

一种 Ka 频段宽带宽角扫描微带天线

郭曦琳, 史永康, 谷胜明, 孟明霞, 丁晓磊
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对低剖面微带天线带宽窄的问题, 设计了一种高度仅为 $0.11\lambda_0$ 的双层贴片开槽微带天线, 通过双贴片同时馈电的方式, 展宽了微带天线的带宽, 实现了驻波带宽达到 17.9%。经过 HFSS (High Frequency Structure Simulator, 高频结构仿真器) 设计仿真结果表明: 该天线单元具有良好的阻抗匹配特性, 驻波带宽在 17.9%, 增益为 5.89 dB, 符合宽带天线的标准。将该天线单元组成 6×6 阵列, 通过仿真分析得出, 天线在 31.0 GHz~36.5 GHz 频带范围内 VSWR(电压驻波比) ≤ 2 , 相对带宽达到 16.4%, 增益达到 20.28 dB, $-60^\circ\sim 60^\circ$ 扫描范围内具有良好辐射特性。该天线具有小型化、易于集成、制造简单等优点, 可用于多种通信系统中, 应用前景良好。

关键词: 微带天线; 宽带宽角; Ka 频段; 低剖面

中图分类号: TN817; V443+.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0107-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220901001

引用格式: 郭曦琳, 史永康, 谷胜明, 等. 一种 Ka 频段宽带宽角扫描微带天线[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 107-115.

Design of a Ka-band wide-band wide-scanning microstrip antenna

GUO Xilin, SHI Yongkang, GU Shengming, MENG Mingxia, DING Xiaolei
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to solve the problem of narrow band width of low profile microstrip antenna, a two-layer patch slotted microstrip antenna with a height of only $0.11\lambda_0$ is designed. By feeding two patches simultaneously, the bandwidth of the microstrip antenna is widened, and the standing wave bandwidth reaches 17.9%. The simulation results of HFSS design show that the antenna unit has good impedance matching characteristics, the standing wave bandwidth is 17.9%, and the gain is 5.89 dB, which meets the standard of broadband antenna. The antenna unit is composed of 6×6 array. Through simulation analysis, it is found that the antenna has VSWR ≤ 2 in the band range of 31.0 GHz~36.5 GHz, the relative bandwidth is 16.4%, the gain is 20.28 dB, and the antenna has good radiation characteristics in the scanning range of $-60^\circ\sim 60^\circ$. The antenna has the advantages of miniaturization, easy integration and simple manufacture. It can be used in a variety of communication systems and has a good application prospect.

Keywords: Microstrip antenna; Wideband wide-scanning; Ka band; Low profile

Citation: GUO Xilin, SHI Yongkang, GU Shengming, et al. Design of a Ka-band wide-band wide-scanning microstrip antenna [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 107-115.

引 言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时全天候二维或三维高分辨成像能力, 广泛应用于机载、星载地球遥感和弹载精确制导等领域。为获得更高的空间分辨能力, 更好地适应无人机、小卫星等小型化平台, 合成孔径雷达正向着毫米波、宽频带、阵列化、轻质化的方向快速发展。作为雷达系统的关键前端, SAR 天线

广泛采用相控阵体制, 用于获得灵活的波束扫描能力, 以满足 SAR 系统多模式工作要求。

常见的 SAR 相控阵天线主要有波导阵列天线和微带阵列天线。相比波导阵列天线, 微带天线具有体积小、剖面低、成本低、易集成 T/R 芯片等优点。然而, 为满足轻质宽带化雷达系统应用需求, 微带天线还需进一步降低剖面高度, 提升带宽。常见低剖面微带天线的频带较窄, 为展宽微带天线的带宽, 通常可以采取的措施包括: 减小

品质因数(提高介质板厚度或减小介质板的介电常数)、附加阻抗匹配网络、在辐射贴片或接地板开槽。减小品质因数的方法增加了天线剖面高度,使得天线很难集成,增加匹配网络以及设计天线阵列的方法改变了天线的结构,而且设计制作复杂度较高。

文献[1]将 SIC(碳化硅)结构引入到微带贴片天线阵, SIC 结构可以抑制表面波。此外,还采用三角晶格构型(TLC)来减小贴片天线阵的相互耦合,大大提高了带宽。文献[2]采用基板集成波导(SIW)腔来减小天线结构尺寸,抑制表面波,提高天线带宽,具有宽角扫描能力。文献[3]中利用 L 探针近耦合馈电,并通过薄介质基片加载从而实现贴片天线阻抗带宽的展宽。

2010 年,香港理工大学的研究人员结合两个 E 型贴片形成“王”型贴片扩展微带天线的阻抗带宽^[4]。除此之外,还有改进 E 型贴片^[5]和改进 U 型槽^[6]等方法实现阻抗带宽扩展。在这之后,通过结合两谐振模式扩展微带天线阻抗带宽的方法被提出,文献[7]和文献[8]分别通过结合 TM_{10} 和 TM_{12} 模式、 TM_{12} 和 TM_{30} 模式,扩展阻抗带宽至 10%(1.8~2.0 GHz)和 14.8%(2.37~2.75 GHz)。文献[9]通过加载双短路针提高 TM_{10} 模式的谐振频率,开双矩形长槽降低 TM_{30} 模式的谐振频率,使 TM_{10} 和 TM_{30} 模式相互靠近,最终阻抗带宽被扩展至 13%(1.88~2.14 GHz)。2013 年,Neto 团队实现了 3~5 GHz 的宽带连接偶极子阵列^[7],为了抑制平衡馈电时产生的共模谐振(与文献[8]中提到的共模谐振机制并不相同),在馈电网络中加入了环形的阻抗变换器。Volakis 团队设计出具有集成巴伦的宽带宽角扫描紧耦合阵列^[9],该阵列采用紧凑的 Marchand 巴伦,同时具有多级阻抗匹配网络的功能。Neto 团队报道了利用人工介质层加载的连接缝隙阵列^[10],该人工介质层由多层电小尺寸的金属贴片阵列构成,在展宽带宽的同时使得整体结构更加紧凑,馈电结构简单。

为满足雷达系统宽带化、高集成的需求,本文提出一种 Ka 频段低剖面宽带天线,该天线采用双层贴片结构,并在矩形贴片上开 U 形槽缝隙,使得天线馈电位置保持在贴片中心,同时展宽了带宽。该天线结构紧凑、易于集成,在保持方向图稳定、增益、扫描能力的前提下,本文提出的微带天线带宽提升至 14.9%(31.5~36.5 GHz),实

现了低剖面、小型化、宽带化的特性。

1 天线设计

1.1 理论分析

常规的微带天线辐射贴片为矩形,若矩形辐射贴片长为 l_1 ,宽为 l_2 ,介质基板的相对介电常数为 ϵ_r ,微带天线的中心频率为 f_{mn} ,有

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_2}\right)^2} \quad (1)$$

其中 c 为真空中的光速, $(m, n \in \mathbb{N})$ ^[11]。矩形微带天线传输主模为 TM_{01} 模,即 $m=0, n=1, f_{mn}$ 的值就是天线的中心频率,取 $l_1=l_2$,则可以计算出辐射贴片边长的理论值^[12]。

为实现雷达系统宽带化的目标,本文采用双层微带天线的形式。假设双层天线下层贴片的谐振频率为 f_{01} ,贴片边长为 L_{e1} ,上层贴片的谐振频率为 f_{02} ,贴片边长为 L_{e2} ,则有:

$$f_{01} = \frac{c}{2L_{e1}\sqrt{\epsilon_{e1}}} \quad (2)$$

$$f_{02} = \frac{c}{2L_{e2}\sqrt{\epsilon_{e2}}} \quad (3)$$

其中 c 为自由空间中的光速^[13]。

$$\epsilon_{e1} = \epsilon_1 \quad (4)$$

$$\epsilon_{e2} = h_{e1} / \left(\frac{h_1}{\epsilon_1} + \frac{h_2}{\epsilon_2} \right) \quad (5)$$

$$h_{e1} = h_1 + h_2 \quad (6)$$

其中, ϵ_1 和 ϵ_2 分别代表下层介质基板的相对介电常数和上层介质基板的相对介电常数; h_1 和 h_2 分别代表下层介质基板的厚度和上层介质基板的厚度^[14]。本文采用介电常数为 3.66 的 Rogers4350B 介质基板,下层介质基板厚度为 0.508 mm,上层介质基板为 0.254 mm,可初步计算出上层贴片边长为 1.92 mm,下层贴片边长为 2.14 mm。

本文设计的天线采用双层结构,常规的双层微带天线馈电点在下层贴片,如图 1(a)所示,采取这种馈电方式时,两层贴片之间存在一定的容性。本文设计的天线馈电点贯穿上下两层贴片,天线结构如图 1(b)所示,两层贴片间新增的金属柱可等效为一段电感,与两贴片间的等效电容形成谐振,从而展宽了天线带宽。为使得同轴馈电点固定在介质板中心位置,在矩形辐射贴片上开一个 U 形槽缝隙,如图 2(b)所示,来获得更好的阻抗匹配。

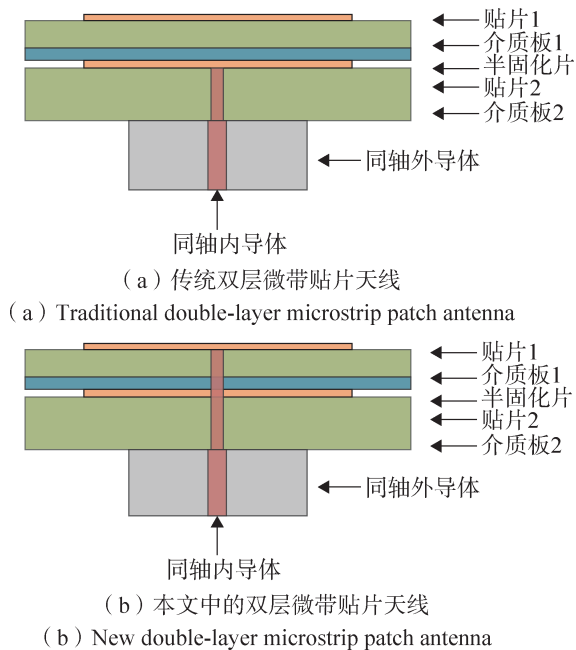


图1 两种双层微带贴片天线

Fig. 1 Two types of double-layer microstrip patch antenna

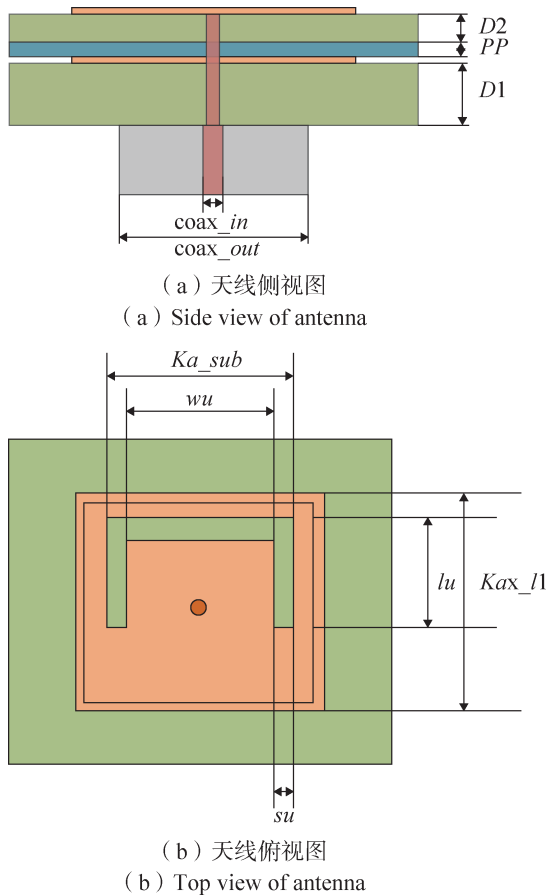


图2 天线结构

Fig. 2 Structure of antenna

使用介电常数为3.66的Rogers4350介质板来设计每一层的天线。上层的介质板厚度为 $D2$ ，下层介质板厚度为 $D1$ ，中间添加一层厚度为 PP 的半固化片。介质边长为 Ka_{sub} ，贴片边长为 Ka_{l1} 、U型缝隙横向长度为 wu 、U型缝隙纵向长度为 lu 、U型缝隙的宽度为 su 。

1.2 参数分析

影响双层微带贴片天线驻波参数主要有介质板和半固化片的高度、微带贴片的边长以及U型缝隙的尺寸，其中介质板和半固化片的高度根据天线实际加工要求决定。因此在参数优化时，主要对贴片边长 Ka_{l1} 、U形缝隙纵向长度 lu 、U形缝隙横向长度 wu 、U形缝隙宽度 su 进行分析。

1.2.1 贴片边长 Ka_{l1} 对VSWR的影响

分别选取 $Ka_{l1}=1.70\text{ mm}$ 、 1.78 mm 以及 1.83 mm 三种不同情况对天线进行参数分析。经过HFSS仿真之后，可以得到图3的VSWR曲线。随着 Ka_{l1} 的增大，天线的带宽逐渐减小、呈现向低频偏移的趋势，VSWR逐渐减小。综合考虑，取 $Ka_{l1}=1.83\text{ mm}$ 时，驻波比在频带范围内小于2，满足需求。

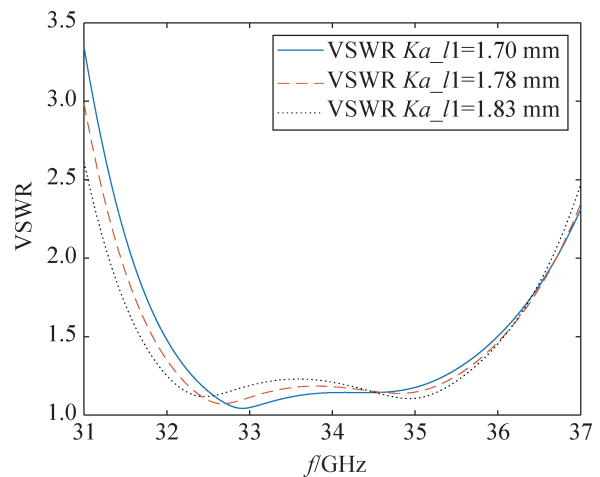


图3 下层贴片边长 Ka_{l1} 对VSWR的影响

Fig. 3 Influence of Ka_{l1} to VSWR

1.2.2 U形缝隙纵向长度 lu 对VSWR的影响

分别选取 $lu=1.00\text{ mm}$ 、 1.04 mm 以及 1.08 mm 三种不同情况对天线进行参数分析。经过HFSS仿真之后，可以得到图4的VSWR曲线。随着 lu 的增大，天线的阻抗带宽逐渐减小、VSWR逐渐增大。综合考虑，取 $lu=1.04\text{ mm}$ 时，天线驻波小于2的频带宽度达到5.5 GHz，性能较好。

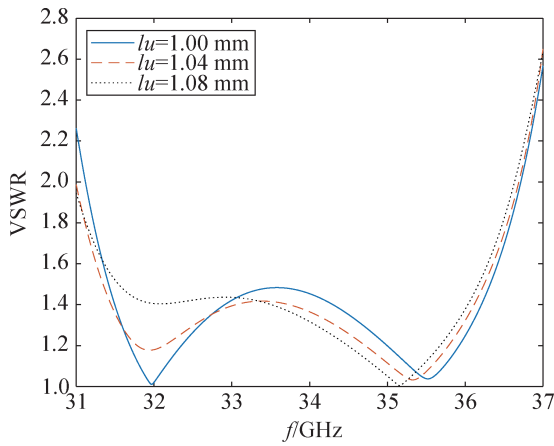


图4 U形缝隙纵向长度 l_u 对VSWR的影响
Fig.4 Influence of l_u to VSWR

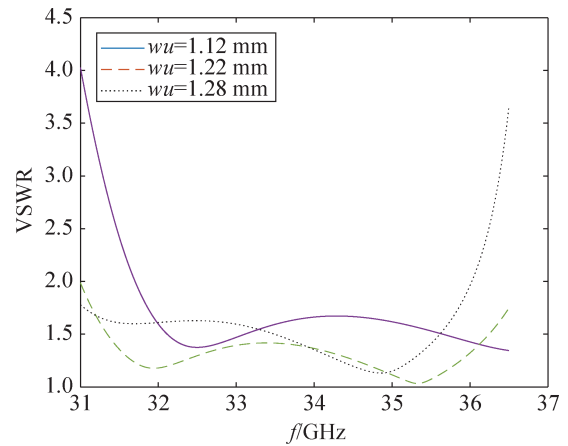


图5 U形缝隙横向长度 w_u 对VSWR的影响
Fig.5 Influence of w_u to VSWR

1.2.3 U形缝隙横向长度 w_u 对VSWR的影响

分别选取 $w_u=1.12\text{ mm}$ 、 1.22 mm 以及 1.28 mm 三种不同情况对天线进行参数分析。经过HFSS仿真之后,可以得到图5的VSWR曲线。随着 w_u 的增大,VSWR逐渐增大,天线阻抗带宽减小。综合考虑,取 $w_u=1.22\text{ mm}$ 时,天线驻波小于2的频带宽度达到 5.4 GHz ,性能较好。

1.2.4 U形缝隙宽度 s_u 对VSWR的影响

分别选取 $s_u=0.1\text{ mm}$ 、 0.15 mm 以及 0.2 mm 三种不同情况对天线进行参数分析。经过HFSS仿真之后,可以得到图6的VSWR曲线。随着 s_u 的增大,VSWR呈现先减小后增大的趋势,天线阻抗带宽增大。综合考虑,取 $s_u=0.15\text{ mm}$,此时,天线驻波小于2的频带宽度达到 6 GHz ,性能较好。

天线的关键参数以阻抗匹配为优化目标得到,

具体的天线尺寸参数在表1中给出。

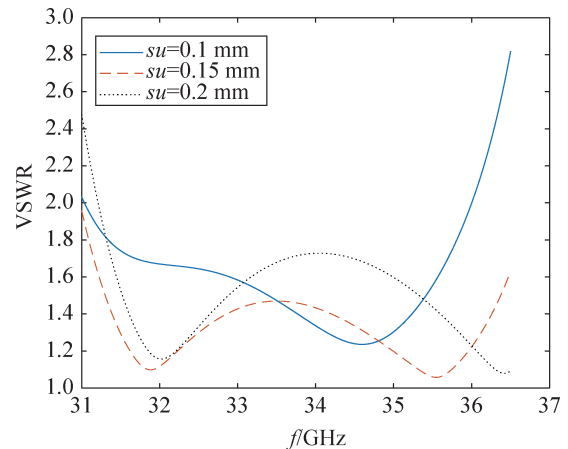


图6 U形缝隙宽度 s_u 对VSWR的影响
Fig.6 Influence of s_u to VSWR

表1 天线参数

Table 1 Parameters of antenna

参数	Ka_l1	Ka_l2	l_u	w_u	s_u	Ka_sub	$D1$	PP	$D2$	$feed_r$	$coax_in$	$coax_out$
尺寸(mm)	1.78	1.83	1.04	1.22	0.15	2.8	0.508	0.3	0.254	0.115	0.15	0.7

1.2.5 传统馈电方式与本文设计的微带贴片天线馈电方式对比

将两种不同馈电方式的微带贴片天线的驻波结果进行对比,仿真结果如图7所示。

由图7可以看出,经过仿真优化,在介质基板材料和厚度相同的情况下,传统馈电方式的双层微带贴片天线驻波带宽在5%,本文设计的双层微带贴片天线驻波带宽达到17.9%,实现了带宽的显著展宽。

2 仿真分析

2.1 双层宽带微带天线单元仿真分析

利用HFSS对天线的尺寸参数进行分析与优化,确定天线最佳尺寸参数,从而得到最优的天线辐射特性。

驻波随频率变化曲线如图8所示,该天线单元在 $31\text{ GHz}\sim 37\text{ GHz}$ 频带范围内 $VSWR\leq 2$,相对带宽达到17.9%,符合指标需求。

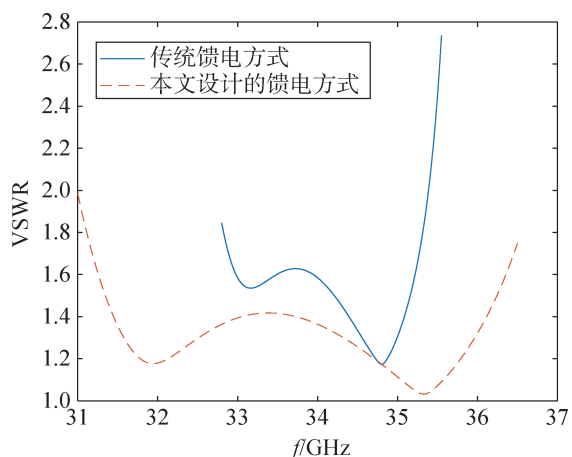


图7 两种馈电方式下的天线驻波带对比
Fig.7 Comparison of two types antenna

天线的增益反映了天线的定向辐射程度，天线增益越高则天线收发成功率越高^[15]。图8是该天线单元增益随频率变化曲线，从图中可以看出，在工作带宽内，该天线单元的整体增益优于5.6 dB。图9是该天线单元分别工作在32 GHz、33.5 GHz和36 GHz处的增益方向图，由图中曲线分析可知，该天线单元在低频、高频以及中心频率增益曲线均较为平滑。

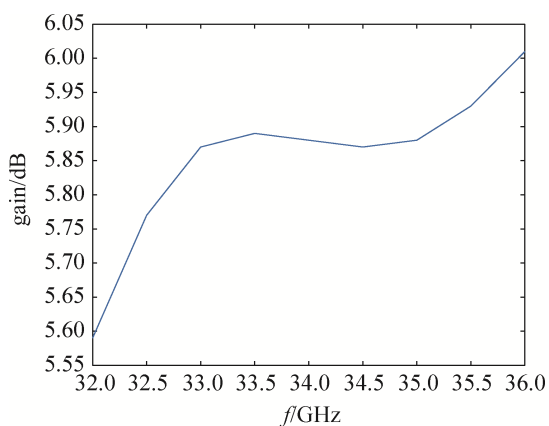


图8 天线单元增益随频率变化曲线
Fig.8 Frequency variation of antenna gain

2.2 2×2天线子阵仿真分析

将上述天线单元按照如图10所示“背靠背”方式排布组成2×2子阵，阵元间距为4.3 mm，采用这种布阵方式可以实现极化抵消，提高了天线的隔离度。

2×2子阵方向图如图11所示，图中曲线分别在32 GHz、33.5 GHz和36 GHz下的主极化和交叉极化曲线。可以看出天线子阵在频带范围内增益均

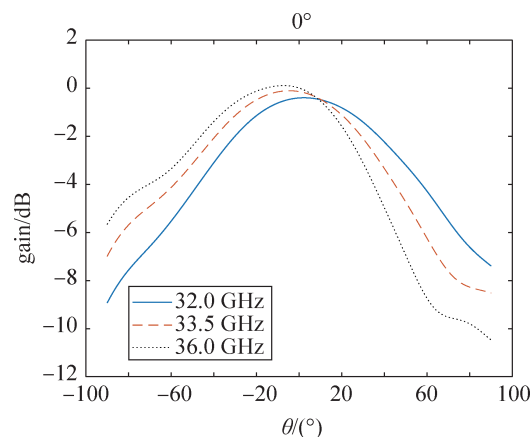


图9 天线单元在不同频率下的归一化增益曲线
Fig.9 Normalized gain at different frequencies

优于11.5 dB，交叉极化低于-39 dB，性能优良，符合实际需求。

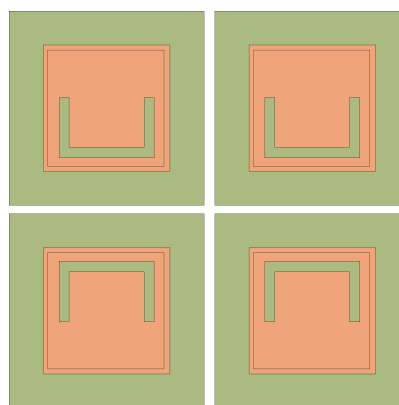


图10 子阵图
Fig.10 Sub-array

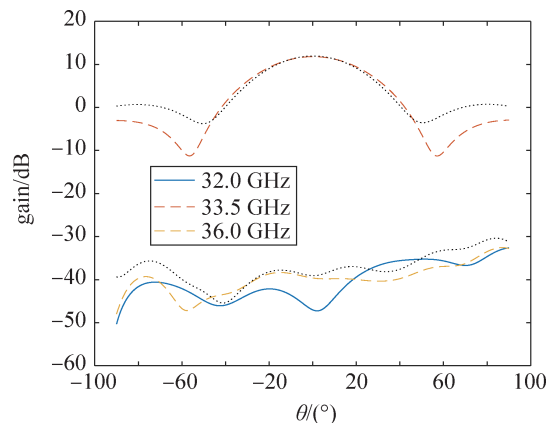


图11 子阵方向图
Fig.11 Directivity diagram of sub-array

2.3 整阵仿真分析

将上述2×2子阵组成如图12所示的6×6单元

阵列。

图13为阵列各单元驻波，由图可见，各单元的驻波在31 GHz~36.5 GHz频带内均小于2，相对带宽可达16.4%，具有良好的宽频带特性。图14

为天线阵列在32 GHz、33.5 GHz、36 GHz下不同扫描角度的方向图，考虑到对称性只给出了0°、-20°、-40°、-60°扫描角下的增益方向图。可以得出：该天线阵列在工作频带范围内的波束扫描宽度可

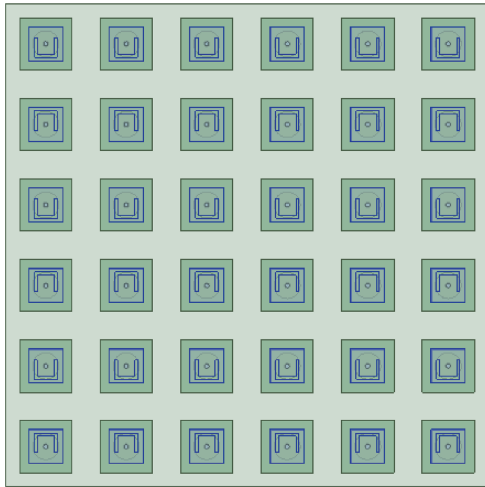


图12 阵列结构

Fig.12 Antenna array

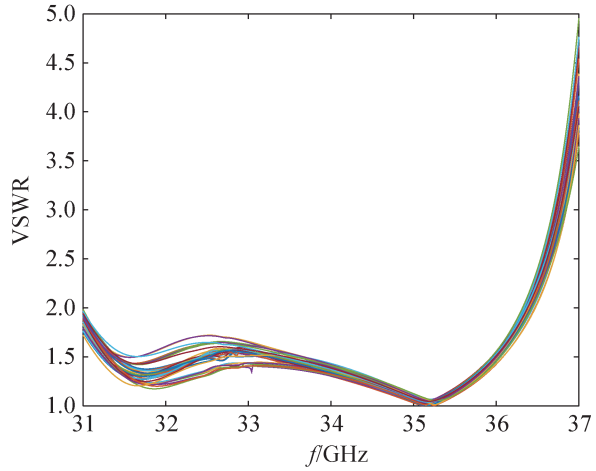
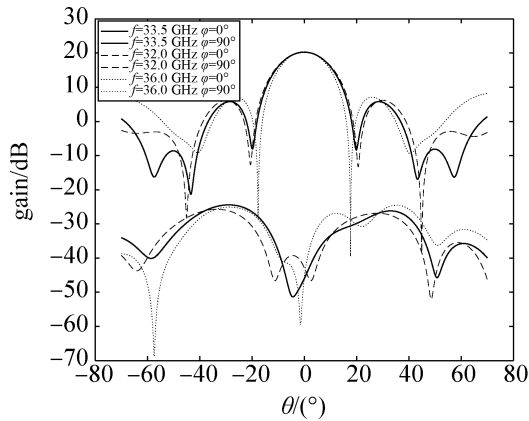
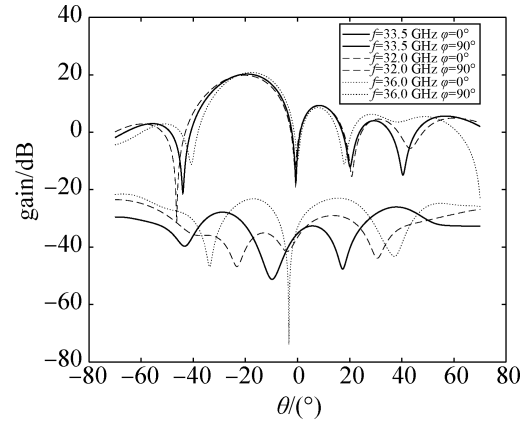


图13 阵列各单元驻波

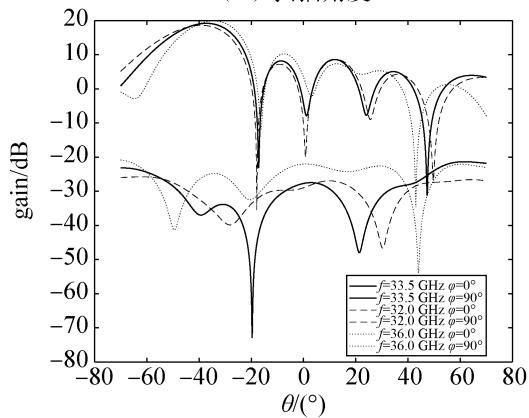
Fig.13 VSWR of each unit



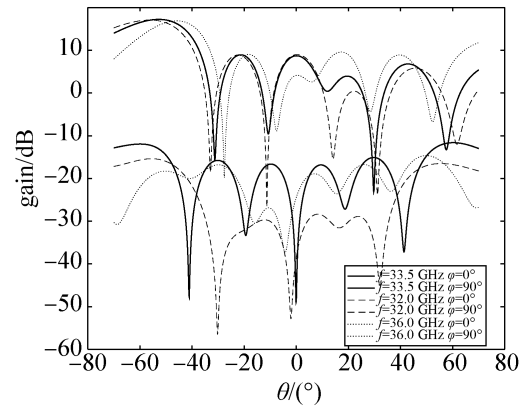
(a) 扫描角度0°



(b) 扫描角度-20°



(c) 扫描角度-40°



(d) 扫描角度-60°

图14 不同角度下阵列扫描方向图

Fig.14 Directivity diagram of different degree

以达到 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，其中 0° 扫描角增益达到20.28 dB， -60° 扫描角增益达到17.28 dB，整个扫描角范围内主波束方向交叉极化电平低于 -11.94 dB。

天线阵列在不同频率下的扫描增益如图15所示，主辐射方向的交叉极化电平如表2所示。由于

阵列采用“背靠背”的布阵方式，相邻单元之间存在极化抵消，交叉极化方向图电平在相应角度上与主极化电平相比有明显的降低，在最大辐射方向上大于28 dB，天线阵列具有良好的正交极化特性。

表2 主辐射方向交叉极化电平

Table 2 Cross polarization level in the main radiation direction

扫描角频率	0°		20°		40°		60°	
	增益 (dB)	交叉极化电平 (dB)	增益 (dB)	交叉极化电平 (dB)	增益 (dB)	交叉极化电平 (dB)	增益 (dB)	交叉极化电平 (dB)
32 GHz	20.42	-42.82	19.84	-40.90	19.01	-32.30	16.91	-15.70
33.5 GHz	20.42	-45.97	20.25	-32.42	19.01	-36.87	16.48	-11.94
36 GHz	20.42	-45.64	20.62	-23.75	19.01	-26.60	13.08	-22.17

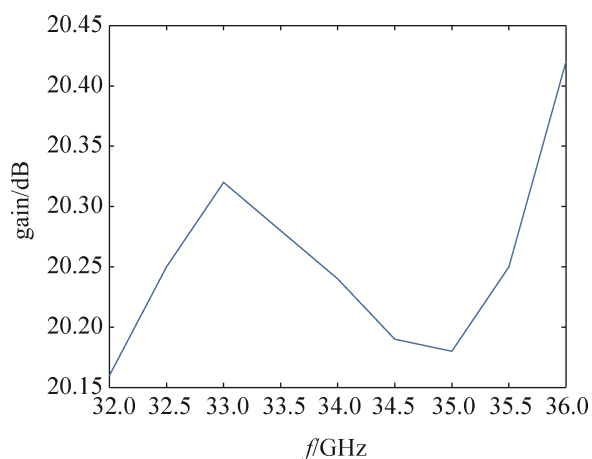
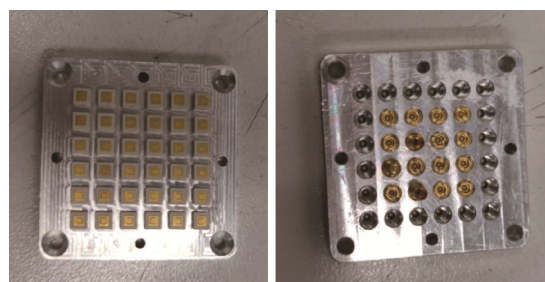


图15 不同频率下的扫描增益

Fig.15 Gain at different frequencies

3 加工与测试

在仿真设计的基础上，加工了一款 6×6 单元的天线，正面和背面如图16所示。对阵中单元进行驻波测量，结果如图17所示，天线单元在31.7 GHz~37.7 GHz频带范围内实测驻波小于2，具有良好的宽频带特性。在微波暗室进行测试，如图18所示，给出了不同频率下E面H面的实测扫描方向图。可以看出， 6×6 阵列在31.5 GHz~36 GHz频带内，可实现 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 扫描，扫描过程中天线增益损耗小于3 dB，具有良好的宽角扫描特性。将阵中单元仿真与实测方向图数据进行对比，如图19所示，验证了实测结果的正确性。



(a) 正面 (a) Front view
(b) 背面 (b) Rear view

图16 天线加工实物

Fig.16 Antenna processing object photo

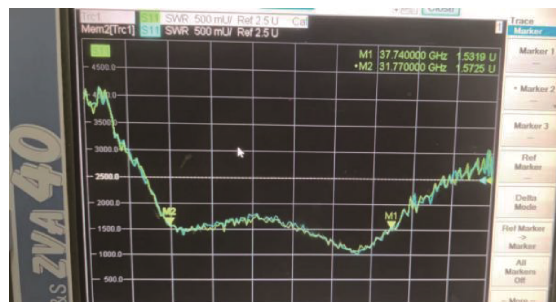


图17 阵中单元的扫描驻波曲线

Fig.17 VSWR curve of antenna unit

4 结束语

本文设计了一款Ka频段宽带微带相控阵天线单元并对其进行组阵分析。天线单元剖面高度为 $0.11\lambda_0$ ，在31.5 GHz~36 GHz（相对带宽16.4%）频带内，驻波小于1.5，具有良好的宽频带、低剖面特性。该单元组成的 6×6 阵列在31.5 GHz~36 GHz频带内，驻波小于2，可实现 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 扫描，

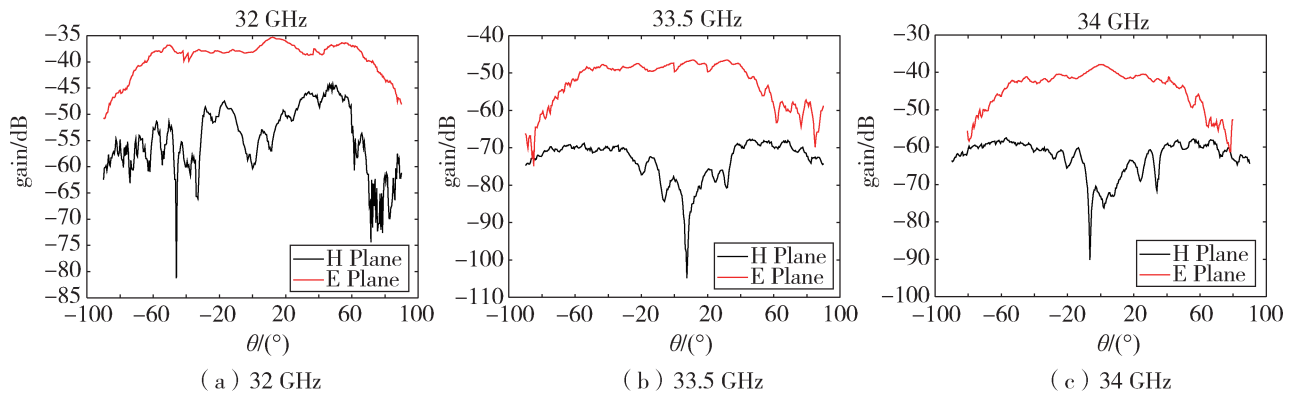


图 18 天线在频带范围内不同频率下方向图测试结果

Fig.18 Directional result of different frequencies

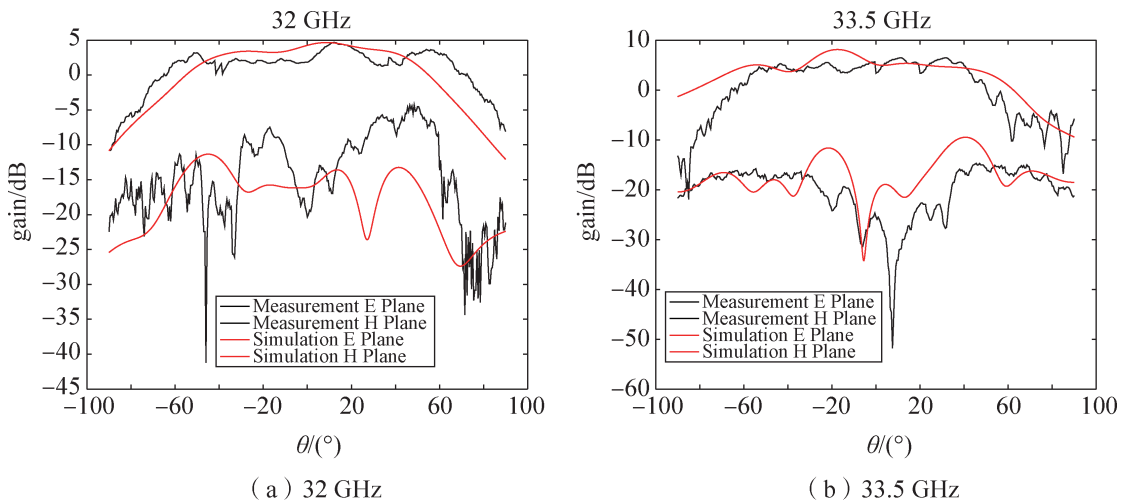


图 19 阵中天线单元仿真与实测方向图对比

Fig.19 Comparison of simulated and tested antenna directional diagram

扫描角域内交叉极化电平低于-11.94 dB, 具有良好的宽带宽角扫描特性, 可满足 SAR 天线毫米波、宽频带、阵列化、轻质化的雷达系统应用需求。

参考文献

[1] YAN Binyun, SHENG Weixing, SUN Liangyu, et al. Wideband wide-scanning planar triangular-lattice phased array with substrate-integrated cavity-backed U-slot patches[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 6082-6086.

[2] LIU Hao, QING Anyong, XU Ziqiang, et al. Design of physically connected wideband SIW cavity-backed patch antenna for wide-angle scanning phased arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(3): 406-410.

[3] 胡明春, 杜小辉, 李建新. 宽带宽角圆极化微带贴片天线设计[J]. 电波科学学报, 2001, 16(4): 441-446.

HU Mingchun, DU Xiaohui, LI Jianxin. Design of broadband and wide-angle circularly polarized microstrip patch antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(4): 441-446.

[4] CHUNG K L, WONG C H. Wang-shaped patch antenna for wireless communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 638-640.

[5] KOUTINOS A G, ANAGNOSTOU D E, JOSHI R, et al. Modified easy to fabricate E-shaped compact patch antenna with wideband and multiband functionality[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2017, 12(3): 326-331.

[6] SINGH A, SINGH S. Miniaturized wideband aperture coupled microstrip patch antenna by using inverted U-slot [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2014: 1-7.

[7] CAVALLO D, NETO A, GERINI G, et al. A 3-to 5-GHz

- wideband array of connected dipoles with low cross polarization and wide-scan capability[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(3): 1148-1154.
- [8] HOLLAND S S, VOUVAKIS M N. The planar ultrawideband modular antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 130-140.
- [9] DOANE J P, SERTEL K, VOLAKIS J L. A wideband, wide scanning tightly coupled dipole array with integrated balun (TCDA-IB)[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4538-4548.
- [10] SYED W H, CAVALLO D, SHIVAMURTHY H T, et al. Wideband, wide-scan planar array of connected slots loaded with artificial dielectric superstrates[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(2): 543-553.
- [11] 魏德肖, 陈兵, 崔雪琪, 等. 一种S频段双圆极化相控阵子阵天线设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 97-103.
WEI Dexiao, CHEN Bing, CUI Xueqi, et al. Design of S-band dual circularly polarized phased array sub-array antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 97-103.
- [12] 陈振炜, 袁成, 李向阳, 等. 小型化超宽带天线设计[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(7): 34-37.
- [13] 薛裕晓, 沈永健, 张峪维, 等. 宽带相控阵馈源可展开反射面天线研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 72-78.
XUE Yuxiao, SHEN Yongjian, ZHANG Yuwei, et al. A broadband deployable reflector antenna with phased array feed[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 72-78.
- [14] 李小刚, 金荣洪, 梁仙灵, 等. Ka频段宽带圆极化微带天线[J]. 电波科学学报, 2022, 37(6): 1073-1079.
LI Xiaogang JIN Ronghong, LIANG Xianling, et al. Ka-band broadband circularly polarized microstrip antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(6): 1073-1079.
- [15] 蒋光明, 杨晓庆, 周健. 一种Ku/K波段宽带圆极化阵列天线的设计[J]. 现代计算机, 2022, 28(10): 67-71.
JIANG Guangming, YANG Xiaoping, ZHOU Jian. Design of a Ku/K-band wideband circularly polarized array [J]. Modern Computer, 2022, 28(10): 67-71.

[作者简介]

郭曦琳 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为航天微波与天线技术。

史永康 1978年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波与电磁场。

谷胜明 1984年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波与电磁场。

孟明霞 1984年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微波与电磁场。

丁晓磊 1971年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波与电磁场。

(本文编辑: 傅 杰)