

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209842

一款适用于5G通信频段的限幅滤波结构的设计*

常志煜 张胤 张翠翠 廖成

(西南交通大学电磁场与微波技术研究所 成都 610031)

摘要: 本文设计了一款新型的、工作于5G移动通信频段的限幅滤波一体化结构,其适用于射频前端,具有良好的电磁防护功能。该结构通过将限幅滤波两个模块进行一体化设计,避免了模块之间匹配网络的构建,实现了电路体积的减小。相较于传统的铁氧体频率选择限幅器,该结构在目标频段实现了宽跨度、大功率容量的特点。测试结果表明:在2.55~2.65 GHz频带内,该结构的插入损耗小于1.8 dB,限幅电平约为7.5 dBm;在4.8~4.9 GHz频带内,该结构的插入损耗小于2 dB,限幅电平约为2.5 dBm。在所选频带外,泄露功率被衰减到可忽略不计。因此,本文所设计的结构在保护敏感元件的同时可以有效提高射频前端接收机的灵敏度。

关键词: 限幅器;双频带通滤波器;电磁防护

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design of an integrated structure of limiting and filtering for 5G communication frequency bands

Chang Zhiyu Zhang Yin Zhang Cuicui Liao Cheng

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper designs a new integrated structure of limiting and filtering that works in the 5G mobile communication frequency band, which is suitable for RF front-end and has good point-to-point protection. By integrating the two modules of limiting and filtering, the structure avoids the construction of a matching network between the modules and reduces the circuit volume. Compared with the traditional ferrite frequency selective limiter, the structure achieves the characteristics of wide span and high power capacity in the target frequency band. The test results show that: in the 2.55~2.65 GHz frequency band, the insertion loss of the structure is less than 1.8 dB, and the clipping level is about 7.5 dBm; in the 4.8~4.9 GHz frequency band, the insertion loss of the structure is less than 2 dB, and the clipping level is less than 2 dB. About 2.5 dBm. Outside the selected frequency band, the leakage power is attenuated to be negligible. Therefore, the structure designed in this paper can effectively improve the sensitivity of the RF front-end receiver while protecting the sensitive components.

Keywords: limiter; dual-band pass filter; electromagnetic protection

0 引言

高功率微波对射频接收前端具有强大的摧毁力,当前对抑制高功率微波的研究多集中于对敏感设备进行防护。其中,限幅器作为一种重要的射频防护器件,可以对高功率信号能量进行衰减,使射频接收前端免受大功率微波信号的直接冲击^[1]。传统限幅器通常会对工作频段内大于起限电平的所有信号进行衰减,但由于不具有频率选择性,限幅产生的谐波分量以及带外无用信号会降低接收系统灵敏度。而具有频率选择性的限幅器在对射频接收系统进行防

护的同时,也会对无用小信号进行衰减从而提升接收系统灵敏度。

对具有频率选择功能限幅器的研究始于一种基于铁氧体材料的非线性电路结构^[2],其后的很多研究也基于此^[3-7],但此类频选限幅器难以实现宽跨度和多频段,在应用上不具有广泛性。对于集总电路型频选限幅器,由于二极管的集成导致电路插损比较大,因此此类研究比较少^[8-10]。为了解决以上频选限幅器出现的频段单一、较难实现等问题,本文设计了一款新型的限幅滤波一体化的结构。对于限幅模块,基于功率容量选取PIN二极管,设计

收稿日期:2022-05-05

* 基金项目:国家自然科学基金(61771407)项目资助

一种带内插入损耗低的结构;对于滤波模块,本文基于多模谐振技术设计一款双频带、结构紧凑、选择性好的滤波器。

接收系统灵敏度与噪声有关^[11],其中带外噪声是噪声的主要来源,一般在接收系统前级使用滤波器滤除。本文所设计的限幅模块应用于前级,将其与滤波模块一体化可避免匹配网络的设计,大大降低电路体积;滤波模块抑制带外噪声以及限幅后产生的谐波分量,减少噪声,提高灵敏度。

1 电路原理

1.1 PIN 二极管限幅原理

PIN 二极管结构及其等效电路如图 1(a)、(b)所示,射频电导率调制效应是 PIN 二极管特有的^[12]。在低频时,信号周期比较大,PIN 二极管的载流子渡越时间远小于信号半周期,此时 PIN 等同于普通二极管。高频时,PIN 二极管载流子渡越时间小于或与信号半周期相差不大时,载流子在 P 区、I 区、N 区之间达到稳态。这种稳态使电路失谐,从而达到限幅的目的。在都达到稳态时,PIN 二极管等效为电流控制变阻器,二极管的内阻由式(1)得出。

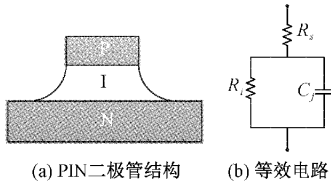


图 1 PIN 二极管结构及等效电路

$$R_i = \frac{W^2}{2\mu\tau I_0} \quad (1)$$

其中, W 为 I 区厚度, μ 为载流子有效平均迁移率, τ 为载流子渡越时间, I_0 为正向导通电流。由式(1)可以看出,随着载流子注入到 I 区,这些存储电荷可以降低 I 区电阻,此时可以等效为变阻器。图 2 为传统单级限幅器结构及其输入输出功率曲线。

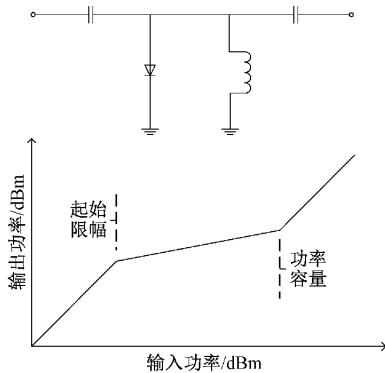


图 2 单级限幅电路及功率曲线

信号功率小于起限电平时,信号输入输出功率呈线性变化;当输入功率大于限幅器起限电平,电路进入限幅状

态,直到电路功率容量之后,输入输出功率回到线性变化。

1.2 双频滤波器设计原理

目前平面多频带滤波技术的研究已经比较成熟,主要归纳为四类:并联法^[13-15]、耦合法^[16-17]、多模谐振技术^[18-21]以及综合设计法^[22-26],并归类总结了很多方法。其中,阶跃阻抗谐振器(SIR)具有高自由度、于设计、结构紧凑的优点,本文采用 SIR 结构对滤波模块进行设计。SIR 具有三种基本结构: $\lambda/4$ 型 SIR、 $\lambda/2$ 型 SIR、 λ 型 SIR,其中 λ 型 SIR 结构更为复杂,而 $\lambda/2$ 型 SIR 对于控制高次频带比 $\lambda/4$ 具有更高自由度,因此本文使用图 3 所示 $\lambda/2$ 型 SIR 结构进行设计。

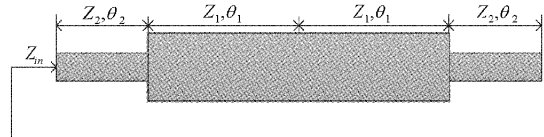


图 3 半波长型 SIR 结构

从开路面向右看,可以得到 $\lambda/2$ 型 SIR 的输入阻抗 Z_{in} 可表示为:

$$Z_{in} = jZ_2 \frac{R_{Z1}(1 - \tan^2\theta_1)(1 - \tan^2\theta_2) - 2(1 - R^2)\tan\theta_1\tan\theta_2}{2(R_{Z1}\tan\theta_1 + \tan\theta_2)(R_{Z1} - \tan\theta_1\tan\theta_2)} \quad (2)$$

其中, R_{Z1} 为 Z_2, Z_1 阻抗比值, θ_1, θ_2 为谐振结构电长度。SIR 发生谐振的条件为 $Z_{in} \rightarrow \infty$, 由式(2)可得 $R_{Z1} = \tan\theta_1\tan\theta_2$ 。设半波长 SIR 基频为 f_0 , 一次、二次、三次杂散响应频率为 f_{s1}, f_{s2}, f_{s3} 则:

$$\begin{cases} \frac{f_{s1}}{f_0} = \frac{\pi}{2\arctan\sqrt{R_{Z1}}} \\ \frac{f_{s2}}{f_0} = \frac{\pi}{\arctan\sqrt{R_{Z1}}} - 1 \\ \frac{f_{s3}}{f_0} = \frac{\pi}{\arctan\sqrt{R_{Z1}}} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3),根据所设计的中心频率比得出阻抗比,结合电长度,计算尺寸,在电磁仿真软件中设计并优化仿真。

理想的频率选择限幅器如图 4 所示。在输入端,输入功率在频谱上具有不同幅值,当输入信号大于起限电平时,在工作频带内,限幅器都会对大于起限电平的信号进行限幅。滤波器是一种可实现对输入信号在频域实现精确选取的元件,将其与限幅结构结合,即可实现在接收系统所需频带处,信号以限幅电平输出,而在其他频带处,信号大幅衰减,进而实现对于接收系统灵敏度的提升。

通过 1.1 节对限幅模块的分析,明确 PIN 限幅电路的作用机理,继而可以进行二极管选型以及限幅电路的设计;通过对 1.2 节对本文所采用的滤波结构的分析,采用 SIR 结构可以实现滤波模块频带的独立控制,具有更高自由度。将两个模块进行一体化实现具有频选功能限幅器的设计,

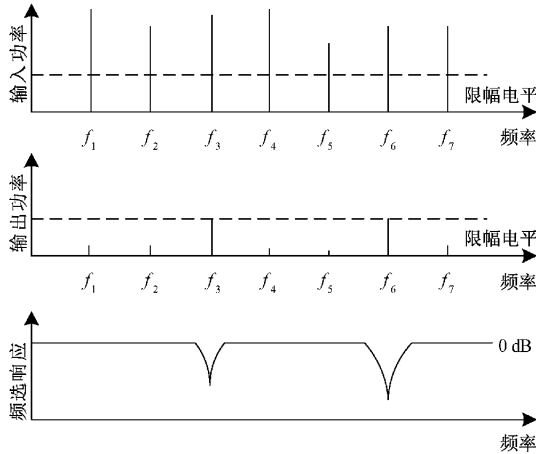


图4 功率、频率响应

在加强5G通信射频前端电磁防护能力的同时,提升接收系统灵敏度。

2 电路设计

2.1 限幅电路设计

二极管并联接入传输线时,吸收功率可由式(4)确定^[27],当 R_D 远小于 Z_0 时,可近似为式(5)。

$$P_D = \frac{4Z_0 R_D}{(Z_0 + 2R_D)^2} P_1 \quad (4)$$

$$P_D = \frac{4R_D}{Z_0} P_1 \quad (5)$$

其中, Z_0 为端口特性阻抗, R_D 为PIN二极管导通电阻, P_D 为二极管吸收功率, P_1 为输入功率,有 N 个二极管并联等分射频功率,则能承受的最大功率由式(6)确定。

$$P_{MAX} = \frac{N^2 Z_0 P_D}{4R_D} \quad (6)$$

经过调研和对比,决定功率容量的“粗糙”级选用I区较厚的PIN二极管CLA4607-085LF,决定限幅电平的“精细”级选用I区较薄的PIN二极管CLA4603-085LF。

二极管导通电阻 R_D 可由式(7)确定。

$$R_D = DF \times \theta_c + K \times \theta_p \quad (7)$$

其中, DF 为占空比, θ_c 为连续波热阻, θ_p 为脉冲瞬时热阻, K 为瞬态热阻对脉宽的归一化因子。由式(4)可得 R_D 为 21.6Ω 。一般对于元件级的大信号功率以十瓦级描述,考虑冗余,将所设计限幅器的处理功率上限定义为100 W。由此可以得到所需第一级二极管数量为:

$$P_{MAX} = 100 = \frac{N^2 Z_0 P_D}{4R_D} = \frac{N^2 \times 50}{4} \times \frac{175 - 75}{21.6} \quad (8)$$

通过式(8),可以得出 $N \approx 1.31$ 。因此,选择在第一级并联两个CLA4607二极管。

对于“精细”限幅模块,并联两个PIN二极管可以为自身提供直流偏置的同时,实现泄露功率的降低。本文所设计的限幅电路原理如图5所示。

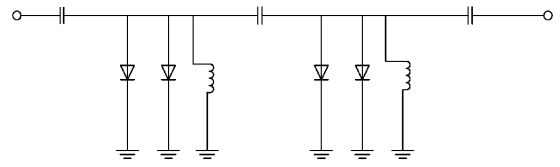


图5 限幅电路原理

在电路仿真软件中对以上电路调试,使其在所选频段(2.6 GHz、4.85 GHz)内插损接近于0 dB,以达到更好地与滤波模块级联的目的。其传输特性如图6所示。

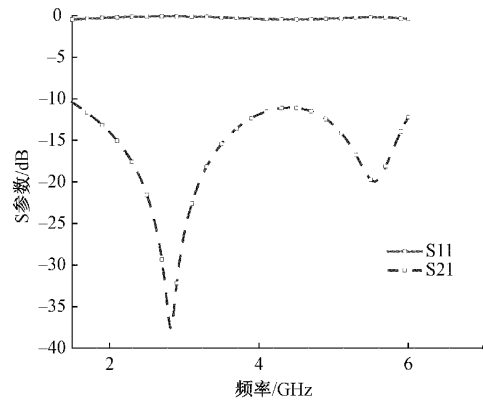


图6 限幅电路原理图S参数曲线

由图6可以看出,限幅电路在1.5~6 GHz上具有较宽带宽,在所选频段插入损耗小于0.2 dB;由图7中可以看出,在2.6 GHz限幅电平约为10 dBm,在4.85 GHz限幅电平约为7 dBm。这是由于限幅管对不同频率的信号具有不同响应,表现为其输出电平在不同频率下会产生一定波动。图8为本文限幅模块电路版图。

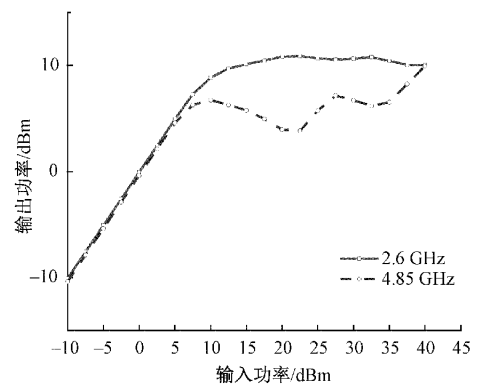


图7 输入输出功率曲线

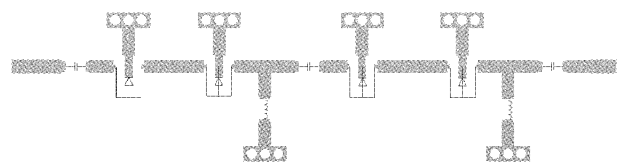


图8 限幅模块版图

2.2 滤波结构的设计

基于 1.1 小节中的 SIR 结构,为实现频带的独立控制,在其上添加对称开路枝节,如图 9 所示。

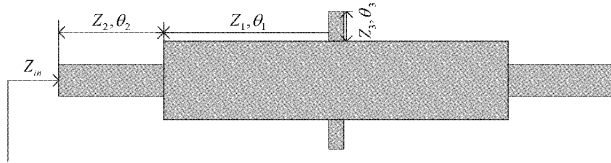
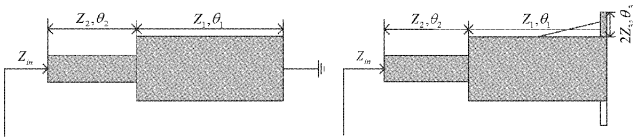


图 9 添加对称开路枝节 SIR

下面通过奇偶模理论对图 9 所示结构进行分析,其奇偶模等效电路如图 10(a)、(b)所示。



(a) 奇模等效电路 (b) 偶模等效电路

图 10 奇偶模等效电路

对于奇模等效电路,从开路面向右看去,可以得到输入阻抗 Z_{in} :

$$Z_{in} = jZ_2 \frac{\tan\theta_1 + R_{Z1} \tan\theta_2}{R_{Z1} - \tan\theta_1 \tan\theta_2} \quad (9)$$

当 $Z_{in} \rightarrow \infty$ 时,发生谐振,即:

$$\begin{cases} R_{Z1} = \tan\theta_1 \tan\theta_2 \\ \theta_1 + \theta_2 = \theta_A / 2 \end{cases} \quad (10)$$

其中, θ_A 为总电长度。

对于偶模等效电路,从开路面向右看去,可以得到输入阻抗 Z_{ine} :

$$Z_{ine} = jZ_1 \frac{R_{Z1}R_{Z2}R_{Z3} - R_{Z1}^2R_{Z2}R_{Z3}\tan\theta_1\tan\theta_2 - R_{Z1}R_{Z3}\tan\theta_1\tan\theta_3 + R_{Z1}R_{Z2}\tan\theta_2\tan\theta_3}{-R_{Z2}R_{Z3}\tan\theta_2 - R_{Z1}R_{Z2}R_{Z3}\tan\theta_1 + R_{Z3}\tan\theta_1\tan\theta_2\tan\theta_3 - R_{Z1}R_{Z2}\tan\theta_3} \quad (11)$$

其中, R_{Z2} 为 Z_2, Z_3 的比值, R_{Z3} 为 Z_1, Z_3 的比值。当 $Z_{in} \rightarrow \infty$ 时,发生谐振,即:

$$\begin{aligned} & -R_{Z2}R_{Z3}\tan\theta_2 - R_{Z1}R_{Z2}R_{Z3}\tan\theta_1 + \\ & \leftarrow R_{Z3}\tan\theta_1\tan\theta_2\tan\theta_3 - R_{Z1}R_{Z2}\tan\theta_3 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

通过式(10)、(12)可以看出,当在 SIR 结构上加载对称开路枝节时,调整开路枝节尺寸参数可以调节第二频带,实现频带的独立控制。

此外,采用零度馈电结构^[28]引入传输零点增加选择性,这种馈电结构对传输性能的影响主要由距离 L_5 决定。另外,在耦合面加载交指结构增加耦合。所设计的双频带滤波器结构如图 11 所示。

通过式(10)可计算出 $Z_1, Z_2, \theta_1, \theta_2$ 得到初步尺寸,并且调整 L_5 使其传输特性初步满足频带要求,再在电磁仿真软件中进行优化微调,并得到表 1 结构参数尺寸。

所设计的滤波器板材采用 ROGERS 4350 型号的介质基

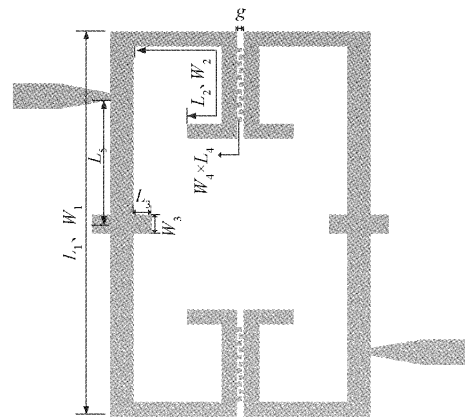


图 11 滤波器结构示意图

表 1 双频段 SIR 结构参数

参数	W_1	W_2	W_3	W_4	g
尺寸/mm	1	0.65	0.8	0.2	0.3
参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
尺寸/mm	16.7	8.7	0.8	0.2	5

板,介电常数为 3.66,损耗正切为 0.003 7,厚度为 0.508 mm。其实物如图 12 所示。

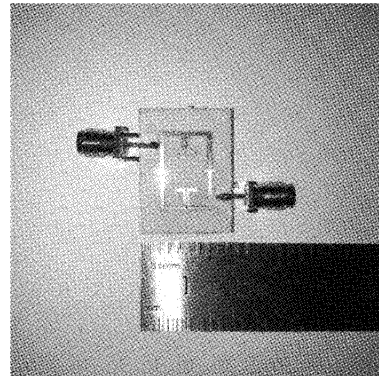


图 12 滤波器实物

滤波器 S 参数仿真及测试结果如图 13 所示,测试结果表明:在所选 5G 通信频段(中心频率为 2.6 GHz、4.85 GHz):在 2.55~2.65 GHz 内,插入损耗小于 1.2 dB,在 4.8~4.9 GHz 内,插入损耗小于 1.7 dB,回波损耗均大于 20 dB。由图 13 传输特性可以看出,本文所设计的滤波模块由于传输零点的存在可以对带外噪声起到很好的抑制作用。

3 仿真与测试

3.1 限幅滤波一体化结构的设计

通过上节对限幅和滤波模块的分析和设计,本文在本节实现面向 5G 通信的限幅滤波结构的一体化设计,其组成部分如图 14 所示。在一体化设计过程中,使用电路、电磁联合仿真,同时考虑在滤波模块一体化后的传输性能与

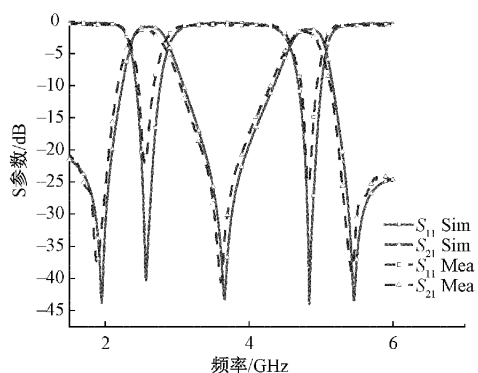


图13 滤波器S参数曲线

限幅性能,不断调整限幅电路微带尺寸使整体结构的性能满足设计要求,其仿真结果在3.2小节与测试验证结果一起给出。

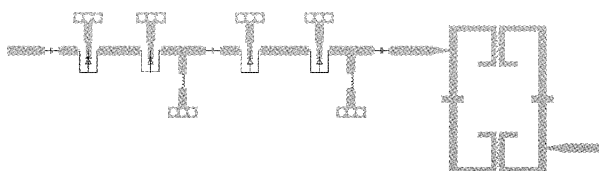


图14 整体结构示意图

3.2 限幅滤波一体化结构的测试

本文提出的限幅滤波结构的测试分为两个部分:S参数测试与限幅性能测试。其中S参数测试包括限幅滤波整体结构在5G通信频段的插入损耗 $|S_{21}|$ 及其输入输出端口的回波损耗 $|S_{11}|$,回波损耗越大,则测试元件端口的阻抗匹配状态越好;对于限幅性能测试是对整体结构在所选频段和带外的输入输出功率曲线的测试,以此来说明本文提出结构对信号的“选择”性能。

限幅滤波结构采用的板材同以上滤波模块使用的一样,其实物图如下:

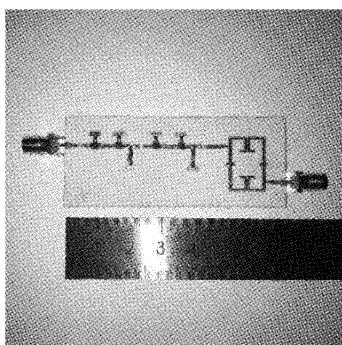


图15 限幅滤波一体化结构实物图

限幅滤波结构的S参数与限幅性能的仿真与测试结果如图16、图17所示。对比仿真与测试结果:由于制作工艺精度引起误差,电路板焊接与测试时所使用的线缆均引入一定损耗,导致测试结果与仿真结果具有一定差别,但是曲

线的整体趋势保持一致,表明仿真结果具有一定指导作用,而本文所设计的结构也确实达到了设计之初所想达到的效果。限幅滤波结构S参数结果:在2.55~2.65 GHz内,插入损耗小1.8 dB,在4.8~4.9 GHz内,插入损耗小于2 dB,回波损耗均大于15 dB。由于二极管载流子在不同频率下具有不同的渡越时间,因此不同频率下,其输出功率具有不同响应。如图17所示为输入输出功率曲线:分别在带内(2.6 GHz、4.85 GHz)以及带外(3.4 GHz、4 GHz)4个频点处进行测试,来反映其选择性:2.6 GHz时限幅电平约为7.5 dBm,4.85 GHz时限幅电平约为2.5 dBm,在带外信号输出功率小于-15 dBm,对于一般接收系统可以忽略不计。在输入功率为40 dBm时,该结构依然可以正常工作,其功率容量大于40 dBm。由图17的传输特性可知,一体化结构也存在传输零点,对带外信号起到了很好的抑制作用,从而有效地提升了接收系统的灵敏度。

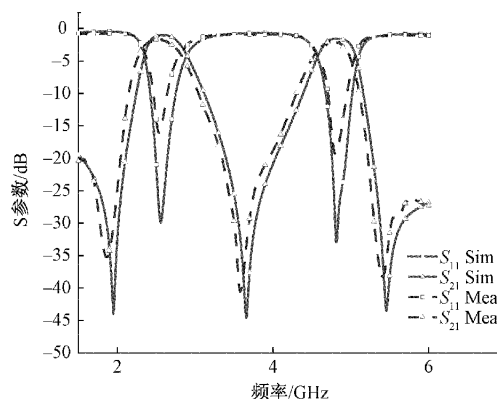


图16 限幅滤波结构S参数曲线

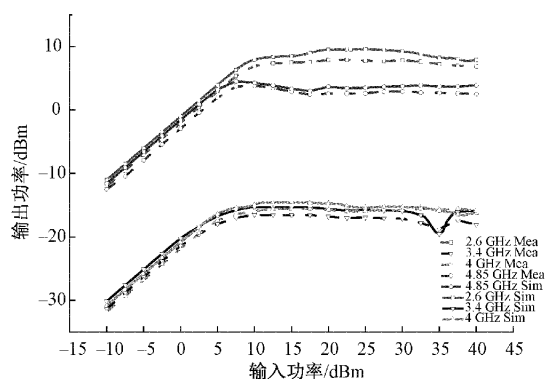


图17 限幅滤波结构输入输出功率曲线

4 结 论

为在加强5G通信射频前端电磁防护能力的同时,提升接收系统灵敏度,本文分析并设计了一种限幅滤波一体化的结构。此外,多频带电路较难实现网络之间的匹配调整,而此一体化结构避免了匹配网络的构建,减少了电路尺寸,在电磁防护领域具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 黄丹. 基于 PIN 二极管的 X 波段大功率限幅器设计[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
- [2] KOTZEBUE K L. Frequency-selective limiting[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1962, 10(6): 516-520.
- [3] STITZER S N. Spike leakage and suppression in frequency selective limiters[J]. IEEE MTT-S Microw. Symp. Dig., 2000, 2: 901-904.
- [4] ADAM J D, STITZER S N. MSW frequency selective limiters at UHF[J]. IEEE Trans. Magn., 2004, 40(4): 2844-2846.
- [5] GILLETTE S M, GEILER M, ADAM J D, et al. Ferrite-based reflective-type frequency selective limiters [C]. 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2018: 1-3.
- [6] BORYSSENKO A O, GILLETTE S M, KOLEDINTSEVA M Y. Nonlinear loss model in absorptive-type ferrite frequency-selective limiters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(12): 4871-4880.
- [7] SHUKLA M, KOLEDINTSEVA M Y, GEILER M, et al. Adaptive interference mitigation using frequency-selective limiters over GPS band for automotive applications[C]. 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), 2020: 614-618.
- [8] PHUDPONG P, HHUNTER I C. Frequency-selective limiters using nonlinear bandstop filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(1): 157-164.
- [9] COLLADO C. Absorptive limiter for frequency-selective circuits[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(6): 415-417.
- [10] HUELTES A. Three-port frequency-selective Absorptive limiter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(5): 479-481.
- [11] GU Q ZH. 无线通信系统中的射频收发系统设计[M]. 杨国敏译. 北京:清华大学出版社, 2016: 142-144.
- [12] WHITE J F. 微波半导体控制电路[M]. 王晦光, 黎安尧, 译. 北京:科学出版社, 1983: 57-84.
- [13] CHEN C Y, HSU C Y. A simple and effective method for microstrip dual-band filters design [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(5): 246-248.
- [14] COTTON S L, SCANLON W G. Characterization and modeling of the indoor radio channel at 868 MHz for a mobile bodyworn wireless personal area network [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2007(6): 51-55.
- [15] CHEN C F. Design of a compact microstrip quint-band filter based on the tri-mode stub-loaded stepped-impedance resonators [J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2012, 22(7): 357-359.
- [16] ZHANG X Y, CHEN J X, XUE Q, et al. Dual-band bandpass filter using stub-loaded resonators[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2007, 17(8): 583-585.
- [17] MO Y X, SONG K J, FAN Y. Miniaturized triple-band bandpass filter using coupled lines and grounded stepped impedance resonators [J]. IEEE Microw. Wireless Compon., 2014, 24(5): 333-335.
- [18] LUO S, ZHU L, SUN S. Compact dual-mode triple-band bandpass filters using three pairs of degenerate modes in a ring resonator[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2011, 59(5): 1222-1229.
- [19] CHIOU Y C, WU C Y, KUO J T. New miniaturized dual-mode dual-band ring resonator bandpass filter with microwave C-sections [J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2010, 20(2): 67-69.
- [20] ZHANG R, ZHU L, LUO S. Dual-mode dual-band bandpass filter using a single slotted circular patch resonator [J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2012, 22(5): 233-235.
- [21] GAO L, ZHANG X Y, XUE Q. Compact tri-band bandpass filter using novel eight-mode resonator for 5G WiFi application [J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2015, 25(10): 660-662.
- [22] 周研, 刘祖深, 陈应兵. 一种新型可调谐微带带通滤波器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 117(9): 866-871.
- [23] ZHANG S B, ZHU L. Synthesis design of dual-band bandpass filters with $\lambda/4$ stepped impedance resonators[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2013, 61(5): 1812-1819.
- [24] 谢涛, 何恰刚, 姚建刚, 等. 基于改进 BP 算法的微带射频带通滤波器设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1317-1323.
- [25] 陈凯, 宋长宝, 李永生. 基于 ADS 的一种高指标带通滤波器设计[J]. 国外电子测量技, 2011, 197(4): 62-65.
- [26] 李力, 年夫顺. 微波多层印制板带通滤波器[J]. 国外电

子测量技术,2013,221(4):63-65.

- [27] 邓世雄,高长征,陈书宾,等.小型化高功率微波限幅器研究[J].微波学报,2020,36(5):70-73.
- [28] 李奇,李桐,梁昌洪,等.基于0度馈电及阶梯阻抗结构的高选择性带通滤波器设计[C].2011年全国微波毫米波会议论文集(上册),2011:410-413.

作者简介

常志煜,硕士,主要研究方向为电磁兼容与微波器件。

E-mail:ChangZY304591@163.com

廖成(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为计算电磁学,天线理论与技术和电磁兼容与电磁环境。

E-mail: c. liao@swjtu. edu. cn