

## 单极子天线瞬态充电和放电特性仿真分析\*

樊文生<sup>1</sup> 陈海涛<sup>2</sup> 章志广<sup>2</sup> 刘欢<sup>2</sup>

(1. 海司信息化部 北京 100036)(2. 中船重工集团公司第 722 研究所 武汉 430079)

**摘要** 模拟分析了单极子天线在直流电压源作用下的瞬态充电和放电特性。在外加电压源的开启和关断的瞬间,天线上将激励出衰减的时域振荡信号。通过对充电或放电波形的快速傅立叶变换,可以观测到单极子天线的谐振模式,并获得天线的部分电气参数。研究表明:大功率无线电发射台在开启和关闭的瞬间,发射天线上将激励出一定的高次谐波,对周边电磁环境存在一定影响;另一方面,通过测试记录发射天线在直流电压源作用下的放电信号,可以测算出天线的阻抗参数。

**关键词** 单极子天线; 阻尼振荡; 谐波模式

**中图分类号** TN820 **DOI:**10.3969/j.issn1672-9730.2013.12.024

## Simulation Analysis of the Charge and Discharge Process for the Monopole Antenna

FAN Wensheng<sup>1</sup> CHEN Haitao<sup>2</sup> ZHANG Zhiguang<sup>2</sup> LIU Huan<sup>2</sup>

(1. Information Ministry of the Navy Headquarters, Beijing 100036)

(2. Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan 430079)

**Abstract** The charge and discharge process for the monopole antenna excited with DC voltage source is investigated in this paper. It's shown that a damping oscillation will be excited in the instant when the source is turn on ore shunt off. By using FFT to the charge and discharge oscillation waveform, the harmonic modes will be observed and part parameters of the antenna can be obtained through the waveform of the charge and discharge process.

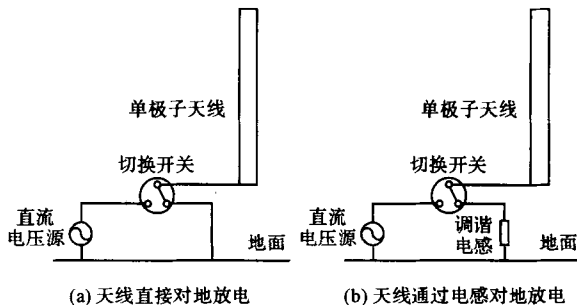
**Key Words** monopole antenna, damping oscillation, harmonic-wave mode

**Class Number** TN820

### 1 引言

单极子天线在短波以下频率的通信、广播等无线电发射系统中获得了广泛的应用,常见的鞭状天线、竖笼天线、倒 L 天线、T 形天线、中波铁塔天线等都属于单极子天线的范畴。工程中往往从频域的角度对这些天线的性能进行研究,包括天线输入阻抗、辐射效率、增益等参数。这是因为通信、广播等无线电工程中主要使用正弦电磁波作为信号发射源<sup>[1~3]</sup>。随着无线电技术的发展,天线的时域性能<sup>[4~6]</sup>开始受到人们的关注,但已有的研究主要集中于天线对时域脉冲信号的响应。本文将探讨天线的另一类时域特性问题:激励源开启和断开的瞬间,单极子天线的瞬态响应特性。激励源在开启和关闭瞬间天线的响应实质上就是天线的充电和放电特性,这方面的研究尚未见到有公开报道。由于天线上存在高阶的谐振模式,那么天线在激励源开闭瞬间的充放电相应中将包含有高次谐波。对于大功率的无线电发射系统,这种高次谐波对周边电磁环境造成的影响将是不能忽视的。本文采用时域有限差分算法<sup>[7~10]</sup>建立了单极子天线在直流源作用下的瞬态数学模型,模拟了天线的充电和放电过程。

### 2 电磁理论模型



注:通过切换开关来控制天线的充电与放电

图 1 单极子天线的充电和放电过程示意图

考察—单极子天线在直流电压源激励下的充电和放电特性,如图 1 所示。在图 1(a)中,通过切换开关可以选择将天线馈电点与电压源连接或者将天线馈电点接地。当天线与电压源接通时,由于天线对地存在分布电容,电压源对天线有一个充电过程,充电过程结束后,天线沿线将出现电荷分布;当天线与电压源断开并接地时,天线对地存在一个放电过程,将累积的电荷泻放到大地。在实际应用中,中短波频段的单极子天线

\* 收稿日期:2013 年 6 月 12 日,修回日期:2013 年 7 月 27 日

基金项目:船舶工业国防科技预研基金项目(编号:10J3.4.2)资助。

作者简介:樊文生,男,研究方向:通信研究。陈海涛,男,博士,高级工程师,研究方向:舰船天线研究。章志广,男,硕士,研究方向:舰船天线研究。刘欢,女,硕士,研究方向:通信与信息系统。

往往需要通过调谐电路来匹配,因此在图1(b)中考虑了另外一种放电模式,即天线通过调谐电感与地连接。

本文采用有限差分法(FDTD)来模拟单极子天线在电压源激励下的充电和放电特性。单极子天线在工作时,通过天线与大地之间的耦合作用,其电流经大地回流到馈电点,形成电磁波回路。因此大地参数对单极子天线的性能有着重要影响,特别是对于较低频率的发射天线,电流经大地回流的损耗电阻在天线总的输入电阻中占有显著的比重。然而精确模拟有耗地面的作用相当复杂,也不是本文研究工作的关键点,因此本文采用在天线馈电端设置一个集中加载电阻来近似模拟地损耗电阻的作用。

### 3 计算结果及分析

计算了一副高度为19m,外径为100mm的单极子鞭状天线的充电和放电特性,其中地损耗电阻取 $10\Omega$ ,电压源的电压为1V。

图2为天线的充电过程,图3为天线的放电过程。从计算结果可以看出天线的充放电过程呈现时域振荡波形,包含有丰富的高阶模式即高频分量。由于天线辐射电阻和损耗电阻的共同作用,充放电的振荡波形是阻尼衰减的。明显可以观察到前面的几个振荡波形中高频分量占的比重更大一些,这可以解释为天线总的电阻(含损耗电阻和辐射电阻)是随频率升高而增大的,对于高频分量而言,其阻尼系数更大,衰减的更快。

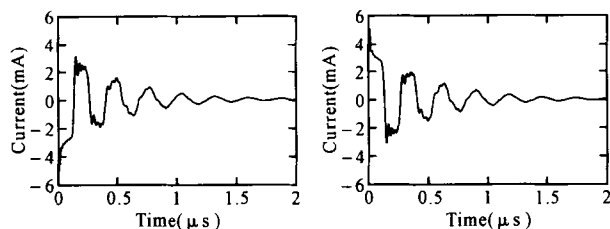


图2 天线充电信号振荡波形

图3 天线直接对地放电信号振荡波形

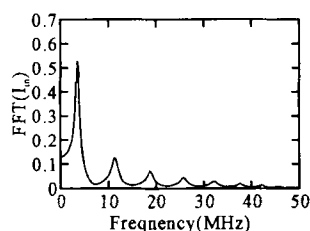


图4 由快速傅立叶变换得到的天线充电信号的频谱

而言,2、4、6等偶次属于并联谐振,电阻很大,因而其信号被抑制而观测不到。

图5为天线通过调谐电感接地时的放电过程,调谐电感量 $L=6\mu\text{H}$ 。可以看出由于调谐电感的滤波作用,高频分量的影响得到了较大的抑制,除了前两个波形外,后面的振荡波形已非常接近于标准的正弦信号。图6为图5所示时域放电信号的快速傅立叶变换结果,可以看出高频分量已基本被抑制,只能观测到1、3阶谐振模式,且1阶主模的幅度要远大于3阶模。在连接调谐电感后,一阶谐振频率为2.9MHz,而调谐电感在这个频率上的电抗值为 $109.3\Omega$ ,这说明天线在该频点上的电抗值应为 $-109.3\Omega$ 。

根据 FEKO 软件的仿真结果,该天线在无调谐电路的情况下,第一谐振点位于 3.7MHz,2.9MHz 频率上的电抗值为 $-120.2\Omega$ ,与上文的分析结果十分吻合,可见通过天线的时域充放电波形可以较准确的推测出来的天线谐振频点和输入电抗值。至于其中的误差可以归结为 FDTD 算法和 FEKO 中所采用的矩量法(MoM)算法之间的差异。

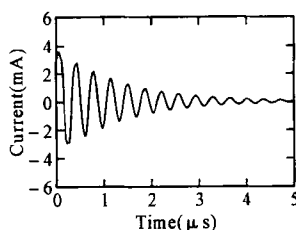


图5 天线通过调谐电感对地放电的振荡波形

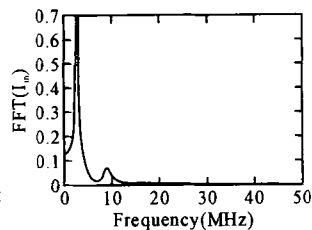


图6 由快速傅立叶变换得到的天线通过调谐电感放电信号的频谱

### 4 结语

基于单极子在直流电压源作用下的充放电特性的理论计算和分析结果,可以得出以下结论:

1) 大功率发射天线在开机和关闭的瞬间会产生较强的高次谐波

在大功率无线电发射台的建造中,发射机的谐波是一个十分重要的指标,其目的就是尽量减少发射台所产生的谐波对其它无线电信号产生干扰。从本文的分析来看,尽管发射机采取了谐波抑制措施,但在开启和断开的瞬间,由于天线的充电和放电效应,仍会激励出较强的谐波信号,其持续时间与工作频率和天线的Q值相关。功率越大、频率越低、Q值越高,发射天线充放电所激励的高次谐波对周边电磁环境的影响也就越显著。

2) 通过天线充放电信号可以测算天线的性能参数

低频大尺寸发射天线阻抗参数的测量一直以来就是工程中的难题。较高频段的阻抗测量常用的网络分析仪等设备不能用于这类天线阻抗的测试,否则由于静电干扰等因素,很容易出现烧毁仪器的情况。以往低频天线阻抗测试主要有电流电压法,电桥法等,但测试难度很大、测量精度十分有限,而且自上世纪八十年代以后随着全球变暖,天电干扰增强,地方工业干扰增加,使得低频天线的阻抗测量更加困难,甚至电抗测量准确度都无法得到保证,测试系统需要具备大功率的射频信号源,以压制干扰信号。从本报告分析结果来看,低频天线的阻抗参数可以通过其放电信号来进行测算。与大功率的射频信号源相比,直流高压源成本要低得多。通过直流高压源对天线进行充电,然后检测其放电信号,并从中计算天线阻抗参数在理论上是具备可行性的。

#### 参考文献

- [1] C. A Balanis. Antenna theory, analysis and design[M]. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [2] Nikolaos K. Uzunoglu. Low-and medium-frequency antennas [C]//chapter 27 of the Antenna Engineering Handbook[M]. John L. Volakis, McGraw-Hill, 2007.
- [3] Wait, J. R. VLF Radio Engineering[M]. Oxford: Pergamon

Press, 1967.

- [4] Poljak, D., V. Doric. Wire antenna model for transient analysis of simple grounding systems. Part II: The horizontal grounding electrode [C]//Progress In Electromagnetics Research, PIER 64, 2006:167-189.
- [5] 孟颜辉. 变压器局放超高频检测与套简单极子天线的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [6] 吴昌英, 张璐, 许家栋. 加载单极子天线的时域辐射特性[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 295-299.

- [7] 吕英华. 计算电磁学的数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2006:235-312.
- [8] Liu, C., Q.-Z. Liu, L. Zheng, W. Yu. Numeric calculation of input impedance for a giant VLF T-type antenna array[C]//Progress In Electromagnetics Research, PIER 75, 1-10, 2007.
- [9] 王琪, 阮成礼, 王洪裕, 等. 电小平面型单极子天线阻抗特性的研究[J]. 微波学报, 2004, 20(2): 59-61.
- [10] 高本庆, 薛正辉, 任武. FDTD 计算中关于低频激励源问题的研讨[J]. 电波科学学报, 2009, 24(2): 213-217.

(上接第 15 页)

2) 分析智能体。专门进行数据分析处理功能, 每个分析智能体分别负责完成场强预测、干扰分析和频谱规划等相关的各项分析工作。它们有各自的计算推理机制, 但是可以共享数据库和分析结果。

3) 采集智能体。采集频谱监测和短波探测数据, 并将采集到的数据进行分类整理, 添加到相应的数据库, 建立设备目录, 进行数据综合。

4) 控制智能体。根据决策智能体的命令快速地控制监测、探测或通信设备。在决策智能体授权的情况下, 也可以自主拟制优化控制方案。

#### 4.4 建模原则

为使频谱规划分配能够真正的保证各通信网系兼容工作, 达到提高频谱利用率的目的, 建模需要遵循四项原则<sup>[3]</sup>:

##### 1) 集中控制与分级管理

各个作战单元所能使用的频谱资源是有限的, 必须集中统一控制和使用。集中控制的功能由核心节点的核心决策智能体实现, 通过和核心分析智能体共同分析各个基本节点决策智能体发送来的请求和数据, 进行最高决策。核心决策智能体也可以在无人干预的情况下, 可以根据自己的推理机做出决定, 核心节点的指挥参谋也可以通过人机界面参与决策过程。

基本节点的决策智能体功能与核心节点类似, 只是决策权利范围有限。在职责范围内的频谱规划分配工作可以自主进行, 不用请示核心节点。如果超出职责范围, 就要向核心节点发出请求响应。

通过这样的设置, 可以实现集中控制与分级管理相结合, 使系统更具主动性、灵活性和实时性, 也可避免集中管理的中央处理机负担过重, 出现其软、硬件方面的问题, 影响正常工作。同时在作战状态下, 即使核心节点受到攻击, 运行核心决策智能体的计算机受损, 可迅速将基本节点的专家决策群升级, 代替核心节点的决策工作, 使系统的可靠性得到大幅度的提升。

##### 2) 互连、互通与互操作

频谱感知数据是频谱规划的基础, 因此与频谱监测设备、短波探测设备和通信设备的互连、互通和互操作显得尤为重要。系统中通过采集智能体和控制智能体监控其工作状态, 智能体的交互性可以保证它们之间的通信、交互信息和共享资源。

##### 3) 通用化、模块化和系列化

系统中的每个智能体都是一个可以独立运行的计算机

实体程序, 具有良好的通讯接口, 并可以通过简单的修改和补充, 实现功能升级, 具有通用化、模块化和系列化的特性。

##### 4) 整体效益最优化

由于各个智能体具有很强的适应性和协作性, 所以各个智能体可以相互交流计算结果, 并由决策智能体通过优化推理机做出决策, 从而达到系统整体效益最优化。

## 5 结语

多智能体技术作为软件设计和实现的一种新范例, 近年来引起了人们广泛的关注。本文所介绍的将多智能体技术应用于舰艇平台, 可有效解决各用频装备之间兼容工作的问题。

### 参考文献

- [1] K. I Aardal, C. A. J. Hurkens, J. K., et al. Algorithms for Frequency Assignment Problems[Z]. CWI Quarterly, 1996, 9 (1):120-126.
- [2] YEUNG KL, YUM T P. Phantom cell analysis of dynamic channel assignment in cellular mobile systems[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1998, 47(1):190-195.
- [3] Kinny D, Georgeff M. Modeling and design of multi-agent systems[C]//Muller J P, Wooldridge M, Jennings NR. Intelligent Agent III (LNAI Volume 1193). Berlin: Springer-Verlag, 1997:1-20.
- [4] O'Hare GMP, Jennings NR. Foundations of Distributed Artificial Intelligence[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996:505-526.
- [5] Genesereth M R. An Agent-based Framework for Interoperability[M]. Software Agents, Menlo Park: AAAI Press, 1997: 18-26.
- [6] KAHWA TJ, GEORGANAS ND. A hybrid channel assignment scheme in large-scale cellular-structured mobile communication systems[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1989, 38(4): 211-215.
- [7] 王超, 赵晓哲, 等. 面向编队协同防空决策的多智能体规划方法[J]. 舰船电子工程, 2009(1):1-4.
- [8] 杨飞, 王青, 等. 资源约束条件下舰艇编队多智能体协作规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2011(2):1-4.
- [9] 段俊花, 朱怡安. 基于群智能的多智能体系统体系结构设计与应用[J]. 西北工业大学学报, 2012(1):1-4.
- [10] 喻菁, 宋安东, 等. 一种动态分布式舰船电磁频谱管理系统的探讨[J]. 舰船科学技术, 2007(2):1-4.
- [11] 欧建军, 钟麟. 基于多智能体的编队协同空战战术规划[J]. 光电与控制, 2010(2):1-4.

## 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>