

文章编号：2095-4980(2024)06-0605-05

基于槽线的太赫兹同相和反相功分器设计

张长路，朱忠博^{*}，王彩霞，金生霄

(中国空间技术研究院西安分院，陕西 西安 710100)

摘要：根据接地共面波导(GCPW)和槽线的结构特点，首先设计并仿真验证了一种由接地共面波导到槽线的功分器；然后根据槽线横截面的电场分布特性，设计了一种GCPW-槽线-GCPW结构的同相功分器和反相功分器。仿真结果表明，同相功分器在175~225 GHz范围内的插入损耗优于4 dB，回波损耗优于9.6 dB；反相功分器在185~215 GHz范围内的插入损耗优于4 dB，回波损耗优于10.5 dB，幅度不平衡度小于0.24 dB，相位不平衡度小于1.3°。相比其他太赫兹功分器，本文设计的功分器在插入损耗和回波损耗相当的情况下，具有更简单、紧凑和易于集成的结构。

关键词：功分器；槽线；接地共面波导；过渡结构；太赫兹

中图分类号：TN626

文献标志码：A

doi: 10.11805/TKYDA2024088

Design of terahertz in-phase and out-of-phase power divider based on slotline

ZHANG Changlu, ZHU Zhongbo^{*}, WANG Caixia, JIN Shengxiao

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: A Grounded Coplanar Waveguide(GCPW) to slotline power divider is firstly built and verified based on the structural properties of both the GCPW and the slotline. Then an in-phase power divider and an out-of-phase power divider based on a GCPW-slotline-GCPW structure are designed according to the electric field distribution characteristics of the cross-section of the slotline. The simulation results show that the insertion loss of the in-phase power divider is better than 4 dB and the return loss is better than 9.6 dB in the range of 175~225 GHz; the insertion loss of the out-of-phase power divider is better than 4 dB and the return loss is better than 10.5 dB in the range of 185~215 GHz, and the amplitude imbalance is less than 0.24 dB and the phase imbalance is less than 1.3°. Compared to other terahertz power dividers, the power dividers presented in this study are simpler, more compact, and easier to integrate, with comparable insertion and return losses.

Keywords: power divider; slotline; Grounded Coplanar Waveguide; transition structure; terahertz

随着智能终端的极速发展和无线网络的传输速率剧增，5G已不能完全满足未来通信的需求。为解决5G存在的问题以及实现空天地海一体化通信，人们把目光转向了第六代移动通信系统(6G)。在6G中，太赫兹波段由于可提供极高的数据传输速率和巨大的带宽资源，使太赫兹通信技术具有很好的应用前景^[1-3]。太赫兹功分器是太赫兹通信系统中的关键器件之一，其主要作用是把较大功率的输入信号分成若干个功率较小的信号。根据输出信号的相位是否相同，功分器可分为同相功分器和反相功分器。

常见的同相功分器有矩形波导类功分器^[4-9]、堆叠基片集成波导功分器^[10]、介质集成悬置线功分器^[11]和共面波导类功分器^[12-13]。其中矩形波导类功分器在功率容量、插入损耗和工作带宽等方面具有一定优势，但矩形波导类功分器的尺寸较大，重量较重，不利于太赫兹通信系统的小型化和轻量化集成；堆叠基片集成波导功分器和介质集成悬置线功分器具有矩形波导类功分器功率容量大和插入损耗低的优点，同时还具有结构紧凑和易于集成的优点，但二者的结构都比较复杂，成本较高且不便于加工；共面波导类功分器具有结构简单和易于加工的优势，同时得益于较小的损耗和色散，是一种性能和结构平衡较好的功分器。

收稿日期：2024-01-30；修回日期：2024-04-25

基金项目：国家自然科学基金资助项目(62101435)

*通信作者：朱忠博 email:zhuzb@cast504.com

反相功分器和同相功分器的差别主要在于反相功分器的输出端口间存在 180° 的相位差，目前 180° 相位差主要由矩形波导宽边双侧输出^[7-9]、移相器级联^[14]和微带到槽线过渡结构^[15]引入。其中矩形波导宽边双侧输出可以产生线性度良好的相位差，但受限于矩形波导结构，重量较大且不便于集成；移相器级联引入的 180° 相位差线性度较差，且在输出端口级联移相器后，功分器输出端口之间的结构对称性变差，导致反相功分器的幅度不平衡度较差；微带到槽线过渡结构也可以在整个频段内引入无色散的 180° 相位差，但微带到槽线过渡结构涉及到信号的跨层传输，这种结构对后续的测试和集成造成一定的困难。

综上所述，当前太赫兹同相功分器和反相功分器还存在结构复杂和不易集成等问题。对此，基于槽线的电场分布、GCPW-槽线过渡结构和槽线-GCPW 过渡结构，提出一种结构简单和易于集成的 GCPW-槽线-GCPW 同相和反相功分器。

1 GCPW-槽线功分器设计

图 1 为 GCPW-槽线功分器结构图，该过渡结构一共有 3 层，顶层和底层是厚度为 $5 \mu\text{m}$ 的铜，中间层是厚度为 $127 \mu\text{m}$ 、相对介电常数 3.78 的石英基片，顶层和底层之间通过直径为 $90 \mu\text{m}$ 的金属柱导通。GCPW-槽线功分器的输入端口 Port 1 为 GCPW 结构，输出端口 Port 2 和 Port 3 为槽线结构。

实现该功分器的关键在于实现 GCPW-槽线的模式转换，一种常用的分析方法是把 GCPW 的中心导体视为一个激励探针，依靠此电流源探针激发出槽线上的切向电场；同时由于空间上所有电场和磁场都与切向电场有关，因此可把切向电场看作一个二次激励源，从而激发出完整的槽线模型。即通过一次激励源激励探针和二次激励源切向电场实现 GCPW 到槽线的模式转换^[16]。

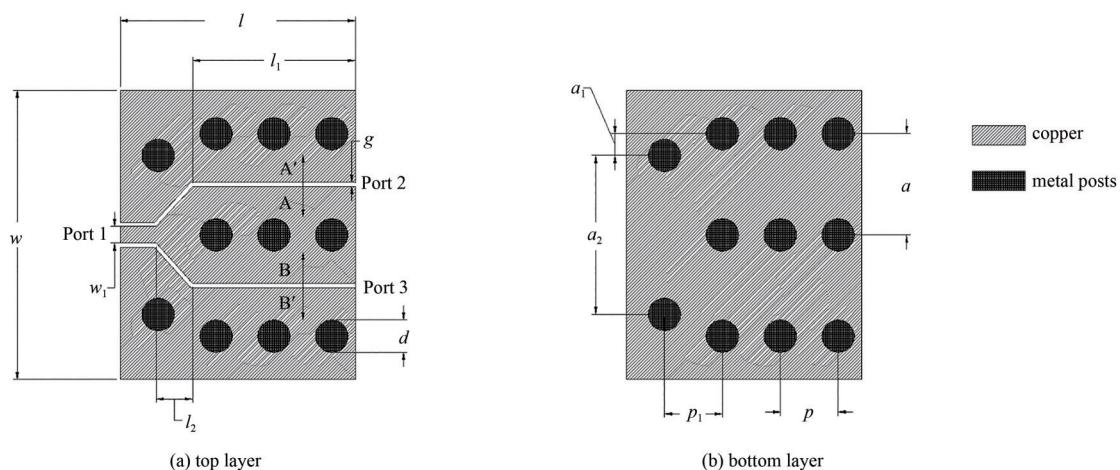


Fig.1 Layout of GCPW to slotline power divider

图 1 GCPW-槽线功分器

图 2 为 GCPW-槽线功分器的仿真结果，从图 2(a)可见，功分器过渡结构在 150~340 GHz 频率范围内的平均插入损耗为 3.4 dB ，最大插入损耗低于 3.6 dB ；回波损耗优于 18 dB ，平均回波损耗则高达 23.6 dB ；隔离度优于 7 dB 。图 2(b)为功分器 Port 2 和 Port 3 之间的幅度不平衡度和相位不平衡度曲线图，该结构在 150~340 GHz 整个频率范围内的幅度不平衡度优于 0.08 dB ，相位不平衡度优于 0.26° 。即 GCPW-槽线功分器在 150~340 GHz 约 77.6% 的相对带宽下具有损耗低和幅相一致性好的优点。

2 同相和反相功分器设计

图 3 为图 1 中 Port 2 支路 A-A' 截面和 Port 3 支路 B-B' 截面的电场分布图，由槽线的电场分布特性可知，图 2 中槽线两侧 A 和 A' 或 B 和 B' 的电场方向相反^[17-18]，且 A' 和 B' 一侧的电场方向相同，A' 和 B 一侧的电场方向相反。此时在 Port 2 端口的 A' 侧和 Port 3 端口的 B' 侧设计一个槽线-GCPW 的渐变结构，再通过 50Ω 的 GCPW 输出，便可得到一个 GCPW-槽线-GCPW 的同相功分器，如图 4(a)所示；同理还可以得到一个 GCPW-槽线-GCPW 的反相功分器，如图 4(b)所示。输入输出端口设计为 GCPW 结构，一方面是便于实现同相和反相的功能，另一方面是便于与其他器件集成。表 1 为 GCPW-槽线功分器、同相功分器和反相功分器的尺寸参数。

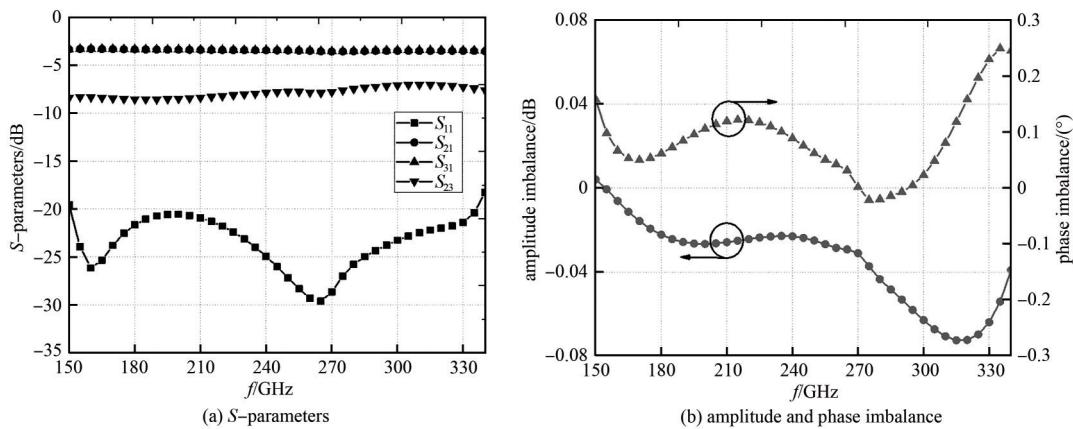


Fig.2 Simulation results of GCPW-slotline power divider

图2 GCPW-槽线功分器的仿真结果

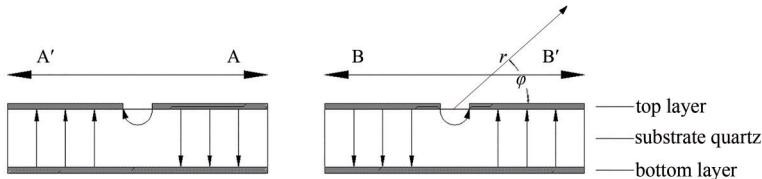


Fig.3 Electric field distribution of cross sections

图3 截面电场分布

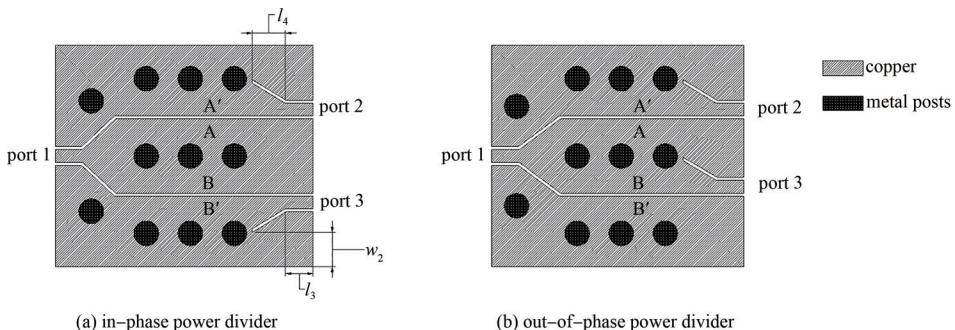
Fig.4 Layouts of in-phase and out-of-phase power dividers
图4 同相和反相功分器结构

表1 GCPW-槽线、同相和反相功分器的尺寸参数(单位:mm)

Table1 Parameters of GCPW-slotline power divider, in-phase power divider and out-of-phase power divider(unit:mm)

type of power divider	l	l_1	l_2	l_3	l_4	w	w_1	w_2	a	a_1	a_2	p	p_1	d	g
GCPW-slotline	0.650	0.450	0.10	—	—	0.8	0.046	—	0.28	0.44	0.06	0.16	0.16	0.09	0.01
in-phase	0.915	0.495	0.12	0.1	0.12	0.8	0.046	0.124	0.28	0.40	0.08	0.16	0.20	0.09	0.01
out-of-phase	0.935	0.445	0.15	0.1	0.12	0.8	0.046	0.124	0.28	0.36	0.10	0.16	0.22	0.09	0.01

同相功分器的仿真结果见图5(a)~(b)。图5(a)为同相功分器的S参数图，由图可见同相功分器在175~225 GHz范围内的平均插入损耗为3.8 dB，最大插入损耗低于4 dB；回波损耗优于9.6 dB，平均插入回波损耗12.4 dB；隔离度大于8 dB。图5(b)为同相功分器的幅度不平衡度和相位不平衡度曲线图，从图中可知，同相功分器在175~225 GHz范围内幅度不平衡度小于0.06 dB，相位不平衡度低于0.6°。由于同相功分器的2个输出端口完全对称，除了工作带宽和损耗的差异外，同相功分器与GCPW-槽线两路过渡结构都拥有良好的幅相不平衡度。图5(c)~(d)为反相功分器的仿真结果。图5(c)为反相功分器的S参数图，从图可知，反向功分器在185~215 GHz范围内的插入损耗低于4 dB，回波损耗优于10.5 dB，隔离度大于10.2 dB。图5(d)为反相功分器的幅度平衡度和相位不平衡度曲线图，从图可见，反相功分器在185~215 GHz范围内的幅度不平衡度小于0.24 dB，相位不平衡度低于1.3°。对比同相功分器和反相功分器的仿真结果可知，由于二者结构基本一致，因此二者的插入损耗、回波损耗和隔离度相差较小；反相功分器的幅度不平衡度和相位不平衡度较同相功分器有一定恶化，这主要是由于反相功分器的Port 2和Port 3端口边界不完全一样所导致。

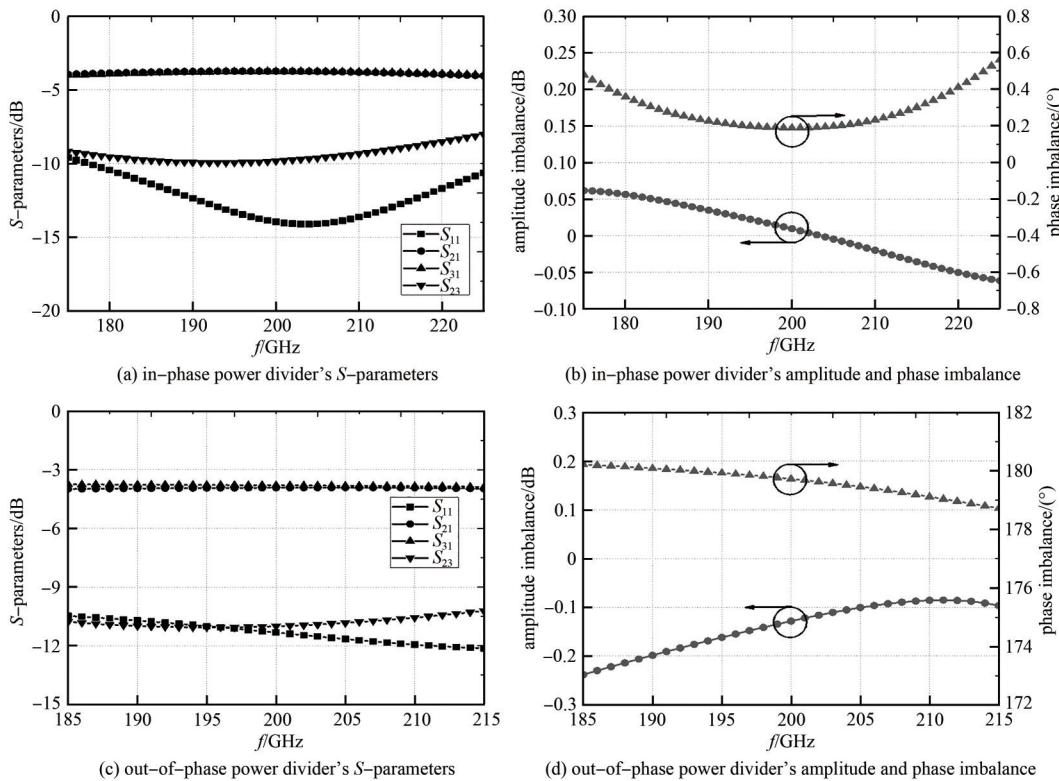


Fig.5 In-phase and out-of-phase power dividers' simulation results

图5 同相和反相功分器仿真结果

表2为不同功分器的性能和尺寸。从表中可见，相较于其他太赫兹功分器，本文设计的太赫兹同相功分器具有较大的工作带宽，同时尺寸品质因数(FOMs)(功分器平均每路占据的尺寸)只有0.02，低于波导结构和堆叠基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)功分器的0.55和0.06，同时相位不平衡度品质因数(FOMp)低至0.6。本文设计的太赫兹反相功分器同样在带宽和相位不平衡度品质因数具有较大的优势，其中相对带宽约为波导结构反相功分器的2.5倍。

表2 不同功分器性能和尺寸对比

Table2 Comparison of different power dividers

reference	type	ways	structure	bandwidth/GHz	IL/dB	RL/dB	AI/dB	PI/(°)	size/(mm ³)	FOMp	FOMs
[5]	in-phase	4	waveguide	75~110	1.2	14.8	N	N	$25\lambda \times 16\lambda \times 6.3\lambda$	N	15.87
[6]	in-phase	32	waveguide	124~146	1.4	10.0	N	N	$4.7\lambda \times 4.7\lambda \times 0.8\lambda$	N	0.55
[10]	in-phase	8	stacked SIW	90~110	1.4	15.0	N	N	$0.84\lambda \times 1.4\lambda \times 0.42\lambda$	N	0.06
this work	out-of-phase	16	waveguide	214~227	0.1	20.0	0.2	1	N	9.6	N
	in-phase	2	GCPW & Slotline	150~340	0.6	18.0	0.08	0.26	$0.53\lambda \times 0.66\lambda \times 0.11\lambda$	0.6	0.020
	in-phase	2	GCPW & Slotline	175~225	1.0	9.6	0.06	0.60	$0.61\lambda \times 0.53\lambda \times 0.09\lambda$	2.4	0.015
out-of-phase		2	GCPW & Slotline	185~215	1.0	10.5	0.24	1.30	$0.62\lambda \times 0.53\lambda \times 0.09\lambda$	8.6	0.015

AI:Amplitude Imbalance; PI:Phase Imbalance; IL:Insertion Loss; RL:Return Loss; N:None

3 结论

本文首先设计并仿真验证了一种GCPW-槽线功分器，在此基础上，根据槽线的电场分布特性，设计了一种GCPW-槽线-GCPW结构的同相和反相功分器。设计的功分器在太赫兹频段不仅具有大带宽和高相位平衡度的优势，同时还具有性能均衡、尺寸小和重量轻的优点，有望为太赫兹通信系统的轻量化和小型化集成作出一定的贡献。

参考文献：

- [1] 石涵琛,杨闯,彭木根. 6G 太赫兹通信:架构、技术与挑战[J/OL]. 电波科学学报, 2023:1~20. (SHI Hanchen, YANG Chuang,

- PENG Mugen. Terahertz communication for 6G:architectures,technologies and challenges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023:1–20.)
- [2] IMT-2030 I(6G)推进组. 太赫兹通信技术研究报告[R/OL]. [2024-01-30]. <https://www.doc88.com/p-67216546463510.html>.
- [3] SONG H J,LEE N. Terahertz communications: challenges in the next decade[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022,12(2):105–117. doi:10.1109/TTHZ.2021.3128677.
- [4] 韩玉朝,孔令甲,李德才. 基于3 dB耦合器的G波段4路功分器研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(10):113–116. (HAN Yuchao,KONG Lingjia,LI Decai. Study on G-band 4-way power divider based on the 3 dB coupler[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022(10):113–116.)
- [5] LI Jianxing,LI Lei,LU Ling,et al. Four-way waveguide power divider design for W-band applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2018,28(5):e21242. doi:10.1002/mmce.21242.
- [6] DENG Xianjin,RAO Yumbo,HUANG Kun,et al. A high efficiency d-band 32-channel radial waveguide power divider/combiner[C]// 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2021: 566–569. doi: 10.1109/IMS19712.2021.9574842.
- [7] HE Yinjian,MO Dayi,WU Qiongsen,et al. A Ka-band waveguide magic-T with coplanar arms using ridge-waveguide transition[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(11):965–967. doi:10.1109/LMWC.2017.2750020.
- [8] 查先飞,张勇. 220 GHz T型结16路功分网络设计[J]. 微波学报, 2020,36(S1):169–171. (ZHA Xianfei,ZHANG Yong. Design of 220 GHz T-junction 16 way power division[J]. Journal of Microwaves, 2020,36(S1):169–171.)
- [9] DANG Zhang,ZHANG Yong,ZHU Huali, et al. An isolated out-of-phase 3-dB power divider via waveguide-to-microstrip transition[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022,32(1):21–24. doi:10.1109/LMWC.2021.3114413.
- [10] ZHOU Yedi,SONG Kaijun,GUO Song,et al. Novel subterahertz high isolation stacked-SIW power divider[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023,13(4):316–323. doi:10.1109/TTHZ.2023.3275820.
- [11] 王映杰,周春霞. 基于介质集成悬置线的W波段功分器设计[J]. 微波学报, 2023,39(S1):186–189. (WANG Yingjie,ZHOU Chunxia. Design of W-band power divider based on substrate integrated suspended line[J]. Journal of Microwaves, 2023,39(S1):186–189.)
- [12] LU Yu,DING Zhenyu,LIU Huan,et al. A GCPW power divider with high isolation for 24 GHz FMCW radar systems[C]// 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Qingdao, China: IEEE, 2023: 1–3. doi: 10.1109/ICMMT58241.2023.10277665.
- [13] 刘一麟. CPW无空气桥功分器设计及其在阵列天线中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(6):595–600. (LIU Yilin. Design of CPW airbridge-free power splitter and its application in antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(6):595–600.) doi:10.11805/TKYDA2021160.
- [14] CHEN Yuta,DENG Puhua,CHEN Bolin,et al. Design of a microstrip out-of-phase power divider using shorted-coupled-line transformer[C]// 2015 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC). Nanjing, China: IEEE, 2015: 1–3. doi:10.1109/APMC.2015.7413528.
- [15] 王雪道,殷燕. 基于微带-槽线结构的宽带反相滤波功分器综合设计[J]. 金陵科技学院学报, 2022,38(4):58–66. (WANG Xuedao,YIN Yan. Integrated design of broadband out-of-phase filtering power divider based on microstrip-slot line structure[J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2022,38(4):58–66.) doi:10.16515/j.cnki.32-1722/n.2022.04.009.
- [16] WANG C H,LIN YS,TSAI M-C,et al. An input-impedance-based circuit model for coplanar waveguide-to-slotline T-junction[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(6):1585–1591. doi:10.1109/TMTT.2004.828446.
- [17] INDER B,MAURIZIO B,RAMESH G. Microstrip lines and slotlines[M]. 3rd ed. Norwood:Artech House, 2013.
- [18] TERRY C,MICHAEL B. Foundations for microstrip circuit design[M]. 4th ed. Chichester:John Wiley & Sons Inc, 2016.

作者简介：

张长路(1996-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹器件.[email:zhangcl28@163.com](mailto:zhangcl28@163.com).

朱忠博(1980-),男,硕士,研究员,主要研究方向空间太赫兹通信技术.

王彩霞(1992-),女,博士,工程师,主要研究方向为太赫兹集成化通信系统.

金生霄(1996-),男,博士,工程师,主要研究方向为太赫兹通信系统.