

# 线性阵列天线到柱形共形阵天线的递推计算\*

崔 尧<sup>1</sup>, 高晓光<sup>1</sup>, 侯新宇<sup>2</sup>, 赵 强<sup>2</sup>

(1 西北工业大学, 西安 710072; 2 电子科技大学, 成都 610054)

**摘要:** 线性阵列天线的相关计算方法是共形天线研究的计算基础, 文中给出了线性阵列的远场辐射场的计算过程, 然后在此基础上得到环形阵列天线的计算方法。而柱形共形天线阵可以看成是环形阵叠加在一起, 进而又得到柱形共形天线阵的辐射场公式。依次得到的计算方法, 应用在实例上进行仿真, 得到了与理论分析较为一致的结果。

**关键词:** 线性阵列; 环形阵列; 柱形共形阵; 天线

中图分类号: TN82 文献标志码: A

## Recursive Calculation from Linear Array Antenna to Cylindrical Conformal Array Antenna

CUI Yao<sup>1</sup>, GAO Xiaoguang<sup>1</sup>, HOU Xinyu<sup>2</sup>, ZHAO Qiang<sup>2</sup>

(1 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

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

**Abstract:** The method of calculating linear array antenna is the basis of studying conformal antenna in calculation. In this article, the calculation of far-field radiation of the linear array was given, and then based on this, circular array antenna was calculated. The cylindrical conformal array antenna can be thought as overlap of ring array. The cylindrical conformal array antenna radiation field equation was easily obtained. Through a simulation with this method, the result according with the theory was obtained.

**Keywords:** linear array; ring array; cylindrical conformal array; antenna

2010年飞机整体实现智能蒙皮结构。

在我国, 对共形天线的研究起步较晚, 研究内容较为单一, 所以对这方面迫切需要更深入的研究。文中致力于研究从线性阵列天线到圆柱形共形阵天线的递推计算。

### 1 线性阵列天线的计算

基本的线性阵列天线有许多离散的辐射单元, 被等同间隔的放置在一条直线上, 并具有相同的辐射方向, 每个单元被看成一个电场或磁场的电流源, 这样就增大了辐射场。假定一个基本单元  $n$  的标准辐射函数为  $EL_n(r)$ , 其中  $r$  代表该点到参考点的方向和距离, 参考点在球坐标里的向量为  $R_n$ , 该单元的激励为  $V_n$ , 因此得到场点  $P$  的辐射场函数为:

$$E(r) = \sum_n V_n EL_n(r - R_n) e^{-jk|r - R_n|} \quad (1)$$

$k$  为传播常数,  $k = 2\pi/\lambda$ 。

\* 收稿日期: 2010-06-17

作者简介: 崔尧(1980-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 研究方向: 电磁周期结构, 电磁计算。

在远场( $r$ 较大),当所有单元假定有相同的方向,那么等式(1)在远场情况下写成:

$$E(r) = EL(r) \sum_n V_n e^{-jk|r-R_n|} \quad (2)$$

求和的前面部分  $EL(r)$  是单元因子,剩下的是阵列因子。在球坐标下可以简化为:

$$E(\theta, \varphi) = EL(\theta, \varphi) \sum_n V_n e^{-jk \cdot R_n} = \\ EL(\theta, \varphi) AF(\theta, \varphi) \quad (3)$$

式中:  $(\theta, \varphi)$  为角坐标,  $AF$  为阵列因子,对于线性阵列最重要的是阵列因子,单元因子看成是一个缓慢变化的函数,对辐射方向图不会有太大的影响。

图1是线性阵列示意图。图1 单元间距为  $d$  的假设设有  $N$  个单元,每个单元一个线性阵列天线的辐射方向是相同的,因此只有  $\phi$  对阵列因子有影响:

$$AF(\phi) = \sum_0^{N-1} V_n e^{jkd \sin \phi} \quad (4)$$

$$AF(\omega) = \sum V_n \omega^n \quad (5)$$

一种重要的特殊情况是具有相同的激励,即  $V_n = 1$ ,则式(5)变成简单的几何级数表达式:

$$AF(\omega) = \frac{\omega^N - 1}{\omega - 1} \quad (6)$$

$N$  是辐射器的总个数,将相关的相位代入得:

$$AF(\phi) = \frac{\sin(\frac{Nkd}{2} \sin \phi)}{\sin(\frac{kd}{2} \sin \phi)} \quad (7)$$

式(7)与  $\sin x/x$  的形式很接近,特别是当单元的个数很多时,主波瓣的最大值出现在  $\phi = 0$  位置,3dB 波瓣近似出现在  $\phi_3 = 50\lambda/Nd$  位置,第一个旁瓣比主波瓣的最大值低 13.5dB。

更准确地说阵列因子最大值出现在  $kd \sin \phi = 2m\pi$  位置,  $\sin \phi = m(\lambda/d)$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  如果  $d/\lambda > 1$ , 则栅瓣出现在实空间( $|\sin \phi| < 1$ ),为了确保栅瓣最大值在空间外面,单元间距需要满足:

$$d/\lambda \leq \frac{1}{1 + |\sin \phi_s|} \quad (8)$$

$\phi_s$  是扫描最大角,典型的扫描角为  $\pm 70^\circ$ ,所以有  $d/\lambda \leq 0.5$ 。

## 2 环形阵列天线的计算

有了线性阵列的计算方法,再来推导环形阵列的辐射场方程。首先来看两种坐标系,局部坐标系( $R, \varphi$ ) (见图 2(a)),远场坐标系( $r, \theta, \phi$ ) (见图 2(b))在线性阵列里忽略了互耦的影响,或者把互耦考虑到激

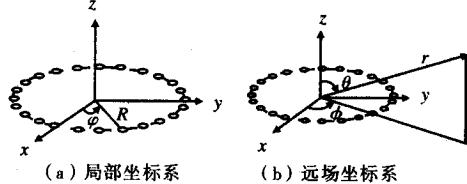


图 2 环形阵列局部坐标系

励里面。先根据式(3)、式(4)得出线性阵列的远场辐射场为:

$$E(\phi) = EL(\phi) \sum_n V_n e^{jkn d \sin \phi} \quad (9)$$

此处  $EL(\phi)$  对所有的单元均相同,但在环形阵列里却不再相同了(见图 3(b)),所以对应的远场表达式为:

$$E(\phi) = \sum_n V_n EL(\phi - n\Delta\varphi) e^{jkr \cos(\phi - n\Delta\varphi)} \quad (10)$$

在式中相位与圆心位置有关,单元间距为  $R\Delta\varphi$ 。

对每个单元赋予一个相位让其可以在  $\phi_0$  方向连续的加起来,那么得到每个单元  $n$  的相位激励:

$$\varphi(n) = -kR \cos(\phi_0 - n\Delta\varphi) \quad (11)$$

因此辐射方程变成:

$$E(\phi) = \sum_n |V_n| EL(\phi - n\Delta\varphi) e^{jkr [\cos(\phi - n\Delta\varphi) - \cos(\phi_0 - n\Delta\varphi)]} \quad (12)$$

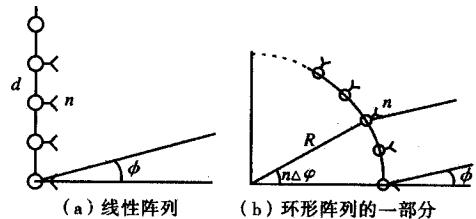


图 3 不同阵列下的单元分布

## 3 圆柱共形阵天线的计算

### 3.1 理论分析

柱形共形阵天线可以看作是由环形阵列天线组成,首先给出圆柱共形阵天线坐标示意图。

如图 4,半径为  $R$  的圆柱面上,均匀布满  $M$  行  $N$  列天线单元,阵列单元

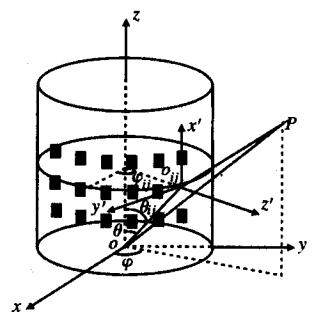


图 4 阵列的坐标关系

的行距和列距分别为  $d_1$  和  $d_2$ , 以圆柱底面圆心为原点建立总体坐标系  $(x, y, z)$ , 以单元  $(i, j)$  为原点建立局部坐标系  $(x', y', z')$ 。对局部坐标系作如下规定:  $x'$  轴平行于  $z$  轴,  $z'$  轴为单元所在处柱面的外法向, 则通过右手定则可确定  $y'$  轴方向;  $o_{ij}$  在总坐标系下的柱坐标为  $o_{ij}(R, \varphi_{ij}, z_{ij})$ ,  $R$  为圆柱的半径,  $\varphi_{ij}$  为柱坐标  $\varphi$  的分量,  $z_{ij}$  为柱坐标  $z$  的分量。

远场任意一点在总坐标下的球坐标为  $P(\theta, \varphi)$ , 经过坐标变换, 在局部坐标下的球坐标表示为  $P(\theta', \varphi')$ , 其关系式如下<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} \theta' = \arccos(\sin\theta \cos(\varphi_{ij} - \varphi)) \\ \varphi' = \arctan\left(\frac{\sin\theta \sin(\varphi_{ij} - \varphi)}{\cos\theta}\right) \end{cases} \quad (13)$$

由于天线单元的远场与其在总体坐标系下的坐标位置有关, 指向各不相同, 方向图乘积定理不再适用。根据非相似元阵列天线理论, 把每一个单元都当成是各不相同的独立项进行叠加。以总坐标系原点  $o$  为参考中心, 所有天线单元在  $(\theta, \varphi)$  方向上辐射的合成场的表示式为:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} f_{ij}(\theta, \varphi) e^{ik(R \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_{ij}) + z_{ij} \cos\theta)} \quad (14)$$

式中:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $f_{ij}(\theta, \varphi)$  为单元在总体坐标系下的矢量方向图函数。通过上述计算公式可以得到圆柱共形阵天线的理论计算结果。

### 3.2 仿真计算

下面用一圆柱共形阵天线建模分析(见图 5)。圆柱底面圆的圆心在坐标原点, 半径为  $5.1816\lambda$ , 表面等间距分布着  $7 \times 13$  个辐射单元(辐射单元为垂直偶极子), 在  $x$  方向间距  $3\lambda$ , 在  $z$  方向间距为  $6\lambda$ , 一维扫描角从  $-90^\circ$  到  $+90^\circ$ 。用 HFSS 软件建模计算得到图 6 结果。

由图 6 看出, 主波瓣在  $0^\circ$  位置, 在  $\pm 20^\circ$  附近出现第一副波瓣, 为  $-20\text{dB}$ , 平均副波瓣小于  $-20\text{dB}$ , 与理论值相符。

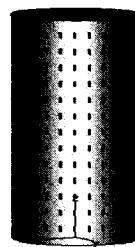


图 5 圆柱共形阵天线模型

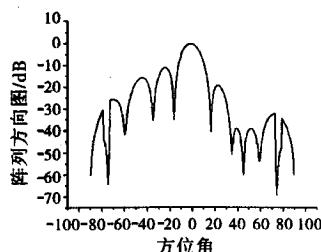


图 6 HFSS 软件建模计算结果

## 4 结论

文中集结了线性阵列、环形阵列以及圆柱形阵列天线的计算方法, 总结出圆柱形共形阵是以环形阵列为基础的, 而环形阵列的很多理论又来自于线性阵列, 这是一种层层递进的关系, 也是行之有效的计算方法。

### 参考文献:

- [1] Lars Josefsson, Patrik Persson. Conformal array antenna theory and design [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006.
- [2] R C Hansen. Conformal antenna array design handbook, A110091[R]. 1981.
- [3] Davies D E N. Circular arrays: Their properties and potential applications [C]// The 2nd International Conference on Antennas and Propagation, 1981.
- [4] Hussein Rammal, Charif Olleik. Synthesis of phased cylindrical arc antenna array[J]. International Journal of Antenna and Propagation, 2009(1):1—5.
- [5] Guy R F. Spherical coverage from planar, conformal and volumetric arrays[C]// IEE Conference on Antennas and Propagation, 1999:287—290.
- [6] Raffaelli S, Johansson M. Cylindrical array antenna demonstrator: Simultaneous pencil and omni-directional beams [C]// Proceedings of 4th European Workshop on Conformal Antennas, 2005.

## 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](http://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](http://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](http://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>