

空间高功率波导-方同轴转换器设计

李继超¹ 陈潇杰¹ 刘长军¹ 白鹤² 崔万照²

1 四川大学电子信息学院, 成都 610064

2 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000

E-mail: cjliu@scu.edu.cn

摘要 本文针对星载高功率微波通信需求设计了一款波导-方同轴转换器, 其在 3.60 GHz-4.85 GHz 内电压反射系数的模值小于 -20 dB, 插入损耗小于 0.069 dB; 工作频率为 4.0 GHz 时, S_{11} 的幅值为 -26 dB, 插入损耗为 0.038 dB, 微放电的功率阈值为 15.5 kW, 能够满足空间工程应用。

关键词 波导-方同轴转换器, 空间应用, 微放电

Design of High-Power Spatial Rectangular Coaxial to Waveguide Converter

Jichao Li¹, Xiaojie Chen¹, Changjun Liu¹, He Bai², and Wanzhao Cui²

1 School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 61004, China

2 China Academy of Space Technology (Xi'an), Xian 710000, China

Abstract: A rectangular coaxial to waveguide transmission line converter utilized in satellite high-power microwave communication systems has been designed and simulated. The simulated results show that its voltage reflection coefficient is below -20 dB and the insertion loss is less than 0.069 dB from 3.60 GHz to 4.85 GHz. The return loss and insertion loss are 26 dB and 0.038dB at 4.0 GHz, respectively. Furthermore, the threshold power of multipactor reaches 15.5 kW, which indicates that the proposed converter meets the requirements of high-power microwave applications.

Keywords: Rectangular coaxial to waveguide converter; Space application, Multipactor

1 引言

波导-同轴转换器是在空间应用中一种不可缺少的微波器件。在空间应用中, 由于设备的工作频率高, 功率大, 在微波器件内部间隔较小的地方电场过大而发生击穿或者微放电现象^{错误!未找到引用源。}。这些现象使设备的电压反射系数增大、系统噪声增加, 严重时甚至会损坏器件, 使系统不能正常工作^[2]。空间中的微波器件应该尽量避免微放电效应的发生。因此, 在设计空间微波器件时, 必须考虑微波器件

的微放电功率阈值。

本文针对空间应用设计了一种高功率波导-方同轴转换器。方同轴具有宽频带、低色散的特点, 还有损耗低、功率容量大、易于加工的优势^[4]。本文设计的波导方同轴转换器在结构上采用工程应用中常用的后馈式^[5]连接方式, 方同轴与波导在同一水平线上。设计中加入了阶梯式阻抗变换器, 可获得较宽的工作频带^[6]。在仿真环境中, 3.60 GHz~4.85 GHz 内 $|S_{11}|$ 小于 -20 dB, 插入损耗低于 0.069 dB; 工作频率为 4.0 GHz 时, $|S_{11}|$ 为 -26 dB, 插

入损耗为 0.038 dB 且微放电的功率阈值达到 15.5 kW。

2 理论分析

关于方同轴的特性,很多文献里都已经做出详细的研究。文献[7]对方同轴的特性阻抗给出了具体的计算公式,具体计算公式如下:

$$Z_0 = \frac{47.09}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{a-b}{0.2794a+0.7206b}, \frac{a}{b} < 2.5$$

$$Z_0 = \frac{136.7}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg\left(0.9259 \frac{a}{b}\right), 2.5 \leq \frac{a}{b} \leq 4$$

$$Z_0 = \frac{138.06}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg\left(0.914 \frac{a}{b}\right), \frac{a}{b} > 4$$

微放电是工作在高功率的空间微波器件内的二次电子倍增现象。它是由器件内传输的电磁场激发,电子获得初始的能量并沿着不同的方向撞击到器件表面,激发出的二次电子再次被电磁加速,并继续撞击器件表面,从而形成类似于雪崩的效应^[3]。微放电的发生与材料本身的固有属性即二次电子发射率 δ 有关,还与器件结构、输入波形、频率及功率大小有关系^[8]。

3 波导方同轴转换器设计

首先对波导方同轴转换器的电性能进行探究,在三维全波仿真软件 CST 中进行建模仿真。图 1 中给出了方同轴的横截面图,方同轴的特性阻抗为 50 欧姆,内导体边长 $b=4.8$ mm,外导体内边长 $a=12$ mm,导体的材料

为金属铝,中间为真空环境。

仿真模型如图 2 所示,波导规格为 BJ-40,宽边和窄边的尺寸分别为 58.2mm 和 29.1mm。金属阶梯均放置于波导宽边中央位置。

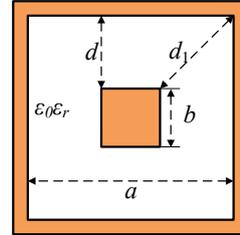


图 1 方同轴截面

以频带宽度和功率容量为目标,通过仿真计算进行结构优化,得到金属阶梯宽度相同均为 14mm,长和高的尺寸分别为 7.4 mm×21.2 mm, 20.4 mm×12.3 mm, 24.8 mm×4.9 mm; 阶梯距离波导底部 4 mm。

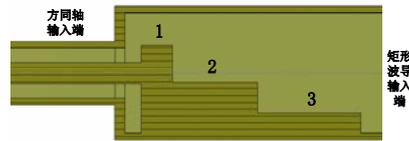


图 2 CST 仿真模型图

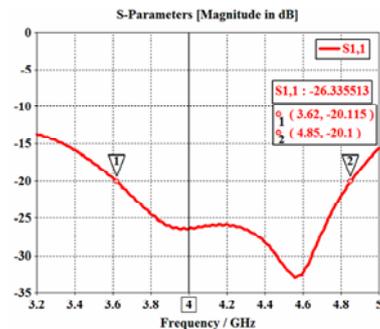


图 3 |S₁₁|仿真曲线

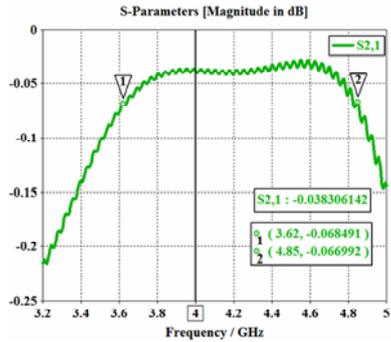


图 4 $|S_{21}|$ 仿真曲线

由图 3 和图 4 仿真曲线可以得出：工作频带 3.62 GHz~4.85 GHz 内， $|S_{11}|$ 幅值均小于 -20 dB，绝对带宽为 1.23 GHz，且插入损耗均小于 0.069 dB。在频率为 4.0 GHz 时， $|S_{11}|$ 幅值为 -26 dB，插入损耗 0.038 dB。

利用 CST 中的 PIC 求解器进行微放电功率阈值仿真。金属铝的二次电子发射模型采用软件内置的 Vaughan 模型，其中 $\delta_{\max} = 2.98$ 。激励信号为频率 $f = 4.0$ GHz 正弦信号。初始宏粒子数为 100 个，初始动能 10 eV。为了获得较高的计算精度，将网格剖分设置为每个波长至少离散为 20 个网格，其中金属间隙最窄的地方，网格密度需要适当的提高。

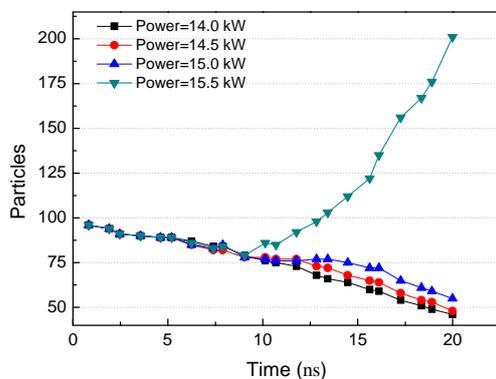


图 5 不同输入功率下粒子数与时间关系

由图 5 粒子数与时间关系曲线可得出：输入功率小于 15.5 kW 时，粒子数随着时间增长而逐渐减少，当功

率超过 15.5 kW，在 10 ns 后粒子数成指数型激增，说明发生了微放电。

基于方同轴的波导同轴转换器正在加工，准备进行测试。

4 结论

本文设计的基于方同轴的波导同轴转换器具有良好的电性能，并拓宽了工作带宽，微放电功率阈值高，还具有易加工、重量轻的特点，能够满足空间应用的要求。为进一步提高波导同轴转换器的微放电功率阈值，可在金属表面附介质或者刻槽等。

参考文献

- [1] Hu T, Cui W. Design and multipactor analysis of microwave impedance transformer with dielectric filling[C]// European Conference on Antennas & Propagation. IEEE, 2014.
- [2] Cui W Z, Li Y, Yang J, et al. An efficient multipaction suppression method in microwave components for space application[J]. CHINESE PHYSICS B.
- [3] Anza S, Vicente C, Gil J, et al. Prediction of Multipactor Breakdown for Multicarrier Applications: The Quasi-Stationary Method[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(7):2093--2105.
- [4] 谢敏, 雷国忠. 方同轴特性的研究[J]. 火控雷达技术, 2015(3):56-59.
- [5] 魏振华, 田立松, 冯旭东, et al. 8-18GHz 同轴-波导转换器的分析与设计[J]. 微波学报, 2008, 24(s1):125-128.
- [6] Levy R, Hendrick L W. Analysis and synthesis of in-line coaxial-to-waveguide adapters[C]// Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE

MTT-S International. IEEE, 2002.

- [7] Lau K H. Loss calculations for rectangular coaxial lines[J]. *Microwaves Antennas & Propagation IEE Proceedings H*, 1988, 135(3):207-209.
- [8] 曹桂明, 王积勤. 微放电效应部件设计研究[J]. *宇航计测技术*, 2004, 24(6):45-48.