

基于幅相加权的阵列天线波束赋形全局优化方法

韩华龙¹ 王 建²

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)¹ (电子科技大学电子工程学院, 成都 610054)²

摘要: 本文给出了一种利用幅相加权对阵列天线进行全局优化的方法。为了使天线的辐射波束形成给定的方向图, 采用联合应用 DFP 和 BFGS 公式的变度量算法对阵列天线各单元的馈电幅度和相位分布进行优化, 通过 C++ 语言编程计算实现, 从而使得优化后的阵列天线主波束形状能够与预给波束形状相吻合, 达到设计要求。全局优化是本文的特色, 它弥补了局部优化结果的精确度依赖于初始值的缺点, 因而得以保证通过优化得到的天线主波束与给定波束的主瓣相吻合, 副瓣也得到有效控制。该方法具有快速收敛, 计算量小等优点, 是一种解决阵列天线波束赋形问题的有效方法。

关键词: 阵列天线, 波束赋形, 幅相加权, 全局优化

Research on Performance Evaluation Based on × × ×

Han Hualong¹ Wang Jian²

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)¹

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)²

Abstract: In this paper, a new method for phase and amplitude optimization of array antennas is presented. In order to form a given antenna pattern for array antennas, variable metric algorithm, Davidon-Fletcher-Powell(DFP), Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS), and global optimization idea realized under c++ environment were joint used to optimize the phase and amplitude distribution of excitations. The global optimization algorithm is the merit of this method. Based on the global optimization algorithm, this method solved the disadvantage of local optimization that the precision of optimization result close depended on the initial value. Thus, the optimized main lobe of the antenna pattern is fitted for the given one and the side lobe level is efficiently controlled. The method shows fast convergence and small amount of computing. So it is a valuable beam shaping method for array antennas.

Keywords: array antennas; shaped beam; amplitude-phase method; global optimization

1 引言

目前, 许多的实际应用对阵列天线的辐射方向图提出要求, 阵列天线需要形成各种不同的辐射波束以满足实际需求。如某些卫星通信天线需要形成赋球形波束, 某些相控阵雷达天线需要在俯仰面形成余割平方波束或进行波束展宽等等。

阵列天线波束赋形综合一般有三种情况: 仅改变幅度实现波束赋形、仅改变相位实现波束赋形及同时改变幅度和相位实现波束赋形。前两种情况在

阵元数目较大时有效。第二种情况适合于采用移相器实现, 第三种情况可采用功分器网络来实现, 其中的相位分布是采用不同的传输线长度来实现的, 称为固定相位分布。Bucci^[1]采用插值法实现了波束展宽和余割平方的赋形波束; Johnson^[2]采用遗传算法得到了可进行宽窄波束切换的线阵; Leavitt^[3]给出了自适应天线的自适应算法; Voges^[4]运用最速下降梯度法实现了仅幅度加权的阵列天线波束赋形。

鉴于系统小型化的考虑, 此处采用较少的阵元数, 同时改变幅度和相位以实现阵列天线的波束赋形。为了使一个偶极子直线阵列天线的波束形成给

定的方向图形状。本文结合全局优化的思想，采用“联合应用 DFP 和 BFGS 公式的变度量算法”对阵列天线各单元的馈电幅度、相位分布进行优化，使阵列天线的方向图在指定角度内能够与预给的波束形状吻合，副瓣电平也可得到较好的控制。该方法不仅收敛速度快，还具有计算量小的优点，是一种解决阵列天线波束赋形问题的通用方法。

2 全局优化算法原理

对一个幅度、相位分布分别为 I_n 、 α_n ，($n=0,1,2,L,N-1$) 的直线阵列，如果同时改变阵列单元的幅度和相位，使其辐射方向图形状接近指定方向图，这一问题可归结为方向图波束赋形。

设有一单元数为 N ，间距为 d 直线阵列，其阵因子为

$$S(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jnu} ,$$

式中，

$a_n = I_n e^{j\alpha_n}$ ， $u = kd \cos \theta$ ， $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ ， I_n 和 α_n 分别为各单元的激励幅度和相位，为需要确定的量， $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为工作波长， d 为单元间距。另设有一指定波束，其方向图函数为 $f_0(\theta)$ 。现在的问题是对阵因子 $S(\theta)$ 在保持 N 、 d 和 λ 不变的情况下，通过改变其激励幅度和相位分布，使其形成与 $f_0(\theta)$ 相同的方向图。要使阵因子 $S(\theta)$ 产生的方向图为目标方向图 $f_0(\theta)$ ，可以对给定方向图 $f_0(\theta)$ 在 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 进行取样，取 M 个采样点 θ_i ， $i = 0, 1, 2, L, M-1$ 。在改变激励幅相分布的情况下，使得在每一个采样点处 $S(\theta_i)$ 都尽可能地逼近 $f_0(\theta_i)$ ，由于预给方向图 $f_0(\theta_i)$ 一般为归一化方向图，可建立如下目标函数 $F(I_0, I_1, L, I_{N-1}; \alpha_0, \alpha_1, L, \alpha_{N-1}) = \sum_{i=0}^{M-1} [|\bar{S}(\theta_i)| - |f(\theta_i)|]^2$ 式中， $\bar{S}(\theta_i)$ 为 $S(\theta)$ 的归一化形式。优化过程其实就是要通过用优化算法找到一组合适的 I_n^* 和 α_n^* ， $n = 0, 1, 2, L, N-1$ ，使目标函数有最小值，即使得下式成立：

$$F(\mathbf{I}^*, \mathbf{\alpha}^*) = \min F(I_0, I_1, I_2, L, I_{N-1}; \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, L, \alpha_{N-1})。$$

由于目标函数是可微的，采用联合应用 DFP 和 BFGS 公式的变度量算法是可以的。但事实上，该方

法是一种局部优化算法。它有自身的不足，其优化结果完全依赖于初值的选取。特别是对于类似本文的多值性问题，初值选取的适当与否直接决定优化结果的准确度。所以，本文在基于这种算法的 C 语言优化程序的基础上，融入了取全局最优的思想，弥补了局部优化的缺陷，使得处理方法更加优越。

本文的全局优化算法可简单地描述为两个循环：内循环和外循环。内循环即是联合应用 DFP 和 BFGS 公式的变度量算法的局部优化过程，该算法在许多文献中都有介绍，限于篇幅，不再赘述；外循环即是基于前述局部优化算法基础上的全局寻优过程。该过程可描述为：首先给出一随机初始值进行局部寻优，如果优化结果达到要求，则终止程序；如果优化结果不符合要求，则在该初始值附近区域随机选取一个新的值做局部寻优，然后判断优化结果是否合格。如果仍不合格，则继续在这个最新选取的值的附近区域内随机选择另一个新的值进行局部寻优过程。如此反复，所以不论开始初始值如何选择，最终总可以找到一个合适的值使得优化结果符合要求。这样既弥补了局部优化优化结果过份依赖初始值的缺点，又节省了大量的人力计算调节，大大缩短了计算时间，提高了优化效率。

3 优化实例

现在利用该方法对一阵列单元数 $N=20$ ，单元间距为 $d = 63mm$ 的 S 波段的直线阵列的激励幅度和相位同时进行优化，使其辐射方向图变为指定方向图（如图 1 虚线所示）。优化计算时，取样点数为 $M=1800$ ，经过迭代后目标函数式的最终结果为 $\min F(\mathbf{I}, \mathbf{\alpha})=1.04$ ，优化得到的辐射方向图如图 1 所示，激励幅度和相位如图 2 和图 3 所示。

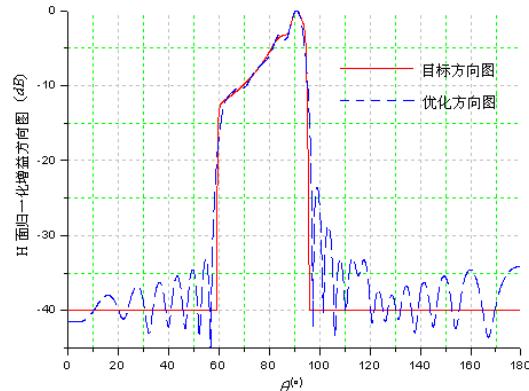


图 1 20 单元优化结果方向图

由图 1 可以看出, 优化得到的方向图主瓣与目标方向图的主瓣基本重合, 副瓣也得到很好控制, 优化得到的幅度和相位分布呈不规则分布。

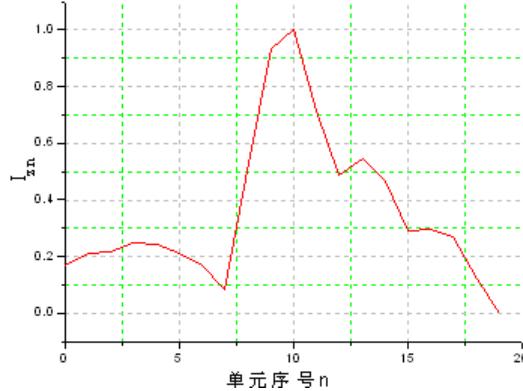


图 2 20 单元优化得到的幅度分布

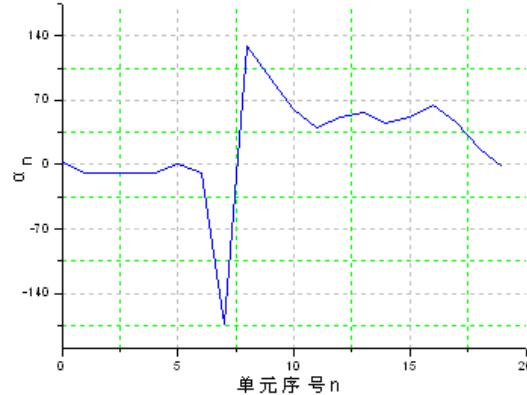


图 3 20 单元优化得到的相位分布

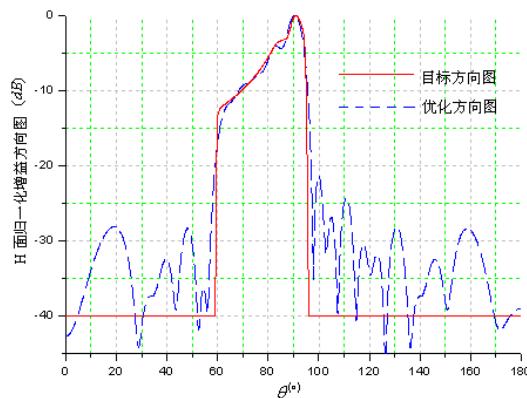


图 4 16 单元优化结果方向图

由于天线单元数较大, 为了节约成本减少复杂性, 可尽量减少天线阵单元数。对阵列单元数为 $N=16$, 单元间距仍为 $d=63\text{mm}$ 的直线阵列进行优化, 使其辐射方向图变为指定方向图。优化计算时, 取样点数仍为 $M=1800$, 经过迭代后目标函数式的最终结果为 $\min F(\mathbf{I}, \boldsymbol{\alpha})=1.21$, 目标方向图和优化所得到的方向图如图 4 所示, 优化得到的幅度和相位分布分别如

图 5 和图 6 所示。我们对该实例设计的 16 单元直线阵列进行了加工测试, 实际测试结果如图 7 所示。

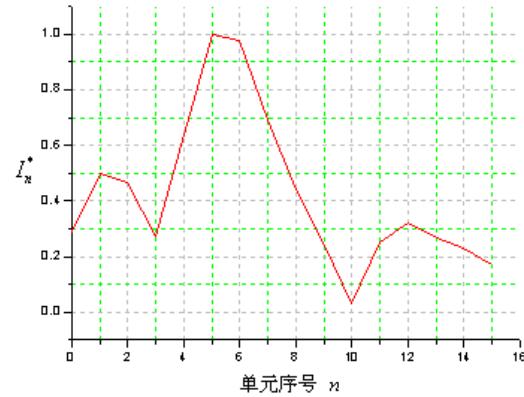


图 5 16 单元优化得到的幅度分布

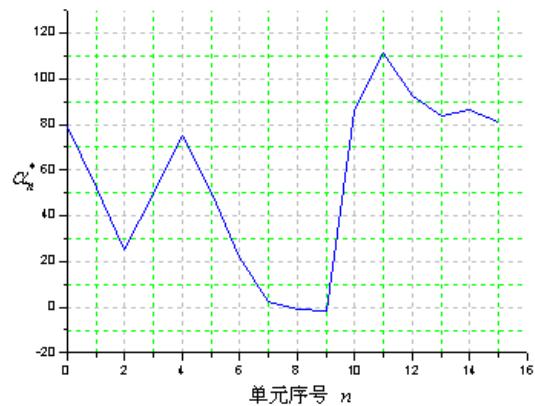


图 6 16 单元优化得到的相位分布

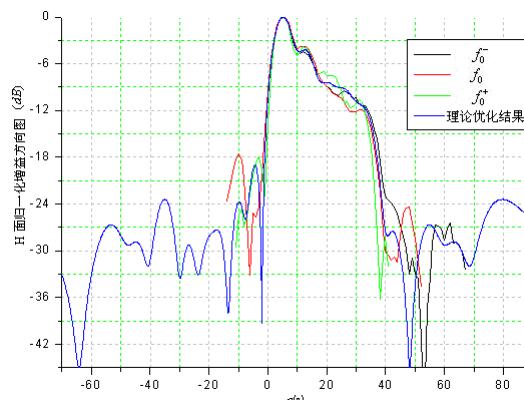


图 7 理论优化结果与实际测试结果的对比

由图 4 可以看到, 由于目标方向图为理想的余割平方方向图, 因而造成优化结果过渡区域拟合不是很好, 但是优化得到的方向图主瓣与指定波束的方向图主瓣已经非常接近, 副瓣也得到了较好的控制, 优化得到的幅度和相位分布都呈不规则分布。由图 7 可以看到, 由这种优化方法设计出的线阵,

其方向图在三个频点上各项指标均满足要求，已得到工程实现，可进行批量生产。

4 结论

本文给出了一种幅相加权阵列天线波束赋形的方法。该方法采用联合应用 DFP 和 BFGS 公式的变度量算法，并在基于这种算法的 C 语言优化程序的

基础上，融入了取全局最优的思想，对阵列天线的馈电幅度和相位进行优化，使阵列天线的主波束与预给波束形状吻合，副瓣电平也得到较好的控制。该方法是一种非常有效的无约束最优化方法，具有收敛快、计算量小、数值稳定性好的特点，并且其优化结果不受初值的限制，从而克服了局部寻优的缺点，是解决阵列天线波束赋形问题的有效方法。

参 考 文 献

- [1] M Bucci, etal.. Reconfigurable arrays by phase-only control[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991. 39(7): 919-925
- [2] J Michael Johoson. Genetic Algorithm Design of a switchable Shaped Beam Linear Array with Phase-only Control [A]. Aerospace Conference, 1999, 3, 6-13 March 1999, 3 :297-303.
- [3] Mark K Leavitt. A phase adaptation algorithm [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 754-756.
- [4] Robert G.Voges, Jerome K.Butler. Phase optimization of antenna array gain with constrained amplitude excitation [J] IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 20, Issue 4, Jul 1972:432 – 436.

作者简介：

韩华龙，男，硕士，主要研究领域为毫米波天线；

王建，男，教授，主要研究领域为毫米波天线、宽带天线、阵列天线、天馈网络一体化设计、计算电磁学等。

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>