

# 基于方向图可重构天线的新型宽角度扫描相控阵

肖绍球 柏艳英 王秉中 冉敏

(电子科技大学物理电子学院应用物理研究所, 成都 610054)

**摘要:** 提出了一种基于方向图可重构天线单元的新型相控阵, 并分别研究了其均匀、非均匀相控阵的扫描特性。通过重构天线单元的工作状态和各单元的激励, 其均匀阵可以获得低副瓣电平等较好的辐射性能, 其非均匀阵的主波束扫描范围达到 $\pm 80^\circ$ , 在扫描平面内 3dB 主波束覆盖可达  $176^\circ$ , 且栅瓣电平很低。研究表明了重构天线在相控阵天线研究中的广阔应用前景。

**关键词:** 方向图可重构天线; 相控阵; 稀布阵; 宽角扫描

## Novel Phased Array with Wide-Angle Scanning Ability Using Pattern Reconfigurable Antenna

XIAO Shao-qi, BAI Yan-yin, WANG Bing-zhong, RAN Min

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** A novel phased array is proposed based on pattern reconfigurable antenna element in this letter and the scanning characteristics of uniform and nonuniform phased arrays are studied. By shifting operating states and adjusting the excitation of the elements, the uniform array can obtain a good radiation performance such as low side lobes, and the nonuniform array can scan its main beam from  $-80^\circ$  to  $+80^\circ$  with 3 dB beam coverage of  $176^\circ$  and with low side lobes. The studies indicate that the pattern reconfigurable antenna has a tremendous potential in phased array applications.

**Key words:** Pattern reconfigurable antenna; phased array; thinned array; wide-angle scanning;

### 引言

微带天线具有重量轻、低剖面、体积小、易于与平台表面共形、易于与射频馈电电路集成等显著优势, 使得其成为相控阵天线单元的主要候选形式之一。然而, 目前研究表明微带平面相控阵波束扫描范围只能限制在有限的空间区域(最佳为单元正方向 $\pm 45^\circ$ 范围)。在军、民等应用中, 这一缺点显然是需要改进的, 扩展微带平面阵列扫描范围成为了其研究的重要课题。

导致微带平面阵列天线波束扫描范围窄的一个关键因素就是天线单元本身的能量辐射只能限制在有限的空间角度范围内, 从而导致由其构成的阵列无法将能量辐射到全空间区域。因此, 发展能够扩展微带天线单元方向图覆盖范围的新型天线技术, 是提高微带相控阵天线阵列扫描能力的必须环节。

本文提出基于方向图可重构微带天线单元技术, 发展能进行宽角度扫描的新型微带相控阵。论文首先介绍一种辐射方向图可重构天线单元, 再将该天线分别用于 12 单元的均匀线阵和非均匀线阵中, 研究其对阵列增益、副瓣、栅瓣的辐射性能的

采用商业软件 ANSOFT HFSS10.0 对天线进行仿真, 开关用理想金属片代替。天线在 H 面内仿真

影响, 并与设计相同频率的传统微带阵相比较, 表明了新型天线阵列的巨大应用前景。

### 1 辐射方向图可重构天线单元

辐射方向图可重构天线单元是一微带八木天线(如图1所示), 该天线的工作原理在文献[4]有介绍。这里基于相同的工作原理, 设计一个毫米波天线单元,  $f=36\text{GHz}$ 。微带基片的相对介电常数为  $\epsilon_r=2.2$ , 厚度为  $h=1.0\text{mm}$ 。天线参数为:  $W=0.4\text{mm}$ ,  $L_m=3.1\text{mm}$ ,  $g=1.11\text{mm}$ ,  $L_r=3.42\text{mm}$ ,  $S=1.4\text{mm}$ ,  $d_m=0.3\text{mm}$ ,  $d_l=0.2\text{mm}$ 。四个开关  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  分别安装在天线两个寄生条带的空隙上, 通过改变 4 个开关的工作状态使天线分别工作于两个模式, 即 R-mode 和 L-mode。当天线工作于 R-mode 时, 开关  $k_1$  和  $k_2$  被断开,  $k_3$  和  $k_4$  被联通, 天线左边条带长度大于右边条带长度, 天线在  $xoy$  面(H面)内的主极化方向图偏离法线方向而靠近  $+y$  轴方向某一倾斜角度。当天线工作于 L-mode 时, 开关  $k_1$  和  $k_2$  被联通,  $k_3$  和  $k_4$  被断开, 天线右边条带长度大于左边条带长度, 天线在  $xoy$  面(H面)内的主极化方向图偏离法线方向而指向  $-y$  轴方向某一倾斜角度。显然, R-mode 与 L-mode 是对称的两种工作状态。

增益图如图2所示。当天线工作在 R-mode 时, H 面内增益最大值方向偏离法线  $30^\circ$ , 其半功率覆盖范围

为 $2^\circ \sim 60^\circ$ 。当天线工作在L-mode时，H面内增益最大方向偏离法线 $30^\circ$ ，其半功率覆盖范围为 $-2^\circ \sim 60^\circ$ 。

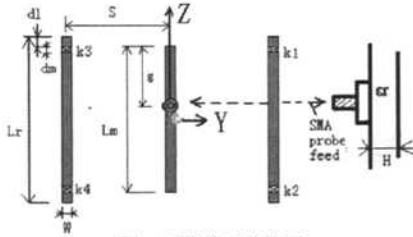


图1 天线单元结构图

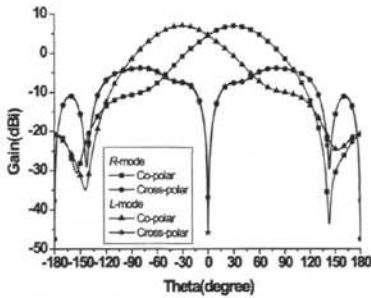


图2 天线单元在H面的仿真增益图

## 2 基于方向图可重构天线单元的新型阵列特性研究

### 2.1 等间距相控阵特性

采用上述方向图可重构天线单元设计一等间距的新型相控阵天线，如图3所示。12个天线单元(no.1~no.12)从坐标原点开始沿+y轴排列，单元间距为 $d=6\text{mm}$ ，则天线单元位置为：

$$y_i = (i-1) * d \quad (1)$$

$i$ 是指第 $i$ 个单元编号。给每个单元馈入相位，阵列在 $xoy$ 平面( $\theta_0=90^\circ$ )扫描，扫描方向图计算公式为：

$$E = \sum_{i=1}^N f_i(\theta, \phi) e^{jk_y(\sin(\theta, \phi) - \sin(\theta_0, \phi_0))} \quad (2)$$

( $\theta_0, \phi_0$ )代表阵列辐射方向图的主瓣方向， $f_i(\theta, \phi)$ 是阵元方向图因子。每个单元所加的激励相位为

$$\Delta\varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} y_n \cdot \sin(\theta_0) \quad (3)$$

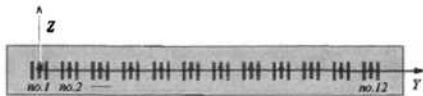
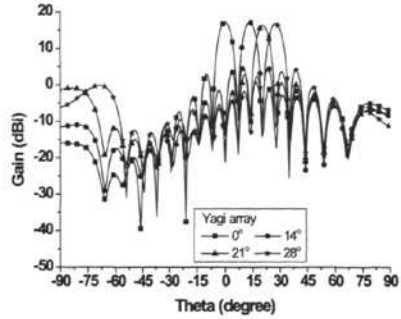
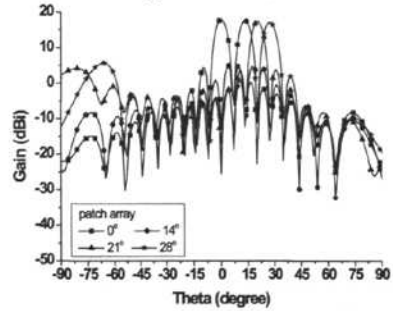


图3 等间距可重构相控阵结构图



(a)可重构天线



(b) 微带贴片天线

图4 等间距阵列H面+y方向扫描方向图

我们仍采用HFSS软件进行仿真。当阵列在 $xoy$ 面内的第一象限扫描方向图，每个天线单元的状态都一致，且都工作于R-mode，该阵列扫描方向图如图4(a)所示。

为比照本文研究结果，我们还设计了相同频率的微带贴片阵列天线，其扫描方向图见图4(b)所示。通过比较可见，可重构天线阵列能在 $\Phi=0^\circ \sim 28^\circ$ 内扫描，其主波束指向与微带贴片阵的主波束一致。在主波束左边，方向图可重构天线的新型相控阵副瓣电平低于微带天线阵相应的副瓣电平，相差甚至达到10dB左右。在主波束右边，副瓣电平稍微高于微带天线阵相应的副瓣电平。所以在等间距阵列中，使用微带贴片天线不能降低阵列副瓣电平时，可用可重构天线阵实现阵列副瓣电平降低。当扫描角继续增大时，两个阵列都出现了栅瓣。当阵列在 $xoy$ 面内的第二象限扫描，每个天线单元的状态都一致，且都工作于L-mode，并且其方向图与图4(a)关于 $\Phi=0^\circ$ 对称，这里就不列出。

### 2.2 稀疏阵相控阵特性

在微带贴片相控阵中，为消除栅瓣，常采用不等间距布阵，这种方法还具有减少阵元间互耦的重要作用。本研究中，阵元布阵我们采用稀疏的非均匀布阵方式。其阵列示意图如图5所示。该阵列仍由12个单元组成，沿y轴分布，位置分别为 $y_1 \sim y_{12}$ ，

各个单元位置由下式可以计算出<sup>[5]</sup>:

$$y_i = \frac{L}{r-1} (r^{i-1} - 1) \quad (4)$$

此处的  $r = (y_{12} - y_{11}) / (y_2 - y_1)$ ,  $i$  是指第  $i$  个单元的编号,  $L$  是这个线性阵列的总的长度, 这里取  $L = 10\lambda_0$ ,  $r = 2$ , 阵元相位仍按(3)确定后馈入。当阵列在  $xoy$  面内的第一象限扫描方向图时, 每个天线单元仍工作于 R-mode, 该阵列扫描方向图如图 6 所示, 其扫描特性详见表 1。可见, 阵列的主波束可在  $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$  的范围内进行扫描, 增益最大值发生在  $\theta = 30^\circ$  处。尽管随着扫描角的增大, 最大副瓣电平稍微有所增大, 但没有出现不可容忍的情况。在主波束指向  $80^\circ$  时, 此时的 3dB 波束覆盖达到  $88^\circ$ 。当改变天线单元的状态, 即都工作于 L-mode, 通过调整各单元相位, 阵列可在  $xoy$  面内的第二象限扫描方向图, 其扫描方向图与图 6 关于  $\phi = 0^\circ$  对称, 这里也不列出。

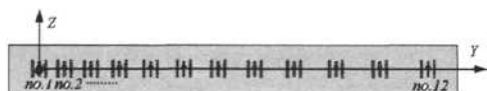


图 5 稀疏阵列可重构相控阵结构图

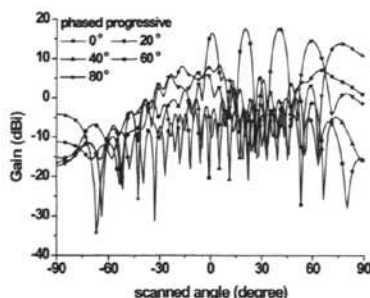


图 6 稀疏阵列 H 面+y 方向扫描方向图

### 3 结论

本文提出了一种基于辐射方向图可重构天线的新型相控阵, 并分别研究了其均匀和非均匀相控阵的方向图扫描特性。该新型阵列展现了宽角扫描、扫描时增益波动小、低副瓣电平和低栅瓣电平等优良的辐射性能, 研究表明了可重构天线在相控阵中具有广阔的应用前景。

表 1 阵列在  $xoy$  面内第一象限的方向图扫描特性

主波束方向 ( $\theta, \phi$ )	3dB 覆盖宽度	增益 (dBi)
( $90^\circ, 0^\circ$ )	( $-1^\circ, 3^\circ$ )	16.41
( $90^\circ, 10^\circ$ )	( $9^\circ, 12^\circ$ )	17.21
( $90^\circ, 20^\circ$ )	( $18^\circ, 22^\circ$ )	17.55
( $90^\circ, 30^\circ$ )	( $28^\circ, 33^\circ$ )	17.84
( $90^\circ, 45^\circ$ )	( $42^\circ, 48^\circ$ )	17.22
( $90^\circ, 50^\circ$ )	( $47^\circ, 53^\circ$ )	16.38
( $90^\circ, 55^\circ$ )	( $51^\circ, 58^\circ$ )	15.42
( $90^\circ, 60^\circ$ )	( $56^\circ, 64^\circ$ )	14.49
( $90^\circ, 70^\circ$ )	( $64^\circ, 78^\circ$ )	13.70
( $90^\circ, 80^\circ$ )	( $70^\circ, 88^\circ$ )	13.78

### 参考文献

- [1] P. L. Perini, Angle and Space Diversity Comparisons in Different Mobile Radio Environments [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat., 1998, 46 (6): 764-775.
- [2] Carl B. Dietrich, Spatial, Polarization, and Pattern Diversity for Wireless Handheld Terminals[J]. IEEE Trans. Antennas and Propag., 2001, 49(9): 1271-1281.
- [3] J. Zhang, A Wang, A Survey on Reconfigurable Antennas, Microwave and Millimeter Wave Technology International Conference[C]. 2008, April, 3: 1156-1159.
- [4] S. Zhang, A Pattern Reconfigurable Microstrip Parasitic Array[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagat, 2004, 52(10): 2773- 2776.
- [5] Y.H. Zhang, Study of Optimum Thinning Arrays by Nonuniform Spacings[J]. Acta Electronica Sinica, 1989, 17(4): 81-87.

肖绍球 男, 1975 年生, 博士, 博士生导师。主要研究方向: 天线理论与技术、超宽带电磁学及其应用、计算电磁学等。

E-mail: xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn

## 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>