

文章编号: 2095-4980(2024)06-0594-05

基于加载线型的平面太赫兹移相器设计

王彩霞, 朱忠博, 李升, 邵伟, 金生霄, 王虎, 段崇棣

(中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要: 移相器是相控阵系统中的重要组成器件, 随着频率的增加, 金属的趋肤深度及波导表面粗糙度对器件的影响不可忽略, 会使移相器的损耗增加。对此, 提出一种基于加载线型的平面太赫兹移相器。将 2 个枝节并联在微带线上, 在并联枝节上加载开关二极管, 调节两段枝节的电长度得到所需的移相量; 控制开关的导通和断开, 实现不同的移相角度。仿真结果表明, 在 192~210 GHz 频带范围内, 导通和断开的反射系数都小于 -10 dB, 插入损耗小于 0.5 dB, 移相误差小于 5°, 其中在 5 GHz 带宽范围内, 移相误差小于 1°。提出的平面型移相器, 加工容易, 成本低, 便于系统集成化, 在太赫兹相控阵系统中具有广泛的应用前景。

关键词: 平面; 加载线型; 移相器; 太赫兹

中图分类号: TN623

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024109

Design of a planar terahertz phase shifter based on loaded microstrip-line

WANG Caixia, ZHU Zhongbo, LI Sheng, SHAO Wei, JIN Shengxiao, WANG Hu, DUAN Chongdi
(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Phase shifters are important devices in phased array systems. As the frequency increases, the skinning depth of the metal and the roughness of the waveguide surface have a non-negligible effect on the device, which cause the increase of device loss. To address the difficulties of poor phase shift accuracy and high loss in terahertz phase shifters, a planar digital terahertz phase shifter based on a loaded line is proposed. By connecting two branches in parallel on a microstrip line, the switching diodes are loaded on the parallel branches, the electrical lengths of the two branches are adjusted to obtain the desired phase shift, and the switches states are controlled to achieve different phase shift angles. The simulation results show that the reflection coefficients of both on and off are less than -10 dB, the insertion loss is less than 0.5 dB, and the phase shifting error is less than 5° in the 192~210 GHz band range, while the phase shifting error is less than 1° within the 5 GHz band. The proposed planar phase shifter is easy for processing and system integration with low cost, and has a wide range of applications in terahertz phased array systems.

Keywords: planar; loaded line; phase shifter; terahertz

移相器是一种二端口器件, 能在改变相位的同时保持信号幅度不变, 使输入、输出信号之间有一定的相差。目前移相器主要通过 PIN(Positive-Intrinsic-Negative)二极管^[1-2]、电容二极管^[3-4]、铁氧体^[5]和微机电系统(Micro-Electro Mechanical System, MEMS)开关^[6]等改变传输线长度实现移相, 或选用石墨烯^[7-8]和液晶^[9]等新材料改变传播常数实现移相功能。基于液晶材料的移相器损耗低, 调节范围宽, 但响应时间较长, 很难用于实际的通信系统中; 基于 MEMS 开关的移相器线性度高, 插入损耗低, 但需要高电压驱动, 且加工难度比较大; PIN 二极管移相器只需低电压驱动, 转换时间快, 但相比其他开关, 在太赫兹频段损耗较大; 肖特基二极管由金属和半导体接触构成, 可工作在更高的频段。

在微波毫米波波带, 移相器技术已成熟, 但由于太赫兹频段的特殊性, 太赫兹移相器的发展受到阻碍: a) 移相精确度, 在太赫兹波段受波长影响, 器件尺寸很小, 对加工工艺的要求大大提高; b) 插入损耗, 在太赫兹

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-03-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3811305); 国家自然科学基金青年基金资助项目(62101435); 重点实验室基金资助项目(2023-JCJQ-LB-007)

波段，加工误差以及器件性能会增加移相器的损耗，影响移相器的性能；c) 已有的太赫兹频段移相器的移相线性度不是很好。文献[10]提出了一个基于肖特基二极管的波导型移相器，通过电压控制肖特基二极管的等效阻抗，实现相位变化。在 300~315 GHz 频段范围内，测试的平均插入损耗大约为 13 dB，但波导移相器体积大，不利于小型化和集成化。本文提出一种基于加载线型的平面三位数字太赫兹移相器，平面型结构便于系统集成，在 192~210 GHz 频段范围内，控制开关的不同组合状态，可分别实现 22.5°、45°以及 67.5°移相，导通和断开的反射系数都小于 -10 dB，插入损耗小于 0.5 dB，移相误差小于 5°。

1 移相器设计

加载双枝节移相器原理图如图 1 所示，设微带线主线的特性导纳为 Y_0 ，加载的 2 个枝节并联在微带线上。2 个加载枝节中间的传输线特性导纳为 Y_1 ，2 个加载枝节的输入导纳为 Y' ，则该加载双枝节与其中间的传输线的矩阵 A 如式(1)所示。当加载双枝节的枝节长度变化时，其并联输入导纳 Y' 将会发生变化，相位也同时发生变化。设计时，可通过调整两段枝节的电长度 θ 来调节所需要的移相角。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & j\frac{1}{Y_1} \sin \theta \\ jY_1 \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta + j\frac{Y'}{Y_1} \sin \theta & j\frac{1}{Y_1} \sin \theta \\ 2Y' \cos \theta + jY_1 \sin \theta + j\frac{Y'}{Y_1} \sin \theta & \cos \theta + j\frac{Y'}{Y_1} \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

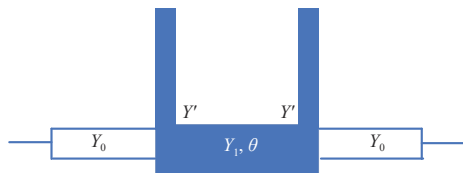


Fig.1 Schematic diagram of loading microstrip-line phase shifter
图1 加载双枝节移相器示意图

表 1 二极管不同工作状态的移相量
Table1 Phase of different operation states of diodes

D_1	D_2	phase
on	on	67.5°
on	off	45.0°
off	on	22.5°

图 2 为平面型三位数字移相器结构示意图，移相器设计在厚度为 50 μm ，介电常数为 3.78 的石英介质上。调整微带线主传输线的宽度，使特性阻抗为 50 Ω ；调整双枝节中间传输线的宽度，使阻抗匹配更好。通过多次迭代优化前半段和后半段枝节的长度，得到所需的移相量，两组枝节分别实现 22.5°相移和 45°相移，将 22.5°移相器和 45°移相器结合，产生 67.5°相移。仿真过程中，采用有无理想的贴片模拟二极管的导通和断开状态。为便于探针测试，将微带线转换为共面波导，共面波导信号线和间隙的设计一方面满足 50 Ω 特性阻抗的要求，同时满足探针 50 μm 的间距要求。表 1 为二极管不同组合的工作状态，当 D_1 断开， D_2 导通时，相移为 22.5°左右；当 D_1 导通， D_2 断开时，相移为 45°左右；当两组二极管都导通时，相移为 67.5°左右。

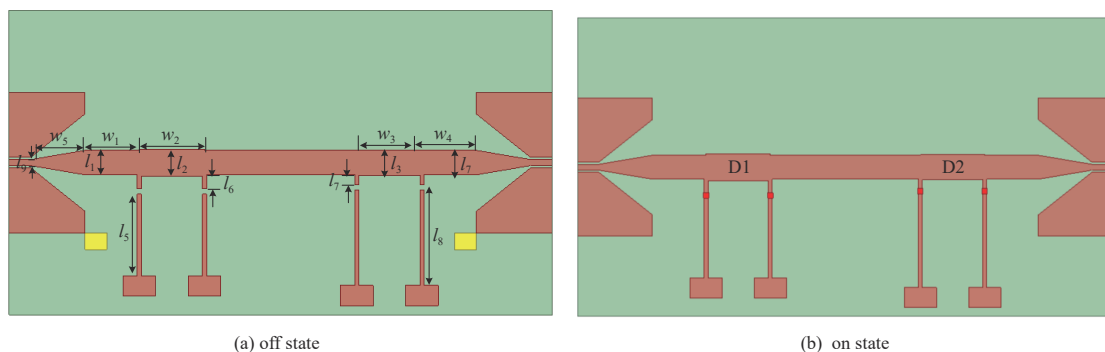


Fig.2 Layout of 3-bit digital phase shifter
图2 三位数字移相器的结构图

图 3 为移相器的仿真结果。从图 3(a)中可以看出，在 190~210 GHz 范围内，导通和断开状态的反射系数都小于 -15 dB，插入损耗小于 0.5 dB。图 3(b)为二极管不同状态移相量的仿真结果，在 195~205 GHz 频率范围内，22.5°移相器移相误差小于 5°，移相线性度良好，在 194~197 GHz 范围内，移相误差小于 1°。在 195~214 GHz 频率范围内，45°移相误差小于 5°；198~201 GHz 频率范围内，移相量为 $(45 \pm 1)^\circ$ 。在 196.5~210 GHz 频段范围内，67.5°移相器移相误差小于 5°；196~200 GHz 频段范围内，移相量为 $(67.5 \pm 1)^\circ$ 。图 3(c)~(d)为仿真的电场分布，可以发现，

开关导通时，枝节上的电场分布明显强于断开状态，22.5°移相器和45°移相器枝节的耦合影响较小。表2为移相器的结构参数。

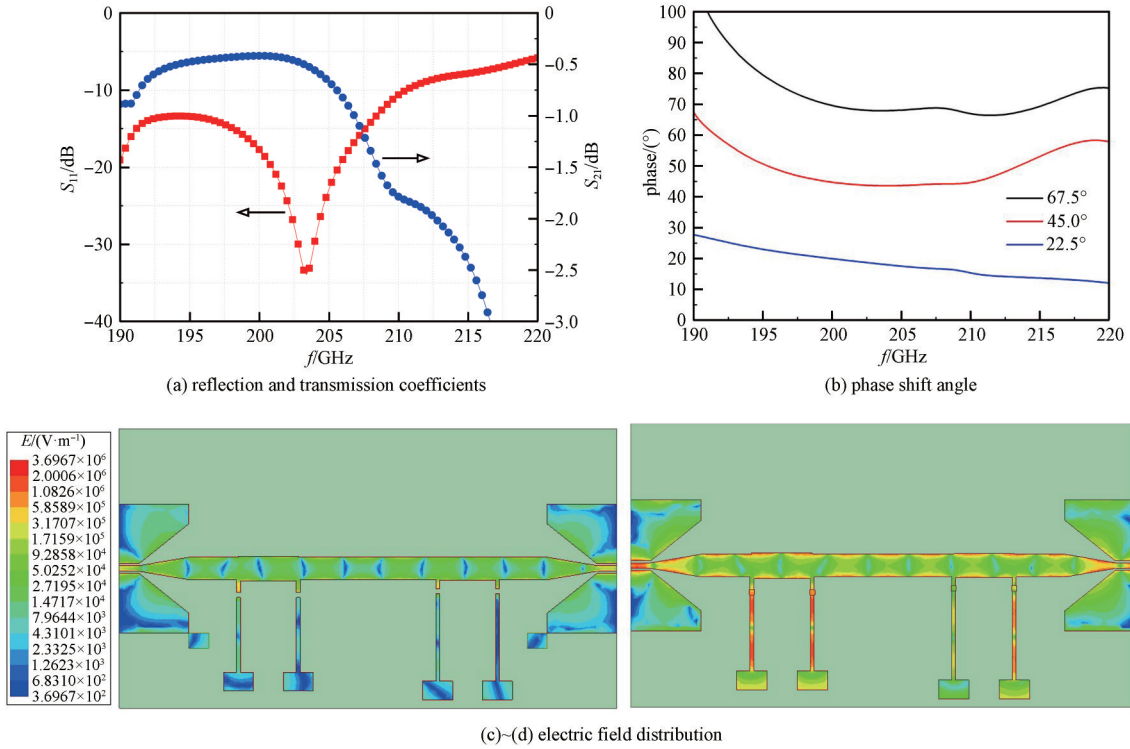


Fig.3 Simulated results of phase shifters
图3 移相器仿真结果

表2 移相器尺寸参数(单位:mm)

Table 2 Parameters of phase shifters(unit:mm)

parameters	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	l_9
value	0.225	0.250	0.235	0.225	0.750	0.115	0.080	0.880	0.500	0.600	0.600	0.500	0.500	0.055

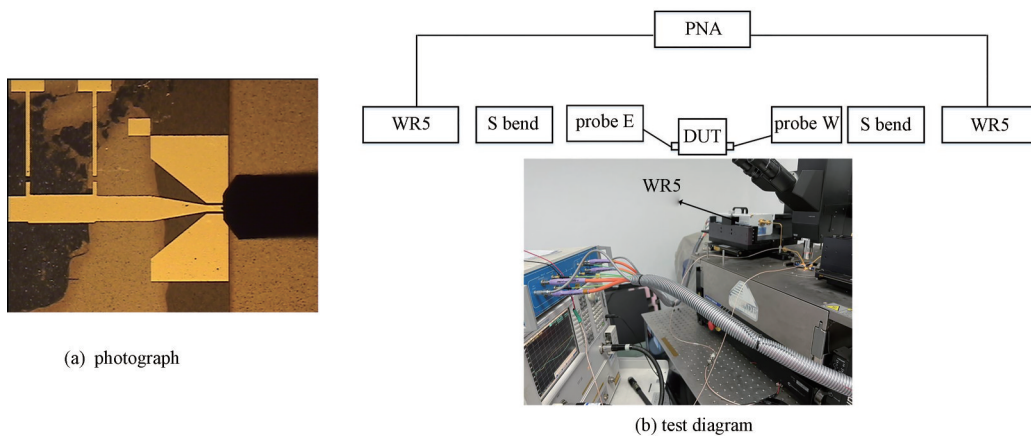


Fig.4 Fabricated and measured photographs
图4 移相器实物图和测试图

2 加工和测试

为验证所设计移相器的性能，对设计的平面数字移相器进行加工测试。图4为加工的移相器实物图以及探针测试的场景图。安捷伦矢量网络分析仪连接2个WR5扩频模块，将频率扩展至太赫兹频段，2个扩频模块分别连接WR5接口的探针，探针为共面波导形式，将探针和待测件接触，测量待测件的性能。图5为22.5°、45°以及

67.5°移相器的 S 参数和移相量，与仿真结果相比，部分频率的匹配变差，插入损耗增加。这一方面是由加工误差引起，另一方面是由于探针和待测件的接触匹配不好，引起匹配恶化。此外，还有个因素是石英介质比较脆，且 50 μm 厚度石英比较薄，器件尺寸小，为便于测试，将移相器粘贴到上表面镀金的陶瓷介质基板上，这也会引起阻抗匹配的变差，从而增加插入损耗。

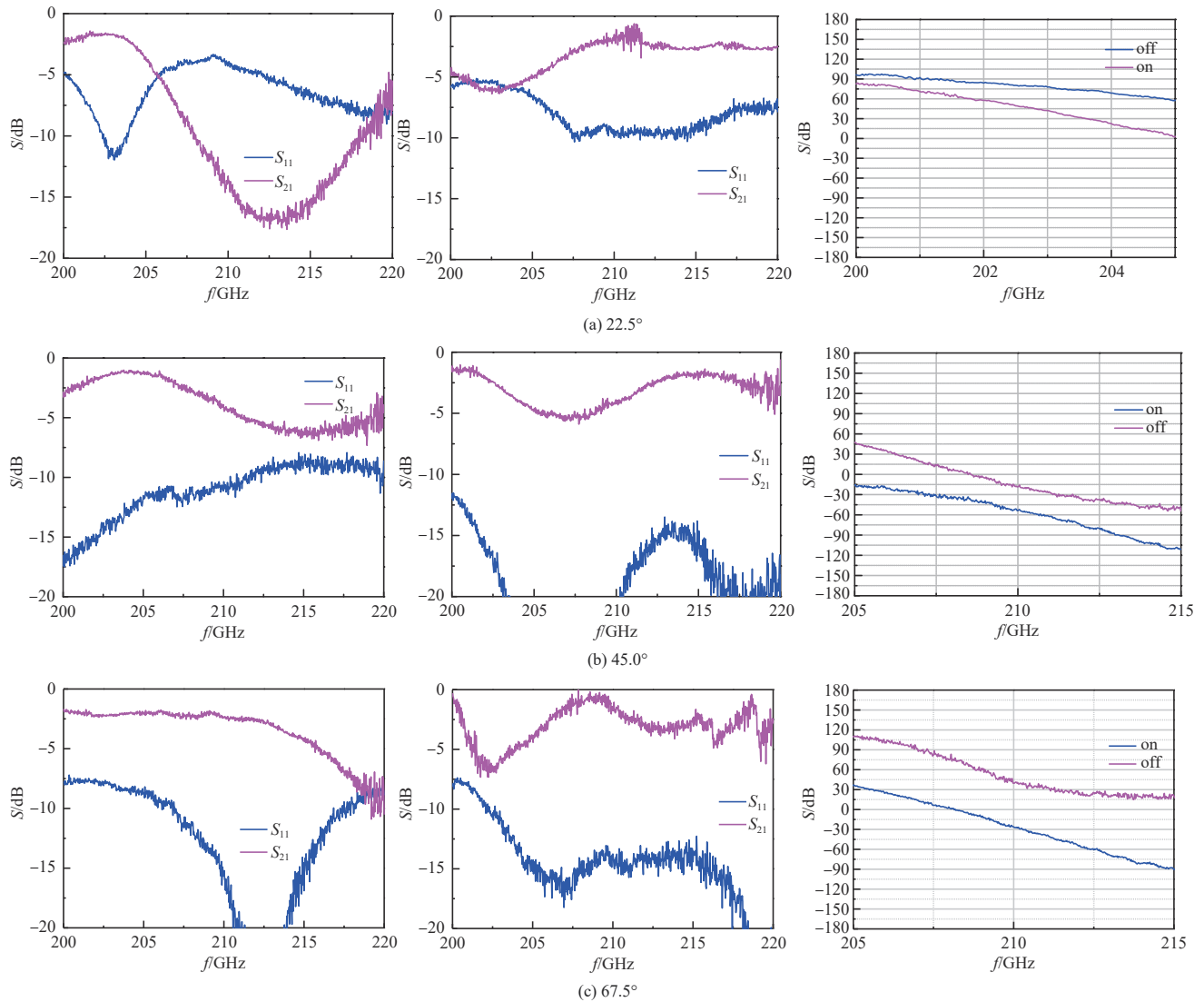


Fig.5 Measured results of phase shifters
图5 移相器测量结果

3 结论

本文提出了一种基于加载线型的平面数字太赫兹移相器。通过控制开关二极管的不同组合状态，分别实现了 22.5°、45° 和 67.5° 移相，在 190~210 GHz 频带范围内，导通和断开的反射系数都小于 -10 dB，插入损耗小于 0.5 dB，移相误差小于 5°。仿真和实测结果验证了方案的可行性。在以后的工作中，需多次迭代提取二极管的准确参数，减小仿真和测量误差，降低移相器损耗。

参考文献：

[1] PAN Yufei,ZHENG Shaoyong,CHAN W S,et al. Compact phase-reconfigurable couplers with wide tuning range[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020,68(2):681-692. doi:10.1109/TMTT.2019.2950001.
[2] REN Han,ZHOU Mi,GU Yixin,et al. A tunable transmission line with controllable phase shifting and characteristic impedance[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2020,67(10):1720-1724. doi:10.1109/TCSII.2019.2946307.

- [3] CHU H N, MA T G. An extended 4×4 butler matrix with enhanced beam controllability and widened spatial coverage[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(3):1301–1311. doi:10.1109/TMTT.2017.2772815.
- [4] DING Yan, WU Ke. Varactor-tuned substrate integrated waveguide phase shifter[C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Baltimore:IEEE, 2011:1–4. doi:10.1109/MWSYM.2011.5972725.
- [5] 张元生, 陈建荣. Ka 频段铁氧体双环移相器[J]. 空间电子技术, 2009,6(1):79–82. (ZHANG Yuansheng, CHEN Jianrong. A ferrite twin-toroid phase shifter in Ka band[J]. Space Electronic Technology, 2009,6(1):79–82.
- [6] LI Xiao, CHAN Y K, RAMER R. E-band RF MEMS differential reflection-type phase shifter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019,67(12):4700–4713.
- [7] CHEN P Y, ARGYROPOULOS C, ALU A. Terahertz antenna phase shifters using integrally-gated graphene transmission-lines[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(4):1528–1537. doi:10.1109/TAP.2012.2220327.
- [8] VARSHNEY A K, PATHAK N P, SIRCAR D. Beam steering THz antenna array using graphene-based phase shifter[C]// IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation. Hyderabad:IEEE, 2018:1–4. doi:10.1109/INCAP.2018.8770849.
- [9] REESE R, POLAT E, TESMER H, et al. Liquid crystal based dielectric waveguide phase shifters for phased arrays at W-band[J]. IEEE Access, 2019(7):127032–127041. doi:10.1109/ACCESS.2019.2939648.
- [10] SHI Zongjun, GUO Yujie, ZHOU Yihong, et al. A novel terahertz wave microstructure phase shifter loaded in rectangular waveguide[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan, Korea(South):IEEE, 2019:1–2. doi:10.1109/IVEC.2019.8744839.

作者简介:

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. email:wangcx504@163.com.

朱忠博(1980-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空间太赫兹通信技术.

李升(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹通信系统.

邵伟(1992-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹通信系统.

金生霄(1996-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹通信系统.

王虎(1986-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹技术.

段崇棣(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为天基雷达.