

## 复射线理论应用于天线一体化设计

张琳琳, 蒙 林

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

**摘 要:** 分析自由空间天线辐射特性的方法已十分成熟, 如口径场积分法、平面波谱积分法等, 它们大都是行之有效的, 但要求对天线及天线罩进行一体化分析时, 现有的经典方法往往不能迅速而准确地给出解答, 如果用复射线理论这一新方法则可以对某些问题圆满地给出结果。根据复射线理论, 利用复源点远场具有的高斯波束特性, 无论是在远区或是近轴区域内, 复源点场和高斯函数有很接近的相同分布, 理论上论证了对于具有高斯波束分布的口径场可以用复源点场来近似模拟。

**关键词:** 高斯波束特性; 复射线理论; 方向性; 天线

### Application of complex ray theory on antenna incorporate design

ZHANG Lin-lin, Meng Lin

(Institute of Physics and Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In this paper, antenna pattern and simulation methods are introduced, and complex ray theory (CRT) is discussed in detail. Then, it analyses the pattern of antenna will radome. Multilayer radome exerts a tremendous influence on low sidelobe antenna pattern. The Gaussian beam radiated by complex source point (CSP) is used to simulate the mainlobe and sidelobes of low sidelobe antenna. Then, the multireflection and transmission of all CSP fields are added at the far zone. It's proved that the Gaussian beam radiated could be imitated by CSP field in theories.

**Key words:** Gaussian beam radiated; complex ray theory; directivity; antenna

## 0 引言

机载雷达可以对远距离的地面或低空目标进行侦察和警戒。由于波束下视, 地面反射杂波很大, 通常要求其天线具有低副瓣特性以提高信杂比。

分析自由空间天线辐射特性的方法已十分成熟, 如口径场积分法、平面波谱积分法等, 它们大都是行之有效的, 但要求对天线及天线罩进行一体化分析时, 现有的经典方法往往不能迅速而简便地给出解答, 如果用复射线理论这一新方法则可以对某些问题圆满地给出结果。

根据复射线理论, 利用多个复源点, 可以分别模拟天线和波束或差波束的主、副瓣, 并可用于分析天线罩等障碍物对天线方向图的影响, 如增益损失, 零点漂移, 零深和差斜率变化等。复射线理论是用于求解波场传播和散射问题的一种高频近似方法。用

复射线理论的方法不仅能非常方便而有效地求解出分层媒质中激光和雷达等高斯波束场的传播和散射特性, 而且可应用于微波声学及表声技术, 水声学及声纳技术, 地震波的分析等。

工程上通常采用在天线最大辐射方向上的两个相互垂直的平面内的方向图来表示天线的方向性, 它们分别称为 E 面和 H 面的方向图。相对于天线的安装位置, 分别用方位面和俯仰面两个主平面的方向图表示。描述天线方向图的参数有: 主瓣宽度 (一般情况下为半功率波瓣宽度, 特殊要求下有专门的规定, 如 10dB 波束宽度、1/e 波束宽度、零值宽度等)、副瓣电平 (系指副瓣中的最大值与主瓣最大值

收稿日期: 2008-02-02

作者简介: 张琳琳(1979-), 女, 电子科技大学硕士研究生, 研究方向为微带天线及天线一体化设计。

之比)、歪头(波束最大辐射方向偏离预定值的角度)、前后辐射比(最大辐射方向电平与其反方向的辐射电平之比)等。

## 1 设计方法

复射线法是一种分析局部不均匀波传播和散射的新方法。如果将实空间中的波源点  $S(x_s, y_s, z_s)$  的三个坐标值分别赋予适当的虚部,则源点坐标将由三维实空间解析延拓到六维复空间。定义一个波束矢量  $\vec{b}$ ,其模的大小称为波束宽度参量,其指向就是波束轴向或最大辐射方向。复源点坐标的虚部就是  $\vec{b}$  在三个坐标轴上的投影。由于波源位于复空间,从波源出发的射线必然在复空间行进,这种射线就是复射线。对于所讨论的场点或观察点,由于它必须位于可见的实空间内才有物理意义,因此它必须保持为实坐标,即是说,观察点可认为是复射线与实空间的交点。本文讨论二维情况,其讨论方法和所得结论可以很容易地推广到三维情况。

在实空间中,假定无限长的单位强度线电流源平行于  $x$  轴,线源在实空间的坐标为  $S(y_s, z_s)$ ,任意观察点的坐标为  $P(y, z)$ ,如图 1 所示。

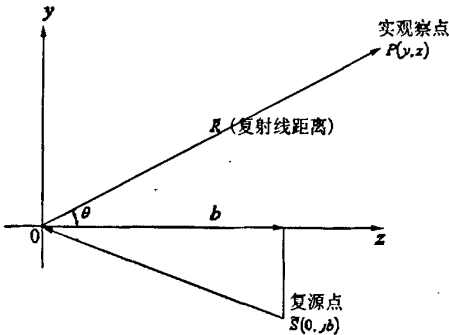


图 1 复源点和复射线

根据几何光学原理,  $P$  点的场可由电流源的柱面波格林函数给出为

$$E_x = -\frac{\omega\mu}{4} H_0(kR) \quad (1)$$

式中  $K = \frac{\omega}{v}$  为媒质的波数,  $R$  为源点到场点的距离

$$R = \sqrt{(y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} \quad (2)$$

远区场时,当场点位于高频场远区 ( $kR \gg 1$ ),式(1)可渐进变为

$$E_x = \frac{c}{\sqrt{kR}} \exp(jkR) \quad (3)$$

式中  $c = -\omega\mu/\sqrt{j8\pi}$  表示场振幅的常数。根据复变函数解析延拓的原理,只要用复距离  $\bar{R}$  代替式(3)

中的实距离  $R$ ,便可直接求得复源点的场  $\bar{E}$ 。

当  $k\bar{R} \gg 1$  时, (3) 式变为

$$\bar{E} = \frac{c}{\sqrt{k\bar{R}}} \exp(jk\bar{R}) \quad (4)$$

当观察点到实坐标距离  $R \gg b$  时,即  $R = \sqrt{y^2 + z^2} \gg b$  时,复距离  $\bar{R}$  可近似表示为

$$\bar{R} = \sqrt{y^2 + z^2 - j2bz - b^2} = R - jb \cos \theta \quad (5)$$

式中  $\theta = \cos^{-1}\left(\frac{z}{R}\right)$  是场点向径  $\bar{R}$  与  $z$  轴的夹角。

将式(5)代入式(4)可得复源点的远区场量表达式:

$$\bar{E} = \frac{c}{\sqrt{kR}} \exp(jk\bar{R}) \exp(kb \cos \theta) \quad (6)$$

上式的代数因子中,由于  $R \gg b$ ,可近似取  $R \approx \bar{R}$ ,但在相位因子中则需保留完整的复数近似式。由式(6)可知,复源点在远区也是柱面波辐射场,但具有定向辐射特性,其方向性函数为

$$f(\theta) = \exp(kb \cos \theta)$$

当  $\theta = 0$  (即  $+z$  轴方向) 时,  $f_0 = f_{\max} = \exp(kb)$ , 归一化后得:

$$F(\theta) = f(\theta)/f_{\max} = \exp[-kb(1 - \cos \theta)] = \exp(-2kb \sin^2 \frac{\theta}{2}) \quad (7)$$

当观察点在  $\theta = 0$  的轴向附近的极小的扇形范围内 ( $\theta \ll 1$ , 即  $z \ll R$ ) 时,式(7)可近似表示为:

$$F(\theta) = \exp(-\frac{kb}{2} \theta^2) \quad (8)$$

而一个标准高斯分布函数可表示为:

$$F(x) = \exp(-cx^2) \quad (9)$$

比较式(8)和式(9)可知,远区复源点场可近似表示为一个高斯函数,场的振幅随  $\theta$  增加而急剧下降,下降速率决定于参量  $b$ 。可见,  $b$  的大小决定复源点场波束能量集中的程度,而  $b$  是沿  $z$  轴而置,正是波束最大值方向,故波束矢量  $b$  的方向代表了复源点定向辐射方向。

为了明确表示出复源点场能量集中程度,引入  $1/e$  波束宽度角  $\omega\theta$ ,即场的振幅下降到最大值的  $1/e$  所对应的半张角。

$$\exp(-\frac{kb}{2} \theta_h^2) = 1/e$$

$$\theta_h^2 = 2/kb$$

可见  $\theta_h$  是  $b$  的函数,  $b$  越大则  $\theta_h$  表示能量越集中于波束轴线附近。复源点远区场方向图是一个只有主瓣没有副瓣的窄波束。

同理,讨论近场区时,由于复源点场的能量集中

在波束轴线 + z 轴附近,这个区域称为近轴区。近轴区域内,偏离轴线的距离 y 远小于复距离 R 在轴线上的投影,即  $|y| \ll |z - z_y| = \sqrt{z^2 + b^2}$ , 带入 (5) 式并化简得到:

$$R = \frac{\sqrt{[z(1+t^2) - jb(1-t^2)]^2}}{z(1+t^2) - jb(1-t^2)} \quad (10)$$

$$\text{其中, } t = \frac{|y|}{2\sqrt{z^2 + b^2}} \ll 1 \quad (11)$$

R 代入式 (6) 可得近轴场量表示式:

$$E = \frac{c}{\sqrt{k(z-jb)}} \exp\left(-kb \frac{y^2}{2(z^2 + b^2)}\right) \exp\left[jkz \left[1 + \frac{y^2}{2(z^2 + b^2)}\right]\right] \quad (12)$$

当参数 b 给定时,在 z 为常数的平面内,复源点场的振幅和相位都是偏轴距离 y 的函数,其振幅分布是一个标准形式的高斯函数,若将场强下降到最大值的 1/e 倍时的观察点偏轴距离定义为 1/e 半波束宽度,简称为波束宽度  $d_w$ ,则由几何关系得波束宽度为:

$$\sin\theta_k = \frac{d_w}{2} = \frac{1}{z} \sqrt{\frac{2b}{k}} \left(1 + \frac{z^2}{b^2}\right) \quad (13)$$

由此可见,复源点场在近轴区域内是具有凋落波特

性的高斯波束场。由以上分析可以得出,无论是在远区或是近轴区域内,复源点场和高斯函数有很接近的相同分布,也就是说,对于具有高斯波束分布的口径场可以用复源点场来近似模拟。适当选择复源点波束矢量 b 可以很精确地拟合出天线口径场分布,从而使计算和分析过程得以大大简化。

## 2 结束语

因为复源点场和高斯函数有很接近的相同分布,对于具有高斯波束分布的口径场可以用复源点场来近似模拟。根据复射线理论,可以利用复源点高斯波束场来模拟天线的远场方向图,实验证实特别适用于模拟天线阵的远区场如机载预警雷达等。随着计算机技术的飞跃进步,复射线理论将得到进一步的发展,出现更为简化的近似方法,并将在电磁波和弹性波的各个学科领域得到广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 张翼周,阮颖铮.低副瓣天线及多层天线罩一体化仿真[J].重庆邮电学院学报,2004,16(2):58-61.
- [2] 沈俊,韩丽川,吕继淮.并行遗传算法在机载宽频带天线罩设计中的应用研究[J].航空学报,2005,26(12):158-162.
- [3] 官正涛,杨儒贵.单层圆柱磁性天线罩的电磁特性分析[J].电波科学学报,200,20(2):840-843. 责任编辑:么丽苹

(上接第 23 页)

表 1 平均运行时间

	BSTM	剑桥大学的 Word-based STM
平均运行时间(ms)	749.25	1636.48

可以看出,本文实现的 BSTM 可以达到细粒度锁相近的性能,在编程模型上表示和粗粒度锁一样简单;并且对比其他 STM 实现,在运行性能上有一定的提高。

## 5 结束语

实现了一种基于写缓冲的软件事务存储模型。这种事务存储模型提供无锁编程,很好地解决锁机制在多线程同步中带来的问题和局限性,简化了并行编程模型;并且在模型结构上存在一定的优势。

虽然通过测试,BSTM 模型的性能比剑桥大学的实现有一定的提高,但它还需要进一步优化和增强。比如,结构进一步优化(如用 Hash 表实现缓冲区,采用 Undo Logging 的结构<sup>[7]</sup>);加入其他冲突解决机制;使用标准测试程序进行测试;集成到编译器,利用编译技术进行优化等。

## 参考文献:

- [1] Njuguna Njoroge, Jared Casper, Sewook Wee, et al. ATLAS: A Chip-Multiprocessor with Transactional Memory Support[C]. Proceedings of

- the conference on Design, automation and test in Europe, 2007:3-8.
- [2] Jim Gray, Andreas Reuter.事务处理:概念与技术[M].孟小峰,于戈,译.机械工业出版社,2004.
- [3] Maurice Herlihy, J Eliot B Moss. Transactional Memory: Architecture Support for Lock-Free Data Structures[C]. Proceedings of the 20th annual international symposium on Computer architecture, 1993:289-300.
- [4] Kevin E Moore, Mark D Hill, David A Wood. Thread-Level Transactional Memory[R]. UW-Madison, March, 2005.
- [5] Ravi Rajwar, Maurice Herlihy, Konrad Lai. Virtualizing Transactional Memory[C]. Proceedings of the 11th International Symposium on High-Performance Computer Architecture, 2005:316-327.
- [6] Lance Hammond, Vicky Wong, Mike Chen, et al. Transactional Memory Coherence and Consistency[C]. Proceedings. 31st Annual International Symposium on Computer architecture, June 2004:102-113.
- [7] Bratin Saha, Ali-Reza Adl-Tabatabai, Richard L Hudson, et al. McRT-STM: A High Performance Software Transactional Memory System for a Multi-Core Runtime[C]. PPOPP, March 2006:187-197.
- [8] Maurice Herlihy, Victor Luchangco, Mark Moir. A Flexible Framework for Implementing Software Transactional Memory[C]. Proceedings of the 21st annual ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming systems, languages, and applications, 2006:253-262.
- [9] Tim Harris, Keir Fraser. Language support for lightweight transactions[C]. Proceedings of the 18th ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications, 2003:388-402.

责任编辑:么丽苹

## 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>