

文章编号: 2095-4980(2023)07-0928-06

一款航空 VHF 限幅器的设计与测试

马振洋^{a,b}, 左晶^{*a}, 史春蕾^{a,b}, 李义成^a

(中国民航大学 a.适航学院; b.民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300)

摘要: 为提高航空甚高频(VHF)通信设备的电磁防护能力, 提出了一种基于 PIN 二极管的限幅器。采用先进设计系统(ADS)仿真研究了不同二极管级数对限幅器插入损耗以及限幅性能的影响, 设计了一款由 PIN 对管并联结构、集总参数定向耦合器、整流电路与匹配电路相结合的半有源式限幅器, 通过将部分干扰信号转变为直流的方式, 为二极管提供偏置电压, 降低限幅器的限幅电平。性能测试结果表明, 在 118~136 MHz 的频率范围内, 半有源式限幅器的插入损耗小于 1 dB, 输入输出端口的回波损耗大于 20 dB, 限幅电平小于 7.5 dBm, 功率容量大于 25 dBm, 实现了低插入损耗与高限幅性能。

关键词: 航空甚高频通信; 先进设计系统; PIN 限幅器; 电磁防护

中图分类号: TN709

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021027

Design and measurement of an avionic VHF limiter

MA Zhenyang^{a,b}, ZUO Jing^{*a}, SHI Chunlei^{a,b}, LI Yicheng^a

(a.School of Airworthiness; b.Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A design method of limiter based on PIN diode is proposed in order to improve the electromagnetic protection capability of the aeronautical Very High Frequency(VHF) communication equipment. The influence of different diode stages on the insertion loss and limiting performance of the limiter are simulated and researched by Advanced Design System(ADS). Furthermore, a semi-active limiter is designed, which is composed of PIN pair parallel structure, directional coupler with lumped parameter, rectifier circuit and matching circuit. To reduce the limiting level of the limiter, a bias voltage is provided for the diode by converting part of the interference signal into DC. The measurements show that the insertion loss of the limiter is less than 1 dB, the return loss is more than 20 dB, and the limiting level is less than 7.5 dBm, the power capacity is more than 25 dBm in 118~136 MHz, which realizes the low insertion loss and high limiting performance.

Keywords: aeronautical Very High Frequency communication; Advanced Design System; PIN limiter; electromagnetic protection

航空 VHF 通信可实现飞机与飞机、飞机与地面的近距离通信, 是航空领域最重要的通信方式之一^[1-2]。在复杂的航空电磁环境中, 电磁能量很容易通过前门耦合的方式进入天线后端的接收模块, 而电路端口接收到的毫瓦量级的干扰信号就可能会使后级敏感器件低噪声放大器失效甚至损坏^[3]。为了提高接收机的电磁抗扰度, 需要一款适用于航空 VHF 频段的低插入损耗、高可靠性的防护模块。目前国内外学者对通信设备的抗电磁干扰设计已有一些研究。文献[4]提出了一种基于延时原理的紧凑型防护模块, 使用检波电路与场效应管控制外置偏压, 驱动浪涌保护器件提高电路的响应时间, 但由于 19 m 延长线不易实现, 并导致了较大的插入损耗, 不适用于工程应用。文献[5-6]设计了滤波电路与浪涌保护元件相结合的复合型滤波器, 减小了防护模块尺寸, 但功率容量较低, 不适用于持续时间较长的电磁干扰, 且箝位电压高, 防护效果较差。文献[7-9]设计了多级 PIN 二极管并联的无源限幅器, 提高了功率容量, 但仍存在限幅电平高、响应速度较慢的问题。文献[10]采用自主研制的 PIN

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 航空科学基金资助项目(20182667009)

*通信作者: 左晶 email:631457903@qq.com

二极管 BWN296，设计了用于保护接收机 ADC 芯片的高功率容量无源限幅电路，在 300~500 MHz 频率范围内，插入损耗为 0.6 dB，当输入功率为 25 dBm 的干扰信号时，限幅电平小于 11.2 dBm。本文针对现有限幅器存在的插入损耗较大以及限幅能力差等不足，提出一种基于 PIN 二极管的半有源式限幅器的设计方法，最后通过 S 参数测试与连续波注入试验对其性能进行验证。

1 PIN 限幅理论

1.1 电导调制效应

PIN 二极管的限幅作用源于其内部载流子运动引起的电导调制效应。当信号频率较高时，载流子出入 I 层的渡越时间不可忽略。在大信号的正半周，P 层与 N 层的载流子在正向电压的作用下注入 I 层，但由于信号周期较短，二极管并未完全导通，信号极性便发生改变，导致部分载流子从 I 层返回，但此时 I 层仍存在少量载流子，使得电阻率降低。当信号进入下个周期时，载流子又向 I 层注入，多次反复后，留在 I 层的载流子增多，电阻降到最小，实现了对 PIN 管的电导调制。

传统的单级 PIN 限幅器由二极管、扼流线圈及隔直电容构成，扼流线圈可为二极管提供小的直流回路，加快二极管的导通，缩短反应时间，但同时也增大了插入损耗。采用对管并联结构可减小插损，提高隔离度^[1]。2 种限幅器结构如图 1 所示。

PIN 限幅器的主要参数指标为 S 参数与限幅电平值。其典型的功率输入输出曲线如图 2 所示^[2]，小信号输入时，限幅器低插入损耗的特点使信号几乎无衰减地通过；而大功率信号输入时，随着输入功率的提高，输出功率逐渐趋于稳定值，为限幅电平，该参数值越低，限幅能力越强。

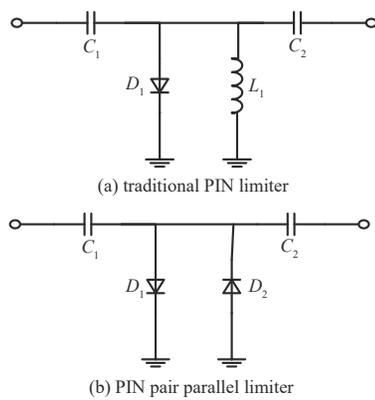


Fig.1 PIN limiter of single stage
图1 单级 PIN 限幅器

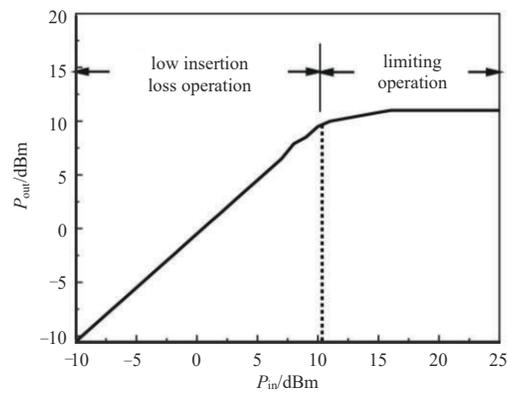


Fig.2 Typical input and output power curve of PIN limiter
图2 PIN 限幅器典型功率输入输出曲线

1.2 PIN 二极管选型

在多个半导体制造厂商中，Skyworks 公司作为无线通信系统射频微波组件的世界级供应商，具有充足的行业经验与尖端制造工艺，其生产的硅 PIN 二极管可用于军事、航空航天、国防等多领域的无线电和雷达接收机，适用于航空 VHF 通信系统中限幅器的设计。其中运用表面贴装技术(Surface Mounted Technology, SMT)的方形扁平无引线封装(Quad Flat No-leads Package, QFN)型的 CLA 系列 PIN 二极管，由于底部具有大面积散热焊盘与无引脚设计使其具有优异的热性能以及可用于对空间有严格要求的应用场合，同时内部引脚与焊盘之间的导电路径短、自感系数以及布线电阻低等特点也提高了二极管的电性能。最终选取了 CLA 系列中的 3 种 PIN 二极管 CLA4607-085LF、CLA4606-085LF 与 CLA4605-085LF，性能参数值见表 1。

表 1 PIN 二极管的性能参数

Table1 Performance parameters of PIN diode

parameter/unit	CLA4607-085LF	CLA4606-085LF	CLA4605-085LF
frequency/GHz	0.01~6.00	0.01~6.00	0.01~6.00
junction capacitance/pF	0.30	0.30	0.32
series resistance/ Ω	1.30	1.80	1.25
I region width/ μm	7.00	2.50	2.00
carrier lifetime/ns	50	15	13

2 限幅器设计

PIN 二极管可以通过外接直流偏置的方式降低限幅电平，提高限幅性能^[13]，但这种有源限幅器需要外界持续供电，容易受到使用环境的制约，且存在一定的功耗，不适用于元件较多的系统。本文设计的半有源式限幅器由 PIN 对管并联结构、匹配电路组成的主限幅电路与定向耦合器、整流电路相结合，通过将一部分干扰信号整流为直流的方式使 PIN 二极管更容易导通，以降低限幅电平，提高限幅器的限幅性能。其中定向耦合器的作用是将输入信号大部分传输到主限幅电路，并耦合出交流小信号送入整流电路。整流电路则将交流小信号整流为直流，为主限幅电路提供偏置电压。

2.1 主限幅电路设计

由于单级限幅器难以同时实现高功率容量与低限幅电平，因此在限幅器设计中采用两级或多级限幅，其中 I 层较厚的二极管置于前级，I 层较薄的二极管置于后级。小信号输入时，各级二极管均为高阻抗截止状态，此时的小插入损耗由二极管自身的结电容与较小的失配造成；大信号输入时，较薄 I 层厚度的二极管先行导通，转变为低阻抗从而导致电压降低，在传输线上形成驻波，此时需保证两级限幅器间距四分之一波长的奇数倍，以产生较大的电压将 I 层较厚的二极管快速导通，实现限幅作用^[14]。由于 I 层薄的二极管先行导通，决定了限幅器的反应时间与限幅电平，而 I 层较厚的二极管则决定了限幅器可承受的最大输入功率。

本文采用集总参数 π 型匹配电路^[10]代替四分之一波长的传输线，以减小限幅器尺寸。取表 1 中的各型号二极管搭建单级、两级、三级 PIN 对管并联限幅电路，I 层较厚的二极管置于前级，I 层较薄的二极管置于后级。仿真对比各结构在 VHF 频段的插入损耗 $|S_{21}|$ 及输入输出功率曲线，确定主限幅电路的级数。单级、两级以及三级主限幅电路结构如图 3 所示，仿真结果对比如图 4、图 5 所示。

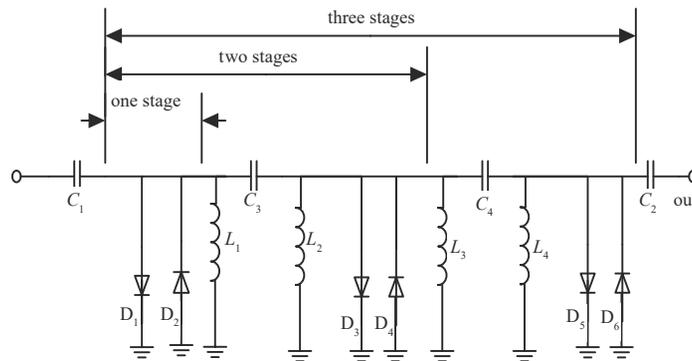


Fig.3 Main limiting circuit with different stages
图3 不同级数主限幅电路

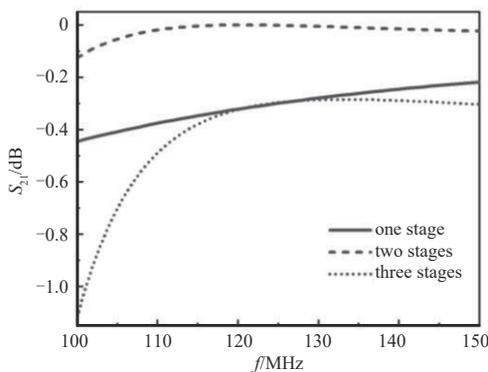


Fig.4 S_{21} simulation of different stages
图4 不同级数 S_{21} 仿真结果

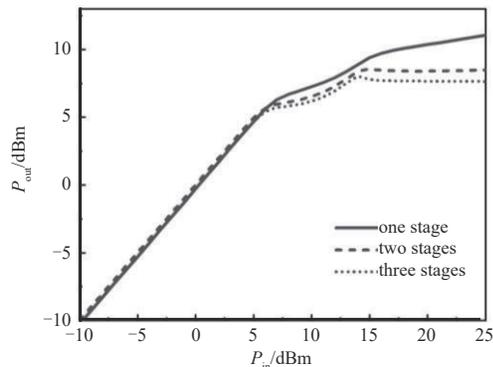


Fig.5 Limiting performance simulation of different stages
图5 不同级数限幅性能仿真结果

S_{21} 参数仿真结果表明：与两级限幅电路相比，单级限幅电路无匹配网络，而三级限幅电路增加了多个元件，引入了较大的损耗，其中两级限幅电路的插入损耗最小，约为 0.1 dB。同时输入输出功率即限幅性能的仿真结果表明：随着级数的增多，限幅电平逐渐降低，但由于两级、三级限幅电路的限幅电平的差值较小，主限幅电路选用与匹配网络相结合的两级 PIN 对管并联结构，其中两级 PIN 二极管型号分别为 CLA4607-085LF 与 CLA4606-

085LF。

2.2 定向耦合器的设计

集总参数定向耦合器为四端口网络，包括输入端 P_{in} 、输出端 P_{out} 、耦合端 P_{co} 、隔离端 P_{is} ，基本结构由串联枝节电感与并联枝节电容组成，如图 6(a)所示。但由于该结构无法使串联与并联枝节保持 90° 的相位差，因此将串联枝节的电感与并联枝节的电容分别用 π 型的电容、电感匹配网络进行优化，优化后的定向耦合器结构如图 6(b)所示。图中串联枝节电感 L_s 、串联枝节电容 C_s 、并联枝节电感 L_p 、并联枝节电容 C_p 元件值的计算见式(1)~式(7)^[15]。其中 C 为耦合度， k 为与耦合度相关的常数。

$$L_s = Z_s / 2\pi f_0 \tag{1}$$

$$C_p = 1 / 2\pi f_0 Z_p \tag{2}$$

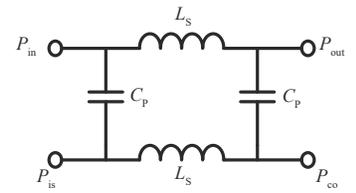
$$L_p = Z_p / 2\pi f_0 \tag{3}$$

$$C_s = 1 / 2\pi f_0 Z_s \tag{4}$$

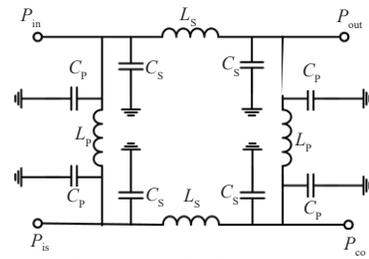
$$Z_s = Z_0 \sqrt{1 - k} \tag{5}$$

$$Z_p = Z_0 \sqrt{(1 - k) / k} \tag{6}$$

$$k = 10^{C/10} \tag{7}$$



(a) basic structure of directional coupler



(b) optimized directional coupler

Fig.6 Directional coupler with lumped parameter
图 6 集总参数定向耦合器

2.3 半有源式限幅器整体设计

将集总参数定向耦合器电路结构中具有共同节点的并联电容值相加，对耦合器进行简化，其直通端连接 PIN 对管并联主限幅电路的输入端，耦合端连接由整流二极管 HSMS2825 与充电电容构成的整流电路的输入端，隔离端接 50Ω 的负载电阻。半有源式限幅器的电路原理图与实物图分别如图 7、图 8 所示。

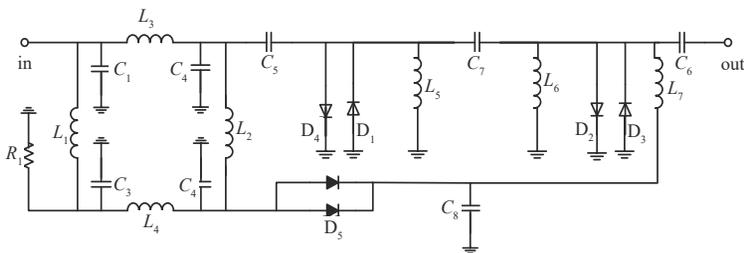


Fig.7 Schematic of semi-active limiter
图 7 半有源式限幅器电路原理图

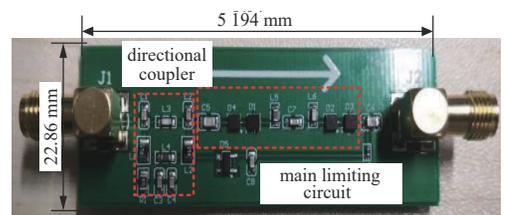


Fig.8 Semi-active limiter
图 8 半有源式限幅器实物

3 限幅器性能测试

半有源式限幅器的性能测试分为 2 部分： S 参数测试与限幅性能测试。其中 S 参数测试包括航空 VHF 频段的限幅器插入损耗 $|S_{21}|$ 与输入输出端口的回波损耗 $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$ ，回波损耗越大，表示端口的阻抗匹配状态越好；限幅性能测试则为各航空 VHF 频点的输入输出功率曲线测试，限幅电平越低，限幅性能越强。

S 参数与限幅性能的试验配置分别如图 9 及图 10 所示，测试设备型号如表 2 所示。 S 参数测试时，首先使用校准件对矢量网络分析仪的输入、输出端口进行校准，校准完成后连接限幅器，设置测试频率范围为 50~200 MHz，输入小信号功率为 -20 dBm，测试 S_{21} 、 S_{11} 与 S_{22} 的参数值。限幅性能测试时，设置信号发生器的输出波形为正弦连续波，信号频率分别设置为 118 MHz、127 MHz 以及 136 MHz，功率范围为 -10~25 dBm，输入的功率间隔为 3 dBm，分别记录频谱仪在各输入信号频点处的功率，最后将测量值加 10 dB 的衰减值以得到限幅器的实际输出功率。

限幅器的 S 参数与限幅性能测试与仿真结果对比分别如图 11、图 12 所示。对比仿真结果，由于各元件的制作工艺、电路板焊接以及测试线缆均引入了一定的损耗，导致实测的 S 参数略差，但由于差值较小，且各曲线

的趋势保持一致，表示仿真结果具有一定的指导作用。实测结果表明：在 118~136 MHz 的航空 VHF 频率范围内，基于 PIN 二极管的半有源式限幅器的插入损耗 $|S_{21}|$ 小于 1 dB，回波损耗 $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$ 均大于 20 dB，限幅电平小于 7.5 dBm。同时当限幅器承受多次功率为 25 dBm 的正弦连续波输入后，仍可正常工作，即限幅器的功率容量大于 25 dBm。

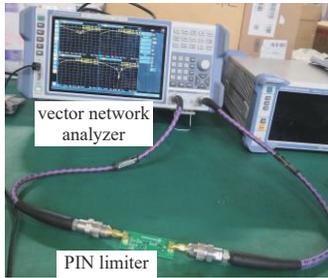


Fig.9 Measurement of S parameter
图 9 S 参数测试

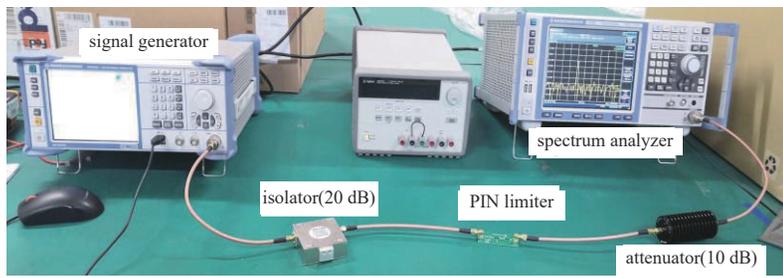


Fig.10 Measurement of limiting performance
图 10 限幅性能测试

表 2 测试设备
Table2 Test equipment

test equipment	model	purpose
vector network analyzer	R&S@ZNL3	S-parameter measurement
signal generator	R&S@SMBV100A	power signal output
spectrum analyzer	R&S@FSVA4	power signal detection
isolator/20 dB	TG6466HS-1	signal generator protection
attenuator/10 dB	ATT-50W10dB-RF4083	spectrum analyzer protection

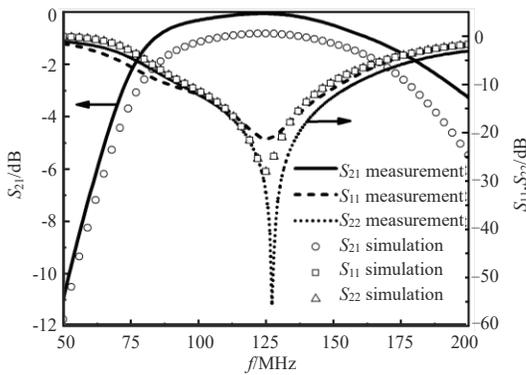


Fig.11 Comparison between simulation and measurement of S parameter
图 11 S 参数仿真与测试结果对比

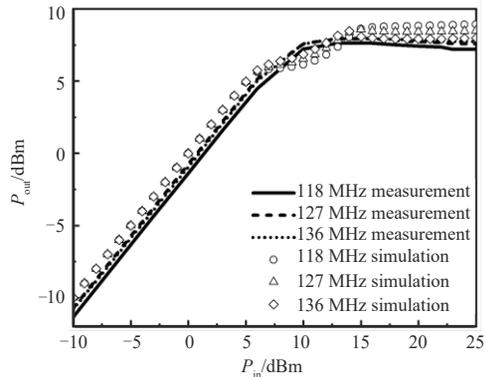


Fig.12 Comparison between simulation and measurement of limiting performance
图 12 限幅性能仿真与测试结果对比

4 结论

为加强航空 VHF 通信设备的电磁防护能力，本文仿真研究了不同级数 PIN 二极管结构对限幅器插入损耗与限幅电平的影响，设计了一种基于 PIN 二极管的半有源式限幅器，通过集总参数定向耦合器与整流电路为二极管提供直流偏置，提高限幅器的限幅性能。测试结果表明，在航空 VHF 频段，限幅器的插入损耗小于 1 dB，回波损耗大于 20 dB，限幅电平约为 7.5 dBm，功率容量大于 25 dBm，满足低插入损耗、高限幅性能的要求。

参考文献：

[1] JACOB P,SIRIGINA R P,MADHUKUMAR A S,et al. Cognitive radio for aeronautical communications: a survey[J]. IEEE Access, 2017(4):3417-3443.
 [2] 刘伯栋,于鹏,谢飞,等. 多部 VHF/UHF 频段机载通信电台同址干扰影响分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4): 599-603. (LIU Bodong,YU Peng,XIE Fei,et al. Analysis of co-site interference effect on VHF/UHF airborne radios[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):599-603.)
 [3] BAEK J E,CHO Y M,KO K C. Analysis of design parameters reducing the damage rate of low-noise amplifiers affected by high-

- power electromagnetic pulses[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018(3):1-6.
- [4] 王晨. 射频前端强电磁脉冲防护方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013. (WANG Chen. Research on protection method of strong electromagnetic pulse in RF front-end[D]. Changsha, China: National University of Defense Science and Technology, 2013.)
- [5] 薛红,王培章,邵尉. 抗高功率微波武器前门防护关键技术研究[J]. 微波学报, 2016,32(S2):589-592. (XUE Hong,WANG Peizhang,SHAO Wei. Research on key technology of front door protection against high power microwave weapon[J]. Journal of Microwaves, 2016,32(S2):589-592.)
- [6] WANG Dongdong, CHEN Liang, YANG Kun, et al. Experimental study of the protection effect of the short-wave RF front-end lightning electromagnetic pulse protection module based on switch-type and voltage limiting type protective elements[C]// International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Piscataway, USA: IEEE, 2018:3-6.
- [7] 李亚南,谭志良,彭长振. 基于短波通信的射频前端电磁脉冲防护模块仿真与设计[J]. 电子学报, 2018,46(6):1421-1427. (LI Yanan, TAN Zhiliang, PENG Changzhen. Simulation and design of electromagnetic pulse protection module for RF front end based on short wave communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2018,46(6):1421-1427.)
- [8] 李亚南,谭志良. 基于PIN二极管的快上升沿电磁脉冲防护模块设计与研究[J]. 兵工学报, 2018,39(10):2066-2072. (LI Yanan, TAN Zhiliang. Design and research of fast rising edge EMP protection module based on PIN diode[J]. Acta Armamentarii, 2018,39(10):2066-2072.)
- [9] LI Yanan. Simulation and design of RF front-end electromagnetic protection module based on VHF communication[C]// International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway, USA: IEEE, 2018:142-146.
- [10] 邓世雄,高长征,陈书宾. 线性限幅器的设计与研究[J]. 微波学报, 2020,36(3):97-100. (DENG Shixiong, GAO Changzheng, CHEN Shubin. Design and research of linear limiter[J]. Journal of Microwaves, 2020,36(3):97-100.)
- [11] 张海伟,史小卫,徐乐,等. 高功率PIN限幅器设计及测试方案[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(11):3029-3032. (ZHANG Haiwei, SHI Xiaowei, XU Le, et al. Design and test scheme of high power PIN limiters[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(11):3029-3032.)
- [12] SU Baowen, CAO Hefei. Study on the power limiter under strong electromagnetic field of Beidou navigation receiver[C]// International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC). Nanjing, China: IEEE, 2019:1-4.
- [13] LUTZ Josef, SCHLANGENOTTO Heinrich, SCHEUERMANN Uwe, 等. 功率半导体器件—原理、特性和可靠性[M]. 北京:机械工业出版社, 2013. (LUTZ Josef, SCHLANGENOTTO Heinrich, SCHEUERMANN Uwe, et al. Semiconductor power devices—physics, characteristics, reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.)
- [14] SANTHAKUMAR R, ALLEN D. High performance Ka-band VPIN limiters[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). La Jolla, CA, USA: IEEE, 2012:1-4.
- [15] 傅世强,李婵娟. 射频电路设计与应用[M]. 大连:大连海事大学出版社, 2018. (FU Shiqiang, LI Chanjuan. Design and application of RF circuit[M]. Dalian, China: Dalian Maritime University Press, 2018.)

作者简介:

马振洋(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事航空器适航审定、航空电磁环境效应等研究. email: zhenyang1105@126.com.

左晶(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为射频电路设计.

史春蕾(1985-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁兼容.

李义成(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为射频电路设计.