

缝隙加载的低剖面双频北斗天线设计

李锐雄¹, 林福民^{1*}, 李晓鹏², 张华福²

(1. 广东工业大学物理与光电工程学院, 广东广州 510006; 2. 广州中海达卫星导航技术股份有限公司, 广东广州 511400)

摘 要: 本文设计了一款应用于北斗系统(BeiDou System, BDS)的新型低剖面双频段贴片天线。该天线基于单层贴片天线结构,通过“桥形”缝隙加载的方式,引入新的谐振频率,使天线工作在双频段(分别以1 176 MHz和1 575 MHz为中心频点),实现共面双频辐射。同时加载4个环形缝隙,仅用一组馈电针进行耦合馈电,方便调节阻抗匹配,同时减少馈电针数量,简化馈电网络复杂性。另外在天线侧面加载“ π 型”金属枝节,进一步优化高频阻抗匹配。实测结果表明,该天线在B1C频段和B2a频段的增益大于3.5 dBic,轴比均小于3 dB。频谱显示,该天线能工作于北斗系统的B1C、B2a频段,有望应用于北斗定位系统终端设备。

关键词: 贴片天线;双频;缝隙加载;北斗系统;低剖面

中图分类号: TN828.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)08-2679-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230444

Design of a Slot-Loaded Low-Profile Dual-Frequency Antenna for Beidou System

LI Rui-xiong¹, LIN Fu-min^{1*}, LI Xiao-peng², ZHANG Hua-fu²

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. Hi-Target Surveying Instrument Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China)

Abstract: A new low-profile dual-band patch antenna for BeiDou system (BDS) applications is designed in this paper. The antenna is based on a single-layer patch antenna structure, and a new resonant frequency is introduced through loading “bridge-type” gaps, so that the antenna operates in dual frequency bands (resonant at 1 176 MHz and 1 575 MHz, respectively), realizing coplanar dual-frequency radiation. Meanwhile, four annular gaps are loaded and only one set of feeding pins is used for coupled feeding, which contributes to adjust impedance matching while reducing the number of feeding pins and simplifying the feeding network. In addition, “ π type” metal branches are installed on the side of the antenna to further optimize impedance matching in high frequency band. The measured results show that the gain of the antenna is greater than 3.5 dBic in both the B1C band and B2a band, and the axial ratio are less than 3 dB in the above frequency bands. The spectrum shows that the developed antenna operates in the B1C and B2a frequency bands of Beidou system, and is expected to be applied to the terminal equipments of Beidou positioning system.

Key words: patch antenna; dual-band; gaps loading; BeiDou System; low profile

1 引言

飞速发展的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)在现代社会中得到了广泛的应用。近年来,我国拥有完全自主知识产权的北斗卫星导航系统(BeiDou System, BDS)带动了国产导航产业的蓬勃发展,各式各样的导航设备对北斗系统的导航需求日渐增长。北斗天线作为导航设备接收电磁波的“窗口”,其性能将直接影响设备终端的信号质量与重量体

积。导航天线技术的发展集中在高精度、多频段、小型化和低成本等方面。为了更好地满足北斗终端设备的市场需求,一般要求天线满足增益较高、圆极化性能良好的特点,同时满足多频辐射、成本低、结构简单等特点。因此,对结构简单的低剖面双频北斗导航天线开展研究变得十分必要。

在天线领域内,贴片天线因具有易加工、易实现圆极化等诸多优点而被广泛应用^[1]。影响贴片天线性能的因素很多,关键因素包括介质材料及贴片结构等,这

些因素将直接影响天线各种重要性能参数. 设计者要实现多频化, 可以将多层贴片天线堆叠, 构成层叠式天线^[2,3], 但这样无疑会增加整体厚度及加工成本, 且不利于小型化; 也可以通过增加寄生单元, 产生新频率, 但一般会增加天线复杂度, 且尺寸较大^[4,5]. 为了降低贴片天线的剖面厚度, 可以压缩层叠式天线的每层介质厚度, 但效果比较有限.

同时, 设计者为了满足导航天线圆极化的性能要求, 往往采用拥有较高对称性的多点馈电方式, 主要包括两种方式, 即两点馈电^[6,7]与四点馈电^[8]. 四点馈电因其更高的对称性会比两点馈电具备更良好的圆极化性能^[9]. 然而一款贴片天线为了实现双频圆极化辐射, 往往整个天线都是八点馈电^[10-14], 因为常规的方式是给每个频段各采用四点馈电, 如此一来容易导致馈电网络的设计难度及加工成本变高. 以解决这个问题为目的, 文献^[15]将高低频段的两组馈电点分别进行两两相接, 但造成的后果是天线的增益恶化.

针对上述的问题, 本文提供了一种设计思路, 并通过仿真与调试提供一种低剖面的双频北斗导航天线. 结果显示, 天线在 B1C 频段最大增益约为 3.9 dBic, 在 B2a 频段最大增益约为 3.6 dBic. 该天线采用电镀辐射技术在单层开缝金属贴片实现双频辐射, 缝隙的形状构成“桥形”. 介质基板的侧面引入 4 个“ π 型”金属枝节, 与接地面相接, 用来调节高频阻抗匹配. 为了更好地实现阻抗匹配, 在贴片上馈电针对应的位置挖去 4 个圆环形缝隙, 馈电针与贴片上的小圆形金属相接, 对天线构成电容耦合馈电. 该天线虽然是双频段辐射, 却仅需要一组馈电针 (4 根), 简化了结构, 降低了馈电网络的成本. 馈电网络结合了 3 dB 电桥和微带线设计^[16], 用于一端口和四端口之间的转换.

2 理论分析与结构设计

2.1 理论分析

设计普通圆形贴片天线时, 可用式 (1)、式 (2) 计算贴片初试尺寸^[17,18]:

$$R = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

其中, R 代表了圆形贴片的半径尺寸 (单位为 mm); h 代表贴片天线的介质厚度 (单位为 mm); ϵ_r 则代表介质的相对介电常数; f_r 代表天线的谐振频率 (单位为 Hz).

使用前述计算结果作为本文所提供的导航天线模型的初试尺寸, 然后通过仿真调整得到一个所需的谐振频率, 再加载缝隙和金属枝节, 引入新的谐振频率,

仿真优化到所需的 2 个谐振频率.

在馈电方式的考虑上, 因为单馈电点带宽窄, 圆极化性能差, 而在双馈电点和四馈电点间, 为了得到更好的圆极化特征, 选择了四点馈电方式, 能保持结构整体的对称性, 更好保证天线的相位中心稳定性^[16], 此外令水平面上各个方向的性能保持一致. 馈电点位置的确定根据经验初定大概, 再利用仿真工具确定, 一般以 50 Ω 为最佳匹配.

与单馈电点阻抗匹配的仿真研究不同, 多馈电点实现圆极化的贴片天线仿真研究中, 常规的 S 参数无法准确表征其阻抗匹配特征. 微波网络理论中, 多馈电点实现圆极化的贴片天线可以视为多个馈源的多端口网络, 仿真时, 同时激励天线的 4 个馈电端口, 这样和实际情况吻合, 此时须考虑端口间的相互影响, 引入 ActiveS 参数来表征此时的阻抗匹配特征, 它描述多端口网络的所有端口均接上馈源时, 某个端口的反射系数:

$$\text{ActiveS}_i = \frac{b_i}{a_i} = \frac{\sum_{j=1}^n S_{ij} a_j}{a_i} = S_{ij} \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{a_i} \quad (3)$$

其中, a_i 和 a_j 分别表示第 i, j 个端口的输入电压; b_i 表示第 i 个端口的输出电压 (反射电压). n 端口网络有 n 个 ActiveS 参数, 对于四馈电点圆极化天线, 4 个馈电点的功率相等、相位依次相差 90°, 可令 $a_1=1, a_2=j, a_3=-1, a_4=-j$, 则

$$\begin{aligned} \text{ActiveS}_1 &= S_{11} + jS_{12} - S_{13} - jS_{14}, \\ \text{ActiveS}_2 &= -jS_{21} + jS_{22} + jS_{23} - jS_{24}, \\ \text{ActiveS}_3 &= -S_{31} - jS_{32} + S_{33} + jS_{34}, \\ \text{ActiveS}_4 &= jS_{41} - S_{42} - jS_{43} + S_{44} \end{aligned} \quad (4)$$

同时四馈电点贴片天线, 一般只含有各向同性、线性介质, 天线结构对称, 馈电点位置均匀对称分布, 馈源功率相等. 所以同一个天线的每个端口的 ActiveS 参数的分贝值一般都是一样的, 故在研究过程可以只观察其中一个端口 (如一端口) 的计算值即可.

2.2 结构设计

图 1 给出了天线的主体结构. 该天线的结构主要包括单层辐射贴片、一组馈电探针、侧面金属枝节、中心短路柱、馈电网络, 介质采用厚度为 8 mm 的 PPO 材料, 性能良好且成本低. 在天线结构中心开一个过孔, 内壁电镀金属, 将辐射贴片与接地面相接, 截面形状为圆形的贴片天线. 根据天线理论分析可知其圆心处电场强度为零, 因此在圆心处即使将贴片和接地面相接也不会对其电场分布造成影响, 同时还能提高该圆极化天线的相位中心稳定性. 在辐射贴片上加载 4 个“桥形”缝隙, 可以引入新的谐振频率, 实现双频辐射. 同时为了调节阻抗匹配, 在馈电点位置附近加载 4 个圆环形缝隙, 缝隙内的 4 个小圆形金属和馈电针连接, 由于圆环形缝隙隔离开馈电针和辐射贴片, 使得馈电针和辐

射贴片两者之间形成等效电容,而馈电针本身会引入等效电感^[16],这样一来等效电容可以补偿等效电感,同时增加天线结构的自由度,便于调节阻抗匹配. 根据仿真发现,“桥形”缝隙新引入的谐振频率的阻抗匹配仍然难以达到良好的效果,于是在介质侧面加载4个“π型”金属枝节,有利于进一步优化高频的阻抗匹配,实现了单层贴片天线实现共面双频辐射,且仅用一组馈电针,一方面,与文献[10~14]的八点馈电方式相比,有效减少了馈点数量,从而使馈电网络的研制难度及成本得到有效降低;另一方面,与文献[19]的两组双馈点为双频天线馈电相比,该设计很好地保持了整体结构的对称性,天线的馈电性能得到更好地保证. 天线的主要结构参数如表1所示.

天线部分具有4个馈电口,需要运用馈电网络来实现一端口和四端口之间的转换. 本文的馈电网络结合3 dB耦合器和微带线相移器,使其良好的功率分配和相移性能在较宽范围内得以实现. 图2给出了馈电网络图,威尔金森功分器的功能是功率等分,然后通过由微带线构成的宽带相移器^[20]输出两路信号,相位差为90°,再通过3 dB耦合器后输出功率相等、相位依次相差90°的4路信号. 在一块PCB板上加工馈电网络线路,另一面敷铜接地. 在后续组装中,将PCB板接地面向着天线单元摆放,使其对上天线单元的接地面,实现天线单元和馈电网络共用一接地面. 因为电磁波难以透过金属,因此理论上能隔离开馈电网络和天线单元,避免馈电网络线路对天线单元造成电磁干扰.

3 天线设计分析

3.1 天线演化分析

本文设计的共面双频天线由传统的圆形贴片天线发展而来,图3给出了本文提出的天线单元的设计演化

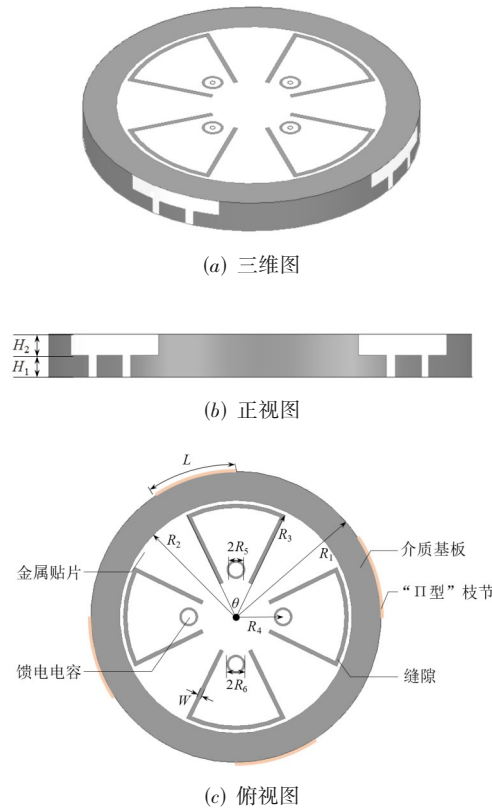


图1 天线结构

过程(演化过程中适当微调部分参数). 天线1是最常规、最基本的圆形贴片天线,通过式(1)、式(2)计算可得天线1的初始尺寸. 此时,天线1只谐振在一个频率,为了实现双频辐射的效果,传统方法是将两层尺寸不一致的贴片天线在结构上进行堆叠,这样会增加整体高度,难以适用于狭小空间中. 为了解决这个问题,本文在圆形贴片上加载多个“桥形”缝隙,形成天线2,在

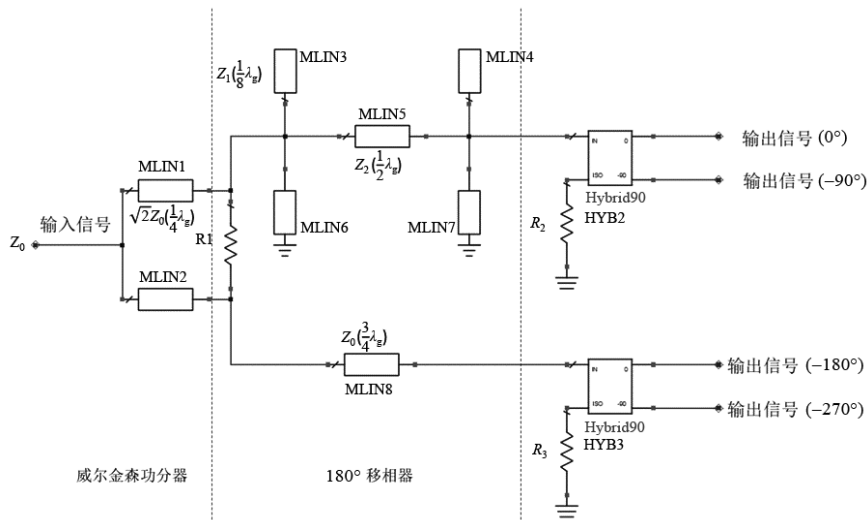


图2 馈电网络

表 1 结构初始尺寸

参数	尺寸/mm	参数	尺寸
R_1	40.0	L	23.74 mm
R_2	31.5	W	1 mm
R_3	31.0	H_1	4 mm
R_4	13.0	H_2	4 mm
R_5	2.0	θ	25°
R_6	2.5		

不增加天线复杂度的前提下,引入新的谐振频率,实现

双频谐振,且基本不改变天线整体高度.然而,即使实现双频谐振,天线2的阻抗匹配效果仍难以达到要求.为此,本文提出了电容耦合馈电和金属枝节加载的方式,以改善阻抗匹配特征.如天线3所示,在馈电点位置四周加载圆环形缝隙,从而形成4个小圆形电容片,馈电针通过小圆形电容片和圆环形缝隙,对辐射贴片构成电容耦合馈电.同时在天线侧面加载多个由接地面延伸出来的“ π 型”金属枝节,可以通过改变枝节的结构参数进一步优化天线的阻抗匹配.天线3即为本文设计的共面双频北斗导航天线的最终结构.

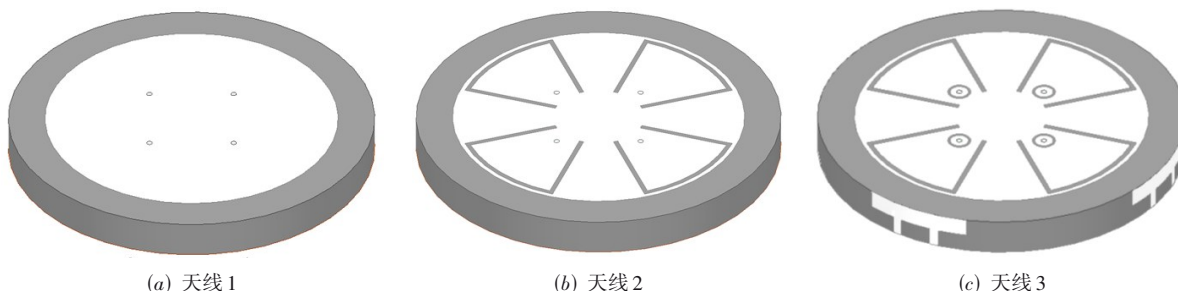


图3 天线演化过程

通过对上述3个天线模型进行仿真,ActiveS参数结果如图4所示.通过优化设计,使天线逐渐实现双频谐振,且阻抗匹配逐渐达到要求.天线4在所需频段内的ActiveS参数小于-10 dB,覆盖北斗系统的B1C、B2a频段.另外在后续仿真中可以看到,增加馈电网络后,整体的阻抗匹配特性将得到进一步优化.

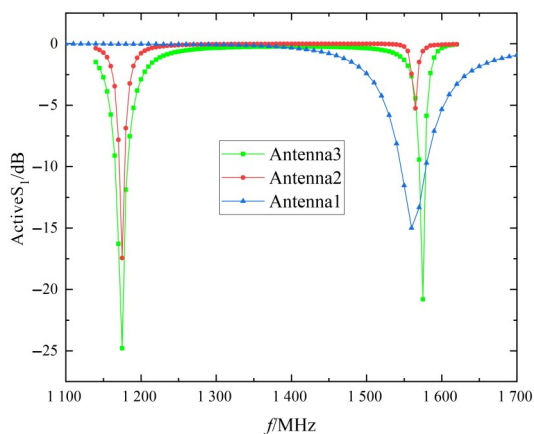


图4 天线演化过程的对比曲线

3.2 天线演化分析

根据电磁仿真结果进行电流分析有助于理解其工作原理,如图5和图6所示.图5展示了工作于B1C频段时的电流分布.通过软件仿真结果的研究分析可知,天线工作在B2a频段时,加载的“桥形”缝隙周围的电流分布最为集中,可以判定加载“桥形”缝隙引入的谐振

频段为B2a频段;同时经过仿真结果的动态分析可以确定,电流分布在一个周期内呈现逆时针旋转,符合右旋圆极化的电流分布规律,说明在此频段辐射右旋圆极化波.图6展示了B2a频段的电流方向分布.根据前述对天线的演化分析可以确定,B2a频段的辐射源于加载“桥形”缝隙前后的天线贴片的辐射;同时通过对动态分布形式的分析可知,电流矢量方向在一个周期内呈现逆时针旋转,电磁波传播方向满足右手法则,因此该模型在B2a频段为右旋圆极化工作模式.

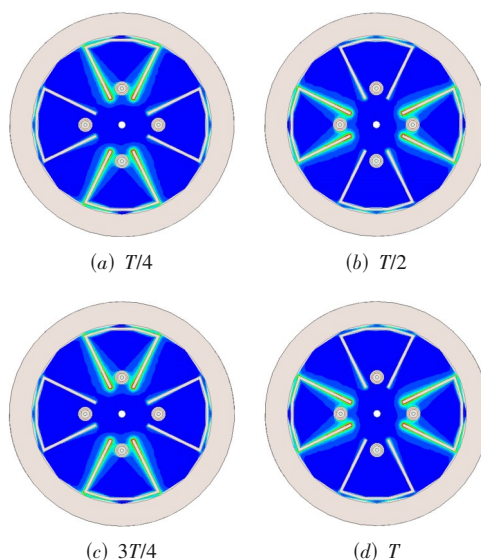


图5 B1C频段的电流幅值分布

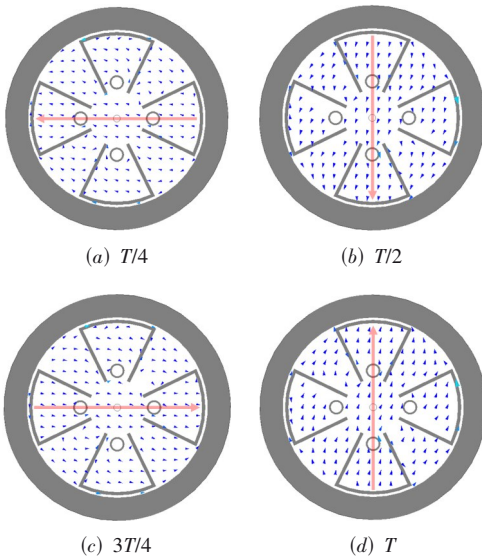


图6 B2a频段的电流方向分布

3.3 重要参数分析

本文天线在仿真设计时借助软件扫参,得到了“桥形”缝隙夹角、馈电电容片尺寸对谐振频率的影响,如图7和图8所示.

由图7可知,“桥形”缝隙夹角(θ)对高频影响较大、低频影响较小. 夹角越大,高频位置越往低频方向移动. 这是因为高频主要由“桥形”缝隙加载引入的缝隙辐射,电流集中在“桥形”缝隙位置,“桥形”缝隙夹角增大,使缝隙总长度增长,由此集中在缝隙位置表面电流路径也得到延伸,使高频频率向低频方向移动,这和前述电流分析的结果一致. 由图8可知,工作频率位置受电容片尺寸影响. 其原因在于,电容片的存在构成耦合馈电方式,电容片与辐射贴片因存在圆环形缝隙而构成电容,电容片半径增大导致等效电容值也随着增大,进而导致谐振频率位置往低频方向运动,此外因为构成电容耦合馈电,亦造成其半径匹配程度的改变. 经过不断调参,确定合理的数值,从而设计好馈电网络,然后进行联合仿真,多次优化后得到良好的阻抗匹配特性.

4 天线结果分析

经过多次仿真优化后,根据仿真模型加工实物,在实际调试后和馈电网络的PCB组装结合,天线整体实物如图9所示. 采用SMA同轴接头进行馈电,馈电口的阻抗选用 $50\ \Omega$. 用矢量网络分析仪对加工好的天线进行S参数测试,而天线的远场实测数据利用微波暗室测试. 图10为微波暗室的图片.

将前述馈电网络和四馈电口的导航天线连接后便成为一端口网络. 为了体现该一端口网络的匹配特征,

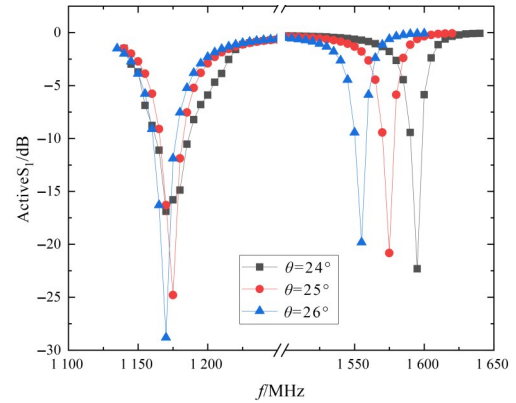


图7 “桥形”缝隙夹角对结果影响

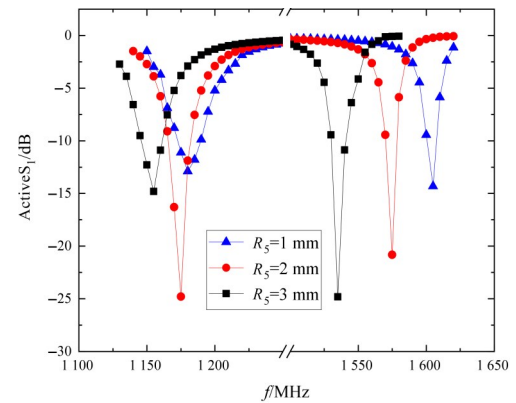
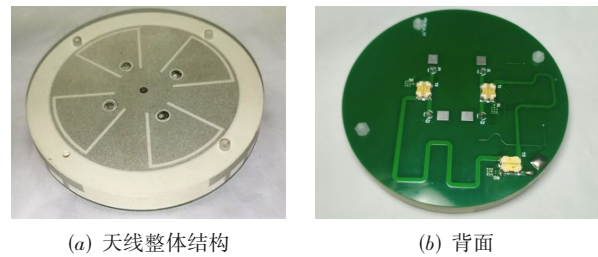


图8 电容片半径对结果影响



(a) 天线整体结构 (b) 背面

图9 天线实物

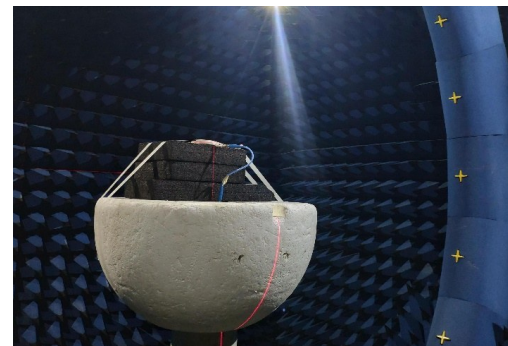


图10 微波暗室

仅需要用 S_{11} 参数即可,曲线如图11所示. 在B1C、B2a频段内均满足 $S_{11} < -15\ \text{dB}$. 可以看到,天线连接上馈电网络后,在很宽的频带内匹配性能表现不俗,其原因在

于馈电网络能够调节阻抗匹配。从图中可以看出,测量、仿真结果整体上的趋势一致。调试时,可以根据实测结果优化天线的参数,解决谐振点偏移的问题。

最大增益随频率变化的趋势在图 12 中给出。在 B1C 频段,本文设计的天线的仿真与实测最大增益分别约为 5.6 dBic、3.9 dBic;在 B2a 频段,本文设计的天线的仿真与实测的最大增益分别约为 5.1 dBic、3.6 dBic。实测增益比仿真增益有所下降的原因,不仅是由于手工组装和测量存在误差,而且有馈电网络中隔离电阻的

存在消耗了部分能量的原因。同时天线在 B1C 频段仿真与实测效率分别约为 92% 和 78%,在 B2a 频段仿真与实测效率分别约为 93% 和 79%。

图 13 显示了 B1C 频段和 B2a 频段的右旋和左旋(对应主极化和交叉极化)二维增益方向。两曲线的实测、仿真结果基本吻合,最大增益方向在 $\theta=0^\circ$,且在地平面以上右旋圆极化性能很好,同时后瓣较小。调试时天线位置摆放、实际损耗等因素是影响结果偏差的主要原因。

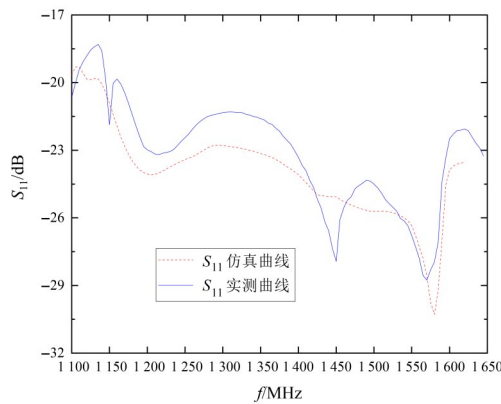


图 11 仿真与实测 S_{11} 随频率的变化曲线

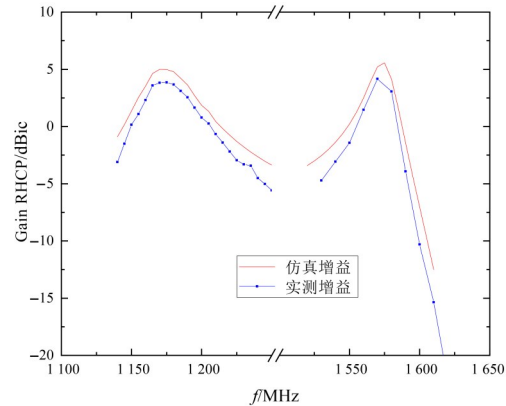
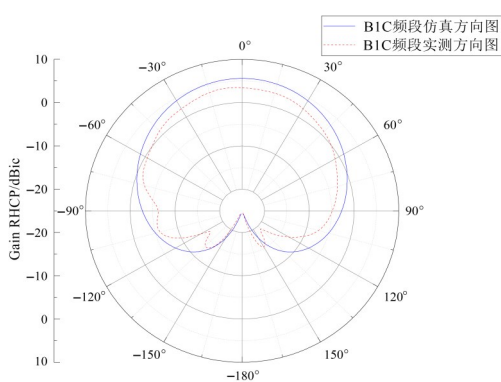
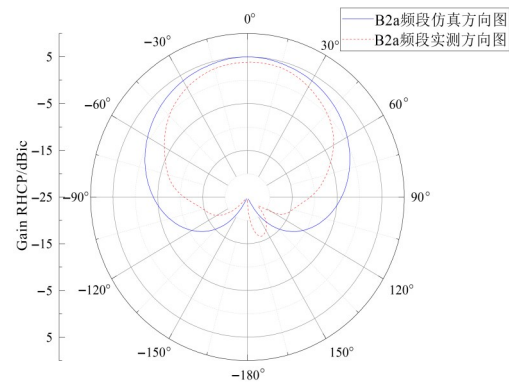


图 12 仿真与实测增益随频率变化曲线



(a) B1C 频段二维方向图



(b) B2a 频段二维方向图

图 13 增益方向

图 14 提供了 B1C 频段和 B2a 频段的轴比性能曲线。如预料的一样,四点馈电方式使轴比性能表现良好,在 θ 方向上,高频的轴比在 $-58^\circ \sim 58^\circ$ 的范围内满足小于 3 dB 的要求,低频的轴比则在 $-61^\circ \sim 61^\circ$ 的范围内满足小于 3 dB 的要求。加工误差、组装和焊接差异等因素会导致实测与仿真曲线有所差别。

本文研发的天线与其他文献中的天线的性能比较

如表 2 所示。本文研发的天线与其他天线相比,具备结构更简单、尺寸更紧凑的特点,通过单层贴片天线实现了卫星导航系统频段的双频辐射,而且在阻抗带宽、增益等方面表现不俗。所以,本文研发的天线在各方面的性能良好,既满足了卫星导航领域对天线的性能要求,又很好地填补了双频导航天线的低剖面化研究方向上的空白。

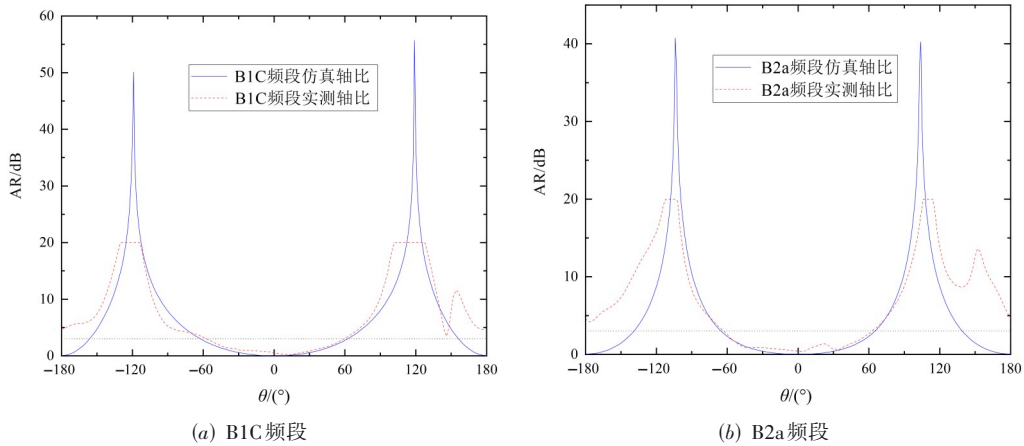


图 14 轴比随角度变化曲线

表 2 性能比较

参考天线	阻抗带宽	极化增益	尺寸
文献[21]	1.27%	1.43 dBic (1 575 MHz)	$0.26\lambda \times 0.26\lambda \times 0.026\lambda$
文献[22]	3.18%	4.12 dBic (1 561 MHz); 4.19 dBic (1 575 MHz)	$0.63\lambda \times 0.63\lambda \times 0.008\lambda$
文献[23]	5.10%	2.969 dBic (1 561 MHz、1 575 MHz)	$0.42\lambda \times 0.42\lambda \times 0.025\lambda$
文献[24]	>17%	6.2 dBic (1 176 MHz); 6.3 dBic (1 561 MHz)	$0.38\lambda \times 0.38\lambda \times 0.04\lambda$
文献[25]	>20%	>6.0 dBic (1 176 MHz); >8.0 dBic (1 575 MHz)	$0.52\lambda \times 0.52\lambda \times 0.15\lambda$
文献[26]	>20%	5.1 dBic (1 561 MHz、1 575 MHz)	$0.41\lambda \times 0.41\lambda \times 0.17\lambda$
本文	>20%	5.6 dBic (1 561 MHz); 5.1 dBic (1 176 MHz)	$0.25\lambda \times 0.25\lambda \times 0.03\lambda$

5 结论

基于单层贴片天线结构,本文采用电镀镭射技术研发一款附加枝节的单层双频贴片天线,其谐振于北斗系统的工作频率,实现双频导航天线的低剖面化设计.在贴片层加载“桥形”缝隙,引入新的谐振频率,实现双频辐射.同时通过电容耦合馈电以及电镀镭射引入枝节,运用电磁场模拟软件建模调参,优化天线的阻抗匹配.同其他天线比较,本文天线具备结构简单、剖面低、成本低、一体化加工等优点,而且只共用同一组馈电针便能实现双频辐射,在保持结构对称性高、圆极化性能良好的同时简化了馈电网络电路的结构,降低了馈电网络的电路复杂度,整体上在同一个紧凑结构中实现了天线的双频辐射,有望在行业内得到广泛应用.但欠缺的是,本文设计的天线的带宽相对不宽,而且在优化调试过程中控制难度相对较大,对加工精度要求较高,此问题在后续工作中将进一步研究.

参考文献

[1] SIM C Y D, LIN K W, ROW J S. Design of an annular-ring microstrip antenna for circular polarization[C]//IEEE Antennas and Propagation Society Symposium. Piscataway: IEEE, 2004: 471-474.
 [2] 周涛,张豪,边成,等.多频双圆极化北斗天线设计[J].电

子技术应用, 2022, 48(10): 9-12.
 ZHOU T, ZHANG H, BIAN C, et al. Multi-band dual circularly polarized antenna for BeiDou navigation system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 9-12. (in Chinese)
 [3] 孙胜,王世通,孙虎成.一种双频四模极化可重构天线[J].电子学报, 2023, 51(8): 2168-2178.
 SUN S, WANG S T, SUN H C. A dual-band quad-polarization re-configurable antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(8): 2168-2178. (in Chinese)
 [4] 张明月.北斗双频圆极化天线及阵列的研究与设计[D].南京:南京信息工程大学, 2018.
 ZHANG M Y. Research and Design of Beidou Dual-Frequency Circularly Polarized Antennas and Arrays[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018. (in Chinese)
 [5] 张浩.宽带高精度GNSS天线的设计与实现[D].北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
 ZHANG H. Design and Implementation of Broadband High Precision GNSS Antenna[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
 [6] SHARMA S B, UGLE A, PARIKH K. A novel U-slot ap-

- erture coupled annular-ring microstrip patch antenna for multiband GNSS applications[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2020: 1-3.
- [7] LIU R, ALOI D N. Dual band GNSS antenna phase center characterization for automotive applications[J]. International Journal of Antennas (JANT), 2021, 7(2/3/4): 1-19. DOI: 10.5121/jant.2021.7401.
- [8] 罗艺, 柳志荣. 小型圆极化天线的交叉极化抑制方法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(12): 2490-2496.
LUO Y, LIU Z R. Methods of suppressing cross polarisation for a miniaturised circularly polarised antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(12): 2490-2496. (in Chinese)
- [9] 刘明建. 用于双频精确导航的新型贴片天线研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
LIU M J. The Research on Novel Patch Antenna for Dual-Frequency Precise Navigation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 李晓鹏, 李庚禄, 张华福. 一种单层双频宽带 GNSS 测量型天线设计[J]. 电讯技术, 2015, 55(2): 211-215.
LI X P, LI G L, ZHANG H F. Design of a monolayer dual-frequency broadband antenna with surveying for GNSS[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(2): 211-215. (in Chinese)
- [11] 赵杰, 周斌楠. 一种 GNSS 天线: CN218101664U[P]. 2022-12-20.
ZHAO J, ZHOU B N. A GNSS Antenna: CN218101664U[P]. 2022-12-20. (in Chinese)
- [12] 张闯, 张捷, 王晓辉. 一种多功能 GNSS 天线: CN111864382A[P]. 2020-10-30.
ZHANG C, ZHANG J, WANG X H. Multifunctional GNSS Antenna: CN111864382A[P]. 2020-10-30. (in Chinese)
- [13] 朱勇安, 林飞, 李晓鹏, 等. 嵌套式 GNSS 天线和 GNSS 装置: CN202120484567.6[P]. 2021-08-10.
ZHU Y A, LIN F, LI X P, et al. Nested GNSS Antenna and GNSS Device: CN202120484567.6[P]. 2021-08-10. (in Chinese)
- [14] 朱勇安, 李晓鹏, 邓良有, 等. 一种基于 3D 辐射的 GNSS 天线: CN212412192U[P]. 2021-01-26.
ZHU Y A, LI X P, DENG L Y, et al. GNSS Antenna Based on 3D Laser: CN212412192U[P]. 2021-01-26. (in Chinese)
- [15] 刘明建, 林福民, 肖宇杰. 采用新型馈电结构的双频宽带导航天线设计[J]. 电讯技术, 2018, 58(6): 732-737.
LIU M J, LIN F M, XIAO Y J. Design of a dual-frequency broadband navigation antenna based on new feeding structure[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(6): 732-737. (in Chinese)
- [16] 李锐雄, 林福民, 周冬跃, 等. 双层空气型高性能精确导航天线设计[J]. 电讯技术, 2023, 63(4): 576-582.
LI R X, LIN F M, ZHOU D Y, et al. Design of a double-layer air-type high-performance precise navigation antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(4): 576-582. (in Chinese)
- [17] BALANIS C. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [18] 盘龙. 小型化多模卫星导航天线[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
PAN L. Miniaturized Multi-Mode Satellite Navigation Antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [19] 林智凯, 林福民, 李庚禄, 等. 四模圆极化卫星导航天线的设计和分析[J]. 数字通信世界, 2013(12): 71-73.
LIN Z K, LIN F M, LI G L, et al. Design and analysis of four-mode circularly polarization antenna for satellite navigation[J]. Digital Communication World, 2013(12): 71-73. (in Chinese)
- [20] 赵忠超, 郑会利, 孙超. 基于宽带移相器的 GNSS 圆极化微带天线[J]. 微波学报, 2016, 32(S1): 134-136.
ZHAO Z C, ZHENG H L, SUN C. A circularly polarized microstrip antenna using broadband phase shifter for GNSS application[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S1): 134-136. (in Chinese)
- [21] WANG M S, ZHU X Q, GUO Y X, et al. Compact dual-band circularly polarised antenna with omnidirectional and unidirectional properties[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(2): 259-264.
- [22] 杨光. 卫星导航接收机宽带宽波束圆极化天线设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
YANG G. Design of Wideband and Wide Beam Circular Polarization Antenna for Satellite Navigation Receiver[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [23] 黎亮. 北斗/GPS 双模差分定位系统及卫星导航天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LI L. A Study of BDS/GPS Dual Mode Differential Positioning System and Satellite Navigation Antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [24] LI X P, MA R Y, CAI H P, et al. High-gain dual-band aperture-shared CP patch antenna with wide AR beamwidth for satellite navigation system[J]. IEEE Antennas and

Wireless Propagation Letters, 2023, 22(8): 1888-1891.

- [25] YAN Y D, JIAO Y C, ZHANG C, et al. Hemispheric conformal wide beamwidth circularly polarized antenna based on two pairs of curved orthogonal dipoles in space[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7900-7905.
- [26] HU W, FENG T X, GAO S, et al. Wideband circularly polarized antenna using single-arm coupled asymmetric dipoles[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7): 5104-5113.

作者简介



李锐雄 男,1997年生,广东揭阳人.广东工业大学硕士研究生.主要研究方向为微带天线、卫星导航天线等.
E-mail: rrxll12@163.com



林福民 男,1964年生,广东汕头人.2003年获电子学博士学位.广东工业大学教授.主要研究方向为电磁场与微波技术,包括天线、滤波器、射频器件与电路等.
E-mail: linfumin@gdut.edu.cn

李晓鹏 男,1987年生,山东菏泽人.硕士.主要研究方向为轻小型GNSS接收天线及应用.
E-mail: lixiaopeng062419@163.com

张华福 男,1985年生,广东茂名.硕士,广州中海达卫星导航技术股份有限公司射频工程师.主要研究方向为卫星导航系统及其应用.
E-mail: huafu135@163.com