

## E 波段集成双工-功分器的设计

余亮<sup>1</sup>, 张健<sup>2</sup>, 孙鹏飞<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310000; 2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 双工器和功分器是通信系统中两个重要的器件, 为了减小通信系统的尺寸, 将功分器集成到双工器内部形成双工-功分器。与一般双工器相比, 可以实现两输出端口功分输出。该双工-功分器主要由矩脊波导过渡、脊波导带通滤波器和脊波导功分器组成。基于消失模的脊波导带通滤波器有插入损耗低、结构紧凑、通带及阻带带宽宽等优势。用 HFSS 进行建模仿真优化, 仿真结果表明在 71~76 GHz 波段, 回波损耗大于 12.9 dB, S32 和 S42 基本维持在 -3.8 dB 左右; 在 81~86 GHz 波段, 回波损耗大于 12.5 dB, S31 和 S41 基本维持在 -3.85 dB 左右, 通道之间的隔离度大于 43.2 dB, 两输出端口的幅度基本一致。实物的测试结果与仿真结果呈现良好的一致性。

**关键词:** E 波段; 双工-功分器; 矩脊波导过渡; 脊波导带通滤波器; 消失模

中图分类号: TN61

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211591

中文引用格式: 余亮, 张健, 孙鹏飞, 等. E 波段集成双工-功分器的设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(8): 15-19.

英文引用格式: Yu Liang, Zhang Jian, Sun Pengfei, et al. Design of E-band integrated diplexer-power divider[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(8): 15-19.

### Design of E-band integrated diplexer-power divider

Yu Liang<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>2</sup>, Sun Pengfei<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310000, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The diplexer and the power divider are two important components in the communication system. In order to reduce the size of the communication system, in this paper, the power divider is integrated into the diplexer to form a diplex-power divider. Compared with the general diplexer, it can realize the output of two-port power division output. The diplex-power divider is mainly composed of rectangular ridge waveguide transition, ridge waveguide band pass filter and ridge waveguide powerdivider. The ridge waveguide bandpass filter based on the evanescent mode has the advantages of low insertion loss, compact structure, wide passband and stopband. The HFSS is used for modeling and simulation optimization. The simulation results show that at 71~76 GHz, the return loss is greater than 12.9 dB, S32 and S42 are basically maintained at around -3.8 dB; at 81~86 GHz, the return loss is greater than 12.5 dB, S31 and S41 are basically maintained at around -3.85 dB, the isolation between channels is greater than 43.2 dB, and the amplitude of the two output ports are basically the same. The actual test results are in good agreement with the simulation results.

**Key words:** E-band; diplexer-power divider; rectangular to ridge waveguide transition; ridge waveguide bandpass filter; evanescent mode

### 0 引言

毫米波无线通信系统容易遭受高路径损耗和大气吸收, 并且容易受到天气条件和降水的影响<sup>[1]</sup>。然而, 在 E 波段(71~76 GHz 和 81~86 GHz)存在一个大气窗口, 其大气衰减较低, 这使 E 波段成为各国的研究热点。

双工器和功分器是通信系统中不可或缺的两个器件。双工器的常见设计方法有基于 T 型匹配网络<sup>[2-4]</sup>、基于分布式耦合<sup>[5-7]</sup>、基于共用谐振器<sup>[8-11]</sup>。现有一种有助于改善系统性能和减小尺寸的新颖的拓扑结构是将功分器集成在双工器内部<sup>[12]</sup>。

本文将用脊波导带通滤波器来设计 E 波段集成双

工-功分器。首先介绍了阶梯矩脊波导过渡结构的设计, 然后介绍了基于消失模的脊波导带通滤波器的原理和脊波导带通滤波器的设计过程, 并介绍脊波导功分器的设计, 最后对双工-功分器进行了仿真和实测。

### 1 阶梯矩脊波导过渡的设计

为了使设计的双工-功分器能与标准器件对接, 在 4 个端口设计了多级阶梯矩脊波导过渡结构。

多级阶梯矩脊波导过渡结构如图 1 所示。矩形波选用标准波导 WR-12( $a=3.1$  mm,  $b=1.55$  mm), 单脊波导的尺寸选取需要满足截止频率小于带通滤波器通带边缘的频率, 一般留有 10%~20%的余量, 这里设置单脊波导

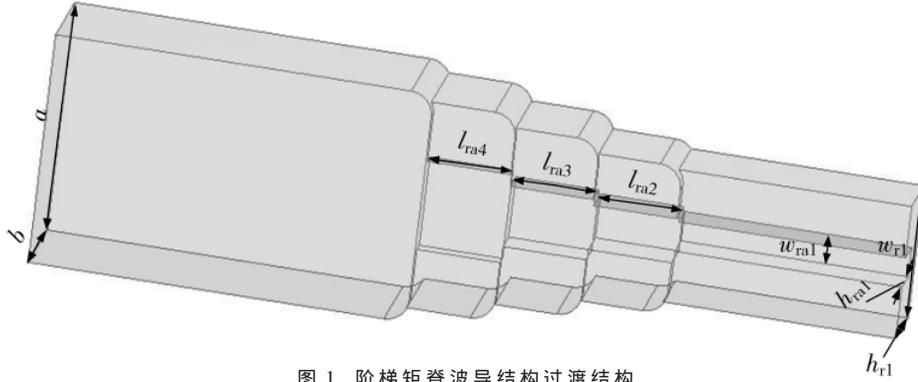


图1 阶梯矩脊波导结构过渡结构

宽度  $w_{r1}=1.8\text{ mm}$ , 高度  $h_{r1}=1\text{ mm}$ , 金属脊高度  $h_{ra1}=0.5\text{ mm}$ , 宽度  $w_{ra1}=0.4\text{ mm}$ 。单脊波导的截止频率约为  $60\text{ GHz}$ , 满足要求。矩形波导与单脊波导之间采用多级阶梯来实现阻抗匹配, 每节阶梯的长度相等 ( $l_{ra4}=l_{ra3}=l_{ra2}=1.1\text{ mm}$ )。由于矩形波导与脊波导存在高度差, 将每段脊波导高度和宽度依次减小, 并且将每段金属脊的宽度依次减小, 高度依次增加, 来实现矩形波导与脊波导之间良好的匹配。

在 HFSS 对矩脊波导过渡结构进行建模仿真优化, 最后仿真结果如图 2 所示, 在  $71\sim 86\text{ GHz}$  波段,  $S_{11}$  小于  $-27.6\text{ dB}$ ,  $S_{21}$  大于  $-0.01\text{ dB}$ , 实现了良好的匹配。

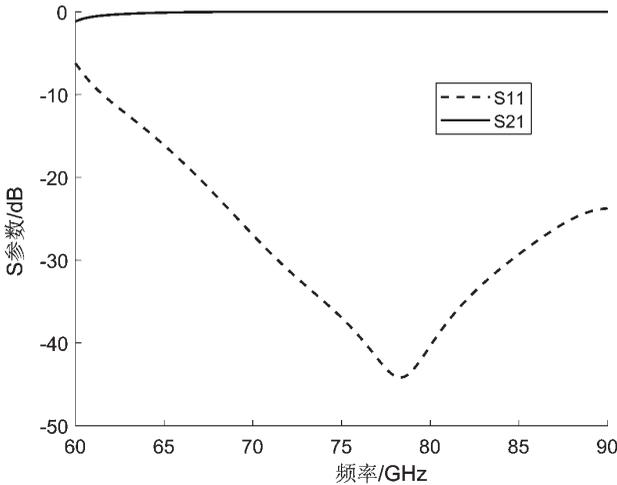


图2 矩脊波导过渡结构仿真结果

## 2 脊波导带通滤波器的设计

消失模是指当传输电磁波的频率小于截止频率, 波导中能量类似于处于无传输状态, 只有一定程度的存储, 而电磁波的波动现象消失的状态<sup>[13]</sup>。

处于消失模状态的波导部分可以等效为“ $\pi$ ”型电感网络。单脊波导可以等效为容性网络。基于消失模的

滤波器的等效电路模型如图 3 所示。基于消失模的脊波导滤波器有插入损耗低、结构紧凑、通带宽及阻带宽等优势<sup>[13]</sup>。

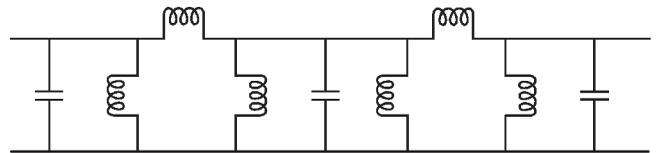


图3 基于消失模的带通滤波器的等效电路模型

综合考虑阻带抑制和尺寸, 本文选用 7 阶带通滤波器。使用 couplfil 综合出  $81\sim 86\text{ GHz}$  带通滤波器的耦合系数 ( $K_{S,1}=K_{1,S}=0.084$ ;  $K_{1,2}=K_{2,1}=0.070$ ;  $K_{2,3}=K_{3,2}=0.050$ ;  $K_{3,4}=K_{4,3}=0.047$ )。图 4 中  $t_1\sim t_8$  为消失模波导长度,  $l_1\sim l_7$  为金属脊长度,  $W_e$  和  $w_{r1}$  分别为消失模波导宽度和脊波导宽度。由于结构对称, 只列出部分数据, 其中  $l_2=l_3=l_4$ 。谐振器间耦合强度与消失模的宽度和耦合长度有关。通过调整消失模的耦合长度和宽度来满足耦合系数。调整消失模波导的宽度使截止频率大于滤波器通带的上边缘<sup>[14]</sup>。经过优化后的滤波器所有参数的值在表 1 中列出。71~76 GHz 的脊波导带通滤波器设计也是类似的,

表 1 脊波导带通滤波器参数表

参数	71~76 GHz	81~86 GHz
$t_1$	0.2	0.24
$t_2$	0.55	0.68
$t_3$	0.68	0.81
$t_4$	0.7	0.84
$l_1$	1.68	1.02
$l_2$	1.6	0.9
$w_{r1}$	0.4	0.4
$W_e$	1.22	1.12

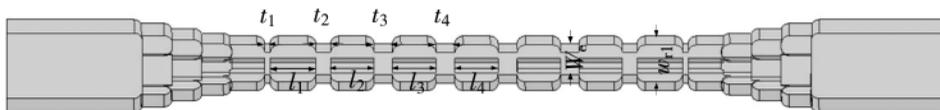
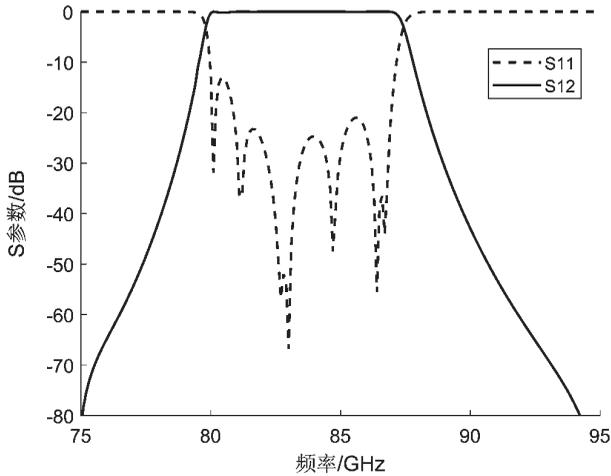


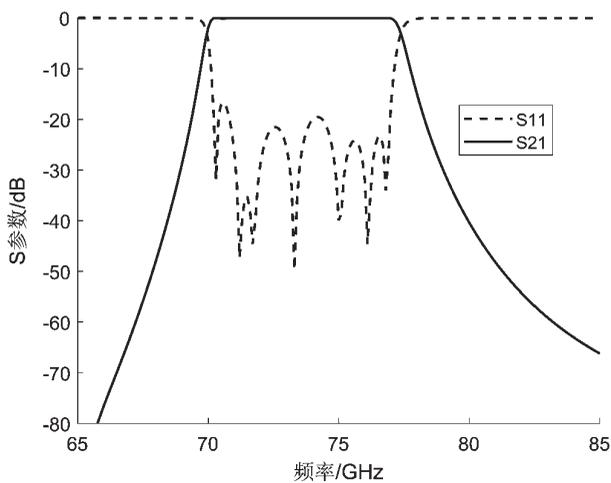
图4 脊波导带通滤波器

不再进行阐述。

脊波导带通滤波器在 HFSS 仿真结果如图 5 所示, 在 71~76 GHz 频段,  $S_{11}$  小于  $-19.5$  dB,  $S_{21}$  大于  $-0.05$  dB; 在 81~86 GHz 频段,  $S_{11}$  小于  $-21.1$  dB,  $S_{21}$  大于  $-0.03$  dB。



(a) 81~86 GHz 带通滤波器仿真结果



(b) 71~76 GHz 带通滤波器仿真结果

图 5 脊波导带通滤波器仿真结果

### 3 脊波导功分器的设计

设计的单脊波导功分器的结构如图 6 所示, 结构类似于 T 形结, 在交汇处设置一个容性金属平板, 将脊波导内的感性金属脊延伸到容性的金属平板内构成阻抗

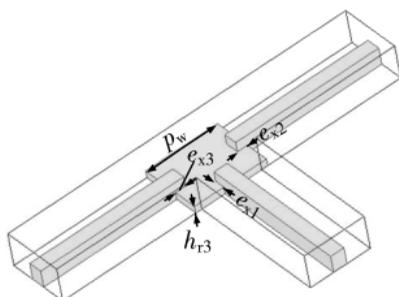


图 6 脊波导功分器结构

匹配网络<sup>[15]</sup>。使两边金属脊的延伸长度相等 ( $e_{x2}=e_{x3}$ ), 即可以实现两输出端口功率平分。通过调整金属平板的宽度  $p_w$  和高度  $h_{r3}$  以及金属脊的延伸长度可以实现良好的匹配。

优化后的脊波导功分器参数为:  $p_w=2.16$  mm,  $h_{r3}=0.21$  mm,  $e_{x1}=e_{x2}=e_{x3}=0.3$  mm。仿真结果如图 7 所示, 在 71~86 GHz 内,  $S_{11}$  小于  $-30$  dB,  $S_{21}=S_{31}=-3.05$  dB。

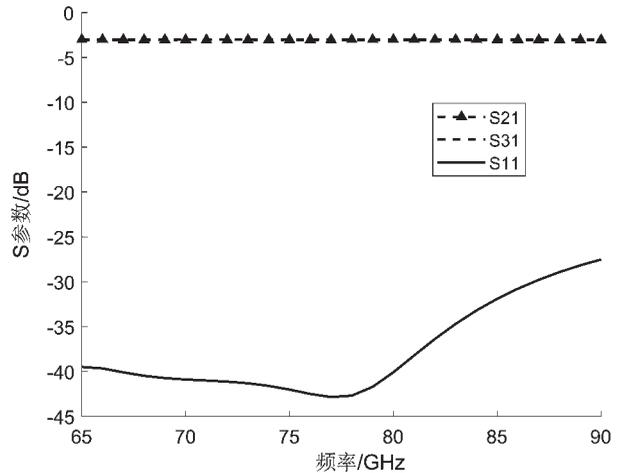


图 7 脊波导功分器仿真结果

### 4 双工-功分器的仿真和实测结果

双工-功分器的结构如图 8 所示, 将设计好的两个带通滤波器通过功分器连接起来。端口 1 为下行通道 (81~86 GHz), 端口 2 为上行通道 (71~76 GHz), 端口 3 和端口 4 为功分输出端口。

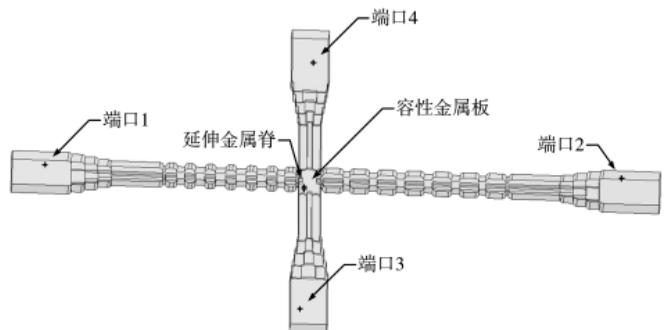
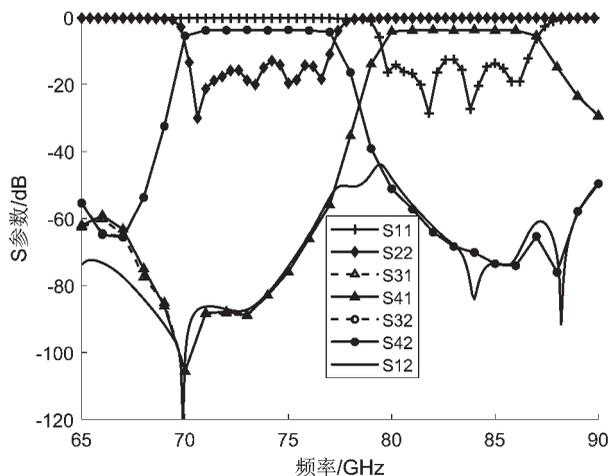


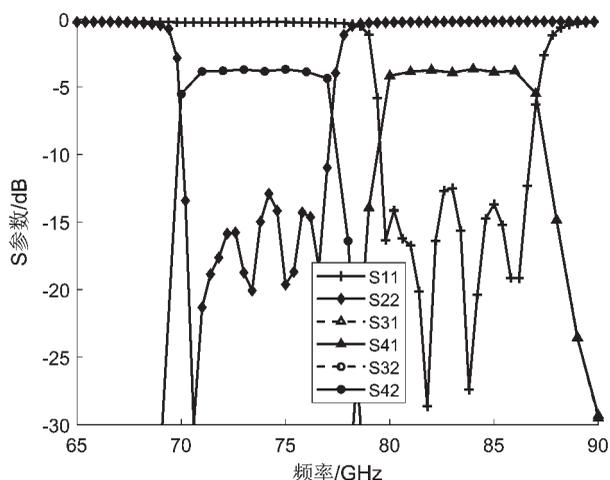
图 8 双工-功分器的结构

最后, 在 HFSS 进行仿真优化, 最后得到的仿真结果如图 9 所示。在 71~76 GHz 和 81~86 GHz, 回波损耗大于 12.5 dB, 通道间的隔离度大于 43.2 dB。3 端口和 4 端口输出幅度基本一致, 在 81~86 GHz,  $S_{31}$  和  $S_{41}$  基本维持在  $-3.85$  dB 左右; 在 71~76 GHz,  $S_{32}$  和  $S_{42}$  基本维持在  $-3.8$  dB 左右。

对双工-功分器进行加工, 腔体材料采用铝, 实物如图 10 所示, 尺寸为 62 mm×27 mm×22 mm。用思仪的 3672E 矢量网络分析仪对实物进行测试, 仿真结果与实



(a) 双工-功分器仿真整体图



(b) 双工-功分器仿真放大图

图9 双工-功分器仿真结果

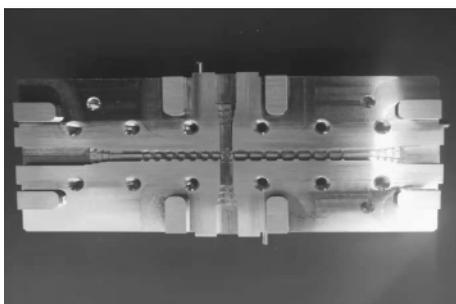
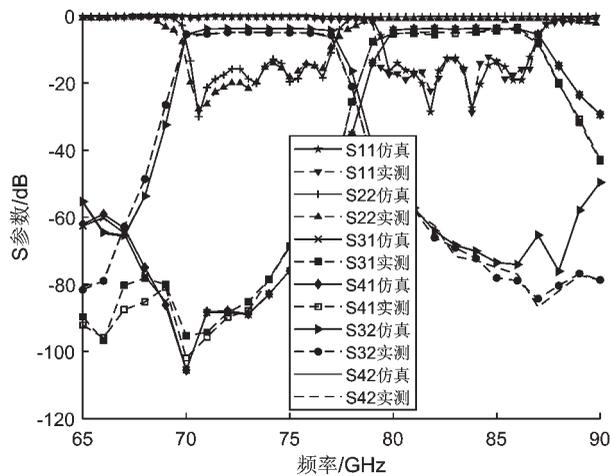


图10 双工-功分器实物图

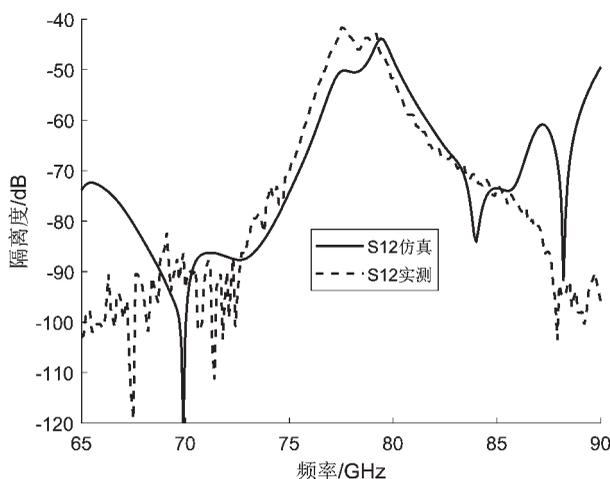
际测试结果比较如图 11 所示。从图中可以看出实际测试结果与仿真结果基本吻合,实际测试的两通道间隔离度大于41.5 dB,在 81~86 GHz, S31 和 S41 基本维持在-5.01 dB 左右;在 71~76 GHz, S32 和 S42 基本维持在-4.95 dB 左右。

### 5 结论

本文设计了一种 E 波段集成双工-功分器,用 HFSS 进行建模仿真,仿真结果表明两功分输出端口的幅度基



(a) 仿真结果与实际测试比较



(b) 隔离度比较

图11 仿真结果与实际测试结果比较

本一致,各通道回波损耗大于 12.5 dB,通道间的隔离度大于 43.2 dB。实际测试的结果与仿真结果基本吻合,表明方案的可行性。后续可以将其用在天线的馈电网络中,做成双工天线减少通信系统尺寸。

### 参考文献

- [1] LOCKIE D, PECK D. High-data-rate millimeter-wave radios[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(5): 75-83.
- [2] 纪玉雪. 小型化高隔离度微带双工器的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [3] 付勇. 结构紧凑高隔离微带双工器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [4] QI Z, LI X, ZENG J. Wideband diplexer design and optimization based on back-to-back structured common port[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2018, 28(4): 320-322.
- [5] WU H W, HUANG S H, CHEN Y F. Design of new quad-channel diplexer with compact circuit size[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2013, 23(5): 240-242.
- [6] TU W H, HUNG W C. Microstrip eight-channel diplexer with

- wide stopband[J].IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2014, 24(11): 742-744.
- [7] CHEN X, YU X, Sun Sheng. Design of high-performance microstrip diplexers with stub-loaded parallel-coupled lines[J]. Electronics Letters, 2017, 53(15): 1052-1054.
- [8] SHANG X, WANG Y, XIA W, et al. Novel multiplexer topologies based on all-resonator structures[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2013, 61(11): 3838-3845.
- [9] GUAN X, YANG F, LIU H, et al. Compact and high-isolation diplexer using dual-mode stub-loaded resonators[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2014, 24(6): 385-387.
- [10] XIAO J K, ZHANG M, MA J G. A compact and high-isolated multiresonator-coupled diplexer[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2018, 28(11): 999-1001.
- [11] 黄巍. 面向无线通信的高性能平面双工器研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [12] VOSOOGH A, SORKHERIZI M S, ZAMAN A U, et al. An integrated Ka-band diplexer-antenna array module based on gap waveguide technology with simple mechanical assembly and no electrical contact requirements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2): 962-972.
- [13] 李飞. 基于消失模的新型波导滤波器研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [14] DE PAOLIS F. Dimensional synthesis of evanescent-mode ridge waveguide bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2): 954-961.
- [15] 尤清春, 陆云龙, 尤阳, 等. 一种紧凑型的宽频带单脊波导功分器[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(2): 50-54.

(收稿日期: 2021-04-02)

## 作者简介:

余亮(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 毫米波集成电路。

张健(1978-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 毫米波集成电路及无线通信系统设计, E-mail: zhangjian@hdu.edu.cn。

孙朋飞(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 毫米波集成电路及应用。



扫码下载电子文档

(上接第 10 页)

- magnetic wave reflected by reentry plasma sheath[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(5): 1755-1769.
- [13] KUNDRAPU M, LOVERICH J, BECKWITH K, et al. Modeling radio communication blackout and blackout mitigation in hypersonic vehicles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(3): 853-882.
- [14] MICHAEL J R, STEPHENSON J J. A versatile three-dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere[R]. Washington, DC: NTIA Technical Report OT-75-76, USA, 1975.
- [15] YANG X, WEI B, YIN W. Relationship between the velocity of hypersonic vehicles and the transmission efficiency of radio waves[J]. Waves in Random and Complex Media, 2019, 29(2): 382-391.

(收稿日期: 2021-01-13)

## 作者简介:

杨鑫(1988-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 非均匀介质中电波传播的数值方法与应用, E-mail: e\_yangx@126.com。



扫码下载电子文档

(上接第 14 页)

- [12] TAN R, ZHOU J, DU H, et al. An modeling processing method for video games based on deep reinforcement learning[C]//2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, 2019: 939-942.
- [13] SILVER D, LEVER G, HEES N, et al. Deterministic policy gradient algorithms[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, 2014: 387-395.
- [14] 马东立, 罗勋, 裴旭. 低重频 PD 雷达的临界散射截面计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1011-1014, 1050.

(收稿日期: 2021-07-12)

## 作者简介:

马子杰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 体系仿真、机器学习。

高杰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 体系仿真、目标特性、计算电磁学。

谢拥军(1968-), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算电磁学及应用、天线与微波工程、太赫兹技术等, E-mail: yjxie@buaa.edu.cn。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所