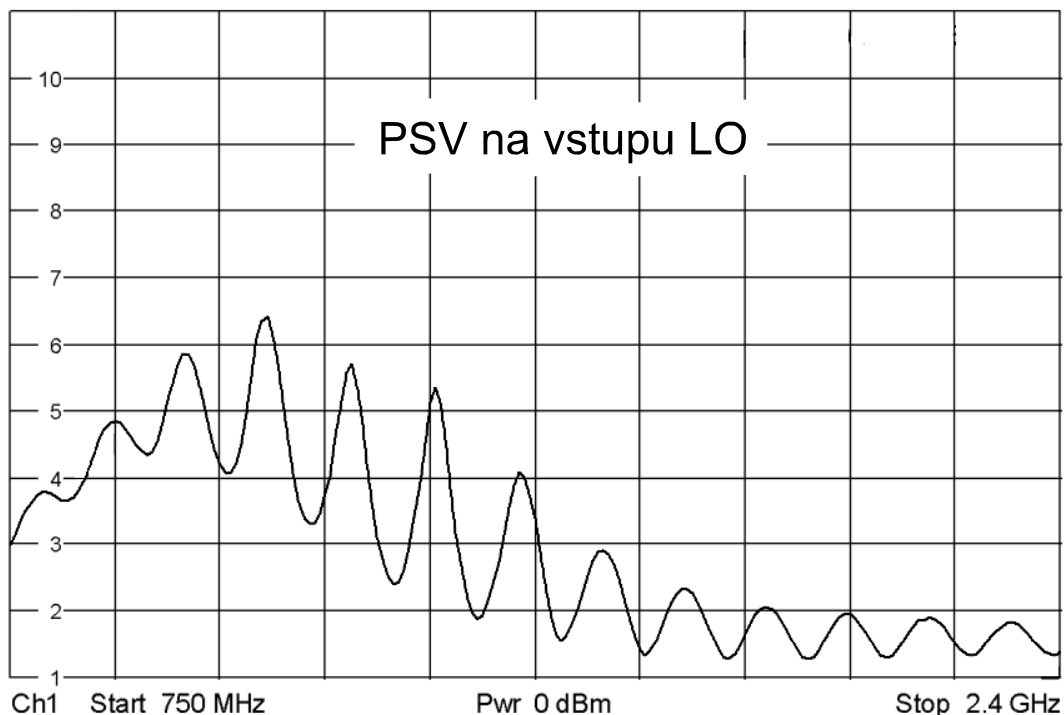
Pro měření PSV byl vybrán vektorový analyzátor R&S ZVL. Před samotným měřením bylo nutné správně zkalibrovat přístroj pomocí širokopásmového zkratu, otevřeného konce a přizpůsobené zátěže. Samotné měření nebylo nijak složité. Analyzátor

musel být pouze nastaven na požadovaný frekvenční rozsah, v tomto případě se jednalo o rozsah vstupních frekvencí směšovače 750–2400 MHz, a na ose y se zvolilo zobrazení parametru S11 přímo v hodnotách VSWR (PSV). Naměřené hodnoty byly získány formou screenshotů z obrazovky analyzátoru. Na obr. 4.9 je zobrazen průběh PSV na RF vstupu. Z průběhu je zřejmé, že PSV je značně kmitočtově závislá veličina a že nejnepříznivějších hodnot nabývá PSV na spodní hranici frekvenčního rozsahu. Výrobce udávané hodnoty PSV na vstupu RF nepřesahují hodnotu 7 [8]. Tato hranice je překročena pouze u již zmiňované spodní hranice rozsahu.



Obr. 4.9: PSV na RF vstupu

Na obr. 4.10 je zobrazen průběh PSV na vstupu LO. Tyto naměřené hodnoty však nejsou příliš ideální, protože výrobcem udávané hodnoty PSV nepřesahují hodnotu 2,5. Naměřené hodnoty v tomto případě však dosahují hodnoty až 6,5 a pod hodnotu 2,5 klesnou až zhruba v druhé polovině frekvenčního průběhu, tedy od frekvence cca 1700 MHz.



Obr. 4.10: PSV na LO vstupu

4.2.2 Bod zahrazení IP3

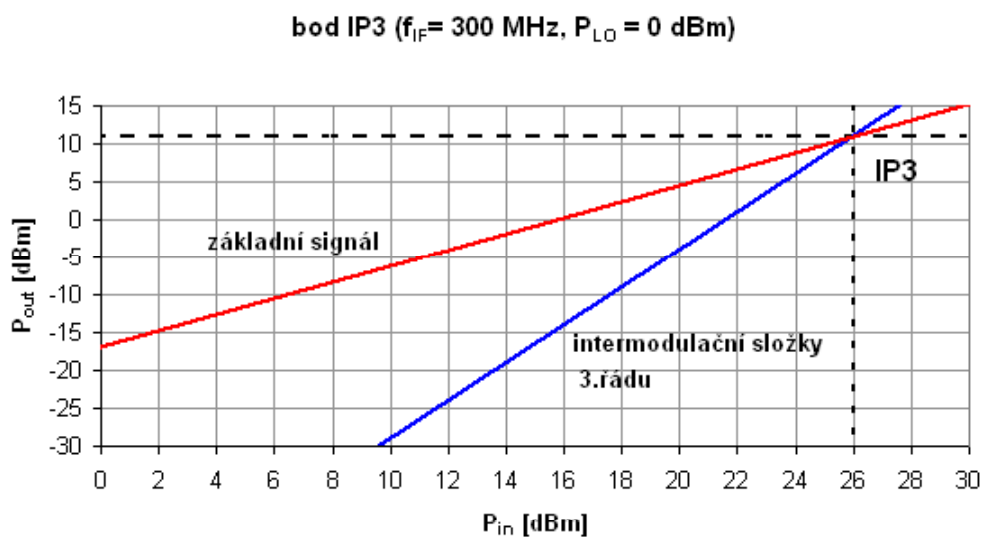
Pro změření bodu IP3 bylo zapotřebí použít ještě třetí signální generátor, a to Agilent N5181A. Tento generátor je schopný dodávat signál o frekvenci až 3 GHz. Na RF vstup směšovače byly přes dělič výkonu HP 11667A [11], který je ale v tomto případě zapojen jako slučovač, zapojeny signální generátory Agilent N5181A a Agilent 83752A. Na obou generátorech byl shodně zvedán výkon a na spektrálním analyzátoru pak byly odečítány úrovně intermodulačních složek 3. řádu. V potaz musel být brán i zřetel na útlum děliče/slučovače, který činí 7 dB. V tab. 4.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty výkonů intermodulačních složek 3. řádu v závislosti na výkonu RF signálu.

P_{in} [dBm]	-12	-9,5	-7	-4,5	-2	0,5	3	5,5	8	10,5
P_{out} [dBm]	-82	-76	-71	-66	-60	-57	-52	-37	-30	-27

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty výkonů intermodulačních složek 3. řádu

Na obr. 4.11 je červenou barvou vyznačen idealizovaný průběh převodní charakteristiky, viz kap. 4.1.4. Do společného grafu jsou vyneseny i výkony intermodulačních složek z tab. 4.1, které jsou proloženy modrou lineární spojnicí trendu. Bod IP3 se nechází v průsečíku obou přímek. Z grafu plyne, že vstupní souřadnice bodu IP3 nabývá hodnoty přibližně 26 dBm, což je běžná hodnota u klasických

směšovačů, a výstupní souřadnice se pohybuje okolo hodnoty 11 dBm. Výrobce udávaná hodnota bodu IP3 je 18 dBm, avšak výrobce nespecifikuje, zda se jedná o vstupní či výstupní souřadnici. Každopádně tato udávaná hodnota nekoresponduje ani s jednou souřadnicí naměřeného bodu IP3.



Obr. 4.11: Bod zahrazení IP3

5 ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo popsat parametry směšovačů a jejich měření a zaměřit se na možnosti konstrukce směšovačů. Hlavním cílem této práce však bylo zkonstruovat plně funkční směšovač a navrhnout automatizované měření parametrů a spektra výstupního signálu. Součástí práce bylo i navržení laboratorní úlohy s realizovaným směšovačem pro předmět Radioelektronická měření vyučovaném na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Vysokém učení technickém v Brně.

První část bakalářské práce byla teoretická a byla zaměřena zejména na princip činnosti směšovačů a na typické parametry spolu s jejich principiálním měřením. Bylo zde uvedeno, jak lze například měřit dynamický rozsah, bod zahrazení IP₃, poměr stojatých vln na vstupních bránách apod. V části zabývající se konstrukcí směšovačů byly popsány nejprve rozdíly mezi diodovými a tranzistorovými směšovači. Z rozboru je patrné, že ačkoliv diodové směšovače nejsou příliš vhodné z důvodů vzniku nežádoucích směšovacích produktů vyšších řádů, jsou nepostradatelné v aplikacích pracujících v pásmu desítek až stovek GHz, kde zatím nejsou tranzistorové směšovače použitelné. Z hlediska obvodového řešení se jako nejideálnější řešení jeví použití vyvážených směšovačů, které mají oproti asymetrickým zapojením celou řadu výhod. Jako nejideálnější řešení směšovače se z hlediska vlastností jeví zapojení dvojité vyváženého diodového směšovače.

Druhá část této práce byla zaměřena čistě prakticky na návrh a konstrukci směšovače. Bylo zde uvedeno zapojení spolu s popisem činnosti realizovaného směšovače. Nejdůležitější částí celého návrhu byl návrh desky plošného spoje, u kterého se muselo dbát, stejně jako u všech vysokofrekvenčních zařízení, na impedanční poměry v obvodu. S plně funkčním vzorkem byly navrženy automatizovaná měření v prostředí Agilent VEE. Pomocí těchto měření byly změřeny konverzní ztráty, vzájemná izolace bran, bod jednodéciblové komprese a rovněž bylo navrženo měření spektra výstupního signálu. Naměřené průměrné konverzní ztráty se pohybovaly 4 dB nad průměrnými ztrátami udávanými výrobcem. Takováto chyba mohla vzniknout například nevhodným přiletováním součástek na desku, případně nezahrnutím útlumu konektorů a přívodních kabelů. Obě měřené vzájemné izolace bran, tedy izolace mezi bránami LO–IF a LO–RF, v celém frekvenčním průběhu nespady pod výrobcem udané hranice. Při tomto měření se rovněž ukázalo, jak je důležitý výstupní filtr zapojený na výstup směšovače, neboť z průběhů naměřených před i za filtrem plyne, že filtr zlepšuje vzájemnou izolaci bran LO a IF přibližně o 45 dB. Bod jednodéciblové komprese získaný z naměřené převodní charakteristiky rovněž koresponduje s teoretickou hodnotou udávanou výrobcem. Při měření poměru stojatých vln na vstupních bránách směšovače, které již ale nebylo prováděno automatizovaně, se

ukázalo, že PSV na vstupu RF vyhovuje limitám získaným z katalogového listu výroce, avšak PSV na LO vstupu není tak ideální a vyhovuje pouze pro druhou polovinu frekvenčního průběhu. Hodnota bodu zahrazení IP3 rovněž neodpovídá teoretické hodnotě, ale na druhou stranu má vstupní souřadnice bodu IP3 hodnotu 26 dBm, což je u směšovačů běžná hodnota.

Při návrhu a výrobě směšovače v profesionálních podmínkách, například ve specializované firmě, by bylo jistě možné dosáhnout lepších paramterů. Avšak parametry tohoto směšovače nabývají uspokojivých hodnot a v nenáročných aplikacích by tento směšovač mohl pracovat bez větších problémů. Směšovač rovněž plně splňuje parametry na něj kladené pro potřeby laboratorní úlohy do předmětu MREM.

LITERATURA

- [1] Žalud, V.: *Vysokofrekvenční přijímací technika*, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1986.
- [2] Žalud, V., Dobeš, J.: *Moderní radiotechnika*, BEN - technická literatura, Praha, 2006.
- [3] Prokeš, A.: *Rádiové přijímače a vysílače*, Elektronický učební text, 179 stran, www.feec.vutbr.cz.
- [4] Hanus, S., Svačina, J.: *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*, Elektronický učební text, 208 stran, www.feec.vutbr.cz.
- [5] Zanánek, P., *Diodové dvojité vyvážené kruhové směšovače*, Amaterské RADIO, květen 1994, roč. 43, č. 5, s. 38.
- [6] *Impedance Calculator for Grounded Coplanar Waveguide* [počítačový program], citováno 2009-11-9. Dostupné z URL <http://www.eecircle.com/applets/015/Gcpw.html>>.
- [7] Dřínovský, J.: *Seznámení s grafickým programovým prostředím Agilent VEE a měření A-V charakteristik* [návod pro laboratorní úlohu], citováno 2010-20-4. Dostupné z URL http://www.urel.feec.vutbr.cz/%7Edrinovsky/?download=MREM_2010_L%2000.pdf>.
- [8] *Ceramic Active Mixer MACA-242H+* [online datasheet], citováno 2010-24-4. Dostupné z URL <http://www.minicircuits.com/pdfs/MACA-242H+.pdf>>.
- [9] *Ceramic Low Pass Filter LFCN-490* [online datasheet], citováno 2010-24-4. Dostupné z URL <http://www.minicircuits.com/pdfs/LFCN-490.pdf>>.
- [10] *Surface Mount Power Splitter/Combiner ADP-2-20* [online datasheet], citováno 2010-24-4. Dostupné z URL <http://www.minicircuits.com/pdfs/ADP-2-20.pdf>>.
- [11] *Power Dividers and Splitters* [online datasheet], citováno 2010-5-5. Dostupné z URL <http://www.datasheetarchive.com/pdf/Datasheet-011/DSA00187068.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

SSB modulace s jedním postranním pásmem – Single Side Band modulation

DSB modulace s dvěma postranním pásmem – Double Side-band modulation

RF vysokofrekvenční signál – Radion Frequency

LO oscilační signál – Local Oscillator

IF mezifrekvenční signál – Intermediate Frequency

f_{mf} , f_s , f_o mezifrekvenční, vysokofrekvenční a oscilační kmitočet

L_c konverzní ztráty

A_c konverzní zisk

L_i izolace bran

L útlum

dB decibel – jednotka míry poměru

PSV (VSWR) poměr stojatých vln – Voltage Standing Wave Ratio

F šumový činitel

DR dynamický rozsah – Dynamic Range

MDS minimální detekovatelný signál – Minimal Detectable Signal

P_{-1} bod jednodecibelové komprese

SFDR dynamický rozsah bez zkreslení intermodulačními složkami 3. řádu –
Spurious-Free Dynamic Range

IP3 bod zahrazení – Intercepr Point

IMD3 výkonový odstup intermodulačních složek 3. řádu a užitečného signálu –
Intermodulation Distortion

FET tranzistor řízený elektrickým polem – Field Effect Transistor

VKV velmi krátké vlny

IRM směšovač s potlačením zrcadlového kmitočtu – Image Reject Mixer

GSM systém mobilních komunikací – Global System for Mobile Communications

UHF ultra vysoké frekvence, v ČR označovány jako ultra krátké vlny – Ultra High Frequency

DPS deska plošného spoje

GSM systém mobilních komunikací – Global System for Mobile Communications

SEZNAM PŘÍLOH

A Návrh laboratorní úlohy pro předmět MREM

41

A NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY PRO PŘED- MĚT MREM

Směšovač vysokofrekvenčních signálů

Zadání

1. Sestavte program, pomocí kterého bude možné vykreslit spektrum signálu na výstupu směšovače (výstup IF1).
2. Navrhněte jednoduchý program pro změření konverzních ztrát směšovače.
3. Pro změření vzájemné izolace bran LO–IF navrhněte program tak, aby do jednoho grafu vykreslil průběh izolace před i za filtrem.
4. Navrhněte program pro změření bodu 1 dB komprese.

Úvod

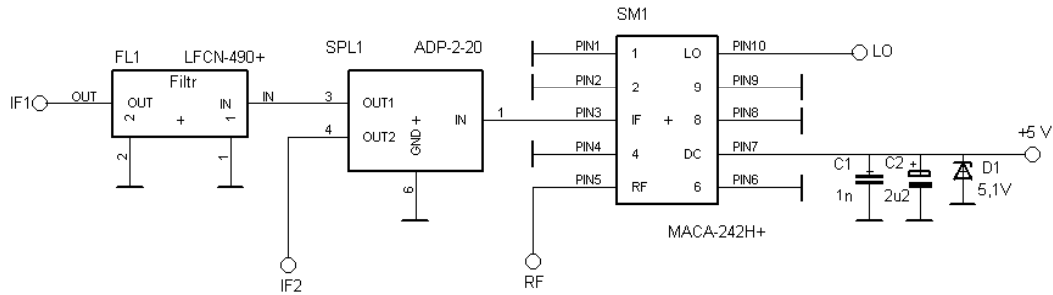
V radioelektronice mají své nezastupitelné místo měniče kmitočtu vysokofrekvenčních signálů. Tyto měniče nacházejí své uplatnění zejména v přijímací a vysílací technice a mohou být využívány jako součásti modulátorů DSB signálů, demodulátorů SSB signálů, fázových detektorů, elektronických atenuátorů apod. Měníče kmitočtu se skládají ze samotného směšovače, který transformuje signál nesoucí informaci z jednoho frekvenčního pásma do druhého, pomocného oscilátoru a filtrů, které upravují signály na vstupu a výstupu směšovače.

Směšovač je nelineární trojbran. Na jeho vstupní bránu RF (Radio Frequency) je přiváděn signál, jenž se směšuje s pomocným signálem přiváděným z oscilátoru na bránu LO (Local Oscillator). Směšováním těchto signálů vzniká na výstupu IF (Intermediate Frequency) celá řada frekvenčních složek, které jsou dány rovnicí A.1. Užitečné složky však bývají pouze rozdílová a součtová ($m, n = 1$). Rozdílová složka

má nižší frekvenci než vstupní signál a je využívána zejména u přijímačů. Směšovače, které takto transformují signál do nižšího frekvenčního pásma, se označují jako Down-Converter, což je i případ měřeného přípravku.

$$f_{mf} = mf_s \pm nf_o, \quad (\text{A.1})$$

Mezi základní parametry směšovačů měřené v této úloze patří konverzní ztráty L_c [dB], vzájemná izolace bran L_i [dB] a bod jednodeciblové koprese P_{-1} [dBm], který ohraničuje shora dynamický rozsah. Konverzní ztráty udávají rozdíl mezi úrovní RF signálu a IF signálu a jsou značně frekvenčně závislé. Rovněž závisí na úrovni LO signálu. Vzájemná izolace bran ukazuje, jak moc je směšovač schopný potlačit signál, který vstupuje do jedné brány, na ostatních branách. Nejvíce se hlídá izolace bran LO–RF, která musí být dostatečná, aby signál z oscilátoru nepronikal do zařízení, které je zapojeno před směšovač a nemohl tak ovlivnit jeho činnost. Izolace bran LO–IF musí být rovněž vysoká, aby se v užitečném signálu neobjevoval signál z oscilátoru, který by mohl být rušivý. Bod jednodeciblové koprese určuje, jak silné signály je směšovač schopný zpracovat tak, aby na nelinearitách nevznikaly další nežádoucí složky. Tento bod leží v místě, kde se skutečná převodní charakteristika mezi RF a IF odkloní od ideální charakteristiky o 1 dB.



Obr. A.1: Schéma zapojení směšovače MACA-242H+

Na obr. A.1 je nakresleno zapojení přípravku. K napájecímu vstupu směšovače je paralelně připojen keramický kondenzátor, který filtruje vysokofrekvenční složky z napájení, tantalový kondenzátor, který slouží jako zásobník energie při náhodných proudových špičkách, a zenerova dioda sloužící ke stabilizaci napájecího napětí a ochraně proti napěťovým špičkám. Na výstup směšovače je připojen dělič výkonu, jehož útlum jsou 4 dB, a díky němuž je možné proměřit spektrum signálu před i za filtrem. Zapojený dolnofrekvenční filtr s mezním kmitočtem 490 MHz odstraňuje

z výstupního signálu nežádoucí frekvenční složky a zároveň zlepšuje vzájemnou izolaci bran LO–IF. Samotný směšovač je pasivní a přivedené napětí je potřeba k napájení zesilovače, který je zabudován ve směšovači a zesiluje oscilační signál. Oscilační signál tedy nemusí mít příliš velkou úroveň. Parametry směšovače jsou následující:

- rozsah kmitočtů na RF a LO vstupech: 750–2400 MHz
- rozsah kmitočtů na výstupu: 0–500 MHz
- maximální výkon RF signálu: 20 dBm
- maximální výkon LO signálu: 10 dBm
- typické konverzní ztráty: 6,1 dB (naměřené konverzní ztráty se mohou lišit)
- bod jednodecibelové komprese P_{-1} : typ. 10 dBm
- vzájemná izolace bran LO–RF: min. 4 dB, typ. 20 dB
- vzájemná izolace bran LO–IF: min. 28 dB, typ. 55 dB
- napájecí napětí: 5 V (110 mA)

Při měření je nutné dbát na dodržení zejména maximálních hodnot výkonů RF a LO signálů a na nastavení proudové pojistky. Při překročení těchto hodnot by mohlo dojít ke **ZNIČENÍ** přípravku!

Postup měření

1. Program pro měření spektra výstupního signálu by měl pracovat na podobném principu jako spektrální analyzátor. To znamená, že program bude skokově měnit frekvenci, na kterou se bude přeladovat spektrální analyzátor. Analyzátor pak v každém kroku najde maximální hodnotu (špičku), kterou zapíše do grafu. kmitočtový krok musí být vhodně zvolen tak, aby bylo dosaženo určitého kompromisu mezi přesností zobrazeného spektra a časovou náročností. Program vytvořte tak, aby měl uživatel jistou volnost v nastavování frekvence a výkonu LO a RF signálu v rámci technických možností směšovače, viz úvod. Nezapojené brány musí být vždy impedancečně přizpůsobeny. **Doporučení:** výkon LO signálu volte u všech měření mezi -5 a +5 dBm.

Pro měření jsou k dispozici následující přístroje spolu s jejich příkazy:

- spektrální analyzátor HP E7404A
 - ***RST** - resetování přístroje

- ***IDN?** - vrátí inicializační řetězec měřicího přístroje
 - **BAND:RES XXHz** - nastaví šířku pásma vstupního hardwarového filtru na XX Hz
 - **BAND:VIDEO XXHz** - nastaví šířku pásma vstupního softwarového filtru na XX Hz
 - **CAL:AUTO OFF** - vypne autokalibraci přístroje
 - **CALC:MARK1:CPE ON** - zapne automatické sledování maximální hodnoty (špičky)
 - **CALC:MARK1:MAX** - nastaví marker na maximum signálu v zobrazeném pásmu
 - **CALC:MARK1:X?** - vrátí hodnotu na ose X na pozici markeru
 - **CALC:MARK1:Y?** - vrátí hodnotu na ose Y na pozici markeru
 - **DISP:WIND:TRACE:Y:RLEVEL XXdBm** - referenční úroveň pro zobrazení, jedná se o hodnotu horního okraje displeje
 - **FREQ:CENT XXMHz** - nastavení středního kmitočtu zobrazeného na displeji na XX MHz
 - **FREQ:SPAN XXkHz** - nastavení šířky zobrazeného frekvenčního pásma na XX kHz
 - **INPUT:COUP DC** - nastavení stejnosměrné vstupní vazby
 - **POWER:ATT XXdB** - nastavení vstupního atenuátoru přístroje na hodnotu XX dB.
 - **POWER:GAIN OFF** - vypnutí vstupního předzesilovače
 - **UNIT:POWER dBm** - nastavení zobrazovaných jednotek na ose y
- signální generátor HP 8656B
 - **FRXXMZ** - nastaví frekvenci generátoru na XX MHz
 - **APXXDM** - nastaví úroveň signálu generátoru na XX dBm
 - **R3** - připojí výstupní svorky k výstupu generátoru (připojí signál na výstup)
 - **R2** - odpojí výstupní svorky od výstupu generátoru (odpojí signál od výstupu)
 - signální generátor Agilent 83752A
 - **FREQ:CW XXMHz** - nastaví frekvenci generátoru na XX MHz

- **POW:LEV XXdbm** - nastaví úroveň signálu generátoru na XX dBm
- **OUTP:STAT ON** - připojí výstupní svorky k výstupu generátoru (připojí signál na výstup)
- **OUTP:STAT OFF** - odpojí výstupní svorky od výstupu generátoru (odpojí signál od výstupu)

Při tomto měření použijte signální generátor HP 8656B jako zdroj LO signálu a signální generátor Agilent 83752A jako zdroj RF signálu. Pro spolehlivý chod programu je nutné nastavit vhodné parametry spektrálního analyzátoru. Atenuátor nastavte kvůli ochraně vstupu na 10 dB a zároveň vypněte vstupní předzesilovač. Filtry nastavte například na hodnoty RES: 120 kHz a VIDEO: 1 kHz. Referenční úroveň (horní okraj obrazovky) nastavte např. na -20 dBm. Při přenastavování (přeladování) přístrojů je vhodné nastavit časovou prodlevu, aby se přístroje mohly ustálit. Velikost časové prodlevy záleží na situaci a může se pohybovat v rozmezí 500–1500 ms.

2. Pro měření konverzních ztrát je zapojení pracoviště shodné se zapojením z předchozího bodu. Nastavení parametrů analyzátoru je téměř shodné, pouze oba filtry nastavte na hodnotu 10 Hz. Toto nastavení je stejné i pro body 3 a 4. Samotné měření by mohlo probíhat tak, že se celkem v n krocích bude přeladovat RF generátor a zároveň se na hodnotu mezifrekvence bude přeladovat i spektrální analyzátor, který v každém kroku odečte maximální zobrazenou hodnotu. Konverzní ztráty jsou pak dány jako rozdíl úrovně vstupního signálu a takto naměřené hodnoty. Program koncipujte tak, aby si uživatel mohl zvolit úroveň LO a RF signálu (pozn.: pro $P_{RF} = 10$ dBm lze dosáhnout vcelku dobrých výsledů). Hodnotu oscilačního kmitočtu zvolte vhodně jako pevnou hodnotu. Nezapomeňte do výpočtu zahrnout i útlum děliče výkonu, viz úvod.

3. Pro toto měření je zapotřebí pouze jeden generátor, a to Agilent 83752A, který je zapojen jako zdroj oscilačního signálu. Tento generátor je vhodně přeladován v n krocích a v každém kroku je na bráně, na které se měří izolace, spektrálním analyzátozem zjišťována velikost signálu, který se na ni dostane. Pro to, aby mohla být v měření realizována pauza, při které může obsluha přepojit spektrální analyzátor z brány IF1 na bránu IF2 (případně obráceně), je nutné v programu provést následujícími opatření: Vytvořte vlastní *UserFunction*, která se nachází v menu Device a libovolně ji pojmenujte. Do takto vytvořené funkce umístěte tlačítko *Confirm* (OK), nezapomeňte ho přidat na panel. Ve vlastnostech panelu změňte vlastnost *ShowPanelOnExecute* na hodnotu True. Do kostry hlavního programu vložte na

vhodné místo objekt *Call*, který se opět nachází v menu *Device*, a napište do něj jméno vámi vytvořené funkce.

4. Zapojení pracoviště pro měření bodu jednodécibellové komprese je shodné se zapojením pro měření konverzních ztrát. Pro správný výpočet P_{-1} je nutné znát rovnici přímky, podle které roste výkon výstupního signálu v závislosti na vstupním zvyšujícím se výkonu. V prvním kroku, hned po inicializaci přístrojů, je nutné ze dvou bodů v lineární oblasti vypočítat směrnici přímky. Pro tento výpočet je vhodné použít objekt *Collector*, který ze vstupních vzorků vytváří pole. Po nashromáždění všech potřebných vzorků je nutné na vstup XEQ Collectoru přivést signál, který pole uzavře. Pro rovnici přímky je nutné znát i posun na ose y. Tento posun se zjistí jako výkon výstupního signálu pro vstupní RF výkon 0 dBm.

Při samotném měření se zvyšuje výkon RF signálu a na spektrálním analyzátoru se odečítá úroveň mezifrekvenčního signálu. Zároveň se z výkonu RF signálu počítá pomocí rovnice přímky teoretická hodnota výkonu výstupního signálu. Když odchylka obou průběhů dosáhne hodnoty 1 dB, je měření přerušeno a poslední naměřená hodnota v grafu se rovná bodu P_{-1} . Do grafu zakreslujte obě křivky, změřenou i teoretickou. Zvolte vhodně pevné frekvence LO a RF signálu.