

文章编号:1005-6122(2002)-0039-04

# 移动通信系统中基站天线波束赋形设计

高雪 胡鸿飞 傅德民

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,西安 710071)

TN92 A

**摘要:** 基站天线的波束赋形设计是提高移动通信系统信道性能的有效手段之一。本文基于移动通信系统,建立了基站天线赋形的优化模型,给出求解具有多个复杂约束条件的乘子罚函数的迭代算法。以八单元线阵为例,设计出压低上半空间所有副瓣峰值,填充下半空间零陷的基站天线,验证了本文方法的正确性和有效性。该方法对于波束赋形问题具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 基站天线,波束赋形,乘子罚函数,优化

## Design of Shaped-Beam for Base Station Antenna in Mobile System

GAO Xue, HU Hongfei, FU Demin

(National Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract:** The beam shaping of base station antenna is an effective method to improve the performance of mobile system channel. Based on the mobile system, an optimized model is constructed, and the iterative algorithm of multiplier penalty function is derived for solving the problem with several complex constraints. Taking the linear array of eight elements for example, the base station antenna is designed in which its peak sidelobe in the upper half space is reduced and the nulls in the lower half space are filled. The results show that this method is accurate, effective, and available as reference for other beam shaping problems.

**Key words:** Base station antenna, Beam shaping, Multiplier penalty function, Optimization

### 1 引言

移动通信系统中,信道的性能显著依赖于基站天线的辐射方向图。如果天线垂直面方向图上半空间旁瓣的辐射电平很低,就可以减小基站之间的干扰,增加频谱重用距离,提高信道容量。如果垂直面方向图下半空间旁瓣的零陷很浅,就可以填充服务区波瓣之间的空隙,减小通话盲区,扩大基站覆盖范围<sup>[1]</sup>(图1)。基站天线的波束赋形设计旨在综合出基站方向图以满足上述要求。

在若干复杂约束条件下综合阵列天线,使其具有期望的方向图,是一个多变量、多约束的非线性优化问题。比较成熟的解析方法只适于解决某一类问题,如 Fourier 变换法适合于综合期望方向图解析式简单的问题;而 Woodward 法虽然更灵活,但由此综合得到的方向图只在抽样点处与期望方向图一致,而在抽样点之间对方向图没有任何控制<sup>[2]</sup>。近年来发展起来的数值优化算法<sup>[3,4]</sup>,如复形调优法、内点法和 Frank-Wolfe 法等可以解决具有多个复杂约束条件的问题,但迭代的初值点必须是内点,而对于多变量、多约束的优化问题,寻找内点这一过程本身的运算量就很大,所以应用并不广泛。

本文考虑到基站天线的应用环境,对天线增益、垂直面方向图的上半空间副瓣峰值和下半空间的零陷施

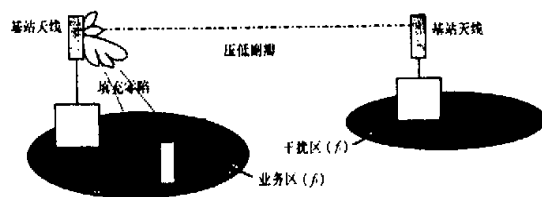


图1 基站天线赋形示意图

• 收稿日期:2001-08-06;定稿日期:2001-11-08

加约束,将阵列的激励电流幅度、相位和单元间距作为优化变量,建立优化目标函数,然后应用乘子罚函数方法将该问题转变为只具有简单约束条件的问题迭代求解,实现了波束赋形,最后用两个数值算例验证了该方法的正确性和有效性。

## 2 波束赋形设计

### 2.1 优化模型

在移动通信系统中,为了保证基站与业务区域内移动站之间的通信,在业务区域内,无线电波的能量必须均匀辐射,并且天线的增益应尽可能高。由于业务区域的宽度已经确定,所以水平面的方向图基本上是确定的,因此只能采用垂直阵列天线,并通过垂直面波束赋形来提高增益和改善输出方向图。这种基站天线的基本结构和坐标关系如图2所示。其垂直方向图(以下简称方向图)和归一化方向图分别为

$$f(\theta, \varphi) = f_a(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N I_n \exp(jk \cos \theta \sum_{i=1}^n d_i + j\psi_n) \quad (1)$$

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|f(\theta, \varphi)|}{|f(\theta_{\max}, \varphi)|} \quad (2)$$

其中  $f_a(\theta, \varphi)$  的阵列单元的方向图函数,  $N$  为单元个数,  $I_n, \psi_n$  分别为第  $n$  个单元的相对激励电流幅度和相位, 设  $\psi_1 = 0, d_i$  是第  $i$  个单元到第  $i-1$  个单元的距离, 设  $d_1 = 0, \theta_{\max}$  为方向图主瓣峰值所对应的角度。波束赋形具体要求压低上半空间的最大副瓣峰值 peak, 填充下半空间的零陷 null, 同时保证有最大的增益输出。在这三个约束参量中, peak 和 null 没有解析表达式, 只能在优化过程中计算数值解。增益的计算式为

$$G = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta} \quad (3)$$

在阵列天线的工程设计中,通过控制各单元激励电流的幅度、相位和单元间距,或者其中的任意一项、两项可以实现输出方向图赋形<sup>[5]</sup>。因此,我们把这些变量作为优化变量,统一记为向量  $\mathbf{x}, \mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{3N-2}]^T = [I_1, \dots, I_N, d_2, \dots, d_N, \psi_2, \dots, \psi_N]^T$ 。按如下要求建立各分量的约束条件  $x_{i, \min} \leq x_i \leq x_{i, \max}$ : 为了使各单元电流激励幅度的相对变化值较小, 规定  $0.1 \leq I_n \leq 1 (n=1, \dots, N)$ ; 根据工程要求, 规定  $0.5\lambda \leq d_i \leq 1.2\lambda (i=2, \dots, N)$ ; 对相位不作特殊规定, 即  $0^\circ \leq \psi_n \leq 360^\circ (n=2, \dots, N)$ 。建立如下优化问题

$$\begin{cases} \max G(\mathbf{x}) \\ s. t. \quad \text{peak} \leq 10^{LP/20} \\ \quad \text{null} \geq 10^{LN/20} \\ \quad \theta_{\max} - 90^\circ \leq 1^\circ \\ \quad x_{i, \min} \leq x_i \leq x_{i, \max}, i = 1, \dots, 3N-2 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $LP$  和  $LN$  分别为上半空间副瓣峰值 peak 的上限电平值和下半空间零陷 null 的下限电平值, 约束 3 表示方向图的最大峰值可以向下半空间稍有偏移。

对于优化问题(4), 文献[3]和[4]的优化方法一般先给出满足简单约束条件 4 的初值  $\mathbf{x}_1$ , 然后以角度间隔  $\Delta\theta$  在  $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$  范围内计算  $F(\theta, \varphi, \mathbf{x}_1)$ , 搜索 peak, null 和  $\theta_{\max}$ , 依次判断是否满足复杂约束条件 1~3。如果不满足, 则根据各自算法的迭代方向更换另一值, 继续上述步骤; 设第  $k$  次迭代计算后, 得到一满足所有约束条件的  $\mathbf{x}_k$ , 然后把它作为新一轮迭代计算的初值, 在该轮迭代中不仅要判断每次迭代的优化变量是否满足所有约束条件, 而且还要同时保证  $G_{k+1} \geq G_k$ 。

事实上, 由于优化问题具有多个优化变量, 且约束条件 1~3 都是优化变量的函数, 又无解析表达式, 所以在两轮迭代计算中, 如何选取迭代方向, 较快收敛到问题的解是很困难的。文献[6]证明乘子罚函数方法可

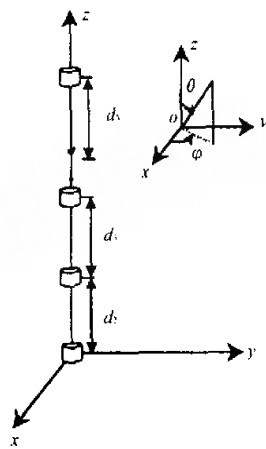


图2 基站天线的结构和坐标关系

以通过不断增大罚因子和迭代乘子,加快收敛速度。经研究发现,该方法非常适合于本问题的求解。

## 2.2 优化算法

将问题(4)的复杂约束条件统一记为  $g_j(x) \geq 0 (j=1,2,3)$  的形式。该问题的目标函数和复杂约束函数的增广 Lagrange 函数记为

$$P(x, \lambda, \sigma) = -G(x) + \sum_{j=1}^3 \begin{cases} [-\lambda_j g_j(x) + \frac{1}{2} \sigma_j g_j^2(x)], & g_j(x) < \frac{\lambda_j}{\sigma_j} \\ -\frac{1}{2} \lambda_j^2 / \sigma_j, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ ,  $\lambda_j (j=1,2,3)$  是乘子,  $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]^T$ ,  $\sigma_j > 0 (j=1,2,3)$  是罚因子。设第  $k$  次迭代的乘子为  $\lambda_j^{(k)}$ , 罚因子为  $\sigma_j^{(k)}$ , 令  $x_{k+1}$  是子问题

$$\begin{cases} \min & P(x, \lambda^{(k)}, \sigma^{(k)}) \\ \text{s.t.} & x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, i = 1, \dots, 3N-2 \end{cases} \quad (6)$$

的解,由此可得乘子的迭代公式为

$$\lambda_j^{(k+1)} = \max\{\lambda_j^{(k)} - \sigma_j^{(k)} g_j(x_{k+1}), 0\}, j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

整个问题的具体算法如下:

- (1) 定义精度要求  $\epsilon \geq 0$ , 令  $k=1$ ; 给出初值  $x_1 \in R^{3N-2}$ ,  $\lambda^{(1)} \in R^3$  且  $\lambda_j^{(1)} \geq 0, \sigma_j^{(1)} > 0, j=1,2,3$ ;
- (2) 求解式(6), 得到  $x_{k+1}$ ; 计算  $g_j^{(-)}(x_{k+1}) = \min\{0, g_j(x_{k+1})\}$ , 如果  $\|g^{(-)}(x_{k+1})\|_{\infty} \leq \epsilon$  则结束;
- (3) 对  $j=1,2,3$ , 令

$$\sigma_j^{(k+1)} = \begin{cases} \sigma_j^{(k)}, & \text{当 } |g_j^{(k+1)}(x_{k+1})| \leq \frac{1}{4} |g_j^{(k)}(x_k)| \\ \max[10\sigma_j^{(k)}, k^2], & \text{其它} \end{cases}$$

- (4) 由式(7)计算  $\lambda^{(k+1)}$ ;  $k := k+1$ ; 转步骤 2。

由文献[7]知,对于问题(4)中的复杂约束条件,可以通过取最优乘子  $\lambda_j=0$  使问题简化;而对  $\sigma_j^{(1)}$ , 只需取较大正数就能保证算法的有效收敛。

## 3 数值结果

对大多数波束赋形问题,都是对单元电流的激励幅度和相位进行优化<sup>[2,5]</sup>。算例 1 也采用此方案来说明本文优化模型的可实现性和优化算法的有效性。设直线阵单元数  $N=8$ , 单元为半波对称振子,各单元的间距均为  $0.82\lambda$ , 目标是压低上半空间所有副瓣峰值,填充下半空间的前两个零陷。复杂约束参量取为:  $LP = -18\text{dB}$ ,  $LN = -15\text{dB}$ ,  $\theta_{\max} = 90^\circ$ 。图 3 是优化得到的方向图,其上半空间的最大副瓣峰值压低到  $-17.58\text{dB}$ , 下半空间填充后的零陷达到  $-15\text{dB}$ , 主瓣峰值对应的角度为  $\theta_{\max} = 90.6^\circ$ , 天线增益达  $10.65\text{dB}$ , 基本上达到设计要求。图 4 是方向图 3 所对应激励电流的幅度和相位分布。

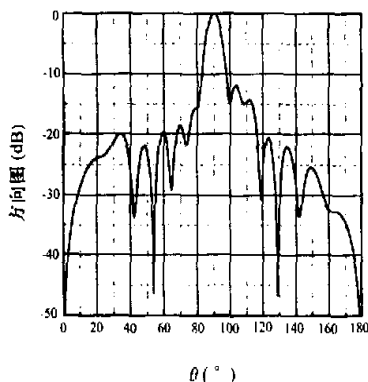


图 3 赋形的阵列方向图

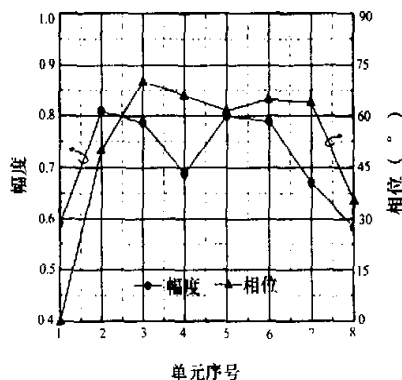


图 4 单元激励电流的幅度和相位分布

由于一定的幅度分布与特定的馈电网络相对应,又由于阵列所采用的单元形式对馈电网络结构的制约性,使得调节单元激励电流幅度和相位的波束赋形方法对有些阵列结构不适用。为此,如果阵列馈电网络的幅度分布已定,只调节间距和相位,从而实现波束赋形,对工程加工设计具有很大的意义。

算例2仍以八单元半波振子阵为例,但设各单元激励电流的幅度相等,仅对单元间距和激励电流的相位进行优化。复杂约束参量取成与算例1相同。图5是赋形方向图,其上半空间的最大副瓣峰值压低到 $-17.92\text{dB}$ ,下半空间填充后的零陷达到 $-14.25\text{dB}$ ,最大峰值所对应的角度 $\theta_{\max}=90.4^\circ$ ,天线增益达到 $10.37\text{dB}$ ,同样满足设计要求。图6是方向图5所对应的间距分布和相位分布,其天线的总高为 $5.92\lambda$ ,比算例1的天线高 $0.18\lambda$ ,而各单元相位之差不大,所以容易制作加工。算例2虽以等幅阵列为例,但可以说明在已知阵列相对幅度分布的条件下,只改变激励电流相位和单元间距,同样可以实现波束赋形,而且更易于工程实现,符合基站天线大批量生产的要求。

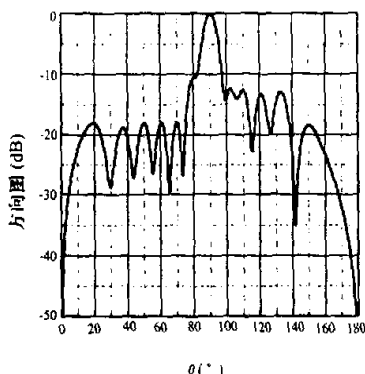


图5 赋形的阵列方向图

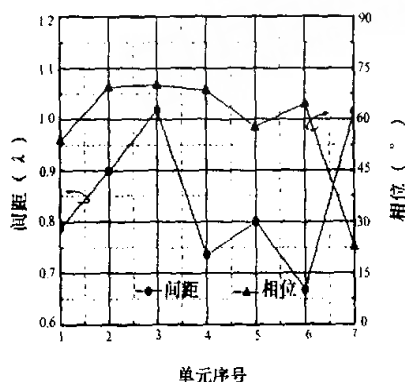


图6 阵列的间距和相位分布

## 4 结论

基站天线设计是高性能移动通信系统的瓶颈技术。为了改善基站天线近区的通信盲点,降低同频信道之间的干扰,使天线的能量集中辐射到服务区域,急需基站天线的波束赋形技术。本文针对工程需要,提出了一种波束赋形的优化模型,给出了基于乘子罚函数的数值优化方法。该算法可以解决多个复杂约束条件的优化问题。数值算例针对不同的优化变量,对八单元的直线阵进行了赋形,得到了很好的结果。该结果可以作为不同结构阵列赋形的依据,所以本文的优化模型和优化方法具有实用性,对其它形式的波束赋形设计具有一定的借鉴意义。

## 参考文献

- [1] K. Fujimoto J. R. James. Mobile Antenna System Handbook. Boston, MA: Artech House, 1994.
- [2] Diogenes Marciano, Filinto Duran. Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(3): 12~20.
- [3] 徐士良. Fortran 常用算法程序集. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [4] 陈开周. 最优化计算方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [5] Robert S. Elliott. Antenna Theory and Design. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- [6] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法. 北京: 科学出版社, 1997.
- [7] M. Avriel. Nonlinear Programming Analysis and Methods. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1976.

**高雪** 西安电子科技大学博士生。主要研究兴趣为天线数值分析与设计和智能天线与信号处理。

**胡鸿飞** 西安电子科技大学博士生。主要研究兴趣为近场测量新技术和天线数值分析与设计。

**傅德民** 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 国家重点实验室副主任。现主要研究领域: 近场辐射与散射测量、天线工程设计和电磁散射问题。

## 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>