

正六边形平面相控阵天线的仿真研究

毕明雪 赵运强 钱博 沈阳理工大学 南京理工大学

摘要：主要研究一种等边三角形栅格排列的正六边形平面相控阵天线。首先对理想的全向阵元组成的天线进行理论上的分析，给出一种方向图函数计算的简单方法，得到统一的方向图函数表达式。然后对正六边形天线的方向图进行仿真分析。

关键词：正六边形相控阵；等边三角形栅格；方向图

平面相控阵栅格排列方式一般有两种：矩形栅格和三角形栅格。由矩形栅格组成的天线阵外观形状为矩形或正方形，这种阵列结构最为常见，计算比较简单。参考图1中的栅格排布，矩形栅格排列即每一阵元占据一个矩形栅格的交点。因此对于同样的栅瓣抑制，由矩形栅格组成的天线阵，阵元数量较多，阵元间距小，导致天线成本高，不利于辐射单元的安装。针对上述情况，提出一种采用等边三角形栅格排列的正六边形相控阵天线结构，来有效的减少平面相控阵天线的阵元数目，增加阵元间距。

1 正六边形平面相控阵天线的方向图函数

正六边形平面相控阵天线结构如图1所示，在满足 $d_y = \sqrt{3}d_x$ 的矩形栅格位置 (m, n) 中，在 $(m+n)$ 为偶数处放置辐射单元，构成等边三角形栅格排列的外观为正六边形的平面阵天线。

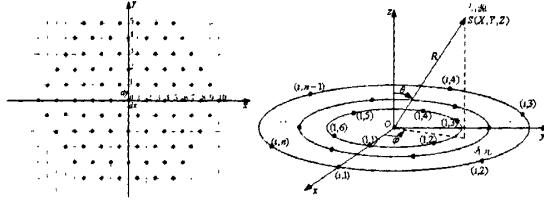


图1 等边三角形栅格排列的正六边形阵

图2 正六边形阵的几何结构

设各阵元为形式和尺寸相同的全向阵元，为了运算简单，以位于原点处的阵元为圆心，将面阵划分为 I 个同心圆，阵元均匀分布在依次向外分布的 I 个半径为 $R(i)$ 的圆上， $i=1, 2, \dots, I$ 。各同心圆上分布了 n 个阵元（ n 为变量），其几何结构如图2所示。下面将利用这一几何结构特性来推导天线的辐射方向图解析表达式。

采用球面坐标系表示入射平面波的波达方向，原点 o 位于阵列的中心，设原点处阵元为相位参考点，用 (i, n) 表示第 i 个同心圆上的第 n 个阵元，信源俯仰角 $\theta \in [0, \pi/2]$ 是原点到信源的连线与 z 轴之间夹角，方位角 $\varphi \in [0, 2\pi]$ 则是原点到信源的连线在 $x-y$ 平面上投影与 x 轴之间的夹角（逆时针）。

阵元 (i, n) 与 x 轴的夹角表示为 $\gamma(i, n) = 2\pi n / N(i)$ 。

其中， $N(i)$ 表示第 i 个同心圆上的阵元总数， $n = 1, 2, \dots, N(i)$ 。

考虑一泽数为 $k = 2\pi/\lambda$ 的窄带平面波，其俯仰角和方位角分别为 θ 和 φ ，则原点和阵元 (i, n) 接收到的信号的复包络之间的相位差为：

$$\Delta\Psi(i, n) = \exp(jkR(i)\sin\theta\cos(\varphi - \gamma(i, n))) \quad (1)$$

则第 i 个同心圆相对于该平面波的方向向量可表示为：

$$a^i(\theta, \varphi) = [\exp(jkR(i)\sin\theta\cos(\varphi - \gamma(i, 1))), \dots, \exp(jkR(i)\sin\theta\cos(\varphi - \gamma(i, N(i))))]^T \quad (2)$$

忽略各阵元间相互耦合的影响，设原点处阵元激励电流为 $A(o)$ ，其它阵元激励电流为 $A(i, n)\exp(-j\varphi_s(i, n))$ ，则相控阵天线的方向图函数为：

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^{I_N} \sum_{n=1}^{N(i)} A(i, n) \exp(jkR(i)\sin\theta\cos(\varphi - \gamma(i, n) - \varphi_s(i, n))) + A(o) \quad (3)$$

当主瓣波束指向 (θ_0, φ_0) 时，各阵元的配相表达式为：

$$kR(i)\sin\theta\cos(\varphi - \gamma(i, n) - \varphi_s(i, n)) = 0 \quad (4)$$

2 正六边形相控阵方向图仿真

以阵元间距 $d = \lambda/2$ 的91个阵元组成的正六边形天线为仿真对象。根据上节的原理，面阵划分成11个同心圆，设最外圈的六个阵元为无源阵元，其它的为有源各向同性阵元，且激励电流幅值相同，相控阵天线指向 $(\theta_0, \varphi_0) = (\pi/2, 0)$ ，则仿真得到激励电流的相位如下：

3 1416	1.5708	-1.5708	-3 1416	-1.5708	1.5708	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
4 7124	0	-4 7124	-4 7124	0	4 7124	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
6 2832	3 1416	-3 1416	-6 2832	-3 1416	3 1416	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
7 8540	6 2832	1.5708	-1.5708	-6 2832	-7.8540	-6 2832	-1.5708	1.5708	6 2832	7.8540	NaN
9 4248	4 7124	-4 7124	-9 4248	-4 7124	4 7124	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
9 4248	0	-9 4248	-9 4248	0	9 4248	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
10 9956	7 8540	3 1416	-3 1416	-10 9956	-10 9956	-7.8540	-3 1416	3 1416	7.8540	10 9956	NaN
12 5664	6 2832	-6 2832	-12 5664	-6 2832	6 2832	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
12 5664	10 9956	1.5708	-1.5708	-10 9956	-12 5664	-12 5664	-10 9956	-1.5708	1.5708	10 9956	12 5664
14 1372	9 4248	4 7124	-4 7124	-9 4248	-14 1372	-14 1372	-9 4248	4 7124	9 4248	14 1372	NaN

正六边形天线阵的方向图仿真结果如图3所示。功率归一化后，方位角方向的扫描截面图如图4所示。

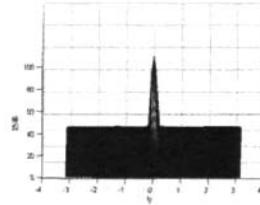


图3 正六边形天线方向图

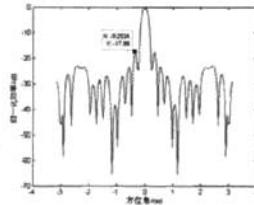
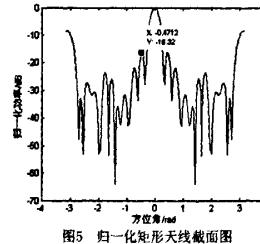
图4 归一化正六边形天线截面图
相同口径的矩形阵的方向图仿真结果如图5所示。

图5 归一化矩形天线截面图

4 仿真结果分析

由图4、图5可以看出，幅度均匀时，的方向图第一副瓣电平为-17.59dB，主瓣宽度11.4°。矩形阵的方向图第一副瓣电平为-16.32dB，主瓣宽度为17.2°。上述仿真模型中，正六边形阵比矩形阵的有源阵元数减少27%左右，但主瓣宽度及第一副瓣电平指标却优于矩形阵，且仿真算法简单有效。

5 结束语

设计一种等边三角形栅格排列的正六边形相控阵天线，有效地减少阵元数目，增加阵元间距，既降低天线成本又利于辐射阵元的安装。在对正六边形相控阵天线结构分析基础上，采用一种简单的计算方法得出其方向图函数，并与同口径的矩形阵天线方向图进行仿真比较，仿真结果对实际工程应用具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 马小玲, 丁丁. 宽频带微带天线技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [2] 杨维, 陈俊仕等. 移动通信中的阵列天线技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka. 天线(上册)[M]. 章文勋译. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2004.

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>