

# 密度加权的稀疏天线阵列研究

李贺, 赵飞, 洪家财, 闫书明

装备指挥技术学院 101416

aboutlihe@gmail.com

**摘要:**在满足技术指标前提下,采用稀疏天线阵列可以降低雷达造价。以圆口径天线阵列为例,对满阵和稀疏阵的特性进行比较,分析了采用 Taylor 分布的独立采样和相关采样的密度加权方法的稀疏阵列方向图变化。结果表明,阵列的变稀总伴随着方向图的变坏,需要经过多次阵列的计算排列选择以获得满意的稀疏阵列。

**关键词:**满阵,稀疏阵,密度加权

## Study on Statistically Thinned Arrays with Quantized Element Weights

Li he, Zhao fei, Hong jia cai, Yan shu ming

Equipment Command & Technology

aboutlihe@gmail.com

**Abstract:** The cost of the Radar can be reduced when thinned arrays are used on condition of meeting the goal. The papers take the circular caliber arrays for example, which compare the characteristic of the full arrays with the thinned arrays' and analyze the changes of the thinned arrays with Quantized Element Weights by the method of independent sampling with Taylor patterns. It's concluded that the radiation becomes worse as the elements are getting more sparse. It should be calculated many times in order to get the satisfying thinned arrays.

**Key words:** full arrays, thinned arrays, quantized element weights

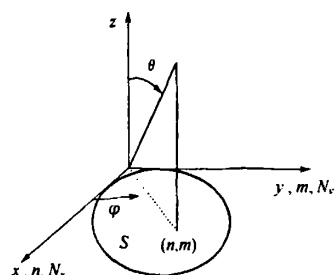
为了降低雷达的造价,有必要尽量减少雷达阵面(满阵)的(有源)阵元数目。许多应用领域,只需要天线有窄的波束以提高角分辨力,而不要求高的天线增益,由于阵波束宽度与口径的最大尺寸有关,这就使设计阵元数目大大减少的大口径稀疏阵天线成为可能。

阵列的变稀总伴随着方向图的变坏,这一变坏特性可通过所用变稀的方法来控制。稀疏阵的设计通常以阵元的密度来模拟满阵的馈电幅度。用阵元的密度加权来模拟满阵的幅度加权可以用较少的阵元实现较低的旁瓣,这是密度加权阵的主要技术特点<sup>[1]</sup>,其设计包括确定满阵和确定有源阵元位置两部分。

### 1 满阵确定

根据对天线性能的要求确定相应满阵的工作,通常是根据扫描空域、阵面倾角、扫描边界、结构性能确定满阵的栅格形式(矩形、正方形或三角形)和阵元间距,以及通过对方向性系数、旁瓣电平、波瓣宽度等的分析,来确定天线口径、阵元点数和幅度加权分布  $A(n, m)$ 。由满阵的波瓣综合理论<sup>[2]</sup>,对于给定的波瓣形状,可综合出相应的馈电幅度和相位,使得到的天线波瓣性能非常接近设计要求(最佳)。

以圆口径天线为例,在图 1 的右手直角坐标系中天线位于  $xy$  平面,阵法线方向为  $z$  轴,口径  $S$  上的阵元以正方形栅格排列,观察方向与阵面法线方向的夹角为  $\theta$ ,  $\varphi$  角,第  $(n, m)$  个阵元的馈电幅度为  $A(n, m)$ 。假定每个阵元在阵中的场强波瓣函数是相同的,只与观察方向  $(\theta, \varphi)$  有关,即阵元



在阵中的场强波瓣可用  $f_0(\theta, \varphi)$  表示, 则满阵的场强波瓣为图 1 圆口径阵面直角坐标示意:

$$E(\theta, \varphi) = f_0(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} A(n, m) \exp\{j[k(nd_x \cos \varphi + md_y \sin \varphi) \sin \theta - \psi(n, m)]\} \quad (1)$$

$$\text{式中} \quad \psi(n, m) = \frac{2\pi}{2^M} \text{Int} \left[ \frac{2^M}{\lambda} (nd_x \cos \varphi_0 + md_y \sin \varphi_0) \sin \theta_0 \right] \quad (2)$$

$$A(n, m) = \begin{cases} T(n, m) \cdots (n, m) \in S \\ 0, (n, m) \notin S \end{cases} \quad (3)$$

$d_x, d_y$  分别为  $x, y$  方向的阵元间距;  $N_x, N_y$  分别为  $x, y$  方向的阵元数目;  $M$  为移相器的位数(数字式);  $(\theta_0, \varphi_0)$  为波束指向角;  $T(n, m)$  为给定的馈电幅度。

## 2 有源阵元位置的确定

### 2.1 基本原理

有源阵元的确定是以  $A(n, m)$  作为概率分布函数的, 即位置  $(n, m)$  上的阵元是否为有源阵元, 取决于此点的幅度分布  $A(n, m)$ 。当  $A(n, m)$  较大时, 此点为有源阵元的概率就大; 否则就小。以  $F(n, m)$  表示有源阵元的位置函数,  $F(n, m) = 1$ , 即表明此点为有源阵元;  $F(n, m) = 0$ , 则此点为无源阵元。假定有源阵元上的馈电幅度为  $A_0(n, m)$ , 则密度加权阵的波瓣计算公式为

$$E(\theta, \varphi) = f_0(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} A_0(n, m) F(n, m) \exp[jk(nd_x \cos \varphi + md_y \sin \varphi) \sin \theta] \quad (4)$$

当  $A_0(n, m) = 1$  时, 密度加权为等幅馈电, 即用纯密度来模拟不等幅。这是一种简单的密度加权阵。若采用阵面中部  $A_0(n, m) = 1$ , 阵面边缘  $A_0(n, m) = 0.5$  的两个台阶分布, 这样确定的密度加权阵元的分布较均匀, 实现同样的旁瓣有源阵元数目较少, 是一种多阶量化的复合型密度加权阵。

### 2.2 独立采样法确定有源阵元位置函数 $F(n, m)$

有源阵元位置函数  $F(n, m)$  由式(5)表示:

$$F(n, m) = \begin{cases} 1, R(n, m) \leq k_1 A(n, m)/A_0(n, m) \\ 0, R(n, m) > k_1 A(n, m)/A_0(n, m) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $R(n, m)$  为  $[0, 1]$  间均匀分布的随机数; 系数  $k_1$  与预期的有源阵元数目有关,  $k_1$  越大, 有源阵元越多,  $k_1 = 1$  时称为自然稀疏。

$F(n, m)$  是二可能值的独立随机变量, 取值为 1 的概率是  $k_1 A(n, m)/A_0(n, m)$ , 取值为 0 的概率是  $1 - k_1 A(n, m)/A_0(n, m)$ , 以  $m\{x\}$  表示对  $x$  求均值, 则独立随机变量  $F(n, m)$  的均值  $m\{F(n, m)\}$  为

$$m\{F(n, m)\} = k_1 A(n, m)/A_0(n, m) \quad (6)$$

由此可得平均有源阵元数目  $\bar{N}$ :

$$\bar{N} = m \left\{ \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} F(n, m) \right\} = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} m\{F(n, m)\} = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} k_1 A(n, m)/A_0(n, m) \quad (7)$$

将式(6)代入式(4)可得平均波瓣函数:

$$m\{E(\theta, \varphi)\} = k_1 f_0(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} A(n, m) \exp[jk(nd_x \cos \varphi + md_y \sin \varphi) \sin \theta] \quad (8)$$

上式常数因子  $k_1$  对波瓣形状没有影响(当分布函数  $k_1 A(n, m)/A_0(n, m)$  不大于 1 时), 可见平均方向图就是以  $A(n, m)$  为馈电幅度的满阵方向图, 即在概率平均意义下, 密度加权阵的波瓣等于满阵的波瓣, 于是就由阵元的密度加权模拟(逼近)了满阵的幅度加权。

文献[3]对等间距密度采样阵的统计特性作了详细分析, 给出了增益、波束指向、波瓣宽度以及旁瓣小于给定电平的概率等参数的平均值及方差, 其中增益平均值  $\bar{G}$  的近似计算公式为

$$\bar{G} = G_0 k_1 \sum_m \sum_n [A(n, m)]^2 / \sum_m \sum_n A(n, m) \quad (9)$$

式(9)中,  $G_0$  为满阵的增益。

当满阵旁瓣极低时, 密度加权阵旁瓣平均值  $\bar{SL}$  的近似计算公式为

$$\bar{SL} = \left\{ \sum_m \sum_n A(n, m) [1 - k_1 A(n, m)] \right\} / \left\{ k_1 \left[ \sum_m \sum_n A(n, m) \right] \right\} \quad (10)$$

由式(6)可见, 这里的概率平均是对有源阵元位置的平均, 即对若干个按式(5)计算获得的密度加权阵平均, 而决非对某一个密度加权阵(在空间上)平均。因此决不会有一个密度加权阵的波瓣能等于满阵的波瓣。

### 2.3 相关采样法确定有源阵元位置函数 $F(n, m)$

独立采样法确定阵元位置仅仅与该点的密度概率有关, 而相关采样的思想是其阵元位置的确定不但要依靠该点的密度概率, 而且与其周围的阵元密度概率有关, 从而使确定有源阵元的概率密度函数以某种方式传递。根据不同的设计要求, 可以有不同的相关形式和不同的传递方向<sup>[5]</sup>。文献[5]提出相关采样的方法比独立采样法可以使波瓣性能更接近满阵。

假定传递方向是沿  $x$  方向, 相关形式是线性叠加相关, 则  $F(n, m)$  的计算应调整为

$$F(n, m) = \begin{cases} 1, R(n, m) \leq S(n, m) \\ 0, R(n, m) > S(n, m) \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} S(n, m) = \sum_{p=1}^{m-1} \sum_{q=1}^{n-1} [FF(p, q) - k_1 A(p, q)/A_0(p, q)] + k_1 A(n, m)/A_0(n, m) \cdots n, m = 2, 3, \cdots \\ S(1, 1) = k_1 A(1, 1)/A_0(1, 1) \end{cases} \quad (12)$$

## 3 满阵与密度加权阵的数值仿真比较

稀疏阵的设计首先应根据天线性能指标选择适当的满阵, 考虑到稀疏阵仅是满阵的一种近似, 选择满阵的性能指标要留有适当余量, 主要是增益和旁瓣, 以使设计出的稀疏阵性能满足要求。

假定前面所提的满阵圆口径天线阵的设计参数为:

天线口径: 圆口径  $D = 34.8\lambda$

阵元间距:  $d_x = d_y = 0.56\lambda$

直径上阵元的数目:  $N_x = N_y = 62$

满阵阵元数目:  $N = 3030$

移相器位数:  $M = 4$

馈电幅度:  $T(n, m)$  为  $-30\text{dB}$  圆 Taylor 分布<sup>[2,4]</sup>

阵元阵中场强波瓣  $f_0(\theta, \varphi)$ : 根据阵元间距与阵元型式, 确定  $f_0(\theta, \varphi) = \sqrt{\cos\theta}$

由以上参数, 在偏离法线的  $60^\circ$  内扫描, 按波长为  $10\text{cm}$  计算, 主要结果如下。

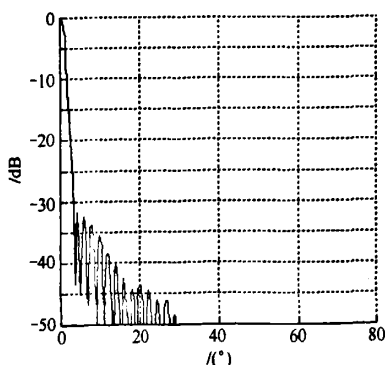


图2 满阵主平面方向图

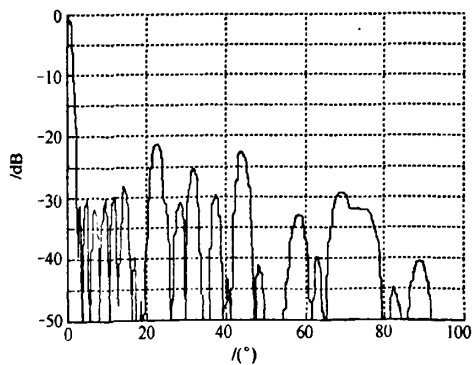


图3 独立采样密度加权稀疏阵列的主平面方向图

表 1 满阵的主要计算结果

扫描角/(°)	0	22	30	50	60
增益 G/dB	38.77	38.27	37.96	36.74	35.39
最大旁瓣 SL <sub>侧</sub> /dB	-32.55	-24.97	-22.84	-19.29	-15.87
波瓣宽度 BW/(°)	2.055	2.210	2.490	3.211	4.180

表 2 独立采样密度加权阵的主要计算结果

扫描角/(°)	0	22	30	50	60
增益 G/dB	36.98	36.47	36.07	34.73	33.64
最大旁瓣 SL <sub>侧</sub> /dB	-21.97	-21.61	-20.10	-17.42	-13.53
波瓣宽 BW/(度)	1.981	2.143	2.392	3.177	3.839

结果对比表明,独立采样法对满阵进行密度加权后,随着阵元的稀疏,其方向图开始变差,主辐射方向(扫描角)的幅度有所降低,旁瓣明显增多且有的幅度较大,并有可能出现栅瓣,从而降低了天线辐射的方向性。但是波瓣宽度变化不大,使得天线阵列的角分辨能力几乎没有下降。这说明,稀疏阵虽然牺牲了阵列的辐射特性,但是基本保持了原波瓣的宽度,能够从某些方面解决雷达的造价问题,这也体现了折衷的方法。

4 结束语

随着阵列的变稀,方向图也随之变坏。工程设计中要获得一个具体排列的密度加权阵,性能要尽量接近满阵,当满阵的阵元不多时可以用枚举法,将所有可能的排列都进行计算比较,经过几次阵列的计算选择,就可以获得满意的密度加权阵排列,性能最好的就是最佳选择。

参 考 文 献

[1] 李建新. 阵列多台阶稀疏技术[J]. 电子学报, 1999, 27(3): 78-80.  
[2] Warren L. Stuzman. 天线理论与设计(第2版). 北京: 人民邮电出版社, 2006.  
[3] 郭燕昌等. 相控阵和频率扫描天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.  
[4] Robert. J. Mailloux. 相控阵天线手册(第2版). 北京: 电子工业出版社, 2007.  
[5] 孙茂友. 密度加权设计方法——相关法与综合法[J]. 现代雷达, 1979, 1(3): 36-49.

作者简介

李贺,男,1983年生,装备指挥技术学院通信与信息系统硕士研究生,专业方向为电磁场与微波技术。  
赵飞,男,1984年生,装备指挥技术学院通信与信息系统硕士研究生,专业方向为电磁场与微波技术。  
洪家财,男,1967年生,副教授,硕士生导师。现主要从事电磁散射和微波推进等方面的研究工作。  
闫书明,男,1985年生,装备指挥技术学院,装备试验指挥专业。

## 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](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>