

# 星载圆锥螺旋天线的一体化设计

卫 杰,何清明,张义萍,何亚东,刘 颖,周智杰,胡永浩

(电子信息控制重点实验室,四川成都 610036)

**摘 要:** 高可靠性对于星载天线至关重要,印制馈线和焊点往往会严重降低天线的工程可靠性. 针对这一问题,本文以超宽带圆锥螺旋天线的设计为例,强化电气、结构和工艺协同设计思想,通过改进传统巴伦结构,提出了电缆、巴伦和螺旋线一体化的无焊接设计方案. 仿真结果表明,所设计的天线在整个工作频段内具有良好的宽角高增益覆盖、宽角圆极化特性和前后比指标.

**关键词:** 圆锥螺旋天线; 宽带宽角; 高增益; 一体化

**中图分类号:** TN823.31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2020)06-1113-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.06.010

## Spaceborne Conical Spiral Antenna Integrated Design

WEI Jie, HE Qing-min, ZHANG Yi-ping, HE Ya-dong, LIU Ying, ZHOU Zhi-jie, HU Yong-hao

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu, Sichuan 610036, China)

**Abstract:** High reliability is essential for spaceborne antenna, however PCB feeder and solder joint are usually lacking of guarantee in reliability. Therefore, a integrative and solderless design of cable, balun and spiral is proposed using improved balun, intensifying the cooperative design idea of electricity, structure and technology. As a example, a UWB conical spiral antenna is designed. The simulated results show that the antenna achieves a wide-angle coverage with high gain and low axial ratio, as same as high front-to-back ratios.

**Key words:** conical spiral antenna; wide-band and wide-beam; high gain; integration

## 1 引言

随着卫星技术和应用的快速发展,圆锥对数螺旋(CLS)天线因其良好的宽带、宽角和端射特性,而被广泛应用于卫星电子侦察技术领域. 高可靠性是星载天线最重要的指标之一<sup>[1-4]</sup>. 然而,以往关于 CLS 天线的研究却多集中在电气设计上,例如如何调节圆锥和螺旋线尺寸从而实现其性能的最优化. 设计中,对螺旋线也多采用 Marchand 转印制微带双线或渐变式微带巴伦馈电,其中印制微带双线与螺旋线都通过锡焊垂直互联<sup>[5-8]</sup>. 而以往的工程经验表明,印制馈线及垂直过渡焊接点都会严重影响 CLS 天线的可靠性.

针对这一问题,我们强化了电气、结构和工艺的协同设计,通过改进传统巴伦结构,提出了电缆、巴伦和螺旋线一体化、无焊接的设计方案,如图 1 所示. 一体化无焊接方案规避了垂直过渡焊接点,同时强化了传统印制馈线的结构强度. 为兼顾电气设计指标和小口径要

求,我们采用了阶梯圆锥拓扑结构,仿真结果表明,所设计天线实现了近 8 倍频程的宽角高增益覆盖,良好的宽角圆极化、前后比.

## 2 天线一体化设计

### 2.1 天线辐射机理和故障机理

根据频率缩放原理,当工作频率变化时,若天线的电尺寸和结构不怎么变化,那么它的特性将与频率无关. 圆锥对数螺旋天线就是典型的频率无关宽带天线中的一种,从顶部馈电到工作区是以慢波结构,在椎体工作区内又变成快波结构. 根据电磁场边界条件相位匹配原理,它不用反射腔或吸收腔就可以获得宽带和高性能的单方向辐射,但剖面相对较高,若能解决可靠性问题,圆锥对数螺旋天线是较为理想的星载侦察天线形式.

工程实现中,圆锥螺旋天线以往采用 Marchand 巴伦和印制微带双线馈电形式,电性能优异,然而在环境试验中驻波和方向图品质经常恶化,表现出较低工程

可靠性<sup>[5]</sup>. 通过 X 光透视观察, 锁定了两处故障点, 分别是顶部垂直过渡锡焊焊接点和顶部印制馈线. 电气、结构和工艺共同对故障机理进行了分析: (1) 热真空高低温冲击试验过程中, 天线表面与内部将产生不均匀的剧烈温度变化, 过热温度使锡铅 63Sn/37Pb 化学反应剧烈, 生长太多强度下降的金属间化合物结晶结构 Cu<sub>3</sub>Sn. 由于材料膨胀系数不同, 温度变化所导致形变应力导致垂直过渡焊接点断裂; (2) 另外, Z 方向振动试验时, 圆锥螺旋天线顶部远离振动台, 振动量级进一步被放大, 造成印制馈线条发生断裂.

基于故障机理分析可知, 圆锥螺旋天线剖面相对较高, 较长的垂直过渡馈线必然伴随较大的高低温冲击或振动形变, 最终导致工程可靠性降低. 本文通过改进传统巴伦结构, 提出了电缆、巴伦和螺旋线一体化、无焊接的设计方案.

## 2.2 天线结构和几何特征

如图 1 所示, 天线由螺旋线(辐射体)、巴伦和底座三部分组成, 部分尺寸参数见表 1.

表 1 天线尺寸 (mm 或°)

$H$	$D$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$\alpha$
365	170	20	100	185	60	78
$D_1$	$D_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$h$	$d$
6	130	5.5	8.5	13	0.2	0.5

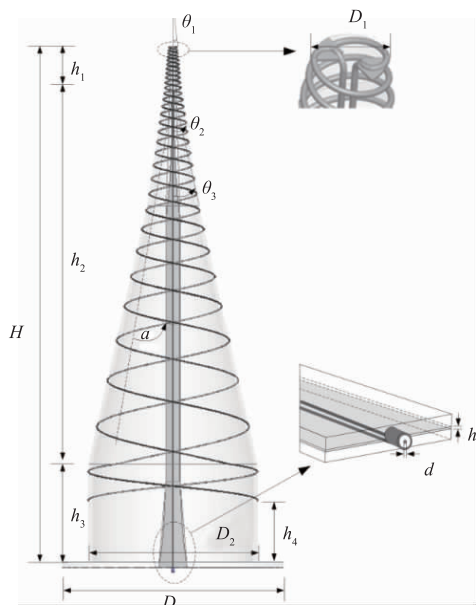


图 1 天线结构示意图

巴伦是连接辐射体和电缆的馈电元件(具有非平衡转平衡和阻抗匹配双重功能), 是一体化、无焊接设计的核心. 综合考虑电气、结构和工艺约束, 本文提出了一种基于双线和微印图案的改进型巴伦. 如图 1 所示, 该巴伦通过多层印制电路工艺实现, 是双线和微带线

结构的一种复合产物: 双线中的一支采用插接方式通过双孔的连接器与 SMA 头连接, 替代微带渐变巴伦较窄的一面微印线路; 另一支通过金属化槽工艺直接嵌入微带渐变巴伦另一面微印线路(地)的中轴线上. 双线的起始端, 一支与射频电缆内芯共线, 而另一支与电缆外导体通过金属螺钉加固连接; 双线的末端通过缠绕直接形成螺旋线的双臂. 双线与螺旋线通过一个扇形的渐变结构过渡, 为实现无焊接设计, 扇形渐变结构可直接由双线压合而成, 或采用金属溅射工艺实现, 外加介质螺钉加固.

辐射臂采用 CLS 天线基本形式, 螺旋线由电缆直接缠绕介质载体而成. 由于不具备互补特性, 为实现小口径设计, 同时确保近 8 倍频程的良好电气指标, 设计中采用了三圆锥和一圆柱的拓扑结构. 另外, 出于结构方面的考虑, 圆锥臂厚 2.5mm.

底板的大小一般等于螺旋底部直径. 但在前后比指标不达标时, 可适当放大底板尺寸, 获得较高的前后比, 以说明天线对平台的适应性.

## 2.3 设计步骤

天线大致采用以下设计步骤, 可大大地提高天线设计效率: 第一步, 对传统的微带渐变巴伦进行改进设计, 确定电缆、巴伦和螺旋线一体化、无焊接设计架构; 第二步, 通过建立理想馈电模型, 确定天线圆锥锥台个数、尺寸的动态范围; 第三步, 通频段、多维度优化 CLS 天线螺旋线拓扑结构; 最后, 构建全要素模型, 优化设计. 设计过程中, 适当的迭代对于分析问题、加快设计进度是必要的.

## 3 数值仿真分析

### 3.1 复合巴伦

通过分析巴伦的电路特性和电流流向, 本文提出了基于传统微带渐变巴伦和双线的复合巴伦结构. 结构维度: 借助多层印制电路工艺, 以在基片中开槽埋紫铜线的方式, 实现精准的平行双线结构. 电气维度: 平行双线中的一只替代微带渐变巴伦较窄的一面微印线路, 另一只直接嵌入微带渐变巴伦另一面微印线路(地)的中轴线上, 进而形成准微带渐变巴伦. 需要强调的是, 紫铜线与微印图案之间的小间隙对巴伦性能几乎无影响, 既无需电连接性(间隙对纵向电流影响甚微, 如图 2 和图 3 所示).

整个巴伦由四段组成, 既一段双线, 两段指数渐变微带线和一段微带双线, 尺寸参数见表 2.

表 2 巴伦尺寸 (mm)

$w_1$	$w_2$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
20	10	20	110	175	60

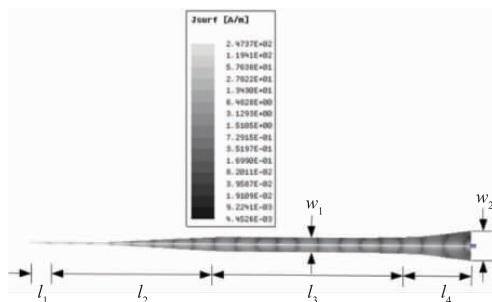


图2 巴伦及电流强度示意图

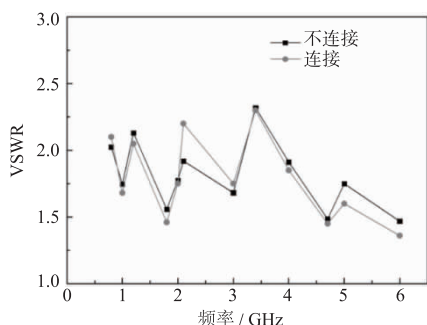


图3 电连接对驻波影响/巴伦

### 3.2 螺旋线

电性能优异的理想馈电圆锥螺旋是整个方案的基础和参考. 由于螺旋线不具备互补特性, 为确保近 8 倍频段的良好电气指标, 设计中采用了三圆锥和一圆柱的拓扑结构.

螺旋线拓扑结构对最终设计方案的增益覆盖和轴比有重要影响. 图 4 和图 5 分别给出了优化设计后的增益和轴比曲线, 图中  $\theta, \Phi$  各代表俯仰角和方位角, 例如图 5 中  $\theta=0^\circ$  便代表锥螺旋的前(轴)向,  $\pm 60^\circ$  广角轴比小于 3.5 dB.

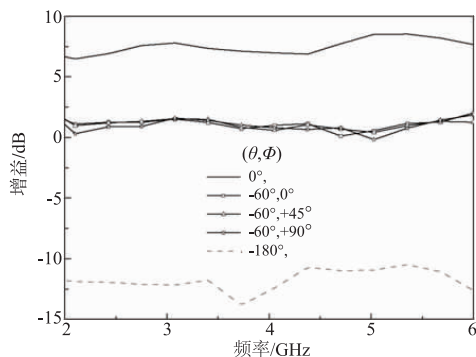


图4 增益/理想馈电螺旋线

### 3.3 全模型

最后, 构建包含巴伦、圆锥螺旋、射频接头、底座和支撑介质的全要素模型, 并进行优化设计. 设计过程中, 适当的迭代对于分析问题、加快设计进度十分必要, 以下是主要指标的仿真结果.

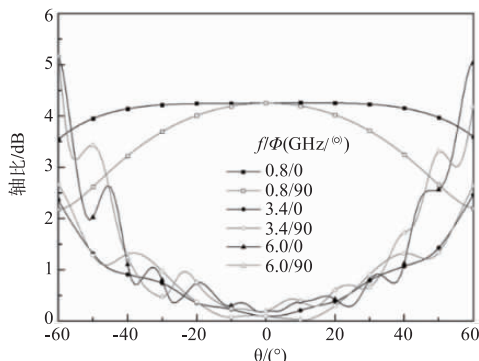


图5 轴比/理想馈电螺旋线

图 6 给出了部分频点的增益方向图, 3.4 GHz 方向图前轴向出现轻微凹陷, 这是由阶梯圆锥所致. 但在整个频段内, 方向图形状总体良好, 满足系统指标要求.

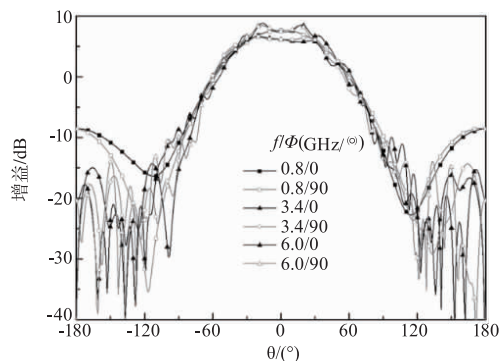


图6 增益方向图

如图 7 所示, 天线具有良好的广角增益覆盖. 在整个工作频段内, 法向和  $\pm 60^\circ$  广角增益大于 6 dB / -3 dB, 满足系统指标要求.

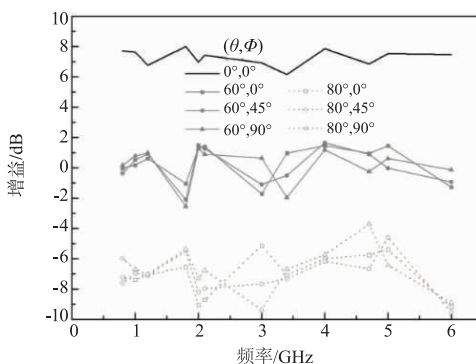


图7 广角增益

轴比和增益是无源侦察天线的关键指标项, 但当两个指标不可协调时, 优化设计策略是保证轴比不低于 6 dB 的情况下, 尽量提升增益指标. 图 8 ~ 图 10 给出了轴比在频域和空域较详尽的分布曲线, 在整个工作频段内,  $\pm 60^\circ$  广角轴比小于 5.3 dB.

前后比指标对于阵列设计十分重要, 会间接影响阵元的相位一致性. 由图 11 可知, 天线的前后比指标优

于 15dB, 绝大部分频段优于 30dB, 满足系统指标要求。

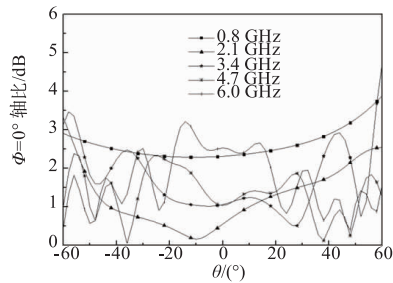


图8 轴比/ $\phi=0^\circ$

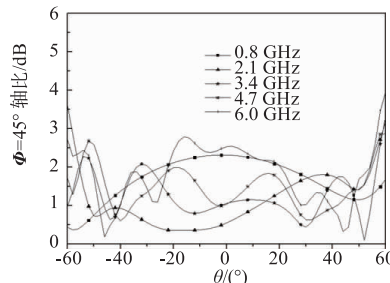


图9 轴比/ $\phi=45^\circ$

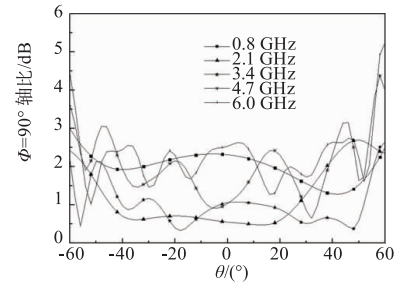


图10 轴比/ $\phi=90^\circ$

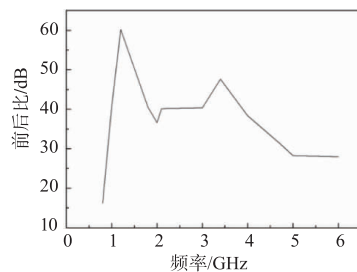


图11 前后比

## 4 结论

对于星载圆锥螺旋天线, 在空间环境温度冷热交变循环和空间离子辐射等综合环境中长期使用下, 焊点变脆老化, 寿命降低, 机械连接又影响电信号的导通和辐射. 同时, 星载圆锥螺旋天线具有较高的剖面, 采用狭长的印制双线馈电会严重影响卫星发射过程振动环境中的可靠性. 针对以上可靠性问题, 基于可靠性机理分析, 本文提出了电缆、巴伦和螺旋线一体化、无焊接的设计方案. 仿真结果表明, 天线实现了近 8 倍频程的宽角高增益覆盖, 良好的宽角圆极化、前后比, 下一步将进行加工和测试验证工作.

## 参考文献

- [1] 林昌禄, 聂在平. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 王元坤, 李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [3] Hertel T W, Smith G S. Analysis and design of two-arm conical spiral antennas[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2002, 1(44): 25 - 37.
- [4] Dyson J D. The characteristics and design of the conical log-spiral antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagat, 1965, 13(4): 488 - 498.

- [5] 刘颖, 叶君永, 何清明. 圆锥对数螺旋天线的设计和验证[J]. 电子信息对抗技术, 2015, 30(2): 62 - 66.

LIU Ying, YE Jun-yong, HE Qing-ming. The design and manufacture of a conical spiral antenna[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2015, 30(2): 62 - 66. (in Chinese)

- [6] 李明. 星载侦察天线[J]. 航天电子对抗, 1997, (03): 38 - 41.

LI Ming. Spaceborne antenna used in electronic reconnaissance[J]. Aerospace Electronic Warfare, 1997, (03): 38 - 41. (in Chinese)

- [7] 胡慧琳, 谭云华, 朱柏承, 周乐柱. 圆锥对数螺旋天线辐射特性的理论分析[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1052 - 1057.

HU Hui-lin, TAN Yun-hua, ZHU Bo-cheng, ZHOU Le-zhu. Theoretical analysis of electromagnetic radiation from conical log-spiral antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(6): 1052 - 1057. (in Chinese)

- [8] 高青, 刘其中, 尹应增. 双臂圆锥对数螺旋天线的研究[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 121 - 123.

GAO Qing, LIU Qi-zhong, YIN Ying-zeng. Research on two arms conical log spiral antenna[J]. Acta Electronic Sinica, 1999, 27(12): 121 - 123. (in Chinese)

## 作者简介

卫杰 男, 1982 年出生于四川乐山, 博士, 电子信息控制重点实验室高级工程师. 研究方向为天线工程技术、无线定位技术、组网与协同技术.

E-mail: jayleejay@126.com