

一种基于优化参考阻抗的宽带紧凑四路功分器设计

孙启梦, 祝大龙, 宋大为
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 本文通过优化 T 型结功分器的参考阻抗、减少阻抗突变, 实现了大幅度展宽工作带宽的效果, 设计了一款中心频率为 15 GHz 的一分四 T 型结宽带功分器。该功分器结构主要由 T 型结和微带传输线组成, 尺寸为 25 mm×3.8 mm。仿真结果表明: 在不增加网络尺寸和复杂度的前提下, 相比传统四路功分器, 该设计将基于 20 dB 回波损耗的工作带宽展宽至 3.44 个倍频程 (6.5~24 GHz)。在工作频带内, 插入损耗小于 6.7 dB (含理论一分四 6 dB 损耗)。加工样机并进行测试后, 实测结果与仿真结果吻合良好。该功分器具有“窄长”的结构特征, 适合在移动通信基站、雷达等宽带一维阵列天线中使用, 具有良好的应用前景。

关键词: T 型结功分器; 馈电网络; 优化参考阻抗; 宽带阵列天线

中图分类号: TN715

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)04-0090-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250218001

CSTR: 32406.14.ycyk.20250218001

引用格式: 孙启梦, 祝大龙, 宋大为. 一种基于优化参考阻抗的宽带紧凑四路功分器设计[J]. 遥测遥控, 2025, 46(4): 90-95.

Design of A Broadband and Compact Four-Way Power Divider Based on Optimized Reference Impedance

SUN Qimeng, ZHU Dalong, SONG Dawei
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: By optimizing the reference impedance of the T-junction power divider and reducing the impedance mutation, the working bandwidth is significantly broadened. A one-to-four T-junction broadband power divider with a center frequency of 15 GHz is designed. Its structure is mainly composed of T-junctions and microstrip transmission lines, with a size of 25×3.8 mm². The simulation results show that, without increasing the network size and complexity, compared with the traditional four-way power divider, the working bandwidth defined by the 20 dB return loss is broadened to 3.44 octaves (6.5 ~ 24 GHz). Within the working frequency band, the insertion loss is less than 6.7 dB (including the theoretical 6 dB loss of one-to-four division). A prototype is fabricated and tested, and the measured results are in good agreement with the simulation results. This power divider features a “narrow and long” structure, making it suitable for use in broadband one-dimensional array antennas such as those in mobile communication base stations and radars, and it has a promising application prospect.

Keywords: T-junction power divider; Power supply network; Optimized reference impedance; Broadband array antenna

Citation: SUN Qimeng, ZHU Dalong, SONG Dawei. Design of A Broadband and Compact Four-Way Power Divider Based on Optimized Reference Impedance[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(4): 90-95.

0 引言

T 型结功分器作为阵列天线的馈电网络, 为阵列天线提供必要的馈电功能。它通常由功分器和传输线两部分组成, 按照特定的比例将微波信号进行功率分配^[1]。工程上, 功分器可采用多种工艺方式实现。其中微带功分器采用平面印刷电路板

工艺制成, 具有易设计、易制作、易集成的优点, 在通信、雷达等诸多领域中获得了十分广泛的应用^[2]。

随着阵列天线技术, 例如紧耦合天线^[3-4]和电磁耦合天线^[5]等向宽频带方向的发展, 人们对作为配套馈电所使用的宽带小型化功分器的需求也越来越迫切。传统微带 T 型结功分器往往通过增加电

路复杂性而实现宽带功率分配，最常见的方法是采用多节阻抗变化级联的方式^[6-10]，文献[11]采用这种方式并利用三段切比雪夫匹配法实现630%的相对带宽，这种方法所设计的节数越多，工作带宽就越宽，但在网络尺寸变大的同时，也不得不引入更多的插入损耗^[12-14]。为了尽可能地减少功分器尺寸，很多研究学者将多节阻抗变换器设计成文氏芦状^[15,16]或其他紧凑的形状和结构^[17-19]，这虽然减少了多节匹配带来的长度增加，但大量的弯折与垂直结构等无疑增加了硬件加工的复杂度，当工作频率较高时，这些复杂结构设计里的大量弯折也将带来无法预测的影响。所以目前采用多节阻抗变换方式的宽带功分器大多数的工作频率在15 GHz以下。除此之外，由于功分器与工作信号的电长度直接相关，通过设计多种电长度枝节可以实现功分器的多频特性，文献[20]便利用两阶阻抗变换器加载并联短路枝节替代四分之一波长变换器的方式，实现了0.95 GHz和2.2 GHz两个工作频点，虽然文献将工作频点设计得较为紧凑，但仍无法实现宽频特性。这种方式还由于引入多个枝节，也会不可避免地增加网络复杂度，对加工工艺要求较高。

针对以往微带功分器为实现宽带功率分配而不得不增加电路复杂性的问题，本文创新性通过研究优化一分四功分器每一T型结处的参考阻抗，在不增加网络尺寸和复杂度的前提下，最终实现

了在20 dB回波损耗以及6 dB插入损耗的同时，具有3.44个倍频程。本文结尾利用该结构，设计并加工测试了一个带宽17.5 GHz、中心频率15 GHz的一分四功分器，具有宽频带、低损耗、网络结构简单等优点。

1 工作原理

1.1 功分器结构与对比

为改善传统T型结功分器的窄带特性，以满足紧耦合阵列天线等基站天线的宽频带需求。本文设计了一款具有宽带特性的四路功分器，模型如图1(a)所示。它由两个T型结，两个 $\lambda/4$ 阻抗变换器以及各段传输线组成，该四路功分器的中心频率为 f 。图1(b)为传统四路功分器的结构图，对比之下，本文设计的功分器其参考阻抗设计从传统的 $50\ \Omega$ 改为 $35.35\ \Omega$ ，传输线 w_1 、 w_2 、 w_3 和 w_4 的阻抗变为 $59.45\ \Omega$ ，长度为所对应波长的一半， $\lambda/4$ 阻抗变换器的阻抗从传统的 $50\ \Omega$ 变为 $42\ \Omega$ 。本文设计的四路功分器与传统四路功分器在HFSS仿真软件中的理想电路仿真结果如图1(c)所示，对比发现，在并未增加尺寸和结构复杂度的情况下，本文四路功分器通过设定优化参考阻抗的方法，将20 dB回波损耗定义下的工作带宽展宽至1.13 f，对比传统四路功分器的0.13 f工作带宽，展宽幅度约为原来的8.6倍。实现了功分器的宽带特性。

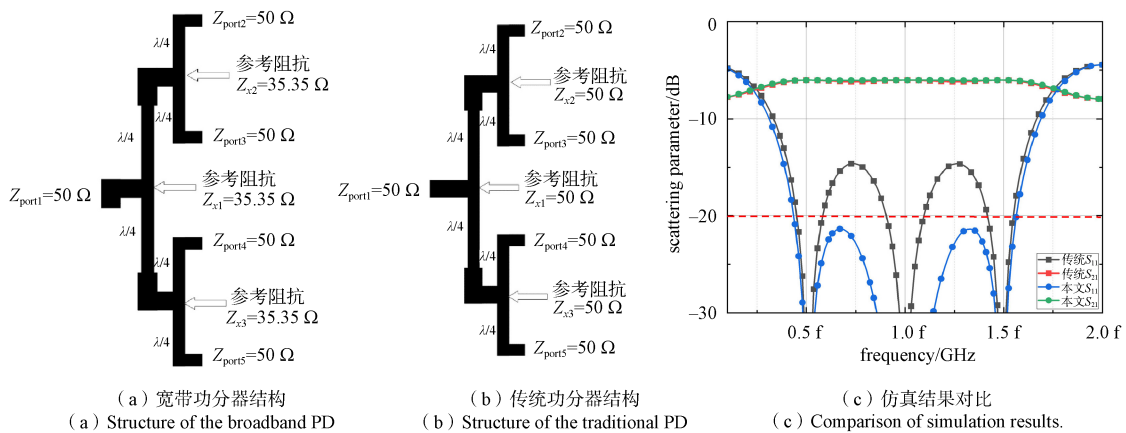


图1 基于优化参考阻抗的宽带功分器与传统功分器结构与二者的仿真结果对比

Fig. 1 Comparison of the structures and simulation results between the broadband PD based on optimized reference impedance and the traditional PD

1.2 优化参考阻抗设计原理

一段由于具有特定阻抗 Z_w 的传输线可以通过公式(1)，可以将负载阻抗 Z_L 变换到和输入端口 Z_0

一样的输入阻抗 Z_{in} 以满足阻抗匹配的要求，所以 $\lambda/4$ 阻抗变换器在传统功分器中尤为重要。

$$Z_w = \sqrt{Z_L \times Z_0} \quad (1)$$

传统功分器利用 $\lambda/4$ 阻抗变换器可以在 $\lambda n/4$ ($n=1, 2, 3, \dots$)所对应的频点处实现完全阻抗匹配,但在其他地方仍处于失配状态,这也是造成传统功分器具有窄带特性的原因。对于一段传输线,规定在满足反射系数 Γ 以下的频带宽度为 Δw ,则相对带宽 FBW 满足公式(2):

$$W_{FBW} = 2 - \frac{4}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\Gamma}{\sqrt{1-\Gamma^2}} \times \frac{2\sqrt{Z_L \times Z_0}}{|Z_L - Z_0|} \right] = \frac{\Delta w}{f_c} \quad (2)$$

其中, f_c 为中心频率。由公式(2)可以看出,当阻抗变换数值差越小时,所对应在反射系数 Γ 以下的频带宽度越宽,在图2的HFSS仿真软件上给出的结果也可以看出,对 50Ω 负载而言,经微带阻抗变换器变换至 60Ω 比变换至 70.7Ω 和 100Ω 所展现的带宽更宽,理论上可以将每一次的阻抗变换缩小到无穷小,以此实现无穷大的带宽,但这样所产生用于匹配的巨大枝节长度现实中是无法承受的,而之前学者采用有限个多节匹配的方法展宽带宽也不得不增加了功分器的尺寸。通过公式(2)可知,存在一 Z_{wm} ,由 Z_{x1} 变换至 Z_{wm} 的阻抗变换器和由 Z_{x2} 变换至 Z_{wm} 的阻抗变换器满足所获得的工作带宽 Δw_1 和 Δw_2 相同。

$$\kappa = \frac{Z_{wm}}{Z_{x1}} = \frac{Z_{x2}}{Z_{wm}} \quad (3)$$

利用该结论,将 50Ω 和 100Ω 代入公式(3)的 Z_{x1} 和 Z_{x2} 中可以获得优化参考阻抗 Z_x 为 70.7Ω ,这样既缩小了每次的阻抗变换数值,又令两个频带宽度 Δw 互不影响限制。而在功分器中,存在许多不同宽度的传输线,利用优化参考阻抗更改这些传输线的阻抗大小,可以缩小各段传输线连接处

的阻抗突变,这为功分器展宽带宽提供了可能。

1.3 宽带功分器设计方法

本文首先利用一工作中心频率为 1 GHz 的一分二功分器作为理论验证。设计的理想电路结构如图3(a)所示,其中传输线 w_1 和 w_2 的阻抗分别为 70.7Ω 和 50Ω ,介质板采用R5880,传输线 w_1 、 w_2 的宽度分别为 0.6 mm 和 1 mm 。长度分别为 4 mm 和 2.8 mm 。仿真软件结果如图3(b)所示,回波损耗在 20 dB 以上的工作带宽为 0.74 GHz ,对比前文提到的传统一分二功分器仿真结果而言,工作带宽展宽 2.3 倍,而插入损耗为理论值 3 dB ,相位平衡和器件尺寸与传统一分二功分器相同,证明使用该优化参考阻抗的设计方法可以很好地展宽功分器的工作带宽。

对于传统一分四功分器,在两个一分二功分器间存在的一个 $\lambda/4$ 阻抗变换器可看作是以往多阶阻抗匹配的一部分,这为本文提出的优化参考阻抗法提供了设计空间。如图4(a)所示是在HFSS仿真软件中设计的T型结一分四宽带功分器结构。利用优化参考阻抗和公式(1)计算得知,传输线 w_1 和 w_2 的阻抗为 59.45Ω ,传输线 w_3 和 w_4 的阻抗为 42Ω 。介质板采用R5880, w_1 、 w_2 、 w_3 和 w_4 传输线宽度分别为 0.39 mm , 0.19 mm , 0.284 mm , 0.136 mm ,长度分别为 3.41 mm , 3.5 mm , 2.85 mm , 2.94 mm 和 1.2 mm 。该一分四功分器网络的仿真结果见图4(b),结果表明该功分器在 20 dB 回波损耗以上的理想工作带宽为 1.13 GHz ,对比传统理想功分器的带宽,展宽幅度约为 8.6 倍。实现了功分器的宽带特性。

2 一种宽带四路功分器设计实例

基于优化参考阻抗设计方法,本文设计了一款中心频率为 15 GHz 四路功分器,并使用HFSS仿真软件进行仿真测试,仿真模型如图5(a)所示。板材采用R5880介质板,板厚 0.127 mm ,介电常数为 2.2 ,损耗正切为 0.002 ,整体尺寸为 $25 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm} \times 0.127 \text{ mm}$,呈现出“窄长”的形状。微带线金属厚 $17 \mu\text{m}$,微带线 w_1 和 w_2 的宽度为 0.27 mm ,长度为 3.7 mm 。微带线 w_3 和 w_4 的宽度为 0.47 mm ,长度为 3.55 mm ,模型中port1为信号输入端口, port2 ~ port5为信号的输出端口。为减少拐角分布参数的影响,传输线的拐角处都做了切角设计。

图5(b)给出了该功分器的仿真曲线,结果表明

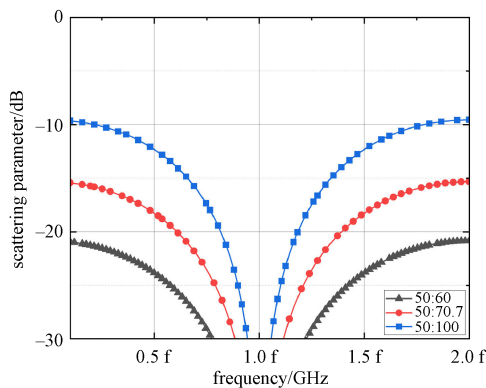


图2 50Ω 负载变换至 60Ω 、 70.7Ω 和 100Ω 的 S 参数仿真结果

Fig. 2 The simulation results of S_{11} , S_{22} and S_{33} for transforming a 50Ω load to 60Ω , 70.7Ω and 100Ω

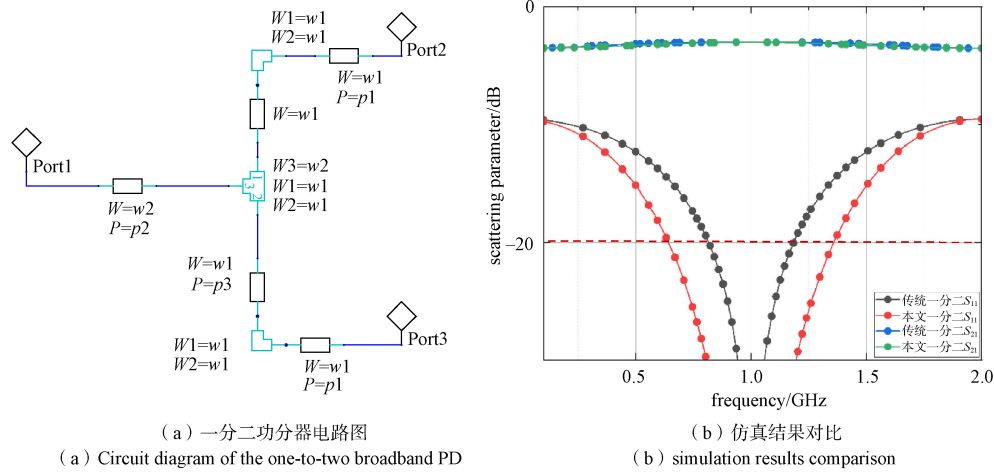


图 3 基于优化参考阻抗的一分二宽带功分器电路图及与传统功分网络仿真结果对比

Fig. 3 Circuit diagram of a one-to-two broadband PD based on the optimal reference impedance and simulation results of traditional power distribution network comparison

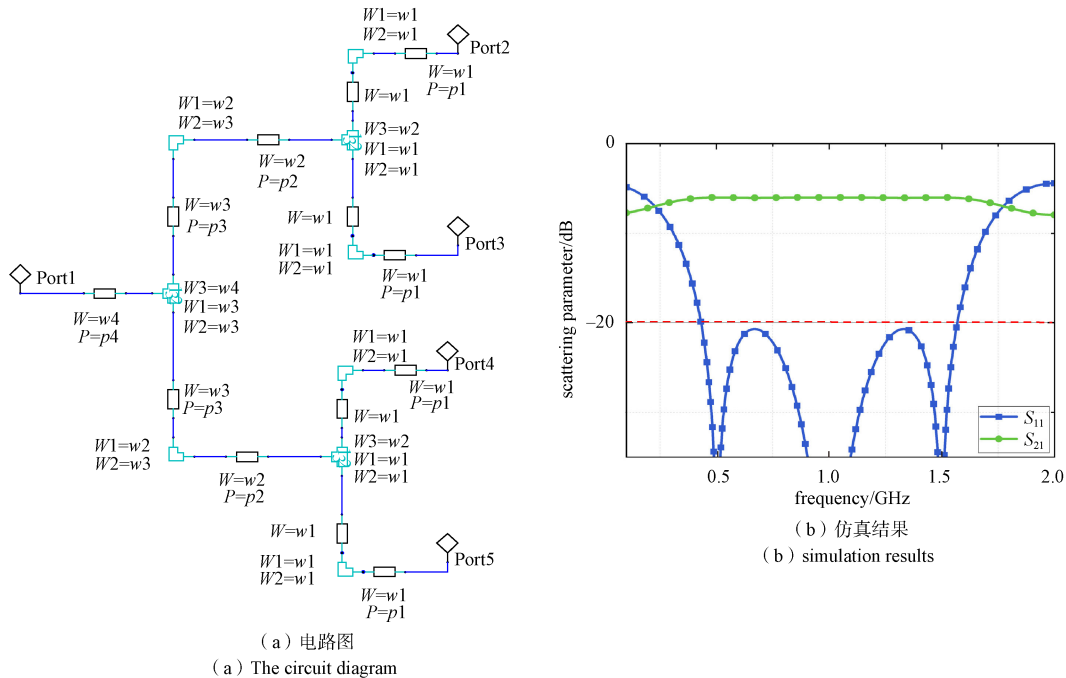


图 4 基于优化参考阻抗的宽带功分器电路图和仿真结果

Fig. 4 Circuit diagram of the PD based on the optimal reference impedance and simulation results

该功分器中心频率为 15 GHz，在 6.5~4 GHz 频段内，回波损耗优于 20 dB(电压驻波比 1.2:1)，传输损耗优于 6.7 dB。

基于上述仿真设计，加工了宽带功分器样机并进行了测试，样机实物如图 6(a)所示。鉴于功分器的工作频率高、尺寸小，且为微带线结构，对测试仪器精度要求也较高，直接测量十分困难。测量时设计并使用了测量支具，同时采用了“直

通-反射-延时” (TRL)校准和去嵌入技术进行测试，延时线的电长度约为中心频率的四分之一波长，测试结果如图 6(b)、图 6(c)所示，其中标记线为仿真结果，实线为测试结果，测试结果整体与仿真结果吻合良好。经分析图中的端口幅度和相位波动，主要是由测试装置引起的。该功分器实现了设计的宽带特性，且相位基本平衡，验证了设计方法的有效性。

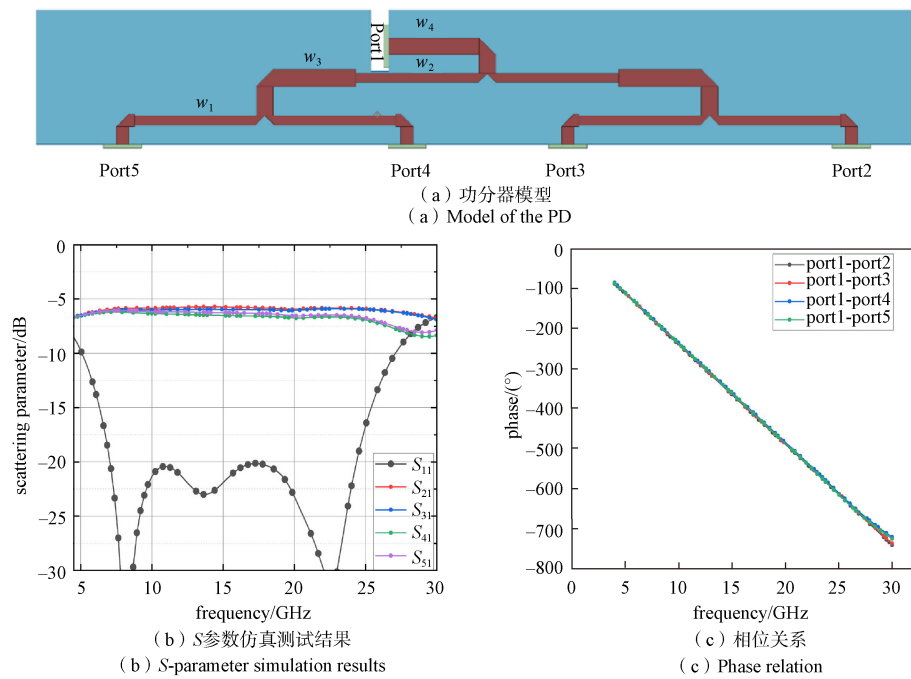


图 5 基于优化参考阻抗的宽带功分器模型和仿真测试结果

Fig. 5 Model of the broadband PD based on the optimal reference impedance and simulation results

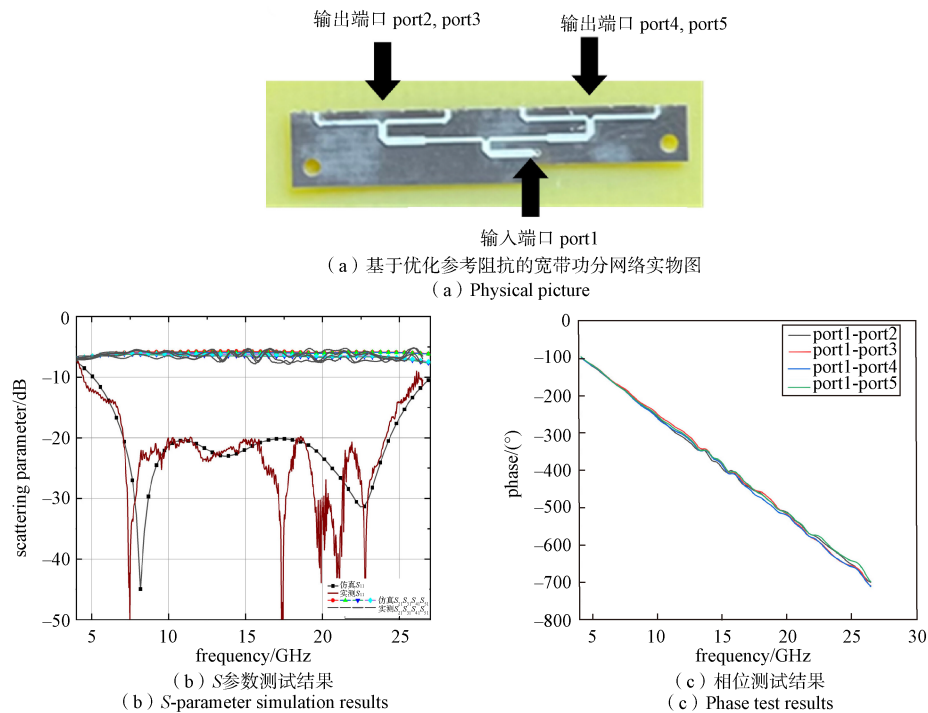


图 6 基于优化参考阻抗的宽带功分网络实物图及测试结果

Fig. 6 Physical picture of the broadband PD based on the optimal reference impedance and test results

3 结束语

本文研究了一种基于优化参考阻抗的T型结宽带功分器设计，在不增加尺寸和模型复杂度的情况

下，将馈电网络的工作带宽进行展宽至3.44倍频程，并在带宽内获得了优于20 dB的回波损耗性能。该功分器具有良好的输出端口相位、幅度平衡特性，能够满足等幅同相的一维阵列天线馈电使用。

对多阶宽带功分器而言,若要实现相同三倍频程带宽,通常需要两个三阶阻抗变换器,这比本文设计的功分器每一支路多出2个阻抗变换器。因此,本文设计的T型结宽带功分器总长度约为之前的二分之一波长。

本文设计的T型结功分器具有宽带和小型化的特点,可用作基站天线、雷达天线等宽频带阵列天线馈电使用,在无线通信和雷达领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 谷玲娜. 宽带功分器设计与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [2] 李希, 李佳霖, 刘阳, 等. 70MHz-800MHz低频超宽带微带一分四功分器的设计[J]. 机电元件, 2023, 43(6): 14-17.
- [3] 朱岑鑫, 段铸. 三端口宽带极化可重构紧耦合天线阵列[J]. 固体电子学研究进展, 2023, 43(3): 247-252.
- [4] LOGAN J T, KINDT R W, VOUVAKIS M N. A 1.2-12 GHz sliced notch antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1818-1826.
- [5] SHANG F, YAN X, FU Z. A broadband electromagnetic dipole antenna with microstrip line gap coupling feeding [C]//2023 IEEE 11th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. New York: IEEE, 2023: 1-2.
- [6] MISHRA B, RAHMAN A, SHAW S, et al. Design of an ultra-wideband Wilkinson power divider[C]// 2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems. New York: IEEE, 2014: 1-4.
- [7] HAKIM N F A, SARTIKA N, AL QIBTIYA M, et al. Analysis of UWB wilkinson power divider design using 4-Stepped patch and ring structure[C]//2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications. New York: IEEE, 2022: 1-4.
- [8] IQBAL M, CAMARCHIA V, PIROLA M, et al. A miniaturized wilkinson power divider for ultra wide-band operation[C]//2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications. New York: IEEE, 2016: 1-4.
- [9] YANG L, CHU Q. Design of a compact UWB Wilkinson power divider[C]//2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. New York: IEEE, 2008: 360-362.
- [10] WEI J, LING T, SUN L. An ultra-wideband compact 1 to 8 wilkinson power divider[C]//2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. New York: IEEE, 2023: 1-3.
- [11] LI S K, GUO P, YI D, et al. Ultra-wideband 3-Way equal-power divider based on multi-section chebyshev matching method[C]//2021 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications. New York: IEEE, 2021: 320-322.
- [12] 邵辉凡, 宗志园, 吴文. 一种宽带小型化低插损微带十六路功分器的设计[C]// 2024年全国微波毫米波会议论文汇编(下册). 北京: 中国电子学会, 2024: 3.
- [13] YU T. A broadband wilkinson power divider based on the segmented structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018, 66(4): 1902-1911.
- [14] SHI J, SONG C, HE Y. Compact ultra-wideband 2-way Wilkinson power dividers at Ka/Ku bands[C]//2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. New York: IEEE, 2024: 1-3.
- [15] LI X, WU B, KONG M, et al. A broadband stripline Wilkinson 2-way power divider[C]//2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. New York: IEEE, 2022: 1-3.
- [16] 郝艺益, 李业振, 张卫彬, 等. 一种新型宽带一分四功分器设计[C]//2023年全国微波毫米波会议论文汇编(二). 北京: 中国电子学会, 2023: 4.
- [17] 郭雪影, 叶建, 赵鹏. 小型化宽带功分器设计[C]//2023年全国天线年会论文集(中). 北京: 中国电子学会, 2023: 3.
- [18] JING Z, JINYANG L, HONGBO Y. Design and realization of an ultra broadband power divider for electronic radar countermeasure system[C]//2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. New York: IEEE, 2020: 1-3.
- [19] LIU L, CHEN L F, WANG Z B, et al. A broadband power divider based on vertically installed planar circuit structure[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2022, 32(2): 109-112.
- [20] 徐炆丙. 多频微带功率分配器的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

[作者简介]

- 孙启梦 2000年生, 硕士研究生。
 祝大龙 1980年生, 博士, 研究员。
 宋大为 1979年生, 硕士, 研究员。

(本文编辑: 潘三英)