

文章编号: 2095-4980(2023)03-0286-05

## 一种星载天线金属网 PIM 性能的波导测试方法

崔 镇<sup>1,2</sup>, 马小飞<sup>\*2</sup>, 施锦文<sup>2</sup>, 李维梅<sup>2</sup>, 周兰兰<sup>2</sup>, 彭 健<sup>2</sup>

(1.西安电子科技大学 空间科学与技术学院, 陕西 西安 710126; 2.西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 金属网的无源互调(PIM)是大功率星载网状天线的一项重要性能参数。传统的金属网无源互调测试主要采用空间辐射法, 但空间辐射法需要的金属网样件尺寸大, 测试效率低。对此, 提出一种基于三端口模块波导测试系统的金属网无源互调性能测试方法。为验证测试方法的有效性, 搭建了基于三端口模块的金属网 PIM 性能测试系统, 并对传统型和改进型 2 个金属网样件进行了 PIM 性能测试。测试结果表明, 改进后的金属网 PIM 性能提升了 50 dB 以上。本文提出的金属网 PIM 性能测试方法使用的三端口测试系统集成度高, 性能稳定, 系统搭建效率高。相比传统的空间辐射测试法, 本文方法的测试样件尺寸减小了一个数量级, 为快速研究新型低 PIM 金属网提供了有力支持。

**关键词:** 星载天线; 金属网; 无源互调; 测试; 三端口波导法

**中图分类号:** TN820

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2022193

## A waveguide test method for Passive Intermodulation performance of spaceborne antenna metal mesh

CUI Zhen<sup>1,2</sup>, MA Xiaofei<sup>\*2</sup>, SHI Jinwen<sup>2</sup>, LI Weimei<sup>2</sup>, ZHOU Lanlan<sup>2</sup>, PENG Jian<sup>2</sup>

(1.School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710126, China;

2.Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an Shaanxi 710100, China)

**Abstract:** The Passive Intermodulation(PIM) value of the reflector's metal mesh, an important performance parameter of high-power spaceborne mesh antenna, is tested traditionally by the radiation method which requires a large size of metal mesh sample and has a low test efficiency. A 3-port PIM test method is proposed for the metal mesh, which is carried out by adopting a waveguide testing system based on the 3-port module. A PIM performance test system based on the 3-port module is constructed in order to verify the effectiveness of this test method. The PIM performance test is carried out on two metal mesh samples of the traditional type and the improved type, respectively. The test results show that the PIM performance of the improved metal mesh sample has been improved by 50 dB than that of the traditional mesh sample. This metal mesh's PIM test system bears the characteristics of high integration, stable performance, and high system construction efficiency. The test sample size for the proposed method is reduced to about 1/10 than that of the traditional method. The proposed 3-port PIM test method provides support for the rapid research of novel low-PIM-level metal meshes.

**Keywords:** spaceborne antenna; metal mesh; Passive Intermodulation; measurement; 3-port waveguide method

随着我国空间有效载荷技术的不断发展, 在工程领域中对 10 m 以上的大口径天线的应用日益广泛, 通信卫星、遥感卫星等都对此类大口径天线有需求<sup>[1-5]</sup>。该类天线由于受火箭整流罩容积的限制, 一般采用发射时收拢, 入轨后展开的形式。为减小质量并方便收拢及展开, 其反射面一般使用金属反射网, 由于不少大口径天线都要求具有收发共用的能力, 这就要求所使用的金属网具有较好的无源互调性能<sup>[6-8]</sup>。尽管认为无源部件是线性

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2023-01-04

基金项目: 国防科技 173 计划技术领域基金资助项目(2021-JCJQ-JJ-0828)

\*通信作者: 马小飞 email:maxf041600@sina.com

的，但研究和实验表明无源部件也具有微弱的非线性。金属网无源互调性能是金属丝选型和金属网编织技术固化的必然要求<sup>[9-14]</sup>。

传统的金属网 PIM 性能测试主要采用空间辐射法，通过天线向空间发射微波照射金属网，激励出无源互调信号并接收<sup>[15]</sup>。该方法需要很大的金属网试片(约 10 个工作波长长度)，由于空间应用的低 PIM 金属网通常采用稀有金属制成，该方法对于多种金属网试件进行互调性能测试鉴定成本高，周期长。为克服现有技术的不足，本文提出一种基于三端口模块结构的金属网无源互调测试装置，所需金属网样件尺寸约 1 个工作波长，比传统金属网样件小 1 个数量级。采用该测试装置，金属网测试样件更换方便，测试速度快，成本低，且测试稳定度高。

### 1 基于三端口模块的金属网无源互调波导测试系统

本文提出的基于三端口模块的金属网无源互调波导测试系统框图如图 1 所示，该系统包括发射模块、接收模块和三端口模块。发射模块根据被测金属网所处环境中存在的射频信号及其功率和预设的被测无源互调波导的阶数，产生 2 路相应频率和功率的射频信号，并将其合路后输出至三端口模块。三端口模块将接收到的发射信号转换为波导信号，之后进行正交极化处理，将其发射至被测金属网试样件；三端口模块中的正交模耦合器接收被测金属网试样件产生的无源互调波导信号，并经过正交极化处理之后，转换为接收信号输出至接收模块。接收模块根据测试系统的发射频率和 PIM 阶数，计算得到无源互调波导信号对应的射频信号频率，对接收信号进行滤波后得到 PIM 信号，将 PIM 信号经低噪放大后传输至频谱仪测试其功率，完成金属网无源互调性能测试。

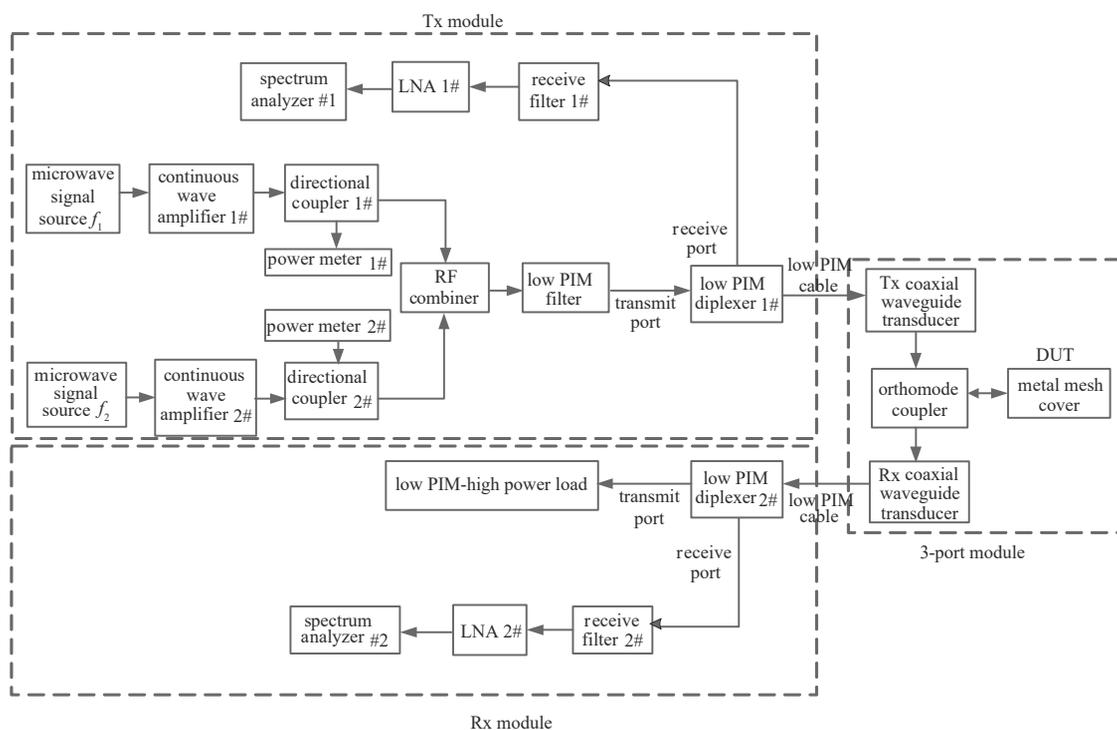


Fig.1 Block diagram of metal mesh passive intermodulation waveguide test system based on three-port module

图 1 基于三端口模块的金属网无源互调波导测试系统框图

该测试系统中的三端口模块由发射波同、接收波同、正交模耦合器组成。其中正交模耦合器为一个 T 型隔板式圆极化器，共有 3 个端口，分别连接发射波同、接收波同、被测金属网样件。与发射波同连接的端口和与接收波同连接的端口位于正交模耦合器的两端枝节，这 2 个端口为矩形波导口，分别通过发射波同和接收波同与发射模块和接收模块连接；与被测金属网样件连接的端口为方形口，位于正交模耦合器的中部枝节。通过发射波同进入正交模耦合器的合成信号为线极化信号，在正交模耦合器内部转换为左旋圆极化信号后，被传输至被测金属网样件端口。由于圆极化电磁波的固有特性，照射到被测金属网的左旋圆极化波，经被测金属网反射后形成右旋圆极化波。波导式正交模耦合器对圆极化旋向通道具有隔离特性，测试端口的左旋圆极化信号，只能从输入端口进/出；测试端口的右旋圆极化信号，只能从输出端口进/出。

从输入波同进入波导式正交模耦合器的信号，会沿着发射波同—正交模耦合器(发射通道)—被测样件反射—

正交模耦合器(接收通道)—接收波同的路径前进。从输入波同进入耦合器的信号，经金属网反射(近似于全反射)，从输出波同输出。金属网反射的信号不会原路返回输入波同中。

综上，正交模耦合器的输入、输出端口的线极化信号分别对应测试端口的左旋圆极化、右旋圆极化信号，且左旋与右旋圆极化 2 种信号是正交的，这 2 种正交的信号又分别对应输入、输出 2 个端口，因此称其为正交极化处理。

### 2 基于三端口模块的金属网无源互调测试方法

图 2 为基于三端口模块的金属网无源互调测试流程图，包括以下步骤：

1) 根据被测金属网所处环境中存在的射频信号及其功率和预设的被测无源互调波导的阶数，设置发射模块和接收模块。使发送模块产生 2 路相应频率和功率的射频信号，将其合路得到发射信号，输出至三端口模块，并在接收端监测无源互调波导信号对应的射频信号；

2) 对金属网无源互调波导测试系统中的发射模块和接收模块进行校准。具体为：采用射频电缆将发射模块的输出端口和接收模块的输入端口连接，测试发射模块与接收模块自身的无源互调波导对应的射频信号。若接收模块收到的无源互调波导对应的射频信号功率低于预设值，则认为测试系统的发射模块与接收模块满足系统测试要求；否则，更换发射模块或接收模块，直至系统的发射模块与接收模块满足系统测试要求；

3) 采用金属板样件对三端口模块进行校准。具体为：将三端口模块的输入波同通过电缆与发射模块第一双工器连接，三端口模块的接收波同通过电缆与接收模块的第二双工器连接，三端口模块的被测件端连接一个波导金属板样件，进行校准测试。若接收模块接收到的无源互调波导对应的射频信号功率低于-155 dBm，则认为测试系统的三端口模块满足系统测试要求；

4) 采用源样件对测试系统的灵敏度性能进行校准。具体为：将三端口模块中的被测件端连接的样件，更换为含有 PIM 源的样件，若接收模块接收到无源互调波导对应的射频信号为-120 dBm 以上，则认为测试系统的灵敏度满足测试要求；否则，调试测试系统直至测试系统的灵敏度满足测试要求。含有 PIM 源的样件包括金属丝材中含有镍等铁磁性材料的金属网、家装用金属纱窗或钢丝球等。这些金属网的金属丝材接触不紧密，PIM 性能很差，因此是理想的 PIM 源；

5) 将三端口模块中的被测件端连接的样件，更换为待测金属网样件，测试无源互调波导信号对应的射频信号功率，完成金属网无源互调性能测试。

### 3 金属网无源互调测试结果

图 3 为根据图 1 搭建的基于三端口模块的金属网无源互调测试系统。被测金属网通过方形金属边框螺接固定

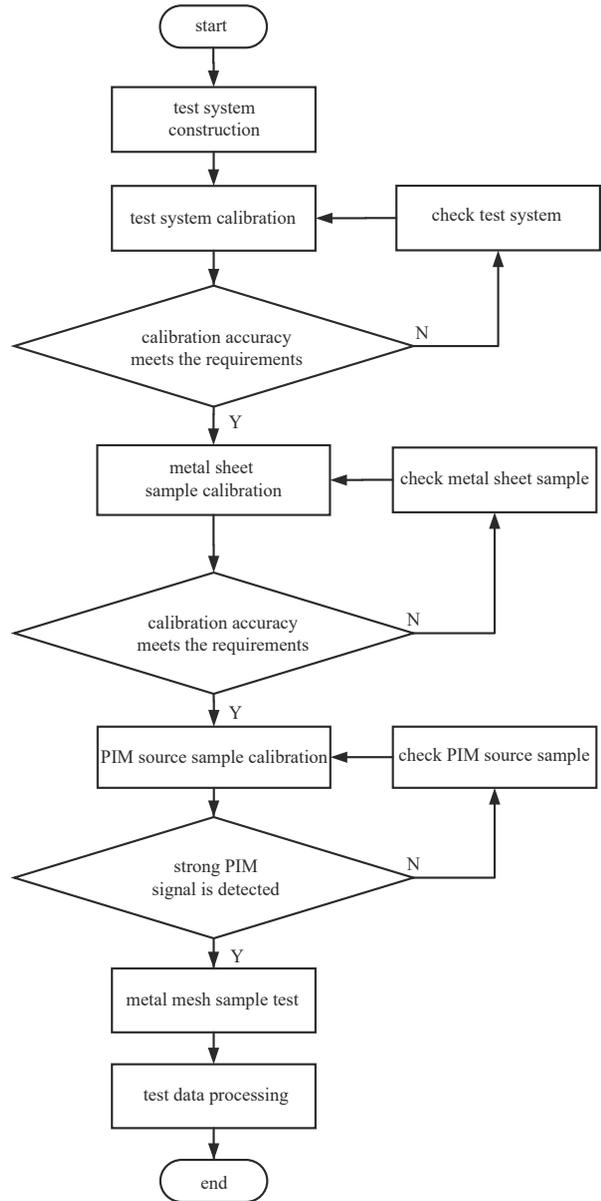


Fig.2 Flow chart of passive intermodulation test of metal mesh based on three-port module

图 2 基于三端口模块的金属网无源互调测试流程图

在金属平板上，组成一个被测金属网样件，被测金属网样件通过夹具固定在三端口模块的测试端口。金属网样件尺寸与三端口模块的尺寸匹配，约为 1 个工作波长，相比于传统的辐射法，小 1 个数量级。

为验证测试方法的有效性，采用上文所述步骤分别对改进前和改进后的金属网的无源互调性能进行测试。由于金属网为金属丝材编织而成的结构，因此金属网内部有很多的金属丝材搭接点，这些搭接点金属丝材之间存在接触非线性，在多载波照射时会有 PIM 产物。为避免金属丝材在搭接点处形成 PIM 产物，本文采用涂覆介质材料厚度为 1 μm 的金属丝材替代传统的裸金属丝材，对金属网 PIM 性能进行改进。改进后的金属网搭接点处的金属丝材彼此之间均有介质隔离，不同丝材内金属表面之间的间距大于 2 μm，从而避免了接触非线性及其带来的 PIM 产物，改善了金属网的 PIM 性能。此外，1 μm 厚的介质涂覆层会额外引入 0.1 dB 的反射损耗，折合反射率损耗约 2%，在天线增益设计时，扣除掉由介质涂覆层额外引入的 0.1 dB 反射损耗即可。基于上述的金属网改进方法，本文分别制作了传统金属网试件和改进金属网试件，2 个样件的状态参数如表 1 所示。

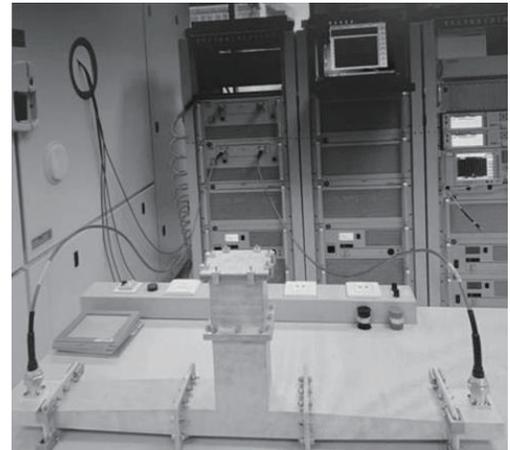


Fig.3 Metal mesh passive intermodulation test status based on three-port module

图 3 基于三端口模块的金属网无源互调测试状态

表 1 金属网试件状态

Table 1 The status of the metal mesh test piece

	sample size	metal mesh tension	craft form
traditional metal mesh test sample	20 cm×20 cm	200 g/m evenly loaded around	metal mesh
improved metal mesh test piece	20 cm×20 cm	200 g/m evenly loaded around	dielectric coated metal mesh

对 2 种金属网的 13 阶 PIM 性能进行测试，测试结果如表 2 所示。

表 2 金属网试件无源互调性能测试结果

Table 2 Test results of passive intermodulation performance of metal mesh specimens

sample	$PIM_{13}/dBm$
traditional metal mesh test sample	-102
improved metal mesh test piece	-154

可见，改进型金属网试件的 PIM 性能相比传统金属网试件的 PIM 性能有明显改善。本文提出的基于三端口模块的金属网无源互调测试方法，可以快速、高效、准确地进行金属网无源互调测试。

#### 4 结论

本文提出一种星载天线金属网无源互调性能的波导测试方法，该方法创新性地采用了基于三端口模块的波导测试系统。结合具体的金属网，采用本文方法，对改进前后的金属网试件进行了无源互调性能测试，测试结果证明了金属网改进的有效性。本文提出的金属网测试方法，被测件更换方便，测试速度快，测试稳定度高且成本低，可为低 PIM 金属网的快速研发提供有力支持。

#### 参考文献：

[ 1 ] 陈传志,董家宇,陈金宝,等. 空间大型星载抛物面天线研究进展[J]. 航空学报, 2021,42(1):126–146. (CHEN Chuazhi,DONG Jiayu,CHEN Jinbao,et al. Large spaceborne parabolic antenna:research progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021,42(1):126–146.) doi:10.7527/S1000–6893.2020.23833.

[ 2 ] 万小平,杨粉莉,杨军刚. 空间大型可展开高精度天线的应用现状及发展趋势[J]. 空间电子技术, 2020,17(6):1–7. (WAN Xiaoping,YANG Fenli,YANG Jungang. The application status and development trend of the large deployable and high-precision antenna[J]. Space Electronic Technology, 2020,17(6):1–7.) doi:10.3969/j.issn.1674–7135.2020.06.001.

[ 3 ] 周晓涛,马小飞,李欢笑. 柔性张拉薄膜可展开空间天线研究现状与发展趋势[J]. 中国空间科学技术, 2022,42(4):77–91. (ZHOU Xiaotao,MA Xiaofei,LI Huanxiao. Review of flexible tensioned thin-film deployable antennas[J]. China Space Science and Technology, 2022,42(4):77–91.) doi:10.16708/j.cnki.1000–758X.2022.0055.

- [4] 马小飞,李洋,肖勇,等. 大型空间可展开天线反射器研究现状与展望[J]. 空间电子技术, 2018,15(2):16–26. (MA Xiaofei,LI Yang,XIAO Yong,et al. Development and tendency of large space deployable antenna reflector[J]. Space Electronic Technology, 2018,15(2):16–26.) doi:10.3969/j.issn.1674–7135.2018.02.003.
- [5] 王娟,刘明治,赵月静. 大型空间可展开天线展开过程组合控制研究[J]. 中国机械工程, 2009,20(6):728–732. (WANG Juan,LIU Mingzhi,ZHAO Yuejing. Study on combination control of deploy process of large space deployable antenna[J]. China Mechanical Engineering, 2009,20(6):728–732.) doi:10.3321/j.issn:1004–132X.2009.06.021.
- [6] 李瑜华,景莉莉,张明涛,等. 大功率馈源类产品低PIM结构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(4):633–638. (LI Yuhua,JING Lili,ZHANG Mingtao,et al. Low PIM structure design for high power feed products[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(4):633–638.) doi:10.11805/TKYDA2017235.
- [7] 白鹤,王五兔. 金属网反射面金属丝接触电流仿真分析[J]. 电子设计工程, 2014,22(24):8–10. (BAI He,WANG Wutu. Simulation analysis of wire contact current on the metal mesh reflective[J]. Electronic Design Engineering, 2014,22(24):8–10.) doi:10.3969/j.issn.1674–6236.2014.24.003.
- [8] 王耀霆,王波,肖志伟,等. 航天器大型可展开天线金属网热辐射性质测试及热分析仿真[J]. 空间电子技术, 2020,17(6):22–27. (WANG Yaoting,WANG Bo,XIAO Zhiwei,et al. Optical–property measurement and thermal analysis on metal wire mesh of large deployable flexible antenna[J]. Space Electronic Technology, 2020,17(6):22–27.) doi:10.3969/j.issn.1674–7135.2020.06.004.
- [9] 李军,赵小龙,高凡,等. 利用电热耦合效应的金属单点接触结构无源互调研究[J]. 西安交通大学学报, 2018,52(9):76–81, 117. (LI Jun,ZHAO Xiaolong,GAO Fan,et al. Passive intermodulation of metal point contact structure based on electrothermal coupling effect[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018,52(9):76–81,117.) doi:10.7652/xjtuxb201809010.
- [10] 毛煜茹,刘莹,谢拥军,等. 金属接触非线性引起的无源互调效应的数值分析[J]. 电子学报, 2015,43(6):1174–1178. (MAO Yuru,LIU Ying,XIE Yongjun,et al. Numerical analysis of passive intermodulation due to metal contact nonlinear[J]. Acta Electronica Sinica, 2015,43(6):1174–1178.) doi:10.3969/j.issn.0372–2112.2015.06.020.
- [11] 曹智,高凡,赵小龙,等. 辐射场中金属接触无源互调干扰研究[J]. 电波科学学报, 2020,35(3):338–343. (CAO Zhi,GAO Fan,ZHAO Xiaolong,et al. Passive intermodulation of metallic contact in radiated field[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020,35(3):338–343.) doi:10.13443/j.cjors.2019022301.
- [12] LI Tuanjie,ZHAI Wangmin,LI Xiangyang,et al. A finite difference time domain method for passive intermodulation analysis of nonlinear metal–metal contact[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2018,33(9):935–942.
- [13] LI Jun,MA Xiaofei,LI Tuanjie. Fast contact force calculation method for a wire mesh based on support vector machine[J]. International Journal of Computational Materials Science and Engineering, 2017,6(1):1750009–1–14. doi:10.1142/S2047684117500099.
- [14] LI Tuanjie,ZHANG Kai,JIANG Jie,et al. Passive intermodulation analysis of single contact junctions of wire mesh[J]. Journal of Computational Electronics, 2018,17(1):101–109. doi:10.1007/s10825–017–1092–6.
- [15] 李砚平,王海林,彭璐,等. 一种微振动条件下金属网天线反射面的PIM测试方法[J]. 空间电子技术, 2018,15(3):45–48. (LI Yanping,WANG Hailin,PENG Lu,et al. Detection of Passive Intermodulation for metal mesh antenna under micro–vibration[J]. Space Electronic Technology, 2018,15(3):45–48.) doi:10.3969/j.issn.1674–7135.2018.03.010.

#### 作者简介:

崔 镇(1984–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁场与微波技术、多波束通信天线 .email: cuizhen3@126.com.

马小飞(1980–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为星载大型可展开结构技术.

施锦文(1981–), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为电磁场与微波技术、天线电气设计.

李维梅(1986–), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁场与微波技术、天线电气设计.

周兰兰(1983–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁场与微波技术、天线电气设计.

彭 健(1979–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁场与微波技术、天线电气设计.