

doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2011.05.023

一种快速综合基站天线赋形方向图的迭代方法

邓敬亚¹, 张小苗², 尹应增², 刘其中²

(1. 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对基站天线赋形波束的上副瓣抑制和下零点填充的要求, 研究了一种快速综合具有给定上副瓣和下零点电平的方向图的迭代方法. 对给定的零点和副瓣的电平值, 应用布伦特方法迭代出功率方向图极值点的位置; 根据零点位置写出功率方向图的因式分解形式, 各项系数即是各阵元带相位的激励系数. 与普遍采用的优化算法相比, 此方法效率高, 耗时少. 结合一种天线单元, 综合了一款10元阵列方向图, 并用HFSS仿真结果验证, 上旁瓣抑制和下零点填充性能良好.

关键词: 基站天线; 赋形波束天线; 旁瓣抑制; 零点填充; 布伦特方法

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2011)05-0142-05

Fast iterative method for the synthesis of the base-station antenna's shaped beam

DENG Jingya¹, ZHANG Xiaomiao², YIN Yingzeng², LIU Qizhong²

(1. School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Science and Technology on Antenna and Microwave Lab., Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: For the requirements of upper sidelobes suppression and lower null-fills of the base-station antennas' shaped beam, a fast iterative method for the synthesis of a pattern with specified levels of upper sidelobes and lower nulls is studied. Brent's method is used to iterate the extrema's positions with the specified levels of sidelobes and nulls of the power pattern's expression, the factorized expression of the pattern can be obtained according to final positions of zeros, and the coefficient of each term is the excitation coefficient with phase information. This method is much more efficient and consumes much less time than optimization methods which are normally used presently. A 10 unit array's pattern is synthesized using an element, and the pattern is confirmed by the result of HFSS simulation. The performances of upper sidelobes suppression and lower null-fills are good, showing that the iterative method presented in this paper is a fast and useful pattern synthesis method for base station antennas.

Key Words: base station antennas; shaped beam antennas; sidelobe reduction; null fill; Brent's method

在蜂窝移动通信中, 基站天线的方向图优劣严重影响着小区内信号的载干比, 从而在某种程度上决定话务质量. 一般要求水平方向图半功率波束宽度为 65° (城区)或者 90° (郊区)以覆盖一个蜂窝, 而对于垂直面方向图则要求上旁瓣要进行抑制以防止对前方小区造成干扰; 下零点要进行填充, 防止基站塔下覆盖电平低而造成用户容易掉话的“塔下黑”现象.

经典的综合方法(如切比雪夫法、泰勒法等)一般不涉及零点填充; Woodward-Lawson方法综合方向图要对方向图多点采样; Orchard^[1]等学者提出的综合方法通过对方向图根的处理来综合余割波束和填充零

收稿日期: 2010-08-25

网络出版时间: 2011-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471043)

作者简介: 邓敬亚(1984-), 男, 讲师, 博士, E-mail: dengjingya_1984@yahoo.com.cn.

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20110427.1719.201105.171_023.html

点. 国内多数学者综合天线方向图普遍采用优化方法, 如遗传算法^[2]、粒子群算法^[3-4]等, 这些方法要计算数量庞大的方向图, 再以一定的适应度函数优中选优, 得到最终的方向图, 计算量巨大; 再者, 余割波束增益损失较大且不易测量, 所以实际应用中天线指标只要求下零点的填充即可. 以往文献报道了一些综合方向图的迭代方法, 如传统牛顿迭代法^[5], 这种方法不能兼顾收敛的速度和鲁棒性; 再如采用迭代法的二次约束综合方法^[6-7]、基于自适应天线理论的迭代方法^[8]等, 这些方法均没有涉及零点填充这一重要指标.

笔者介绍了一种基于布伦特方法(Brent's method)^[9]的快速综合基站天线赋形波束的迭代方法. 由于此综合过程表达式简单, 布伦特方法又能稳健地快速收敛, 对于当前主流配置的计算机, 在 Fortran95 环境中程序耗时以毫秒计, 与优化算法相比, 优势十分明显. 在综合了期望的方向图并计算阵元激励后, 结合文献[10]中工作于 GSM1800 和 WCDMA 的天线单元方向图, 得到一款 10 元阵列的方向图, 并用 HFSS 全波仿真结果验证. 笔者亦讨论了被填充零点位置的选取对各单元激励系数的影响.

1 综合方法

对于 $N+1$ 个理想点源组成的等间距阵列, 令其振幅为复数 I_n (包含幅度和相位), 其远场场强方向图为

$$F(\theta) = \sum_{n=0}^N I_n \exp(j\beta s n \sin \theta) = \sum_{n=0}^N I_n z^n, \quad (1)$$

其中, s 为阵元间距; θ 为偏离阵列法向的角度; $z = \exp(j\beta s \sin \theta)$. 其功率方向图为

$$\begin{aligned} P(\theta) = F(\theta)F^*(\theta) &= \sum_{n=0}^N I_n z^n \left(\sum_{n=0}^N I_n^* z^{-n} \right) = \sum_{n=-N}^N c_n z^n = \sum_{n=0}^N (c_n z^n + c_{-n} z^{-n}) = \\ &= \sum_{n=0}^N [c_n (\cos(n\beta s \sin \theta) + j \sin(n\beta s \sin \theta)) + c_{-n} (\cos(n\beta s \sin \theta) - j \sin(n\beta s \sin \theta))] = \\ &= \sum_{n=0}^N [(c_n + c_{-n}) \cos(n\beta s \sin \theta) + j(c_n - c_{-n}) \sin(n\beta s \sin \theta)] \end{aligned}$$

$P(\theta)$ 是功率方向图, 必为实数, 则 $\text{Im}(c_n + c_{-n}) = 0, \text{Re}(c_n - c_{-n}) = 0$, 即 $c_n = c_{-n}^*$.

令 $c_n = (a_n - jb_n), c_{-n} = (a_n + jb_n)$, 则有

$$P(\theta) = 2a_0 + 2 \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\beta s \sin \theta) + b_n \sin(n\beta s \sin \theta)] \quad (2)$$

如此, 方向图综合问题归结于如何求得 a_n 和 b_n .

下面介绍笔者采用的迭代思想和步骤:

步骤 1: 方向图的主瓣、副瓣和零点都是极值点. 先估计式(2)的极值点位置 x_n , 并给定期望电平值 e_n . 对于 $N+1$ 个阵元, 式(2)有 $2N+1$ 个未知数, 要求有 $2N+1$ 个线性方程, 即要给定 $2N+1$ 个点及对应电平值. $N+1$ 个阵元的方向图可写为 N 个因式相乘的形式, 即有 N 个零点, 则亦必有 $N-1$ 个副瓣和 1 个主瓣. 给定这些零点和副瓣期望电平值, 再按经验估计主瓣半功率位置, 即有 $2N+1$ 个点及其电平值.

步骤 2: 解方程组 $P(x_i) = e_i$, 其中 $i = 1, 2, \dots, 2N+1$, 得到 $a_0, a_n, b_n, n = 1, 2, \dots, N$; 新的 a_0, a_n, b_n 会产生新的功率方向图 $P_1(\theta)$.

步骤 3: 函数的极值点即是一阶导数的零点. 用布伦特迭代法, 以步骤 1 所选取的相邻的零点或相邻副瓣点之间为求根区间, 迭代得到 $P_1'(\theta)$ 的 $2N$ 个零点, 即是 $P_1(\theta)$ 的 $2N$ 个极值点. 然后重复步骤 1, 给新的极值点赋予期望电平值 e_n . 反复执行此过程, 直到极值点位置收敛.

这是一个简洁、快速的迭代过程. 对于普通的基站天线方向图, 在 15 次以内迭代就可以收敛. 与优化算法需要大量样本计算, 再以一定的适应度函数优中选优的优化步骤相比, 在耗时和计算量方面的优势是不言而喻的.

得到功率方向图表达式之后, 下一个重要步骤是求出各阵元的激励系数. 由于已经得到各个零点的位置, 则场强方向图可写为

$$F(\theta) = (z - z_1)(z - z_2) \cdots (z - z_N) \quad (3)$$

其中 z_1, z_2, \dots, z_N 是 θ 的函数, 表征 N 个零点的位置. 将 $F(\theta)$ 展开, 各次项系数即是阵元激励系数.

2 布伦特方法

可通过求一阶导数的根求出函数的极值点. 布伦特方法(Brent's method)^[9]是一种快速的混合迭代求根方法,它兼顾了二分法的鲁棒性与逆二次插值法、割线法的快速收敛特性. 下面简单介绍布伦特方法.

设在区间 (a_0, b_0) 内求方程 $f(x)=0$ 的根, $f(a_0)$ 和 $f(b_0)$ 符号相反,根据中值定理,区间 (a_0, b_0) 必存在根. 对于 $K+1$ 步迭代,都用到 a_k, b_k, b_{k-1} 这3个点:

- b_k 是第 K 步迭代得到的迭代点,也就是说到第 k 步为止 b_k 离根最近;
- a_k 是第 K 步迭代所得区间的另一边界,使得 $f(a_k)$ 与 $f(b_k)$ 符号相反,以保证 (a_k, b_k) 内有根; a_k, b_k 满足 $|f(b_k)| < |f(a_k)|$;
- b_{k-1} 是 $K-1$ 步迭代得到的点.

对于每一步迭代,优先选用逆二次插值法:

$$s_{k+1} = \frac{f(a_k)f(b_k)}{(f(b_{k-1}) - f(a_k))(f(b_{k-1}) - f(b_k))} b_{k-1} + \frac{f(b_{k-1})f(b_k)}{(f(a_k) - f(b_{k-1}))(f(a_k) - f(b_k))} a_k + \frac{f(b_{k-1})f(a_k)}{(f(b_k) - f(b_{k-1}))(f(b_k) - f(a_k))} b_k \quad (4)$$

如果 $f(b_k)$ 与 $f(b_{k-1})$ 相等,则使用割线法:

$$s_{k+1} = b_k - \frac{b_k - b_{k-1}}{f(b_k) - f(b_{k-1})} f(b_k) \quad (5)$$

其中, b_{k-1} 取为 a_k .

如果下面两条件同时满足,可以保证逆二次插值法或割线法在此处的收敛性,那么接受 s_{k+1} :

- s_{k+1} 在 $(b_k, (a_k + b_k)/2)$ 或 $((a_k + b_k)/2, b_k)$ 内;
- 如果上一步迭代采用二分法,则须满足 $|s - b_k| < |b_k - b_{k-1}|/2$;

如果上一步迭代采用逆二次插值法或割线法,则须满足 $|s - b_k| < |b_{k-1} - b_{k-2}|/2$.

如果以上两条件不能同时满足,则不能保证收敛性. 为保证迭代的鲁棒性,使用二分法,取 $s_{k+1} = (a_k + b_k)/2$. 最后, b_k, s_{k+1} 绝对值小者为 b_{k+1} ,另一个为 a_{k+1} .

3 被填充零点位置的选取

依式(2)推导过程,功率方向图可表示为

$$P(\theta) = \sum_0^N (c_n z^n + c_{-n} z^{-n}) \quad (6)$$

其中 $z = \exp(j\beta s \sin \theta)$. 容易验证,如果 $r \exp(j\phi)$ 是式(6)的根,则 $\exp(j\phi)/r$ 也是方程的根. 换句话说,式(6)的根都以 $r \exp(j\phi)$ 和 $\exp(j\phi)/r$ 的形式成对出现(位于单位圆上的根,即 $r=1$ 的根,两根重合). 无论选取 $r \exp(j\phi)$ 和 $\exp(j\phi)/r$ 的哪一个,由式(3)得到的方向图形状相同,而激励系数不同. 针对笔者所述的基站天线综合问题,填充 n 个零点,则有 2^n 组不同的阵元激励产生同样的方向图. 这就给阵列综合问题提供了另一个自由度,可以根据不同的馈电形式和具体情况,选取更适合的那组阵元激励系数. 下一节中被填充的第1、2零点,一律选在单位圆内,即 $|r \exp(j\phi)| < 1$,这样由式(3)求得的各阵元激励系数相对平均.

表1 各阵元激励幅度与相位

	阵元编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
相对幅度	1.357	1.641	2.019	2.141	2.171	2.154	1.948	1.512	1.000	1.046
相位/(°)	16.87	3.59	-5.59	-8.82	-7.58	-7.14	-9.48	-12.24	-10.54	0

4 算例与结果

笔者根据一款10阵元基站天线的波束赋形要求,应用上述迭代法综合了阵因子方向图,如图1所示,频率为2GHz,阵列间距选取130mm.要求计算了单元方向图的阵列方向图指标为:上旁瓣小于-20dB;第1下零点为-20dB,第2下零点为-22dB.求得的各单元激励系数在表1给出.值得注意的是,最大与最小激励幅度之比 $I_{max}/I_{min}=2.17$,最大相位差为 29.1° ,激励系数的幅度和相位比较均匀,易于工程实现.

应用文献[10]中介绍的一款工作于1710~2170MHz,覆盖GSM1800和WCDMA的双极化天线单元来验证这种阵列综合方法,其2GHz频点俯仰面方向图在图2中给出.图3比较了应用方向图乘积定理得到的不考虑互偶的理想阵列方向图和用HFSS全波仿真的阵列方向图.可以看出两者吻合良好,误差来源于单元之间互偶的影响以及各个阵元由于在阵列中所处位置不同,单元方向图有些许不同.图3所示方向图有良好的上旁瓣抑制和下零点填充特性,可实际应用于工程当中以提升无线蜂窝网络性能.算例证明笔者提出的迭代法是一种快速、实用的基站天线赋形方向图综合方法.

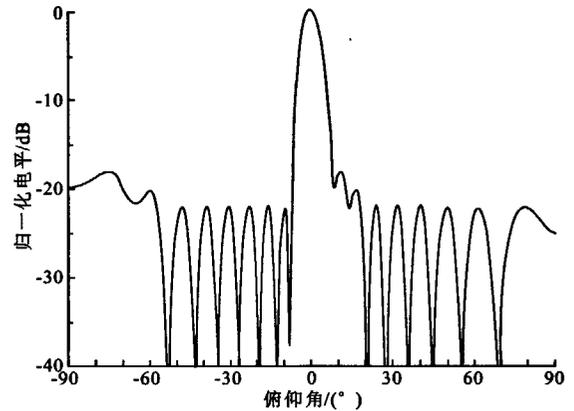


图1 阵因子方向图

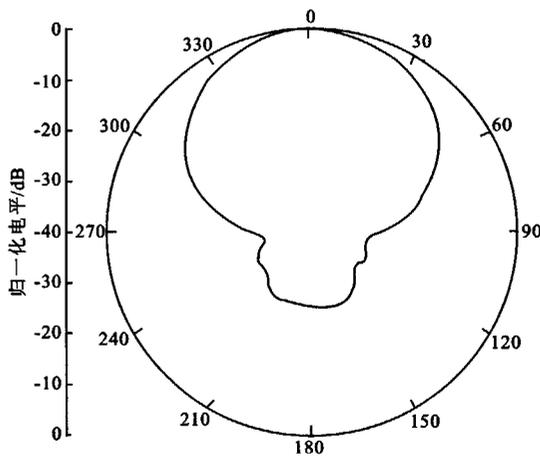


图2 单元方向图

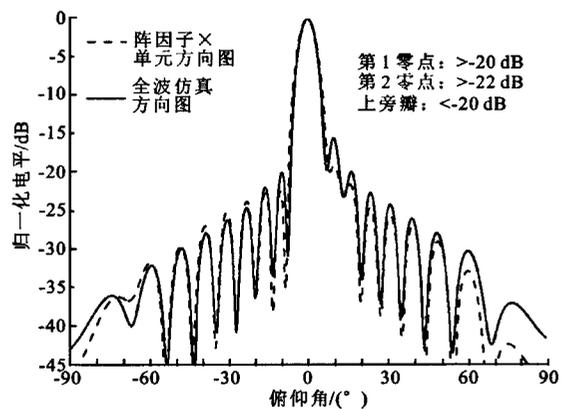


图3 理想阵列方向图与全波仿真方向图

5 总结

笔者研究了一种基于布伦特迭代法的综合基站天线赋形方向图的快速方法.与常用于综合方向图的优化算法相比,这种方法计算量小,耗时很少,优势明显.结合一款基站天线阵元,综合了一款赋形方向图,表明上旁瓣抑制与下零点填充特性优良,证明这是一种快速、实用、可靠的基站天线方向图综合方法.

参考文献:

[1] Orchard H J, Elliott R S, Stern G J. Optimising the Synthesis of Shaped Beam Antenna Patterns [J]. IEE Proceedings, 1985, 132(1): 63-68.
 [2] 刘瑞斌, 鄢泽洪, 孙从武, 等. PSO和GA在阵列天线波束赋形中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(5): 797-799.
 Liu Ruibin, Yan Zehong, Sun Congwu. et al. Application of PSO and GA in Beamforming of an Array Antenna [J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(5): 797-799.
 [3] 张帅, 龚书喜, 路宝, 等. 一种提高稀布线阵优化布阵效率的方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(5): 888-

- 892.
- Zhang Shuai, Gong Shuxi, Lu Bao, et al. Method for Improving the Optimization Efficiency of Sparse Linear Arrays [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(5): 888-892.
- [4] 张凡, 张福顺, 赵钢, 等. 共形天线阵列方向图分析与综合 [J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(3): 498-501.
Zhang Fan, Zhang Fushun, Zhao Gang, et al. Application of Particle Swarm Optimization in Antenna Array Pattern Synthesis [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(3): 497-501.
- [5] Jones B, White P. A Power Synthesis Technique for Series-Fed Array Antennas [R]. Sydney: Interscan Australia Pty Ltd, 1990.
- [6] 刘聪锋, 廖桂生. 改进的快速稳健任意阵列天线方向图综合方法 [J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 104-110.
Liu Congfeng, Liao Guisheng. Improved Fast Robust Pattern Synthesis Method for Arbitrary Arrays [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(1): 104-110.
- [7] 刘源, 邓维波, 马兴峰, 等. 一种阵列天线的约束最优化综合方法 [J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 670-676.
Liu Yuan, Deng Weibo, Ma Xingfeng, et al. A Pattern Synthesis Method for Constrained Optimisation of Array Antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(5): 670-676.
- [8] 丁君, 王琄, 郭陈江, 等. 一种对任意线阵天线的主波束赋形方法 [J]. 电波科学学报, 2004, 19(5): 638-640.
Ding Jun, Wang Jun, Guo Chenjiang, et al. Mainlobe Shaping Method for Arbitrary Arrays [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(5): 638-640.
- [9] Press H W, Teukolsky A S, Vetterling T W, et al. Numerical Recipes: the Art of Scientific Computing [M]. 3rd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 454-456.
- [10] Huang Y H, Wu Q, Liu Q Z. Broadband Dual-polarised Antenna with High Isolation for Wireless Communication [J]. Electronics Letters, 2009, 45(14): 714-715.

(编辑: 郭 华)

(上接第 128 页)

- [20] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [21] Mingmin Chi, Rui Feng, Lorenzo Bruzzone. Classification of Hyperspectral Remote-sensing Data with Primal SVM for Small-sized Training Dataset Problem[J]. Advances in Space Research, 2008(41): 1793-1799.
- [22] Valls G C, Bruzzone L. Kernel Methods for Remote Sensing Data Analysis[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [23] 杨晓元, 王志刚, 王育民. 支持向量机在图像隐秘检测中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(3): 457-459.
Yang Xiaoyuan, Wang Zhigang, Wang Yumin. The Application of Support Vector Machines in Detection of Images Steganography[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(3): 457-459.

(编辑: 齐淑娟)

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>