



·前沿技术与交叉科学·

# 一种波束赋形可调的导航天线设计\*

周凯翔, 袁健锋, 袁雪林

(中山大学 电子与通信工程学院, 广州 510006)

**摘 要:** 提供一种新的调节半功率波束宽度的思路, 并设计了一款可实现波束宽度变换以应用于不同波束赋形场景的北斗二号 B3 频段的导航天线。基于四阵元双馈源的微带贴片天线阵列, 在 HFSS 有限元仿真软件中根据理论进行建模仿真并优化。在保持右旋圆极化的基础上, 不用改变阵列的结构, 只需适当调节各个阵元激励的幅度与相位, 就能实时缩小或者扩大半功率波束宽度, 分别实现主瓣方向可调的定向波束赋形与宽波束赋形以应对不同的工作环境, 并且具有定向抗干扰能力。仿真结果表明: 定向波束赋形与宽波束赋形在 B3 中心频点的最大增益分别约为 7.13, 3.56 dBi, 半功率波束宽度分别为 52°, 119°, 3 dB 轴比宽度分别为 90°, 166°; 在整个 B3 频段内各个馈电端口反射系数低于 -11 dB, 相邻端口隔离度低于 -28 dB。设计的波束赋形方式可调的导航天线适用于在无遮挡的开阔空间与特定的遮挡环境之间经常切换的工作场景, 改善传统的机动式导航终端在“城市峡谷”等高遮蔽角环境下增益较低的缺点。

**关键词:** 半功率波束宽度; 波束赋形; 导航天线; 微带贴片阵列; 机动式导航终端

中图分类号: TN965.2

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210531

## Design of navigation antenna with adjustable beam forming

Zhou Kaixiang, Yuan Jianfeng, Yuan Xuelin

(School of Electronic and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A new idea of adjusting half-power beam width is applied to design a navigation antenna of Beidou-2 B3 band, which can realize beam width transformation and apply to different beam forming scenes. The microstrip patch array is modeled in HFSS simulation software. On the basis of keeping the right-handed circular polarization, the half-power beam width can be reduced or expanded without changing the structure of the array, the directional beam forming and wide beam forming with adjustable main lobe direction can be realized to cope with different working environments, and the directional anti-interference ability can be achieved. The simulation results show that the maximum gain of directional beam forming and wide beam forming at B3 center frequency is about 7.13 dBi and 3.56 dBi, the half-power beam width is 52° and 119° respectively, and the axial ratio width in  $xOz$  plane is 90° and 166° respectively. In B3 frequency band, the reflection coefficient of each feeding port is under -11 dB, and the isolation degree of adjacent ports is under -28 dB. The designed navigation antenna with adjustable beam forming mode is suitable for working scenes that often switch between open space without shielding and specific shielding environment, and it can improve the low gain of traditional mobile navigation terminal in the environment of high shielding angle such as “Canyon City”.

**Key words:** half power beam width, beam forming, navigation antenna, microstrip patch array, mobile navigation terminal

随着全球卫星导航技术的不断发展, 尤其是近年我国北斗三号卫星导航系统的建成与使用, 导航定位在军事及民用领域的系统应用也不断拓展。由于导航卫星在运动, 而导航接收机至少需要同时接收四颗卫星的信号才能精准定位, 故导航接收天线一般都具备宽波束即有较高的低仰角增益的特点。微带天线结构简单、剖面低、易于

\* 收稿日期: 2021-11-27; 修订日期: 2022-06-09  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973328)  
联系方式: 周凯翔, zhouxk7@mail2.sysu.edu.cn。  
通信作者: 袁雪林, yuanxlin3@mail.sysu.edu.cn。

圆极化、相位中心稳定性好且便于组成天线阵列,可作为卫星信号接收天线的首选<sup>[1-2]</sup>。但微带天线在低仰角的圆极化效果较差<sup>[3]</sup>,一般可通过多馈源技术加以改善<sup>[4]</sup>。此外,微带天线的半功率波束宽度较窄,一般小于 $100^\circ$ <sup>[5]</sup>,难以满足普通场景下导航天线的宽波束要求。目前,增大微带贴片天线阵列半功率波束宽度的方法基本都是通过改变其结构实现的,例如在天线四周加折叠导电壁<sup>[6]</sup>、天线单元之间加介质板<sup>[7]</sup>、缺陷接地结构<sup>[8]</sup>、采用微带-介质天线<sup>[9-11]</sup>等方法。然而,一旦采取某种结构便很难再改变波束宽度,无法应对导航终端工作于复杂环境的需求。

设计一种能改变半功率波束宽度的导航天线是非常必要的。导航天线一般都工作在无遮挡的开阔空间,此时宽波束赋形即可满足低仰角增益较高的需求。但是,目前很少有设计专门的导航天线以应对一些特殊的应用场景,例如受安装环境的限制如飞行器机翼的遮挡<sup>[3]</sup>、高遮蔽角的环境如“城市峡谷”、干扰方向与卫星信号方向相近等场景,此时宽波束赋形反而会带来负面影响,需要采取定向波束赋形方式。尤其是对于需要频繁更换工作环境的机动式导航终端,最好能实时根据环境的变化调节半功率波束宽度以确保导航天线能有最佳的工作状态。本文提出一种无需改变天线阵列结构,仅通过适当调整每个阵元激励的幅度与相位来调节半功率波束宽度,进而改变波束赋形方式以应用于不同工作环境的新思路。基于工作频带最宽的北斗二号 B3 频段( $1268.52 \text{ MHz} \pm 10.23 \text{ MHz}$ ),在 HFSS 仿真软件中设计一款四元微带贴片天线阵列,每个天线单元采用双探针馈源激励,提高轴比性能。设计的天线阵列使用工艺成熟的矩形微带贴片结构,并且以常用的 FR4 介质板作为基板,在目前的工程条件下可实现低成本大量印刷生产,具有一定的市场应用价值,对研制大规模的商用导航天线样机具有一定的指导意义。

## 1 天线设计

### 1.1 建立模型

基于北斗二号-B3 频段,采用单层双馈四阵元微带贴片天线阵列进行低成本导航天线设计。微带贴片天线常用三种几何形式,但三角形贴片增益低,圆形贴片波束宽度窄,故采用矩形微带贴片<sup>[12]</sup>,并且矩形贴片的理论与制备工艺成熟,成本低且易于批量生产。相对介电常数高的介质基板可以减小贴片尺寸,但也会减小天线的阻抗带宽,同时激起表面波辐射,并且增强天线单元的互耦<sup>[13]</sup>。综合考虑,天线阵列的介质基板采用 FR4 材料,其相对介电常数为 4.4,损耗角正切为 0.02,虽然 FR4 介质基板损耗较大导致增益偏低,但能在薄厚度下实现较宽的阻抗带宽,并且增益还可以通过射频前端的有源器件如低噪声放大器增强。

仿真中直接用同轴线进行双馈源的底部馈电方式,若是具体的硬件设计需要采用 T 性分支或者 3 dB 电桥的馈电网络。由于微带天线的功率容量较小,仿真中每个馈源分配 0.8W,相位差  $90^\circ$  以实现圆极化。由于馈电点位置距阵元中心的距离与输入阻抗成正比,理论上合适的馈电点位置  $X_f$  经过公式计算设为 9.6 mm。馈电孔半径  $r_0$  经过公式计算设为 1.4 mm。贴片单元边长

$$L_2 = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \approx 56.4 \text{ mm} \quad (1)$$

式中:  $f_0$  为 B3 中心频点,即 1268.52 MHz;  $\epsilon_r$  为 FR4 介质板的相对介电常数即 4.4。

考虑边缘缩短效应,贴片单元实际边长  $L_2$  设为 55 mm。综合考虑相位模糊与耦合效应,一般取天线阵元的间距为略小于半波长即 118 mm,不同阵元的相应馈电点的距离也为半波长,使得各个阵元馈电的空间相位相同。阵元边缘与介质板边缘距离  $d$  约为十分之一波长,设为 14 mm,则介质基板边长  $L_1$  设为 200 mm。此外,增加介质基板厚度可增加阻抗带宽,但也会增大表面波辐射,故初始厚度  $h$  设为 2.5 mm 以保证电场强度在厚度方向基本不变。

根据以上理论分析,在 HFSS 仿真软件中建立如图 1 所示的四阵元微带贴片天线阵列模型。

### 1.2 参数优化

由于图 1 的模型是根据一些理论的经验公式建立的,仿真结果会有一些的偏差,需要进行优化。本文固定  $L_1$  的值,将显著影响谐振频率的  $L_2$  与  $h$  进行联合参数扫描,再对基本不影响谐振频率的  $d$ ,  $X_f$ ,  $r_0$  另外进行联合参数扫描,最后再进行整体的参数化扫描,大大减少了计算时间的同时保证优化质量。经过对模型的设计优化之后,最

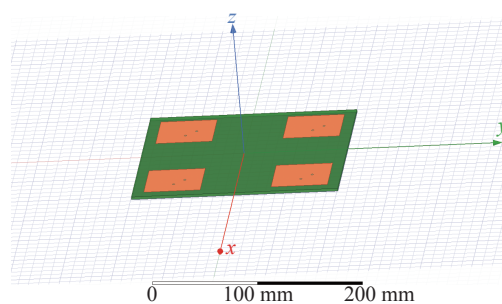


Fig. 1 3D model of four-element antenna array

图 1 四阵元天线阵列的 3D 模型

终确定各参数取值分别为 $L_1=200$  mm,  $h=2.8$  mm,  $L_2=54.6$  mm,  $d=11$  mm,  $X_f=10$  mm,  $r_0=1.2$  mm。

## 2 仿真分析

### 2.1 定向波束赋形

八个馈电点分别记为1~8,其幅度与相位如表1所示,此时所设计的天线在B3频点处的场强空间分布图与归一化方向图如图2所示。

需要说明的是,由于在远场区场强与半径成一次反比关系,故在HFSS软件中用 $rE$ 即半径与场强的乘积来代替远场区场强的性质。由图2可以看到, $rE$ 最大值出现在 $z$ 轴方向且最大为44.07 V;但半功率波束宽度<sup>[4]</sup>较小且仅为 $52^\circ$ 且在 $(-26^\circ, 26^\circ)$ 之间,有较强的定向性,适用于前文所述的一些特殊的导航终端应用场景;并且由于本文设计的微带贴片阵列排列为 $2 \times 2$ 且贴片为对称的正方形结构,故 $yOz$ 面( $\varphi=90^\circ$ )与 $xOz$ 面( $\varphi=0^\circ$ )具有较好的相似对称性,以下均以 $yOz$ 面为例进行讨论。

表1 定向波束赋形时八个馈电点的幅度与相位  
Table 1 Amplitude and phase of eight feed points in directional beam forming

feed point	amplitude/W	phase/( $^\circ$ )
1	0.8	0
2	0.8	-90
3	0.8	0
4	0.8	-90
5	0.8	0
6	0.8	-90
7	0.8	0
8	0.8	-90

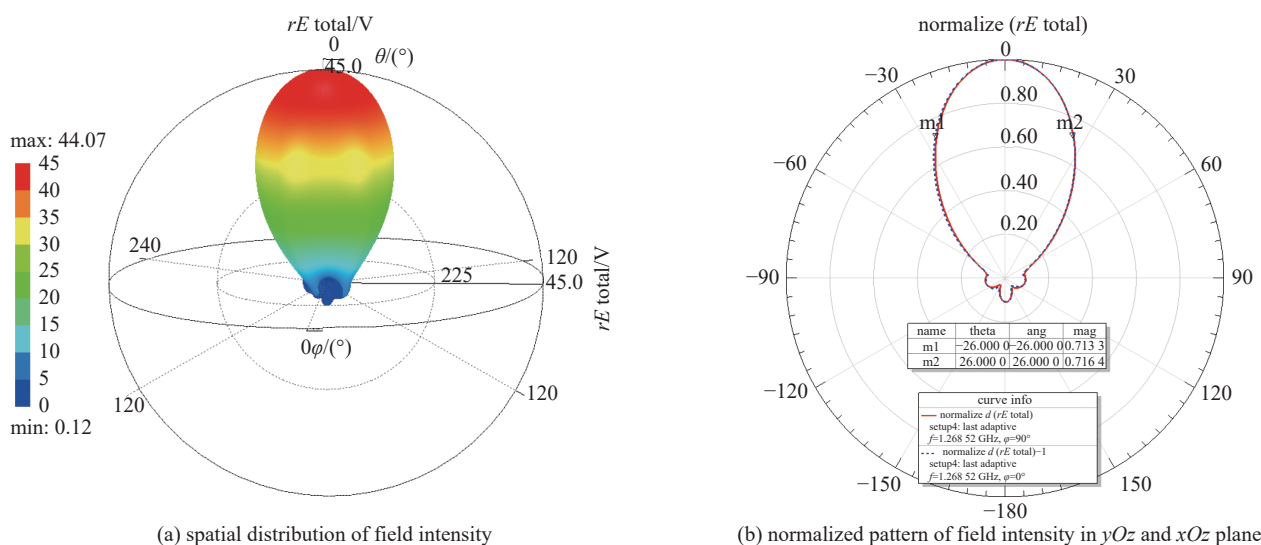


Fig. 2 Field intensity distribution

图2 场强分布

图3表明增益最大值约为7.13 dBi,在 $60^\circ$ 仰角、 $30^\circ$ 仰角、 $10^\circ$ 仰角时增益分别约为3.24, -8.38, -13.92 dBi,在高仰角时增益很高,在低仰角时增益较低,再次说明这种设计方案仅能应用于特定场景。此外,该四阵元天线阵列最大抗干扰方向为 $-145^\circ$ ,此时增益为-21.94 dBi。

由图4(a)的轴比图可知,3 dB轴比宽度约 $90^\circ$ 且在 $(-45^\circ, 45^\circ)$ 之间,最大接收方向上轴比仅为0.2 dB,故极化纯度很高;由图4(b)的左右旋圆极化增益图看到左旋圆极化增益无论在哪个方向上都低于-12 dBi,而右旋圆极化增益在最大接收方向能达到7.13 dBi,说明右旋圆极化效果很好。由于3 dB轴比宽度较小,并且强接收方向上极化纯度高,适用于定向波束赋形的场景。

以上都是基于B3频点即1268.52 MHz频率处的仿真结果讨论,下面考虑在整个B3工作频段即1268.52 MHz~10.23 MHz内的仿真结果。

图5给出了各馈电点的反射系数(实线)及隔离度(虚线)在B3频段内的变化图,“1~8”分别代表4个阵元的8个馈电端口。可以看出,端口的反射系数在B3工作频段内都低于-11 dB,同一个阵元的两个端口隔离度低于-28 dB,故各阵元的馈源端口反射小、隔离度高。

保持八个馈电点的幅度不变,调整馈电点1,2,5,6的相位如表2所示,此时的方向图如图6所示,设计的天线在保持右旋圆极化的基础上实现了主瓣波束指向的偏移。

图6表明只对馈源的相位进行适当的简单调节,即可实现定向波束赋形的主瓣偏移,图6(a)中实现了 $16^\circ$ 的偏

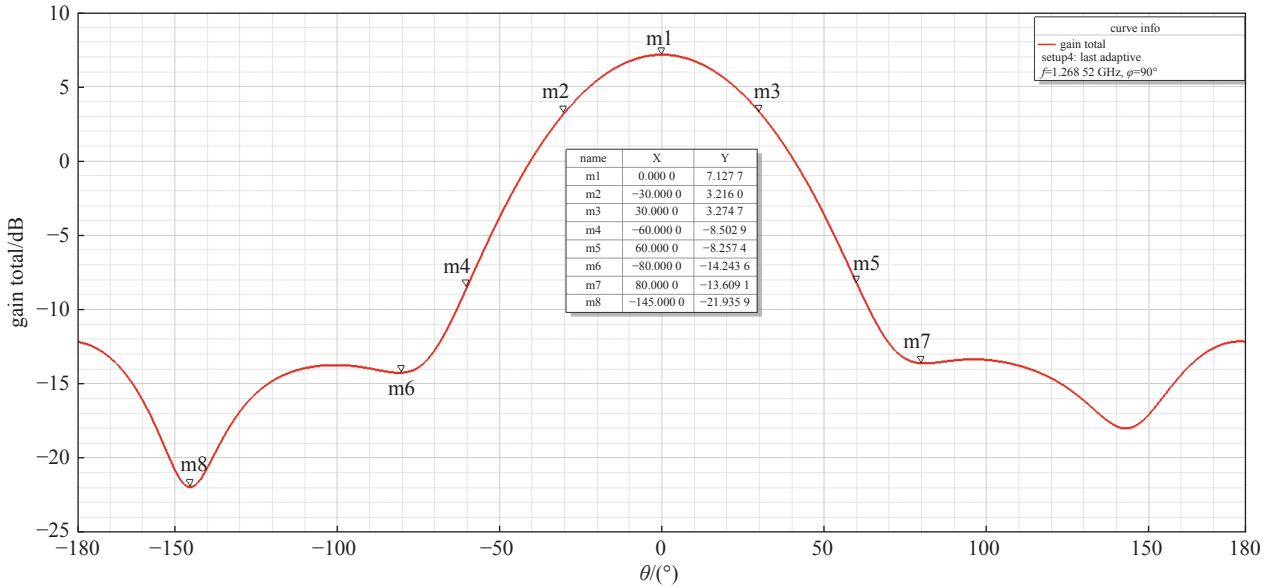
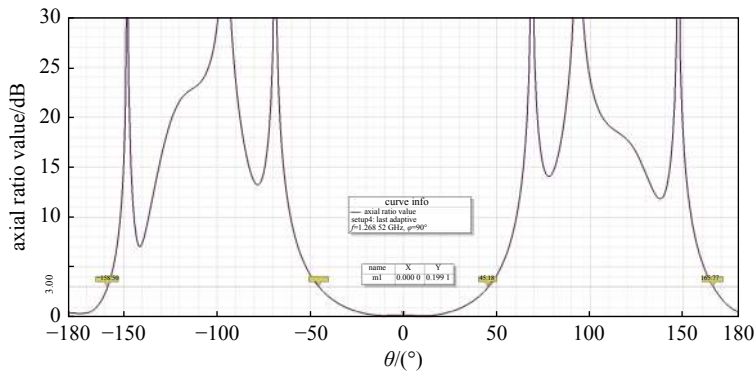
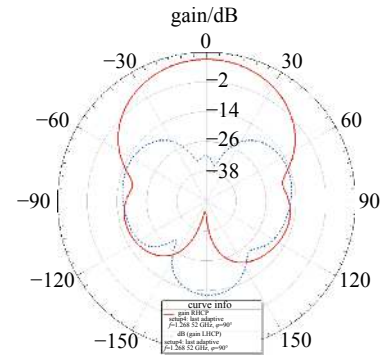


Fig. 3 Gain distribution

图 3 增益分布



(a) axial ratio distribution



(b) circular polarization gain

Fig. 4 Circular polarization characteristics

图 4 圆极化特性

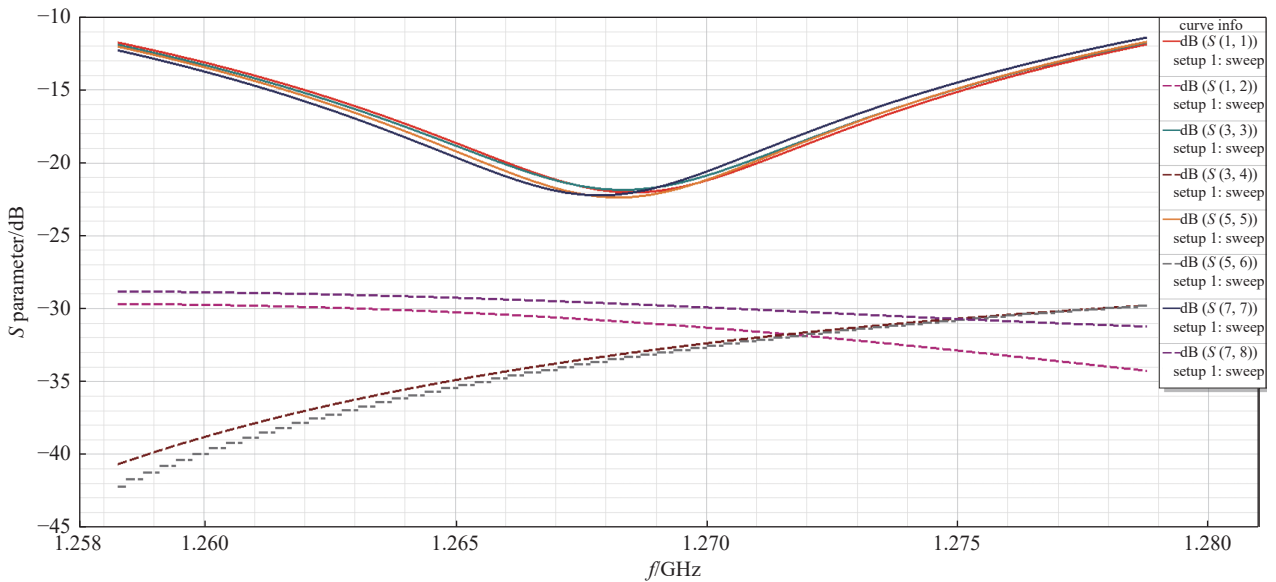


Fig. 5 Sweep diagram of reflection coefficient and isolation

图 5 反射系数与隔离度的扫频图



移。而且主瓣宽度、增益、圆极化纯度、反射系数、隔离度等基本不会发生改变,这使得定向赋形方式在受安装环境的限制、高遮蔽角的环境、干扰与信号方向相近等特殊场景下具有更加实用的价值。

此外,对相位调节程度与主瓣偏移的大小规律进行探究,假设馈电点1的相位相对 $0^\circ$ 相位偏移量为 $\theta$ ,则馈电点2,5,6的相位分别为 $\theta-90^\circ$ , $\theta$ , $\theta-90^\circ$ 。图7给出了馈电点1的相位偏移量 $\theta$ 与主瓣偏移角度 $\delta$ 的关系,在 $-120^\circ < \theta < 120^\circ$ 时,基本遵循 $\theta$ 每改变 $4^\circ$ , $\delta$ 改变 $1^\circ$ 的关系; $\theta$ 大于 $120^\circ$ 时由于偏移角度 $\delta$ 趋向于饱和,使得 $\delta$ 的变化程度稍微下降。

## 2.2 宽波束赋形

上述主波瓣方向可调的定向波束赋形仅适用于一些特殊的场景,实际上导航天线大多工作于空旷无遮挡的环境,这也是目前导航天线研究的主流。针对机动式导航终端经常在空旷环境与高遮蔽角环境之间切换的场景,本小节通过适当改变馈源的幅度与相位来实现半功率波束宽度的变化以满足需求。需要特别说明,在实际的实物设计中可以通过阵列信号处理器获取天线接收信号的特征信号,然后通过算法控制功率分配器实现调幅,移相器进行调相来完成。

表2 主波瓣偏移时八个馈电点的幅度与相位  
Table 2 Amplitude and phase of eight feed points when the main lobe is offset

feed point	amplitude/W	phase/( $^\circ$ )
1	0.8	60
2	0.8	-30
3	0.8	0
4	0.8	-90
5	0.8	60
6	0.8	-30
7	0.8	0
8	0.8	-90

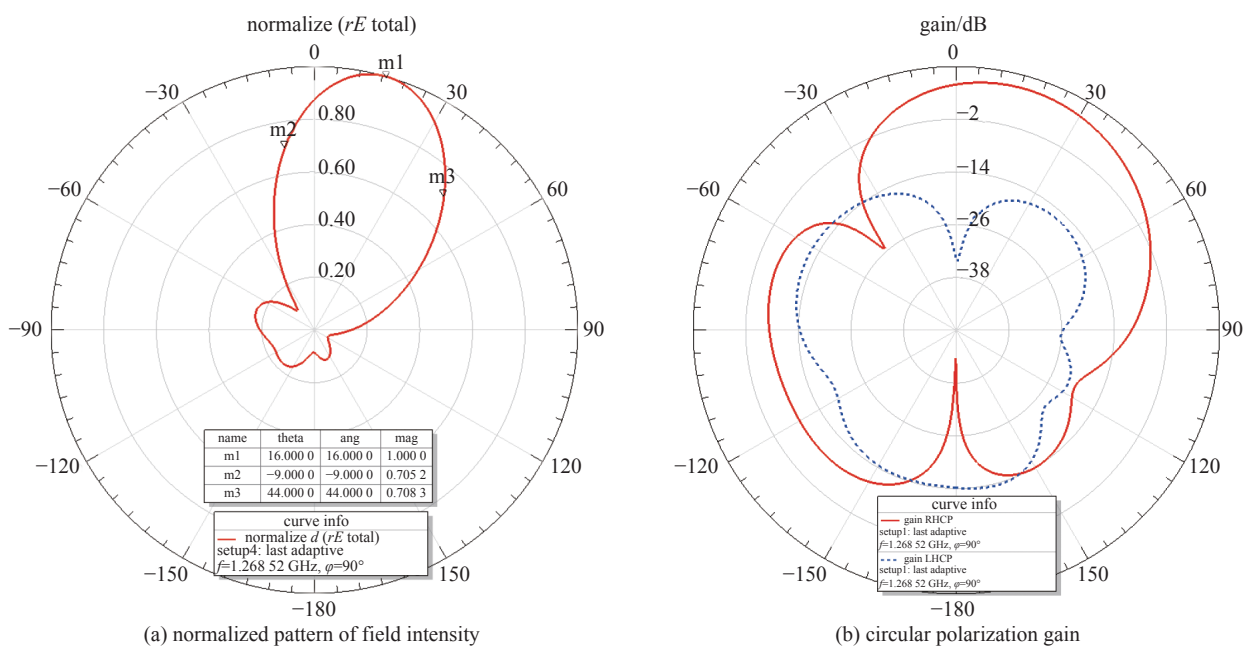


Fig. 6 Directional beam forming diagram with adjustable main lobe direction

图6 主波瓣方向可调的定向波束赋形图

保持总输入功率不变,调节馈源的幅度与相位为表3所示,得到如图8所示的场强空间分布图与归一化方向图。图8给出了场强归一化方向图,可知半功率波束宽度为 $119^\circ$ 且在 $(-59^\circ, 60^\circ)$ 之间,比图2的定向波束赋形的波束宽度多 $67^\circ$ ,并且完全满足空旷空间的导航天线性能需求。

图9表明大于 $50^\circ$ 仰角的增益均大于3 dBi,在 $30^\circ$ 仰角、 $10^\circ$ 仰角时增益分别约为0.66, -3.21 dBi,在低仰角时增益比图3的定向波束赋形增益高约8~10 dBi,并且满足导航天线的低仰角需求。此外,该四阵元天线阵列最大抗干扰方向为 $179^\circ$ ,此时增益为-15.87 dBi,抗干扰效果略差于定向波束赋形方式。

由图10(a)可知3 dB轴比宽度为 $166^\circ$ 且在 $(-83^\circ, 83^\circ)$ 之间,基本覆盖了整个上半空域,且轴比大小远低于王汇龙等人所设计的紧凑五单元B3天线阵列<sup>[15]</sup>在上半空域为(2.5 dB, 10 dB)的轴比大小;而左旋圆极化增益无论在哪个方向上都低于-12 dBi,最大右旋圆极化增益约为总增益即3.56 dBi,与五单元B3天线阵列<sup>[15]</sup>的右旋圆极化增益相近。此时圆极化纯度相对定向波束赋形稍差,但3 dB轴比宽度远大于定向波束赋形且基本覆盖了整个上半空域,能满足开阔区域的工作环境下导航定位的圆极化要求。

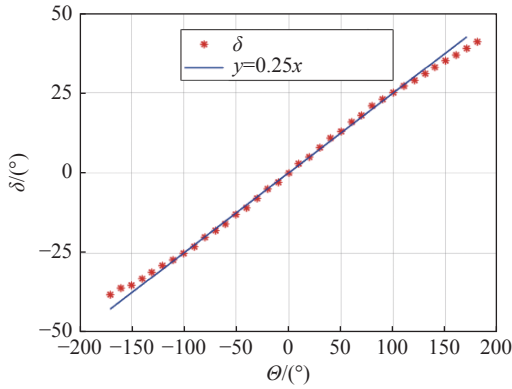


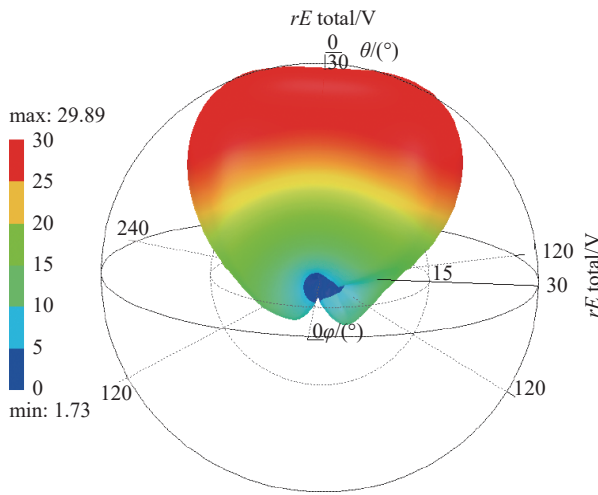
Fig. 7 Relation between phase offset and main lobe offset angle

图 7 相位偏移量与主瓣偏移角度的关系

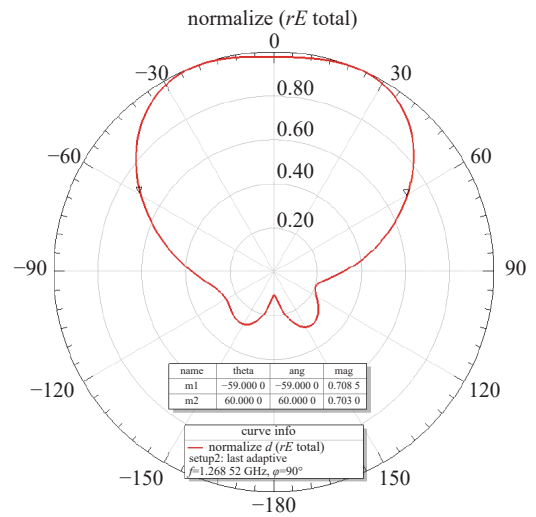
表 3 宽波束赋形时八个馈电点的幅度与相位

Table 3 Amplitude and phase of eight feed points in wide beamforming

feed point	amplitude/W	phase/(°)
1	1	0
2	1	-90
3	0.1	180
4	0.1	-45
5	2	0
6	2	-90
7	0.1	-70
8	0.1	40



(a) spatial distribution of field intensity



(b) normalized pattern of field intensity in  $yOz$  and  $xOz$  plane

Fig. 8 Field intensity distribution

图 8 场强分布

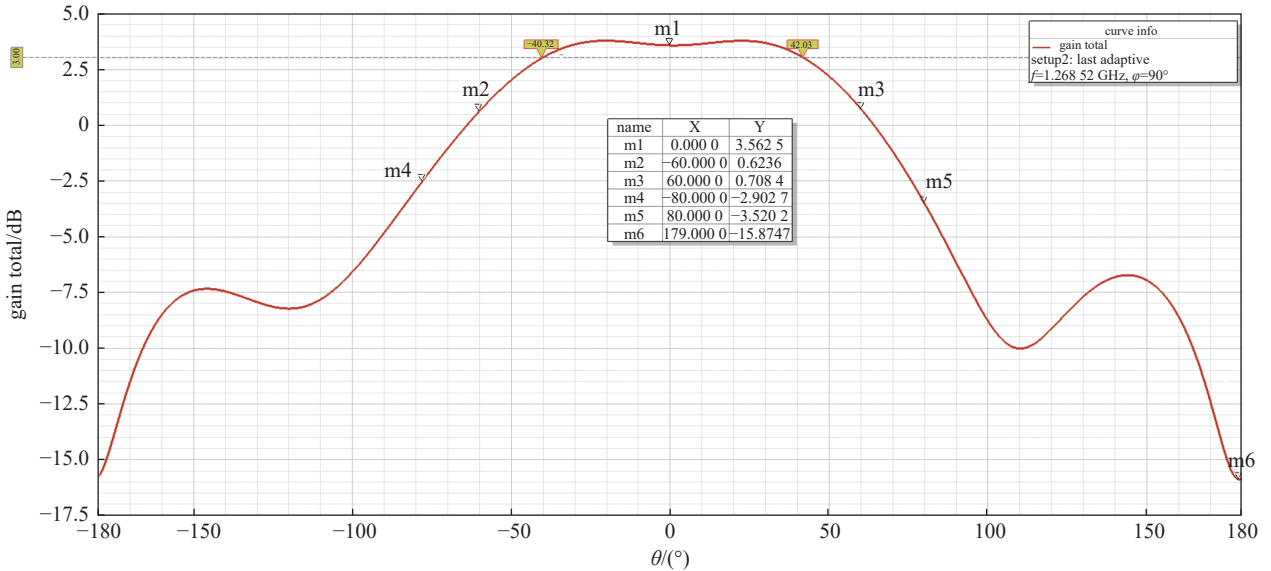


Fig. 9 Gain distribution

图 9 增益分布

此外,宽波束赋形时阵元的各个端口的反射系数和相邻端口的隔离度与定向波束赋形时一致,分别低于-11 dB和-28 dB,具有反射小、隔离度高的特点,比五单元B3天线阵列<sup>[15]</sup>的-12 dB的隔离度有极大提升。

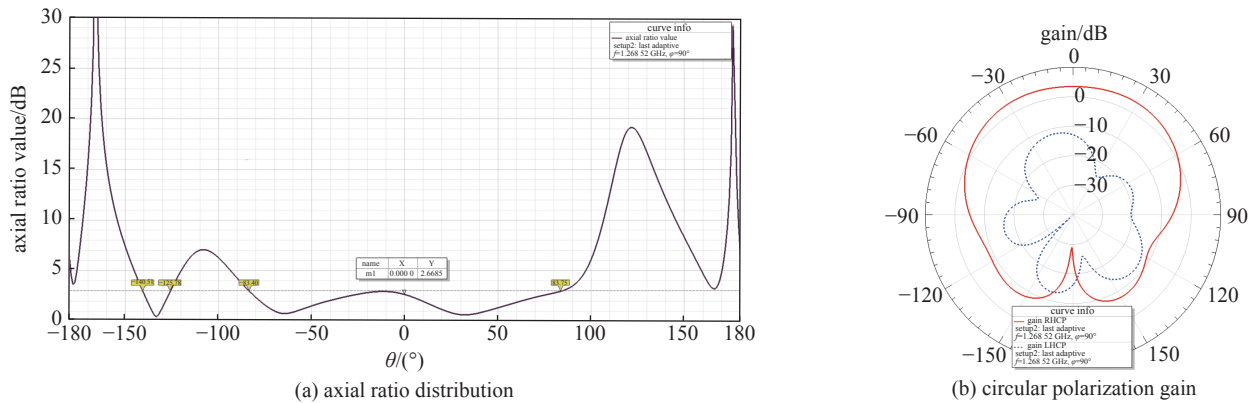


Fig. 10 Circular polarization characteristic

图 10 圆极化特性

### 3 结论

本文选用低成本的FR4介质基板与矩形微带贴片,根据理论经验公式在HFSS仿真软件中建模并优化得到一款单层双馈四阵元BD2-B3频段的导航天线阵列设计。设计的导航天线有如下特点:(1)不用改变阵列结构,只需简单地适当调节馈源的幅度与相位来改变半功率波束宽度实现不同的波束赋形方式以应用于不同的场景,尤其适用于机动式的导航终端。(2)通过适当调节馈源的相位,可以实现定向波束赋形主瓣的移动,使导航终端更加灵活应用于一些特殊的场景。(3)设计的导航天线进行定向波束赋形时,B3频点处的增益为7.13 dBi,半功率波束宽度为52°,3 dB轴比宽度为90°,最大接收方向轴比仅0.2 dB;B3频段内各个馈电端口反射系数<-11 dB,隔离度<-28 dB。即接收能力强的方向上增益大、波束及轴比宽度较窄、极化纯度极高、反射系数小且隔离度很好,可满足特殊场景的使用。(4)设计的导航天线进行宽波束赋形时,B3频点处的增益约为3.56 dBi,半功率波束宽度为119°,3 dB轴比宽度为166°且基本覆盖整个上半空域;B3频段内效率、馈电端口的反射系数和隔离度均不变。即接收能力强的方向上增益较大、波束及轴比宽度很宽、反射系数小且隔离度很好,可满足一般空旷场景的使用。(5)设计的导航天线进行宽波束赋形时,3 dB轴比宽度、隔离度比紧凑五单元B3天线阵列更好。(6)在具体的实物设计中,需要较为复杂的馈电网络及自适应算法设计,后续可以进行研究探讨。

### 参考文献:

- [1] 陈强. 卫星导航接收机的抗干扰天线设计[J]. *无线电工程*, 2011, 41(10): 33-36. (Chen Qiang. Design on anti-interference antenna for satellite navigation receiver[J]. *Radio Engineering*, 2011, 41(10): 33-36)
- [2] 陈钢, 韩日霞, 熊君瑞, 等. 一种新型宽波束圆极化微带天线的设计[J]. *现代电子技术*, 2012, 35(19): 82-84. (Chen Gang, Han Rixia, Xiong Junrui, et al. Design of novel wide-beam circularly polarized antenna[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(19): 82-84)
- [3] 刘胤廷. 卫星导航天线及自适应抗干扰技术[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019. (Liu Yinting. Satellite navigation antenna and adaptive anti-jamming technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019)
- [4] 孙莉, 周力, 欧钢, 等. 小型多馈源宽频微带天线分析与设计[J]. *微波学报*, 2007, 23(6): 44-47. (Sun Li, Zhou Li, Ou Gang, et al. Analysis and design of a compact multi-feed broadband microstrip antenna[J]. *Journal of Microwaves*, 2007, 23(6): 44-47)
- [5] 李洪彬, 丁卫平, 余同彬, 等. 一种波束展宽的宽频带圆极化微带天线的设计与制作[J]. *军事通信技术*, 2011, 32(4): 71-73,82. (Li Hongbin, Ding Weiping, Yu Tongbin, et al. Design and implement of broadband circularly polarized microstrip antenna with wider beamwidth[J]. *Journal of Military Communications Technology*, 2011, 32(4): 71-73,82)
- [6] Nakano H, Shimada S, Amauchi J, et al. A circularly polarized patch antenna enclosed by a folded conducting wall[C]//Proceedings of 2003 IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology. Honolulu: IEEE, 2003: 134-135.
- [7] 朱毛毛. 一种调节天线阵列半功率波束宽度的方法: CN105958213A[P]. 2016-09-21. (Zhu Maomao. Method of adjusting half-power lobe width of antenna array: CN105958213A[P]. 2016-09-21)
- [8] Brahma P, Basu B. Improving the performances of microstrip antenna array using defected ground structure[J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2020, 9(3): 1081-1086.
- [9] 何海丹. 新型宽波束圆极化天线——微带介质天线[J]. *电讯技术*, 2003, 43(1): 48-50,54. (He Haidan. A novel wide beam circular polarization antenna—microstrip-dielectric antenna[J]. *Telecommunication Engineering*, 2003, 43(1): 48-50,54)
- [10] 谢苗珍, 陈明. 基于双层介质的宽轴比波束微带天线[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 113003. (Xie Miaozhen, Chen Ming. Wide axial ratio beamwidth microstrip antenna based on bilayer substrates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 113003)
- [11] 卫雯洁, 蔡敏康, 周后英, 等. 一种宽轴比波束宽度的圆形微带天线的设计[J]. *微波学报*, 2018, 34(s1): 222-224. (Wei Wenjie, Cai Minkang, Zhou

- Houying, et al. Simulation of a circularly polarized microstrip antenna with wide axial ratio beamwidth[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(s1): 222-224
- [12] 韩玲, 张志杰. 微带贴片天线的设计与仿真[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(1): 269-271. (Han Ling, Zhang Zhijie. The design and simulation of the microstrip patch antenna[J]. *Sci/Tech Information Development & Economy*, 2006, 16(1): 269-271)
- [13] 王红林. 导航抗干扰天线的小型化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018. (Wang Honglin. Design of miniaturization navigation anti-jamming antenna[D]. Xian: Xidian University, 2018)
- [14] 宋铮, 张建华, 黄冶. 天线与电波传播[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016. (Song Zheng, Zhang Jianhua, Huang Zhi. Antennas and radio wave propagation[M]. Xian: Xidian University Press, 2016)
- [15] 王汇龙, 徐澜飞, 刘运林. 紧凑五-五单元天线阵设计[J]. *电讯技术*, 2012, 52(6): 952-955. (Wang Hui long, Xu Lanfei, Liu Yunlin. Design of compact five-five elements array[J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(6): 952-955)