

引用格式: 关小龙, 武建锋, 吴华兵, 等. 层叠式北斗多频圆极化微带天线设计与实现[J]. 时间频率学报, 2025, 48(2): 157-166.

层叠式北斗多频圆极化微带天线设计与实现

关小龙^{1,2}, 武建锋^{1,2}, 吴华兵¹, 赵爱萍¹

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为满足机载多频卫星导航天线低剖面要求, 设计并实现了一款层叠式北斗多频圆极化微带天线。该天线工作频率覆盖了北斗卫星导航系统 S 频段 ($2\,492 \pm 4$ MHz)、L 频段 ($1\,616 \pm 4$ MHz)、B1 频段 ($1\,561 \pm 2$ MHz) 与 B3 频段 ($1\,268 \pm 10$ MHz)。设计采用短路隔离环的方法, 提高天线在 4 个导航频段工作时的隔离度。所设计的天线在 B1、L 和 S 频段采用单点馈电, 通过微扰方式实现圆极化; 而在 B3 频段采用双点馈电, 通过 3 dB 90°电桥实现圆极化设计。通过对每层天线加载环形短路柱, 在确保各频段间隔离度的同时起到防雷击作用。通过在辐射贴片上加载径向带线, 调节各层贴片谐振频率。测试结果表明, 在 B3、B1、L1 与 S 频段内, 回波损耗小于 -15 dB, 频段内法向圆极化增益大于 4 dBic, 法向 $\pm 60^\circ$ 波束范围内增益大于 -2.5 dBic, 法向轴比小于 3 dB, 满足机载卫星导航终端设备应用需求。

关键词: 低剖面; 层叠式; 圆极化; 短路柱; 径向带线

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-02-0157-10

Design and implementation of stacked BeiDou multi-band microstrip polarized antenna

GUAN Xiao-long^{1,2}, WU Jian-feng^{1,2}, WU Hua-bing¹, ZHAO Ai-ping¹

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to meet the requirement of low profile of airborne multi-frequency satellite navigation antenna, a stacked BeiDou multi-band circularly polarized microstrip antenna is designed and implemented. The operating frequencies of the antenna cover S-band ($2\,492 \pm 4$ MHz), L1 band ($1\,616 \pm 4$ MHz), B1 ($1\,561 \pm 2$ MHz) and B3 ($1\,268 \pm 10$ MHz) of the BeiDou Navigation System. The low profile is achieved by using high dielectric constant substrate. Thus, the total height of the proposed antenna is 10.5 mm (including feed network). According to the bandwidth requirements of different bands, the B1, L and S frequency bands are fed by single feed, and the circular polarization is realized by introducing perturbation. The B3 frequency band patch adopts dual feeds and 3 dB 90° bridge to achieve circular polarization. The short pins on each layer of antenna are

收稿日期: 2024-04-13; 接受日期: 2024-08-23

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (1188000WHB)

loaded to improve the isolation of patches, and play the role of lightning protection. The resonant frequency of each layer is adjusted radial branches which is etched on the patch. The measured results show that the return loss is less than -15 dB in B3, B1, L1 and S frequency band, and the normal circularly polarization gain is greater than 4 dBic in these frequency bands, the gain in the normal $\pm 60^\circ$ beam range is greater than -2.5 dBic, and the normal axial ratio is less than 3 dB. It can meet the needs of airborne satellite navigation terminal equipment.

Key words: low profile; stacked; circularly polarized; short pins; radial branches

随着北斗卫星导航系统在机载导航设备中的广泛应用^[1-3], 天线作为机载导航设备的重要组成部分, 需要接收多种频段的导航信号, 所以设计实现一种北斗多频卫星导航天线具有重要意义。卫星导航天线主要实现形式有微带天线和螺旋天线, 而螺旋天线由于纵向高度过大, 难以满足机载系统小型化集成要求。同时, 如何利用一副天线实现多频段覆盖、优化射频链路、降低收发天线匹配难度, 成为导航天线设计中亟需解决的问题之一。因此, 层叠式的小型化多频段微带天线成为机载卫星导航天线研究的热点^[4-6]。

多频段层叠式微带天线由多个单层微带天线构成, Yang^[7]利用缝隙结构实现了两个工作频段的信号接收。Chae^[8]利用两层陶瓷切角贴片结构, 实现了导航频段和数字音频无线电频段信号的发射和接收。Yang^[9]利用底部的对称斜角的贴片和对角线上有两个矩形微扰的顶部贴片产生一对简并模态, 实现两个导航频段的接收。傅世强^[10]通过加载中心短路柱和改进 T 型双馈电功分移相网络扩展传统层叠式天线的轴比带宽, Li^[11]采用由圆形通孔阵列构成两个短环降低层间耦合, 适用于高精度 GNSS 系统。Chen^[12]利用 3 层圆形贴片与短路柱, 将 UHF/ISM RFID 阅读器应用与 GNSS 功能集成到单个天线。Xu^[13]提出的 SIW 被用来当做背腔, 利用层叠式结构集成了功分器等单元, 实现 Ka 频段天线的圆极化辐射。近年来还有一些利用新工艺实现多层微带的方式, Wang^[14]利用 3D 打印技术, 把层叠天线安装在低剖面非均匀基板上, 利用交替的金属栅格来产生多频圆极化波。随着天线层数的增加, 层间的互耦会降低辐射效率, 目前层叠式天线大多数是采用 3 层或者 3 层以下的层叠结构, 很少有 4 层的天线应用于实际系统中。因此, 如何设计

3 层以上的层叠天线, 满足多频段互不干扰的导航信号的收发, 成为了近年来导航终端天线的研究热点。

本文提出利用在辐射贴片之间增加短路圆环的方法抑制表面波, 抑制频段间的互耦, 同时通过采用高介电常数介质基板, 降低天线剖面高度, 基于此设计出一种 4 层多频段北斗微带圆极化天线, 覆盖了包括北斗短报文上行 L 频段, 下行 S 频段以及北斗 B1/B3 的接收频段, 并且通过仿真计算与加工测量, 结果表明该天线可以覆盖北斗的 4 个频段, 并且满足了多频段导航天线的小型化要求。

1 天线结构设计

对于高精度北斗多频天线来说, 获得对称的方向图是基本要求, 所以天线结构必须是对称的。该天线采用对称式贴片和探针馈电方式, 考虑到高频段探针需要穿过相邻低频段层, 为了降低馈电网络设计难度以及后期工艺要求, 高频段的 B1、L 频段与 S 频段采用单点探针馈电, B3 频段采用双点探针馈电。天线结构如图 1 所示, 组成结构包括: S 频段贴片, L 频段贴片, B1 频段贴片, B3 频段贴片, 短路柱圆环和馈电网络。其中的贴片都刻蚀在介电常数为 9.8 的复合陶瓷介质基板上, 考虑到天线在每个频段的带宽不同, 介质基板的厚度分别为 2.5 mm (B3 层) 与 2 mm (B1 层、L 层和 S 层)。4 层天线由小到大自下而上层叠放置, 其中 B3 频段频率最低, 贴片位于最下层, 贴片长与宽都为 L_1 , 利用幅度相等, 相位差为 90° 的两个馈电端口进行馈电, B3 频段馈电网络采用带状线 3 dB 分支线耦合器实现。

B1 频段贴片位于 B3 频段天线层上, 使用单点

探针馈电的方法实现圆极化,贴片宽度为 L_2 ,馈电点则在方形贴片的对角线上。因为是单点馈电,基于空腔模型理论,需要给贴片上加入几何微扰,通过微扰单元使矩形贴片的 TM_{10} 模与 TM_{01} 模两个极化正交的简并模分离,选取合适的尺寸,可以在远场中得到两个等幅的电场分量,相位相差 90° ,从而实现天线辐射圆极化波的目的,同时需要对B1贴片两个对角进行如图1所示的切角处理。为了改善轴比,额外刻蚀的矩形贴片在方形贴片的两个方向也有所差异。L频段与S频段的贴片依次位于B1贴片的上层,同样的采用单探针馈电,贴片宽度分别为 L_3 与 L_4 ,并且也对贴片进行了微扰处理。为了便于控制与调整,所有频段的贴片都在贴片边缘多刻蚀了额外的矩形贴片,以方便后期调试处理。

短路环是该天线的关键结构,短路环1到环4的直径分别为 d_1, d_2, d_3 和 d_4 。其中短路环1从B3频段贴片连接到接地面,短路环2从B1频段贴片连接到B3频段贴片,短路环3从L频段贴片连接到B1频段贴片,短路环4从S频段贴片连接到L频段贴片。4层短路环(通过圆形阵列形成)将天线的辐射器与接地板连接在一起,形成直流短路,能够很好地抑制雷电以及浪涌干扰,保护天线后端的射频电路。

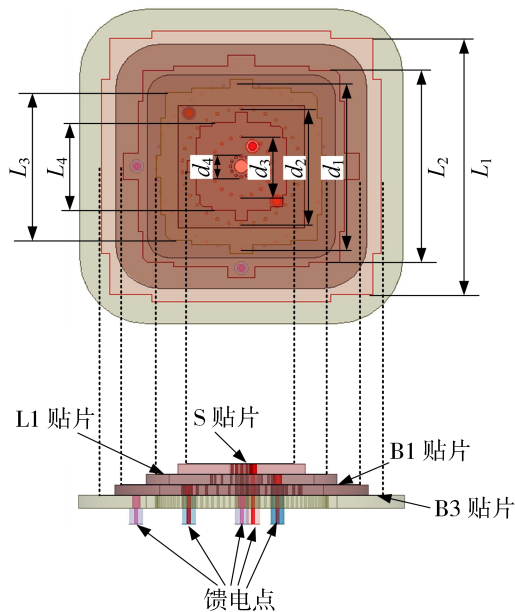


图1 天线结构及侧视图

2 天线参数研究与分析

贴片的调试分别为馈电点位置的调整、方形贴片的尺寸以及短路环的调整。其中馈电点位置与贴片尺寸决定了微带天线的阻抗特性,贴片尺寸利用经验公式(1)确定:

$$L = 0.5\lambda_g - 2\Delta l \quad (1)$$

式(1)中: λ_g 为工作波长,而 $\Delta l = 0.412h \left(\frac{\epsilon_r + 0.3}{\epsilon_r + 0.258} \right)$

$\left(\frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.8} \right)$,其中 W 为微带贴片的宽度, h 代

表介质基板的厚度。

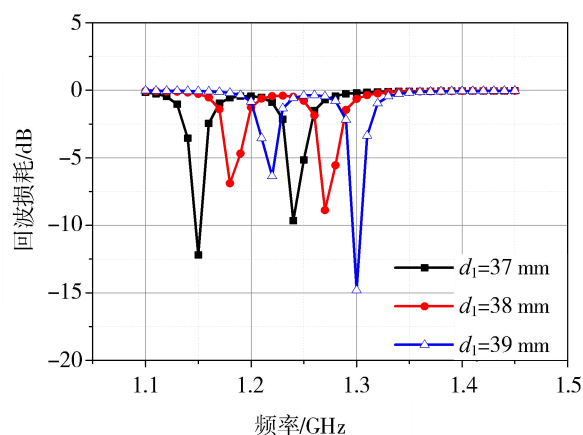
根据公式(1)确定贴片尺寸 $L_1 \sim L_4$,并对单点馈电的B1、L以及S层贴片做微扰处理,再利用三维电磁仿真软件Ansoft HFSS对天线的相关参数进行仿真优化,对不同的工作频率选择合适的天线尺寸,由于贴片尺寸的调节属于微带天线设计的常规步骤,本文不再赘述。

本文主要从短路环直径参数出发,研究短路环直径 d_1, d_2, d_3 和 d_4 对天线性能的影响。通过每次改变一个参数,固定其他参数来研究该天线的隔离柱参数。图2(a)~(d)为不同尺寸的(短路)环对天线的谐振频率(反射系数)的影响。图2(a)结果表明,在B3频段天线的谐振对频率的变化非常敏感。当直径 d_1 从37 mm增加到39 mm时,谐振频率增加60 MHz。图2(b)显示了不同 d_2 对天线谐振的影响。结果表明,当短路环2的直径由26.4 mm增加到28.4 mm时,B1频段的谐振频率增加90 MHz。图2(c)显示了不同 d_3 对天线谐振的影响。结果表明,当短环3的直径由13.6 mm增加到17.6 mm时,L1频段谐振频率增加了约160 MHz,由于L1与B1频段相距较近,所以由图2(c)可知,短路环3直径的调节尤为重要,这决定了是否天线可以让B1与L1频段分开使用。图2(d)显示了不同 d_4 对天线谐振的影响。结果表明,当短环4的直径 d_4 由5.2 mm增加到6.8 mm时,S频段谐振频率增加约50 MHz。除了环形短路探针整体的半径,短路柱自身的半径对天线的谐振频率也有影响,如图3所示,随着短路柱半径的增大,谐振频率

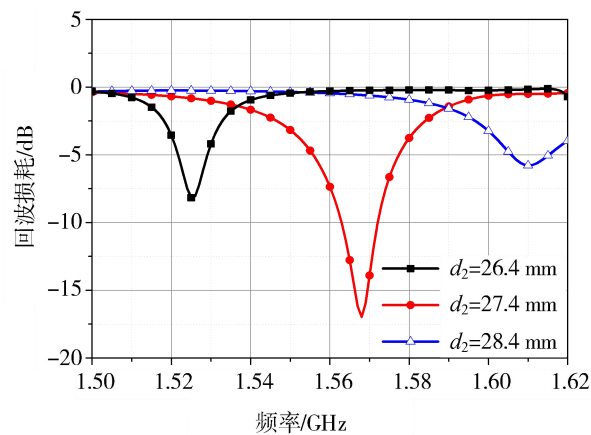
也随之提高,并且环形短路柱的半径只对相应频段的谐振性能有影响,说明其起到了良好的隔离效果。

由于短路柱电感的作用,其谐振频率会随着短路柱环形半径以及短路柱之间的距离变化而变化,

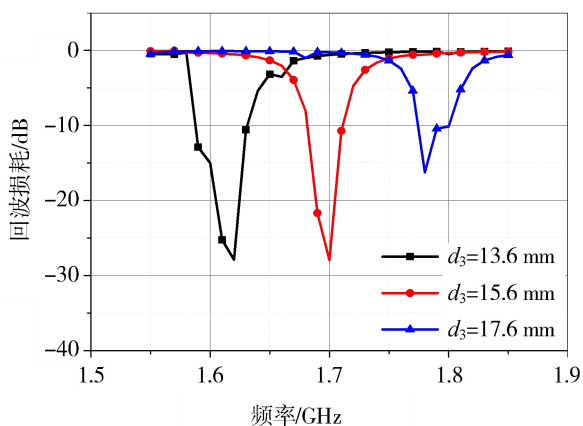
环形短路柱的存在会对天线整体的谐振频率产生影响,频率越高,对天线产生的影响就越明显。经过软件仿真与优化,最终所设计的天线的主要参数如表 1 所示。



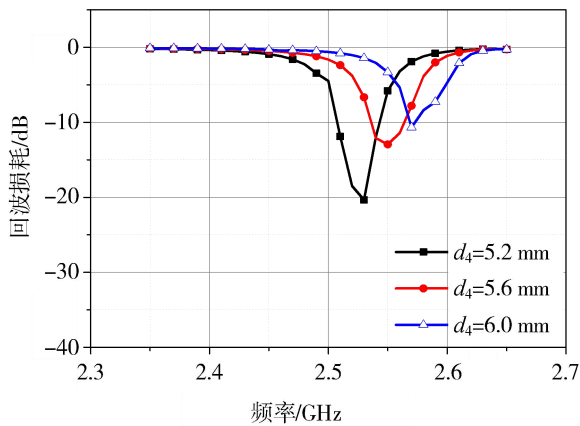
(a) d_1 对 B3 频段的影响



(b) d_2 对 B1 频段的影响

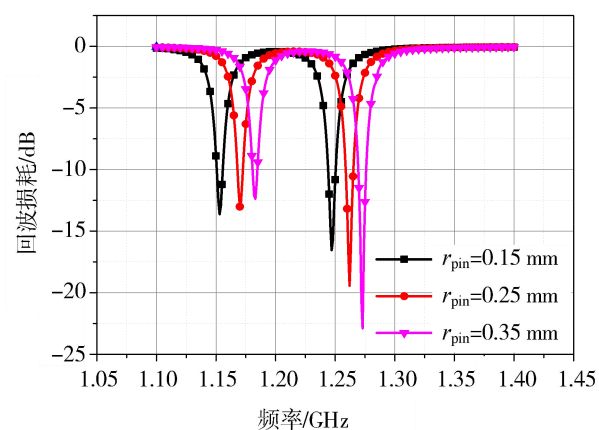


(c) d_3 对 L 频段的影响

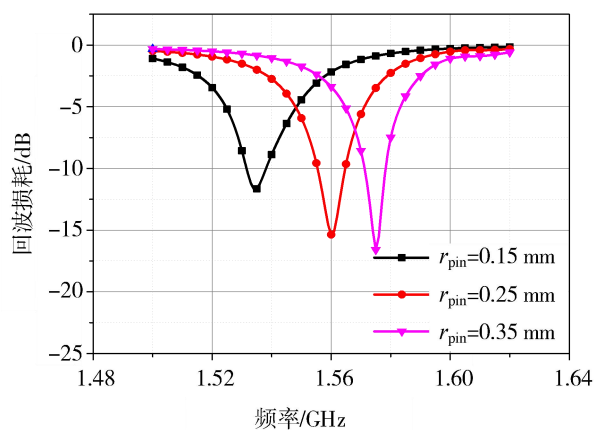


(d) d_4 对 S 频段的影响

图 2 环形短路柱直径对谐振频率的影响



(a) r_{pin} 对 B3 频段的影响



(b) r_{pin} 对 B1 频段的影响

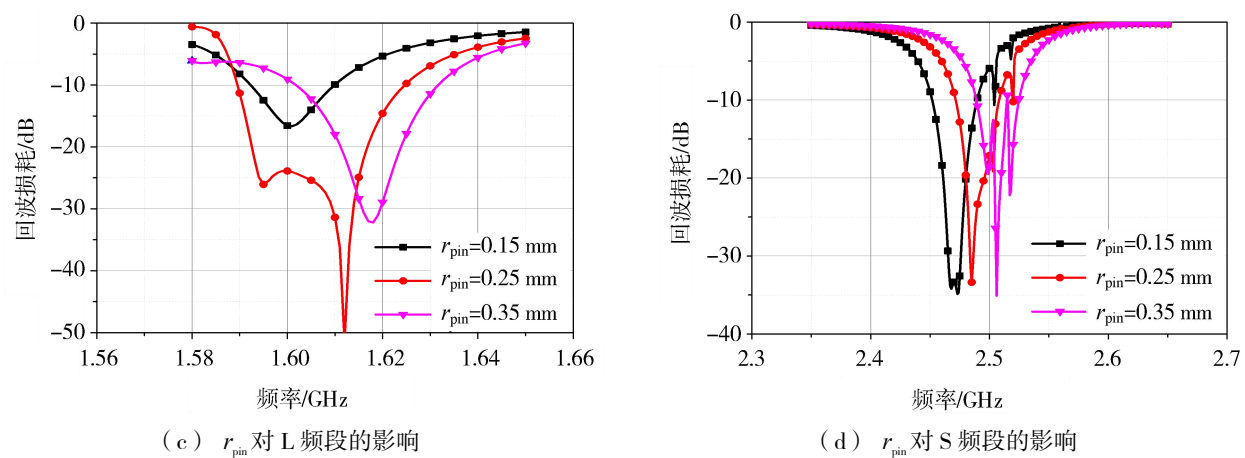


图 3 单个短路柱半径对谐振频率的影响

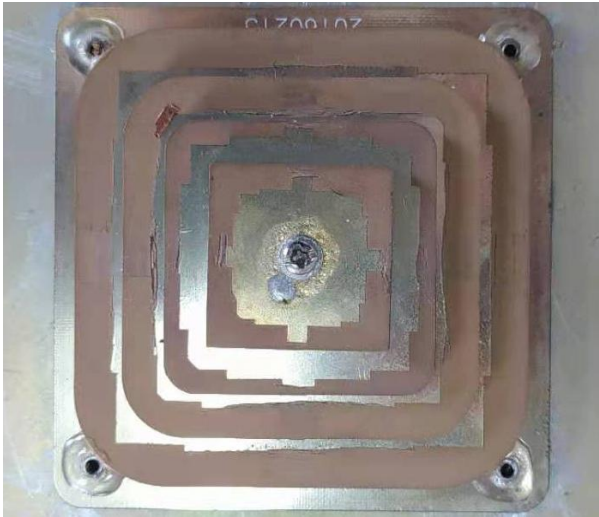
表 1 天线主要参数 单位：mm

参数	数值	参数	数值
L_1	58.6	d_1	37.8
L_2	44.0	d_2	26.4
L_3	34.0	d_3	13.6
L_4	18.2	d_4	4.4

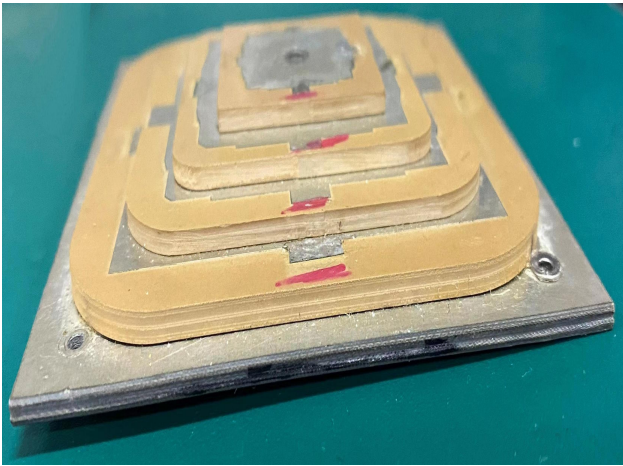
3 测试结果与分析

根据优化后的结果，对天线整体进行加工，天线的实物如图 4 所示。

在微波暗室利用矢量网络分析仪对天线的阻抗特性及辐射特性和 S_{11} 进行测量。图 5 为天线在不同工作频段的仿真与测试的阻抗特性，其中纵坐标代表每层天线馈电端口的回波损耗，图中实线表示仿真的回波损耗值，虚线表示实际测量出的回波损耗值。测量结果表明天线可以分别工作在下行 S 频段 ($2\,492 \pm 4\text{ MHz}$)，上行 L 频段 ($1\,616 \pm 4\text{ MHz}$) 以及接收 B1 频段 ($1\,561 \pm 2\text{ MHz}$) 与 B3 频段 ($1\,268 \pm 10\text{ MHz}$)，仿真与实测结果吻合良好，表明利用此种层叠式排列方式的天线在多个频带上都能表现出良好的阻抗性能。注意其中仿真计算时 B3 频段没有加载馈电网络，而测量时增加了电桥作为双端口馈电的馈电网络，因此在测量时，实际测量的是“馈电网络+天线”的这一组合。

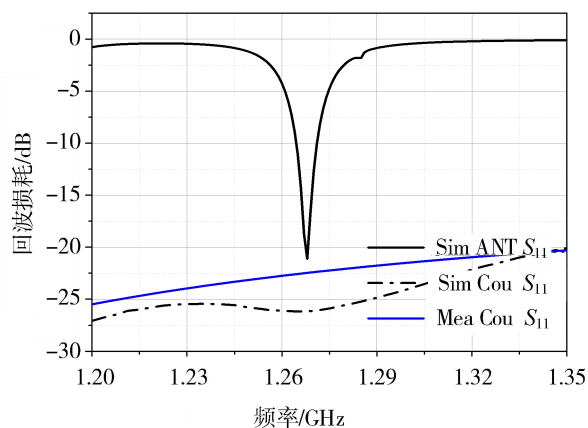


(a) 天线俯视图

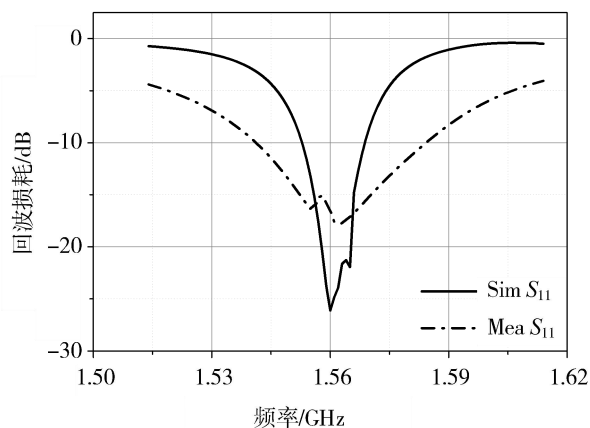


(b) 天线侧视图

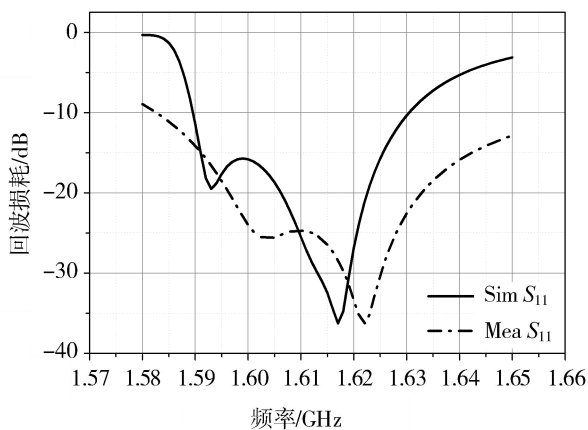
图 4 天线实物图



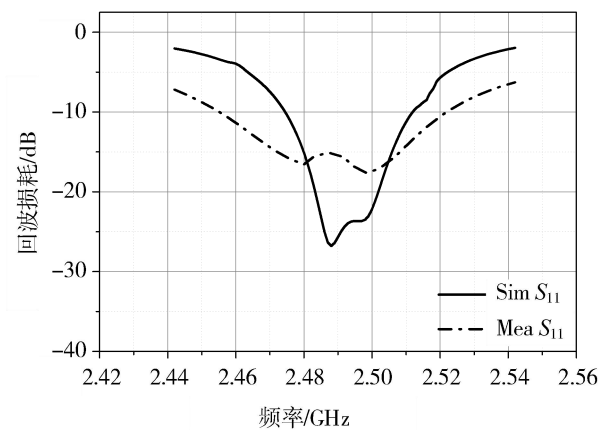
(a) B3 频段



(b) B1 频段



(c) L 频段

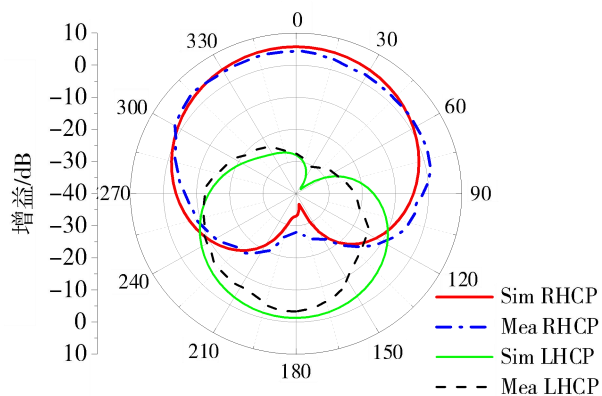


(d) S 频段

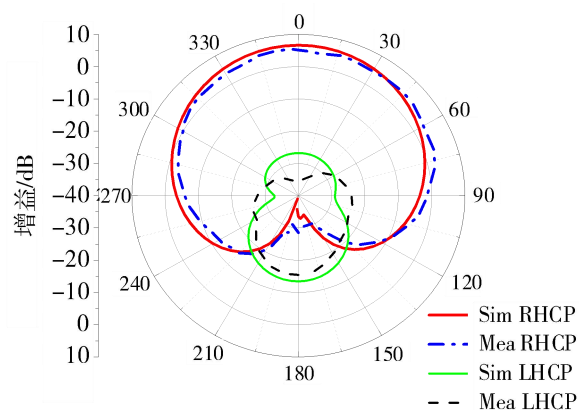
图 5 天线回波损耗

图 6 为天线 H 面在 4 个频点上的仿真和测量的增益与频率的关系, 其中纵坐标代表天线的左旋/右旋增益。根据测量结果可知, 在 4 个频点处测得的增益均低于仿真结果, 最大增益高于 4 dBic, 并且各个频点波束宽度为 $\pm 60^\circ$ 增益都高

于 -2.5 dBic。其中 B3 频段, B1 频段与下行链路 S 频段辐射右旋圆极化波, L 频段为上行链路辐射左旋圆极化波。增益降低的主要原因是馈电网络的引入增大了损耗, 同时加工采用的复合陶瓷材料损耗角正切值偏大进一步造成增益下降。



(a) 1 268 MHz



(b) 1 561 MHz

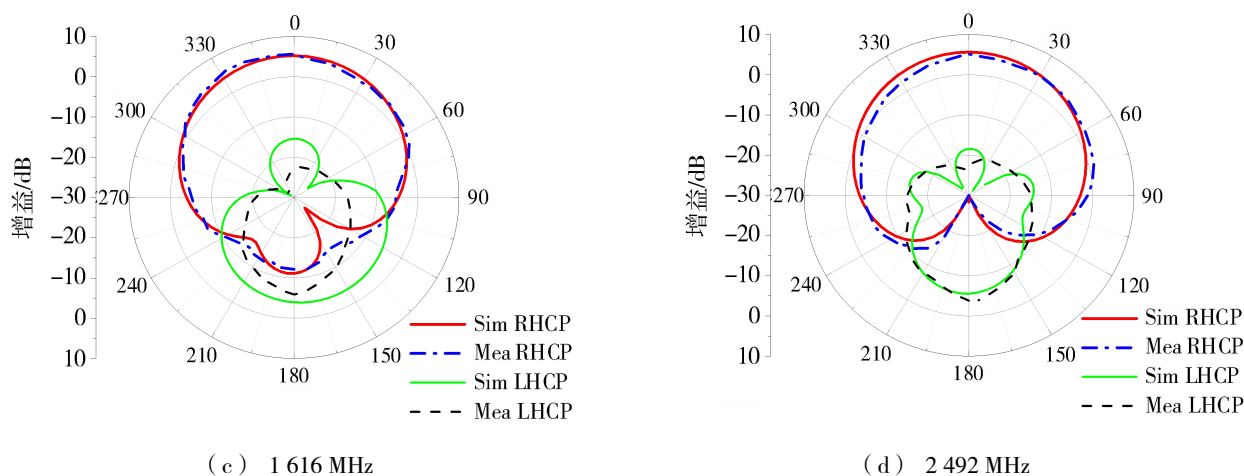
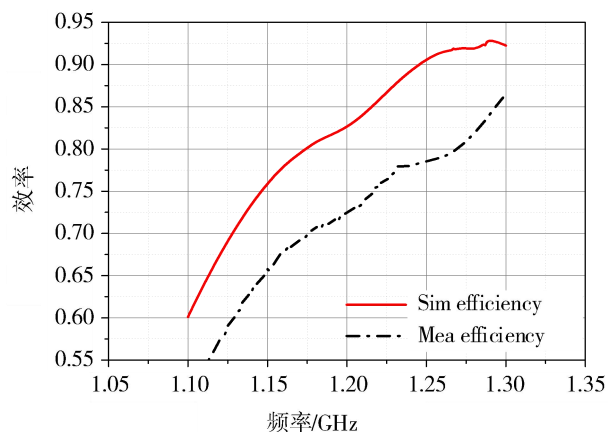


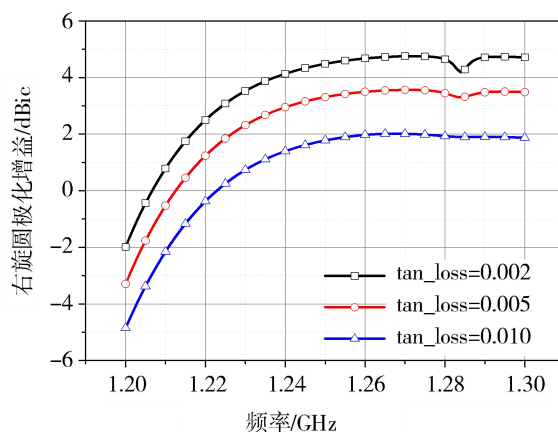
图6 4个北斗频段的仿真与测试方向图

为了说明馈电网络以及损耗角正切对增益的影响,计算了B3频段仿真与实测的效率以及在不同介电常数下的右旋圆极化增益,如图7(a)和(b)所示,可以看出实际测量的天线效率要低于仿真

值,并且随着耗角正切值增加,天线增益随之降低。圆极化天线除了增益之外,还需要对天线的轴比带宽以及增益带宽进行测量分析。



(a) B3 频段天线效率仿真 VS 实测结果



(b) 损耗角正切对 B3 频段右旋圆极化增益的影响

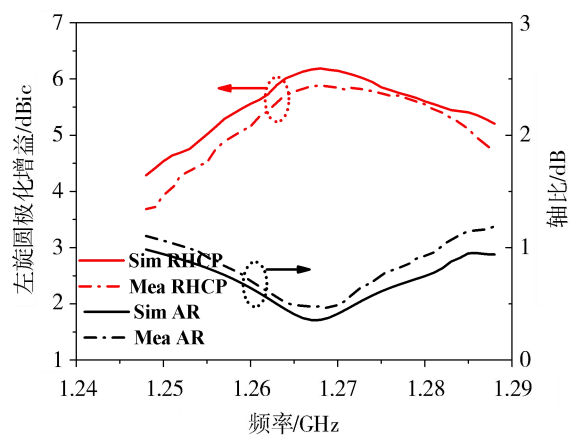
图7 B3 频段天线效率与不同损耗角正切下的增益

图8为4个频段内法向增益与轴比随频率变化的仿真与测试曲线,其中左边的纵坐标代表天线的圆极化增益,右边的纵坐标代表天线的轴比。根据测量结果可知4个频段内天线的圆极化增益均大于4 dBic,表明天线在4个频段都有较为稳定的圆极化增益;同时其轴比在频带内都小于3 dB,实测的轴比高于仿真值,主要是由于馈电网络幅度不均衡以及相位偏差都会造成天线轴比恶化^[15],同时测试馈线的引入会造成天线边界条件不对称,

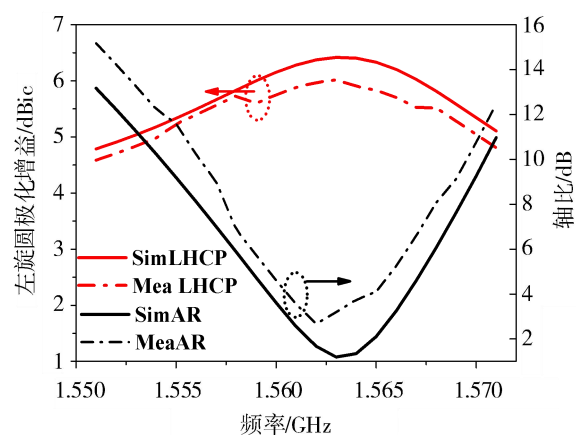
也会影响天线轴比性能。

除了上述指标,轴比的波束宽度也是导航通信的重要指标^[16]。

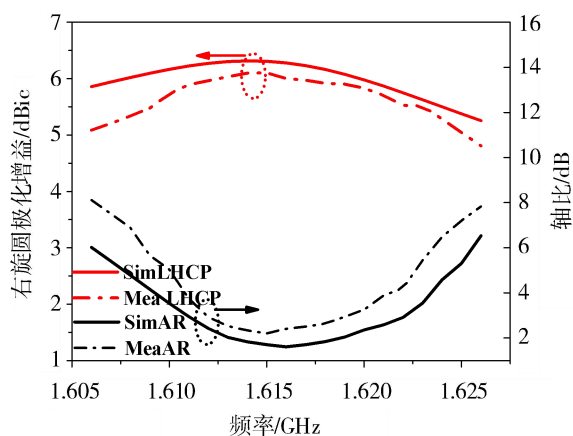
图9是在GNSS 4个频段内选取的4个频点的上半空间的轴比方向图,可以看出,测量得到的B3、B1、L以及S频点处轴比波束宽度分别是125°、180°、60°以及80°,轴比波束测量结果表明此天线在上半空间辐射的电磁波具有较好的圆极化特性,适合GNSS通信使用。



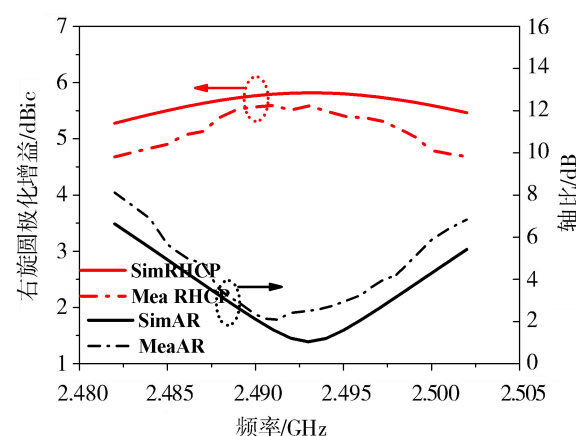
(a) B3 频段



(b) B1 频段

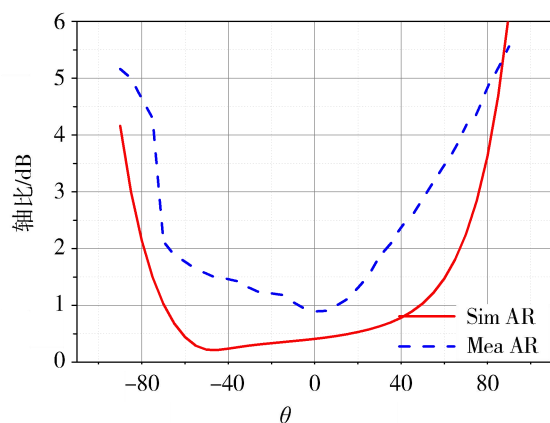


(c) L 频段

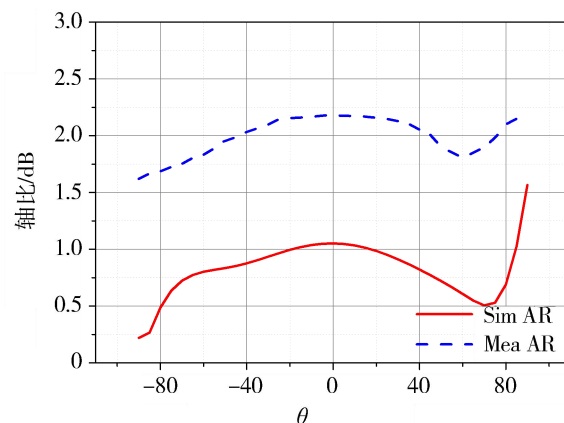


(d) S 频段

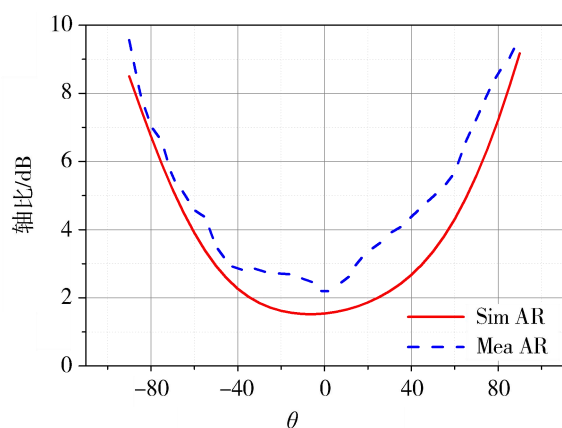
图 8 各频段增益与轴比随频率变化曲线



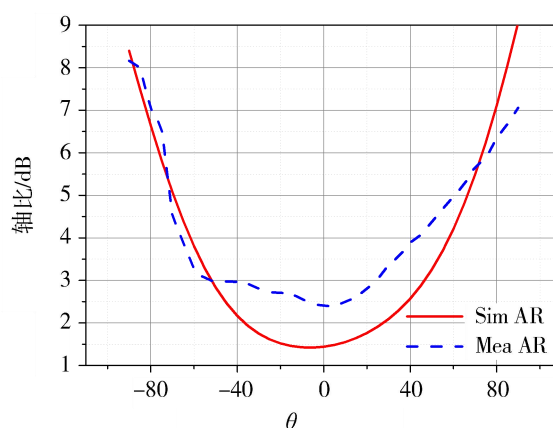
(a) B3 频段



(b) B1 频段



(c) L频段



(d) S频段

图9 4个北斗频点轴比波束

4 结语

本文设计并实现了一款用于机载导航的层叠式北斗多频圆极化微带天线,采用不同尺寸的环形短路柱实现了频带之间良好的隔离。在设计过程中,仿真分析了环形短路柱对于天线性能的影响;在此基础上,通过调整天线贴片参数与馈电点位置来改善阻抗匹配情况,使其在4个频段都实现圆极化性能;其次,为了方便天线的修改与调整,采用调整径向长度带线、切角等方式调节天线的谐振频率与圆极化特性;最后,根据优化尺寸,制作出天线实物并对其电磁性能进行了测试。测试结果表明,该天线在北斗的B3, B1, L与S频段内回波损耗均小于-15 dB,在法向方向上可以获得4 dBic以上的圆极化增益,法向 $\pm 60^\circ$ 波束范围内增益大于-2.5 dBic,法向轴比小于3 dB,满足机载卫星导航天线在不同频段互不影响的隔离要求。

参考文献:

- [1] 李亚玲, 杨玉卫, 周甄. 机载北斗定位系统应用研究[J]. 现代信息科技, 2020, 4(7): 36-38+41.
- [2] 方芳, 杨航, 李伟, 等. 一种基于北斗的航空搜救机载指挥系统设计[J]. 航空科学技术, 2018, 29(10): 48-52.

- [3] 朱一龙, 刘瑞华, 王剑, 等. 基于北斗 RDSS 的通用航空监视系统设计与实现[J]. 航空科学技术, 2018, 29(2): 55-60.
- [4] 郑一, 李海岩, 纪涛涛, 等. 一种宽频带导航天线的研究与设计[J]. 微波学报, 2019, 35(1): 7-12+28.
- [5] NASIMUDDIN N, QING X. A single-feed compact wide-band circularly polarized antenna for INMARSAT/GNSS applications[C] // 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020: 1-4.
- [6] 吴峻岩, 于家傲, 姜永金, 等. 电小尺寸锥台上双馈圆极化共形微带天线阵设计[J]. 现代电子技术, 2019, 42(23): 17-21+25.
- [7] YANG X J, GE L, WANG J P, et al. A differentially driven dual-polarized high-gain stacked patch antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(7): 1181-1185.
- [8] CHAE S, AHN B, YEO T, et al. An automotive stacked ceramic patch antenna with an integrated GNSS and SDARS antenna[C] // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2017: 1-2.
- [9] YANG H C, FAN Y, LIU X. A compact dual-band stacked patch antenna with dual circular polarizations for BeiDou Navigation Satellite Systems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1472-1476.
- [10] 傅世强, 钟华华, 李婵娟. 超高频 RFID 系统的宽带圆极化微带天线优化设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(9):

- 17-20.
- [11] LI L X, HUANG Y B, ZHOU L, et al. Triple-band antenna with shorted annular ring for high-precision GNSS applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15): 942-945.
- [12] CHEN Y, LIU Q, TANG X, et al. Compact triple-band circularly-polarized directional antenna for UHF/ISM RFID mobile readers with GNSS band[C] // 2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2018: 1-3
- [13] XU H F, ZHOU J Y, ZHOU K Z, et al. Planar wideband circularly polarized cavity-backed stacked patch antenna array for millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5170-5179.
- [14] WANG S Y, ZHU L, WU W. 3-D printed inhomogeneous substrate and superstrate for application in dual-band and dual-CP stacked patch antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(5): 2236-2244.
- [15] 吴瑞荣, 邹永庆, 汪伟. 卫星移动通信天线极化误差分析[J]. 信息通信, 2013(5): 23-24.
- [16] 陈曦. 相控阵天线相位中心以及卫星通信圆极化天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.