

一种基于 LS 的天线阵方向图综合算法*

杨 林,杨莘元

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,哈尔滨 150001)

[摘要] 采用一种基于最小二乘理论的算法对阵列天线进行方向图综合,仅对旁瓣峰值和主瓣电平进行处理,可以实现旁瓣和主瓣电平的同时控制,使天线阵方向图向期望方向变化。算法可以对等间距和不等间距天线阵进行综合,计算量也较小,所以具有很强的实用性,仿真结果验证了算法的有效性。

[关键词] 最小二乘;方向图综合;不等间距阵列

[中图分类号] TN821+.8 [文献标识码] A

An Algorithm of Array Pattern Synthesis Based on Least-Squared

YANG Lin, YANG Shen-yuan

(School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Applying an algorithm based on Least-Squared to pattern synthesis of linear arrays. The algorithm only conduces sidelobes' peak and the mainlobe, thus can exert design of sidelobe and mainlobe in the same time. The algorithm can complete pattern synthesis for uniform and nonuniform arrays and can control mainlobes and sidelobes according to design. The simulating results show that the algorithm completes the required design very well so it owns fairly practical-value.

Key words: least-squared; pattern synthesis; nonuniform arrays

1 引言

天线阵综合就是指按规定的方向图要求,用一种或多种方法来进行天线系统的设计,使该系统产生的方向图与所要求的方向图良好逼近。天线阵综合问题近年来受到了人们越来越多的重视。Dolph 在他的经典论文中导出了等间距线阵的阵列权值,它可以在给定最大旁瓣电平的情况下使波束宽度达到最小,Olen 和 Compton. Jr^[2]应用自适应理论对方向图进行综合,在旁瓣部分按需要加入人为干扰,使其满足设计要求,F. Wang^[7]将天线阵综合转换成线性估计问进行解决。

近年来,天线阵综合的热点是实现不等间距阵列的综合,以及对主瓣电平的控制,这样的天线阵列也具有更强的实用性。这里考虑采用一

种基于最小二乘方法的综合算法,仅对旁瓣峰值和主瓣电平进行处理,使其按设计要求进行变化,计算量相对较小,并且可以实现等间距和不等间距的天线阵综合,仿真结果显示算法很好满足了设计要求。

2 算法的阐述

考虑如图 1 所示的 N 元天线阵列,假设有一组单频连续波信号从不同角度入射阵列,阵列导向矢量为:

$$U(\theta) = [f_1(\theta), f_2(\theta)e^{-j\varphi_2(\theta)}, L, f_Ne^{-j\varphi_N(\theta)}]^T$$
$$(\varphi_i(\theta) = 2\pi d_i \sin\theta/\lambda, i \geq 2)$$
$$\theta \in \Theta, \Theta \text{ 为信号入射角度的集合,且 } \Theta \in [-90^\circ,$$

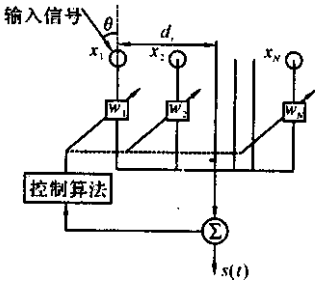


图 1 N 元天线阵

* 收稿日期:2005-10-27
基金项目:国防预研重点项目资助(40106030501)
作者简介:杨林(1979-),男,博士研究生,研究方向:电子对抗、精确制导、阵列天线信号处理方面的研究。

90°],上标 T 表示向量转置, $f_i(\theta)$ 为第 i 个阵元的方向图, d_i 是阵元 1 与阵元 i 之间的间距。

天线阵列的输出响应方向图为:

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{W}^H\boldsymbol{U} \tag{2}$$

其中:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}&=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{L},\boldsymbol{w}_N]^T \\ \boldsymbol{U}&=[\boldsymbol{U}(\theta_1),\boldsymbol{L},\boldsymbol{U}(\theta_M)] \\ \boldsymbol{P}&=[P(\theta_1),\boldsymbol{L},P(\theta_M)],(\theta_1,\boldsymbol{L},\theta_M\in\Theta),\end{aligned}$$

上标 H 表示向量共轭转置。

天线阵综合的目的是要使设计天线的方向图 \boldsymbol{P} 和期望方向图 \boldsymbol{P}_d 最大程度的一致。即要完成:

$$\min_w J=\min_w\|\boldsymbol{P}-\boldsymbol{P}_d\| \tag{3}$$

这里 $\boldsymbol{P}_d=[P_d(\theta_1),\boldsymbol{L},P_d(\theta_M)]$ 。

$(\theta_1,\boldsymbol{L},\theta_M\in\Theta)$ 是一组角度,根据设计要求,预先设定这些角度的期望值,然后根据最小二乘算法进行计算。由最小二乘算法可知,最优权值为:

$$\boldsymbol{W}_{opt}=(\boldsymbol{U}\boldsymbol{U}^H)^{-1}\boldsymbol{U}\boldsymbol{P}_d^H=\boldsymbol{R}_s^{-1}\boldsymbol{R}_d \tag{4}$$

搜索方向图的峰值旁瓣位置的方法是将旁瓣峰值角度作为入射角,通过最小二乘方法进行计算最优权值,并根据设计要求不断进行调整,直到满足要求为止。在对主瓣的处理中,可以根据要求将主瓣形状设计为余弦函数或者平顶。每次迭代之后, \boldsymbol{R}_s 和 \boldsymbol{R}_d 都要做出调整,调整公式如下:

$$\boldsymbol{R}_s(k+1)=\boldsymbol{R}_s(k)+\Delta\boldsymbol{R}_s(k) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{R}_d(k+1)=\boldsymbol{R}_d(k)+\Delta\boldsymbol{R}_d(k) \tag{6}$$

$$\Delta\boldsymbol{R}_s(k)=\sum_n a_k(n)\boldsymbol{U}(\theta_n)\boldsymbol{U}^H(\theta_n) \tag{7}$$

$$\Delta\boldsymbol{R}_d(k)=\sum_n a_k(n)P_r(\theta_n)\boldsymbol{U}^H(\theta_n) \tag{8}$$

其中 $P_r(\theta_n)$ 是理想的峰值,为计算简单,这里取 $P_r(\theta_n)$ 旁瓣峰值为 0, θ_n 为第 k 次迭代时的第 n 个旁瓣峰值角度, $a_k(n)$ 为第 k 次迭代的调整系数。

需要指出的是,每次迭代得出的旁瓣峰值未必相同,所以 θ_n 会是新的观察角,从而 $\Delta\boldsymbol{R}_s$ 和 $\Delta\boldsymbol{R}_d$ 不断的提供新的数据,使得算法不断进行调整。

$$a_{k+1}(n)=\begin{cases} b_k(n) & \theta_n \text{ 在主瓣区} \\ \max\{K_1[P(\theta_n)-P_d(\theta_n),0]\} & \theta_n \text{ 在旁瓣区} \end{cases} \tag{9}$$

$$b_k(n)=\begin{cases} 0, & |p(\theta_n)-P_d(\theta_n)|\leq\epsilon \\ K_0|P(\theta_n)-P_d(\theta_n)|, & \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

在旁瓣区, $P(\theta_n)$ 和 $P_d(\theta_n)$ 分别为第 k 次迭代时的第 n 个旁瓣的实际值和期望值, K_0 、 K_1 分别为主瓣和旁瓣峰值的调整系数,在进行迭代时,要尽量使主瓣电平和旁瓣峰值电平的变化协调同步,否则,结果会不理想。当 K_0 与 K_1 的比值取的较小时,副瓣电平较高,无法完成设计要求,当比值较大时,副瓣电平会出现不相等的现象。具体设计时要调试使其比值在一定范围内,一般 K_0 比 K_1 小很多,为一比几千。 ϵ 为误差上限,一般等于 0.001。

这样,第 $k+1$ 次迭代最佳权值为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}(k+1)&=[\boldsymbol{R}_s(k)+\Delta\boldsymbol{R}_s(k)]^{-1} \\ &[\boldsymbol{R}_d(k)+\Delta\boldsymbol{R}_d(k)]\end{aligned} \tag{11}$$

重复计算,直到满足期望条件为止。

在迭代之前,初始权值需要被做如下设置:

$$\boldsymbol{R}_s(0)=\sigma^2\boldsymbol{I}+\sum_{\theta_n\in\text{主瓣}}\boldsymbol{U}(\theta_n)\boldsymbol{U}^H(\theta_n) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{R}_d(0)=\sum_{\theta_n\in\text{主瓣}}P_r(\theta_n)\boldsymbol{U}^H(\theta_n) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{W}(0)=\boldsymbol{R}_s^{-1}(0)\boldsymbol{R}_d(0) \tag{14}$$

这里,加入 $\sigma^2\boldsymbol{I}$ 的目的是使算法更稳定,防止 $\boldsymbol{R}_s(0)$ 不可逆,以免产生畸变。为计算简便,假设理想情况下的旁瓣部分均为 0,这样可以减小计算量,同时不影响结果。

在调整系数的计算中,按要求的主副瓣比值来计算,而旁瓣峰值的位置和主瓣峰值的大小都是不断变化的,所以每次迭代的期望旁瓣峰值大小也要随之变化,算法根据每次迭代的主瓣峰值来计算旁瓣的期望值,这样保证了算法的稳定性和快速性。

3 仿真结果

下面举两个例子验证算法的可实现性,这里考虑的天线阵元为全向性的。示例一,设计一个不等间距 10 元阵列,要求旁瓣电平低于主瓣 35dB,主瓣形状为 $\cos(4\theta)$, $K_0=1$, $K_1=8\ 000$,仿真结果如图 2 所示,图 2(a) 为初始方向图,图 2(b) 为第一次迭代方向图,图 2(c) 为最终方向图,阵列间距(单位: λ)及最终权值如表一所示。

示例二,设计一个 9 元等间距阵列,阵元间距为 0.5λ ,要求主瓣为平顶,且旁瓣低于主瓣电平 25dB, $K_0 = 3$, $K_1 = 7\ 000$,仿真结果如图 3 所示,阵列权值如表二所示。

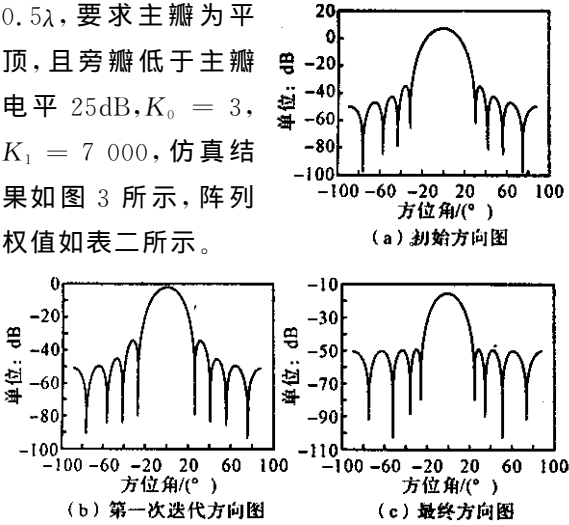


图 2 最终权值对应与表 1 的天线阵方向图

表 1 图 2(c)的对应权值

n	d	W
1	-3.2	0.0094853 + 8.3485e-014i
2	-2.4	0.0067315 - 1.6279e-013i
3	-1.7	0.027081 + 5.1558e-013i
4	-1.1	-0.0041596 - 7.8941e-013i
5	-0.6	0.041416 + 6.0633e-013i
6	0.6	0.041416 - 6.0633e-013i
7	1.1	-0.0041596 + 7.8941e-013i
8	1.7	0.027081 - 5.1558e-013i
9	2.4	0.0067315 + 1.6279e-013i
10	3.2	0.0094853 - 8.3485e-014i

表 2 图 3 的对应权值

n	W
1	0.0011701 + 6.086e-018i
2	0.0010566 + 1.3759e-017i
3	-0.00023915 + 1.9851e-017i
4	-0.0028425 + 2.3989e-017i
5	-0.0057791 + 1.8323e-017i
6	-0.0074407 + 1.0321e-017i
7	-0.006943 + 2.2577e-018i
8	-0.0047231 - 1.4774e-018i
9	-0.0023067 - 3.4123e-018i

4 结论

由上面仿真图形可以看出,算法很好的实现了设计任务,对主瓣电平,旁瓣峰值的控制效果是相当的,并且对等间距和不等间距阵列都可以实现综合,所以使算法具有很强的实际意义。

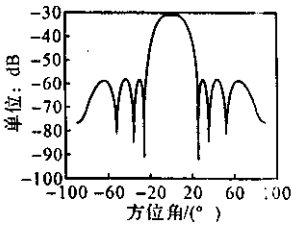


图 3 权值对应于表 3 的天线阵最终方向图

[参 考 文 献]

[1] DUFORT EDWARD C. Pattern synthesis based on adaptive array theory[J]. IEEE Trans. Antennas and propagation, 1989,37(8):1011-018.

[2] OLEN C A,COMPTON R T, JR.. A numerical pattern synthesis algorithm for arrays[J]. IEEE Trans. Antennas and propagation , 1990,38(10): 1666-1676.

[3] Zhou Philip Yuanping,,Ingram Mary Ann. . Pat-tern synthesis for arbitrary arrays using an adaptive array method[J]. IEEE Trans. Antennas and prop-agation, 1999,47(5):682-689.

[4] C. Tseng and L. J. Griffiths. A simple algorithm to achieve desired patterns for arbitrary arrays[J]. IEEE Trans. Signal Process, 1992,40(11):2737-2746.

[5] M. Er. Array pattern synthesis with a controlled mean-square sidelobe level[J]. IEEE Trans. Sig-nal Process,1992,40(4):977-981.

[6] H. Lebreit and S. Boyd. Antenna array pattern syn-thesis via convex optimization[J]. IEEE Trans. Sig-nal Process,1997,45(3):526-981.

[7] F. Wang,R. Yang and C. Frank. A new algorithm for array pattern synthesis using the recursive least squares method [J]. IEEE Signal Process Lett, 2003,10(8):235-238.

[8] F. Wang, V. Balakrishnan, P. Zhou, J. Chen, R. Yang,and C. Frank. Optimal array pattern synthe-sis using semidefinite programming [J]. IEEE Trans. Signal Process , 2003,51(5):1172-1183.

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>