

文章编号 1005-0388(2009)02-0332-05

## 远距离短波鱼骨天线的仿真设计

张志刚 郑龙根 王跃平 柳超

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 研究了鱼骨天线工程设计中辐射体导线材料更换的可行性和天线架设高度的优化设计问题。采用矩量法计算天线的辐射特性。在预定通信区域均匀设置25个发射点,将矩量法计算的天线三维方向图数据与短波天波信道仿真模型相结合,计算各发射点与鱼骨天线构成的点对点通信链路的时间可靠性,以在不同频率、季节、时间和太阳黑子数时达到规定可靠性的计算点的总数量来衡量12 m、17 m、25 m三种架高的天线的覆盖能力。计算结果表明:天线辐射体材料采用不锈钢代替铜包钢对效率影响很小,替换可行;17 m架高的鱼骨天线在预定通信区域覆盖能力与25 m架高天线相当,高于12 m架高天线的覆盖能力。

**关键词** 鱼骨天线;天线仿真;信道仿真;通信覆盖区

**中图分类号** TN82

**文献标志码** A

## Simulation and design of long-distance HF fishbone antenna

ZHANG Zhi-gang ZHENG Long-gen WANG Yue-ping LIU Chao

(College of Electronic Engineering, Naval

University of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

**Abstract** The feasibility of adopting alternate radiation wire material and the determination of radiator height above the ground in the design of a fishbone antenna are discussed. Moment of methods (MOM) is used to simulate the radiation property of antenna. Twenty-five positions distributed evenly in concerned communication area are selected as transmitting points. 3D radiation pattern data from MOM simulation are integrated with HF sky-wave channel model to simulate the time reliability of links between transmitting points and the fishbone antenna. The area coverage capability of 12 m, 17 m and 25 m high fishbone antennas are numerically evaluated in terms of total number of transmitting points that satisfied the required reliability at different frequency, seasons, time and sun spot numbers. Simulation results show that stainless wire is a good substitute for copper-covered steel wire as radiator. A fishbone antenna with a height of 17 m exhibits nearly the same communication ability as that of 25 m in concerned area and performs much better than that of 12m.

**Key words** fishbone antenna; antenna simulation; HF channel simulation; coverage area of communication

## 引言

鱼骨天线是一种宽带行波天线,具有方向性强、副瓣电平低的优点,作为接收天线时具有良好的抗干扰特性,目前主要用于远距离短波收音。某工程中需要架设若干副鱼骨天线,用于覆盖某海域的短波收音,在设计的过程中遇到两个问题:

### 1) 辐射体导线材料更换的可行性

传统设计多采用铜包钢导线作为辐射体,具有导电率高、抗拉力强的优点,但铜包钢质地较硬,抗弯折能力差,天线需现场制作,而鱼骨天线结构复杂,现场加工制作和后期的维护都比较困难。因此希望在不影响天线电气性能的前提下选择一种结构柔软的材料来代替铜包钢导线,拟采用1cr13/ $\Phi 3$ 不锈钢钢丝绳来代替原有的 $\Phi 2.0$ 铜包钢导线。

### 2) 天线架高的选取

通常而言,水平天线架设电高度越高,近地面第一波瓣的仰角越低,通信距离也越远。对于预定的通信区域必须合理地选择天线的架设高度,以提高通信的可靠性。

关于导线材料对鱼骨天线性能的影响分析,尚未见到文献报道,文献[1]对鱼骨天线的分析是将其近似为无耦合的天线阵,分析复杂且精度有限,也不能计算导线材料的影响。本文采用矩量法对鱼骨天线的辐射性能进行仿真计算,实践证明,只要建模准确,用矩量法分析线天线具有较高的精度[2]。

在预定的通信区域,天线的架高对其覆盖能力的影响是非常复杂的,首先需要考虑天线架高对方向图的影响,由于短波远距离通信是依赖电离层的反射而实现,因此还必须考虑电离层的传播特性,而天线的方向图是随频率改变而变化的,电离层的特性也受到诸多因素如时间、季节等的影响,因此需要综合考虑各方面的影响,才能得到准确的结果。目前还没有相关的研究报道。

## 1 天线矩量法建模

### 1.1 积分方程

在矩量法中,鱼骨天线可视为既有分布加载(导线电导率)又有集中加载的圆柱细导线结构。对于集中加载,在加载区长度比天线长度小很多的情况下,可用狄拉克函数来代替加载区及其邻域中加载阻抗的分布规律,表达式为

$$Z(z) = Z_i \delta(z - z_i) \quad (1)$$

式中, $Z_i$ 为加载处的集总元件阻抗; $z_i$ 为加载区中

心点位置。激励区采用 $\delta$ 电压源时外加电场可表示为

$$E_x = V\delta(z) \quad (2)$$

式中, $V$ 为激励电压。采用海伦积分方程,表达式为

$$\int_{-L}^L I(z')g(r)dz' + \frac{1}{j\eta_0} \int_0^z Z(z')I(z')\text{sinc}k_0(z - z')dz' = C\cos k_0 Z + \frac{V}{j2\eta_0} \text{sinc}k_0 |z| \quad (3)$$

式中, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为自由空间波阻抗; $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ ;  $C$ 为积分常数[3-6]。

### 1.2 基函数的形式

用矩量法计算线天线时,基函数的选取对于计算的速度及精度均有很大的影响,本文采用正弦插值基,其形式为

$$I_j(s) = A_j + B_j \text{sinc}(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j) \quad (4)$$

$$|s - s_j| < \Delta j/2$$

式中, $\Delta j$ 为第 $j$ 段的长度; $s_j$ 为该段中点的坐标; $A_j, B_j, C_j$ 三个未知系数,两个可通过电流、电荷连续性方程确定,另一个可作为待求量代入矩阵方程来进行求解。对于圆柱状细导线,由于该基函数较好地近似于实际电流分布,因而收敛较快[7]。

## 2 天线辐射性能仿真计算

3 MHz 时铜的趋肤深度为 0.038 mm, 30 MHz 时铜的趋肤深度为 0.012 mm, 而  $\Phi 2.0$  铜包钢铜层厚度通常大于 0.1 mm, 为铜趋肤深度的 3~9 倍。因此在短波段电导率可取为  $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S}$ , 不锈钢钢丝绳电导率取为  $\sigma = 0.14 \times 10^7 \text{ S}$ 。用矩量法对采用两种不同导线材料时鱼骨天线的辐射效率进行计算和比较, 天线型号为  $YR \frac{21}{8} \cdot \frac{200}{4.4} 17$ , 其中 YR 表示电阻耦合单鱼骨天线; 21 为振子数量; 8 为振子单臂长, 单位为 m; 200 为耦合电阻阻值, 单位为  $\Omega$ ; 4.4 为相邻振子的间距、17 为天线架高, 单位均为 m。对比结果如图 1 所示。

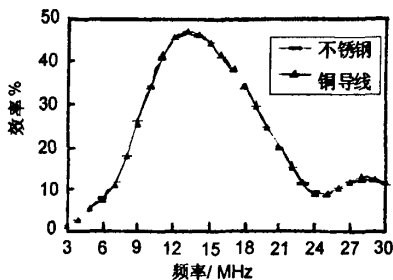


图1 导线材料对天线电性能的影响

计算结果表明更换导体材料对天线的辐射效率几乎没有影响,用1cr13/ $\Phi 3$ 不锈钢绳代替原有的 $\Phi 2.0$ 铜包钢导线可行。

采用矩量法对  $YR \frac{21}{8} \cdot \frac{200}{4.4} 12$ 、 $YR \frac{21}{8} \cdot \frac{200}{4.4} 17$ 、 $YR \frac{21}{8} \cdot \frac{200}{4.4} 25$  三种架高时天线的辐射性能进行计算,对比如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出,在低频段架设高度对主瓣仰角的影响不明显,随着频率的升高,由于高度差相对波长变大,导致主瓣仰角相差比较明显,但到 20 MHz 以后,主瓣仰角降低变缓,27~30 MHz 时 25 m 架高天线最大辐射仰角发生跳变是由于近地面第一波瓣变为副瓣,第二波瓣变为主瓣,导致最大辐射仰角升高。总体而言天线架高越高,主瓣仰角越低,主瓣宽度越窄,方向性越强。

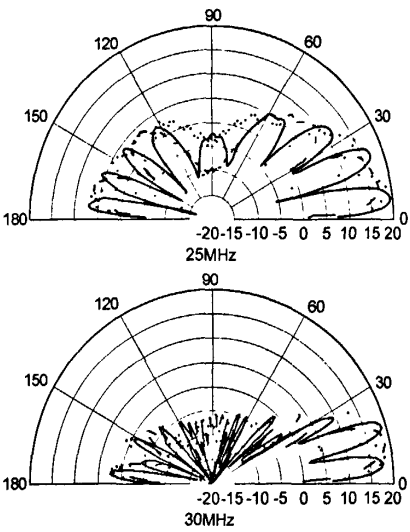
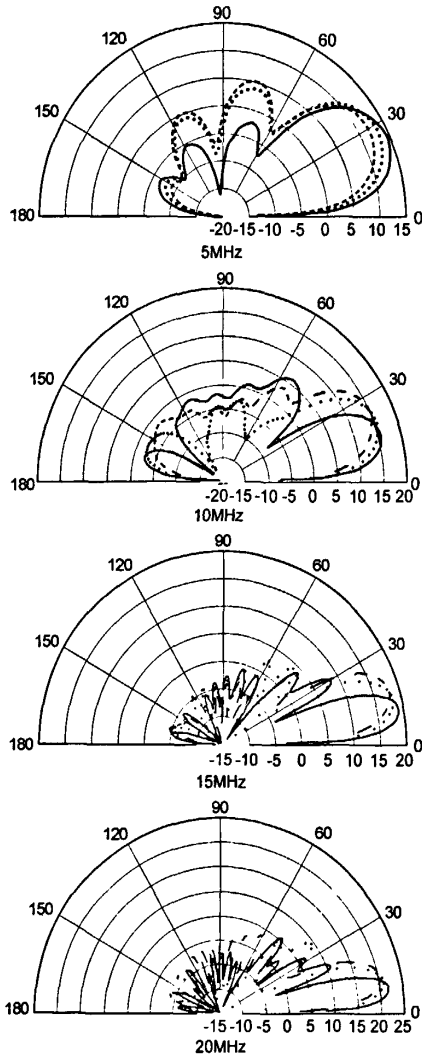


图 2 天线轴线所在垂直面方向图对比  
(--- 12m, ... 17m, — 25m)

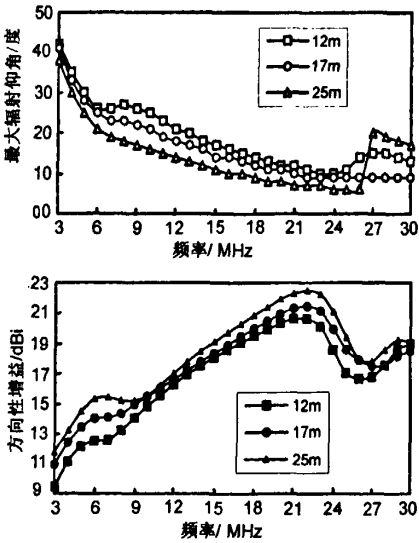


图 3 不同架设高度时天线最大辐射仰角和方向增益对比

3 天线覆盖能力计算

鱼骨天线预定的通信区域是一个内径为  $r_1$ /km,外径为  $r_2$ /km,夹角为  $\alpha$  的扇形区域。直接比较接收天线在连续区域的覆盖能力是比较困难的,为了能对天线的通信覆盖能力进行量化的计算和比较,在通信区域内等角度间隔均匀设置 25 个点作为计算点,如图 4 所示,并以计算点作为发射点与鱼骨天线建立点对点通信链路。

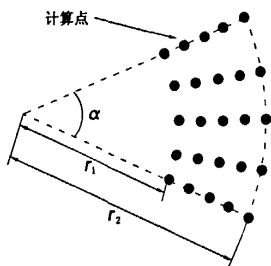


图 4 通信区域和计算点分布

对于点对点通信而言,根据给定信噪比下的时间可靠性确定的可用频率集能够真实地反映天线的覆盖能力。可用频率集不仅与电离层特性(主要受季节、时间与太阳黑子数影响)有关,而且与发信天线、辐射功率、天线辐射性能、人为高频噪声和接收机灵敏度有关,为准确评估天线的实际通信能力,需对各种计算条件进行组合,综合评估天线在各种不同条件下的覆盖能力。本文选取的计算条件见表 1。

表 1 通信电路计算条件

| 项目      | 计算条件                                     |
|---------|--|
| 接收点人为噪声 | -150 dBW/Hz                              |
| 信噪比要求   | 10 dB                                    |
| 太阳黑子数   | 10, 60, 110                              |
| 季节      | 冬季(1月)、夏季(7月)                            |
| 时间      | 北京时间 00:00、04:00、08:00、12:00、16:00、20:00 |
| 频率      | 范围:3~30 MHz;频率间隔:1 MHz                   |
| 发射天线设置  | 10 m 鞭天线,功率 800W                         |

将矩量法计算的天线三维方向图数据与短波天波信道模型相结合,计算各点与鱼骨天线构成的通信链路的可靠性,用达到规定可靠性的计算点的总数量来衡量天线的覆盖能力。电离层传播模型采用 ITU-R P.533 模型,大气噪声利用 CCIR 报告 322-3 中给出的各个季节以及不同时段内的平均噪声系数曲线计算<sup>[8]</sup>。考虑所有组合条件后总统计点数为 25 个计算点×2 个季节×3 种黑子数×6 个时刻×28 个频率点,共 25200 个点。统计了 12m、17m、25m 架高天线满足 90%和 80%时间可靠性的点数,见表 2。

表 2 12 m、17 m、25 m 架高天线覆盖能力对比

| 可靠性 | 点数<br>(12m 架高) | 点数<br>(17m 架高) | 点数<br>(25m 架高) |
|-----|----------------|----------------|----------------|
| 90% | 8069           | 10968          | 11061          |
| 80% | 10155          | 12383          | 12335          |

从表中可以看出,在预定的通信区域,12 m 架高的天线满足 90%和 80%可靠性的点数明显低于

17 m、25 m 天线,而 17 m 架高天线 90%可靠性下的点数略低于 25 m 架高的天线,但 80%可靠性下的点数反而略高,总体而言两者的覆盖能力基本相当,因此工程选用 17 m 架高比较合适。

4 结 论

矩量法计算表明,鱼骨天线辐射体导线材料采用 1cr13/Φ3 不锈钢丝来代替原有的 Φ2.0 铜包钢导线对辐射效率影响很小,替换可行。采用新材料后天线整体为柔索结构,便于工厂一次定型和运输。

通过将天线仿真技术与短波天波信道仿真技术相结合,对 12 m、17 m、25 m 三种不同架设高度下,鱼骨天线在预定区域的通信覆盖能力进行计算,计算时按照通信系统的实际情况设定发信天线的型式、功率、接收点人为噪声、接收机信噪比要求,并充分考虑了频率、季节、时间、太阳黑子数等因素的影响,为实际的工程设计提供了准确的依据。

参考文献

[1] 爱金堡. 天线[M]. 毕德显,叶根涵,蒋同泽,译. 北京:人民邮电出版社,1956:213-256.

[2] 张小林,高火涛. 近地短波鱼骨天线矩量法建模及应用[J]. 电波科学学报,2007,22(2):281-285.

ZHANG Xiaoling, GAO Huotao. Moment method modeling and application for shortwave fishbone antennas above ground[J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE,2007,22(2):281-285. (in Chinese)

[3] 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.

[4] 柳超,刘其中,梁玉军,等. 舰用短波宽带鞭状天线研究[J]. 电波科学学报,2006,21(6):955-958.

LIU Chao, LIU Qizhong, LIANG Yujun, et al. Design of broadband shipboard whip-type antenna at high frequency band[J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE,2006,21(6):955-958. (in Chinese)

[5] HARRINGTON R F. Field Computation by Moment Methods[M]. New York: Macmillan, 1968.

[6] 延晓荣,金元松,罗翠梅. 阻容加载偶极天线的宽带性能及效率分析[J]. 电波科学学报,2000,15(2):169-173.

YAN Xiaorong, JIN Yuansong, LUO Cuimei. Analysis of wide-band properties and efficiency for dipole antennas with resistive and capacitive loadings[J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE,2000,15(2):169-173. (in Chinese)

- [7] BURKE G J, POGGIO A J. Numerical Electromagnetics Code (NEC)-Method of Moments[R]. Rep UCID 18834, Lawrence Livermore Laboratory, CA, 1981.

- [8] 冯锡生, 田秀占, 叶林云. 短波通信电路设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.



张志刚 (1977—), 男, 湖北人, 海军工程大学电子工程学院博士, 主要研究方向为天线数值计算、宽带天线设计等。



郑龙根 (1965—), 男, 江苏人, 海军工程大学电子工程学院副教授, 主要研究方向为电磁场与天线。



王跃平 (1974—), 男, 湖南人, 海军工程大学电子工程学院讲师, 主要研究方向为天线数值计算、短波天线工程设计等。

(上接第313页)

#### 参考文献

- [1] PETERS L J, DANIELS J J, YOUNG J D. Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool[J]. Proc. IEEE, 1994, 82(12): 1802-182.
- [2] 刘培国, 毛钧杰. 电波与天线[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.
- [3] BAWER R, WOLFE J J. A printed circuit balun for use with spiral antennas[J]. Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions on, 1960, 8(3): 319-325.
- [4] DUNCAN J W, MINERUA U P. 100:1 bandwidth balun transformer[J]. Proc. IRE, 1960, 48(2): 156-164.



肖志文 (1978—), 男, 湖北人, 国防科技大学电磁场与微波专业博士生, 从事天线、探地雷达等方向的研究。



黄晶晶 (1983—), 男, 江苏人, 国防科技大学电磁场与微波专业硕士, 从事天线、微波测量等方向的研究。



何建国 (1954—), 男, 湖南人, 国防科技大学教授、博士生导师、中国电子学会高级会员, 从事现代微波系统与天线技术等方向的研究。

## 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>