

超方向性天线最优化综合方法研究

陈永锋 黄兴忠

西南电子电信技术研究所，上海 200434

摘要：超方向性天线比均匀馈电的普通天线具有更小的尺寸和更高的方向性系数。因此，超方向性天线综合方法的研究一直受到天线研究人员的关注。近年来，随着阵列天线和数字波束形成理论的出现，人们提出了多种超方向性天线综合的实用方法。本文以圆形天线阵为例，详细介绍了三种典型的超方向性天线综合方法及其数值计算结果，并对相关结果进行了分析和讨论。

关键字：超方向性天线，方向性系数，综合方法

Study of Synthesis Methods for Optimization of Super-directive Array Antennas

CHEN Yong-feng HUANG Xing-zhong

Southwest Research Institute of Electronic Technology , Shanghai 200434

Abstract: Super-directive antenna arrays can be designed to achieve higher directivities than common antennas, which are obtained from the uniformly excited equivalent array. Different approaches have been adopted for the design of super-directive arrays since the beginning of last century. In this paper, we explored three typical super-directive synthesis methods for circle arrays and their numerical simulations. The characteristics of these synthesis methods and numerical results are also discussed. It shows that the synthesis method for constrained optimization of super-directive array antennas is better than others.

Key Words: Super-directive Array Antennas, Directivity, Synthesis Method

1 引言

在短波频段(3-30MHz)，为使接收或发射天线获得一定的方向性增益，天线的尺寸往往很大，从而给天线场地的选取、安装和日常维护带来很大的困难。因此，小尺寸高增益短波天线的研究一直是天线研究的热点问题之一，其中超方向性天线阵列的理论和应用研究是这一领域最具挑战性的工作之一。

早在上世纪20年代就有人提出了超方向性天线的基本概念[1]，在随后的几十年里，人们对超方向性天线的理论进行了广泛而深入的研究[2]，但由于技术条件的限制，超方向性天线的研究并没有得到很好的发展和应用。近年来，随着阵列天线和数字波束形成理论的出现和日益完善，超方向性天线的理论和应用研究[3]得到了长足的发展，给出了许多很有价值的超

方向性天线综合方法[4-6]，但其中许多方法都是在一定的假设条件下提出的，具有一定的局限性。因此，如何根据需要选择合适的综合方法在超方向性天线的实际应用中具有十分重要的意义。

本文详细介绍了三种典型的超方向性天线综合法的基本思想及其数值计算方法，对不同方法之间的内在联系和数值计算结果进行了初步的分析和讨论。结果表明，与其它方法相比，约束最优化综合法在超方向性天线综合中具有更好的灵活性和适应性。

2 圆形阵列超方向性综合的基本理论

设由N个单元组成的圆阵等间距排列，所有单元位于x-y平面内，其中第N个单元位于x轴上，圆阵的半径为a，如图1所示。

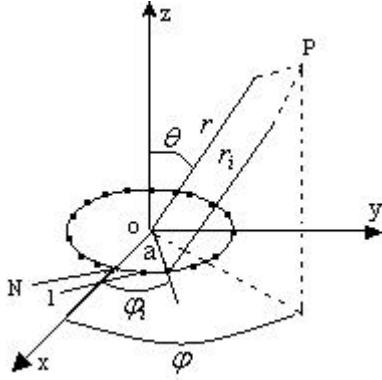


图1 圆阵的结构示意图

天线阵的方向函数可写为

$$E(\theta, \varphi) = \bar{V}^H(\theta, \varphi) \bar{I} \quad (1)$$

式中， $\bar{V}(\theta, \varphi)$ 是与天线阵结构及各阵元方向性有关的 N 维矢量； \bar{I} 是阵元的激励电流，可分别写为

$$\bar{V}(\theta, \varphi) = [g_1(\theta, \varphi) e^{-j2\pi a_0 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_1)}, \Lambda, \dots] \quad (2a)$$

$$g_N(\theta, \varphi) e^{-j2\pi a_0 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_N)}]^T \quad (2a)$$

$$\bar{I} = [I_1 e^{j\varphi_1}, I_2 e^{j\varphi_2}, \Lambda, I_N e^{j\varphi_N}]^T \quad (2b)$$

式中， $g_i(\theta, \varphi)$ 、 I_i 和 φ_i 分别为第 i 个天线单元的方向函数、激励电流的幅度和相位， $k = 2\pi / \lambda$ ； φ_i 为第 i 个天线单元在 x - y 平面上与 x 轴之间的夹角； $a_0 = a / \lambda$ 即为圆阵的归一化半径。该圆阵的方向性系数和最大方向辐射效率分别为

$$D = \frac{\bar{I}^H \bar{A}(\theta_0, \varphi_0) \bar{I}}{\bar{I}^H \bar{B} \bar{I}} \quad (3a)$$

$$\eta = \frac{\bar{I}^H \bar{A}(\theta_0, \varphi_0) \bar{I}}{N \bar{I}^H \bar{I}} \times 100\% \quad (3b)$$

式中， (θ_0, φ_0) 为主瓣辐射方向； \bar{A} 、 \bar{B} 都是与天线阵元方向性及天线阵结构有关的 $N \times N$ 矩阵。

A. 二次型综合法

二次型综合法应用于超方向性圆形阵列天线的基本思想是：将具有正定性质的天线阵方向性系数的分子分母分别用两个二次型表达，然后通过求解最大本征值和特征向量的方法得到最大方向性系数下天线阵列各单元的激励电流[4]。

根据矩阵理论，当一个函数的分子分母都能用二次型表达时，则该函数的最大本征值即为该函数的最大值，而且可以证明，对(3a)给出的方向性系数而言，

最大本征值对应的特征向量即为最佳激励电流。因此，通过求解(3a)的最大本征值及其对应的特征向量，即可得到天线阵最大方向性系数及其对应的最佳激励电流，分别为

$$D_{\max} = \bar{V}^H(\theta_0, \varphi_0) \bar{B} \bar{V}(\theta_0, \varphi_0) \quad (4a)$$

$$\bar{I}_{opt} = \bar{B}^{-1} \bar{V}(\theta_0, \varphi_0) \quad (4b)$$

B. Dolph-Chebyshev综合法

Dolph-Chebyshev综合法应用于超方向性圆形阵列天线的基本思想是：将圆形阵列天线的方向函数用 Bessel 函数展开，并利用线性阵列天线的 Dolph-Chebyshev综合法得到展开系数，然后再根据展开系数得到天线阵列单元的最佳激励电流[5]。

将圆形阵列的归一化方向函数用 Bessel 函数展开，可得到

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s_m \exp(-jm\varphi) \quad (5a)$$

$$s_m = j^m J_m(2\pi a_0 \sin \theta) \sum_{n=1}^N g_n(\theta, \varphi) [I_n e^{j\alpha_n} e^{im\varphi_n}] \quad (5b)$$

式中， s_m 是与圆形阵列天线结构及阵列单元激励电流有关的量。根据数字信号处理理论，(5a)中 m 越大，即离散序列的点数越多，天线可能达到的方向性系数越高，主瓣也越窄。显然对于由 N 个单元组成的圆形阵列天线而言，离散序列的最大点数为 N 。在具体求解过程中，对每一个给定的仰角 θ ，利用线性天线阵列的 Chebyshev 综合方法得到等副瓣条件下最大方向性系数对应的激励电流因子 s_m ($m = 1, 2, \dots, N$)，进一步利用(5b)，即可得到圆形天线阵在等副瓣条件下各阵列单元的最佳激励电流，可写为

$$\bar{I}_{opt} = \bar{C}^{-1} \bar{S} \quad (6)$$

式中， $c_{mn} = j^m J_m(2\pi a_0 \sin \theta) g_n(\theta, \varphi) e^{jm\varphi_n}$ 是与天线阵结构及辐射方向有关的矩阵。

C. 约束最优化综合法

基于特征值分解的二次型综合法中不能加入约束条件，因此无法对需要考虑副瓣电平或辐射效率的天线阵进行综合。约束最优化综合法能够对给定效率及副瓣的天线阵进行综合，其基本思想是：将最大方向性综合问题转化为二次规划问题，再应用数值方法进行不同约束条件下最大方向性综合，得到约束条件

下天线阵列的最佳激励电流[6]。

不失一般性对天线阵的方向函数进行归一化，则由(3a)得到

$$D = \frac{1}{I^H \bar{B} \bar{I}} \quad (7)$$

显然，要使得上式中的方向性系数D达到最大值，必须满足分母达到最小值，则最大方向性系数对应的激励电流为下列最优化问题的解

$$\min \bar{I}^H \bar{B} \bar{I}$$

s.t.

$$V^H(\theta_0, \varphi_0) \bar{I} = 1 \quad (8a)$$

$$\operatorname{Re}[V_\theta^H(\theta_0, \varphi_0) \bar{I}] = 0 \quad (8b)$$

$$\operatorname{Re}[V_\varphi^H(\theta_0, \varphi_0) \bar{I}] = 0 \quad (8c)$$

其中，约束条件(8a)保证了方向性系数D的分子为1；(8b)和(8c)为主瓣的约束条件，保证方向函数在 (θ_0, φ_0) 方向出现峰值；Re表示取实部，下标 θ, φ 分别表示对 θ 和 φ 求导。将线性约束条件(8a~8c)简写为矩阵的形式

$$\bar{W}^H \bar{I} = \bar{f} \quad (9)$$

式中， \bar{W} 为 $N \times M$ 的列满秩矩阵， \bar{f} 为 $M \times 1$ 的向量，M为约束条件的个数，这里 $M=3$ ， $\bar{f} = [1, 0, 0]^T$ 。上述线性约束二次规划问题可以由经典的Lagrange乘子法求得，解析表达式可写为

$$\bar{I}_{opt} = \bar{B}^{-1} \bar{W} (\bar{W}^H \bar{B}^{-1} \bar{W})^{-1} \bar{f} \quad (10)$$

\bar{I}_{opt} 即为约束条件下天线阵最大方向系数所对应的最佳激励电流。

(1) 天线效率约束下的最优化方向性综合

由天线阵效率的表示式(3b)，不难得到归一化条件下的天线阵效率

$$h = \frac{1}{N \bar{I}^H \bar{I}} \quad (11)$$

对于给定的天线效率 h ，最优方向性综合的约束条件(9)扩展为

$$\bar{W}^H \bar{I} = \bar{f} \quad (12a)$$

$$I^H \bar{I} = \frac{1}{N \eta} \quad (12b)$$

仿照(10)，即可得到效率约束下最佳激励电流

$$\bar{I}_{opt} = (\bar{B} + \lambda \bar{U})^{-1} \bar{W} (\bar{W}^H (\bar{B} + \lambda \bar{U})^{-1} \bar{W})^{-1} \bar{f} \quad (13)$$

式中， \bar{U} 是 $N \times N$ 的单位矩阵，Lagrange乘子 $\lambda \geq 0$ ，是一个待定系数，可利用效率约束条件(12b)得到。

(2) 天线效率和副瓣约束下的最优化方向性综合

在效率约束的基础上加入对副瓣电平的约束，最优方向性综合约束条件(12a)、(12b)进一步扩展为

$$\bar{W}^H \bar{I} = \bar{f} \quad (14a)$$

$$I^H \bar{I} = \frac{1}{N \eta} \quad (14b)$$

$$\bar{V}^H(\theta_i, \varphi_i) \bar{I} = f_i' \quad (14c)$$

式中， f_i' 是天线阵在 (θ_i, φ_i) 方向辐射电平的约束值。对于m个副瓣电平最优化约束问题而言， (θ_i, φ_i) 就是各副瓣对应的方向角。合并(14a)、(14c)后，上述约束条件简写为

$$\bar{W}^H \bar{I} = \bar{f}' \quad (15a)$$

$$I^H \bar{I} = \frac{1}{N \eta} \quad (15b)$$

(15a)同时包含了对主瓣和副瓣的约束。利用Lagrange乘子法，通过数值迭代即可得到满足上述约束条件的天线阵最佳激励电流。

3 数值结果和讨论

为定量地了解上述三种方法在超方向性天线阵列求解中的差异，我们以7元圆阵为例，对最优化方向性系数的数值结果进行了定量的比较。

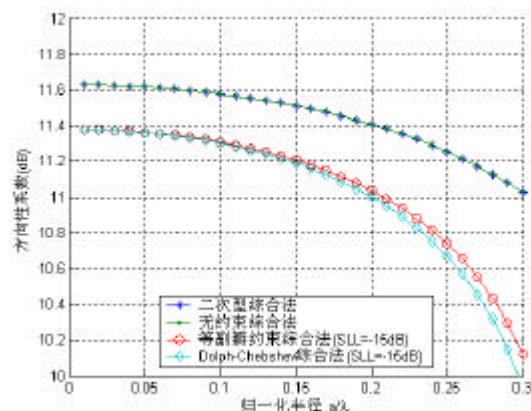


图2 方向系数随归一化半径的变化曲线

图2给出了不同约束条件下圆阵最大方向性系数随归一化半径的变化曲线。由图中曲线可以看出，无

约束综合法与二次型综合法完全一致，而等副瓣约束法与Dolph-Chebyshev综合法基本一致。可见二次型综合法和Dolph-Chebyshev综合法分别是约束最优化法在无约束和等副瓣约束条件下的特例，因此，最优化综合法是天线阵综合中更为灵活的方法。从具体的数值结果来看，相同的天线尺寸条件下，由二次型综合法得到的方向性系数最大，Dolph-Chebyshev综合法得到的方向性系数最小，分析表明，后者是由于等副瓣条件下较大的副瓣辐射能量而引起。从Dolph-Chebyshev综合法与副瓣约束最优化综合法比较结果来看，即使在相同的副瓣约束条件下，前者给出的最大方向性系数略小于后者，显然这是由于Dolph-Chebyshev综合法应用于超方向性圆形阵列天线综合时对无穷序列进行N点截断所引起的。可见，无论从普适性还是计算精度来看，约束最优化法是三种方法中较好的一种天线阵综合法。但从第2节中对于超方向性综合的理论推导不难看出，在三种方法中约束最优化综合法的计算量较大。

图3给出了不同归一化半径的圆形天线阵在等副瓣条件下方向性系数随着副瓣电平的变化曲线。可以看出，对于任意归一化半径的超方向性天线，方向性系数均在副瓣电平为-11.5dB附近取得最大值。这一结果表明，天线的方向性系数与副瓣电平之间存在一定的约束关系。因此，在进行超方向性天线阵设计时应根据实际要求确定合适的副瓣电平，以保证在满足设计要求的条件下获得最大的方向性系数。

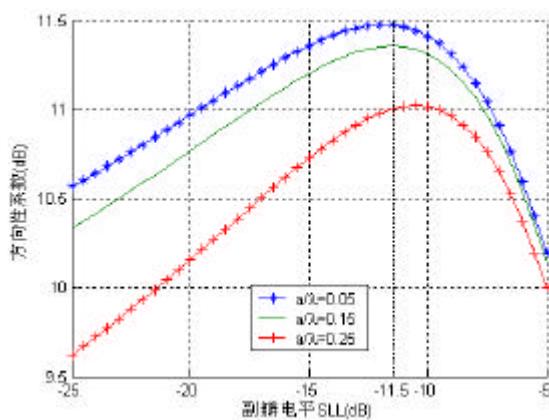


图3 方向性系数随副瓣电平的变化曲线

4 结论

天线方向特性的综合是天线设计的重要内容之一。本文以圆形天线阵为例，详细介绍了超方向性天线设计中三种典型综合方法的基本思想及其计算公式。以7元圆阵为例，分析了三种综合方法的内在联系，给出了不同归一化半径和副瓣电平约束条件下最优方向性系数的数值结果，并进行了初步的分析和讨论。结果表明，无论从灵活性还是计算精度来看，约束最优化法能够更好地解决天线副瓣和效率约束下超方向性天线的综合问题。另外，在利用约束最优化综合法或Dolph-Chebyshev综合法进行超方向性天线设计中，副瓣电平的选取对天线方向性系数有很大的影响。

参考文献

- [1] C.W. Oseen, “Die Einsteinsche Nadelstichstrahlung und die Maxwellschen Gleichungen”, Ann. Dern Physik, Vol.69, pp.202-204, 1922.
- [2] N.Yaru, “A note on supergain antenna arrays”, Proc.IRE, Vol.39, pp.1081-1085, Sept.1951.
- [3] Donald E.Berrick, “HF Surface-Wave Radar Revisiting a solution for EEZ ship surveillance”, WWW.EEZInternational.com.
- [4] 吕善伟, 天线阵综合[M], 北京航空学院出版社, 1988:157-159.
- [5] 邓维波, 林力, 袁楼 一种等距离圆形阵列的超方向性综合方法[J], 哈尔滨工业大学学报, vol.33, No.6, pp.838-841, 2001.
- [6] 刘源, 邓维波, 一种阵列天线的约束最优化综合方法[J], 电波科学学报, Vol.21, No.5, pp.670-676, 2006.

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>