

中波天线辐射场特性分析

李幸,王娜,李莉

(北京邮电大学, 北京)

摘要: 中波发射天线由于其发射功率大, 覆盖范围广, 地波传播, 对周围电磁环境的影响很大, 所以中波天线周围辐射场的特性研究对电磁环境评价工作有着借鉴和指导作用, 具有很大的工程应用价值。本文主要采用了两种方法对中波天线辐射场的特性进行研究。一种是应用天线场理论中辐射场的研究方法, 另一种是通过 XFDTD6.0 软件仿真, 应用时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain Method 简称 FDTD Method) 的研究方法, 并将所得结果与实测结果进行分析比较, 为电磁环境评价工作提供了借鉴方法。

关键字: 中波天线 电磁辐射 天线理论

中图分类号: TN822

Analysis of Medium Wave Antenna

LI Xing, Wang Na, LI Li

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing)

Abstract: The radiation field of medium wave antenna covers wide area, using terra wave propagation mode. It has big power and affects greatly to the electromagnetism environment. The theory research of radiation field characteristic around medium wave antenna is an instruction to the work of electromagnetic environment evaluation in field theoretic calculation and has great project application value. This paper is mainly about two methods used in the research of radiation field characteristic around medium wave antenna. One method is antenna theory, and the other is FDTD Method (Finite-Difference Time-Domain Method). Finally, the radiation field around medium wave antenna is calculated by both antenna theory method and FDTD method, the difference is analyzed by being compared to the result of measurement.

Key Words: Medium Wave Antenna, Electromagnetic radiation, Antenna Theory

1、引言

1.1 中波天线国内现状

中波广播作为一种传统媒体, 以其投资少、接收方式简单, 在科技高速发展的今天仍然是适合国情的宣传手段。根据我国的中波广播覆盖技术要求, 中波发射天线发射垂直极化波, 地波覆盖。因此, 目前我国的中波发射天线从其结构形式上分, 有采用最为广泛的底部绝缘拉线铁塔, 此外还有小部分底部绝缘的自立式铁塔, 对于小功率发射台, 亦有部分 T 形或 Γ 形天线: 从其功率等级上分, 有大功率天线 (功率容量为 $n \times 200kW$), 中等功率天线 ($100kW$ 、 $50kW$ 、 $30kW$), 小功率天线 ($10kW$ 以下); 从天线水平方向图上分, 有不定向天线 (单塔天线) 和定向天线 (二塔天线、四塔天线、八塔天线)。

1.2 中波天线的现存问题

近年来, 随着我国城镇化的不断发展, 城市规模越来越大, 许多原先建在城市郊区的发射台, 其所处位置慢慢的变成为市区, 有的发射台周围成了居民区, 严重影响了中波台的广播效果, 也

对周围的电磁环境有严重影响。因此, 许多省市一级的中波发射台面临着搬迁或调整的任务。

由于中波发射天线的覆盖范围广, 地波传播, 发射功率大, 对周围电磁环境的影响很大, 所以, 中波天线周围辐射场的特性研究对电磁环境评价工作有着借鉴和指导作用。

2、天线场理论分析

本文研究的是采用单根铁塔的非定向天线作为中波发射天线。垂直中波天线与其周围的地面构成一个完整的辐射器。地面是中波接地天线回路的一部分, 天线的损耗主要来自于地面损耗。中波天线的增益与塔高有直接关系, 对于高度较低的轻型塔, 主要是通过在天线底部周围铺设辐射状金属地网, 减少电流损耗, 提高天线效率来弥补天线辐射的不足, 提高天线的辐射效率。

2.1 电场强度计算

中波天线的位置示意图如图 1 所示:

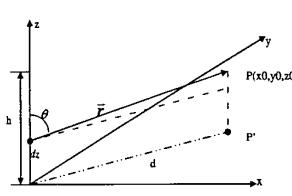


图 1 天线位置示意图

线元 dz 坐标为 $(0, 0, z)$ ，矢径

$\bar{r} = x_0 \bar{x} + y_0 \bar{y} + (z_0 - z) \bar{z}$ ，由矢量关系得：

$$r^2 = d^2 + (z_0 - z)^2, d^2 = x_0^2 + y_0^2$$

$$\sin \theta = d/r, \cos \theta = (z_0 - z)/r$$

$$\bar{d} = x_0 \bar{x} + y_0 \bar{y}$$

$$\bar{r} = \bar{z} \cos \theta + \bar{d} \sin \theta = \frac{x_0}{r} \bar{x} + \frac{y_0}{r} \bar{y} + \frac{(z_0 - z)}{r} \bar{z}$$

$$\bar{\theta} = -\bar{z} \sin \theta + \bar{d} \cos \theta = \frac{z_0 - z}{dr} x_0 \bar{x} + \frac{z_0 - z}{dr} y_0 \bar{y} + \left(-\frac{d}{r}\right) \bar{z}$$

电基本振子的电场强度表达式：

$$dE_r = \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz$$

$$dE_\theta = \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \sin \theta \left[\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz$$

考虑中波天线的近场，对各个线元的电场强度进行矢量积分，得到：

$$\bar{E}_r = \int \bar{r} dE_r = \bar{x} \int_0^h \frac{x_0}{r} \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{y} \int_0^h \frac{y_0}{r} \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{z} \int_0^h \frac{z_0 - z}{r} \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz$$

$$\bar{E}_\theta = \int \bar{\theta} dE_\theta = \bar{x} \int_0^h \frac{z_0 - z}{dr} x_0 \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \sin \theta \left[\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{y} \int_0^h \frac{z_0 - z}{dr} y_0 \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \sin \theta \left[\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{z} \int_0^h \left(-\frac{d}{r}\right) \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} I_m \sin k(l-|z|) \sin \theta \left[\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz$$

对于有限导电率的大地，图 2 是大地对中波天线电磁场的反射示意图：

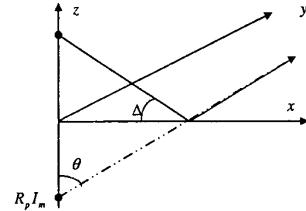


图 2 大地反射示意图

其反射系数：

$$R_p = \frac{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) \sin \Delta - \sqrt{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \Delta}}{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) \sin \Delta + \sqrt{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \Delta}} =$$

$$\frac{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) \cos \theta - \sqrt{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) - \sin^2 \theta}}{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) \cos \theta + \sqrt{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) - \sin^2 \theta}}$$

$$(\Delta = \frac{\pi}{2} - \theta)$$

ϵ_r 、 σ 为大地的相对介电常数和电导率。

当有地网反射时，不同的线元 dz ，其反射系数可能不同。

镜像产生的电场强度为：

$$\bar{E}_r = \int \bar{r} dE_r = \bar{x} \int_{-h}^0 \frac{x_0}{r} \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} R_p I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{y} \int_{-h}^0 \frac{y_0}{r} \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} R_p I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{z} \int_{-h}^0 \frac{z_0 - z}{r} \frac{2}{4\pi\omega\epsilon} R_p I_m \sin k(l-|z|) \cos \theta \left[\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz$$

$$\bar{E}_\theta = \int \bar{\theta} dE_\theta = \bar{x} \int_{-h}^0 \frac{z_0 - z}{dr} x_0 \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} R_p I_m \sin k(l-|z|) \sin \theta \left[\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz +$$

$$\bar{y} \int_{-h}^0 \left(-\frac{d}{r}\right) \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} R_p I_m \sin k(l-|z|) \sin \theta \left[\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right] e^{-jkz} dz$$

对上述电场强度的 x, y, z 分量分别求和后得 E_x, E_y, E_z ，场强 E 为：

$$E = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2}$$

电流幅值计算

设定塔形中波天线工作于远区场，由于电场强度与电流幅值有关，那么通过电场强度所求得的辐射功率也与电流幅值有关，所以可以利用辐射功率的值反推电流幅值。

2.2

考虑大地影响的中波天线在远场区的电场强度为:

$$\begin{aligned}
 E_\theta &= \int_0^h j \frac{60\pi I_m \sin k(l-|z|)}{r_0 \lambda} \sin \theta e^{-jk_0} e^{jkz \cos \theta} dz + \\
 &\quad \int_{-h}^0 j \frac{60\pi R_p I_m \sin k(l-|z|)}{r_0 \lambda} \sin \theta e^{-jk_0} e^{jkz \cos \theta} dz \\
 &= \frac{I_m e^{-jk_0}}{r_0} \left(\int_0^h j \frac{60\pi \sin k(l-|z|)}{\lambda} \sin \theta e^{jkz \cos \theta} dz + \right. \\
 &\quad \left. \int_{-h}^0 j \frac{60\pi R_p \sin k(l-|z|)}{\lambda} \sin \theta e^{jkz \cos \theta} dz \right) \\
 &= \frac{I_m e^{-jk_0}}{r_0} Int
 \end{aligned}$$

$$P_r = \frac{1}{240\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} |E_\theta|^2 r_0^2 \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{1}{120} I_m^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} |Int|^2 \sin \theta d\theta$$

$$I_m = \sqrt{\frac{120P_r}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} |Int|^2 \sin \theta d\theta}}$$

2.3 计算结果

中波天线塔高 0.45λ ，大地为北京地区土壤的典型值 $\epsilon_r = 4, \sigma = 0.025(S/m)$ ，地网长度为 100m，其等效电参数为: $\epsilon_r = 4, \sigma = 1(S/m)$ 。

不考虑地网的影响，计算高度为 1.8m 时，仿真分析得到的中波天线的远场垂直面内方向图如图 3 所示:

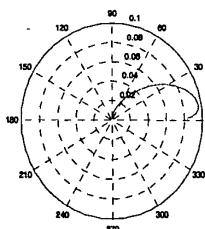


图 3 不考虑地网仿真分析得垂直面内方向性图

不考虑地网的影响，计算高度为 1.8m 时，仿真分析得到的中波天线的场强距离曲线如图 4 所示。

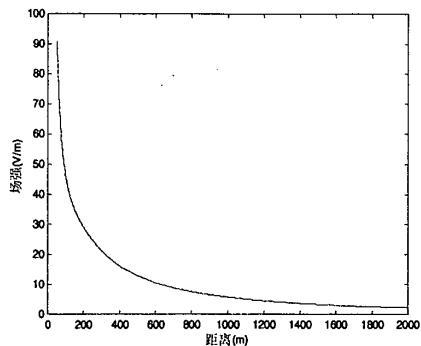


图 4 不考虑地网仿真分析得距离场强曲线图

考虑地网为理想导体，计算高度为 1.8m 时，仿真分析得到的中波天线远区场垂直面内方向性图如图 5 所示:

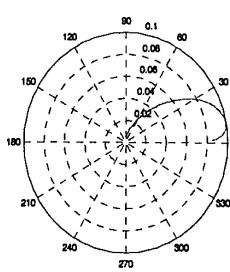


图 5 考虑地网仿真分析得垂直面内方向性图

考虑地网为理想导体，计算高度为 1.8m 时，仿真分析得到的中波天线的场强距离曲线如图 6 所示:

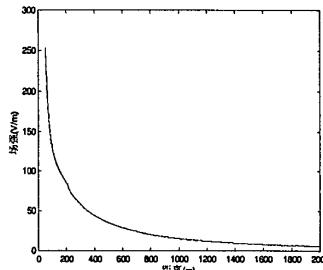


图 6 考虑地网仿真分析得距离场强曲线图

3、FDTD 算法分析

时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain Method 简称 FDTD Method) 是求解电磁问题的一种数值技术，它对麦克斯韦方程直接求解，其算法相对简单，对复杂问题处理灵活，对瞬态问题处理直观。

本文利用 XFDTD6.0 软件仿真架设在有限导电率地面上的中波天线模型, 其垂直面内结构示意图如图 7 所示:

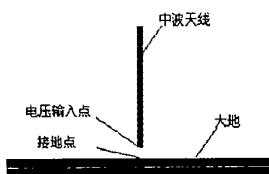


图 7 中波天线垂直面内模型示意图

在所研究的中波天线模型中, 天线高度为 0.45λ , 地面厚度为 50m, 正弦波激励, x 方向的空间步长 25m, 坐标为 $-1500\text{m} \sim +1500\text{m}$, 共 161 个空间网格, y 方向的空间步长 25m, 坐标为 $-1500\text{m} \sim +1500\text{m}$, 共 161 个空间网格, z 方向的空间步长为 2m, 坐标为 $-90\text{m} \sim +228\text{m}$, 共 160 个空间网格, 时间步长 6.629ns, 1500 个时间步, PML8 层吸收边界。

3.4 计算结果

计算结果与实测结果的比较如表 1 所示:

表 1 计算结果与实测结果比较

距离 (m)	350	450	500
实测场强	42.2	40	33
天线理论计算	47.219	36.861	33
FDTD 计算值	41.121	35.184	33
距离 (m)	650	750	850
实测场强	26.3	22.3	20.6
天线理论计算	24.654	20.843	17.9
FDTD 计算值	27.426	25.32	23.1
距离 (m)	950	1050	
实测场强	13.5	15.3	
天线理论计算	15.597	13.732	
FDTD 计算值	22.348	19.92	

4、结论

FDTD 算法和天线场理论方法都能够预测中波天线附近的电场强度, 误差在可以估计的范围内。在中波天线的近场区, FDTD 算法仿真得到的场强结果较天线场理论计算得到的场强结果更能够接近实测场强, 这是由于在中波天线的近场区, 用平面波反射系数求反射波的方法误差较

大, 而 FDTD 算法模拟了电磁波传播的整个过程, 对近场区的场强计算具有更高的精度。在中波天线的远场区, FDTD 算法仿真得到的场强结果较天线场理论计算得到的场强结果与实测场强符合得稍差, 这是由于在中波天线的远场区, 天线理论计算中的平面波条件成立, 误差主要来源于计算中采用的近似和参数的取值, 而 FDTD 算法中的网格的划分会造成计算中存在数值色散, 在计算远区场时误差增大。

所以, 虽然天线场理论和 FDTD 算法这两种方法都能够用于仿真分析中波天线周围的场分布, 但是天线场理论的方法更适合于计算远区场, FDTD 算法分析更适合于计算近区场, 两种方法相结合较之单一方法计算而言, 能够减小误差, 具有更高的精度。

参考文献

- [1] 谢处方, 邱文杰 “天线原理与设计”, 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [2] 王玮 “中波发射台天线场现状的分析”, 广播与电视技术, 2003.7.
- [3] 何红宇, 陈燕武, 周卫华 “并馈式自立铁塔中波天线”, 广播与电视技术, 2004.5.
- [4] 邓维波, 刘永坦, 宋昱 “高频电磁波在有损地面上的传播特性”, 微波学报, 2001.9
- [5] 焦其祥 “电磁场与电磁波”, 科学出版社, 2004.
- [6] 王华芝 “天线与电波传播”, 人民邮电出版社, 1994
- [7] 张铁江, 章文勋 “采用架高地网地中波天线分析”, 东南大学学报 2004.5.
- [8] Russell T A. “Simple, effective, elevated ground-plane antennas” 1994.6.
- [9] Chrisman Alan M. “Using elevated radials with grounded towers” IEEE Transactions on Broadcasting, 2001.

作者介绍: 李幸, 男, 籍贯安徽, 生于 1981 年, , 北京邮电大学在读硕士研究生, 专业电磁场与微波技术, 研究方向天线与电磁兼容。

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>