

文章编号 1005-0388(2003)01-0028-04

一种阵列天线方向图的数值合成新方法^{*}

郭陈江 丁 君 石 敏 许家栋

(西北工业大学电子工程系, 陕西 西安 710072)

摘 要 给出了一种阵列天线方向图的数值合成方法。这种分析方法基于自适应天线理论, 通过数值迭代运算, 得到一组最佳权值, 用以控制方向图的主波束方向和副瓣电平的大小。该技术的优点是它适用于任意单元构成的不均匀阵列天线情况。计算结果表明该方法是有效的。

关键词 数值波束合成算法, 自适应天线

中图分类号 TN820 **文献标识码** A

A new numerical algorithm for pattern synthesis of array

GUO Chen-jiang DING Jun SHI Min XU Jia-dong

(Department of Electronic Engineering Northwestern
Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

Abstract In this paper, a numerical pattern synthesis algorithm for an array is presented in the basis of the adaptive array theory. By employing the iteration technique, the algorithm can find a set of optimum weights that steer the main beam in a given direction and yield the side-lobes meeting a specified level. Its advantage is suitable to an arbitrary set of array elements, and the array can have arbitrary nonuniform spacing between elements. The numerical results indicate that the algorithm is effective.

Key words numerical pattern synthesis algorithm, adaptive antenna array

1 引 言

近几年, 随着卫星通信和移动通信的迅速发展, 空间的电磁环境恶化、电磁干扰增强, 使得通信质量下降, 为解决这些问题, 副瓣低、方向性强、抗干扰能力强的智能天线得到极大的关注和研究。低副瓣的天线方向图合成问题就成为人们研究的关键课题。

在经典的阵列天线理论中, C. L. Dolph 用 Chebyshev 多项式推导出了使均匀线阵在给定副瓣电平的情况下, 产生最窄主瓣宽度的权值, 利用该权值可得到均匀副瓣电平面方向图。A. T. Villeneuve^[1]、R. S. Elliott 和 G. J. Stern^[2]给出了等间距阵列天线的低副瓣设计的分析方法。

这些方法一般只适用于均匀分布, 各向同性的

阵列单元情况。本文的目的是寻找一种简单的数值合成方法。它可以对任意单元所组成的阵列情况, 何能满足主波束在指定方向上, 且副瓣符合给定特性的最佳方向图。

根据自适应天线理论, 主波束的方向由所给定的控制向量来决定。为了降低副瓣电平, 假设在副瓣区加入了很多干扰, 通过调整干扰功率的大小, 获得理想的方向图。最早用自适应天线理论来分析天线方向图的是 Surean 和 Keeping^[3], 他们应用自适应天线阵列算法, 得到分布在圆柱上的阵列的权值, 但是他们并没有给出选择干扰谱的系统方法。后来 E. C. Dufort^[4]选择干扰谱等于所需功率方向图的倒数, 获得了均匀分布、各向同性的阵列权值。这种算法基于干扰谱和功率方向图在某一方向上造成恒定

的想法,通过使阵列的输出功率最小,获得最大的输出信噪比。

本文的方法不同于以上方法,而是利用循环反馈的方法来获得干扰的功率谱,通过干扰功率谱的反复迭代使方向图收敛到期望的结果。因为这种方法不同于解析方法,它是数值方法,因此比解析方法的适用性更广,可能应用于任意不均匀分布的各向异性单元组成的阵列。

2 自适应阵列模型

如图1所示,一个 N 元线阵天线,各单元的方向性函数为 $f_j(\theta)$,单元之间的间距与波长比为 d_j ,假设一单频连续波信号从角度 θ 入射到该线阵上, $x_j(t)$ 为第 j 个单元接收到的信号,定义信号向量为 X :

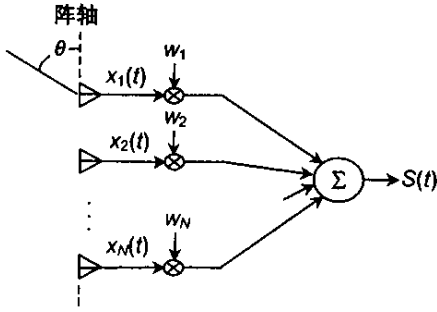


图1 N 元线阵

$$X = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \quad (1)$$

其中:上标 T 表示转置。

阵列输出信号为 $S(t)$,该参数由单元接收到的信号 $x_j(t)$ 与复权函数 w_j 乘积相加的总和:

$$S(t) = \sum_{j=1}^N w_j x_j(t) = W^T X \quad (2)$$

其中: W 为权向量。

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T \quad (3)$$

若信号频率为 ω_0 , 则

$$X = A e^{j\omega_0 t} F \quad (4)$$

其中: A 为信号振幅, F 为包含各阵元相移的方向函数向量。

$$F = [f_1(\theta), f_2(\theta) e^{-j\phi_2(\theta)}, \dots, f_N(\theta) e^{-j\phi_N(\theta)}] \quad (5)$$

且:

$$\phi_j(\theta) = 2\pi \left[\sum_{k=1}^{j-1} d_k \right] \cos \theta \quad j \geq 2 \quad (6)$$

由(2)(4)式可得阵列输出为:

$$S(t) = A e^{j\omega_0 t} W^T F \quad (7)$$

定义阵列电压方向图为 $\mu(\theta)$:

$$\mu(\theta) = |W^T F| \quad (8)$$

自适应阵列是一种根据外部环境调整权向量 W 的天线系统,权向量的调整依据使信干噪比(SINR)最大为原则,即方向图在信号方向最大,在干扰方向最小。

总的信号向量为:

$$X = X_d + X_i + X_n = X_d + X_u \quad (9)$$

其中: X_d 为所需信号向量, X_i 为干扰向量, X_n 噪声向量, $X_u = X_i + X_n$ 。

则最佳权值由文献[5]给出:

$$W = \mu \Phi_u^{-1} F_d^* \quad (10)$$

其中: Φ_u 为无用信号协方差矩阵,上标 $*$ 表示复共轭, μ 为任意非零常数。

期望信号从 θ_d 方向入射, 则

$$X_d = A_d e^{j(\omega t + \Psi_d)} F_d \quad (11)$$

另外设干扰信号由 θ_i 方向入射,

$$X_i = A_i e^{j(\omega t + \Psi_i)} F_i \quad (12)$$

自适应天线阵方向图的响应依赖于干扰信号的个数,一个 N 元阵有 $N-1$ 个自由度。一个自由度用来形成最大主瓣,另外 $N-2$ 个自由度用以产生抗干扰零陷,若有小于 $N-2$ 个干扰信号照射在天线阵上,通常在各干扰源方向上将形成零陷,但若多于 $N-2$ 个干扰信号入射时,则该天线阵不能形成各干扰源方向上的零陷,将形成在干扰方向上副瓣降低的综合方向图。自适应天线阵对干扰信号的抑制依赖于干扰信号的强度,某方向上的干扰信号越强,自适应调整后,该方向上的零陷越深。本文给出的方向图合成算法就是利用这个优点来降低副瓣的。

3 控制副瓣电平的数值算法

本文要解决的问题:对于给定任意单元特性和任意阵元分布的天线阵,寻找一组权向量,得到满足要求的方向图。首先选择向量 F_d 使主波束指向所需方向 θ_d ,主波束左右零点在 θ_L 和 θ_R 处,副瓣在 $\theta_L \leq \theta \leq \theta_R$ 区域之外。然后为了降低副瓣,假设在副瓣区域引入大量的干扰信号,干扰信号的数目 M 为2倍或3倍的自由度,通过不断调整干扰信号功率,来获得满意的副瓣特性。

假设一个 N 元线阵,单元间距为 $\lambda/2$ 。假设要求在 θ 角方向上的副瓣电平低于主波束峰值 $D(\theta)$ dB。初始步骤将所有干扰功率置零,只有噪声情况下,最优权向量由式(10)计算,方向图由式(8)计算

给出。把该步骤称为 $k = 0$ 次迭代,所得的方向图称为静止方向图。

将每次迭代所得的副瓣电平与所需的副瓣电平 $D(\theta)$ 比较,若在 θ_{im} 方向上的电平高于所需电平 $D(\theta_{im})$ 时,在 θ_{im} 方向的干扰信号功率将增加,反之减小,若干扰功率变为负数时则置零。

在确定第 k 次迭代的干扰功率之前,必须找出当前每一个干扰方向上电压的期望值 $d(\theta_{im}, k)$,它与副瓣电平 $D(\theta_{im})$ 和主波束峰值 $p(k)$ 的大小有关。

$$d(\theta_{im}, k) = P(k) \cdot 10^{[D(\theta_{im})/20]} \tag{13}$$

每次迭代时, $d(\theta_{im}, k)$ 都需要重新计算。主瓣宽度 $\theta_L(k), \theta_R(k)$ 也必须重新计算,因为主波束峰值 $p(k)$ 和主瓣宽度 $\theta_L(k), \theta_R(k)$ 在每次迭代后都会发生变化。若干扰的入射角 θ_{im} 落在 $\theta_L(k)$ 和 $\theta_R(k)$ 之间时,该干扰功率置为零。

调整副瓣区的干扰信号功率是通过调整干扰与噪声比来完成的。设 $\xi_{im}(k)$ 代表第 m 个干扰信号在第 k 迭代时的干噪比 INR,则第 $k + 1$ 次迭代中 INR 为:

$$\xi_{im}(k + 1) = \max[0, \Gamma_{im}(k)], \tag{14}$$

$$\theta_{im} \notin [\theta_L(k), \theta_R(k)]$$

其中:

$$\Gamma_{im}(k) = \xi_{im}(k) + K [P(\theta_{im}, k) - d(\theta_{im}, k)] \tag{15}$$

K 为迭代增益, K 值的大小依赖于所期望的副瓣深度 $D(\theta)$,为使算法尽可能快的收敛,副瓣电平越低, K 值应选择的越大。但若 K 值选择的过大,算法会变的不稳定。因此在计算中要特别注意 K 值的选择,以使算法收敛最快。

M 个干扰功率确定后,协方差 Φ_u 就可以计算了,由式 (10) 得到最优权向量 W ,再由式 (8) 得到新的合成方向图。这个循环持续到得到满意的方向图为止。

4 算法应用

4.1 各向同性单元均匀分布的线阵情况

各向同性单元均匀分布的十元线阵,单元间距为半波长,要求该天线阵的主波束在 $\theta_d = 65^\circ$ 。图 2 (a) 为 $k = 0$ 次迭代所得的静止方向图。图 2 (b) 为 $k = 8$ 次迭代获得的优化方向图,副瓣电平为 -30dB ,其中迭代增益 $K = 1.5$,计算出的最佳权值如表 1 所示。图 2 (c) 为 $k = 501$ 次迭代获得的优化方向图,

该方向图具有 -35dB 的均匀副瓣,可以看出,副瓣要求越低,迭代次数会大量增加。

表 1 副瓣电平低于 -30dB 的权值

n	权值	n	权值
1	0.2490 ^(0.0000)	6	1.0000 ^(0.3553)
2	0.4197 ^(1.3277)	7	0.8822 ^(1.6830)
3	0.6699 ^(2.6554)	8	0.6699 ^(3.0107)
4	0.8822 ^(-2.3001)	9	0.4197 ^(1.9448)
5	1.0000 ^(-0.9724)	10	0.2490 ^(-0.6171)

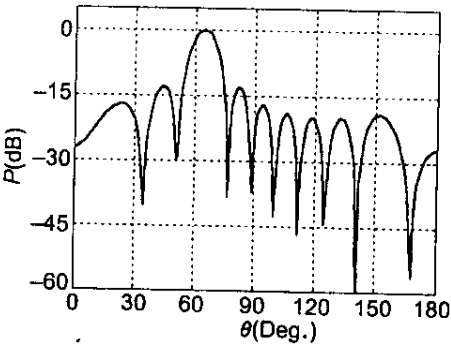


图 2(a) 10 元线阵的静止方向图

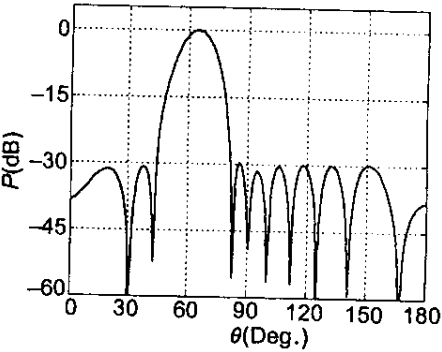


图 2(b) 10 元线阵的优化方向图
(-30dB 均匀副瓣)

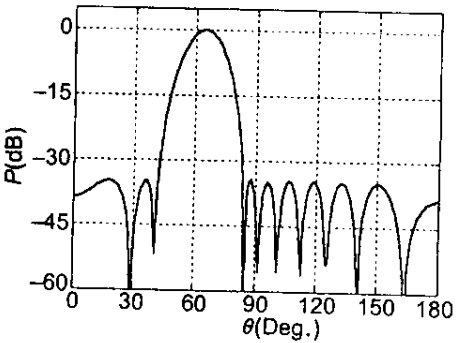


图 2(c) 10 元线阵的优化方向图
(-35dB 均匀副瓣)

4.2 各向异性单元均匀分布情况

假设有一 12 元短偶极子组成的均匀线阵,每一单元的方向函数为 $f(\theta) = \cos\theta$,希望主瓣在 $\theta_d = 65^\circ$,副瓣电平为 -35dB ,用本文给出的自适应算法解决此问题,则阵元的方向性函数从一开始就包含在算法中。图 3(a)是静止方向图,图 3(b)是用此算法获得的优化方向图,可以看到副瓣电平满足设计要求。

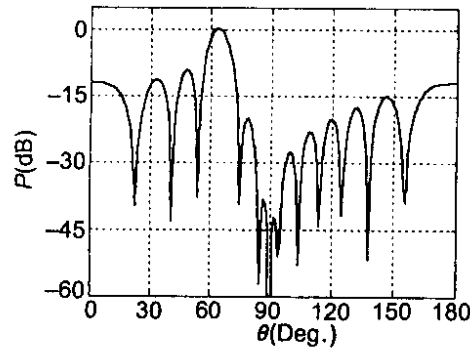


图 3(a) 12 元短偶极子线阵的静止方向图

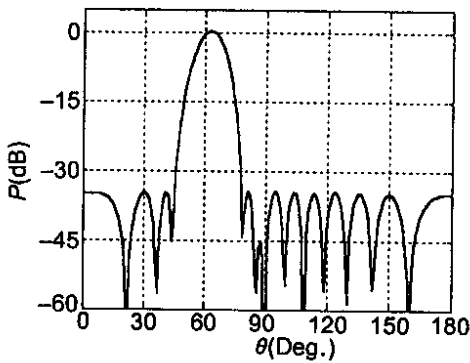


图 3(b) 12 元短偶极子线阵的优化方向图

5 结论

此算法是一种数值合成方法,经过数值迭代,找出一组最优权值,使给定的天线阵列满足特定的方向图要求。该算法的优点是它可以直接包含单元的方向性,对任意单元均可以计算,而且单元与单元也可以不相同,对阵元的空间分布没有任何限制。

参考文献

- [1] A T Villeneuve. Taylor patterns for discrete arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. ,1984 ,AP-32(10):1089 ~ 1093 .
- [2] R S Elliott and G J Stern. A new technique for shaped beam synthesis of equispaced arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. ,1984 ,AP-32(10):1129 ~ 1133 .
- [3] J C Sureau and K J Keeping. Sidelobe control in cylindrical arrays[J]. IEEE Trans Antenas Propagat. ,1982 ,AP-30(5): 1027 ~ 1031 .
- [4] E C Dufort. Pattern synthesis based on adaptive array theory [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. ,1989 ,AP-37(8):1011 ~ 1018 .
- [5] S P Applebaum. Adaptive arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. ,1976 ,AP-24(5) 586 ~ 598 .



郭陈江 (1963-),男,陕西人,西北工业大学电子工程系副教授,硕士,主要从事电磁场与微波技术、天线、电磁特性等方面的研究。



丁 君 (1964-),女,陕西人,西北工业大学电子工程系副教授,硕士,主要从事电磁场与微波技术、智能天线、电磁兼容等方面的研究。



石 敏 (1978-),女,陕西人,西北工业大学电子工程系硕士研究生,主要从事智能天线算法方面的研究。

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>