

# 新型缝隙加载平面等角螺旋天线分析与设计

纪建红<sup>1</sup>,仵大奎<sup>2</sup>

- (1. 桂林长海发展有限责任公司微波测试中心,广西 桂林 541001;  
 2. 桂林电子工业学院通信与信息工程系,广西 桂林 541004)

**摘要:**文章给出了一种新型结构的缝隙加载平面等角螺旋天线,该天线采用基于自补结构并附加缝隙的平面等角螺旋振子组成,采用矩量法对缝隙位置进行优化以改善天线的阻抗特性。根据等角螺旋天线的特性,采用一种阻抗为指数渐变的微带线——平行双线形式的宽带巴仑,并采用50 Ω同轴线馈电。仿真及测试结果表明该天线具有良好的宽带特性。

**关键词:**矩量法;巴仑;自补结构

中图分类号:TN823.31 文献标识码:A

## Analysis and design of a novel slot-loaded planar equiangular spiral antenna

JI Jian-hong<sup>1</sup>, WU Da-kui<sup>2</sup>

- (1. Microwave Measuring Department of Changhai Ltd, Guilin 541001 China;  
 2. Dept. of Communication and Information Engineering of Guilin University of  
 Electronic technology, Guilin 541004 China)

**Abstract:**A novel Slot-loaded Planar Equiangular Spiral Antenna was proposed in this paper. The Slot-loaded Planar Equiangular Spiral Antenna which based on self-compensation structure was used as radiation cell. The locality of the slot was optimized by the method of moment(mom) to improve the character of the antenna. To match the character of the Planar Equiangular Spiral antenna, its balun is microstrip line-parallel wire which is exponentially gradual type and the antenna was fed by 50 ohm coaxial-cable. The wideband character of the antenna was showed in the simulation and measured data which given in the paper.

**Key words:**method of moment;BALUN;self-compensation structure

## 0 引言

随着无线设备不断向小型化和集成化发展,天线的体积和性能越来越受到业界的广泛关注,天线的体积直接影响设备的集成度和灵活性,如何在有限的体积内实现天线的宽频带特性已成为

新的难题。微带天线以其剖面低、重量轻、体积小等优点近年来广泛应用于小型无线设备,但其固有的窄带特性在一定程度上限制了它的发展。有一类天线的增益、输入阻抗、方向图等电特性参数在一个较宽的频段内保持不变或变化较小,这类天线称为非频变天线。这类天线由其固有的特殊

收稿日期:2005-11-23;修订日期:2006-01-14

作者简介:纪建红(1967-),女,广西桂林人,工程师,在职研究生,从事研究及测试各类高频微波天线;仵大奎(1980-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为宽带小型化天线及阵列天线。

结构而呈现出宽频带特性，因而被越来越多的应用。实现非频变天线的方法主要有两种：一是使天线的结构尺寸按某一特定比例因子变换，其典型天线如对数周期天线；另一种是天线的结构只由角度决定，最典型的就是等角螺旋天线。事实上，频率无关天线只是在一定的频率范围内电特性变化不大，其频带宽度要远大于一般的宽带天线，所以也称之为超宽带天线。虽然平面螺旋天线具有较宽的频带特性，但在一定应用环境下还需对其结构做进一步改进以改善阻抗特性，同时采用一般振子结构的平面螺旋天线在重量和结构紧凑方面不如用微带形式的平面螺旋天线优越。

本文给出一种采用微带实现的缝隙加载平面螺旋微带天线。加载缝隙后，在保留原天线自补结构和非频变特性的同时，进一步改善了天线的低端阻抗特性，因此可以进一步减小天线体积，实现这类天线的宽带小型化。螺旋振子上缝隙的位置采用矩量法进行优化以达到预期的效果，为实现平衡馈电以及减小天线体积，采用具有宽带特性的平行双线形式的宽带平面巴伦。仿真和实测结果均表明该天线具有很好的阻抗特性，与同类无缝隙平面螺旋天线相比其体积可减小约 10% 左右。

## 1 设计原理

### 1.1 螺旋天线结构分析

图 1 为一般的双臂等角平面螺旋天线，其曲线方程为：

$$r = r_0 e^{j\varphi} \quad \text{式中 } r_0 = e^{j\varphi_0} \quad (1)$$

各参数的定义如图 1 中所示，其中向径  $r_0$  为常数，它是  $\varphi_0$  角的向径  $r_1$  的大小，在  $a$  为常数的情况下，式(1)只是由角度确定的方程。通常设计等角螺旋天线是取一圈半螺旋，即外径  $R=r(\varphi=3\pi)=r_0 e^{3\pi j}$ ，若以  $a=0.221$  代入可得  $R=8.03r_0$ ，而工作波段的下限是使天线臂长约为一个波长左右，相当于向径长度为低频端波长的四分之一。该天线有一个有限的工作区，电流沿天线臂衰减很快，从顶点开始到第一个波长远处就可以衰减大约 20dB。其最大辐射方向在平面两边的法线方向上，且为圆极化波。方向图接近  $\cos\theta$ ，因此主瓣宽度约为 90°，当频率由  $f_1$  变到  $f_2$  时，方向图几乎不变，只不过是绕螺旋平面的法线旋转  $\beta=\frac{1}{a} \ln \frac{f_2}{f_1}$

的角度。

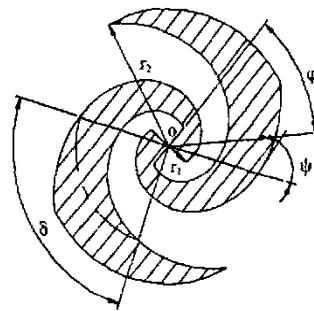


图 1 平面螺旋天线示意图

### 1.2 缝隙加载振子矩量法分析

图 2 为缝隙加载平面等角螺旋振子，在振子上开一系列位置，经过优化且垂直于振子边缘切线的缝隙，两臂上缝隙位置关于中心对称。

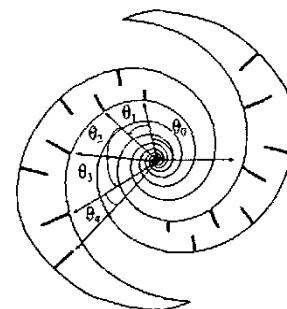


图 2 加载缝隙振子

用矩量法对缝隙位置进行优化的过程如下：

取天线振子表面电流分布

$$\vec{E}(r) = \frac{-j\mathbf{r}}{4\pi k} \int_{\mathbf{v}} \mathbf{J}(r') \bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{v}' \quad (2)$$

$$\bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\mathbf{k}^2 \bar{\mathbf{l}} + \nabla \nabla) g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (3)$$

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \exp(-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \quad (4)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (6)$$

(7)、(8)两式中矢量用黑体表示

$$\mathbf{I} = \mathbf{e}_x \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y + \mathbf{e}_z \mathbf{e}_z \quad (7)$$

天线表面满足边界条件：

$$\mathbf{E}_{in}^i(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{in}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_{in}^s(\mathbf{r}) = 0 \quad (8)$$

其中： $\mathbf{E}^i$ 、 $\mathbf{E}^s$  和  $\mathbf{E}^r$  分别表示总电场、激励电场和辐射电场。

$$\mathbf{L}\mathbf{f} = \mathbf{e} \quad (9)$$

其中： $\mathbf{L}$  表示线性算子（在这表示积分算子）， $\mathbf{e}$  为

已知的激励源,  $f$  是由基函数组成的未知函数。

$$f = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i \quad (10)$$

采用一组权函数对方程两边取内积得:

$$\langle \omega_i, Lf \rangle = \langle \omega_i, e \rangle, i=1, \dots, n \quad (11)$$

综合(9)、(10)、(11)3式可得:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j \langle \omega_i, Lf_j \rangle = \langle \omega_i, e \rangle, i=1, \dots, n \quad (12)$$

用矩阵形式表示为:

$$[G][A] = [E] \quad (13)$$

其中:  $G_{ij} = \langle \omega_i, Lf_j \rangle$      $A_j = \alpha_j$

$$[A] = [G]^{-1}[E] \quad (14)$$

采用分域基函数和点选配的方法:  $\omega_i = \delta(r - r_i)$  为权函数,  $\{r_i\}$  为每段的中点, 选用适当的基函数求得电流分布之后就可以得到天线的输入阻抗、方向图等。经过优化可得到如图 2 中 5 个振子内侧缝隙位置角度的最优值为:

角度类别	$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
大小(度)	100	20	55	60	15

外侧缝隙位于与之相邻的两内侧缝隙之间的中心位置, 且缝隙宽度均为 2mm。

### 1.3 宽带 BALUN

采用同轴线经过宽带渐变式巴伦给天线平衡馈电, 图 3 给出了巴伦结构图。其中渐变线各点的阻抗  $Z(x)$  和导纳  $Y(x)$  与电压  $V$  电流  $I$  的关系为:

$$Z(x) = Z(0)e^{\delta x} \quad (15)$$

$$Y(x) = Y(0)e^{-\delta x} \quad (16)$$

式中,  $\delta$  是指指数线阻抗变化参量, 为实数。当  $\frac{1}{\lambda} < 0.5$  时, 指数线的反射系数最小, 而且具有极宽的带宽。

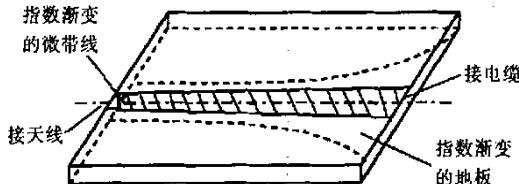


图 3 指数线渐变式巴伦

## 2 仿真及测试数据

在初步确定平面螺旋振子的基本结构后, 用

德国 CST 公司三维电磁仿真软件 CSTMicrowaveStudio 对振子和巴伦进行进一步仿真和优化, 之后用 HP8719D 矢量网络分析仪对天线进行测试, 图 4 给出了无缝隙时 VSWR 仿真结果和加载缝隙时 VSWR 仿真及实测结果。从图 4 中可以看出加载缝隙后平面等角螺旋振子低端阻抗特性得到了明显改善, 说明在同等条件下应用加载缝隙的方法可以进一步减小平面等角螺旋天线的体积, 有利于天线的小型化。

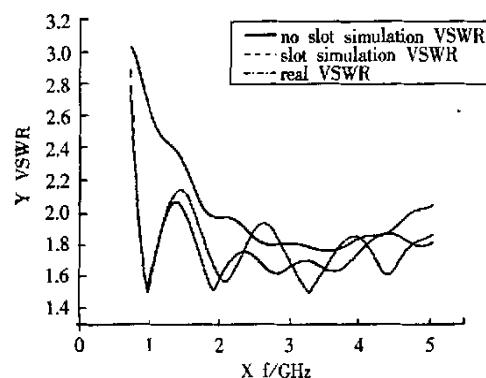


图 4 VSWR 比较图

## 3 总结

本文给出了一种减小平面等角螺旋振子体积的新方法——加载缝隙法, 并用矩量法对加载缝隙的位置进行了优化。仿真及实测结果表明该方法能够进一步改善平面等角螺旋天线低端阻抗特性, 在同等条件下能够进一步减小天线体积, 采用平面指数线渐变式宽带巴伦馈电以实现振子的宽带特性。经加载缝隙的平面螺旋天线具有带宽大、体积小、重量轻等优点, 适于飞行器装载。

### 参考文献:

- [1] 哈林登.计算电磁场的矩量法[M].王尔杰, 等译.北京:国防工业出版社, 1981.
- [2] 宋朝晖, 邱景辉, 张胜辉, 刘志惠.一种平面等角螺旋天线及宽频带巴伦的研究[J].制导与引信, 2003, 2(24): 36-39.
- [3] 李明.用于有源诱饵的小型化天线[J].航天电子对抗, 1998(2):
- [4] 林日禄, 陈海, 吴为公.近代天线设计[M].北京:人民邮电出版社, 1990.
- [5] Song zhao-hui, Qiu jing-hui, Li hong-mei. Novel planar complex spiral ultra-wideband antenna [J]. IEEE 2004 6:35-38.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>