

文章编号: 2095-4980(2023)07-0845-06

面向卫星通信的内导体非接触同轴接头设计方法

张欣¹, 李金凤¹, 刘长军^{*1}, 陈翔², 崔万照^{*2}

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064;
2. 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对无源互调(PIM)严重影响卫星通信系统性能和稳定性问题, 提出了一种利用内导体非接触式结构实现低PIM的同轴接头设计方法。设计并实现了2款分别工作在S波段和C波段的内导体非接触式同轴接头: S波段的内导体非接触式同轴接头在2.1~2.7 GHz下实测 $|S_{11}| < -30$ dB, 通带内插入损耗小于0.3 dB; C波段的内导体非接触式同轴接头在3.5~4.2 GHz下实测 $|S_{11}| < -30$ dB, 通带内插入损耗小于0.2 dB。该改进型同轴接头设计方法为卫星通信系统的微波连接器的设计提供了重要的参考价值和新的研究思路。

关键词: 内导体非接触式同轴接头; 卫星通信系统; S波段; C波段; 等效电路

中图分类号: TN61

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022238

Design method of coaxial connector with noncontact inner conductors for satellite communication

ZHANG Xin¹, LI Jinfeng¹, LIU Changjun^{*1}, CHEN Xiang², CUI Wanzhao^{*2}

(1.School of Electronic and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China;

2.National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: A design method of low Passive Intermodulation(PIM) coaxial connectors using noncontact inner conductors is proposed in this paper. Coaxial connectors are widely used in satellite communication systems, and their PIMs seriously affect the communication performance. Two coaxial connectors with noncontact inner conductors in S-band and C-band are designed and implemented, respectively. The measured $|S_{11}|$ of the proposed coaxial connectors is less than -30 dB from 2.1 GHz to 2.7 GHz in S band, and the insertion loss is better than 0.3 dB. The measured $|S_{11}|$ of the C band connector is less than -30 dB from 3.5 GHz to 4.2 GHz, and the insertion loss is better than 0.2 dB. The proposed coaxial connector design method with noncontact inner conductors may lower the PIM of a coaxial connector and has bright future applications in satellite communication systems.

Keywords: coaxial connector of noncontact inner conductors; satellite communication; S band; C band; equivalent circuit

随着卫星通信技术的进一步发展, 高功率、宽带宽、多载波技术正成为必然趋势^[1]。微波元器件中的无源互调(PIM)将对大功率卫星通信系统的设计、实现和稳定运行构成巨大的威胁^[2]。材料非线性和接触非线性是产生PIM的2个主要机制^[3]。材料非线性是指具有非线性导电特性材料媒质的固有非线性特性, 如铁磁材料; 接触非线性是指具有非线性电流/电压特性的接触引起的非线性, 如经氧化和腐蚀的金属接触表面^[4]。射频同轴接头作为不同电路模块之间传输能量和交换信息的射频器件, 在卫星通信系统中起着至关重要的作用^[5]。其连接端口处松散接触、涂层厚度不均匀性以及加工本身缺陷引起的接触非线性效应会导致PIM的产生, 从而严重影响射频系统的通信性能^[6]。

收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2023-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071316); 国际合作项目资助项目(2021YFH0152)

*通信作者: 刘长军 email:cjliu@scu.edu.cn; 崔万照 email:cuiwanzhao@126.com

近年来,对无源互调干扰问题进行了广泛的研究。湖南大学杨会平团队提出并验证了金属松散电接触导致接触非线性是产生PIM干扰的直接原因^[7]。为了抑制接触非线性导致的PIM干扰,现有的PIM抑制方法主要集中在改善金属-金属接触状态上,但此类方法受限于加工工艺和不稳定性问题。金属-金属的非接触式结构可以避免金属接触,从而在根源上消除接触非线性^[8]。T N V Dinh^[9]设计并实现了一种同轴旋转接头,接头内导体通过聚四氟乙烯材料机械对齐,避免了金属接触导致的PIM干扰。但该结构存在一些不足:内部结构复杂,尺寸偏大,不便于加工;工作频段不是常见频段,质量偏大。空间技术研究院西安分院研究团队此前基于间隙波导的非接触结构实现了滤波器的整体非接触化^[10],并充分验证了非接触式PIM抑制方法的可行性。

基于非接触式抑制PIM的方法,本文设计并实现了分别工作在S波段和C波段的内导体非接触式同轴接头。软件仿真和实测的S参数结果吻合良好。该接头结构设计简单,加工成本低,为非接触式结构抑制PIM的研究提供了重要参考价值。

1 内导体非接触式同轴接头原理及设计

图1为射频同轴线的电流分布图,由图可知,外导体区域电流密度低,内导体区域电流密度高。根据金属-金属接触产生的PIM强度与电流密度正相关特性^[11],将抑制同轴接头内导体接触产生PIM作为主要研究思路。因此同轴接头内导体连接处设计非接触式结构,避免内导体金属接触,消除内导体区域接触非线性导致的PIM干扰。

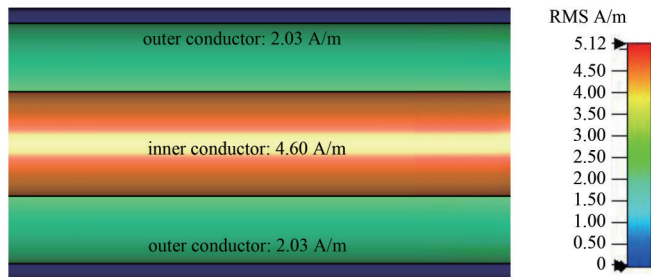


Fig.1 Current distribution of the coaxial line
图1 同轴线的电流分布

基于传输线理论和非接触式结构,本文设计了一种改进型同轴接头结构,如图2(a)所示。该接头的内导体采用非接触式结构,外导体则采用接触式结构。接头尺寸选用L29接头标准尺寸,即内导体外径7 mm,外导体内径16 mm。与之对应的近似等效电路模型如图2(b)所示, C_1 为内导体非接触间隙的等效耦合电容,对应图2(a), C_1 由 C_{11} 和 C_{12} 并联组成; C_2 和 C_3 为同轴线内外导体之间的等效耦合电容; L_1 和 R_1 分别为同轴线的等效电感和等效损耗电阻。

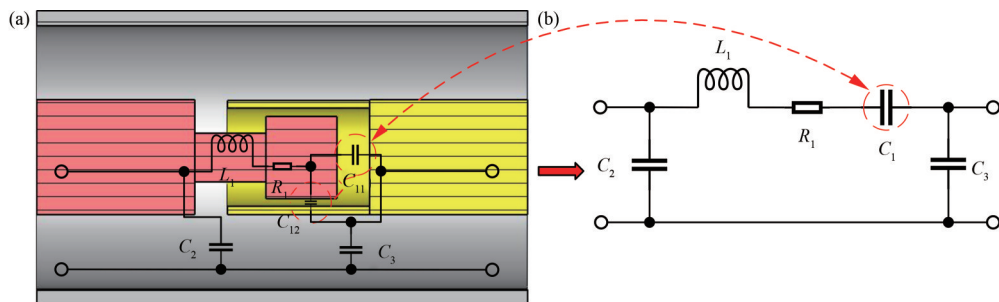


Fig.2 Simulated model and the equivalent circuit model of the coaxial connector with the contactless inner conductor
图2 内导体非接触式同轴接头的仿真模型和等效电路模型

该改进型接头非接触间隙的尺寸远小于工作波长,因此等效电路模型中的器件参数可采用以下方法进行近似计算。

C_{11} 近似为平行板间电容:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{l} \quad (1)$$

式中: ϵ_r 为相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; S 为平行板有效面积; l 为平行板间距离。

C_{12} 、 C_2 、 C_3 近似为同轴线内外导体间耦合电容，单位长度的分布电容为：

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (2)$$

式中： D 为同轴电缆外导体的内径； d 为同轴电缆内导体的外径。计算 C_{12} 时， D 为母头内导体的内径，如图3取 $D_3-2\times H_1$ ， d 为公头内导体的外径，如图3取 D_2 。

L_1 近似为同轴线的分布电感，单位长度的分布电感为：

$$L = \frac{\mu_r\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (3)$$

式中： μ_r 为相对磁导率； μ_0 为真空磁导率。

R_1 近似为同轴线的分布电阻，单位长度的分布电阻为：

$$R = \sqrt{\frac{f\mu_r\mu_0}{4\pi\sigma}} \left(\frac{2}{d} + \frac{2}{D}\right) \quad (4)$$

式中： σ 为导体的电导率； f 为射频频率。

2 仿真及优化

使用 CST studio suite 2020 软件的通用高频无源器件仿真功能对 S 波段改进型同轴接头进行仿真优化，得到对应的 S 参数。同时测量了该仿真模型的尺寸参数，如表 1 所示，尺寸变量如图 3 所示。并根据式(1)~(4)，计算了对应元器件参数值，如表 2 所示。

表 1 S 波段和 C 波段改进型同轴接头尺寸参数(mm)

Table1 The dimension parameters of the improved coaxial connector at S band and C band(unit:mm)

dimension parameters	values in CST at S band	calculated values at C band
L_1	15.18	8.68
L_2	7.59	4.34
L_3	7.59	4.34
L_4	25.91	25.66
L_5	25.91	25.66
D_1	3.00	3.00
D_2	5.00	5.00
D_3	7.00	7.00
D_4	16.00	16.00
H_1	0.50	0.50
H_2	1.00	1.00
M_1	2.00	2.00
M_2	2.00	2.00

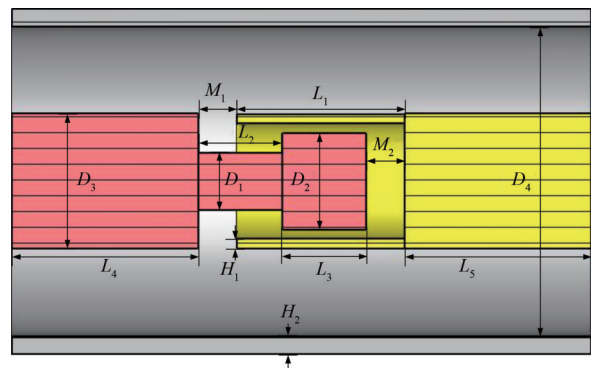


Fig.3 Dimension parameters of the improved coaxial connector

图 3 改进型同轴接头的尺寸变量

表 2 S 波段和 C 波段下改进型同轴接头对应的等效电路模型参数值

Table2 The parameters values of the equivalent circuit model for the improved coaxial connector at S band and C band

component	calculated parameters values at S band	parameters values in ADS simulation at C band
C_1/pF	4.18	2.65
L_1/nH	2.32	1.40
C_2/pF	0.28	0.17
C_3/pF	0.26	0.16
R_1/Ω	0.02	0.02

再使用 Advanced Design System 2020 软件中电路仿真功能计算等效电路模型的 S 参数。将得到的 S 参数与在 CST 软件仿真中得到的 S 参数进行对比，如图 4(a)所示。由图可知，CST 仿真下，S 波段下内导体非接触式同轴接头在 2.24~2.65 GHz 频率范围内 $|S_{11}| < -30$ dB，插入损耗小于 0.05 dB，在 2.43 GHz 处 $|S_{11}|$ 得到最小值 -55 dB。S 波段的改进型同轴接头等效电路模型和 CST 仿真模型的 S 参数结果吻合良好，验证了本文改进型同轴接头结构的

等效电路模型的准确性。

基于该改进型同轴接头的等效电路模型,为得到C波段的等效电路,在ADS软件中调整优化等效电路器件的参数值。得到C波段下改进型同轴接头等效电路器件参数值,如表2所示。

再根据式(1)~(4)逆向计算CST仿真模型的尺寸参数,多次优化后得到了C波段下的内导体非接触同轴接头尺寸参数值,如表1所示。

图4(b)为C波段下改进型同轴接头的等效电路模型和仿真模型 S 参数对比,由图可知,CST仿真下,C波段下内导体非接触式同轴接头在3.60~4.35 GHz频率范围内 $|S_{11}| < -30$ dB,插入损耗小于0.06 dB,在3.94 GHz处 $|S_{11}|$ 得到最小值-60 dB。C波段的改进型同轴接头的等效电路模型和CST仿真模型 S 参数结果吻合良好。

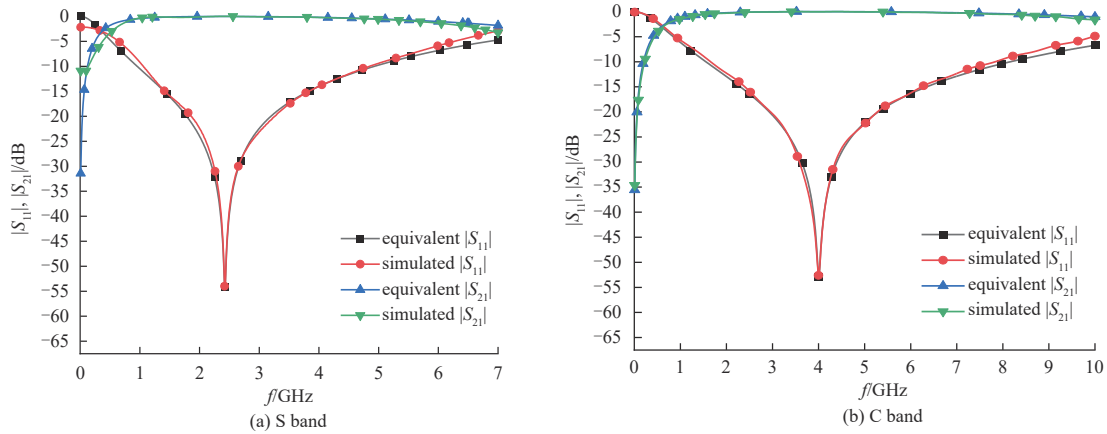


Fig.4 Comparison of S -parameters between the equivalent circuit model and the simulated model for the improved coaxial connector at S band and C band

图4 S波段和C波段下改进型同轴接头的等效电路模型和仿真模型 S 参数对比

3 测量结果及分析

该内导体非接触同轴接头的外壳采用铝合金,内导体采用铜芯,内外导体之间用聚四氟乙烯进行固定,接头两端通过外壳螺母实现连接固定。样件整体尺寸小,质量轻,其中S波段的接头总质量为185 g,总长度为69 mm;C波段的接头总质量170 g,总长度为62 mm,实物如图5所示。



Fig.5 Pictures of the contactless coaxial connector of the inner conductor at S band and C band

图5 S波段和C波段下内导体非接触式同轴接头实物图

图6为S波段和C波段的内导体非接触式同轴接头的电参数性能仿真与实测对比图,其中测试使用的矢量网络参数仪型号为MS46322A。从图6中可以看出,该接头 S 参数实测与仿真结果吻合较为良好。S波段下内导体非接触式同轴接头在2.1~2.7 GHz下实测 $|S_{11}| < -30$ dB,通带内插入损耗小于0.3 dB;C波段下内导体非接触式同轴接头在3.5~4.2 GHz下实测 $|S_{11}| < -30$ dB,通带内插入损耗小于0.2 dB。S波段和C波段的内导体非接触同轴接头实测结果表现良好。

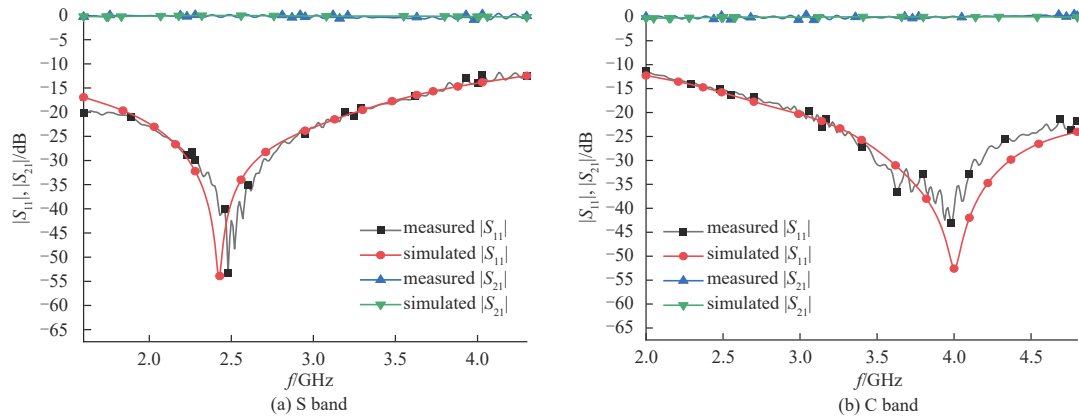


Fig.6 Comparison of S -parameters between the simulation and the measurement for the improved coaxial connector at S band and C band
图6 S和C波段下改进型同轴接头的 S 参数仿真与实测对比

4 结论

本文提出了一种内导体非接触式同轴接头结构的设计方法，该方法避免了内导体金属-金属接触，在根源上消除了内导体区域的接触非线性，理论上能较好地抑制PIM的产生。基于此设计并实现了分别工作在S波段和C波段下的内导体非接触式同轴接头。软件仿真和实测的 S 参数性能表现良好并近似吻合，S波段的改进型接头在2.1~2.7 GHz下实测 $|S_{11}| < -30$ dB，通带内插入损耗小于0.3 dB；C波段的改进型接头在3.5~4.2 GHz下实测 $|S_{11}| < -30$ dB，通带内插入损耗小于0.2 dB。该内导体非接触式同轴接头整体结构简单，降低了加工难度及成本，后续将对其进行PIM实测分析。本课题对PIM的研究有着潜在的推动作用，为我国大功率卫星通信系统的电磁兼容研究提供了参考价值、实用价值和应用前景。

参考文献：

- [1] 叶鸣,贺永宁,王新波,等. 金属波导连接的无源互调非线性物理机制和计算方法[J]. 西安交通大学学报, 2011,45(2):82-86. (YE Ming, HE Yongning, WANG Xinbo, et al. Nonlinear physical mechanism and calculation method of passive intermodulation at metal waveguide connection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(2):82-86.)
- [2] 李霄泉,崔万照,胡天存,等. 无源互调抑制技术研究现状及发展趋势[J]. 空间电子技术, 2017,14(4):1-6. (LI Xiaoxiao, CUI Wanzhao, HU Tiancun, et al. Review of passive intermodulation techniques and development trend[J]. Space Electronics Technology, 2017,14(4):1-6.)
- [3] 王小丽,陈翔,崔万照. 空间大功率微波器件无源互调最新研究进展[J]. 空间电子技术, 2020,17(5):1-10. (WANG Xiaoli, CHEN Xiang, CUI Wanzhao. Recent research advances of passive intermodulation for high-power microwave components[J]. Space Electronics Technology, 2020,17(5):1-10.)
- [4] 崔万照,李军,魏焕,等. 航天器微波部件无源互调机理分析与检测技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2020:2-20. (CUI Wanzhao, LI Jun, WEI Huan, et al. Mechanism analysis and detection technology of passive intermodulation in satellite microwave components[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2020:2-20.)
- [5] 王琪,狄学峰,李秋强,等. S频段低无源互调同轴滤波器设计[J]. 空间电子技术, 2017,14(6):49-53. (WANG Qi, DI Xuefeng, LI Qiuqiang, et al. A design of low-passive intermodulation coaxial filter in S band[J]. Space Electronics Technology, 2017,14(6):49-53.)
- [6] JIN Qiuyan, GAO Jinchun, FLOWERS G T, et al. Modeling of passive intermodulation with electrical contacts in coaxial connectors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(9):4007-4016.
- [7] 杨会平,黄为,曾碧卿,等. 松散电接触对无源互调干扰的影响机理分析[J]. 中国科学:信息科学, 2021,51(8):1316-1330. (YANG Huiping, HUANG Wei, ZENG Biqing, et al. Analysis of passive intermodulation distortion caused by loose electrical contact[J]. Science China:Information Science, 2021,51(8):1316-1330.)
- [8] YOU Jianwei, ZHANG Jianfeng, GU Weihui, et al. Numerical analysis of passive intermodulation arisen from nonlinear contacts in HPMW devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(5):1470-1480.
- [9] DINH T N V. A compact contactless coaxial VHF rotary joint for surveillance radar[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019,29(1):17-19.