

扇区波束赋形基站天线分析与综合^{*}

卜安涛¹ 史小卫¹ 刘英² 沈宗珍³ 肖良勇³

(1. 西安电子科技大学 601 试验室 , 西安 710071 ; 2. 西安电子科技大学天线所 , 西安 710071 ;
3. 西安海天天线科技股份有限公司研究院 , 西安 710075)

摘要: 本文分析了几种复杂结构基站天线, 并使用遗传算法进行了方向图综合设计。对天线结构采用线栅网格近似, 用矩量法分析。并针对方向图参数要求, 采用遗传算法对天线方向图进行了综合。在优化过程中对方向图参数构造了综合目标函数, 保证了增益、满足了扇区波束宽度, 并控制了后瓣。此方法可用于同种类不同振子排列形式的天线。本文的结果对工程和理论研究都有重要意义。

关键词: 方向图综合 线栅网格 矩量法 基站天线 遗传算法

Analysis and Synthesis of Sector Shaped Beam for Base Station Antenna

BU Antao¹, SHI Xiaowei¹, LIU Ying², SHEN Zongzhen³, XIAO Liangyong³

(1. 601 lab., Xidian University, Xi'an, 710071;
2. Institute of Antenna and EM scattering of Xidian University, Xi'an 710071;
3. Xi'an Haitian Antenna Technologies Co., Ltd., Xi'an 710075)

Abstract: This paper introduces the analysis and pattern synthesis of some kinds of complicated base station antennas using genetic algorithm. The antenna approximated with wire grid is analyzed in terms of method of moment and synthesized using genetic algorithm based on the pattern demand. Through the proper choice of target function, the gain, beamwidth and backlobe are comprehensively considered during optimizing. The method can be used to analyze other array of the same kind with different radiating elements. The result is very useful for engineering and theoretic analysis.

Key words: Pattern synthesis, Wire grid, Method of moment, Base station antenna, Genetic algorithm

1 引言

移动通信系统由于其方便、快捷的优点, 越来越受到人们的青睐, 用户量迅猛增长。通信信道的不足已经成为人口密集地区的严重问题, 因此急需使用有效的频率复用技术。蜂窝状小区实现了频率再用, 即在不同的小区使用相同的频率, 大大增加了系统容量。但是当用户数量达到每个小区所能提供的最大数量时, 就要把小区分割成更小的蜂窝状区域, 并使用相同的频率复用模式。

在同一蜂窝小区中使用扇形分区也可以实现频率复用。因为当用角度为 θ_s 的扇形波束来代替全向(圆形)波束时, 如图 1 所示, 相邻区域同频干扰距离由($D - R$)变长为:

$$\{D^2 + R^2 - 2DR\cos(\theta_s)\}^{1/2} w \quad (1)$$

式中, R 是蜂窝半径, D 是相邻蜂窝中心之间的距离^[1]。

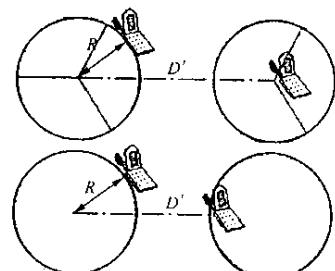


图 1 扇形区、全向区干扰距离

* 收稿日期 2002-06-04 定稿日期 2002-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(69971017)及西安海天天线科技股份有限公司资助项目

另外，基站天线的水平方向图通常是全向的，但是如果业务区不是圆形的，而是半圆形或扇形时，扇形波束可以更有效地覆盖业务区。

2 分析方法

本文的天线结构由薄板形或者线形辐射器以及水槽形反射板组成，如图 2 所示。对于这种线、面混合结构，考虑到线面结构计算复杂性及工程需求精度，采用线栅模型^[2]来剖分面结构。这样所有结构简化为线性结构。

在应用线栅模型时，关于理想细线导体中电流密度有几点假设：电流沿着导线轴线流动，电流密度为线电流；不考虑导体的圆周方向电流密度分量。导线两个端面上电流分布情况及其对空间电磁场的影响都不考虑（一般情况下，导线两端的端面效应并不影响导线电流求解，至少在相对细线结构中是这样）。

将天线结构中的反射面用网格面来代替，构成网格四个边框的四根导线，其长度 l 和半径 a 首先必须满足 $a < < \lambda, l < < \lambda$ 。对于导线半径，如果相对于波长较大，则不应再近似为细线结构。考虑到导体表面电流的集肤效应，电流沿半径为 a 的管状面流动，应该将模型建立为中空的管状结构。一般情况下，每个小线段长度 l 应该小于十分之一个波长。但是在天线的某些重要节段，比如辐射器单元、细线结构的弯曲部分等等，剖分的每个小段长度应该小于 0.05λ 或者更小。当然，一味地减小单元长度势必造成计算量增大，分段数目过小甚至会带来积累误差，使得输入计算机中的网格结构实际上由于存储、计算方面的截断误差而令网格各边两端坐标不能重合，不能构成网格，使输入计算机中的结构并不能等效原来的导体平面。为安全起见，线栅网格中细线间距最好是半径的几倍。下面简述分析的理论依据。

根据电磁场边界条件，在理想导体表面切向电场为零。即：

$$\mathbf{0} = \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}^{\text{inc}} + \mathbf{E}^{\text{sca}}) \quad (2)$$

导体表面外任意一点的场是入射场 \mathbf{E}^{inc} 和散射场 \mathbf{E}^{sca} 的合成场。由(2)得到 $\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}^{\text{inc}} = -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}^{\text{sca}}$ 。而散射场 \mathbf{E}^{sca} 是由导体表面电流产生，则：

$$\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}^{\text{inc}} = -\hat{\mathbf{n}} \times \frac{1}{jk\eta} [k^2 \mathbf{A} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A})] \quad (3)$$

其中：

$$\mathbf{A}(r) = \mu_s \int_s \mathbf{J}_s(r') G(r, r') ds' \quad (4)$$

$$G(r, r') = \frac{e^{jkr}}{4\pi R} \quad (5)$$

式中 $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ 为波数， \mathbf{J}_s 是导体表面的电流密度。 (5) 式表示的是自由空间格林函数， $R = |r - r'|$ 。

公式(3)就是任意细线结构的电场积分方程。使用最简单数值解包括用脉冲函数作为基函数，以点选配作检验函数。将电场积分方程离散为矩阵矩阵方程：

$$[\mathbf{Z}_{mn}] \cdot [\mathbf{I}_n] = [\mathbf{V}_m] \quad (6)$$

求解方程(6)，得到所有结构上的电流密度。那么，天线在某个方向上的场就是天线结构中所有分段上的电流在该方向上产生场的叠加。

3 方向图综合

本文例子中的天线结构复杂，不能解析写出天线的方向图表达式。应该采用解析或者半解析方法来得到其方向图。天线结构对于方向图的影响只有在数值计算结果中才能反映出来。所以在文中综合过程应用了遗传算法进行优化设计。之所以采用遗传算法是因为该方法适合于复杂问题的最优值求解。

遗传算法是 70 年代初期由美国的 Holland 教授发展起来的，它是一种启发式算法，具有以下优点：遗传算法不是从单点开始搜索，而是多点同时搜索，并且具有并行性，这是它计算效率高的主要原因之一。遗传算

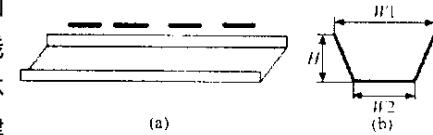


图 2 天线结构

法是一种全局优化方法,不像传统方法那样容易陷入局部最优解的死区当中;遗传算法对函数没有特殊要求,适用于处理复杂多变量问题。遗传算法作为一种方法在理论研究方面已经取得非常完善的结果,关于它在众多领域包括电场数值计算方面的应用可参考相关文献^[3]。

本文提到的天线结构形式如图2所示,在移动通信系统应用中,主要是对增益、波束宽度和前后比提出一定要求。对于这种类型的基站天线,增益主要由垂直面的阵列数目来保证。对于扇形波束基站天线,如果波束宽度不满足要求,不是由于波束较窄而导致工作区域覆盖不全,就是波束宽度较宽而干扰其它区域。此外,前后比控制不当也会对其他扇区造成干扰。所以该问题是一个多约束优化问题,必须综合考虑每个约束。在遗传算法应用中构造的目标函数为:

$$fit = [a_1(G - G_o)^2 + a_2(\theta_{0.5} - \theta_{0.50})^2 + a_3(FB - FB_o)^2] \quad (7)$$

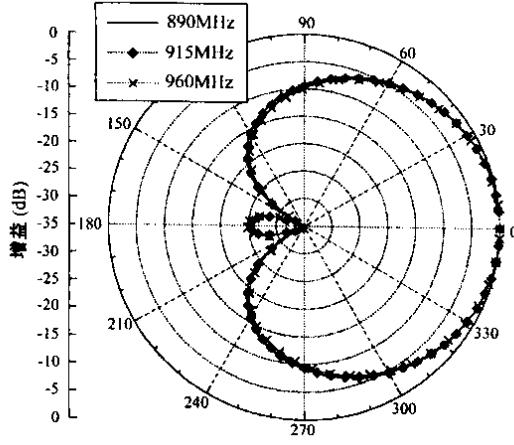
其中, a_1, a_2, a_3 为权值系数,主要用来控制每个变量对于目标函数的贡献。 $G, \theta_{0.5}, FB$ 分别表示天线增益、水平面方向图的半功率波瓣宽度、前后比, $G_o, \theta_{0.50}, FB_o$ 分别为对应于上面三个变量的目标值。通过对权值系数的合理调整可以使多个参数都能较好地满足目标要求。

4 数值算例

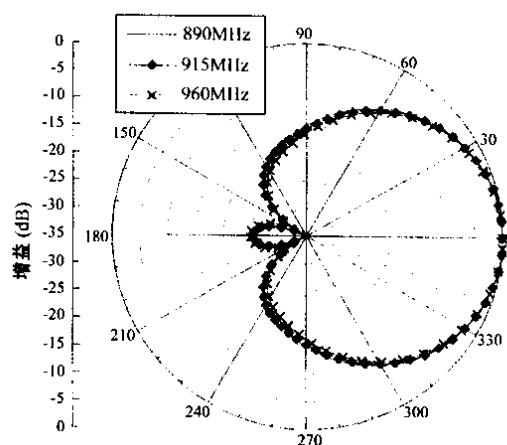
算例一:应用于GSM移动通信系统的900MHz单极化65°、90°扇形波束基站天线,天线结构如图2所示。垂直方向采用2单元,优化频率点选择在915MHz,这不是频段的中心频率,而是偏向低频点的结果,分析结果证明这样选择优化频率点可以较好的折衷天线在整个频段上的性能^[4]。图3(a)(b)分别给出了两种情况下的优化结果。可以看出本文的结果具有较好的频带特性,这是其它许多优化方法未能实现的。各个频率点的具体参数如表1所示。

表1 不同频率下半功率波束宽度HPBW(°)

设计波束宽度(°)	频率(MHz)		
	890	915	960
90	94.45	92.67	90.42
65	68.81	68.00	66.00



(a) 设计波束宽度 90°



(b) 设计波束宽度 65°

图3 单极化扇形波束优化理论结果

表中可以看出整个频段上两种天线波束宽度误差分别为5%和5.86%,均在行业标准10%的误差范围内。其前后比也均在25dB左右。单极化65°没有试验数据。图4给出了单极化90°扇形波束测试结果与理论结果比较曲线,可以看出设计曲线与试验结果吻合较好。

算例二:应用于GSM、CDMA系统中的900MHz双极化65°、90°扇形波束天线。天线结构与图2相似,只是水槽型地板上方的辐射单元分别改为十字形、菱形两种形状。设计频率点选择稍低于工作频段中点。图5给出双极化90°扇区天线的优化结果与实验结果对比。图6给出双极化65°扇区天线优化结果与实验数据对比图形。由两图可以看出,实验结果与理论结果主波束方向吻合很好。但是在180°方向图与实验测量数值有所差别。这是因为双极化天线在测试中测试天线振子排列轴线与垂直方向重合,测试天线绕垂直轴转

动。源天线极化方向与垂直方向夹角 45° 。当测试天线与源天线面对面放置时, 测试天线与源天线极化方向平行, 此时测试值是比较准确的。当接收天线绕其阵列轴线转动时, 接收天线主极化方向与源天线极化方向不能始终保持一致。尤其在 180° 位置, 接收天线主极化方向与源天线极化方向夹角达到 90° , 也就是垂直, 所以在这个位置测试结果实际是测试天线的交叉极化, 而优化计算的结果却是采用垂直极化、水平极化两个方向进行能量合成, 所以计算值要比实测值偏大。

5 总结

本文对于几种复杂结构的扇区波束基站天线进行了

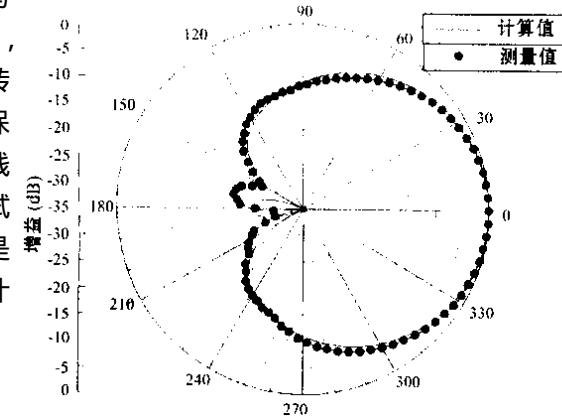


图4 单极化波束宽度 90° 天线测试结果

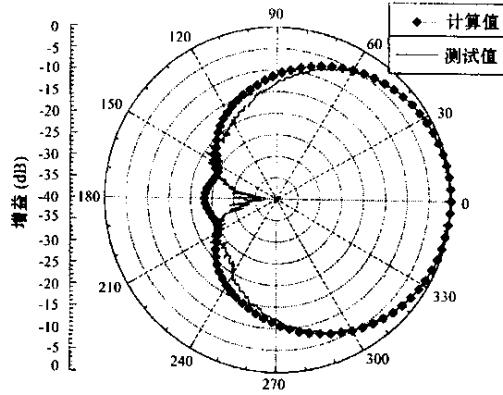


图5 双极化波束宽度 90° 天线测试结果

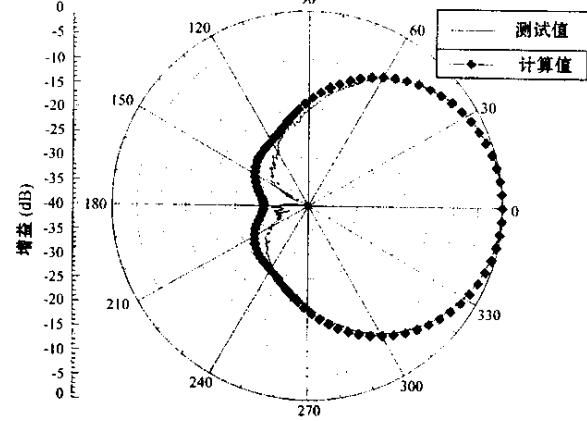


图6 双极化波束宽度 65° 测试结果

分析, 在此基础上用遗传算法对这些天线的方向图进行综合设计, 并对得到的优化结果进行了实验检验, 实验结果与理论结果吻合很好。

参 考 文 献

- [1] 藤本共荣, J. R. 詹姆斯. 移动天线系统手册. 北京: 人民邮电出版社, 1997. 110~124.
- [2] J. H. Richmond. Radiation and Scattering by Thin-Wire Structures in the Complex Frequency Domain. NASA CR-2396, Washington: National Aeronautic and Space Administration, 1974.
- [3] Daniel S., Eric Michielssen. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: a review. IEEE Trans. on AP, 1997, 45(3): 343~353.
- [4] 马云辉. 基于遗传算法的唯相位控制方向图零点生成. 微波学报, 2001, 17(2): 41~46.
- [5] M. Kijima, Y. Yamada. Determining excitation coefficients of dual-frequency shaped beam linear array antenna for mo-

bile base station. Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Symp., London: Ontario, 1991, 932~935.

- [6] H. J. Orchard, R. S. Elliott, G. J. Stern. Optimizing the synthesis of shaped beam antenna patterns. Proc. Inst. Elect. Eng., Pt. H, 1985, 132(1): 63~67.

卜安涛 男, 1976年生。西安电子科技大学在读博士生。2000年在西安电子科技大学电磁场与微波技术系获得硕士学位。主要研究方向是电磁场数值计算、电磁兼容以及阵列天线分析、综合。

史小卫 男, 1963年生。多年来从事电磁场与微波技术及无线电物理专业教学与科研工作。现任西安电子科技大学教授、博士导师。目前主要研究方向有: 智能天线、射频识别、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>