

宽频带圆锥对数螺旋天线仿真计算与性能分析

刁冠勋, 田冀焕, 袁建生

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘 要: 介绍了一种用于宽脉冲电磁辐射的宽频带天线——圆锥对数螺旋天线。在通过近似解析计算进行天线结构粗略设计的基础上, 利用仿真软件对其进行了较准确和全面的仿真计算, 得到了天线的方向图、输入阻抗、电压驻波比和天线上的电流分布等各项参数, 从而论证了原解析的误差范围和适用范围。

关键词: 宽脉冲电磁辐射 圆锥对数螺旋天线 数值仿真

宽脉冲大功率电磁辐射技术日趋成熟, 该技术可广泛应用于民用、军事、天文等社会生活各个方面。此类电磁脉冲所包含的频谱很宽, 对电子系统的干扰和威胁较大。在宽脉冲电磁辐射研究中, 发射天线设计是关键所在。天线将脉冲电流转化为空间电磁波, 决定电磁波的发射方向、覆盖面积等, 并且影响到调制电路中脉冲激励的波形, 在电磁辐射系统中起着非常重要的作用。圆锥对数螺旋天线是一类较理想的宽频带天线, 适合宽脉冲电磁辐射系统对天线的要求。本文对圆锥对数螺旋天线的性能进行了仿真与分析。

圆锥对数螺旋天线的基本结构如图 1 所示^[1], 其基本参数为: 圆锥半张角 θ_0 、螺旋线包角 α 、天线臂角宽度 δ 。在球坐标系下, 圆锥对数螺旋天线螺旋臂的两条边线 ρ_1 、 ρ_2 的曲线方程为:

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_0 e^{(\sin\theta_0 \cot\alpha)\varphi} \\ \rho_2 = \rho_0 e^{(\sin\theta_0 \cot\alpha)(\varphi - \delta)} \end{cases}$$

可以看出, ρ_1 和 ρ_2 为螺旋臂上一点与原点(锥顶)的距离, ρ_0 为螺旋臂顶端端点与原点的距离。

实际应用中, 圆锥对数螺旋天线是两个天线臂对绕形成的, 其中一个天线臂由另一臂绕圆锥轴线旋转 180° 而产生(如图 2 所示)。该天线沿锥尖方向有最强的辐射, 而其反方向辐射则相对微弱。当天线臂角宽度 $\delta = 90^\circ$ 时称为自补结构, 能产生最好的方向图。由于结构是螺旋对称的, 故方向图接近旋转对称, 辐射场的极化几乎在所有方向都非常接近圆极化, 但随着离开轴线角度的增加, 椭圆率会增加, 椭圆极化旋转方向取决于天线螺旋的方向^[2]。

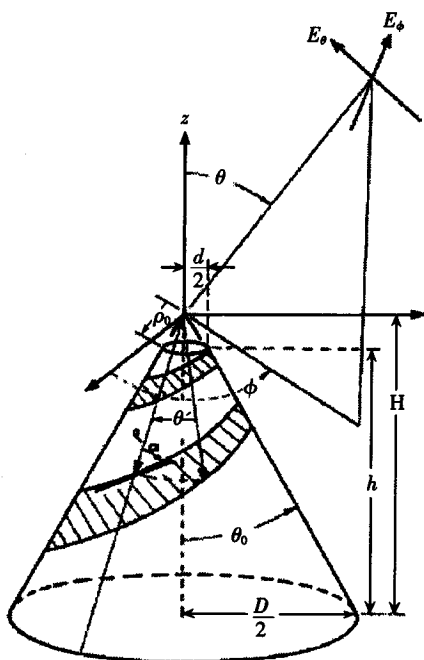


图 1 圆锥对数螺旋天线

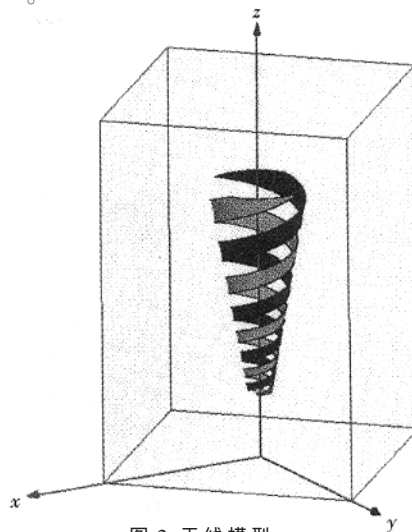


图 2 天线模型

1 圆锥对数螺旋天线性能参数解析算法与设计

圆锥对数螺旋天线(简称 CLS 天线)结构较复杂, 利用解析分析只能粗略地计算其性能参数, 要想得到较准确的参数及方向图必须利用数值计算方法进行仿真。

CLS 天线有五个结构参数:顶端半径 r 、底端半径 R 、锥角 θ 、螺旋线包角 α 、天线臂角宽度 δ 。其中,天线方向性主要由锥角 θ 以及螺旋线包角 α 决定,而天线频带宽度主要由天线上下半径 r 和 R 决定。这是因为对于频带内的各个频率,圆锥对数螺旋天线上可以找到与该频率对应波长相似的圆环,称为该频率下天线的工作区。所以上下底面半径决定了上下截止频率对应的波长,从而确定了频带宽度。文献[1]和[2]给出了 CLS 天线性能参数的经验计算公式,可用其粗略设计天线的结构尺寸。

笔者的研究工作要求天线的工作频率为 60MHz~100MHz。由于对频带特性要求较高,首先要考虑其辐射方向图具有非频变性,即不随频率有明显改变;其次是输入阻抗变化范围要小,以利于调制电路与天线的匹配。为此,先取天线足够长,以确保天线的宽带特性;然后通过改变圆锥角和螺旋包角控制辐射场的波瓣宽度,使其满足要求。一般情况下,增加包角(天线缠绕更紧凑)或减小锥角,天线的方向性会增加,同时后瓣会减小;反之,方向性减弱,后瓣会增大。设计时可根据波瓣宽度等要求先确定包角 α 和锥角 θ ,然后尝试缩短天线臂,并考查此时的辐射特性,最后使天线臂长在满足要求的前提下最短,从而实现尺寸大小的优化。根据文献[2]给出的经验公式及已有的试验数据可以设计得:

(a)由查表可以确定三个角度: $\theta_0=10^\circ$, $\alpha=71.6^\circ$, $\delta=90^\circ$;

(b)根据上下截止频率,可确定圆锥上下底面半径 r 和 R 。根据工作频带下截止频率及波长 $f_1=60\text{MHz}$ 、 $\lambda_1=5\text{m}$,上截止频率及波长 $f_2=100\text{MHz}$ 、 $\lambda_2=3\text{m}$ 。查表可得^[2]:

$$\frac{R}{\lambda_1}=0.15804 \quad \frac{r}{\lambda_2}=0.06288$$

即: $R=0.15804 \times 5\text{m}=0.79\text{m}$

$r=0.06288 \times 3\text{m}=0.19\text{m}$

(c)由查表可得方向性系数为 6.5dB^[1]。

2 圆锥对数螺旋天线的仿真

在上面粗略设计的基础上,要想得到较精确的性能参数,有必要利用现代数值计算技术和软件对天线进行仿真。笔者使用了 Ansoft 公司的 HFSS 软件进行仿真计算。该软件是一种基于有限元法的高频电磁场仿真程序,它采用切向矢量有限元法求解三维结构的电磁场^[3],可以计算出天线的输入阻抗、增益、方向图、效率以及电流分布等特性。HFSS 软件求解天线问题分为建模、施加边界条件、施加激励、设置频率范围、求解、后处理五个步骤。

HFSS 自带的三维建模功能比较简单,建立复杂模型比较困难,但它提供了与 AUTOCAD、Pro-E 等专业三维建模软件的接口。先在 Pro-E 中建立圆锥对数螺旋天线模型,再导入 AutoCAD,然后导入 HFSS 中,最后得到的模型与计算场域如图 2 所示。在场域最外围加辐射边界条件,天线臂设为铜材料。在天线双臂的顶端(即半径小的一端),加电压激励,然后开始仿真运算。在 P4/2.8GHz 计算机上,整个仿真计算过程约需 6 小时。

2.1 天线方向图

图 3 为 $f=70\text{MHz}$ 时天线的二维方向图,从中可以看出,天线方向性系数达到 7dB 左右,而利用文献[1]中的图表所查到方向性系数为 6.5dB。图 4 给出了几个频率下天线的二维方向图,可以看出,各个频率下方向图形状大致相同,但随着频率越靠近频率范围的上下限、方向图背瓣越大。

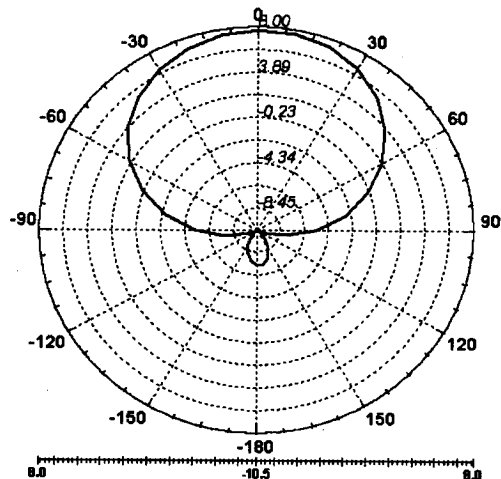


图 3 $f=70\text{MHz}$ 时天线 2D 方向图

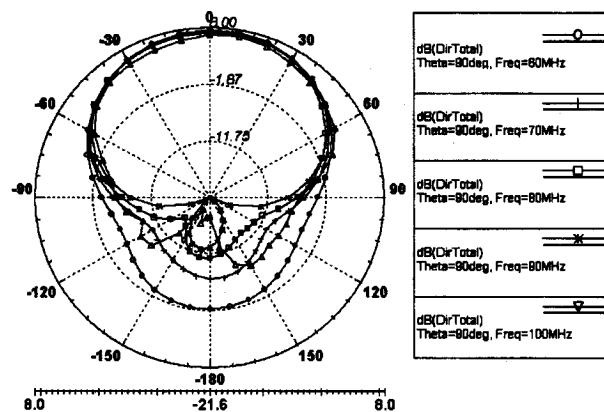


图 4 60MHz~100MHz 不同频率下天线方向图

为了更形象地描述天线的方向性,软件可以给出三维方向图。频率为 60MHz 和 90MHz 时天线的三维方向图如图 5 所示。表 1 给出天线的方向性系数。

从以上结果可以看出,圆锥对数螺旋天线是一类方向性较强的天线,其主瓣的半功率波束宽度约为 90° 。在 60MHz~100MHz 频带内方向性系数变化不大,且与利用文献[1]估算值 6.5 相差不大,从而证明了此类天线的非频变特性,这是仿真计算工作的价值之一。

2.2 电压驻波比和输入阻抗

从文献[1]中可以查到本文所仿真的天线输入电阻值约为 150Ω ,从文献[4]可以查到输入电抗约为 20Ω 左右。实际上,不仅天线的输入电抗与频率有关,而且不同频率下输入电阻也不同,利用仿真软件可以比较准确地

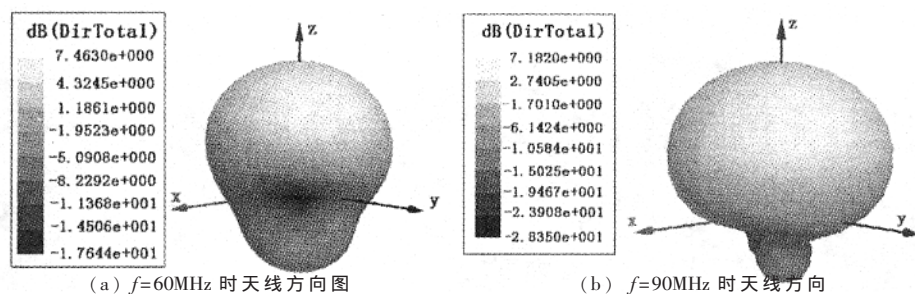


图 5 两个频率下天线的 3D 方向图

表 1 几个频率下天线的方向性系数

频率 (MHz)	60	70	80	90	100
方向性系数 (dB)	7.4638	7.5478	7.2763	7.1820	6.8959

得到这些参数。表 2 给出了几种频率下天线的输入电阻与电抗值。从表 2 可以看出,仿真结果的输入阻抗在工作频带内与理论值有一定差别,随着频率接近天线频率范围的上下限,仿真结果与理论值相差越大。通过仿真计算所得到比较准确的天线输入阻抗,对于研究调制电路与天线的匹配问题有着非常重要的作用。

表 2 不同频率下天线的电压驻波比和输入阻抗

Freq [MHz]	电压驻波比	Zin (Ω)	
		Real	Imag
60.000000	2.102622	104.563227	6.772978
70.000000	3.065034	151.177344	16.726027
80.000000	2.976317	142.804546	27.521969
90.000000	3.078570	151.015749	19.813322
100.000000	2.714516	135.208953	7.769131

2.3 天线上传导电流分布

图 6 表示频率 $f=80\text{MHz}$ 时电流在天线臂上的分布,可以看出传导电流从天线馈电点(即圆锥顶部一端)流入,先经过传输区(约下面的 2 圈),再向上是辐射区(约第 3 圈),最后为衰减区(后面几圈)。在传输区内,电流大小变化不明显,到达辐射区后,随着大量能量以电磁波的形式传播,电流迅速减小,最后经过衰减区,电流逐渐减小至零,这符合天线一般规律^[5]。其中,辐射区的位置与频率有关,即位于波长近似于圆锥截面周长的

地方。可以想象,不同频率会对应不同的辐射区位置,这是 CLS 天线的工作特性,也是 CLS 天线具有宽带特性的原因。

利用仿真计算可以较准确、较全面地得到天线的各项参数。仿真结果表明,圆锥对数螺旋天线有着很好的方向性以及频带宽度,且结构简单、紧凑,这非常适合于宽脉冲电磁辐射系统。其输入阻抗随频率变化较小,有利于在调制电路中实现阻抗匹配。

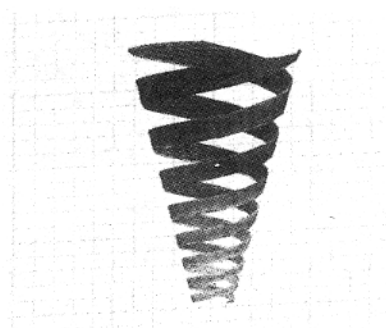


图 6 天线臂电流分布

参考文献

- 1 Dyson J. The characteristics and design of the conical log-spiral antenna[J]. Antennas and Propagation. IEEE Transactions on [legacy, pre-1988], Volume: 13 Issue:4, Jul 1965: 488~499
- 2 林昌禄,陈海,吴为公. 近代天线设计[M]第 1 版.北京:人民邮电出版社,1990
- 3 周伟华. 印制偶极子天线单元的仿真设计[J]. 现代电子, 2000; (3)
- 4 Thorsten W. Hertel, Glenn S. Smith, Analysis and Design of Two-Arm Conical Spiral Antennas[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, FEBRUARY 2002; 44 (1)
- 5 张德伟. 2GHz~25GHz 圆锥对数螺旋天线的设计与性能仿真[J]. 信息工程大学学报, 2002; 3(2)

(收稿日期: 2004-11-15)

NI 将于 4 月主办第二届“设计、验证及测试论坛”

美国国家仪器有限公司 (National Instruments, 简称 NI) 宣布第二届“设计、验证及测试论坛” (Design Validation Test Forum, 即 DVTF 2005) 将于 2005 年 4 月 15 日在上海国际会议中心举行。NI 诚邀行业内外相关领域的多家优秀企业, 如英特尔 (Intel)、科梁科技 (AEETEK) 等共同参与, 为广大测试测量行业的工程技术人员提供一个良好的学习与交流平台。

此次论坛将分为热点技术专题与实时应用专题同时进行。10 余场内容丰富的专题研讨会, 现场的产品展示, 与各参展商和行业内人士的面对面交流, 必将使您不虚此行, 是一个不容错过的行业盛会。

请登陆 www.edw.com.cn/dvtf.htm, 或致电 010-68578429 报名参与。

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),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>