

# 一种宽频带双圆极化微带天线阵列设计

王新<sup>1</sup>, 杨凯<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 顾保国<sup>2</sup>, 李佳津<sup>1</sup>, 赵义<sup>3</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军63726部队, 银川 750021;

3. 空军工程大学, 西安 710038)

**摘要:** 为了支撑低轨卫星宽带数据下传需求, 提出了一款宽频带双圆极化微带天线; 采用微带天线作为基本辐射单元, 基于层叠寄生贴片方式与加载空气腔方法展宽天线工作带宽并提高增益值, 利用电容加载的三分支线定向耦合器对天线单元进行馈电进一步展宽天线带宽, 并实现双圆极化辐射特性; 单元电性能仿真结果良好, 阻抗相对带宽为 28.2%, 轴比相对带宽达 14.5%, 峰值增益达到 5.6 dBi; 基于辐射单元进行 4×4 阵列组合, 所设计阵列天线阻抗带宽覆盖 7.7~8.9 GHz, 同一单元不同极化与不同单元间端口间隔离度均 $\geq 15$  dB, 轴比在通带内均 $\leq 3$  dB, 方向图仿真与测试结果吻合良好, 验证了设计方案的正确性。

**关键词:** 宽频带; 双圆极化; 微带天线; 电容加载; 定向耦合器

## Design of a Broadband Dual Circular Polarization Microstrip Antenna Array

WANG Xin<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, GU Baoguo<sup>2</sup>, LI Jiajin<sup>1</sup>, ZHAO Yi<sup>3</sup>

(1. The 54th research institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. Unit 63756 of PLA, Yinchuan 750021, China;

3. Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** To support the requirements of broadband data transmission from low orbit satellites, a wide band dual circular polarization microstrip antenna is proposed. The microstrip antenna is taken as the basic radiation unit, the antenna bandwidth based on the stacked parasitic patch and loaded air cavity methods is widened, and the gain value of the antenna is improved. The antenna unit is fed by using a capacitor loaded three-way branch directional coupler to further widen the antenna bandwidth and achieve the characteristics of the dual circularly polarized radiation. The simulation results of unit electrical performance are good, with an impedance relative bandwidth of 28.2%, an axial relative bandwidth of 14.5%, and a peak gain of 5.6 dBi. Based on radiation units, a 4×4 array combination is designed, with an impedance bandwidth covering 7.7~8.9 GHz. The isolation degree between different polarizations and ports of the same unit is not less than 15 dB, with a axial ratio of not greater than 3 dB within the pass band. The simulation results of the directional pattern are in good agreement with the testing results, the designed scheme is verified.

**Keywords:** broadband; double circular polarization; microstrip antenna; capacitance loading; directional coupler

## 0 引言

随着低轨卫星星座的推广和快速建设, 高速卫星数据接收系统需求不断增加。宽频带天线作为支撑高速数据传输和广泛覆盖的关键技术之一, 受到了广泛关注, 宽频带天线能够提供高达 Mbit/s 到 Gbit/s 的数据传输速率, 满足现代无线通信系统对高速数据传输的需求, 除此之外还能够提供较大的系统容量, 满足大规模用户同时在线和高速数据传输的需求<sup>[1-2]</sup>; 传统的无线通信设备主要使用线极化天线, 但线极化波容易受到气候、环境等外界因素影响。

而圆极化波在面对复杂传输环境时受损较小, 可以很好保证通信链路的可靠性<sup>[3-5]</sup>。宽频带天线可有效提高信道容量<sup>[6]</sup>, 因此对具备宽频带与可辐射圆极化电磁波的天线成为众多学者攻坚方向。

常见的宽频带天线包括超宽带单极子天线<sup>[7-8]</sup>、维瓦利迪天线<sup>[9-10]</sup>等形式。超宽带单极子天线作为一种特殊的天线类型, 具有其独特的优点和缺点, 由于超宽带通信使用的频率范围较宽, 且功率密度较低, 因此对现存无线通信系统的影响较小, 其还具有较高的数据传输速率, 适用于高速无线通信需求。除此之外, 超宽带信号具有较宽的频谱,

收稿日期: 2024-06-12; 修回日期: 2024-06-24。

作者简介: 王新(1989-), 男, 博士, 高级工程师。

通讯作者: 赵义(1994-), 男, 硕士生。

引用格式: 王新, 杨凯, 王飞, 等. 一种宽频带双圆极化微带天线阵列设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 308-314.

能够分辨出多径信号,提高通信的可靠性<sup>[11-12]</sup>。单极子天线的-一个主要缺点是地面依赖,单极天线需要依赖导电接地层才能正常工作,因此当没有合适的接地平面或接地平面发生变化时,天线的性能会受到影响。单极天线可能会受到建筑物或其他附近障碍物的影响,导致性能下降,障碍物的存在会严重降低其性能。另外由于其结构的原因导致超宽带单极子天线的H面辐射方向图在某些频率下可能不全向,这可能会影响通信的覆盖范围。所以超宽带单极子对天线的设计要求较高,需要精确控制天线的尺寸、形状和材料等参数。维瓦尔迪天线(Vivaldi)是一种指数型渐变开槽天线,维瓦尔迪天线的设计允许其自由切换信号的极化方式,包括水平极化、垂直极化和圆极化。这种极化可调性使其能够适应不同信号的传输需求,天线的金属条可以通过调整其长度和角度来改变辐射方向,这种方向性可调性使维瓦尔迪天线能够适应不同的通信场景,包括点对点通信和广播通信。维瓦尔迪天线的-一个主要缺点是其尺寸相对较大、剖面较高,这可能会限制其在某些紧凑空间的应用,此外尽管维瓦尔迪天线结构简单,但由于其特殊的设计和材料要求,制造成本可能相对较高。圆极化天线具有多个显著的优点,这些优点使得它在各种通信系统中显得尤为重要,圆极化天线对接收信号的极化方向不敏感,因此能够接收任意极化的来波<sup>[13]</sup>。这意味着,即使信号在传输过程中发生了极化畸变或受到其他干扰,圆极化天线仍然能够保持较好的接收效果。此外,圆极化天线还能够抑制雨雾干扰和抗多径反射,进一步提高信号传输的可靠性。圆极化天线由于其旋向正交性,能够有效地降低极化失配带来的性能损失,这使得圆极化天线在移动通信、卫星通信等系统中具有广泛的应用前景。

微带天线具有剖面低、易共形和加工成本低等优势<sup>[14]</sup>,但其相对工作带宽仅为3%~5%,这限制了其实际应用环境,常见的展览微带天线带宽的方法包括:增加微带天线介质基板厚度、加载缝隙、加载共面寄生贴片、层叠贴片技术等<sup>[15-17]</sup>;介质板厚度的增加可以显著提高天线的带宽,其理论依据为降低Q值<sup>[18]</sup>。较厚的介质基板可以使得天线波速变慢,有助于控制天线的辐射方向,使天线辐射更加均匀,同时能够拓展天线的带宽。这对于需要宽频带工作的天线系统来说是一个重要的优势。但同时由于介质基板的变厚会增加表面波泄露,当介质板厚度过大时,会引起更多的表面波泄露,这可能会降低天线的效率,会导致能量损失和辐射方向的不准确。辐射贴片上加载缝隙也能提高天线阻抗带宽,其原理为通过改变天线表面电流流向,从而引入新的谐振,其效果远超过仅改变基板相对介电常数和基板厚度的方式。同时由于缝隙天线的辐射面积进行了缩减,因而接收到信号的强度降低,且结构特殊容易受到周围金属结构的影响,在复杂的电磁环境中使用时应注意避免与其他金属结构产生干扰。工程中还可采用加载共面寄生贴片的方法增加天线工作带宽,其原理为通过引入

寄生贴片,可以在主贴片的基础上增加谐振点,当这些谐振点靠近时,它们会形成一个宽频通带,有效地拓展了天线的带宽。与传统的叠层形式相比,共面寄生贴片技术可以将所有金属片印刷在同一块介质板上,不需要增加新的介质板,因此剖面高度更低,且通过调节寄生贴片与主贴片之间的间隙宽度和贴片大小,可以有效改变天线的容性曲线,从而实现增加带宽可调。虽然加载共面寄生贴片可以实现天线宽频带,但由于引入寄生贴片,设计与制造难度有所增加,且主辐射贴片与寄生贴片在同一块介质基板上,虽然天线剖面没有增加,但是由于寄生贴片的引入,天线的整体体积和重量可能会增加,同时成本也会增加。微带层叠贴片是由金属贴片以及贴片间的介质材料叠堆而成,通过调节金属片尺寸大小与介质板的厚度调节带宽与效率。由于采用多层叠堆设计,使得天线在保持性能的同时,体积更加紧凑,适合在有限的空间内使用。同时随着集成技术和印制技术的发展,使得微带层叠天线的制作方便简单,价格低廉。在通信过程中,如果接收端与发射端的极化方式不匹配,会导致信号衰减,而圆极化波可以接收任意方向线极化波及旋向相同的圆极化波,因此,在复杂的多径环境中,圆极化波天线能够减少多径效应的影响,提高通信质量。正是由于圆极化天线具有多种优势,因此在无线通信、雷达探测、卫星通信等领域得到了广泛的应用。圆极化电磁波可由两个正交、等幅的线极化波合成,目前常用的技术包括:单点馈电、多点馈电、多元法等<sup>[19-20]</sup>。

针对上述研究现状与背景,为同时满足所设计天线具备宽频带与双圆极化特性。以微带天线为基本单元,通过加载寄生贴片与空气腔体的技术实现宽频带特性,采用小型化分支线耦合器进行馈电从而实现双圆极化特性。在仿真结果满足指标的情况下加工了天线样机并进行测试,结果验证了该设计方案的可行性。

## 1 天线设计原理

### 1.1 天线单元宽频带实现机理

微带天线具有体积较小,剖面较低,易于与其它载体进行共形放置的特点。但传统的单层微带天线品质因数Q值较高,因此其相对带宽比较窄。本设计以传统的单层微带天线单元为基础,通过层叠寄生辐射贴片的方式与加载空气腔体的方法展览天线工作带宽,具体实现方法如图1所示。

由图1可知,在寄生辐射贴片上进行了切角操作,微带天线的切角是一种常用的实现圆极化的方法,它基于改变天线表面电流的流动方向来实现圆极化辐射。切角会使天线的辐射电场在水平和垂直方向上产生两个分量,且这两个分量具有相等的幅度但相位相差 $90^\circ$ <sup>[21]</sup>。阻抗匹配是确保天线与馈线之间能量传输效率最大化的关键技术,当天线与馈线的阻抗不匹配时,会导致能量反射、传输损耗增大以及天线辐射效率降低。因此,为了优化天线的性能,

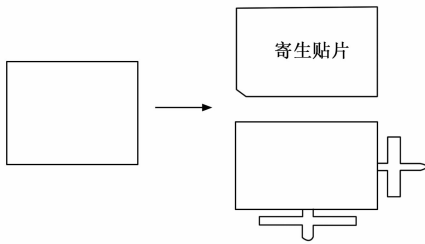


图 1 天线单元宽带化实现流程

需要实现良好的阻抗匹配。对于微带天线，可以通过在馈线上加载十字枝节以改善阻抗匹配，在微带天线馈线上加载十字枝节是一种常用的阻抗匹配技术。通过调整十字枝节的尺寸、位置以及形状，可以有效地改变馈线的阻抗特性，从而使其与天线的阻抗更加匹配。加载十字枝节后，馈线的阻抗可以在较宽的频率范围内保持相对稳定，从而提高了天线的带宽和辐射效率。图中寄生贴片与激励贴片之间填充为空气介质，加载空气腔体可以有效地提高微带天线的带宽，空气腔体的引入可以改变天线的谐振特性，使得天线能够在更宽的频率范围内工作<sup>[22]</sup>。相比于传统的实心介质基板，加载空气腔体的微带天线在保持性能的同时，可以显著减轻天线的重量，还可降低微带天线的制造成本。

图 2 给出了加载寄生辐射贴片与否的反射系数随频率的变化曲线。由图可知，单层微带贴片天线谐振频率为 8 GHz，-10 dB 阻抗带宽仅为 400 MHz。加载寄生贴片后天线谐振点发生偏移且引入了新的谐振点，谐振频率为 7.5 GHz 与 8.2 GHz，-10 dB 阻抗带宽为 1.4 GHz，很大程度上展宽了天线单元的工作频带。

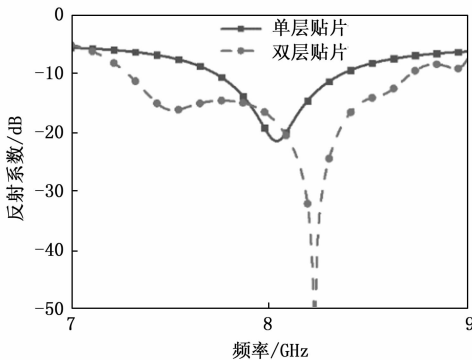


图 2 反射系数对比图

### 1.2 小型化宽带电桥设计机理

由于所设计天线单元需要接收双圆极化信号，需要对天线添加馈电结构，使其能够分别实现左旋圆极化以及右旋圆极化。双分支线定向耦合器是一种被广泛应用于双圆极化微带天线馈电的无源器件，如图 3 所示，其共有四个端口，当端口 1 为输入端时，端口 4 为隔离端，无能量输出，端口 2 与 3 平均分配端口 1 的输入功率，且端口 2、3 之间输出信号相位之差为 90°；反之，当端口 4 输入信号

时，端口 1 为隔离端，无能量输出，端口 2 与 3 平均分配端口 1 的输入功率，且端口 2、3 之间输出信号相位差值为 -90°<sup>[23]</sup>。

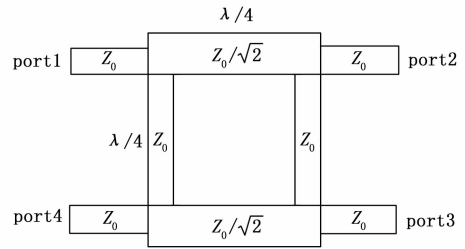


图 3 双分支线定向耦合器结构示意图

令  $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$ ，则可求得双分支线定向耦合器各段传输线阻抗分别为 50 Ohm 与 35 Ohm，据此可对其进行仿真分析。图 4 给出了双分支线定向分支耦合器的仿真结果。结果显示，在 7.5~8.5 GHz 范围内，定向耦合器的回波损耗以及在 2、3 端口处的幅度一致性良好，但是在超出范围内可以看到 2、3 端口之间的幅度差值发生了较大的偏差，这是由于耦合器的各枝节长度都为中心频点处波长的四分之一，当工作频率偏离中心频点时，使得传输效果变差，受此影响双分支线定向耦合器的带宽较窄，因此需对其进行改进以拓展其工作带宽。

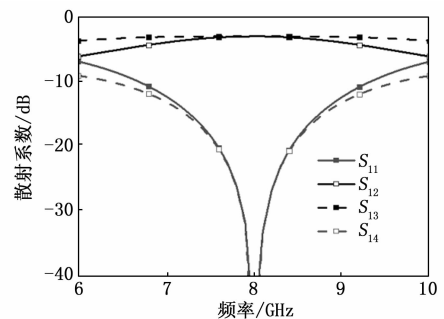


图 4 双分支线定向耦合器散射参数仿真结果

如图 5 (a) 所示在双分支线定向耦合器的基础上对其进行级联得到的三分支线定向耦合器可通过引入新的谐振点的方式来拓展其工作带宽，但同时其尺寸也在不断变大。且由于天线单元尺寸受限，三分支线定向耦合器尺寸过大不能满足单元尺寸设计需求。因此需对其进行进一步小型化设计。电容加载技术可以缩短传输线长度，因此可以将电容加载技术应用至三分支线定向耦合器中用来缩短其各传输线枝节长度，从而实现小型化的设计。如图 5 (b) 所示，在三分支线定向耦合器的两条平行支线上通过并联“T型”的传输线开路枝节来实现电容加载结构。

为验证基于电容加载结构的三分支线定向耦合器的实际性能，本节基于 HFSS 软件对其建模仿真。如图 6 所示。

仿真结果如图 7 所示，可知在 7.0~9.5 GHz 处，端口 1 和 2 的反射系数均  $\leq -10 \text{ dB}$ ，这说明端口处阻抗匹配良

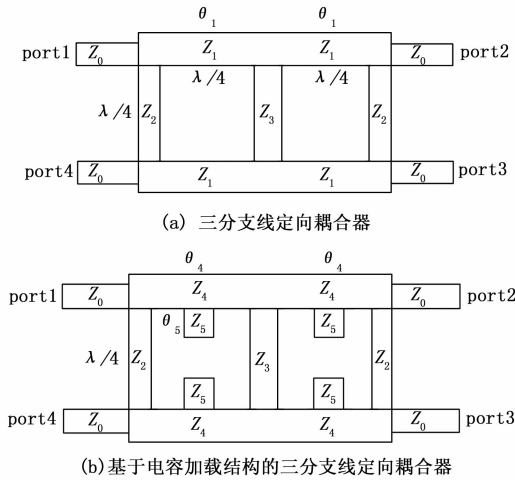


图 5

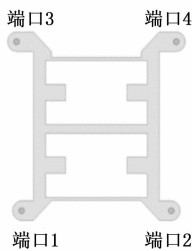


图 6 三分支线耦合器模型

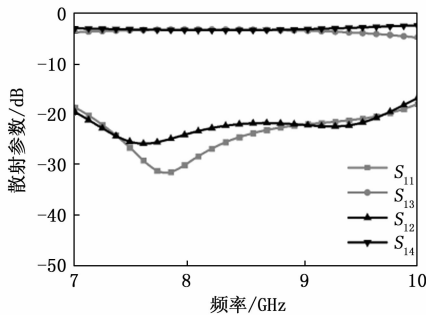


图 7 耦合器散射参数仿真结果

## 2 天线单元设计

### 2.1 天线单元结构

采用三分支线定向耦合器给层叠微带辐射天线进行激励, 将天线单元放置在金属腔体内, 即可以屏蔽外界环境对天线单元电性能的影响, 还可以展宽天线单元辐射方向图波束宽度。图 8 给出了天线单元结构, 印制板相对介电常数为 3.0, 利用特性阻抗为 50 Ω 的 SMP 接头给天线单元馈电, 天线尺寸为 20.0 mm × 20.0 mm × 9.4 mm。

如图 8 (a) 所示, 所设计天线共包含三层介质板, 为清楚看到不同层的结构, 将金属腔体进行了隐藏。第一层介质板下方印制有切角的寄生辐射贴片, 第二层介质板上

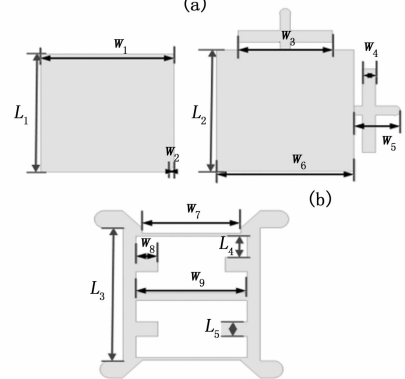
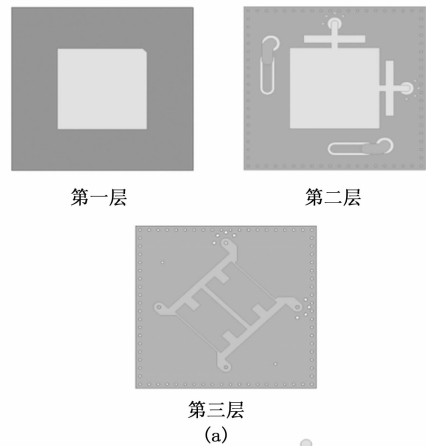


图 8 天线单元结构图

方为直接激励的辐射贴片, 第一层介质板与第二层介质板之间填充为空气介质, 下方为开有馈电孔的金属底板, 第三层介质板底部印有电桥。第三层的地板通过金属通孔与第二层底板进行互联。表 1 给出了对应图 8 (b) 的具体参数表。

表 1 线结构参数

参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm
$L_1$	9.92	$L_2$	10.2	$L_3$	9.60	$L_4$	1.50
$L_5$	1.05	$W_1$	9.92	$W_2$	0.50	$W_3$	6.80
$W_4$	0.95	$W_5$	3.50	$W_6$	9.90	$W_7$	6.30
$W_8$	1.40	$W_9$	7.10				

### 2.2 天线仿真与测试结果分析

#### 2.2.1 散射参数

散射参数为无源器件最重要的参数之一, 反射系数可以用来表征天线端口的阻抗匹配情况, 电压传输系数用来表征不同端口间的能量耦合情况<sup>[24]</sup>。图 9 给出了所设计天线单元仿真与测试的散射参数结果。

由图 9 可得, 所设计天线的反射系数在 7.0~9.3 GHz 频段内均 ≤ -10 dB, 这说明天线端口的阻抗匹配情况良好; 在 7.7~8.9 GHz 频段内端口间的电压传输系数在通带频段内均 ≤ -15 dB, 说明端口间耦合能量较小, 对于双极化天线而言就是不同极化间的隔离度较高即交叉极化值高。

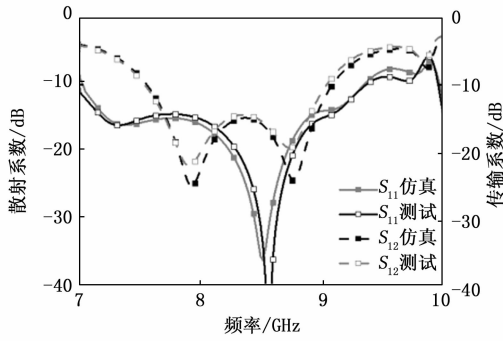


图 9 天线单元散射参数结果

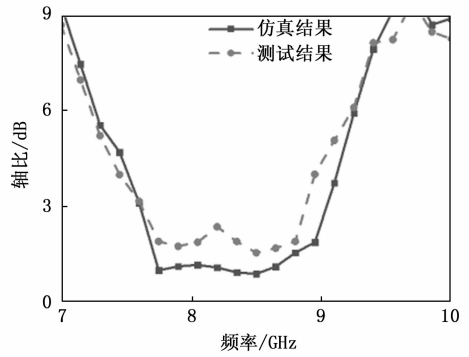


图 11 天线轴比结果图

2.2.2 增益仿真与测试结果

天线增益定义为在输入功率相同的条件下,空间某点的辐射功率谱密度与理想点源在该点产生的功率谱密度之比。用来衡量天线辐射能量的集中程度,可同时表征天线的方向性系数和辐射效率。图 10 给出了所设计天线的增益值随频率的变化曲线。

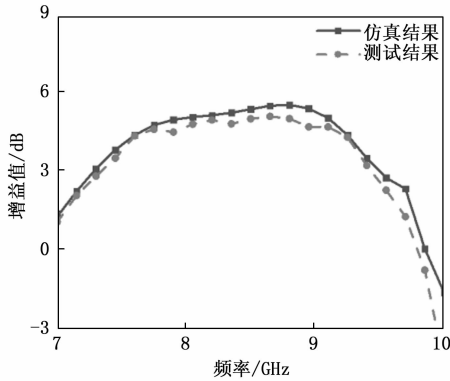


图 10 天线增益结果图

由图 10 可得,天线增益值在 7.7~8.9 GHz 均  $\geq 4.0$  dB,且随着频率的升高增益值逐渐增大,这是由于随频率的升高,相同体积的天线对应的等效面积会变大。

2.2.3 轴比仿真与测试结果

电场矢量末端随时间的变化轨迹为圆形称为圆极化电磁波,轴比是用来衡量圆极化电磁波至关重要的参数,图 11 给出了天线轴比随频率的变化曲线。

通常将轴比不大于 3 dB 的带宽定义为天线的圆极化轴比带宽。由图 11 可知,所设计天线单元在 7.7~8.9 GHz 轴比均  $\leq 3$  dB。

2.2.4 辐射方向图仿真与测试结果

天线辐射方向图可以直接表征天线辐射能量特性与空间坐标系之间的关系。由于端口 1 与端口 2 分别代表左旋圆极化与右旋圆极化,为避免冗余,图 12 仅给出了天线单元端口 1 馈电左旋圆极化的辐射方向图。

由图可知,天线单元辐射方向图性能稳定,测试结果与仿真结果吻合度良好。表 2 将所设计天线与近年相似研究成果进行了对比,可得所设计天线在结构和性能上具备

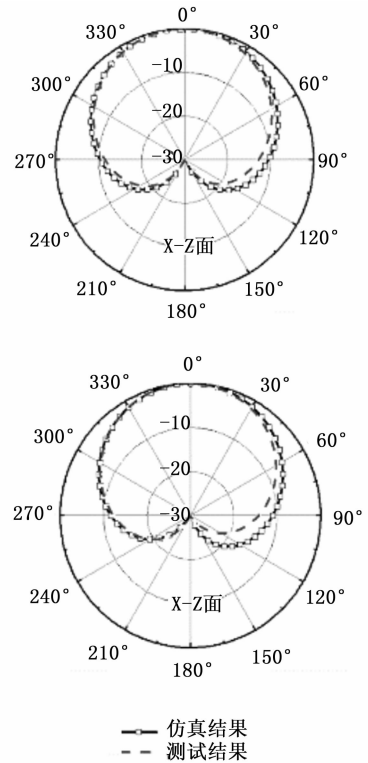


图 12 天线方向图结果图

先进性。注所得测试结果均为阵中单元所测。

表 2 本文所设计天线与先前报道天线对比表

文献	尺寸/ $\lambda_0^2$	极化类型	阻抗带宽/%	轴比带宽/%	峰值增益/dB
[30]	1.06 * 1.06	圆极化	23.0	18.9	10.2
[31]	1.01 * 0.8	圆极化	19.6	18.0	9.2
[32]	1.02 * 1.02	圆极化	4.5	5.3	8.3
[33]	0.65 * 0.65	线极化/圆极化	27.0	—	3.05( $\pm 25^\circ$ )
[34]	0.6 * 0.6	圆极化	16.0	—	8.5
本文设计天线	0.54 * 0.54	双圆极化	28.2	14.5	5.6

注:所得测试结果均为阵中单元所测。

### 3 阵列天线设计

#### 3.1 阵列天线结构

基于上述天线单元进行平移组阵,得到 $4 \times 4$ 天线阵列,天线单元平铺在金属腔体内,不同单元间通过金属隔断进行隔离以减小单元间的耦合,天线阵列总体尺寸为 $80.0 \text{ mm} \times 80.0 \text{ mm} \times 9.4 \text{ mm}$ ,图13给出了所设计阵列天线的结构及实物模型图。

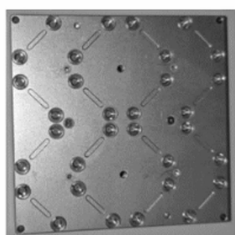
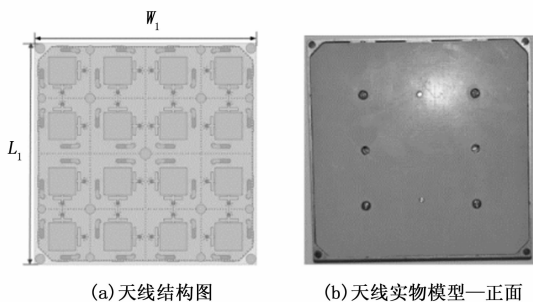


图13 天线阵列结构图

如图13所示,天线正面为介质基板下方印制有16个寄生辐射贴片,背面为32个SMP接头,分别对应16个左旋圆极化与16个右旋圆极化。

#### 3.2 阵列天线仿真与测试结果分析

##### 3.2.1 增益仿真与测试结果

采用十六路合成器对天线子阵的增益值进行了合成,图14给出了子阵的仿真与测试的增益值曲线。

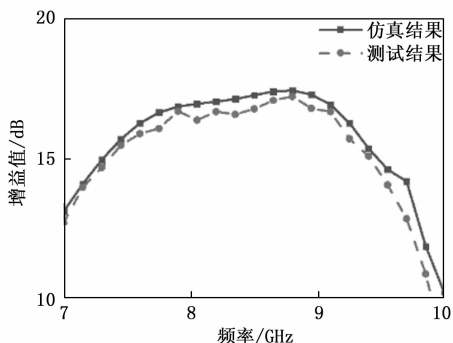


图14 天线阵列增益值结果

由图14可得,天线子阵的仿真结果普遍较测试结果数值较大,这是由于仿真结果为理想电磁环境下得出,而测

试结果受环境、介质基板属性等影响。增益值在7.7~8.9 GHz频段内普遍大于15.7 dB。

##### 3.2.2 辐射方向图仿真与测试结果

图15给出了所设计天线子阵仿真与测试的结果。

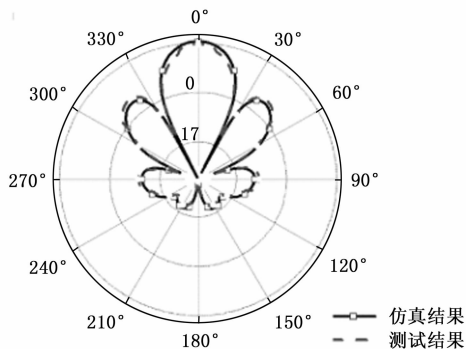


图15 天线阵列方向图

由图15可得,子阵仿真与测试的方向图吻合度良好,测试结果较仿真结果增益值略小,这是由于测试误差以及加工误差等原因导致。

### 4 结束语

经加工天线模型并测试,得所设计天线阻抗带宽为7.7~8.9 GHz,轴比带宽覆盖7.7~8.9 GHz,在通带内增益值较为稳定且方向图形状规范。验证了加载寄生贴片与空气腔增加工作带宽方案和3 dB宽带电桥实现双圆极化馈电的可行性。为X频段数传相控阵前端阵列天线的设计提供了可行性设计方案。

#### 参考文献:

- [1] EMADEDDIN A, SALARI M A, ZOGHI M, et al. A compact ultra-wideband multibeam antenna system [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 66 (1): 125-131.
- [2] NADEEM I, ALIBAKHSHIKENARI M, BABAEIAN F, et al. A comprehensive survey on 'circular polarized antennas' for existing and emerging wireless communication technologies [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 55 (3): 33002-33008.
- [3] WONG K L, HUANG C C, CHEN W S. Printed ring slot antenna for circular polarization [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50 (1): 75-77.
- [4] YOUSEF B M, AMEEN A M, ALANAZI M D, et al. A wide-band antenna with circular polarization utilizing a u-shaped radiator and parasitic strip for wireless communications [J]. Micromachines, 2023, 14 (7): 1308.
- [5] 薛玲珑, 方文婷, 许娟, 等. 一种中心馈电圆极化天线设计 [J]. 无线电工程, 2021, 51 (4): 308-312.
- [6] WANG W, YANG S, FANG Z, et al. Compact dual-polarized wideband antenna with dual-/single-band shifting for microbase

- station applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69 (11): 7323–7332.
- [7] NIKOLAOU S, ABBASI A B. Design and development of a compact UWB monopole antenna with easily-controllable return loss [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65 (4): 2063–2067.
- [8] ZHANG H, LI M, YANG F, et al. A low-profile compact dual-band L-shape monopole antenna for microwave thorax monitoring [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19 (3): 448–452.
- [9] LIANG J C, CHIU C N, LIN T C, et al. An ultrawideband circularly-polarized vivaldi antenna with high gain [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 100446–100455.
- [10] WU B, SUN X Y, ZU H R, et al. Transparent ultrawideband halved coplanar vivaldi antenna with metal mesh film [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21 (12): 2532–2536.
- [11] 王军会. 超宽带天线及其阵列的若干技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [12] SRIVASTAVA G, MOHAN A. Compact MIMO slot antenna for UWB applications [J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2015, 15 (4): 1057–1060.
- [13] WEI K, LI J Y, WANG L, et al. A new technique to design circularly polarized microstrip antenna by fractal defected ground structure [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65 (7): 3721–3725.
- [14] BANCROFT R. Microstrip antenna efficiency and surface wave loss [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69 (8): 5032–5035.
- [15] DESHMUKA A A, CHAVALIP A V. Compact wideband microstrip antennas using C, H, and W-shape ground plane for GSM band applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2023, 65 (12): 3235–3241.
- [16] SAI R, SAININAD N, MARIA P. Stably polarized wideband circular microstrip antenna excited in TM<sub>12</sub> mode [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69 (4): 2370–2375.
- [17] 荣志鹏, 李丽娴, 邵晓龙, 等. 宽频带低剖面微波天线应用 [J]. *无线电工程*, 2020, 50 (2): 158–161.
- [18] 尹杰茜. 毫米波无线通信宽带天线与阵列 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [19] JIA Y, XI L, LIN Y. A novel design of CPW feed planar omnidirectional circularly polarized antenna [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 1: 5966–5972.
- [20] 曹振华, 刘雯雯, 张秀平. 一种宽频带方形槽圆极化天线设计 [J]. *微波学报*, 2023, 39 (4): 18–22.
- [21] CHENG Y, DONG Y. Wideband circularly polarized planar antenna array for 5G millimeter-wave applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 69 (5): 2615–2627.
- [22] YEAP S B, CHEN Z N, QING X. Gain-enhanced 60 GHz LTCC antenna array with open air cavities [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59 (9): 3470–3473.
- [23] BUESA-ZUBIRIA A, ESTEBAN J. Design of broadband doubly asymmetrical branch-line directional couplers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 68 (4): 1439–1451.
- [24] 王培章, 晋 军. 现代微波与天线测量技术 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- [25] 付云起, 张光甫, 莫锦军, 等. 天线理论与工程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [26] XU J S, JIAN Y C, YONG F. Planar ultra-wideband and wide-scanning dual-polarized phased array with integrated coupled-marchand balun for high polarization isolation and low cross-polarization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69 (11): 7134–7144.
- [27] 吴思凡, 李建星, 曹元熙, 等. 一种 Ka 波段高增益磁电偶极子滤波阵列天线设计 [J]. *无线电工程*, 2023, 53 (8): 1752–1759.
- [28] PATNAIK M K, BASAVARAJAPPA G. A configuration to double the gain of pyramidal horn antenna using single layer frequency selective surface [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2023, 18 (1): 35–42.
- [29] TAKAKURA H, SEKIMOTO Y, INATNAI J, et al. Far-side lobe antenna pattern measurement of LiteBIRD low frequency telescope in 1/4 scale [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9 (6): 598–605.
- [30] WANG L, EN Y F. A wideband circularly polarized microstrip antenna with multiple modes [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2020, 1: 413–418.
- [31] WANG L, FANG L, ZHANG X, et al. A compact broadband circularly polarized stacked microstrip antenna with parasitic elements [J]. *Radio Science*, 2022, 57 (6): 1–8.
- [32] YANG W, Pan Y M, ZHANG X Y. A single-layer low-profile circularly polarized filtering patch antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [J]. 2021, 20 (4): 602–606.
- [33] LI W, WANG Y M, HEI Y, et al. A compact low-profile reconfigurable metasurface antenna with polarization and pattern diversities [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20 (7): 1170–1174.
- [34] SAHANA C, JAYAKUMAR M, KUMAR V S. High performance dual circularly polarized microstrip patch antenna for satellite communication [C] // Bangalore: 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2018: 1608–1611.