

# 基于矩形开口谐振环的低频天线阻抗变换器

唐 尧, 曹祥玉, 高 军

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

**摘要** 设计了一种低频波段使用的新型阻抗变换器,该阻抗变换器在 0.1~3 GHz 频率范围内实现由输入 150  $\Omega$  到输出 50  $\Omega$  的阻抗匹配。矩形开口环结构具有良好的谐振特性,通过在阻抗变换器底部开矩形开口环的方法实现单一频点的陷波特性的。新型阻抗变换器其原理是基于巴伦阻抗变换器的阻抗转换特性和矩形开口环结构的谐振特性,仿真结果显示新型阻抗变换器在 1.1 GHz 频点与 2.2 GHz 频点的  $S_{12}$  参数均在一 15 dBi 以下, $S_{11}$  参数均在一 0.5 dBi 以上。经过仿真验证,随着矩形开口环结构长度与位置的变化,可以实现陷波频点在 0.1~3 GHz 频率范围内自主调控。文中采用 HFSS 软件进行仿真优化,绘出  $S$  参数图,实物测试结果验证了设计结构的有效性。陷波阻抗变换器作为天线匹配终端,在射频信号采集、超宽带天线及阵列阻抗匹配等领域有很好的军事应用前景。

**关键词** 阻抗变换器;矩形开口环;陷波特性的;低频

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.01.014

**中图分类号** TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)01-0084-06

## A Band-Notch Impedance Transformer Based on Split Rectangular Loop in Low Frequency

TANG Yao, CAO Xiangyu, GAO Jun

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** This paper designs a novel impedance transformer used for low frequency, performing 150  $\Omega$  at the input to 50  $\Omega$  at the output within the range of 0.1 GHz to 3 GHz. The novel impedance transformer is characterized by band-notch function through loading the technology of curving split rectangular loop with good resonance. The principle is based on the impedance transmission characteristics of Balun impedance transformer and the resonance characteristics of split rectangular loop. The results indicate that the  $S_{12}$  parameters are below minus 15 dBi and the  $S_{11}$  parameters are above minus 0.5 dBi. And the band-notch frequency point can be controlled by changing the length and location of the split rectangular loop. The HFSS software is utilized for modeling and optimizing parameters. The results of  $S$  parameters and fabricated sample measurements indicate that the design is reasonable. Taking band-notch impedance transformer as the antennas matching terminal, there is a good prospect in application in the fields of radiation frequency harvest and the matching of extremely wideband antenna arrays.

**Key words:** impedance transformer; split rectangular loop; band-notch function; low frequency

**收稿日期:** 2017-12-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(61271100;61471389;61501494;61671464)

**作者简介:** 唐 尧(1986—),男,山东淄博人,硕士生,主要从事高增益端射天线设计、电磁超材料等研究。E-mail:dongfang2222002@163.com

**引用格式:** 唐尧,曹祥玉,高军.基于矩形开口谐振环的低频天线阻抗变换器[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(1):84-89.  
TANG Yao, CAO Xiangyu, GAO Jun. A Band-Notch Impedance Transformer Based on Split Rectangular Loop in Low Frequency[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 84-89.

1826 年欧姆发现了电压与电流的关系式  $R = V/I$ , 因而提出了阻抗 (Impedance) 的概念, 随着理论发展到传输线阻抗概念和自由空间场中的波阻抗, 从馈线到传输线, 再到自由空间中场之间能量的传输效率, 分析传输线理论的关键还是阻抗变换问题。阻抗变换器是一种常用的双端口元件, 通过插入阻抗变换器可以消除因负载和传输线特性阻抗不匹配而产生的反射。理论上说, 一段  $1/4$  波长的均匀传输线就可以实现阻抗变换的功能, 但天线的输入阻抗与天线的几何形状尺寸、馈电点位置、工作波长及周围的环境因素都息息相关, 研究天线阻抗的最大意义就是为了实现天线和馈线之间的最优匹配, 即天线的阻抗等于馈线的阻抗<sup>[1]</sup>。在传输线原理中, 当天线与馈线匹配最佳时, 发射机发射功率达到最大, 馈线上不会出现反射现象, 能量没有损失, 能量全部加载到天线端辐射出去, 保证了天线的辐射效率。天线的匹配效率低, 馈线上的损耗就会增大, 发射功率就会减小, 从而就会影响天线的辐射性能。

克洛普芬斯坦渐变阻抗变换器<sup>[2]</sup>是由 R. W Klopfenstein 在 1956 年提出, 这种阻抗变换器具有更好的带内匹配特性, 其特点是在其两端都具有阻抗不连续性, 特别是带内反射系数较大的条件限制下。近年来, 设计的阻抗变换器通过加载电器元件方法<sup>[3-7]</sup>来实现低频段内双频带的陷波特特性, 但其不足是该双频带的陷波点对于单一频点的选择不够精确, 覆盖频点过多容易产生谐振与干扰; 改变传输线如 T 型<sup>[8]</sup>、 $\pi$  型<sup>[9]</sup>、P 型<sup>[10]</sup>等不同结构<sup>[11-12]</sup>来获得陷波特性的方法过于复杂, 制造加工不便。双频带及多频带的阻抗变换器<sup>[13-18]</sup>频带较窄, 而且陷波点通常为高频点与低频点同时出现, 不能满足选取单一频点的要求。切比雪夫阻抗变化器<sup>[19]</sup>提出传输线结构的渐变特性符合设计理念, 但是阻抗匹配需要的计算量级过大, 各个结构需要单独计算尺寸。本文设计的阻抗变换器, 其原理是基于超宽带阻抗变换器<sup>[20]</sup>, 与其他设计方案相比本设计优势是在  $0.5 \sim 3$  GHz 的频带范围实现低频阻抗匹配, 通过引入矩形开口谐振环结构, 实现单一频点陷波特特性, 而且加工制造简单、计算量较小。创新点在于低频段匹配和任意频点的可调控陷波特特性, 该设计可以解决天线与天线阵列在低频段内阻抗匹配的问题。未来带有陷波特性的低频超宽带天线、射频信号采集器是天线发展与研究的

热点。

## 1 理论分析

微波工程在一定意义上讲就是微波网络匹配技术, 如式(1)所示, 若匹配端阻抗满足  $Z_l = Z_{in}$  即负载阻抗等于输入阻抗, 则电源功率  $P_l$  达到最大值。

$$P_l = P_{\max} = \frac{|E_g|^2}{8\text{Re}(Z_g)} \quad (1)$$

如果负载阻抗与输入阻抗不匹配, 则在电源和负载间加入一个无损耗匹配网络<sup>[8-9]</sup>, 如图 1 所示。

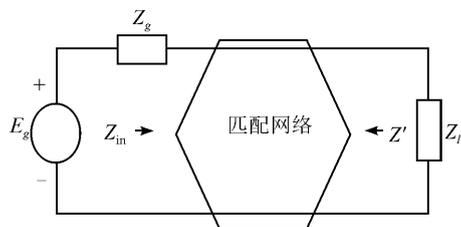


图 1 匹配网络

匹配网络的作用是获得系统匹配, 将电源产生的最大功率传输到负载端, 匹配网络本身不消耗功率。当阻抗匹配时, 有  $Z_{in} = Z_g^*$ , 则必有  $Z'_l = Z_l^*$ , 以上原理是阻抗匹配的核心原则<sup>[21-22]</sup>。

克洛普芬斯坦阻抗变换器的上下 2 个表面采用的是 2 条  $K$  渐近线<sup>[2]</sup>, 通过这种指数渐变结构来实现阻抗从不平衡到平衡的匹配, 选取该阻抗变换器的优点是其具有更好的带内阻抗匹配特性。阻抗变量  $Z$  和长度变量  $L$  关系可从式(2)中得出, 其中  $A$  为与传输边界条件有关的常数,  $Z_0$  与  $Z_l$  为电路的匹配阻抗,  $\Gamma_0$  为零频率时的反射系数,  $I_1(x)$  函数是贝塞尔函数。

$$\ln Z(z) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_l) + \frac{\Gamma_0}{\cosh A} A^2 \phi\left(\frac{2z}{L} - 1, A\right), 0 \leq z \leq L \quad (2)$$

$$\phi(x, A) = -\phi(-x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A \sqrt{1-y^2})}{A \sqrt{1-y^2}} dy, |x| \leq 1$$

对于渐变线传输理论, 利用小反射理论可知总的反射系数为所有带内适当相移的局部反射之和, 通过讨论其大小可以得到反射系数的最大值。

$$\Gamma(\theta) = \Gamma_0 e^{-j\theta L} \frac{\cos \sqrt{(\beta L)^2 - A^2}}{\cosh A}, \beta L \geq A \quad (3)$$

$$\Gamma(\theta) = \Gamma_0 e^{-j\beta L} \frac{\cos \sqrt{A^2 - (\beta L)^2}}{\cosh A}, \beta L < A \quad (4)$$

$\beta L < A$  时最大的反射系数公式变换为式(5):

$$\Gamma_m = \Gamma_0 = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \approx \frac{1}{2} \ln\left(\frac{Z_l}{Z_0}\right) \quad (5)$$

$\beta L \geq A$  时再通过计算式(2)可以算出最大的频

带宽度公式如下:

$$\Gamma_m = \Gamma_0 / \cosh A \quad (6)$$

## 2 仿真模型建立与分析

使用 MATLAB 软件通过公式计算得到反射系数与阻抗变量、长度变量对应的参数数值,利用 HFSS 软件建立结构模型,如图 2 所示。

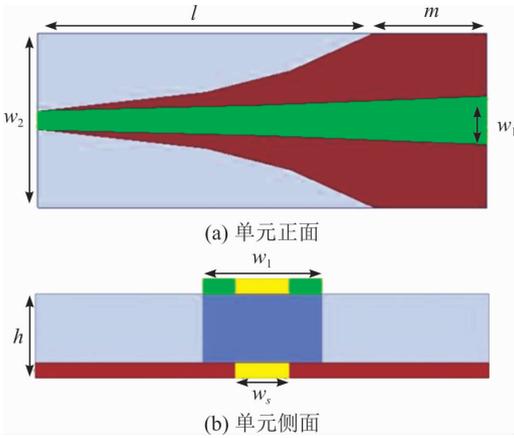


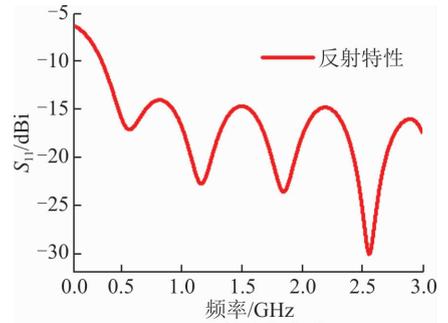
图 2 单元结构

阻抗变换器单元由上下表面和介质层组成,介质介电常数为 4.4,上下表面渐变线结构为金属覆层。上表面为克洛普芬斯坦渐变线结构,下表面由克洛普芬斯坦渐变线结构和缓冲结构组成,渐变线后面部分的缓冲区其作用是对阻抗的变化起到保护和缓冲,防止出现 S 参数的跳变。通过软件优化单元参数可以实现在低频 0.1~3 GHz 的频带内将输入不平衡的 150  $\Omega$  输入转换为平衡的 50  $\Omega$  输出。优化后参数如表 1 所示,其中  $l$  表示下表面渐变线长度, $m$  表示缓冲区长度, $W_1$  表示输入端宽度, $h$  表示厚度, $W_2$  表示阻抗变换器宽度, $W_s$  表示输出端宽度。

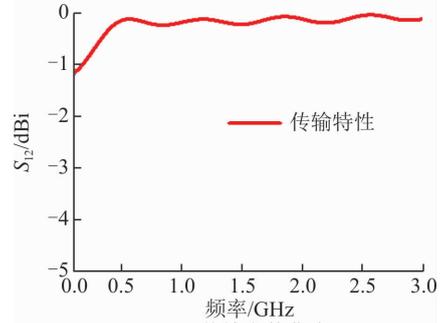
表 1 模型优化参数

参数	$l$	$m$	$W_1$	$h$	$W_2$	$W_s$
数值/mm	82	30	3.5	3	16.66	1.698

在 HFSS 中建模后分析单元结构的反射特性和传输特性,图 3(a)为反射参数曲线,图中可以看到反射曲线在 0.1~3 GHz 的频段内均能够保持在 -15 dBi 以下,保证大部分能量通过传输端口进入阻抗变换器。传输参数曲线如图 3(b)所示,可以看出匹配转换器的传输特性保持在 -0.2 dBi 左右,说明大部分能量都可以通过阻抗变换器加到天线端,损耗能量等同于 0 dBi,可以忽略不计,以上数据显示从仿真角度阻抗变换器能够实现阻抗转换的目的。



(a) 反射参数曲线



(b) 传输参数曲线

图 3 S 参数曲线

## 3 矩形开口环结构

T. Huynh 与 K. F. Lee 提出了一种采用空气介质的单层、单辐射贴片矩形开口环结构,该结构设计简单并可以取得较宽的阻抗带宽,在单一频点能够产生谐振反应。通过该结构的启发,本文在克洛普芬斯坦渐变线结构上引入矩形开口环结构的开槽设计并对其进行优化,将该结构端口改为 C 型,该开槽结构可以通过其谐振特性来获得单一频点陷波特特性,其结构见图 4。

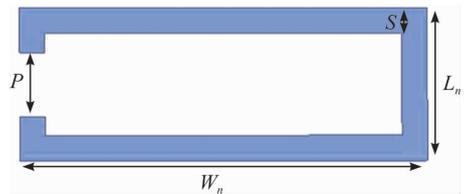


图 4 矩形开口环结构

通过 HFSS 软件优化看到开槽的位置变化会影响单一频点的分布,因此可以实现在 0.1~3 GHz 范围内的单一频点进行理想化的调控。如图 5 所示的 C 型开口环电流图分析,在克洛普芬斯坦阻抗变换器的下表面开的 C 型开口环结构能够产生电谐振,其周边产生了同上表面结构反向的谐振电流。C 型开口环的尺寸变化能够增加电流的流动路径,从而形成不同频率上可调控的谐振点,新的谐振点便实现了在单一频点上陷波带阻特性。

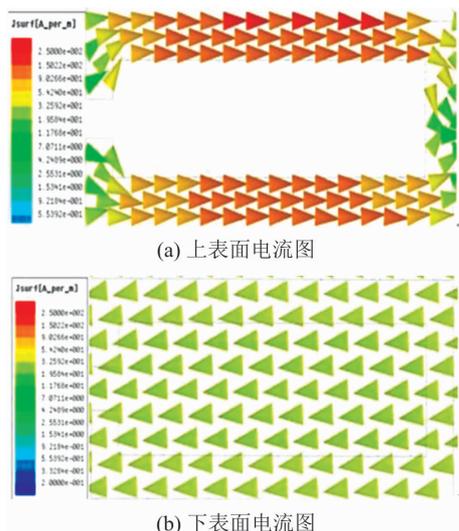


图 5 表面电流图

为验证上述理论的准确性,利用 HFSS 软件仿真,选取不同的长度值的 C 型开口环分别为 40 mm, 25 mm, 20 mm, 15 mm, 观察其传输曲线特性。由图 6 可知谐振点开始由 2.7 GHz, 2.4 GHz, 1.7 GHz, 1.2 GHz 逐渐向高频移动变化,可以分析出 C 型开口环长度减少,频点逐渐开始向低频移动。仿真结果证实 C 型开口环的长度变化能够增加电流流动的路径,因此该结构利用长度变化产生可控的陷波是符合理论分析的。

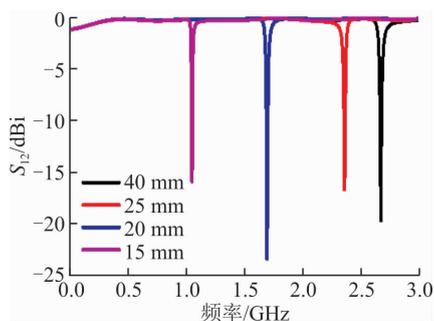


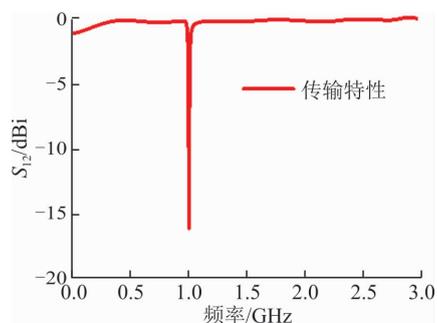
图 6 长度变化传输参数曲线

为进一步验证阻抗变化器的性能特性,选取 1.1 GHz, 2.2 GHz 2 个频点进行单一频点的传输特性与反射特性对比分析,验证理论的实际应用。

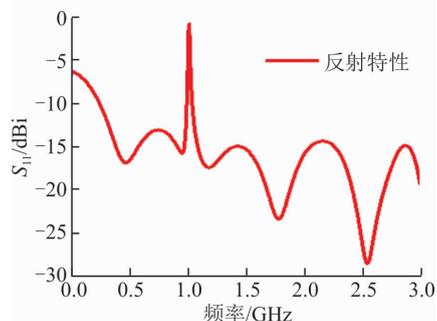
如图 7 所示,在 1.1 GHz 频点处传输曲线能够被限制到  $-17$  dBi 以下,反射参数曲线中传输能量在 1.1 GHz 处达到  $-0.5$  dBi,其余频点均在  $-15$  dBi 以下,这保证了单一频点的陷波特性。

图 8 中传输参数曲线显示在 2.2 GHz 处达到  $-23$  dBi,反射参数曲线显示在 2.2 GHz 处达到  $-0.2$  dBi,其余频点均在  $-15$  dBi 以下,这保证了单一频点的陷波特性。通过以上 2 个频点分析,调整 C 型开口环的长度,可以获得在频段内任一频点的陷波特性,后面将通过实物加工进一步验证该设

计的有效性。

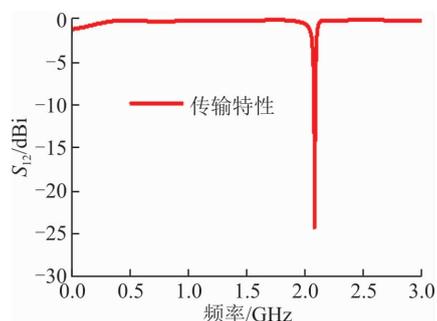


(a) 1.1 GHz 传输参数曲线

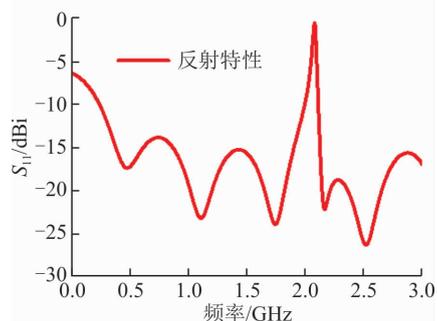


(b) 1.1 GHz 反射参数曲线

图 7 1.1 GHz 频点 S 参数曲线



(a) 2.2 GHz 传输参数曲线



(b) 2.2 GHz 反射参数曲线

图 8 2.2 GHz 频点 S 参数曲线

## 4 实物加工和实测

加工实物如图 9 所示,测试该结构其传输特性与两端口的反射特性,S 参数如图 10 所示。

从图中可以看到实物测量在陷波特性幅度上有所下降,下降幅度在  $3\sim 4$  dBi,但是能实现单一频点的调控特性,考虑到因加工工艺、焊接工艺、测试误

差等问题, 1.1 GHz 处频点偏移至 1 GHz, 2.2 GHz 处频点偏移至 2.5 GHz, 传输特性曲线在陷波处均在 -10 dB 以下, 符合设计要求, 有效验证了理论分析与仿真的真实性。

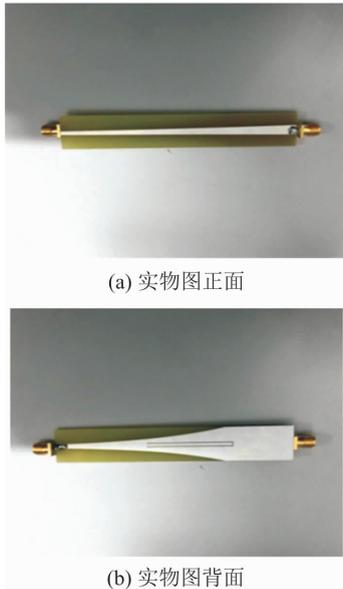


图 9 实物图

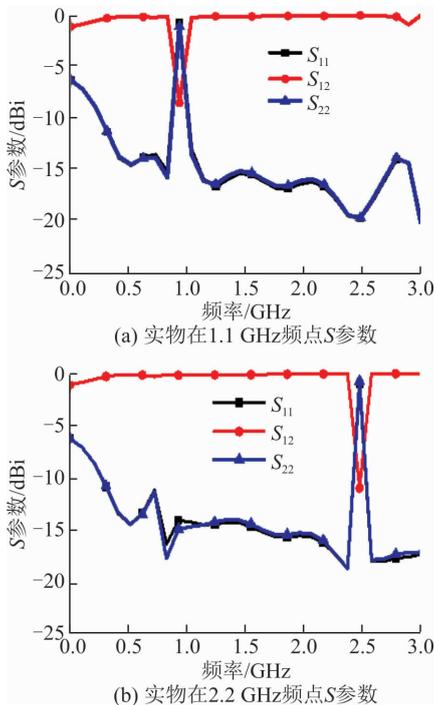


图 10 实物测试结果

## 5 结语

本文设计了一个低频陷波的阻抗变换器, 通过引入矩形开口谐振环结构, 获得单一频点的陷波特性, 测试结果显示在 0.1~3 GHz 频段内传输特性曲线保持在 0 dB 左右, 陷波点阻隔在 -10 dB 以下, 经过仿真验证改变矩形开口谐振环的长度和位

置可以获得需要频点的陷波特性, 从而实现可的陷波的可调控性。目前大部分阻抗转换器因尺寸和实际使用效果不佳等原因在低频段的研究比较少, 本文设计的阻抗变换器对于低频范围内频带选择类型的天线、射频信号采集器等具有很重要的军事意义, 未来对于需要带有陷波特性的低频超宽带天线、射频信号采集器具有一定应用前景。

## 参考文献(References):

- [1] 吴万春, 梁昌洪. 微波网络及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.  
WU W C, LIANG C H. Microwave Network and Its Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [2] KLOPFENSTEIN R W A. A Transmission Line Taper of Improved Design [J]. Proceedings of the IEEE, 1956, 44:31-35.
- [3] MONZON C. A Small Dual-Frequency Transformer in Two Sections [J]. IEEE Transactions Microwave Theory Technology, 2003, 51:1157-1161.
- [4] MOON B T, MYUNG N H. A Dual-Band Impedance Transforming Technique with Lumped Elements for Frequency-Dependent Complex Loads [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 136:123-139.
- [5] WU Y, LIU Y, LI S. A Dual-Frequency Transformer for Complex Impedances with Two Unequal Sections [J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2009, 19:77-79.
- [6] WU Y, SUN W. A Novel Compact Dual-Frequency Coupled-Line Transformer with Simple Analytical Design Equations for Frequency-Dependent Complex Load Impedance [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 134:47-62.
- [7] LIU X. A Three-Section Dual-Band Transformer for Frequency-Dependent Complex Load Impedance [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19:611-613.
- [8] NIKRAVAN M, ATLASBAF Z. T-Section Dual-Band Impedance Transformer for Frequency-Dependent Complex Impedance Loads [J]. Electronics Letters, 2011, 47:551-553.
- [9] MANOOCHEHRI O.  $\pi$  Model Dual-Band Impedance Transformer for Unequal Complex Impedance Loads [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25:238-240.
- [10] ZHENG X, LIU Y. A Dual-Band Impedance Transformer Using Pi-Section Structure for Frequency-Dependent Complex Loads [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 32:11-26.
- [11] WU Y, LIU Y, LI S. A Generalized Dual-Frequency

- Transformer for Two Arbitrary Complex Frequency-Dependent Impedances [J]. *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, 2009, 19:792-794.
- [12] CHOI H, LIM J. A New Design of Doherty Amplifiers Using Defected Ground Structure [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16: 687-689.
- [13] NGUYEN H, ANG K. Design of Coupled Three-Line Impedance Transformers [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24:84-86.
- [14] AHN H, ITOH T. Impedance-Transforming Symmetric and Asymmetric DC Blocks [J]. *IEEE Transactions Microwave Theory Technology*, 2010, 58: 2463-2474.
- [15] KIM P, CHAUDHARY G. Wideband Impedance Transformer with Out-of-Band Suppression Characteristics [J]. *Microwave Optical Technology Letters*, 2014, 56:2612-2616.
- [16] CRISTAL E G, FRANKEL S. Hairpin-Line and Hybrid Hairpin-Lin/Half Wave Parallel-Coupled-Line Filters [J]. *IEEE Transactions Microwave Theory Technology*, 1972, 20:719-728.
- [17] CHUANG M L. Analytical Design of Dual-band Impedance Transformer with Additional Transmission Zero [J]. *IET Microwaves Antennas Propagation*, 2014, 8:1120-1126.
- [18] RAWAT K, GHANNOUCHI F M. Dual-Band Matching Technique Based on Dual-Characteristic Impedance Transformers for Dual-band Power Amplifiers Design [J]. *IET Microwaves Antennas Propagation*, 2011, 5:1720-1729.
- [19] CASTALDI G, FIUMARA V. A Dual-Band Chebyshev Impedance Transformer [J]. *Microwave Optical Technology*, 2003, 39:1620-1627.
- [20] BAH A O. An Extremely Wideband Tapered Balun for Application in Tightly Coupled Arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 5: 12-17.
- [21] 范寿康,李进,胡容. 微波技术、微波电路及天线 [M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- FAN S K, LI J, HU R. *Microwave Technology, Microwave Circuits and Antenna* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [22] 闫润卿. 微波技术基本教程 [M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- YAN R Q. *Basic Tutorial of Microwave Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

\*\*\*\*\*

## (上接第 72 页)

- [14] 王博,贺正洪,张晶,等. 空天飞行器跳跃巡航目标特性仿真分析[J]. *现代防御技术*, 2016, 44 (1):5-9.
- WANG B, HE Z H, ZHANG J, et al. Simulation Analysis of Aerospace Vehicle's Jumping Cruise Target Characteristics [J]. *Modern Defence Technology*, 2016, 44(1):5-9. (in Chinese)
- [15] 王国宏,李俊杰,张翔宇,等. 临近空间高超声速滑跃式机动目标的跟踪模型[J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2400-2410.
- WANG G H, LI J J, ZHANG X Y, et al. A Tracking Model for Near Space Hypersonic Slippage Leap Maneuvering Target[J]. *Acta Aerospace et Astronautica Sinica*, 2015, 36(7): 2400-2410. (in Chinese)
- [16] 李慧峰. 高超声速飞行器制导与控制技术[M]. 北京:中国宇航出版社, 2012.
- LI H F. *Hypersonic Vehicles Guidance and Control Technology* [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2012. (in Chinese)
- [17] CHUANG C H, MORIMOTO H. Sub-Optimal and Optimal Periodic Solutions for Hypersonic Transport [C]//*Proceedings of the American Control Conference*. IEEE, 2000:1186-1190.
- [18] CHUANG C H, MORIMOTO H. Optimal Periodic Cruise for a Hypersonic Vehicle with Constraints[z]. *AIAA* 96-3876.
- [19] 张忠峰,高云峰,宝音贺西. 高超声速飞行器周期巡航与总体参数关系研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2009(4):4-7.
- ZHANG Z F, GAO Y F, BAOYIN H X. Study on Relationship between Periodic Cruise and Configuration Parameters of Hypersonic Vehicle[J]. *Missile and Space Vehicle*, 2009(4): 4-7. (in Chinese)
- [20] LE J L, GANIMEDOV V L, MUCHNAJA M L, et al. The Calculation of Aerodynamic Heating and Viscous Friction Forces on the Surface of Hypersonic Flight Vehicle[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2002, 16(1):8-20.

(编辑:徐敏)