

一种新型的高增益曲线振子天线

曹伟 葛悦禾

·南京邮电学院电子工程系

**中国船舶工业总公司 724 研究所

摘要

本文提出了一个新型的曲线振子八木天线。在这种天线中，所有的单元天线具有 Agnesi 曲线几何形状。采用矩量法对这类天线进行了分析，并采用单纯形法进行了优化。根据优化设计结果加工了一只三单元天线样品，其实测结果与理论计算结果吻合大体一致。

引言

在本文中，我们将推出一种新型的高增益天线，即一种具有 Agnesi 曲线单元的变形八木天线。这种天线具有结构简单和增益高的特点，有可能在电磁兼容测量以及通信领域中找到重要的应用前景。

具有曲线单元振子的八木天线最早由德国人 Landstorfer^{[1][2]}提出。由于这类天线具有结构紧凑和增益较高的特点，长期以来，获得了人们广泛的关注和实际的应用。后来，有不少人采用不同的单元振子曲线形状设计了这类天线，取得了良好的结果^{[3][4][5]}。

本文在前人工作基础上，构思了一种新型的曲线振子天线。在这种天线中，单元振子采用由意大利数学家 Agnesi 于 1748 年提出的所谓“Agnesi 魔线”(Witch of Agnesi)。对这一结构进行矩量法分析和单纯形法优化，并根据计算结果制作了一副中心频率为 714 兆赫的三单元 Agnesi 曲线振子天线。对该天线进行实际测试，其测量数据与理论分析结果吻合良好，天线增益较高。

分析与设计

三单元 Agnesi 曲线振子天线如图 1 所示。与经典的八木天线一样，三根振子处在同一平面上，中间那根振子为有源振子，有源振子两侧的振子均为无源振子。

取定直角坐标系，使振子平面与 YZ 坐标平面相重合，其曲线振子的形状按下列 Agnesi 魔线方程给定：

$$y = c_i - \frac{a_i^3}{a_i^2 + b_i z^2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

在上式中， $a_i, b_i, c_i, i=1, 2, 3$ ，表示第 i 根振子上的待定常数，它们可以通过优化计算获取。

在优化计算中，目标函数取为该阵列端射方向上的增益，它可以表示为^[6]

$$G(\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ) = 30k^2 \left(\frac{\bar{I}^H [A] \bar{I}}{R_m |I_m|^2} \right) \quad (2)$$

式中, R_m 和 I_m 分别表示天线馈电中处的输入电阻和电流, k 是波数。

\bar{I} 表示当用矩量法对该天线进行分析时所得出的展开系数矩阵, \bar{I}^H 是这个矩阵的转置共轭矩阵,

$$\bar{I} = [I_1, I_2, \dots, I_N]^T \quad (3)$$

$$\bar{I}^H = [I_1^*, I_2^*, \dots, I_N^*] \quad (4)$$

在我们的矩量法分析中, 该天线的三根振子共被剖分为 $N+1$ 段, 将出现 $N+2$ 个剖分点, $\{I_0, I_1, \dots, I_N, I_{N+1}\}$ 。展开函数和权重函数均取为三角形分域基函数, 每个函数占两段, 且相邻两函数的定义域之间有一段相重叠。这样的函数共有 N 个: $\{T_n(l), n=1,2,\dots,N\}$, 它们定义为

$$T_n(l) = \begin{cases} \frac{l - I_{n-1}}{I_n - I_{n-1}}, & I_{n-1} \leq l \leq I_n \\ \frac{l - I_{n+1}}{I_n - I_{n+1}}, & I_n \leq l \leq I_{n+1} \\ 0, & l < I_{n-1}, l > I_{n+1} \end{cases} \quad n=1,2,\dots,N \quad (5)$$

$[A]$ 是一个 $N \times N$ 方阵, 它为

$$[A] = \left(\bar{F}_\theta \bar{F}_\theta^H + \bar{F}_\phi \bar{F}_\phi^H \right)_{\theta=90^\circ, \phi=90^\circ} \quad (6)$$

$$\bar{F}_\theta = [f_{\theta 1}, f_{\theta 2}, \dots, f_{\theta N}]^T \quad (7)$$

$$\bar{F}_\phi = [f_{\phi 1}, f_{\phi 2}, \dots, f_{\phi N}]^T \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} f_{\theta n} \\ f_{\phi n} \end{Bmatrix} = \int_{I_{n-1}}^{I_n} T_n(\bar{r}') \exp(jk\bar{r}' \cdot \hat{r}) d\bar{r}' \cdot \begin{Bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix}, \quad n=1,2,\dots,N \quad (9)$$

采用单纯形法对该天线进行优化处理。的优化过程中, 取 (2) 式所示天线增益为目标函数, 参数 $a_i, b_i, c_i, i=1,2,3$ 和每根振子的长度取为优化变量。

和前人的工作比较起来, 除了振子的形状不同以外, 我们所取的优化变量也要多一些, 因而优化得出的增益指标要高一些, 所需振子的长度也可短一些。以三单元曲线振子八木天线为例, 文献[1]~[4]将每根振子的长度取为 1.5 个波长, 所得增益的优化计算值为 $11.5 \sim 11.8$ dB。我们计算得出的优化增益值为 13.4 dB, 而三根振子的长度则分别缩短为 1.35, 1.32 和 1.26 个波长。

根据上述优化设计得出的尺寸, 我们加工制作实际天线样品。在这个实际结构中, 采用 75 欧姆同轴电缆馈电, 并用半波长巴伦保障馈电的平衡性。为保证馈线良好的匹配, 我们还设计了一个带可调螺钉的外方内圆调配装置。

实测结果

该天线的远区辐射方向性图的测试工作是在室外进行的, 其测试方框图如图 2 所示。测量得出的增益上面已给出, 而测量得出的 E 面方向图及其理论计算得出的方向图同时给出在图 3 上。从该图可见, 主射方向一侧吻合较好, 而另一侧

则较差。我们分析，这有可能主要是因为场地测试条件的不对称引起的。

参考文献

- [1] F. M. Landstorfer, "On the optimum shape of linear antennas," IEEE AP-S Symp., Amhest, Mass., 1976.
- [2] F. M. Landstorfer, "New types of Yagi-Uda arrays and log-periodical antennas," Int. Symp. on Antennas and Propagation, Japan, 1978.
- [3] D. K. Cheng and C. H. Liang, "Shaped wire antennas with maximum directivity," Electronics Letters, Vol. 18, Sept. 1982.
- [4] C. H. Liang and D. K. Cheng, "Directivity optimization for Yagi-Uda arrays of shaped dipoles," IEEE Trans., AP-31, May 1983.
- [5] 周朝栋等, 《线天线理论与工程》, 西电出版社, 1988.
- [6] R. F. Harrington, 《Field computation by moment methods》, Macmillan, New York, 1968.

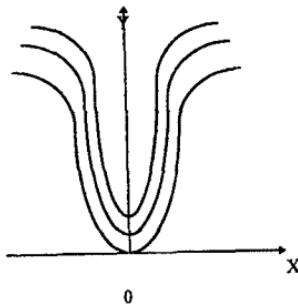


图 1. 三单元曲线振子天线

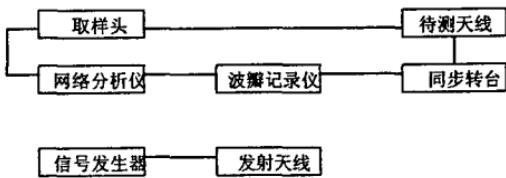


图 2. 天线方向图测试框图

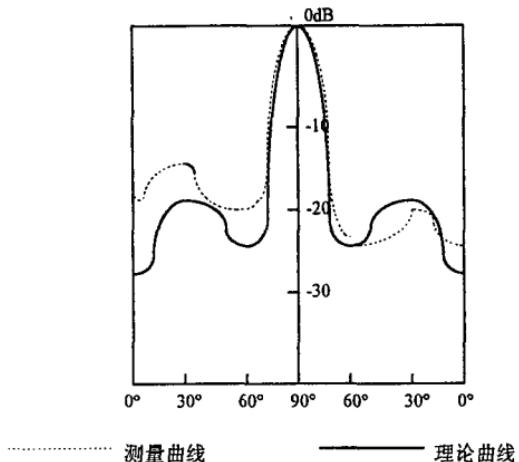


图 3. 三单元曲线振子天线 E 面方向图的
测量及其理论计算曲线

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)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)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),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>