

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209419

## 一种基于方向图重构机制的宽带宽视角相控阵天线\*

梁峰 程友峰 廖成

(西南交通大学电磁场与微波技术研究所 成都 610031)

**摘要:** 本文提出了一款风车形方向图可重构单元及其作为阵元的二维平面宽带宽视角扫描相控阵天线。所提出的单馈方向图可重构单元天线由辐射贴片、直流偏置电路以及宽带人工磁导体(AMC)反射面构成。其中,辐射贴片为馈电结构可重构的4个Vivaldi缝隙组成的风车形贴片,它能够通过改变PIN二极管的通断以实现宽带内四个端射方向上的波束切换。此外,将AMC反射面加载于辐射结构的后端,使得最大辐射方向由原来的端射方向调整为端射方向,这样有利于单元天线组阵后的扫描波束能够覆盖到侧射方向。对该天线单元及其构建的 $8 \times 8$ 均匀平面相控阵天线进行了仿真与分析。仿真结果显示,所设计的阵列天线同时具备了宽带宽视角二维波束扫描性能,其在5.4~6.1 GHz的工作频带内可以实现 $\pm 60^\circ$ 范围内的二维波束扫描。同时,阵列的增益波动小于4.3 dB,并且具有较低的旁瓣电平。

**关键词:** 方向图可重构天线;PIN二极管;人工磁导体(AMC);宽带宽视角扫描相控阵天线

**中图分类号:** TN821 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

A wideband wide-angular phased array base on  
pattern-reconfiguration mechanism

Liang Feng Cheng Youfeng Liao Cheng

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In this paper, a windmill shaped pattern reconfigurable element and its two-dimensional (2-D) wideband wide-angular scanning phased array antenna as an array element are proposed. The proposed single feed pattern reconfigurable unit antenna is composed of radiation patch, DC bias circuits and broadband artificial magnetic conductor (AMC) reflector. The radiation patch composed of four Vivaldi slots is a windmill-shaped patch with a reconfigurable feeding structure. By electrically controlling the PIN diodes integrated in the feeding network, the radiation beam of the element can be switched towards four endfire directions. Besides, the fan-shaped AMC surface is loaded backward the radiation patch. In this situation, the maximum radiation direction is tilted from the original endfire direction into a quasi-endfire direction, which benefits that the main beam of the planar phased array covers the broadside direction. The antenna unit and its construction  $8 \times 8$  uniform planar phased array is simulated and analyzed. The simulation results show that the designed planar array has the performance of wide-band and wide-angle two-dimensional beam scanning, which supports its maximum scanning angle of  $\pm 60^\circ$  in two main planes from 5.4 to 6.1 GHz. Meanwhile, the gain fluctuation of the array is less than 4.3 dB, and the sidelobe level is quite low.

**Keywords:** pattern reconfigurable antenna; PIN diode; AMC; wideband wide-Angular scanning phased array

## 0 引言

相控阵天线作为一种具有快速波束扫描功能的阵列类型,成为近年来天线研究领域的重要研究热点。特别是在雷达系统中,相控阵天线克服了机械扫描在扫描速度慢、数据传输速率低等方面的劣势,并且在扫描角度有很大要

求的实际工程应用中,相控阵天线能够利用移相网络对单元激励和幅度的控制,实现波束的快速切换,达到波束在特定角度的覆盖,这是传统平面阵列天线所无法比拟的。因此,相控阵天线成为了目前实现大空间波束覆盖的主要手段,例如移动通信、雷达系统、卫星通信、机载舰载等通信系统,具有十分广阔的发展前景。

收稿日期:2022-03-27

\* 基金项目:国家自然科学基金(61901398, 61801405, 61771407)、四川省科技厅项目(2021YJ0361)资助

但是目前相控阵天线也存在着诸多的技术瓶颈。一方面,由于阵元之间互耦效应的影响随着扫描角度的增加,阵列的有源反射系数增大,会在某些角度下发生全反射出现扫描盲点;另一方面,天线单元本身的波束覆盖宽度有限,这导致相控阵天线扫描角度一般限制在 $\pm 45^\circ$ 范围内<sup>[1]</sup>。而随着无线通信技术的快速发展,为了适应更广泛的应用需求,对相控阵天线提出了更高的性能要求,不仅要求其具有宽视角扫描性能,还对天线的工作带宽提出了更高的要求。近年来,已有很多的学者投入到相控阵天线宽带宽视角扫描的研究中,极大的推动了相控阵天线的发展。

针对相控阵天线宽视角扫描的研究,现有技术手段可以概括为拓宽天线单元的波束宽度<sup>[2-5]</sup>和联合波束宽度<sup>[6-7]</sup>两类。文献[2]中作者基于镜像原理从理论上系统的分析了电流/磁流与电壁/磁壁的位置关系及相应的方向图,证明了电流平行于磁壁和磁流平行于电壁两种情况下,天线可以实现理想的宽波束覆盖。此外,为实现联合宽波束单元的设计,方向图可重构技术也被引入到宽视角扫描相控阵天线的设计中。在文献[7]中,作者提出了一款基于方向图可重构技术的风车形二维宽角扫描相控阵天线,并利用混合粒子群优化算法对阵列进行了幅相综合,最终设计的相控阵天线实现了 $\pm 70^\circ$ 范围内二维波束扫描。然而该设计的工作带宽较窄,因而在很多实际应用中受到限制。

为了拓宽具有宽视角扫描能力的相控阵天线的工作带宽,Vivaldi 缝隙天线阵<sup>[8]</sup>、紧耦合阵列<sup>[9]</sup>、连接缝隙阵列<sup>[10]</sup>等结构以及通过分级延迟的方案实现宽带性能<sup>[11]</sup>等方法被相继提出。这些设计均能实现几个倍频程的工作带宽,然而缺点是往往具有复杂的结构与较高的剖面,不利于安装集成。事实上,方向图可重构技术同样可以应用到宽带宽视角扫描相控阵天线的设计中。文献[12]通过馈电可重构手段对超宽带天线单元进行重构,实现了时域方向图的切换。进一步地,以该方向图可重构超宽带天线为单元构建了八单元线阵,实现了 $\pm 70^\circ$ 的扫描波束覆盖。然而,这款天线仅支持一维波束扫描,对于上半空间的覆盖范围仍然较小。

综上所述,相控阵天线要同时具备宽带宽视角二维扫描的性能是一个具有挑战的研究课题,而方向图可重构天线已经展现了二维宽视角扫描与宽带一维宽视角扫描的能力。本文在此基础上,提出了一种单馈风车形方向图可重构天线单元,并将该单元应用于平面相控阵天线中,通过仿真优化,实现了相控阵天线宽带、宽视角、二维方向扫描的设计目标。

## 1 方向图可重构天线单元设计与分析

### 1.1 单元天线结构设计

为了实现相控阵天线宽带宽视角扫描的设计目标,其单元天线的设计尤为重要。针对宽带的设计目标,采用如图 1(a)所示的具有宽带特性的单馈风车形 Vivaldi 缝隙天

线作为单元天线的辐射源。针对宽视角扫描的设计目标,在单元天线的设计中引入了方向图可重构技术,以实现单元天线在 $\pm x$ 、 $\pm y$  4 个方向上的波束切换。同时,为了消除天线的后向辐射,在天线的后端加载了 AMC 反射面。需要注意的是,由于天线的带宽比较宽,所以对应的 AMC 反射面的零相位反射带宽也需要拓宽,这里采用了文献[13]中作者提出的宽带 AMC 结构,如图 1(b)所示,它由风扇型贴片、介质基板(Rogers RT5880,  $\epsilon_r = 2.2$ )及其金属地板构成。

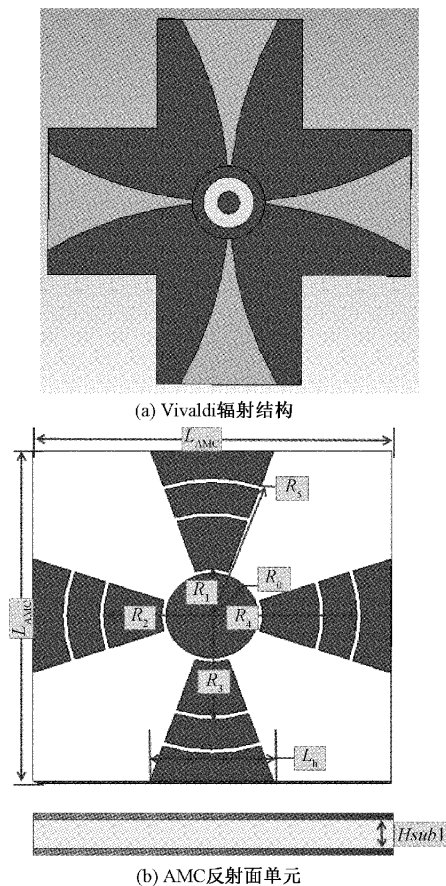


图 1 单元天线分部结构

单元天线整体结构如图 2 所示,它主要分为可重构辐射源部分与 AMC 反射面部分,其中辐射源部分的介质基板选择为国产旺灵板材,其相对介电常数为 4.3。通过仿真优化,最终确定了结构尺寸如表 1 所示。单元天线的馈电结构及直流偏置电路放置于 Vivaldi 缝隙辐射贴片的背面,如图 3 所示。它由 PIN 二极管开关、直流偏置控制端以及馈电微带线组成。另外,为防止射频信号对直流偏置电路干扰,在直流偏置控制端口与射频信号之间接入一个“隔交”电感,其值为 120 nH。

### 1.2 天线工作原理

在本设计中,采用同轴线-微带线的馈电形式,同轴探针连接 4 个嵌入 PIN 二极管的 L 型馈电微带线,通过切换

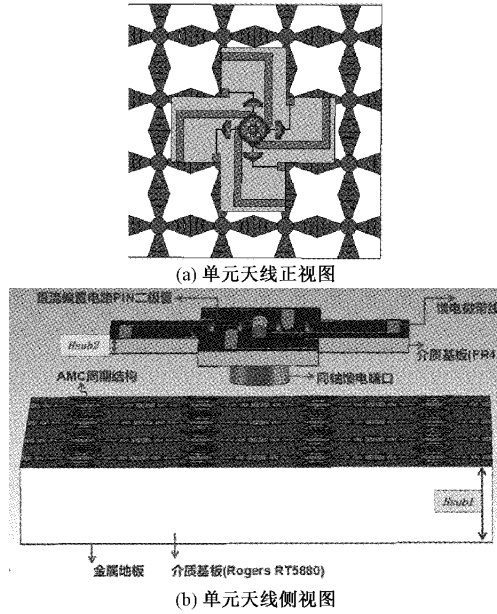


图 2 单元天线完整结构

表 1 天线单元各部分结构尺寸具体数值 mm

结构参数	数值	结构参数	数值
$W_{sub}$	8.00	$W$	31.2
$L_{sub}$	20.00	$L_{AMC}$	7.8
$H_{sub1}$	5.08	$L_h$	2.68
$H_{sub2}$	1.016	$R_0$	1.0
$a_1$	8.50	$R_1$	1.1
$c_1$	3.05	$R_3$	2.45
$d_1$	1.00	$R_4$	3.15
$f_1$	0.90	$R_5$	3.25
$g_1$	6.30		

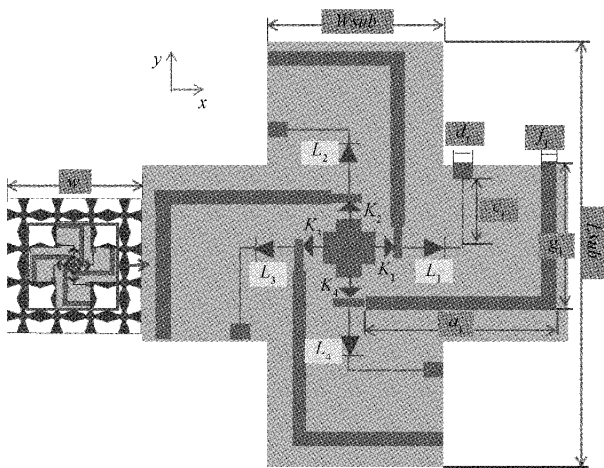


图 3 直流偏置电路以及馈电微带线

二极管的通断可以控制 Vivaldi 缝隙的工作状态,以此来实现单元天线在 4 个准端射方向上的波束切换。在仿真中,

PIN 二极管在导通状态下等效为电阻与电感的串联电路,对应的电阻值为  $4 \Omega$ ,电感值为  $0.4 \text{ nH}$ ;而在断开状态下的等效电路为电阻和电容的并联电路,此时的阻值是  $20 \text{ k}\Omega$ ,等效电容值为  $0.1 \text{ PF}$ 。以上等效电路是基于选用的 PIN 二极管(MACOM MA4FCP300)的 datasheet 来确定的。

PIN 二极管的通断状态与天线方向图的指向关系如表 2 所示。例如在模式 1 的状态下,设置二极管开关  $K_1$  为开状态,其他为关状态,此时辐射贴片上的仿真电流分布如图 4 所示,可以看出  $+y$  方向的 Vivaldi 缝隙被激励起来,因而方向图为偏向  $+y$  方向的准端射方向图。以此类推,依次还可以实现其他 3 个具有旋转对称性的准端射方向的辐射。

表 2 PIN 二极管状态与天线方向图指向关系

状态	K1	K2	K3	K4	波束指向
1	导通	断开	断开	断开	$+y$
2	断开	导通	断开	断开	$-x$
3	断开	断开	导通	断开	$-y$
4	断开	断开	断开	导通	$+x$

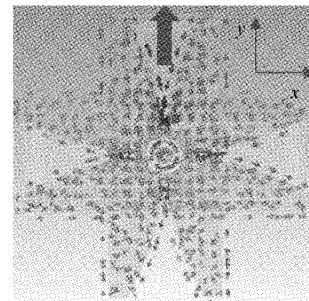


图 4 电流分布图

### 1.3 仿真结果分析

利用商业电磁仿真软件对所设计的单元天线各部分结构进行仿真分析。图 5 列出了 AMC 结构的零相位反射带宽。可以看出,AMC 结构的零相位反射( $\pm 90^\circ$ )带宽为  $5.4 \sim 11.0 \text{ GHz}$ (图中已用阴影区域标识),相对工作带宽为  $68\%$ ,这样的宽带足以覆盖 Vivaldi 缝隙的反射带宽。

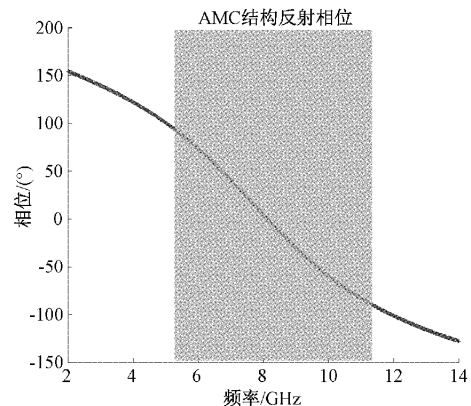


图 5 AMC 结构反射相位

单元天线的反射系数如图 6 所示,可以看出单元天线的工作带宽为 5.5~6.0 GHz。图中还对比了加载 AMC 反射面前后的单元天线的反射系数,可以看出 AMC 反射面的加载使得天线带宽增加且向低频移动,谐振点的下陷更深,具有更好的阻抗匹配性能。

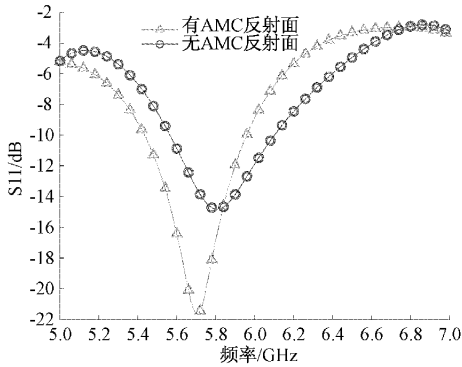
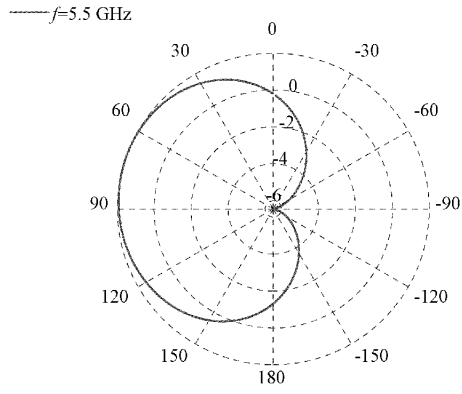
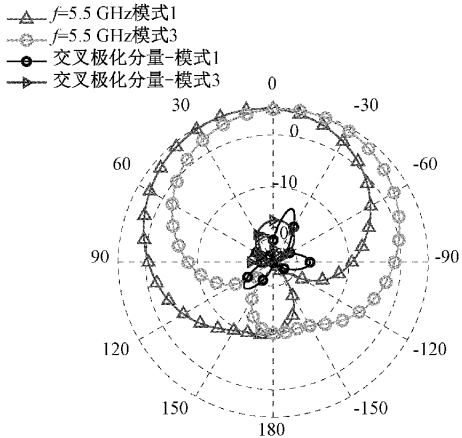


图 6 单元天线反射系数

有无 AMC 反射面加载的单元天线工作在模式(1)时,在中心频点  $f=5.5$  GHz 时的方向图见图 7 所示。通过对图 7(a)与(b)可以看出,在加载 AMC 反射面前,天线的波束指向 +y 端射方向,其增益为 2.0 dBi;加载 AMC 反射面后,波束指向变成了偏向 +z 方向的准端射方向,单元天



(a) 无AMC结构



(b) 两种模式下的单元方向图

图 7 单元方向图

线的增益增加到 5.01 dBi,增益上升的主要贡献来自于后向辐射抑制。此外,在图 7(b)还给出了单元天线在 -yoz 面可重构模式 3 情况下的方向图仿真结果。可以看出,由于天线结构具有旋转对称性,由此可以推断在其他状态下也满足类似的旋转对称性。

## 2 均匀平面阵列结构与性能

基于上述单元天线,设计了一款  $8 \times 8$  均匀平面阵列天线,天线有效辐射单元均匀分布在  $xoy$  平面,阵列结构如图 8 所示。阵元间距为  $0.5\lambda$  ( $\lambda$  为最大工作频率时的波长),阵列尺寸为  $249.6 \text{ mm} \times 249.6 \text{ m}$ 。图 8 中方框内为阵列的中心单元 NO. 28 和周边单元 NO. 20、NO. 27、NO. 29 和 NO. 36。

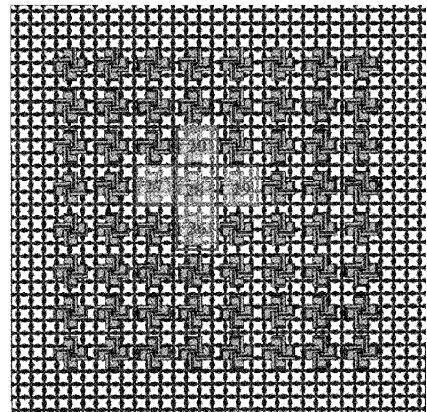
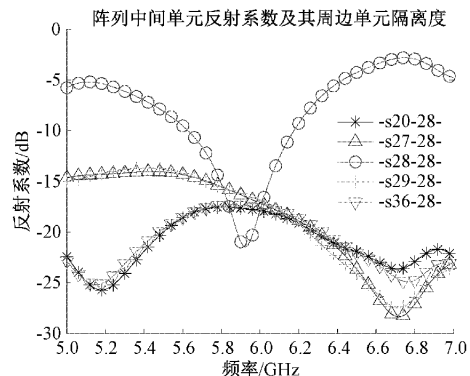


图 8  $8 \times 8$  平面阵列结构

利用电磁仿真软件对阵列进行仿真,采用等幅激励,当所有阵元都工作在模式 1 时,中心单元(NO. 28)的反射系数以及与周边单元(NO. 20、NO. 27、NO. 29 和 NO. 36)的传输系数如图 9(a)所示。从仿真结果可以看出,中心单元的 -10 dB 反射带宽为 5.6~6.2 GHz,并且中心单元与周边单元之间的隔离度均大于 14 dB,由此可以推断出阵列单元之间具有良好的隔离度。图 9(b)给出了阵列在扫描过程中的有源驻波比,可以看出,阵列的工作带宽(驻波比小于 3)为 5.4~6.1 GHz,相对工作带宽为 12%,在此频带内阵列在扫描的过程中不会出现扫描盲点。



(a) 有源反射系数及传输系数

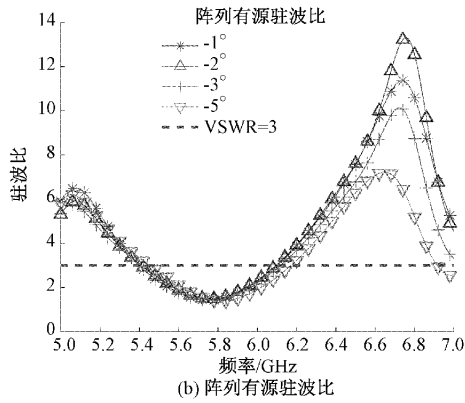
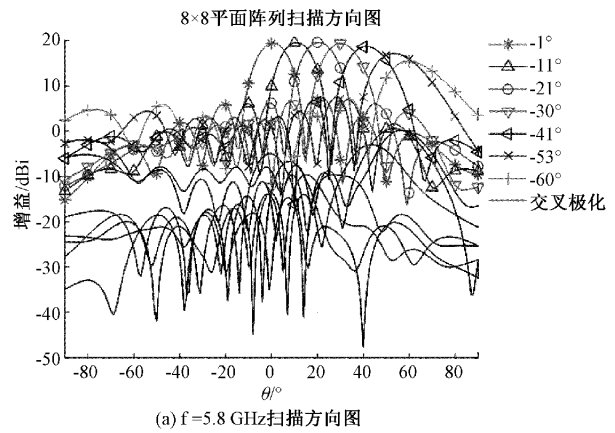


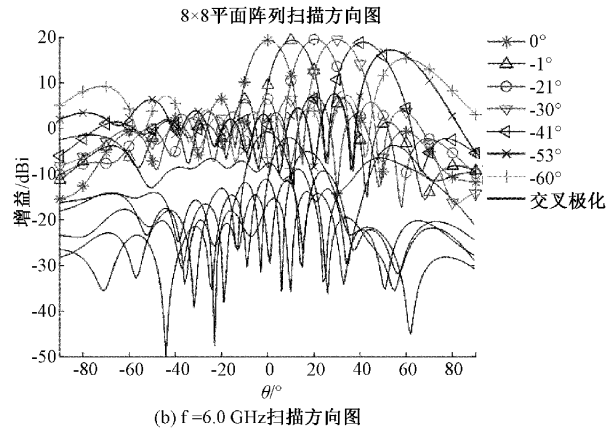
图 9 阵列反射性能

图 10 给出了仿真得到的阵列在  $yo z$  面的远场扫描方向图。可知该阵列天线在整个工作频带内均可实现  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围内无栅瓣扫描, 在 5.8 GHz 和 6.0 GHz 处的峰值旁瓣电平分别小于  $-8.1$  dB 和  $-6.1$  dB。对应的扫描性能总结在表 3 和 4 中。根据单元方向图与重构模式的旋转对称性可以推断得知: 该阵列天线可以实现在  $xoz$  与  $yo z$  两个平面  $-60^\circ \sim +60^\circ$  范围内扫描, 3 dB 波束覆盖范围达  $-80^\circ \sim +80^\circ$ , 主波束的增益波动分别小于 4.2 dB 和 4.3 dB。

作为对比, 表 5 列出了本文与文献[14-16]中相控阵天线的性能的对比。与文献[14]提出的一维线阵相比, 本文提出的二维平面阵具有更宽的工作带宽、更多的扫描维度以及更低的旁瓣电平; 与文献[15]提出的平面阵列天线相



(a)  $f=5.8$  GHz 扫描方向图



(b)  $f=6.0$  GHz 扫描方向图

图 10 阵列辐射性能

表 3 阵列扫描特性 ( $f=5.8$  GHz)

参数	扫描特性						
扫描角度/ $^\circ$	1	11	21	30	41	53	60
增益/dBi	19.5	19.6	19.6	19.4	18.7	17.4	15.4
峰值旁瓣电平/dB	-12.0	-12.6	-13.4	-12.8	-11.8	-9.60	-8.10
3 dB 波束宽度/ $^\circ$	13.1	13.0	13.7	14.7	16.4	19.5	21.4
3 dB 波束覆盖/ $^\circ$	-5~80						

表 4 阵列扫描特性 ( $f=6.0$  GHz)

参数	扫描特性						
扫描角度/ $^\circ$	0	11	21	30	41	53	60
增益/dBi	19.4	19.4	19.6	19.5	18.9	17.3	15.3
峰值旁瓣电平/dB	-12.4	-12.8	-13.1	-12.9	-12.1	-9.70	-6.10
3 dB 波束宽度/ $^\circ$	12.7	12.9	13.5	14.4	16.2	19.0	20.9
3 dB 波束覆盖/ $^\circ$	-5~80						

比, 本文的  $8 \times 8$  平面阵列具有更宽的波束扫描范围; 与文献[16]中提出的全金属 Vivaldi 天线组成的宽带一维扫描相控阵天线相比, 本文的平面阵列具有更宽的波束扫描范

围和二维方向上的波束扫描性能。综上所述, 本文设计的平面相控阵天线具有了宽带宽视角二维扫描的性能优势, 具备了较好的潜在工程应用前景。

表 5 相控阵天线仿真性能对比

文献来源	阵列规模	工作带宽/GHz	扫描范围/(°)	最大旁瓣电平/dB
文献[14]	1×8	5.8	±70	-2.1
文献[15]	8×8	28.0~31.0	±30	-11
文献[16]	1×8	6.0~12.0	±45	-10
本文	8×8	5.4~6.1	±60	-6.1

### 3 结 论

本文提出了一款基于单馈风车形方向图可重构单元的宽带宽视角扫描相控阵天线。首先,设计了一种具有低后向辐射的单元天线,并利用 PIN 二极管实现了该单元方向图的可重构。此外,利用 AMC 结构作为反射面,消除了后向辐射,并将原本最大辐射方向在端射的方向图改变为准端射方向。然后,基于该单元天线,设计了一款 64 单元平面相控阵天线。仿真结果表明,该平面阵列天线在 5.4~6.1 GHz 的工作频带内可以实现±60°范围内的二维波束扫描,3 dB 波束覆盖达-80°~+80°,增益波动小于 4.3 dB,相对工作带宽超过 12%。本文所提出的平面相控阵天线具有二维扫描、工作带宽宽、以及扫描范围大的优点。

#### 参考文献

- [1] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2002, 509-523.
- [2] WANG R, WANG B Z, DING X, et al. Planar phased array with wide-angle scanning performance based on image theory[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(9): 3908-3917.
- [3] 毛贵海, 牛传峰, 杨国栋, 等. K 波段圆极化相控阵天线的研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(5): 548-550.
- [4] 王超. 基于方向图可重构技术的二维宽角扫描相控阵天线及其电路研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
- [5] 谢明聪, 姜兴, 彭麟, 等. 宽频带宽角域扫描的圆极化相控阵设计[J]. 电讯技术, 2020, 60(8): 974-980.
- [6] DING X, CHENG Y F, SHAO W, et al. A wide-angle scanning phased array with microstrip patch mode reconfiguration technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4548-4555.
- [7] CHENG Y F, DING X, SHAO W, et al. Planar wide-angle scanning phased array with pattern-recon-

figurable windmill-shaped loop elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(2): 932-936.

- [8] 杨俊. 基于 Vivaldi 天线的宽带宽角扫描相控阵的研究和设计[D]. 成都:电子科技大学, 2019.
- [9] MUNK B, TAYLOR R, DURHAM T, et al. A low profile broad band phased array antenna[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Columbus, 2003, 448-451.
- [10] LEE J J, LIVINGSTON S, KOENING R. Wide band long slot array antennas[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Columbus, 2003, 452-455.
- [11] 姜玮, 潘宇虎, 夏琛海, 等. 基于分级延迟的宽带相控阵天线研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 39-42.
- [12] JIANG Z, XIAO S, LI Y. A wide-angle time-domain electronically scanned array based on energy-pattern-reconfigurable elements [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(9): 1598-1602.
- [13] CHENG Y F, FENG J, LIAO C, et al. Analysis and design of wideband low-rms wide-scan phased array with amc ground[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(2): 209-213.
- [14] XIAO S, ZHENG C, LI M, et al. Varactor-loaded pattern reconfigurable array for wide-angle scanning with low gain fluctuation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(5): 2364-2369.
- [15] LIU W E I, CHEN Z N, QING X M. Compact wideband metasurface-based circularly polarized antenna for Ka-band phased array[J]. 2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2017: 17-20.
- [16] MA X, CHAI S, XIAO K, et al. Design of all-metal vivaldi phased array antenna [J]. 2018 IEEE 3rd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2018: 547-551.

#### 作者简介

梁峰硕士研究生, 主要研究方向为天线理论与技术。

E-mail: liangfeng\_swjtu@163.com

程友峰, 讲师, 主要研究方向为天线理论与技术。

廖成(通信作者), 教授, 主要研究方向为天线理论与技术、计算电磁学、电波传播与电磁环境等。

E-mail: c. liao@swjtu. edu. cn