

## Analysis of the Reflection Phase Property about Reflectarray Antenna\*

LI Yafeng, XIE Yongjun\*, YANG Rui, YUE Liang

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

**Abstract:** The reflection phase property of reflectarray antenna with crossed dipoles is discussed. The reflectarray antenna with crossed dipoles backed by a solid metal ground plane is analyzed with Floquet method, and the reflection phase of the antenna is numerically computed. The reflection phase versus the length of crossed dipoles is discussed, when varying the substrate thickness, relative dielectric permittivity and scanning angle of the incident RF energy. The results presented in this paper make great help in the precise design of reflectarray antenna.

**Key words:** reflectarray antenna; crossed dipoles; floquet mode; reflection phase

**EEACC:** 5270D

## 平面反射阵列天线相移特性分析\*

李亚峰, 谢拥军\*, 杨锐, 岳亮

(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:** 本文中采用十字交叉振子为单元分析其相移特性。利用 Floquet 模展开分析了任意平面波照射下的交叉振子阵列的场分布, 计算出其反射系数的相位变化情况。通过数值仿真, 分别给出了在不同介质、介质厚度以及入射角度下, 详细对比了相位对于振子长度的变化曲线, 有助于反射阵列天线的精确设计。

**关键词:** 交叉振子; Floquet 模; 反射阵列; 反射相移

**中图分类号:** TN821.8

**文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-9490(2009)03-0682-03

平面抛物面天线 FLAPS(Flat Parabolic Surface), 又称平面聚焦反射面天线或反射阵(Reflectarray Antenna)。1987 年, 美国 Massachusetts 大学对单元为矩形微带片的 FLAPS 天线的聚焦性能和扫描特性进行研究, 并申请了一项美国专利(US Patent 468492): 用于卫星通信和雷达散射截面增加和减少的微带反射阵天线<sup>[1]</sup>。美国 Fairchild Space 和 Malibu Research 对单元为交叉振子的 FLAPS 天线进行了极化控制、波束切换及波束赋形、双频或者多频、RCS、共形、宽角扫描、低风载等

全面的功能研究<sup>[2-3]</sup>。

自从反射阵列天线提出以来, 由其可以实现极化变换、极化旋转、多波束、波束扫描与波束赋形等功能, 在孔径合成雷达天线得到了广泛的应用。而相位曲线是设计反射阵列天线的关键技术, 这就要求调整阵列中各个振子的反射相位以获得在某个方向产生固定的相移波束。在文献中给出了多种不同种类的反射阵列结构。第 1 类是设计辐射单元的尺寸来调整入射波的相位, 补偿从馈源到每个单元由于空间距离不同而造成的相位延迟<sup>[4-5]</sup>。第 2 类是

收稿日期: 2009-01-14

基金项目: 国家自然基金资助(60771040)

作者简介: 李亚峰(1984-), 男, 西安电子科技大学硕士生, 主要从事反射面以及反射阵列天线等方面的研究, lyf963852@yahoo.com.cn;

谢拥军(1968-), 男, 西安电子科技大学博士生导师, 主要从事计算微波与计算电磁学, 微波通信, 电磁兼容及电波传播特性等方面的研究, yjxie@xidian.edu.cn;

杨锐(1981-), 男, 西安电子科技大学博士生, 主要从事新型人工材料和电磁场数值计算等方面的研究, mattomato811118@yahoo.com.cn

辐射单元的形状完全相同,但是旋转角度不同,调节单元的旋转角度来达到所需相位<sup>[6]</sup>。第3类辐射单元的形状相同,但是单元连接的相位延迟线的长度不同,调整单元的相位延迟线来满足相位差程<sup>[7]</sup>。还有调整结构单元的负载电阻来满足所需相位等等<sup>[8]</sup>。本文中,采用调整交叉振子的长度来获得阵列反射相位曲线,分析了不同介质、介质厚度以及入射角度对相位曲线的影响。

## 1 Floquet 模的传播特性

在文中,所要分析的结构的总体尺寸远大于工作波长,可以将其等效为无限大二维周期问题。利用 Floquet 模展开分析了均匀平面电磁波照射下交叉振子阵列的频率谐振响应。

在图 1 所示的周期结构中,交叉振子单元结构沿着  $x$  和  $y$  方向分别以  $d_x = d_y = 21.43 \text{ mm}$  为周期排列。交叉振子长度为  $L_e = 0.25 \sim 0.6 \lambda$ , 厚度  $H = 0.238 \text{ mm}$ , 介电常数  $\epsilon_r = 1.0$ , 介质厚度  $h = 3.571 \text{ mm}$ 。

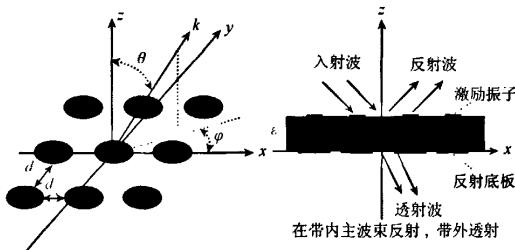


图 1 双层交叉振子周期结构示意图

因为空间电磁场满足周期性边界条件时的解由一组 Floquet 模表达。因为空间电磁场满足周期性边界条件时的解由一组 Floquet 模表达,其散射场  $E_s$ , 透射场  $E_t$  可以表示为<sup>[9]</sup>

$$E_{s(t)} = \sum_{m=1}^2 \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} R_{mpq} (B_{mpq}) \psi_{mpq} \quad (1)$$

其中,  $p = q = 0$  时对应 Floquet 主模,  $p$  或  $q$  不等于零时对应 Floquet 高次模。 $m = 1$  时代表了 TE-Floquet 模,  $m = 2$  时代表了 TM-Floquet 模。 $R_{mpq}, B_{mpq}$  分别为空气和介质层界面的反射系数和透射系数,  $\psi_{mpq}$  为矢量形式的 Floquet 模, 并具有以下形式

$$\psi_{pq} = \frac{1}{(d_x d_y)^{1/2}} \left( \frac{v_{pq}}{t_{pq}} \hat{x} - \frac{u_{pq}}{t_{pq}} \hat{y} \right) \varphi_{pq} \text{ TE-Floquet 模} \quad (2a)$$

$$\psi_{pq} = \frac{1}{(d_x d_y)^{1/2}} \left( \frac{u_{pq}}{t_{pq}} \hat{x} - \frac{v_{pq}}{t_{pq}} \hat{y} \right) \varphi_{pq} \text{ TM-Floquet 模} \quad (2b)$$

其中:

$$\varphi_{pq} = \exp[-i(u_{pq}\hat{x} + v_{pq}\hat{y} + \gamma_{pq}\hat{z})] \quad (3)$$

因为交叉振子阵列的谐振响应通常表现为 S 参数的极小值,故考虑其 S 参数:

$$S_{11}^{mpq} = \frac{R_{mpq}(1 - T_{pq}^2)}{1 - R_{mpq}^2 T_{pq}^2}, S_{21}^{mpq} = \frac{T_{pq}(1 - R_{mpq}^2)}{1 - R_{mpq}^2 T_{pq}^2} \quad (4)$$

## 2 交叉振子阵列移相特性分析

天线反射面由反射振子组成阵列。反射阵元为由距接地板  $1/8 \sim 1/10 \lambda$  的振子组成。为了控制其极化特性,每一振子还配一个正交的短振子。图 2 为一对交叉偶极子作辐射单元的结构示意图,其中的单极子控制各自的极化方向。

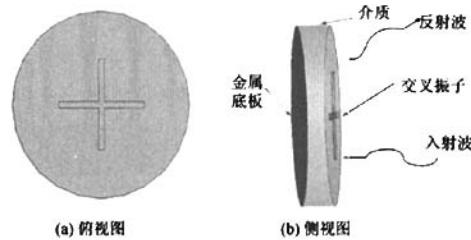


图 2 平面反射阵列辐射单元

入射的 RF 能量在振子和接地板之间形成驻波分布,振子本身对 RF 能量呈电抗关系,其大小和特性与其长度和厚度有关。这种驻波分布和振子电抗的相互作用,使得入射的 RF 能量以某一相移辐射出去,这种相移可以通过控制振子的长度变化而进行控制。该相移的精确值是振子的长度、厚度以及与接地板的距离、夹层的介电常数、RF 场的入射角度的函数。由于该阵元用于阵列中,其值还受到临近阵元的影响。

振子长度在  $0.25 \sim 0.6 \lambda$  的范围变化时,可以取得全范围  $360^\circ$  的相移。接地板与振子之间的间距取  $1/16 \sim 1/8$  之间。该空间影响形状因子、带宽及制造误差敏感度等因素。

在本文中,辐射单元振子的宽度  $w = 0.714 \text{ mm}$ , 厚度  $H = 0.238 \text{ mm}$ , 工作频率为  $f = 8.4 \text{ GHz}$ , 数值计算分析了反射相位随入射角度、介质厚度和介电常数变化的曲线对比。

### 2.1 不同入射角度下反射相移相对于振子长度的变化

图 3 给出了在介质厚度  $h = 3.571 \text{ mm}$ , 介电常数  $\epsilon_r = 1.0$ , 入射角度  $\theta$  分别为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  下, 反射相位随着振子长度变化的曲线。反射相位大小随着辐射单元尺寸的增加单调减小。在入射角度  $\theta$  较小的时候, 反射相位曲线的斜率和最大范围基本相同, 相差不超过  $5^\circ$ 。在入射角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时, 最大反射相位的范围变化小于  $20^\circ$ , 反射相位去曲线的斜

率略微增大。当振子长度  $L=15.71\text{ mm}$  时,反射相位曲线在谐振点十分接近。这就说明,入射角度  $\theta$  对谐振频率的影响不是很大,它只是影响初始相移和在谐振点附近曲线的斜率,但是对反射相位的最大范围影响不大。

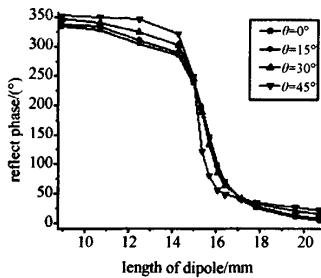


图3 不同入射角时反射相位随振子长度变化曲线

## 2.2 不同介质厚度反射相移相对振子长度的变化

在图4中,介电常数  $\epsilon_r=1.0$ ,入射角度  $\theta=0^\circ$ ,反射相位相对于振子长度变化的曲线。注意到随着介质厚度  $d$  的减小,反射相位的范围也在增大,在  $d=\lambda/16$  时可以达到  $350^\circ$ 。但是随着介质厚度  $d$  减小,反射相位曲线的斜率也变大,不利于反射阵列天线的精确设计,而且其带宽也变得极其狭窄。相反,使介质厚度  $d$  增大,有助于辐射单元的选择性和带宽改善,但是最大移相范围也会随之减小。

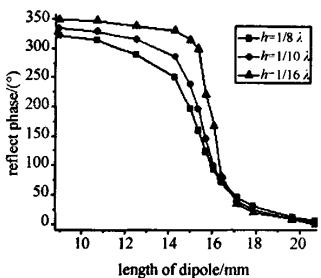


图4 不同介质厚度时反射相位随振子长度变化曲线

## 2.3 不同介质下反射相移相对于振子长度的变化

图5为在介质厚度  $h=3.571\text{ mm}$ ,入射角度  $\theta=0^\circ$  下,反射相位随着振子长度变化的曲线。在图中可以看到,随着介电常数的增加,反射相位曲线向左移动,曲线斜率逐渐变大,单元选择性和带宽变差。在文献[7]中,最大反射相位的范围也略微减小,在本文中,由于振子长度范围为  $(0.25 \sim 0.6)\lambda$ ,在介电常数为  $\epsilon_r=4.0$  时,反射相位的范围只是部分,为  $170^\circ$ 。

从馈源发出的电磁波,在各个方向上经反射面反射后到达焦平面上,电磁波的空间路径均等长且在焦平面上同相。而将抛物面变为平面之后,如图6所示,馈源到每个单元的电磁波的空间路径不再

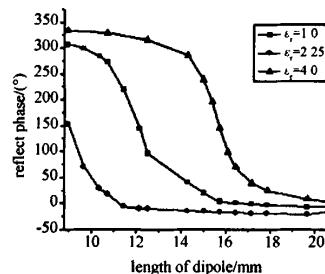


图5 不同介电常数时反射相位随振子长度变化曲线

相等,即存在空间程差。这个空间程差就需要通过合理设计每个辐射单元的大小以补偿从馈源到每个贴片的相位延迟,使每个辐射单元在某个方向上达到同相,第  $i$  个辐射单元需要调节的相位

$$\varphi_i = 2N\pi + k_0(R_i - r_i \cdot r_0), N = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式中,  $R_i$  表示馈源到第  $i$  个贴片的位置矢量,  $r_i$  表示阵列中心到第  $i$  个贴片的位置矢量,  $r_0$  表示沿主波束的单位矢量。由式(5)根据每个偶极子的位置不同计算所需要调节的相位,然后由反射相位曲线计算出每个偶极子的长度。

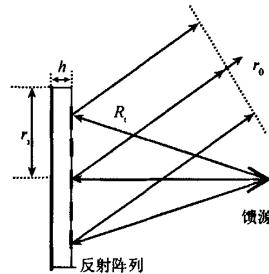


图6 平面反射阵列结构示意图

## 3 结论

在平面反射阵列天线的设计中,辐射单元的移相特性是关键部分。本文采用整体建模并利用 Floquent 方法数值计算分析了反射相位随入射角度、介质厚度和介电常数变化的曲线对比。利用辐射单元的移相来补偿平面反射阵列天线由于空间传输引起的相位延迟,使反射波在某个方向实现同相。这对于平面反射阵列天线在共行、多频和波束赋型等方面的设计具有一定的工程意义。

## 参考文献:

- [1] Munson R E, Haddad H, Hanlen J. Microstrip Reflectarray Antenna for Satellite Communication and RCS Enhancement or Reduction[P]. U. S. Patent 4684952, Aug. 1987.
- [2] Kelkar A. FLAPS: Conformal Phased Reflecting Surfaces[C]// Proceedings of the IEEE National Radar Conference, 1991;58-62.

(下转第 688 页)

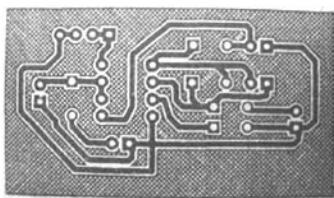


图8 样品1的喷涂实物图

对图8的喷涂实物图放大100倍进行不同部位的采样,图9为线路图经过腐蚀之后的放大效果图。由图9可见,样品1经过腐蚀之后,0.203 2 mm的网格状覆铜喷涂脉络清晰,走线边缘平缓,走向清明确,墨滴饱和,线条中间没有任何缺失,不会出现断点和圆角边缘缺失等情况,弧度饱满,角度清晰可见。



图9 喷涂式线路板直接制板仪腐蚀效果放大图(×100倍)

在试验中,一共采用5块线路板进行喷涂,结果如表1所示。

表1 喷涂式线路板直接制板仪一致性试验

样品	面板/cm	速度 /m·min <sup>-1</sup>	分辨率 /DPI	精度/mm
样品1	3.5×6.3	2.5	400	优于0.18
样品2	1.3×1.6	2.5	390	优于0.18
样品3	1.0×1.5	2.5	430	优于0.18
样品4	1.2×1.5	2.5	400	优于0.18
样品5	1.7×2.3	2.5	410	优于0.18

(上接684页)

- [3] Sikora L J. FLAPSTM Reflector Antennas[C]//Tele Systems Conference, 1993: 233-238.
- [4] Pozar D M, Metzler T A. Analysis of a Reflectarray Antenna Using Microstrip Patches of Variable Size[J]. Elect. Letters, 1993, 29: 657-659.
- [5] Bozzi M, Germani S, Perregnini L. Performance Comparison of Different Element Shapes Used in Printed Reflectarrays[J]. I EEE Antennas Wireless Propagat. Lett., 2003, 2: 2192222.
- [6] Cooley M E, et al. Novel Reflectarray Element with Variable Phase Characteristics[J]. Microwaves, Antennas and Propaga-

由表1可知,此线路板直接制板仪一致性高,分辨率和精度都能符合实验室制作线路板时的要求,喷涂的精度能够达到0.18 mm,分辨率为400 DPI。

## 6 小结

根据对制板仪系统的整体测试可知,字车运动控制部分可将喷头移动目标位置实现所需图像的喷涂,字车运行平稳,定位准确。整体操作过程方便快捷,当电路图在PROTEL里绘制完成之后,将PCB板放置于制板仪中,按一下“开始”键即可进行喷涂操作。

喷涂式线路板图直接制板仪制作的线路板精度高,工作分贝较低,可工作于日常的科研环境之中,无需隔绝,机器体积不大,不会占有太大的空间,比热转印机和直接雕刻机都有更高的性价比,有望在高校和企业研发部门进行推广。

## 参考文献:

- [1] 王明,王普天,魏杰等.喷墨技术在PCB制造中的应用[J].信息记录材料.北京:北京化工大学,2007,10(8):36-40.
- [2] 田宏强.打印机维修技能实训[M].北京:科学出版社,2007,1: 114-117,163-165,166-167,169-170.
- [3] 何继成,高有行,王厚生.大幅面彩色喷墨绘图机的关键技术研究[J].电子计算机与外部设备,1997,21:37-38.
- [4] 王宏.无刷直流电动机控制系统的研究与设计[D].南京:南京理工大学,2003,2:27-31.
- [5] 谢世杰.基于DSP的无刷直流电机控制系统研究[D].西安:西安电子科技大学,2004,1:14-17.
- [6] 王海龙.喷墨绘图仪伺服控制系统[D].西安:西安电子科技大学,2006:41-43.

tion, IEE Proceedings, 1997, 144(2): 149-151.

- [7] Javor R D, Wu X D, Chang K. Offset-Feed Microstrip Reflectarray Antenna[J]. Electronics Letters, 1994, 30(17): 1363-1365.
- [8] Kloca A O, Ege T. The Reflection and Transmission Characteristics of a Frequency Selective Surface Comprising of Crossed Dipoles on a Chrial Substance[C]//IEE, 1996: 531-533.
- [9] Chen C C. Transmission through a Conducting Screen Perforated Periodically with Apertures[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1970, 18(9): 627-632.

## 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>