

文章编号:1005-6122(2005)01-0001-04

采用非线性最小二乘法实现圆环天线阵的方向图综合*

陈腾博, 陈轶博, 焦永昌, 张福顺

(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)

摘要: 为使阵列天线获得圆对称方向图, 通常采用环阵的排列方式。本文研究了圆环阵列天线的特殊方向图综合方法, 文中采用非线性最小二乘法对影响天线方向图的诸多参数, 如单元的幅度和相位、单元间距以及单元在阵中的位置进行了优化设计, 使阵列方向图在最小二乘意义上逼近预先给定的理想方向图。仿真结果表明该方法可行、有效。

关键词: 阵列天线, 圆环阵列, 非线性最小二乘法

Synthesis of the Circular Antenna Array by the Nonlinear Least Square Method

CHEN Teng-bo, CHEN Yi-bo, JIAO Yong-chang, ZHANG Fu-shun

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Circular array is a common used structure that yields the symmetry radiation pattern. The optimal design of the circular array antenna is addressed in this paper. The nonlinear least-square method is used to optimize the parameters affecting antenna pattern such as the amplitude and phase of the elements, the space between the elements as well as the positions of the elements in array so that the pattern of array antenna approaches the desired pattern in the least square sense. Simulation results show the proposed method is feasible and efficient.

Key words: Array antenna, Hexagon array, Nonlinear least-square method

引言

阵列天线被广泛用于相控阵雷达、飞机和卫星导航等领域。为了获得圆对称的方向图, 通常使用圆环阵列天线的形式。目前针对环阵的优化方法主要考虑在阵列单元均匀分布情况下, 对单元的激励进行优化综合。事实上, 在天线阵列中每个单元的幅度和相位、单元的间距和单元在阵中的位置都是影响方向图变化的参量。自然还应考虑单元本身的特性对阵列总特性的影响。本文对多环 N 元圆环阵天线进行了优化综合分析, 影响方向图变化的各个参量都被作为优化变量, 以工程要求的辐射特性设计一个理想方向图曲线作为优化目标, 构造一个非线性最小二乘数学模型。在优化过程中需要加入约束条件, 以保证优化结果的工程应用可行性。用

优化综合后的结果计算天线远场方向图, 与理想方向图相比, 逼近、副瓣很低, 天线的利用效率得到提高。

1 圆环阵的排列方式

图 1 给出了 37 元圆环阵列单元在阵中的分布, 本文将单元按逆时针排序, 采用这种方式的目的是为了能够方便准确地表示每个单元的阵中相位差, 便于控制馈源阵列的辐射波束在要求角域内快速、无捷变扫描。经过优化综合后各单元在阵中的位置与图中有一些偏差。

圆环阵列天线的坐标关系如图 2 所示。假设 $f(\theta, \varphi)$ 是天线单元的主极化方向图, 喇叭单元半径为 c , 喇叭长度为 R 。则天线阵在远区观察点 $\rho(r, \theta, \varphi)$ 的主极化方向图可表示为:

* 收稿日期:2004-01-05;定稿日期:2004-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60171045)

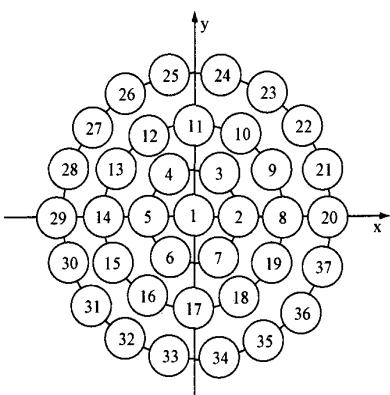


图1 37元圆环阵单元分布图

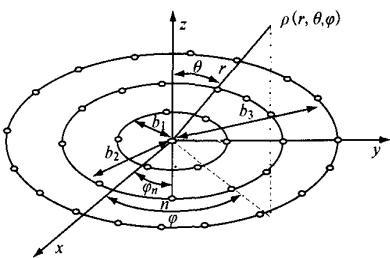


图2 圆环阵单元与坐标关系

$$\begin{aligned}
 E(x, \theta, \varphi) = & (I_0 e^{j\alpha_0} + \sum_{n=1}^{N_1} I_n e^{[kb_1 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) + a_n]} + \\
 & \sum_{n=N_1+1}^{N_1+N_2} I_n e^{[kb_2 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) + a_n]} + \\
 & \sum_{n=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} I_n e^{[kb_3 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) + a_n]} f(\theta, \varphi) \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中

$$x = (I_0, I_1, \dots, I_{N-1}, a_0, a_1, \dots, a_{N-1}, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N-1}, b_1, b_2, b_3, c, R)^T \quad (2)$$

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + 1, \quad N_1 < N_2 < N_3 \quad (3)$$

I_n, a_n 为第 $n+1$ 个单元的激励幅度、相位 ($n = 0, 1, \dots, N-1$)， φ_n 为第 $n+1$ 个单元在阵列平面中的方位角 ($n = 1, 2, \dots, N-1$)， b_1, b_2 和 b_3 分别是第一、二、三环的半径。 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是波长。显然, 当 $N=37$ 时, 向量 x 有 113 个分量。

2 优化设计模型及求解方法

作为例子, 我们研究如图 1 所示的 $N=37$ 元圆环阵天线。在天线设计中, 除了把单元的激励幅度和相位以及内、外圆环半径取为设计变量外, 还要使各单元在环上的分布间距不同, 实现阵列单元的最优配置。天线设计的目标是: 需求最佳的单元激励

万方数据

幅度, 单元位置以及内、外圆环半径, 使阵列的方向图尽可能逼近预先给定的理想方向图。由于我们要求天线阵方向图应具有空间圆对称性, 故将圆环等分为 m 份 (m 是环上单元的个数), 每一段的夹角为 $\psi = 2\pi/m$, 在其中放置一个辐射单元, 并通过优化算法求得各单元在所属角域内的最佳位置。在优化过程中还需要考虑工程的可实现性, 因此需引入一定的上、下界约束条件: 单元之间、环与环之间的间距大于两倍的馈源喇叭口径, 外环半径大于 4 倍的喇叭口径, 内环半径大于 2 倍的口径。我们用 $A(\theta)$ 来表示预先给定的理想方向图, 它不随 φ 角变化。为简单起见, 把 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$ 离散化, 取 $M_1 \times M_2$ 个均匀离散点, $\theta_i \in [-\pi/2, \pi/2]$ 和 $\varphi_j \in [0, 2\pi]$:

$$\theta_i = -\pi/2 + (i-1) \times \pi/(M_1-1), \quad i = 1, 2, \dots, M_1$$

$$\varphi_j = (j-1) \times 2\pi/(M_2-1), \quad j = 1, 2, \dots, M_2$$

因此, 非线性最小二乘问题的目标函数为:

$$r(x) = \sum_i \sum_j \|E(x, \theta_i, \varphi_j) - A(\theta_i)\|_2^2 \quad (4)$$

考虑到设计中变量应满足的上、下界约束条件, 非线性最小二乘设计的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min r(x) \\ \text{s. t. } \begin{aligned} & (n-1)\pi/3 < \varphi_n < n\pi/3, \quad 0 \leq n \leq 6 \\ & (n-7)\pi/6 < \varphi_n < (n-6)\pi/6, \quad 7 \leq n \leq 18 \\ & (n-19)\pi/9 < \varphi_n < (n-18)\pi/9, \quad 19 \leq n \leq 37 \\ & b_1 > 2c, \quad b_2 > 4c, \quad b_3 > 6c \\ & 0 \leq I_n \leq 1, \quad 0 \leq a_n \leq 2\pi, \quad n = 0, 1, L, 36 \end{aligned} \end{cases} \quad (5)$$

Gauss-Newton 法的搜索过程如下:

① 给定初始点 $x^{(0)}$, 精度 $\varepsilon_0, k=0$ 。

② 对 $i=1, 2, \dots, M$, 求 $r_i(x^{(k)})$, 得 $r(x^{(k)}) = [r_1(x^{(k)}), \dots, r_m(x^{(k)})]^T$; 对 $i=1, 2, \dots, M$ 和 $j=1, 2, \dots, N$, 求 $J_{ij}(x^{(k)}) = \frac{\partial r_i(x^{(k)})}{\partial x_j}$, 得 Jacobi 矩阵 $J(x^{(k)}) = [J_{ij}(x^{(k)})]$ 。

③ 解线性方程组 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) d^{(k)} = -J(x^{(k)}) r(x^{(k)})$ 求出搜索方向 $d^{(k)}$ 。在解方程组时, 如果发现矩阵 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 的秩不是 N , 则不解方程组, 直接取 $d^{(k)}$ 为负梯度方向, 即

$$d^{(k)} = -\frac{1}{2} \nabla F(x^{(k)}) = -J(x^{(k)})^T r(x^{(k)})$$

④ 直线搜索 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}$, 其中 λ_k 满足 $F(x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}) = \min_{\lambda} F(x^{(k)} + \lambda d^{(k)})$

⑤若 $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| < \varepsilon$,则得到解 X_{opt} ,停止计算;否则转向⑥。

⑥ $k = k + 1$,转向②。

式中 x_k 为本次迭代的解向量, d_k 为搜索方向, a 为搜索方向上的步长参数。这里的一维搜索就是利用本次迭代的信息作为构造下次迭代的条件。 d_k 可以保证每一次迭代都使函数 $r(x)$ 减小。经过有限次迭代后, x_k 趋向最优解,此时可借助MATLAB计算软件求得非线性最小二乘问题的最优解,运算的返回值即残差很小^[3~5]。一般全局优化方法收敛速度慢且效果并不理想。本文在优化过程中为了避免解的收敛性陷入局部极值,采用满足约束条件的若干个不同初始向量 $x^{(0)}$ 进行多次搜索,选择计算结果中的最优值,从而克服了Gauss-Newton法局部收敛的缺点。

3 数值仿真

在数值模拟中, $N=37$, $N_1=6$, $N_2=12$, $N_3=18$ 。本文研究的37元圆环阵单元分布见图2,单元的阵中方向图即主极化方向图是相同的。这里采用的天线单元是光壁圆锥喇叭天线。光壁喇叭辐射方向图 $f(\theta, \varphi)$ 的计算方法见文献[1]。本文讨论圆环阵的特殊方向图综合问题。理想方向图函数可取为: $A(\theta) = \cos^2 \theta$ 。采用非线性最小二乘法对37元圆环阵进行优化设计,优化结果见表1所示, $c=0.37\lambda$, $b_1=0.79\lambda$, $b_2=1.58\lambda$, $b_3=2.38\lambda$, $R=2.44\lambda$ 。经过48次迭代最后返回的目标函数值 $f(x)=4.72586$,返回 x 处残差的平方范数 resnorm = 4.7259。

图3和图4比较了阵列优化方向图和理想方向图。E面副瓣电平为-32.1dB,H面副瓣电平为-28.5dB,E面3dB波瓣宽度11.42°,H面3dB波瓣宽度11.42°,理想方向图3dB波瓣宽度11.34°。比较后看出,优化综合后的天线方向图与理想方向图非常逼近。

表2为不同 φ 角天线方向图波瓣特性,可以看出,天线副瓣变化很小,3dB波瓣宽度基本不变, φ 向对称性很好。

4 仿真结果的验证

根据非线性最小二乘法的优化综合,得到了圆环阵列单元的幅相分布和单元间距。使用MATLAB软件进行了主要计算。在优化综合中,喇叭单元方向图的计算通过ANSOFT HFSS 8.0进行验证,其算万方数据

表1 37元圆环阵优化后单元位置和幅相分布

编 号	单元位置	激励幅 度(I_i)	激励相位 号(φ_i)	(rad)	编 号	单元位置	激励幅 度(I_i)	激励相位 号(φ_i)	(rad)
0	圆心	0.0365	0.0469	19	0	0.0161	0.0615		
1	0	0.0393	0.0615	20	0.3491	0.0177	0.0540		
2	1.0472	0.0392	0.0540	21	0.6981	0.0162	0.0549		
3	2.0944	0.0393	0.0549	22	1.0472	0.0160	0.0489		
4	3.1416	0.0393	0.0489	23	1.3963	0.0186	0.0546		
5	4.1888	0.0392	0.0546	24	1.7453	0.0160	0.0504		
6	5.2360	0.0393	0.0504	25	2.0944	0.0162	0.0846		
7	0	0.0291	0.0846	26	2.4435	0.0177	0.0719		
8	0.5236	0.0289	0.0719	27	2.7925	0.0161	0.0756		
9	1.0472	0.0298	0.0756	28	3.1416	0.0161	0.0607		
10	1.5708	0.0298	0.0607	29	3.4907	0.0177	0.0864		
11	2.0944	0.0289	0.0864	30	3.8397	0.0162	0.0707		
12	2.6180	0.0291	0.0707	31	4.1888	0.0160	0.0781		
13	3.1416	0.0291	0.0781	32	4.5379	0.0186	0.0730		
14	3.6652	0.0289	0.0730	33	4.8869	0.0160	0.0772		
15	4.1888	0.0298	0.0772	34	5.2360	0.0162	0.0715		
16	4.7124	0.0298	0.0715	35	5.5851	0.0177	0.0893		
17	5.2360	0.0289	0.0893	36	5.9341	0.0161	0.0642		
18	5.7596	0.0291	0.0469						

表2 不同 φ 角天线方向图波瓣特性

φ	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
3dB波瓣 宽度(deg)	11.35	11.36	11.32	11.34	11.41	11.29	11.36	11.38
副瓣电 平(dB)	-28.1	-27.48	-27.5	-27.78	-28.06	-27.67	-27.54	-28.10

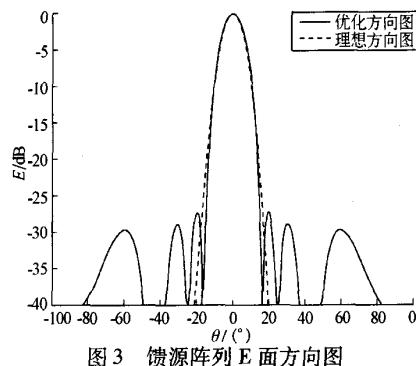


图3 喂源阵列E面方向图

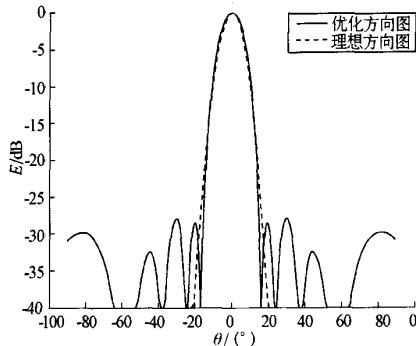


图4 喂源阵列H面方向图

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>