

# 笼形结构对甚低频 T 形发射天线电特性影响的分析<sup>\*</sup>

赵 锋 柳 超

(海军工程大学 武汉 430033)

**摘 要** 笼形结构通过等效加粗导线直径可降低甚低频 T 形发射天线的特性阻抗,改善输入阻抗特性,展宽天线工作带宽。文章采用矩量法计算了笼形与线形两种甚低频发射天线结构、不同笼直径、不同顶线长度天线的输入阻抗特性,并进行了分析对比。

**关键词** 甚低频; 带宽; T 形天线; 矩量法

**中图分类号** TN82

## Analysis of the Influences of Cage Structure for the Electrical Characteristic of VLF T-type Transmitting Antenna

Zhao Feng Liu Chao

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

**Abstract** The wire diameter of VLF T-type antenna can be equivalently increased by using cage structure. The characteristic impedance and bandwidth of the antenna can be improved and extended. The both input impedance of the VLF antenna with cage and liner two structures are calculated based on method of moment for different diameters of the cage and different length of the top wire. And the results are compared and analyzed.

**Key Words** VLF(very low frequency), bandwidth, T-type antenna, method of moment

**Class Number** TN82

### 1 引言

甚低频波是波长为 10~100km,频率为 3~30kHz 的无线电超长波,波长可与地球尺寸相比拟,天线架设的电高度受到限制,若采用水平悬挂的天线,受地面负镜像的作用,天线的辐射能力很弱,水平天线激励水平极化波,当波沿地面传播时衰减很大,因此要求甚低频天线采用垂直于地面架设的直立天线形式<sup>[1]</sup>,辐射垂直极化波,衰减较小。

甚低频发射天线通常是工作在高电压大电流状态下的单极子天线,尽管甚低频发射天线结构庞大,但天线的几何尺寸与波长相比仍然小得多,辐射电阻很小,一般仅为零点几欧姆,天线效率很低。天线上的电流分布近似为直线分布,天线顶端电流接近于零,为改善天线的电流分布提高天线辐射效

率,通常在天线顶端加载,T 形就是常用的甚低频发射天线形式。

笼形结构通过等效加粗导线直径降低天线特性阻抗,改善输入阻抗特性,在一定程度上扩展了天线频带<sup>[2]</sup>。本文提出用笼形结构代替导线的 T 型笼天线形式,并计算其阻抗特性。甚低频 T 型笼天线结构复杂,用传统的解析方法来计算该天线的输入阻抗,误差大,难以得到高精度的结果<sup>[1]</sup>。本文采用数值计算方法(矩量法)对 T 型笼天线不同笼直径、不同顶线长度情况下的输入阻抗分别予以计算并与 T 形天线进行比较分析。

### 2 计算模型

基本模型为理想地面上高 300m 顶容线长 600m 的 T 形天线,频率范围 10~50kHz,并在此

• 收稿日期:2011 年 1 月 1 日,修回日期:2011 年 2 月 3 日

作者简介:赵锋,男,硕士研究生,研究方向:对潜通信。



基础上进行  
笼形结构的  
替换。本文

图 1 基本 T 形天线 图 2 笼形结构 主要研究笼形结构对 T 形天线阻抗特性的影响。采用矩量法计算甚低频直立天线时用细线近似<sup>[3]</sup>,即电流沿导线的轴线流动,体电流密度  $J$  可由电流  $I$  近似表示,忽略导线上环向电流和线端点上的径向电流,轴线上的电流只与导线长度有关。模型如图 1 所示。

### 3 矩量法计算的原理和方法

矩量法将待求函数用已知的函数族(基函数)展开表示,并用矩阵的方式求解线性方程。本文采用正弦插值基函数将线上的电流展开并计算天线的阻抗特性。

$$f_i(s) = A_i + B_i \sin k_0(s - s_i) + C_i \cos k(s - s_i)$$

$$|s - s_i| \leq \Delta_i/2$$

式中的  $s_i$  为第  $i$  段中心的  $s$  值,  $\Delta_i$  为第  $i$  段的长度。这种基函数对线结构特别是长线结构具有较快的收敛性<sup>[4~5]</sup>。

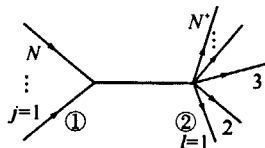


图 3 所示导线  
段结构推导基函数  
的一般形式。那么  
对具有  $N$  段线结构

图 3 T 形天线第  $i$  段计算模型的总电流展开式是

$$I(s) = \sum_{i=1}^N a_i f_i(s)$$

式中第  $i$  段中心的基函数是

$$f_i(s) = f_i^0(s) + \sum_{j=1}^{N^-} f_j^-(s) + \sum_{j=1}^{N^+} f_j^+(s)$$

设外加场为  $\vec{E}^0(\vec{r})$ , 在天线表面上产生感应电流  $\vec{J}$  和电荷  $\sigma$ , 再由  $\vec{J}$  和  $\sigma$  形成辐射, 辐射场可表示为电流的标量方程, 推导见文献<sup>[4]</sup>:

$$-\hat{s} \cdot \vec{E}^0(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L I(s') \cdot (k^2 \hat{s}' \cdot \hat{s} - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'}) g(\vec{r}, \vec{r}') ds'$$

其中:

$$g(\vec{r}, \vec{r}') = \exp(-jk|\vec{r} - \vec{r}'|) / |\vec{r} - \vec{r}'|, k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}, \eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

上式便为待求电流的电场积分方程(EFEI)。其中  $s$  为在  $r$  处沿电线轴的距离,  $\hat{s}$  为沿电线轴的单位矢量。由于  $\vec{r}$  是位于轴线  $s'$  上的点,  $\vec{r}$  是导线表面  $s$  上的点, 所以有  $|\vec{r} - \vec{r}'| \geq a$  且积分项有界。

将上述电流展开并代入电场积分方程, 采用点

选配的方法进行检验,  $w_m(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_m)$  为检验函数, 其中  $\vec{r}_m$  为每条线段的中心。再两边取内积可得矩阵形式方程组:

$$-\hat{s} \cdot \vec{E}^0(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N a_i (-j\eta/4\pi k \int_{L_i} f_i(s') \cdot (k^2 \hat{s}' \cdot \hat{s}_m - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'}) g(\vec{r}_m, \vec{r}') ds')$$

$$m=1, 2, \dots, N$$

上式可简化为  $[Z][I]=[V]$ , 求解该矩阵方程就可得到线上的电流展开系数, 这样就可以求出天线的输入阻抗。

### 4 数值计算结果及分析

T 形天线直立部分为辐射体, 水平顶线主要起加载作用。本文将对 10~50kHz 频段, 天线各项尺寸一致情况下单根导线结构与笼形结构的输入阻抗进行计算并比较分析, 而且笼形结构情况下又对不同直径、不同顶线长度的输入阻抗进行计算并对比, 分析笼形结构对天线阻抗特性的影响, 以及笼的尺寸参数对天线阻抗特性的影响。

基本模型为理想地面上高 300m 顶线长 600m, 底端馈电的线性结构 T 形天线, 不考虑电网、拉线、绝缘子和纤绳铁塔等的影响, 模型如图 1 所示, 并在此基础上把线性结构改为用九根导线围成的直径 2m 的笼形结构如图 2 所示。在笼形结构基础上将笼直径调整为 4m、6m, 顶线调整为 1000m、2000m 并分别进行计算对比。

现将不同情况下输入阻抗对比如下:

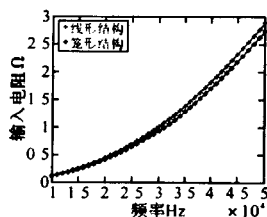


图 4 线形与笼形结构输入电阻对比

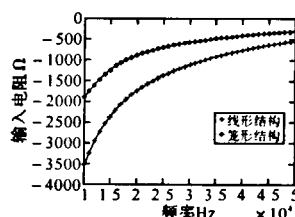


图 5 线形与笼形结构输入电抗对比

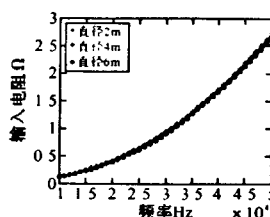


图 6 不同直径天线的输入电阻对比

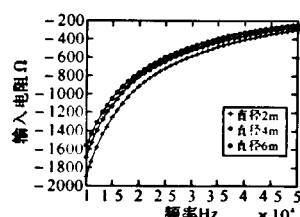


图 7 不同直径天线的输入电抗对比

(下转第 144 页)

显示方案 1 也是风险最小的方案。结果说明了本文的评估结果具有较高的可信性。

## 5 结语

本文所建立的评估指标,充分的考虑了项目技术可行性的内涵和评估指标的可操作性的问题,比较全面的总结了影响技术可行性的因素,同时又避免了指标之间的交叉。本文所选取的评估方法,也有一定的局限性,就是评估指标之间应该尽量少的交叉,其优点是从理论上讲,能够充分发挥专家群的智慧,将各个专家的评估结果很好的聚合,可以得出较为科学的评估结论,从实际应用上讲,评估过程简单,方法实用。本文所提出的指标与方法可以较好地解决大型武器装备项目的技术可行性评估问题,具有一定的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 吕宏. 我军武器装备科研项目评价体系研究[J]. 北京理工大学学报, 2005(4): 10~12
- [2] 程永生, 等. 军事高技术与信息化武器装备[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009(3)
- [3] 政策与管理. 美国 NASA 大型项目“拖、涨”问题严重[J]. 国防科技情报, 2009(12): 10~12
- [4] 安茂春, 等. 国外技术成熟度评价方法及其应用[J]. 评价与管理, 2008(2): 1~3
- [5] 王绪智, 等. 美军装备发展经济可承受性研究[D]. 总装备部科技信息研究中心, 2008(1)
- [6] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 212~214
- [7] 吕建伟, 等. 装备研制方案评估的群决策方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(2): 42~46
- [8] 蔺美青, 等. 基于 TOPSIS 评估算子的装甲装备作战能力评估[J]. 指挥控制与仿真, 2006(4): 56~59

(上接第 88 页)

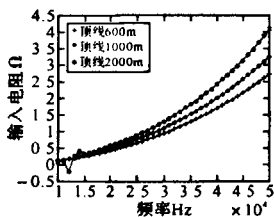


图 8 不同顶线长度  
天线的输入电阻对比

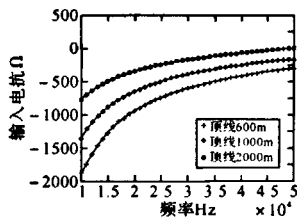


图 9 不同顶线长度  
天线的输入电抗对比

由以上对比图可以得出如下结论: 笼形结构相对线形结构的输入电阻略微减小且频率越高减小越多, 甚低频段减小不明显, 输入电抗部分(容抗)比线形结构明显减小; 笼直径变化天线输入电阻无明显变化, 随着直径的增大天线输入电抗减小且频率越低减小越明显; 天线顶长增加输入电阻增大且频率越高增加越明显, 天线电抗减小且频率越低减小越明显。

## 5 结语

利用矩量法对 T 形天线不同结构形式不同尺寸情况下进行仿真计算, 笼形结构相对线形结构电抗明显减小且增大笼直径、增加顶长亦可减小天线的电抗, 低频段结构、尺寸的变化对天线的输入电阻影响不大。笼形结构可改善天线的阻抗特性, 展宽天线工作频带, 在工程上具有重要的参考意义。

## 参考文献

- [1] 梁高权. 甚低频和超长波的辐射与传播[M]. 海军工程大学, 2002: 37~43
- [2] 宋铮, 张建华, 黄治. 天线与电波传播[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 61~62
- [3] King. R. W. P. Theory of Linear Antenna[M]. New York: IFI/Plenum, 1971: 15~68
- [4] G. J. Burke, A. J. Poggio. Numerical Electromagnetics Code(NEC)-method of moments, Rep. UCID 18834, Lawrence Livermore Laboratory, CA, 1981
- [5] Fikioris. G. An Application of Convergence Acceleration Methods[J]. IEEE Trans on AP, 1999
- [6] Miller E. K, Dearick F. J. Some Computational Aspects of Thin-wire Modeling[M]. Numerical and Asymptotic Techniques in Electromagnetics, Mittra Red, New York: Springer-Verlag, 1975: 89~127
- [7] 柳超, 蒋华, 黄金辉. 甚低频通信[M]. 海潮出版社, 2008: 73~74
- [8] A. D 沃特. 甚低频无线电工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973: 51~65
- [9] 张志刚, 柳超, 龚降法. 基于矩量法仿真的笼形天线宽带化设计[J]. 计算机仿真, 2008: 335~357
- [10] 王元坤, 李玉权, 文希理. 线天线的宽频带技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995: 38~76
- [11] 周朝栋, 杨恩耀. 电小天线[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990: 7~9

## 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,一直致力和专注于微波、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>