

# Ka频段超宽带双圆极化低剖面相控阵天线

张文杰, 李航, 高峰, 郭萌, 董妮妮, 田烨, 陈璐

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

Email: wenjie103@163.com

收稿日期: 2020年7月18日; 录用日期: 2020年7月29日; 发布日期: 2020年8月5日

## 摘要

随着近年低轨卫星星座的兴起, 相控阵天线受到广泛关注。在此背景下本文设计了一种工作于Ka频段的相控阵天线, 其阵元采用微带天线的形式。与传统超宽带阵元多采用振子天线的方法相比, 本设计采用常见的微带天线, 具有加工简单、低剖面易集成、双极化等显著优点。通过测试可知: 该天线驻波小于2的带宽为43%, 辐射效率大于85%的带宽为43%, 具有较好的阻抗特性和辐射特性, 本工作具有一定的创新性和工程实践意义。

## 关键词

相控阵天线, 超宽带, 双圆极化, 低剖面, 阵列综合

# Ka-Band UWB Dual Circularly Polarized Phased Array Antenna with Low Profile

Wenjie Zhang, Hang Li, Feng Gao, Meng Guo, Nini Dong, Ye Tian, Lu Chen

Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Co., Ltd, Xi'an Shaanxi

Email: wenjie103@163.com

Received: Jul. 18<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 29<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 5<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

With the rise of LEO Satellite Constellation in recent years, phased array antenna has attracted much attention. In this paper, a Ka-band phased array antenna is designed. The array element uses the form of micro-strip antenna. The antenna has the characteristics of ultra-wideband, dual circular polarization, low-profile and high radiation efficiency. Compared with the traditional ultra-wideband array element which mostly uses the dipole antenna, the micro-strip antenna is used in this design. It has the advantages of simple processing, easy integration of low profile. Ac-

According to the test, the bandwidth with the VSWR less than 2 is 46% and the bandwidth with radiation efficiency greater than 85% is 43%. So, this work has innovation and meaning for engineering practice.

## Keywords

Phased Array Antenna, Ultra-Wideband, Dual Circular Polarization, Low-Profile, Array Synthesis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

相控阵天线由于具有扫描速度快、波束赋形及多波束等特点,在军民领域受到广泛地关注。特别是近年来低轨卫星通信(LEO)在全球范围的兴起,相控阵天线在该领域的应用受到人们的重视。相比传统的静地轨道卫星通信系统,低轨系统在技术上有其优势:一般工作在Ka等高频段,可进行大容量、高通量的宽带通信,具有传输延时短、传输损耗小、卫星移动速度快、星座通信容量高、系统可靠性高等特点[1]。并在全球天基网络、卫星物联网链接、偏远区域网络通信等领域有广阔的应用前景。下表1是各国推出的低轨星座卫星通信系统。基于以上背景,相控阵天线终端受到学术界和工业界越来越多的关注,尤其是对低成本、高集成度、低剖面及极化复用等技术提出新的需求。

Table 1. LEO satellite constellation plans

表 1. 各国低轨星座计划

星座名称	公司	频率	国家
第一代铱星	摩托罗拉	Ka\L	美国
Iridium Next	铱星公司	Ka\L	美国
Starlink	SpaceX	Ka\Ku	美国
Oneweb	Oneweb	Ka\Ku	英国
Telesat	Telesat	Ka	加拿大
鸿雁	航天科技	Ka\VL	中国
虹云	航天科工	Ka\VL\S\C	中国

国内外对相控阵天线技术已经展开了很多工作,包括了对系统的研究、单元天线的研究、有源器件及工艺生产等研究。文献[2]对毫米波有源相控阵天线技术的特点、应用场合、技术发展趋势及技术难点做了系统性的论述。文献[3]提出了一种高集成度有源相控阵天线,阵列天线和集成电路分别装配于多层微波电路板两侧,该方法避免了大量连接器的使用。但是作为辐射单元采用了金属结构件,这样将带来生产成本和重量的增加。有学者也开展了天线单元的宽带化工作[4] [5] [6],文献[4]通过临近耦合和在贴片表面加微扰结构的方式实现了天线的宽带化,带宽达 63.5%,高度 41 mm,工作方式为圆极化。文献[5]中通过使用多模滤波器概念的方法将 L 形枝节加载于对称振子上,使带宽达到 25.6%,高度 36 mm,工作方式为双线极化。这几种方式都采用了振子作为单元,使得天线高度较高不利于在对剖面高度有要

求的场合使用。通过紧耦合来实现超宽带阵列天线也已经被学者和工程人员进行了广泛地研究[7][8]。文献[7]通过印刷偶极子天线间的紧耦合实现了超宽带的天线阵列,带宽达 137%,高度 63 mm,工作方式 为线极化。紧耦合的方式一般采用振子天线,该方法也有剖面较高、结构复杂、不易装配等缺点。超 表面结构的提出为天线工程提出了新的发展方向,特别是在高增益、宽带、小型化等方面已经有许多成 功的案例[9][10][11]。文献[9]采用超表面技术实现了三种带宽达 26%~29%,高度只有  $0.06\lambda$  的宽带低剖 面高增益天线。文献[10]中采用超表面技术实现了具有 28%的阻抗带宽和高为  $0.06\lambda$  的圆极化天线。该种 方法具有结构复杂等缺点,不利于天线单元和 TR 组件或者芯片进行互联。

本文基于低轨星座的应用背景下,围绕天线应具有高性能、结构简单、低剖面、低成本、易集成及 装配便利性等要求出发,设计了一款应用于地面终端的 Ka 频段相控阵天线。该天线具有超宽带、双圆极 化、低剖面及结构简单等属性。具体方法是通过微波 PCB 多层板及盲埋孔等工艺手段,利用耦合馈电方 式实现了超宽带特性;通过金属化通孔将辐射单元和多层板底部的硅基 COMS 多功能芯片进行互联,实 现了低剖面的一体化设计。天线频段覆盖了中星 16 和中星 18 的接收工作频段。该 Ka 相控阵天线可应用 于各类低剖面载体平台使用。

## 2. 分支线混合网络

本次设计使用了比较常见的分支线混合网络作为天线单元的馈电网络,网络的两个输入端口作为右 旋圆极化和左旋圆极化的输入端口。该网络相比其它双端口输入功分器的优点是结构简单且易于加工。 其各个端口都是匹配的,且输出端口间可实现等功率分配和  $90^\circ$  的相移量[11]。通常在设计圆极化天线时 要用到功分移相网络,常用的比如 T 型结功分器、Wilkinson 功分器、耦合线定向耦合器及波导魔 T 等。 其中 T 型结功分器不需要焊接电阻在设计时有一定的便利性,但是也存在不是所有端口匹配的问题。 Wilkinson 功分器和耦合线定向耦合器在使用时都需要焊接电阻,显然这样会使得设计和电装等变得复杂, 但是优点是各端口是匹配的。每一种功分网络都有其优缺点,在设计时应根据具体使用场景来做出选择。

图 1 为分支线混合网络的电路结构示意图,当 Port1 作为输入时能量从 Port2 和 Port3 平均分配输出 并且两端口有  $90^\circ$  的相位差,Port4 作为隔离端口没有能量输出。该结构具有镜像对称性,每个端口都是 匹配的,和输入端同侧的为隔离端口,输出的两个端口在中心线的另外一侧。网络中间部分的左右带线和 上下带线对应的两种电长度都为  $\lambda_g/4$ ,且特性阻抗分别为  $Z_0$  和  $Z_0/\sqrt{2}$ 。

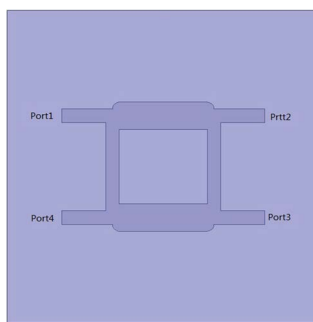
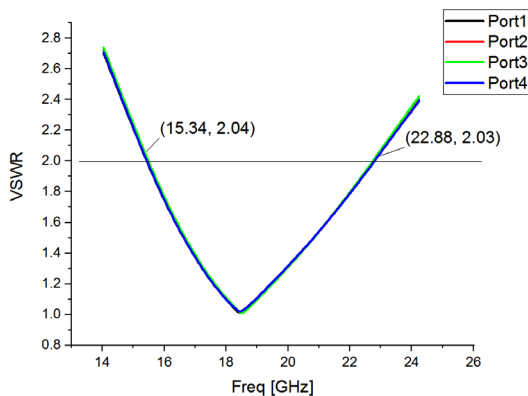


Figure 1. The graph of branch-line hybrid network

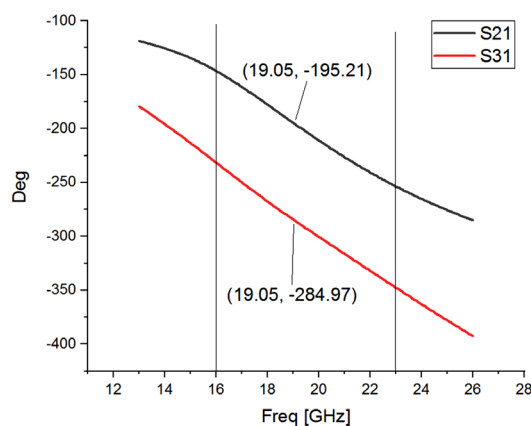
图 1. 分支线混合网络示意图

下图 2~4 分别为正交网络电压驻波比仿真曲线、相位一致性仿真曲线和传输系数仿真曲线。分别验 证了正交网络的输入端口的驻波、两个输出端口间的相位一致性(理论上两个输出端口的相位差应为  $90^\circ$ ) 及两个输出端口间的等功分特性(理论上输出端口的传输系数应为  $-3$  dB)。从仿真结果来看,该正交网络 有较好的驻波特性、相位特性及传输特性,为后续一体化天线的设计打好了基础。

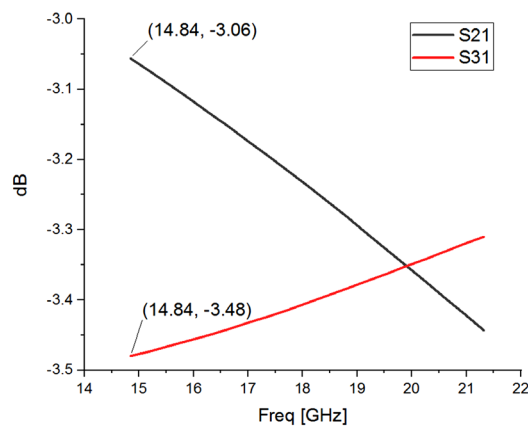
从图 2~4 及表 2 可以看出：其电压驻波比相对带宽(FBW)达 39%，绝对带宽(BW)达 7.54 GHz，相位一致性(90°相差)相对带宽约为 36%，等功分(3 dB)传输系数相对带宽约为 27%。从以上数据可以看出：该网络在频带内具有良好的宽带特性，相位一致性及等功分传输特性。



**Figure 2.** The VSWR simulation result of branch-line hybrid network  
**图 2.** 分支线混合网络电压驻波比仿真结果



**Figure 3.** The phase simulation result of branch-line hybrid network  
**图 3.** 分支线混合网络相位仿真结果



**Figure 4.** The transmission coefficient simulation result of the network  
**图 4.** 分支线混合网络传输系数仿真结果

**Table 2.** The results of the network  
**表 2.** 分支线混合网络仿真数据汇总

	Freq (GHz)	BW (GHz)	FBW (%)
电压驻波比	15.34~22.88	7.54	39
相位一致性	16.00~23.00	7.00	36
传输系数	16.00~21.00	5.00	27

### 3. 单元天线的设计

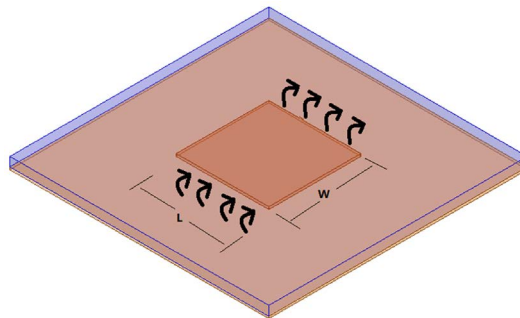
微带天线由于具有剖面低、重量轻、成本低及易于批量生产等特点备广泛地应用于通信领域。微带天线实现圆极化的方法一般是给辐射贴片激励两个等幅度、相位相差 90° 的激励模，一般由各种不同形式的馈电网络来提供这样的激励分布，本设计使用了正交网络作为天线的馈电网络并实现了左右旋的双圆极化。对于微带天线的宽带实现，一般的方法有多枝节法、多路开槽法、宽带陷波法及寄生耦合法等，本次设计使用了寄生耦合方法实现天线的超宽带特性[12] [13]。

图 5 为微带天线的辐射原理图，该微带天线可等效为相距  $W$ ，长度为  $L$  的两个同相激励的缝隙天线。对于矩形微带天线可以借助矢量位法、并矢格林函数法、腔体模型法等对其进行分析。假设天线的介质基板的厚度为  $h$ ，介电常数为  $\epsilon_r$  天线的工作频率为  $f$ ， $c$  表示光速，则矩形微带天线的宽( $W$ )和长( $L$ )可用以下公式(1)表示：

$$W = \frac{c}{2f} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}}, L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \tag{1}$$

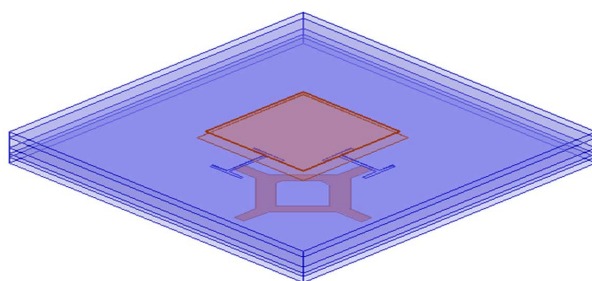
公式(1)中的  $\epsilon_e$  和  $\Delta l$  分别表示等效介电常数和线伸长量，可由公式(2)计算得到：

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}, \frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \tag{2}$$



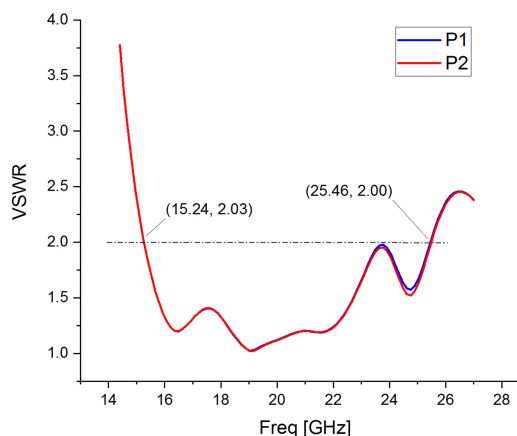
**Figure 5.** The radiation principle of micro-strip antenna  
**图 5.** 微带天线辐射原理图

本次设计使用了矩形微带天线，并使用正交(90°)混合网络对微带贴片进行馈电，通过 H 缝隙对两层寄生耦合贴片实现超宽带的特性。为了简化设计和方便后续对阵列的组装等考虑，本次的微带天线贴片采用的是正方形贴片。使用的PCB介质板材料为罗杰斯高频层压板材 RT/duroid 6006 和陶瓷 PTFE 粘结片 RO3006，各层板通过多层压合、盲埋孔及表面沉金等工艺实现了一款 Ka 频段超宽带双圆极化低剖面天线，图 6 为该天线模型的示意图。天线的工作频段为 18~20 GHz，驻波比要求小于 2，并具有左右旋圆极化功能。

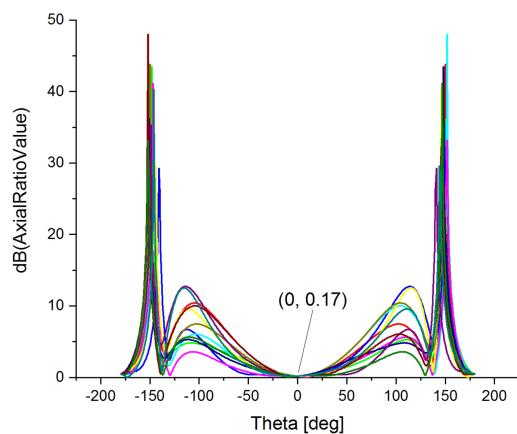


**Figure 6.** The graph of micro-strip antenna model  
**图 6.** 微带天线模型示意图

从图 6 中可以看出，天线的输入端口有两个，分别为左旋圆极化和右旋圆极化。当能量从任意一个端口输入时，通过分支线混合网络后被分成两路幅度值相等相位相差  $90^\circ$  的信号，从而实现了双圆极化的特性。两个端口分别接入后端 TR 组件的射频通道中，实现每个端口独立的幅相控制。由于微带天线具有低剖面的特性并且在设计时选择了较薄的板材，天线的整体厚度小于  $1.6\text{ mm}$ 。通过调节寄生贴片的大小及该贴片与直馈贴片之间的距离可实现天线的超宽带、较好的极化等特性。下图 7~9 分别为单元天线的驻波仿真曲线图、轴比仿真曲线图、实际增益仿真曲线图。



**Figure 7.** The VSWR of antenna  
**图 7.** 天线驻波



**Figure 8.** The AR of antenna  
**图 8.** 天线轴比

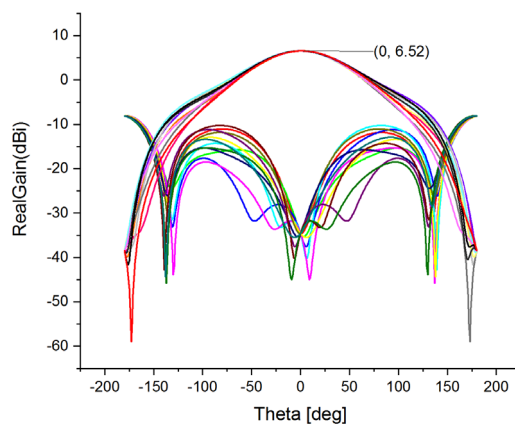


Figure 9. The real gain of antenna

图 9. 天线增益值

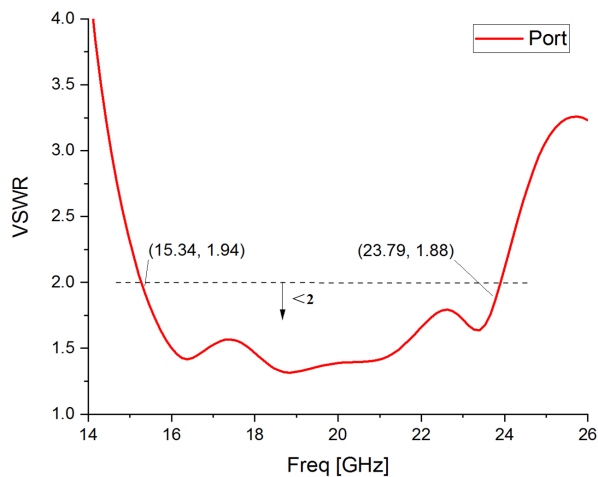
从图 7 可以看出该天线驻波的绝对带宽为 10.22 GHz，相对带宽为 50%，具有优异的超宽带特性。图 8 为该天线中心频点的轴比，法向轴比值为 0.174 dB，具有很好的极化隔离性能。图 9 为该天线中心频点的实际增益值，法向最大值为 6.52d Bi，且主极化和交叉极化的隔离性较好。从以上数据可以看出该天线具有优异的超宽带特性、圆极化性能及方向性。阵元的电气性能会对阵列天线方向图的合成产生影响，从以上各图仿真结果可以看出阵元具有良好的电气特性，这为后续阵列天线的设计起到了关键的作用。较宽的工作带宽可以提高系统的适应性，可以满足更多的业务需求；轴比性能的提高，可以提高收发天线的隔离度防止通信时的干扰；微带天线成熟的加工工艺方便大规模地批量化生成，起到节约生产成本的目的，为后续低成本相控阵天线提供了支撑。



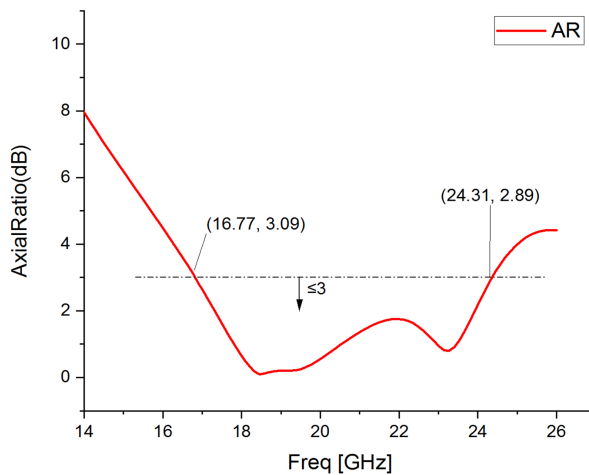
Figure 10. The picture of antenna

图 10. 微带天线实物图

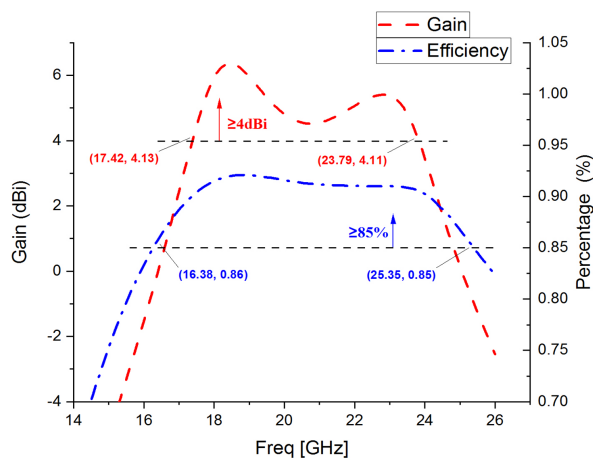
图 10 为该天线的实物图，该天线由正交混合馈电网络和辐射贴片组成，采用了多层压合等加工工艺，具有超宽带、双圆极化及低剖面等特性。由天线辐射效率的定义可知，在天线的导体损耗和介质损耗减小的情况下，天线的辐射功率会提高进而提升天线的辐射效率。为了降低该天线在高频段的导体损耗和介质损耗本次设计选用了罗杰斯(ROGERS)高频板材。使用压延铜箔作为辐射贴片并对其进行表面沉金处理，且板材本身具有较小的损耗角正切参数。该一体化天线单元的最终厚度小于 1.6 mm，具有优异的低剖面特性，非常易于和 TR 组件或者多功能射频芯片集成。适合对高度有严格要求的机载、车载动中通等场景使用。下图 11~13 分别为对单元天线的驻波、轴比、增益以及天线辐射效率的实测结果曲线。



**Figure 11.** The VSWR measurement result of the antenna  
**图 11.** 电压驻波比实测曲线



**Figure 12.** The AR measurement result of the antenna  
**图 12.** 轴比实测曲线



**Figure 13.** The gain and efficiency measurement results  
**图 13.** 增益和辐射效率实测曲线



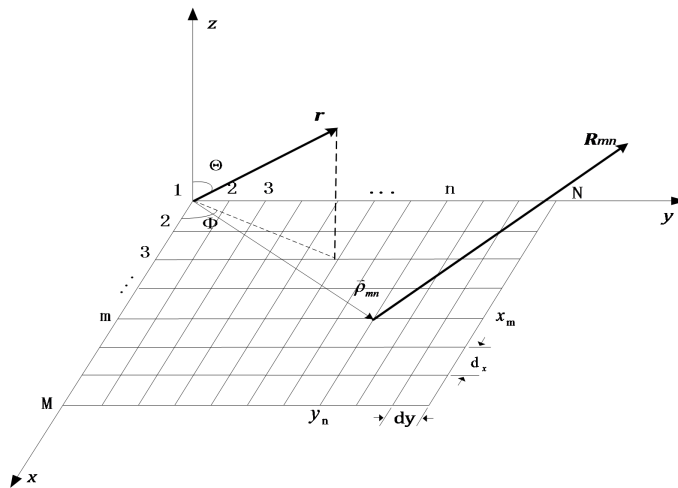
**Table 3.** The test results of the antenna element  
**表 3.** 单元天线测试结果

	Freq (GHz)	BW (GHz)	FBW (%)
驻波	15.34~23.79	8.45	43
轴比	16.77~24.31	7.54	37
增益	17.42~23.79	6.37	31
效率	16.38~25.35	8.97	43

从图 11~13 及表 3 可以看出该天线的驻波绝对带宽为 8.45 GHz，相对带宽为 43%；轴比绝对带宽为 7.54 GHz，相对带宽为 37%；增益绝对带宽为 6.37 GHz，相对带宽为 31%；辐射效率在 85%以上的绝对带宽为 8.97 GHz，相对带宽为 43%。从以上数据可知，该天线各项指标的相对带宽都在 30%以上，是一款具有优异辐射特性的高性能天线。其频带完全覆盖了 Ka 频段动中通接收频段，作为卫星通信地面终端来说具有较好的应用前景。

### 4. 阵列天线的设计

LEO 卫星相比 GEO 卫星的飞行速度更快数量更多，所以地面终端应具备对卫星快速跟踪、波束切换及波形调整等功能，相控阵天线相比传统机械扫描天线具有极大的优势。相控阵天线通过改变天线单元连接的 TR 组件射频通道中移相器的相位来实现阵列波束的扫描，一般采用矩形栅格布阵、三角形栅格布阵或同心圆环栅格布阵等[14][15][16][17]。在本次设计中为了简化设计和后期组装采用了矩形栅格布阵。设有一如图 14 所示的 MxN 排布的矩形平面阵，阵面所在平面为 OXY 面，行间距为  $d_x$  列间距为  $d_y$  且  $d_x = d_y$ 。



**Figure 14.** The graph of rectangular array antenna  
**图 14.** 矩形栅格排布的平面阵列

则阵因子可由公式(3)表示为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} e^{jk(md_x \cos \varphi + nd_y \sin \varphi) \sin \theta} \tag{3}$$

当各个单元的电流分布为可分离型分布时，阵因子可由公式(4)表示为:

$$F(\theta, \varphi) = F_x(\theta, \varphi) \cdot F_y(\theta, \varphi) \tag{4}$$

$$F(\theta, \varphi) = \begin{cases} F_x(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M I_{xm} e^{jm(kd_x \cos \varphi \sin \theta - \alpha_x)} \\ F_y(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N I_{yn} e^{jn(kd_y \sin \varphi \sin \theta - \alpha_y)} \end{cases} \quad (5)$$

其中的  $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  表示沿 x 和 y 方向的递变相位，当最大值指向为  $(\theta_0, \alpha_0)$  时， $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  为：

$$\begin{cases} \alpha_x = kd_x \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \\ \alpha_y = kd_y \sin \varphi_0 \sin \theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

同时，使栅瓣不在实空间出现的条件为：

$$d_x, d_y < \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}} \quad (7)$$

因为天线工作在 Ka 的高频段，所以馈电网络部分和辐射天线部分已经不允许使用焊接的方式进行连接装配，相应地应该使用多层板层压技术来实现一体化的天线设计。本次设计中天线板材选用了罗杰斯高频层压板材 RT/duroid 6006 和陶瓷 PTFE 粘结片 RO3006，两种板材从底部开始依次层压加工，且两种板材的相对介电常数( $\epsilon_r$ )都为 6.15。这样选择的好处有两个方面的考虑：首先板材间介电常数值相同可以有效避免因为介电常数突变带来的场分量的不连续；其次选用硬质的陶瓷板材可以有效地提高最终整阵的平整度，从而在整阵装配时提高天线阵面和组件面的贴合度。从 Bottom 层开始到 Top 为止，板材厚度依次为：0.25 mm, 0.13 mm, 0.25 mm, 0.64 mm, 0.25 mm，图 15 为天线阵列的实物图。在进行测试时，天线阵通过测试工装板对接到射频控制板上进行测试。

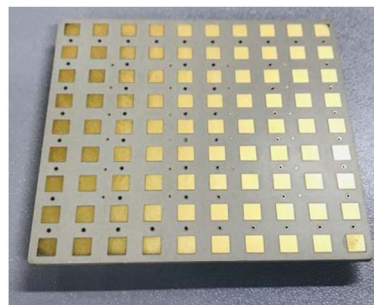
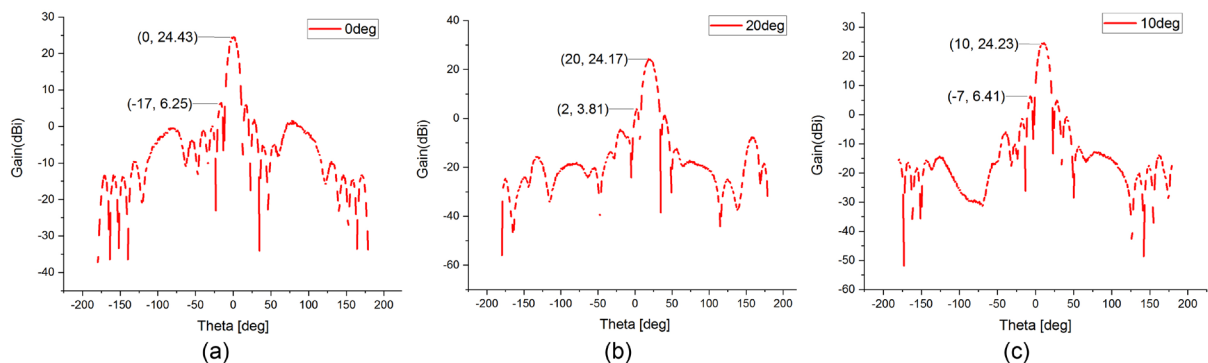
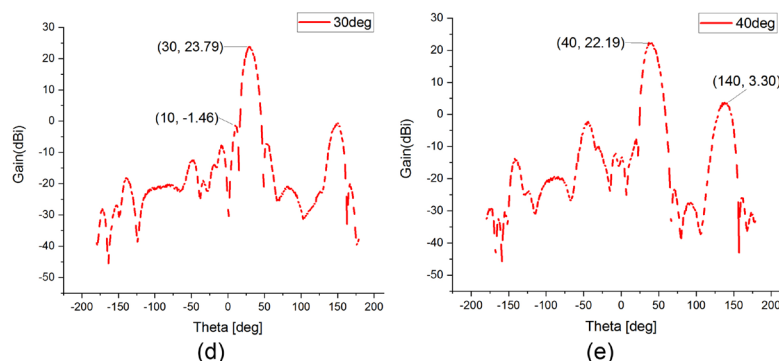


Figure 15. The picture of array antenna  
图 15. 阵列天线实物图

图 16 所示分别为阵列天线的方向图测试曲线，波束扫描角分别为  $0^\circ$ ， $10^\circ$ ， $20^\circ$ ， $30^\circ$ ， $40^\circ$  的情况。从仿真结果可知，该阵列天线具有良好的旁瓣抑制能力和极化隔离能力。





**Figure 16.** The gain and AR measurement results. (a) The scan angle at 0°; (b) The scan angle at 10°; (c) The scan angle at 20°; (d) The scan angle at 30°; (e) The scan angle at 40°

**图 16.** 方向图扫描实测值。(a) 扫描角 0°; (b) 扫描角 10°; (c) 扫描角 20°; (d) 扫描角 30°; (e) 扫描角 40°

**Table 4.** The results of the gain and AR of the antenna array

**表 4.** 阵列天线增益和轴比测试结果

	Gain (dBi)	AR (dB)	SLL (dB)
0°	24.43	0.59	-18.18
10°	24.23	1.32	-17.82
20°	24.17	1.78	-20.36
30°	23.79	1.75	-25.25
40°	22.19	2.65	-18.89

副瓣的抑制能力是阵列天线中的一项重要指标，通过阵列综合法对阵列进行综合得到各个阵元的激励锥分布，对各阵元幅度的加权可有效地提高阵列天线的副瓣抑制能力。从图 16 和表 4 可以看出，天线在各个扫描角情况下其 SLL 均小于 -17 dB 有较好的旁瓣抑制能力。在卫通领域中收发天线一般使用不同的极化方式，提高阵列天线的轴比可以通过对阵元进行空间圆极化的排布，可以有效地提高阵列天线在扫描时的极化抑制能力。从图 16 和表 4 可以看出，随着扫描角度的变大其轴比值变大，但是 AR 均小于 2.7 dB 具有较好的极化抑制能力。从以上的数据可以看出，该阵列模块具有较好的辐射性能，为下一步进行大规模组阵建立了基础。

### 5. 结论

本文设计了一种于 Ka 频段的相控阵天线，通过仿真分析和实际测试表明该天线具有良好的电特性。具体方法是将馈电网络和辐射贴片通过多层 PCB 板进行整体设计，采用耦合馈电的方式实现了宽带展宽，且具有双圆极化和低剖面的特性。相比于其他天线形式，本设计中微带的形式具有易加工、易集成等优点。作为天线系统可以应用于车载、船载、机载等平台，对今后相控阵天线的研制具有一定的工程实践意义。后续工作可以从简化工艺复杂度、降低产品成本、方便电装及易测试性等方面展开。

### 基金项目

装发共用技术预研项目：31504610301。

### 参考文献

[1] William A. Imbriale, Steven Gao, Luigi Boccia. 空间天线手册[M]. 胡明春, 王建明, 金林, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2018.

- [2] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. 微波学报, 2018, 34(1): 1-5.
- [3] 肖昌怡, 张波, 刘港, 王延. 高集成度有源相控阵天线[J]. 微波学报, 2018, 34(4): 1-5.
- [4] 严冬, 杜培勋, 王平, 陈俊宇, 董腾. 2.4 GHz 宽带圆极化微带天线的研究与实现[J]. 电波科学学报, 2019, 34(3): 380-389.
- [5] 褚庆昕, 罗宇, 郑东泽, 吴锐. 基于多模滤波器概念的宽带天线设计[J]. 电波科学学报, 2018, 33(4): 373-379.
- [6] 蔺炜, 黄衡. 宽带极化与方向图可重构天线研究[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 293-300.
- [7] 陈常青, 周志鹏, 张金平. 一种基于紧耦合结构的超宽带天线阵列设计[J]. 现代雷达, 2018, 40(2): 73-76.
- [8] 戴宗昆, 周永刚, 王佳友. 基于紧耦合结构的宽带基站天线设计[J]. 微波学报, 2019, 35(3): 20-23.
- [9] 陈志宁, 刘炜, 李腾, 林丰涵, 江梅. 惠更斯电磁超构表面微波天线的研究进展(特邀文章) [J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 239-255.
- [10] Chen, Z.N., Liu, W. and Qing, X. (2017) Low-Profile Broadband Mushroom and Metasurface Antennas. *International Workshop on Antenna Technology*, Athens, 1-3 March 2017, 13-16. <https://doi.org/10.1109/IWAT.2017.7915284>
- [11] David M. Pozar. 微波工程[M]. 第3版. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [12] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [13] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 西安: 西安电子科技大学, 1985: 50-55.
- [14] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [15] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [16] 王建, 郑一农, 何子远. 阵列天线理论与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社出版社, 2017.
- [17] Zhang, W.J., Zhao, Y.M. and Zhang, M. (2012) The Synthesis of a Longitudinal Slot Array on a Rectangular Waveguide. 2012 10th *International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*, Xian, 22-26 October 2012, 202-205. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2012.6408744>