



·高功率微波技术·

L/S/C/X 四频高隔离共口径微带天线设计*

黄鑫源, 蒋 坤, 郭庆功

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘 要: 首次设计实现了一款能同时工作在 L/S/C/X 四个频段的高隔离共口径低剖面微带天线。整体结构通过依次按照频率从低至高的顺序自下而上将 4 个频段的微带天线堆叠而成, 采用同轴探针穿过低频辐射贴片形成过孔给高频天线馈电, 同时将低频天线作为其上层高频天线的地, 以提高天线指标与性能。其中 L/S/C 波段的辐射贴片采用在矩形辐射贴片四周添加枝节的方式, 更利于阻抗调节; X 波段置于最顶层, 通过对矩形贴片进行开槽处理, 避免了对其它频段的辐射遮挡; 通过采用中和线去耦合及正交馈电的方法, 最终实现了 4 个频段内增益分别为 6.85, 7.48, 6.13, 6.62 dBi; 各端口之间隔离均大于 30 dB; 天线尺寸为 85 mm×85 mm×9.07 mm; 通过实物加工, 测试与仿真结果吻合良好, 验证了设计的有效性和可靠性。

关键词: 多频段; 高隔离; 共口径; 微带天线

中图分类号: TN827.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220241

Design of highly isolated common aperture microstrip antenna for L/S/C/X band

Huang Xinyuan, Jiang Kun, Guo Qinggong

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: For the first time, a highly isolated common aperture low-profile microstrip antenna is designed and realized to work in four frequency bands—L/S/C/X, simultaneously. The overall structure is made by stacking microstrip antennas of four bands from bottom to top according to the order of frequency from low to high, using coaxial probes through the low-frequency radiation patch to form an over-hole to feed the high-frequency antenna and using the lower-frequency antenna as the ground of the higher-frequency one in turn to improve the antenna index and performance. Among them, each radiation patch of L/S/C band adopts the way of adding branches around a rectangular radiation patch, which is conducive to impedance adjustment. The X band radiation patch is placed at the top layer, and by slotting the rectangular patch, the radiation blocking to other bands is avoided. By adopting the method of neutralizing line decoupling and orthogonally feeding, the gain in the four bands is finally realized as 6.85 dBi, 7.48 dBi, 6.13 dBi, and 6.62 dBi respectively. The isolation between each port is greater than 30 dB. The antenna size is 85 mm×85 mm×9.07 mm. By means of the physical processing, the test results and simulation ones match well, which verifies the validity and reliability of the design.

Key words: multi-band, high isolation, common aperture, microstrip antenna

近年来,随着无人机、卫星通讯、飞行器通讯等无线通讯系统应用的发展,多频天线成为业界研究领域的热点之一。在合成孔径雷达(SAR)和飞行器等诸多领域,需要将多个频段天线做共口径设计,以实现减小剖面高度和尺寸的目的。共口径天线作为一种新型天线,将不同频段不同极化的天线放在同一口径中,每个频段单独设计,在阻抗匹配和方向图上都方便控制,能够有效的减小天线的尺寸和体积。针对不同控制信号的收发,如何充分利用现有空间,在保证高增益及高隔离的条件下,实现更多频段的共口径,是众多学者想要突破的关键与难点。早期

* 收稿日期:2022-08-08; 修订日期:2022-10-09
基金项目:国家自然科学基金项目(U19A2054)
联系方式:黄鑫源, 583515781@qq.com。
通信作者:郭庆功, guoqingong@scu.edu.cn。

设计大多采用分散放置法^[1-3],将不同频段的天线平铺开,实现共口径。但口径利用率太低,导致天线整体体积偏大,不能满足实际应用需求。目前大多采用将多个高频天线辐射单元嵌入到低频天线辐射单元之间的嵌入法^[4-6]实现共口径。其中,文献[4]设计了一种工作在C/X波段的共口径天线,在C波段辐射贴片刻蚀4个圆角,将4个X波段辐射贴片嵌入至其四周,以将C/X两个波段容纳到一个口径中,且端口之间隔离为15 dB。为了进一步实现天线小型化,近年来采用堆叠法^[7-14]来设计共口径天线已成为主流趋势。文献[7]通过3个层压PCB板的堆叠结构,利用缝隙耦合馈电,设计了一种工作在E/Ka波段的共口径微带天线。文献[11]设计实现了S/X波段的共口径微带天线,也是将低频天线放置在高频天线下方,最终实现了S波段增益7.3 dBi, X波段增益4.3 dBi;端口之间隔离大于10 dB。文献[14]中,将矩形微带贴片、微带偶极子和贴片单极子交错放置在同一口径中,从下到上依次为L/S/X波段辐射贴片,实现了各个端口之间隔离均大于30 dB。

由于空间的限制和辐射贴片之间耦合的影响,目前的研究并不能满足实际工程中对高增益、高隔离及三频以上共口径设计指标的要求。本文采用微带堆叠结构,并利用天线开槽技术和中和线去耦合的方法,设计了一款工作在L/S/C/X波段的天线,在满足各个频段增益大于6.5 dBi的前提下,实现了低剖面和高隔离微带天线的设计。

1 设计理论分析

该设计采用矩形微带贴片作为4个频段的辐射贴片,并在四周添加枝节,利于阻抗调节将低频辐射贴片作为高频天线的地。在相邻频段的辐射贴片之间引入中和线,降低高低频之间的耦合。矩形微带贴片的经验公式如式(1)和式(2)所示^[15], W 为微带天线宽, L 为微带天线长, h 为基板高度, ΔL 为辐射缝隙的宽度, f_r 为谐振频率; ϵ_r 为介质板介电常数, ϵ_e 为等效介电常数,可以初步确定工作频段对应的辐射贴片尺寸。

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (2)$$

$$\text{式中: } \epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}; \Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)}。$$

微带天线带宽的经验公式如式(3)所示^[15],通常采用增大介质基板高度 h 和降低基板介电常数 ϵ_r 来增加带宽。

$$W_b = \frac{8}{3\sqrt{2}\epsilon_r} \frac{h}{\lambda_0} \quad (3)$$

2 天线设计

2.1 天线模型

天线模型如图1所示。图1(a)为天线俯视图,图1(b)为天线侧视图。四层介质基板材料均为F4BK225,介电常数 ϵ_r 为2.25。天线采用堆叠结构,从下至上依次为L波段(1.5 GHz)、S波段(3 GHz)、C波段(6 GHz)和X波段(10 GHz),频率比(FR)约为1:2:4:6.67。X波段阻抗带宽为9.72~10.15 GHz,S波段阻抗带宽为2.98~3.07 GHz,L波段和C波段阻抗带宽分别为1.49~1.52 GHz,5.93~6.07 GHz。

2.2 L/S/C波段天线设计

L/S/C波段天线模型如图2所示。图2(a)为天线俯视图,图2(b)为天线侧视图。L波段辐射贴片位于最下层基板的上层,S波段辐射贴片位于第2层基板的上层,C波段辐射贴片位于第3层基板的上层。为了增大天线的口径利用率,该设计中选择将4个不同频段的天线堆叠在一起,利用同轴探针贯穿低频辐射天线形成过孔来给高频辐射天线馈电。但探针的引入会极大增加高低频之间的耦合,该设计中采用中和线的方法,引入与原电流相反的电流来减少特定频率的相互耦合。同时使用正交馈电的方式,增大了各端口之间的隔离。主要参数如表1所示(由上述给出的微带天线经验公式算出)。

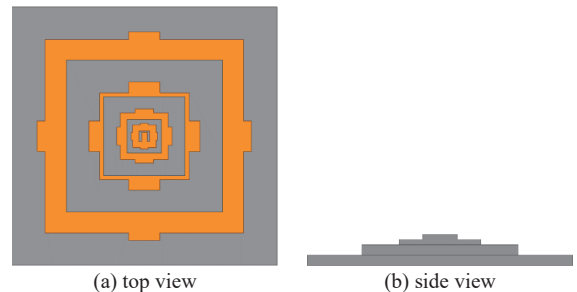


Fig. 1 Schematic diagrams of antenna

图1 天线模型

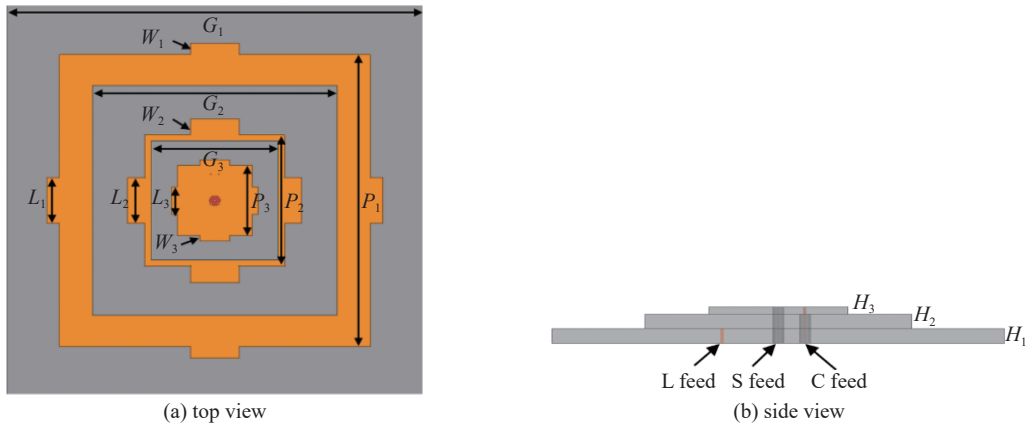


Fig. 2 L/S/C band schematic diagrams of antenna

图 2 L/S/C 波段天线模型

表 1 天线各项参量

Table 1 Parameters of fabricated antenna

G_1/mm	G_2/mm	G_3/mm	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	H_1/mm	H_2/mm
85	50	26	63.2	28.6	14.9	3	3
H_3/mm	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	W_1/mm	W_2/mm	W_3/mm	
1.5	10	10	6	2.5	3.5	1.2	

2.3 X 波段天线设计

X 波段辐射贴片位于最上层基板的上层。为与 L, S, C 波段共口径, X 波段天线采用中心馈电。通过在辐射贴片上开槽, 来达到实现匹配的目的。图 3 为 X 波段天线模型。图 3(a) 为天线俯视图, 图 3(b) 为天线侧视图。主要参数如表 2 所示(由上述给出的微带天线经验公式算出)。

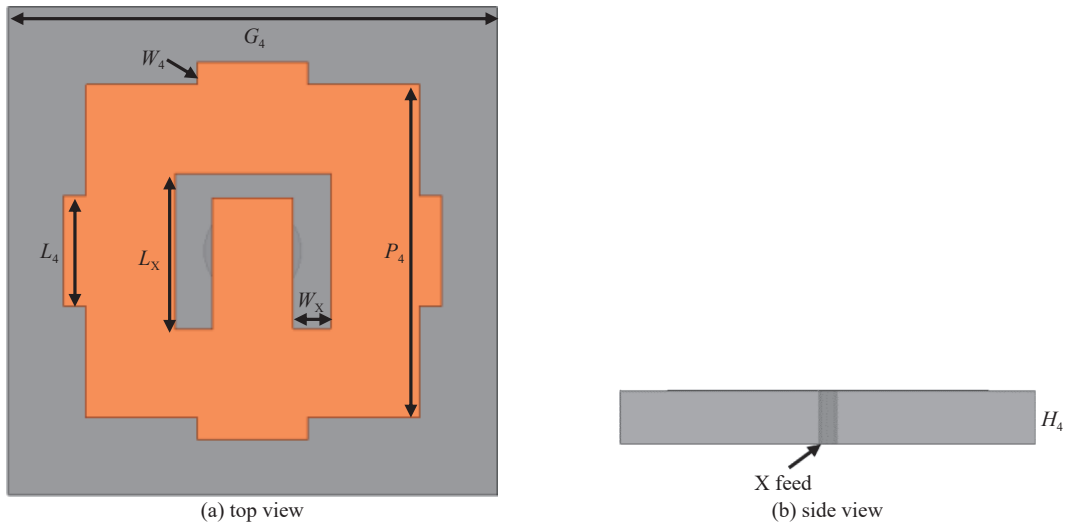


Fig. 3 X band schematic diagrams of antenna

图 3 X 波段天线模型

表 2 天线各项参量

Table 2 Parameters of fabricated antenna

G_4/mm	P_4/mm	L_4/mm	H_4/mm	W_4/mm	L_x/mm	W_x/mm
11	8	2.5	1.5	0.5	3.5	1.8

3 仿真测试的结果与分析

利用三维电磁仿真软件 (Ansoft HFSS15.0) 对天线模型进行仿真及优化, 并制作实物(如图 4 所示), 使用安捷伦矢量网络分析仪对天线进行 S 参数的测量, 如图 4(b) 所示, 并在微波暗室中分别测量不同频段增益曲线, 如图 4(a)

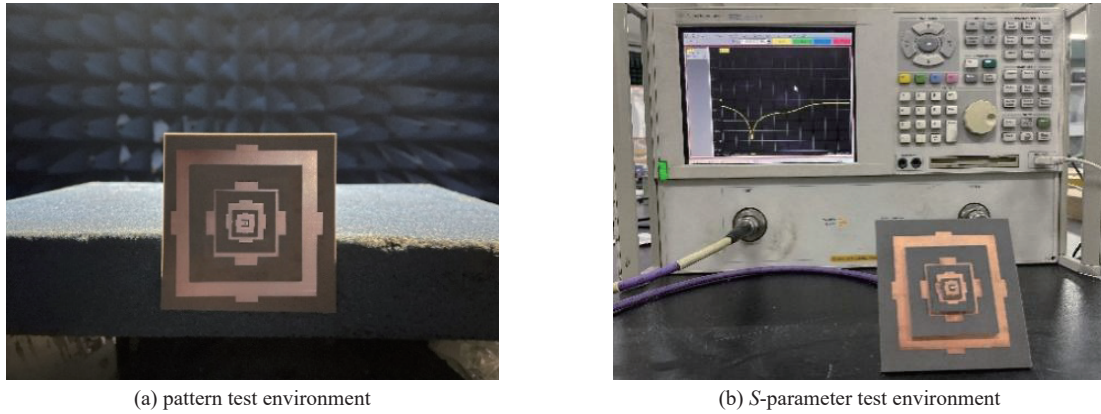


Fig. 4 Photos of fabricated antenna
图 4 天线实物图

所示。对于 L 波段, 如图 5(a) 所示, 天线仿真结果显示在 1.49~1.52 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果显示在 1.49~1.51 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 即实测结果比仿真结果阻抗带宽窄 10 MHz; 对于 S 波段, 如图 5(b) 所示, 天线仿真结果显示在 2.98~3.07 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果显示在 2.90~3.10 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果略优于仿真结果; 对于 C 波段, 如图 5(c) 所示, 天线仿真结果显示在 5.93~6.07 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果显示在 5.83~6.10 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果略优于仿真结果; 对于 X 波段, 如图 5(d) 所示, 天线仿真结果显示在 9.72~10.15 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果显示在 9.90~10.23 GHz 频段内 S_{11} 小于 -10 dB, 实测结果比仿真结果阻抗带宽窄 100 MHz。可以发现, 实测 S_{11} 比仿真 S_{11} 匹配程度更好。分析原因可能是在实物制作时, 由于 X 波段焊点是在辐射贴片上方, 焊锡的引入对阻抗有影响, 从而影响 X 波段的匹配。

图 6 为各个端口之间的隔离度, 其中 L, S, C, X 分别对应着端口 1、端口 2, 端口 3 和端口 4。图 6(a) 为 L 波段与 S, C, X 波段端口的隔离; 图 6(b) 为 S 波段与 L, C, X 波段端口的隔离; 图 6(c) 为 C 波段与 L, S, X 波段端口的隔离; 图 6(d) 为 X 波段与 L, S, C 波段端口的隔离。可以发现, 各个端口之间隔离均大于 30 dB。

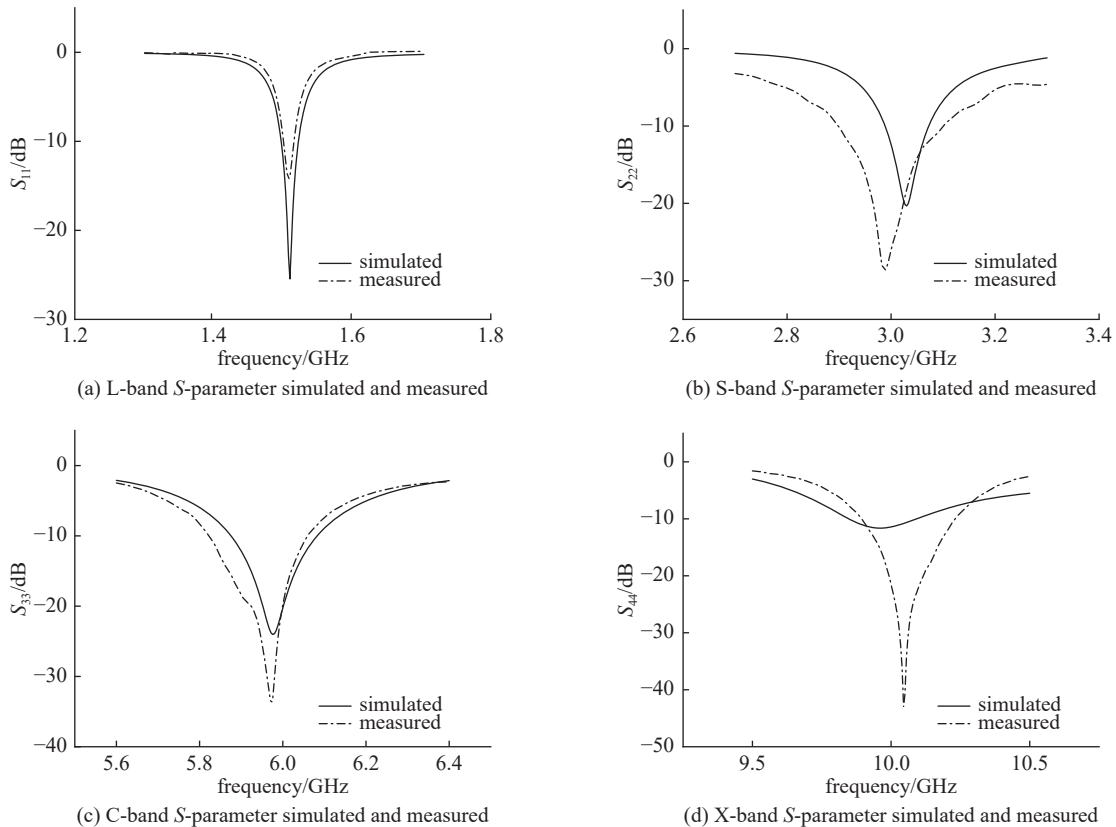


Fig. 5 S-parameters simulated and measured
图 5 S 参数仿真测试结果

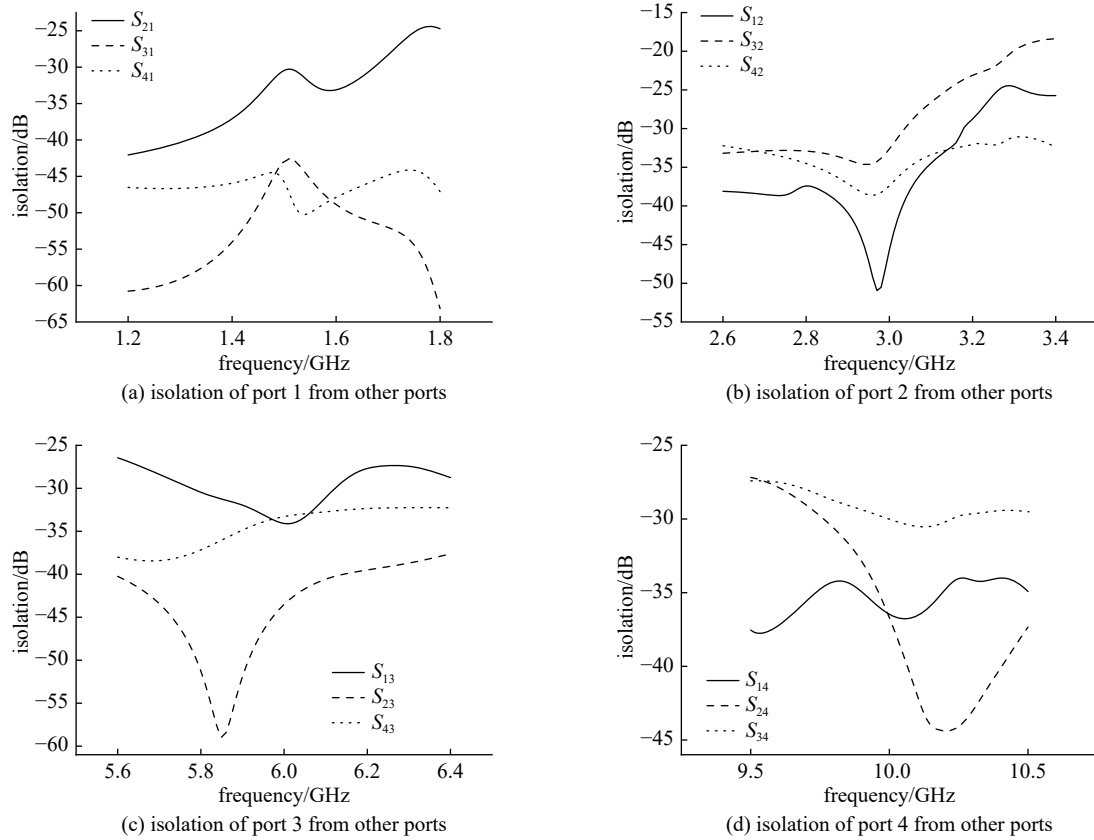


Fig. 6 Isolation of ports

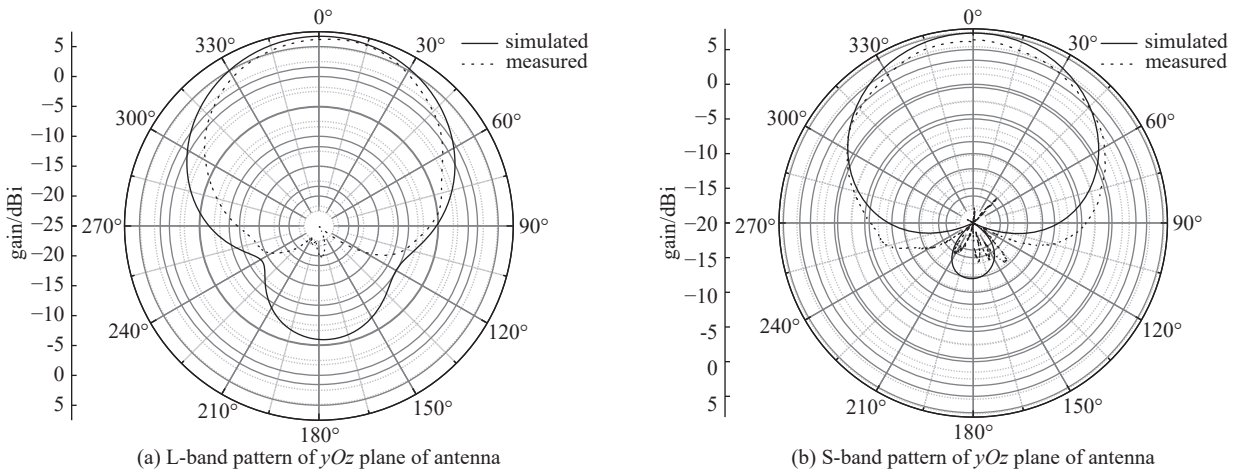
图 6 各端口之间的隔离度

图 7、图 8 分别为 yOz 面和 xOz 的辐射方向图, L, S, C, X 波段仿真与测试结果分别如图 7(a)、图 8(a); 图 7(b)、图 8(b); 图 7(c)、图 8(c); 图 7(d)、图 8(d) 所示。可以发现, 在 4 个频段, 测试结果与仿真结果吻合度较高, 因为在仿真过程中不能完全考虑实际环境, 所以必然会产生误差, 但该误差在允许范围内。

表 3 对比了不同多频段天线的性能, 其中 λ_0 为最低频点对应的自由空间中波长。对比可见, 本文所设计的天线频段最多, 整体尺寸最小, 且剖面高度最低, 各频段端口之间隔离最大。

4 结论

首次设计实现了一种能够同时工作在 L/S/C/X 四个频段的高隔离共口径低剖面微带天线。保证低剖面的前提下, 最终实现了天线小型化的设计, 尺寸仅为 $85\text{ mm} \times 85\text{ mm} \times 9.07\text{ mm}$ 。不同频段的的天线增益分别为 6.85, 7.48, 6.13 和 6.62 dBi。显示测试结果与仿真结果出现略微偏差, 因为在仿真过程中不能完全考虑实际环境, 例如材料参数的偏差、焊接不当、同轴电缆的损耗等, 从而导致测量误差。但是偏差在允许范围内, 能够在无人机、飞行器 etc 小尺寸低剖面严苛要求的场景下应用。



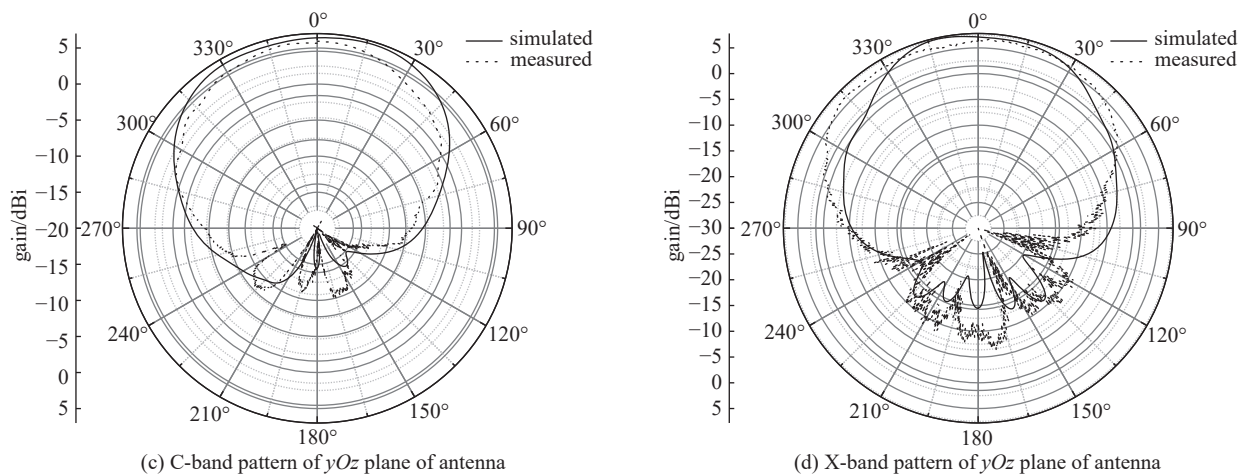


Fig. 7 Patterns of yOz plane of antenna

图 7 yOz 面辐射方向图

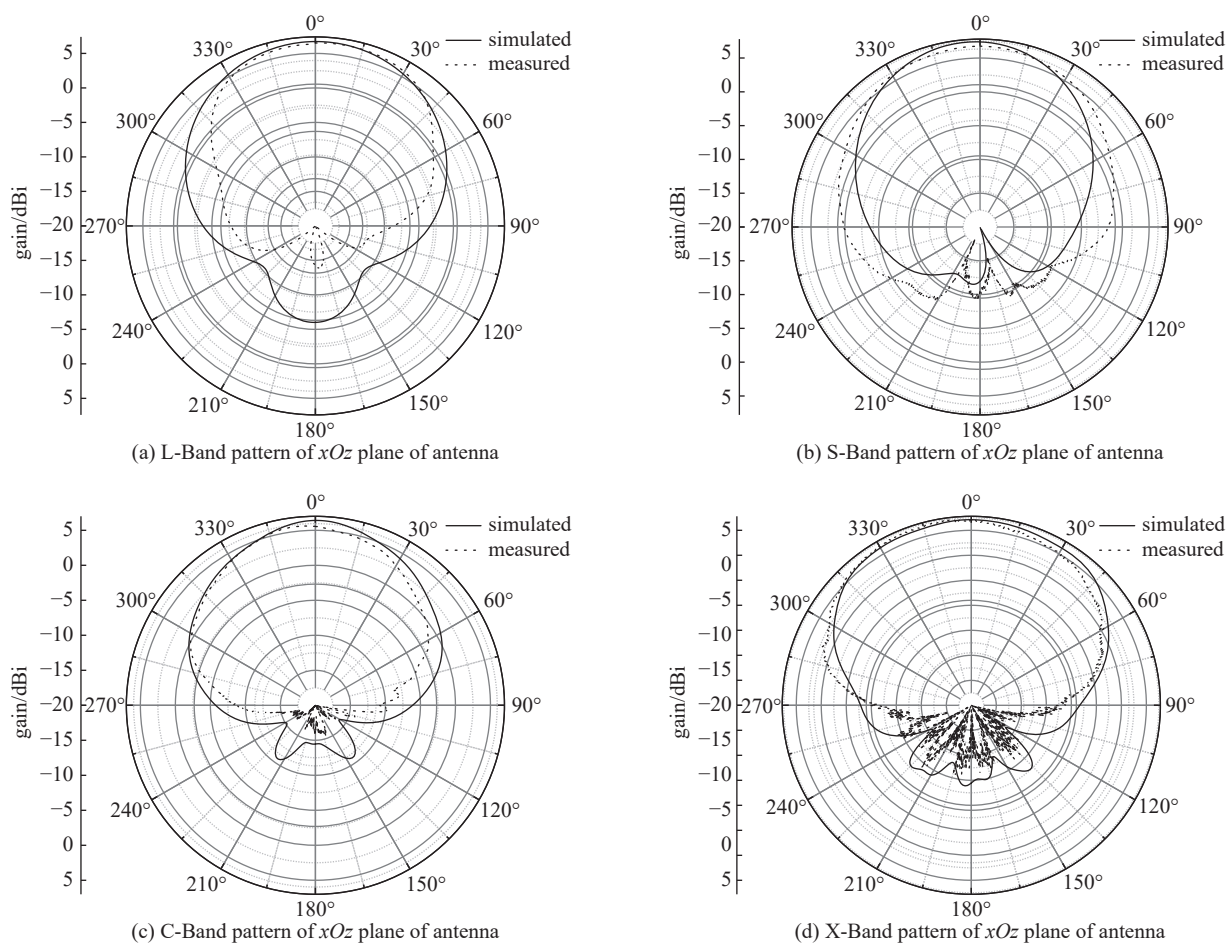


Fig. 8 Patterns of xOz plane of antenna

图 8 xOz 面辐射方向图

表 3 不同天线性能对比

Table 3 Comparison of performance for various antennas

antenna	size	band	isolation/dB
Ref [4]	$1.94\lambda_0 \times 1.94\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$	C/X	15
Ref [11]	$1.26\lambda_0 \times 1.26\lambda_0 \times 0.47\lambda_0$	S/X	10
Ref [14]	$0.87\lambda_0 \times 0.87\lambda_0 \times 0.26\lambda_0$	L/S/X	25
this work	$0.34\lambda_0 \times 0.34\lambda_0 \times 0.04\lambda_0$	L/S/C/X	30

参考文献：

- [1] Kothapudi V K, Kumar V. A single layer S/X-band series-fed shared aperture antenna for SAR applications[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2017, 76: 207-219.
- [2] Kati P, Kothapudi V K. 5-element series-feed shared aperture antenna array for X/Ku-band SAR applications[C]//2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). IEEE, 2021: 1689-1694.
- [3] Ji Shuosheng, Dong Yuandan, Wen Sichao, et al. C/X dual-band circularly polarized shared-aperture antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(12): 2334-2338.
- [4] Mao Chunxu, Gao S, Wang Yi, et al. Dual-band circularly polarized shared-aperture array for C-/X-band satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(10): 5171-5178.
- [5] Vaziri A, Kaboli M, Mirtaheri S A. Dual-polarized aperture-coupled wideband microstrip patch antenna with high isolation for C-band[C]//2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE, 2013: 1-4.
- [6] Zheng Y Y, Liu C C, Ding Yanran. A shared-aperture broadband circularly polarized antenna for satellite communications and navigation[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. IEEE, 2019: 1755-1756.
- [7] Wang Zongxin, Huang Zeqin. A microwave/millimeter wave dual-band shared aperture patch antenna array[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 218585-218591.
- [8] Piao Dazhi, Wang Meng, Zhang Linkun, et al. A two-port compact and high-isolated microstrip MIMO antenna[C]//2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE, 2020: 398-399.
- [9] Mei Peng, Zhang Shuai, Pedersen G F. A dual-polarized and high-gain X-/Ka-band shared-aperture antenna with high aperture reuse efficiency[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(3): 1334-1344.
- [10] Chen Yikai, Zhao Jiacheng, Yang Shiwen. A novel stacked antenna configuration and its applications in dual-band shared-aperture base station antenna array designs[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(12): 7234-7241.
- [11] Bai Chunxu, Cheng Yujian, Ding Yanran, et al. A metamaterial-based S/X-band shared-aperture phased-array antenna with wide beam scanning coverage[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(6): 4283-4292.
- [12] Wang Chuang, Cao Wenquan, Hong Rentang, et al. Dual-band and dual-circularly polarized shared-aperture antenna based on UAV communication[C]//2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN). IEEE, 2021: 406-410.
- [13] Jang D, Wang S, Kim Y, et al. Design of a dual-band shared-aperture radar array using printed dual-loop antennas[C]//2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE, 2021: 75-76.
- [14] Li Ke, Dong Tao, Xia Zhenghuan. A broadband shared-aperture L/S/X-band dual-polarized antenna for SAR applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 51417-51425.
- [15] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 264-319. (Zhong Shunshi. *Antenna theory and techniques*[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 264-319)