DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.06.009

基于后向辐射抑制的低剖面圆极化环天线研究

杨玉凡,张 晓,许志泳,袁 涛

(深圳大学 电子与信息工程学院,深圳 518060)

摘 要:为了适应现阶段可移动终端的小型化发展趋势,设计了一种结构紧凑的低剖面高前后比圆极化环天线,可覆盖BDS-B1和GPS-L1两个工作频段。天线的辐射体采用环形贴片,使用两个不同面积的耦合馈电枝节给天线耦合馈电,实现天线的圆极化辐射。另外,深入探讨了寄生环的后向辐射抑制机理,使天线得以在结构紧凑的基础上实现了天线的高前后比,并且可实现天线的前后比与辐射效率之间的灵活调控。测试结果表明,在工作频带内,所设计的天线具有10 dB以上的前后比,实际增益不低于3.25 dBi,天线在3-dB轴比带宽内具有不少于3.19 dBic的右旋圆极化增益。此外,所设计的天线辐射器尺寸为$0.148\lambda_0\times0.148\lambda_0$($\lambda_0$为真空波长),整体尺寸为$0.236\lambda_0\times0.236\lambda_0\times0.028\lambda_0$,可适用于小型化程度较高的终端设备中。

关键词:导航;圆极化;增强前后比;环天线;小型化

中图分类号:V443 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-7135(2022)06-0061-08

Research of low profile circularly polarized loop antenna based on backward radiation suppression

YANG Yufan, ZHANG Xiao, XU Zhiyong, YUAN Tao

(College of Electronic and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In order to adapt to the development trend of miniaturization of mobile terminals at present, a compact circular polarization ring antenna with low profile and high front-to-back ratio is proposed in this paper, covering the two operating bands of BDS-B1 and GPS-L1. The radiator of the antenna is a loop patch, and two coupled feeding branches with different areas are used to feed the antenna to achieve circular polarization radiation. In addition, the mechanism of backward radiation suppression of the parasitic loop is deeply discussed, which enables the antenna to achieve a high front-to-back ratio on the basis of compact structure, and the exchange between the front-to-back ratio and the radiation efficiency can be realized. The measured results show that in the operating frequency band, the designed antenna has achieved a front-to-back ratio of more than 10 dB, the realized gain is higher than 3.25 dBi, and the antenna has a right-handed circular polarization gain of not less than 3.19 dBic in the 3-dB axial ratio bandwidth. In addition, the size of the designed antenna radiator is $0.148\lambda_0\times0.148\lambda_0$ (λ_0 is the vacuum wavelength), and the overall size is $0.236\lambda_0\times0.236\lambda_0\times0.028\lambda_0$, which can be applied to the terminal equipment with high degree of miniaturization.

Key words: navigation; circular polarization; enhanced front-to-back ratio; loop antenna; miniaturization

0 引言

随着无线通信技术的快速发展,目前全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)已被广泛用于军事和民用领域中[1-2]。由于圆极化天线具有可克服法拉第旋转效应、抗多径干扰效应强等优点,因此在导航系统中起到了至关重要的作

收稿日期:2022-08-30; **修回日期**:2022-09-15

基金项目:深圳市基础研究面上项目(编号:JCYJ 20190728151457763)

引用格式:杨玉凡,张晓,许志泳,等.基于后向辐射抑制的低剖面圆极化环天线研究[J].空间电子技术,2022,19(6):61-68.
YANG Y F, ZHANG X, XU Z Y, et al. Research of low profile circularly polarized loop antenna based on backward radiation suppression[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(6):61-68.

用。同时,近年来各种移动终端设备都朝着小型化的方向发展,这对设备中导航天线设计提出了更高的要求,需要天线在保证较高性能的前提下向更小尺寸的方向发展。

对圆极化导航天线而言,前后比(front-to-back ratio,F/B)是衡量其性能的重要指标之一,提高天线的 F/B 可以抑制从后向入射的多径波,减轻接收器和终端设备其他射频电路的干扰等。因此,众多国内外学者在抑制天线的后向辐射上做了大量研究。

提高 F/B 的方法中最为著名的一类是磁电偶极子天线的设计[3-6],该类天线的中心思想是设计一对正交摆放的电偶极子和磁偶极子,并以适当的幅度和相位激励,从而获得较高的 F/B。该类天线的优点是具有较高的 F/B 和较宽的阻抗带宽,但其普遍的缺点是剖面高、尺寸大,不适合应用于小型化的终端设备上。而同样利用该原理的电小尺寸的惠更斯元天线[7-10]具有尺寸小、剖面低的优点,但由于其结构缺少地板,无法与终端设备中其他射频电路兼容,这将使该天线的应用场合受限。

而另一类提高 F/B 的方法较为巧妙,其天线结构利用了八木天线的原理。通常情况下,环天线需要保持相对较大的地板才能获得较高的 F/B,而该类方法是在小地板的情况下,在地板外部放置一寄生环或是在地板内部刻蚀多个方环形缝隙形成多个环[11-16],从而实现了较高的 F/B。该天线结构中,寄生环充当了反射器,将来自辐射环的后向辐射反射至前向,从而实现了后向辐射的抑制。该类天线具有剖面低、F/B 较高的优点,且具有地板,在终端设备中应用具有较大的优势,但寄生环与地板需要有一定的距离才能保持较高的 F/B,故寄生环的存在使天线无法做到极致的小型化。

在上述环天线加寄生环的基础上,深入研究了寄生环抑制后向辐射的工作原理,通过观察寄生环的电流分布,掌握其工作规律,成功地减小了寄生环的尺寸,设计了一款具有更小尺寸、低剖面、较高 F/B 的圆极化环天线。此外,本天线还引入了 4 个调谐枝节,使天线得以在进一步小型化的基础上,做到天线实物的调谐功能。

1　天线设计

本文所设计的天线首先在三维电磁仿真软件 ANSYS HFSS 中进行建模仿真和参数优化,并对天线的后向辐射抑制原理进行深入分析。本节内容主要包括以下 3 个部分:(1)天线结构;(2)后向辐射抑制原理分析;(3)重要参数分析。

1.1　天线结构

图 1 为本文所提出的天线结构图,天线由两块印刷电路板组成,印刷电路板材料选用罗杰斯 RO4003C 介质板(介电常数 $\varepsilon_r = 3.55$,损耗角正切 $\tan\delta = 0.0027$)。另外为了充分考虑表面粗糙度的影响,设计的天线在电磁仿真软件中将导体设为黄铜,设置电导率为 3×10^7 Siemens/m,铜厚度设置为 0.035 mm。

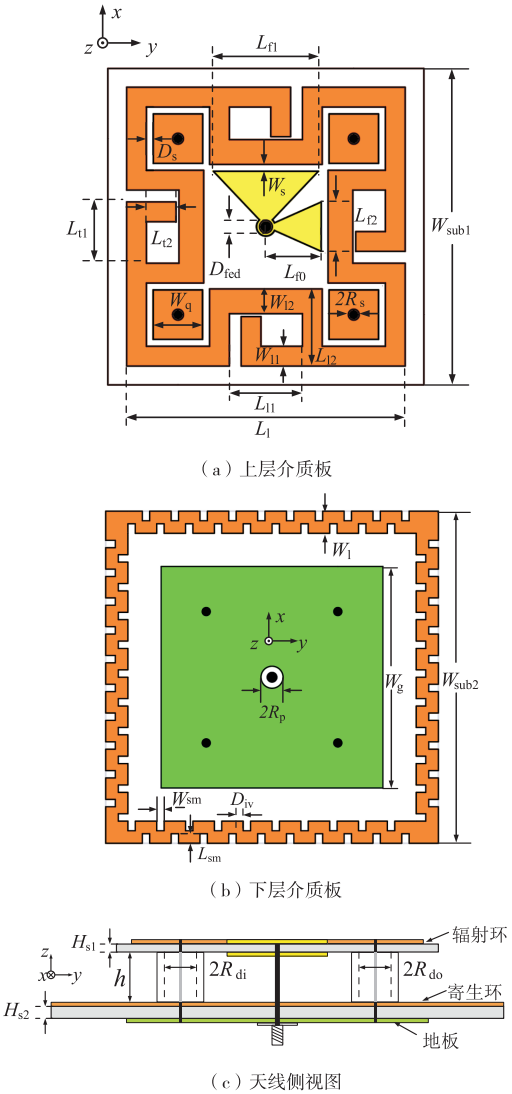


图 1　天线结构图

Fig. 1　Geometry of antenna

图 1(a)是天线的上层介质板结构,介质板的边长为 W_{sub1},厚度为 H_{s1}。其中橘黄色部分为介质板上表面覆铜,黄色部分为介质板上下表面都覆铜。其中,黄色部分为耦合馈电枝节,包含两个高度均

为 L_{f0},底边分别为 L_{f1} 和 L_{f2} 的三角形,用于给天线耦合馈电并产生圆极化辐射,与天线之间的间距为 W_s,且与 SMA 同轴接头上直径为 D_{fed} 的金属探针直接接触。橘黄色部分中,主辐射器为弯折走线的方形环天线,其外轮廓边长为 L_1,环内部与耦合馈电枝节贴近的部分宽度为 W_{l2},长度为 L_{l1},在其外部设置有 4 个“L”形枝节,宽度为 W_{l1},长度分别为 L_{t1} 和 L_{t2},用于天线的小型化和天线实物的调谐。另外,在辐射环内部还有 4 个边长为 W_q 的方形贴片,贴片四周与辐射环的间距为 D_s,并通过 4 根半径为 R_s 的短路钉与下层介质板的地板短路。4 个短路贴片与辐射环之间的耦合缝隙可等效为并联电容,从而降低了天线的谐振频率,实现了天线的进一步小型化。

图 1(b)是天线的下层介质板结构,介质板的边长为 W_{sub2},厚度为 H_{s2}。橘黄色部分位于介质板上表面,该结构为用于抑制辐射器后向辐射的寄生环,通过弯折走线实现小型化,其外轮廓边长与介质板边长相同,厚度为 W_1,蛇形走线所挖出的每个凹槽深度、宽度和间距均为 L_{sm}、W_{sm} 和 D_{iv}。绿色部分位于介质板的下表面,为天线的地板,其边长为 W_g,地板中心半径为 R_p 的圆孔用于防止 SMA 内导体的金属探针与地板短路。

图 1(c)为天线的侧视图,其中,两层介质板之间是厚度为 h 的空气层,可在一定程度上提升天线带宽和降低天线重量,上层介质板通过 4 个嵌套在短路钉外部的尼龙支撑柱(介电常数 $\varepsilon_r = 4.3$,损耗角正切 $\tan\delta = 0.004$)支撑起来,其内径为 R_{di},外径为 R_{do}。天线最终的各尺寸参数如表 1 所列。

表 1　天线尺寸参数表

Tab. 1　Parameter list of antenna structure

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
W_{sub1}	32	L_1	28.2	D_{fed}	1.2
L_{f0}	6.07	L_{f1}	11.52	L_{f2}	4.66
W_s	0.3	W_{l1}	2	W_{l2}	2.5
L_{l1}	7.4	L_{l2}	7.8	W_q	5.8
D_s	0.3	R_s	0.5	L_{t1}	6.4
L_{t2}	3	W_{sub2}	45	W_g	30
R_p	1.5	W_1	2	D_{iv}	0.95
L_{sm}	1.3	W_{sm}	1	H_{s1}	0.508
H_{s2}	0.813	h	4	R_{di}	1.35
R_{do}	2				

1.2　后向辐射抑制原理分析

设计的天线采用的辐射器结构为环形贴片,与地板大小相同的贴片天线相比,环天线后向辐射较大,F/B 较差,故其需要更大的地板才能保持较高的 F/B,而代价是天线整体的尺寸增大。为了使天线在紧凑尺寸的条件下保持较高的 F/B,采用了在地板外侧加寄生环的方法,寄生环的总长度为天线谐振频率的 1 个真空波长左右,寄生环作为反射器,将来自辐射器的后向辐射反射至前向,从而有效地提高天线的 F/B。另外,本文还通过蛇形走线增加寄生环的等效长度,实现了寄生环的小型化,使天线整体尺寸更加紧凑。

取 4 种不同的情况观察寄生环抑制后向辐射的效果,如图 2 所示。这 4 种情况中,只改变下层介质板中地板和寄生环的形状,天线其他结构保持不变。其中方案 1 为天线选用边长为 77 mm 的大地板;方案 2 为天线选用边长为 45 mm 的地板;方案 3 为天线选用 30 mm 的小地板,外部放置外边长为 45 mm 的寄生环;方案 4 为天线选用 30 mm 的小地板,外部放置外轮廓边长为 45 mm 弯折走线的蛇形寄生环。

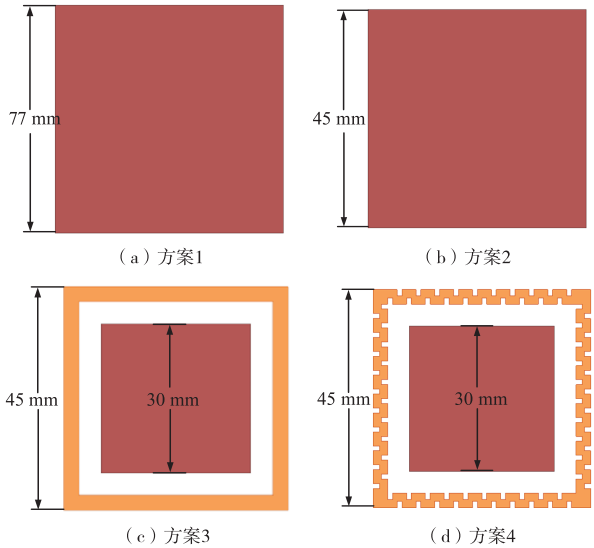


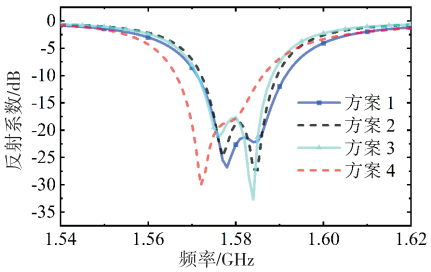
图 2　4 种不同情况的地板结构

Fig. 2　Four different cases of GND structure

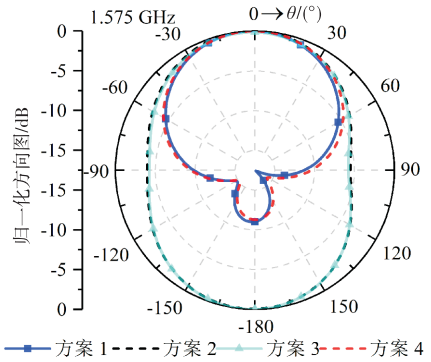
图 3 为这 4 种情况下天线的反射系数和 1.575 GHz 的方向图对比。在图 3(a)中可观察到,方案 1 和方案 4 的 −10 dB 反射系数带宽相对较宽,方案 2 和方案 3 带宽都较窄,而只有方案 4 向低频偏移。在图 3(b)中可观察到,方案 2 和方案 3 的后向辐射较大,F/B 较差;方案 1 和方案 4 可保持较高的 F/B,但方案 1 地板过大,不利于天线整体的小型

化，而方案 4 这种情况可使天线获得较高 F/B 的情况下保持紧凑的尺寸。

图 4 为这 4 种情况同相位下的近场电场分布，通过对比可明显发现，F/B 较差的方案 2 和方案 3 地板下方的电场较强，这导致天线有较强的后向辐射，而方案 1 和方案 4 地板下方的电场相对明显较弱，这表明天线的后向辐射被有效抑制，从而保持较高的 F/B。



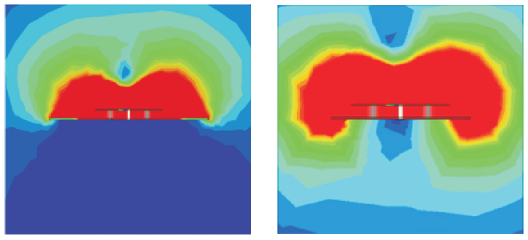
（a）反射系数对比



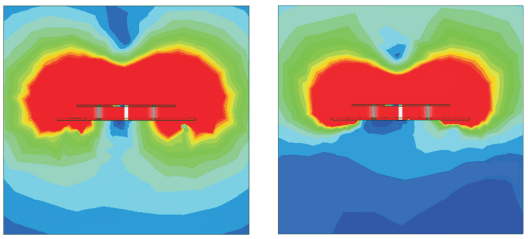
（b）归一化方向图对比

图 3　4 种情况的反射系数与方向图对比

Fig. 3　Comparisons of reflection coefficient and radiation patterns in four cases



（a）方案1　（b）方案2

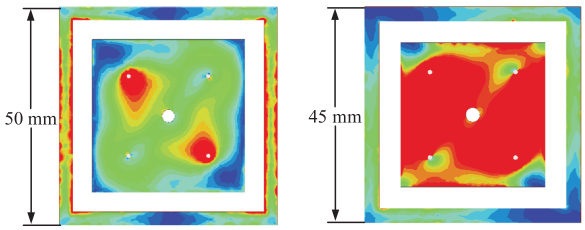


（c）方案3　（d）方案4

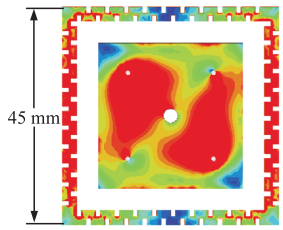
图 4　4 种情况的近场电场分布

Fig. 4　Near-field electric field distribution in four cases

图 5 所示的是 3 种不同情况的地板和寄生环上表面的同相位下电流分布，图 6 为这 3 种情况的反射系数与方向图对比。其中，方案 A 是边长为 35 mm 的地板，地板外部放置外边长为 50 mm 的寄生环；方案 B 是边长为 30 mm 的地板，地板外部放置外边长为 45 mm 的寄生环；方案 C 是边长为 30 mm 的地板，地板外部放置外边长为 45 mm 的蛇形寄生环。从图 5 中可观察出，方案 A 和方案 C 中寄生环的上表面两侧的电流较强，这是由于此时寄生环处于谐振状态，其耦合得到的能量较强，所产生的辐射可与辐射环前相叠加，后向抵消，因此 F/B 较高；而方案 B 中寄生环上整体的电流相对较弱，F/B 较低。此现象可说明，寄生环在具有明显的后向辐射抑制功能时，其环上两侧具有较强的电流分布，其等效总长度约为天线谐振频率的 1 个真空波长左右。另外观察图 6(a)可发现，F/B 较高的方案 A 和方案 C 的带宽相对较宽，而 F/B 较差的方案 B 带宽较窄。观察图 6(b)可发现，处于寄生环工作状态的方案 A 和方案 C 的输入阻抗实部随频率的变化相对平缓，其频率特性较好，故其阻抗带宽相对较宽。



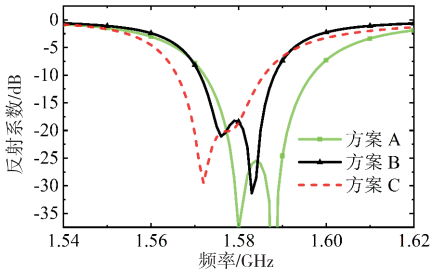
（a）方案A　（b）方案B



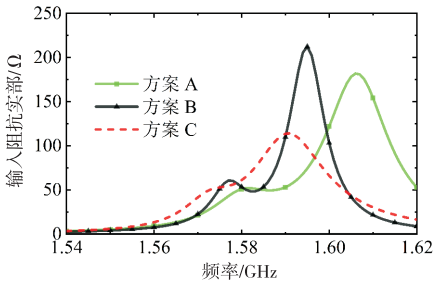
（c）方案C

图 5　3 种情况的地板寄生环电流分布对比

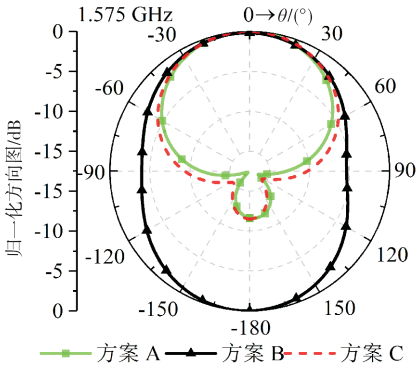
Fig. 5　Comparison of the current distribution of the GND parasitic loop in three cases



（a）反射系数对比



(b) 输入阻抗实部对比



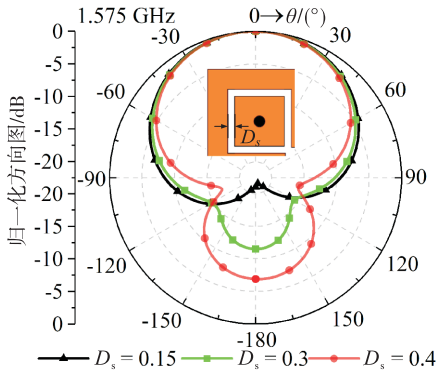
(c) 归一化方向图对比

图 6　3 种情况的阻抗特性与方向图对比

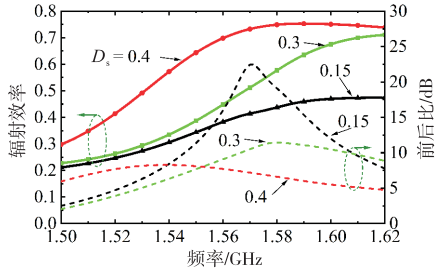
Fig. 6　Comparisons of impedance characteristic and radiation patterns in three cases

1.3　重要参数分析

图 7 为短路贴片与辐射环的间距 D_s 的改变对天线性能的影响,从图 7 中可观察出,D_s 越小时,天线在匹配频带处的 F/B 越高,天线的后向辐射抑制效果越强,但其辐射效率会相对较低。因此,该天线可通过改变 D_s 的大小实现天线 F/B 与辐射效率的灵活调控。图 8 为寄生环的凹槽深度 L_{sm} 的改变对天线性能的影响,而其实质上就是改变了寄生环的等效长度,L_{sm} 越大,寄生环的等效长度越长,其工作频率越低。从图 8(b)中可观察出,随着 L_{sm} 的增加,天线的具有较高 F/B 的频带会向低频移动,而其辐射效率会随 L_{sm} 的增加而逐渐提高。因此,此天线可通过微调 L_{sm} 的大小实现 F/B 与辐射效率之间的调控。



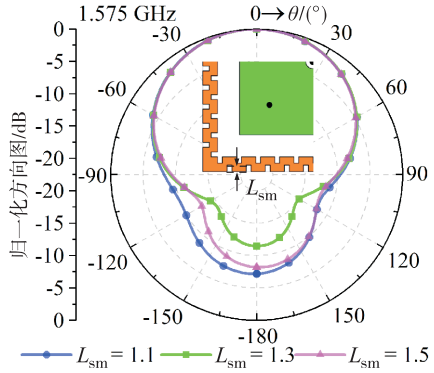
(a) 归一化方向图对比



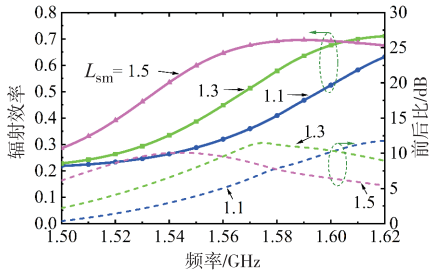
(b) 辐射效率与前后比对比

图 7　短路贴片与辐射环的间距 D_s 的改变对天线的影响

Fig. 7　Effect of the spacing D_s between the shorting patches and the radiation loop on antenna performance



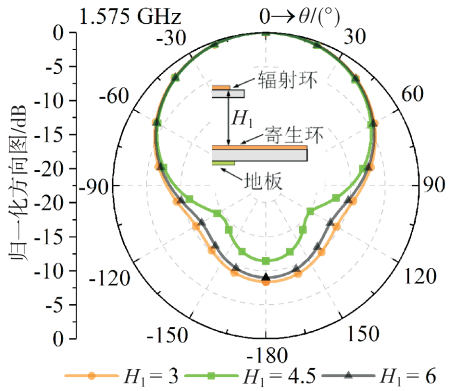
(a) 归一化方向图对比



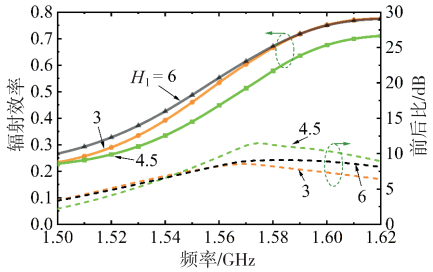
(b) 辐射效率与前后比对比

图 8　寄生环凹槽深度 L_{sm} 的改变对天线性能的影响

Fig. 8　Effect of parasitic loop groove depth L_{sm} on antenna performance



(a) 归一化方向图对比



（b）辐射效率与前后比对比

图 9　寄生环与辐射环距离 H_1 的改变对天线性能的影响

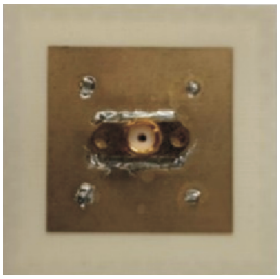
Fig. 9　Effect of the distance H_1 between the parasitic ring and the radiation loop on antenna performance

图 9 所示的是改变寄生环与辐射环的距离 H_1 对天线性能的影响，从中可观察到，在这 3 种情况中，$H_1 = 4.5$ mm（$0.024\lambda_0$，λ_0 为真空波长）的 F/B 整体较高，对天线的后向辐射抑制效果较好，其辐射效率相对较低。

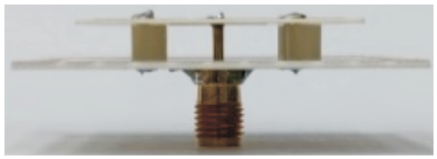
2　仿真与实测结果

为验证本文所提出的圆极化天线的性能，将所设计的天线调至最优性能并加工，天线的加工照片如图 10 所示。加工出的天线使用 Agilent E5071C 矢量网络分析仪测试天线的反射系数，并使用 SATIMO 近场微波暗室测试天线的远场辐射参数。

（a）天线俯视图



（b）天线仰视图

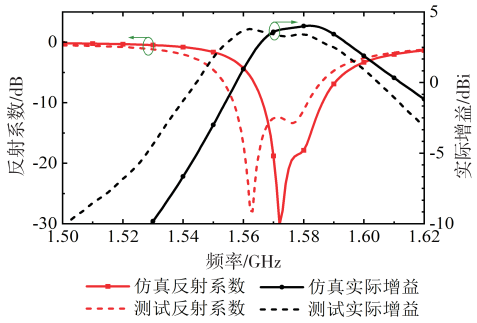


（c）天线侧视图

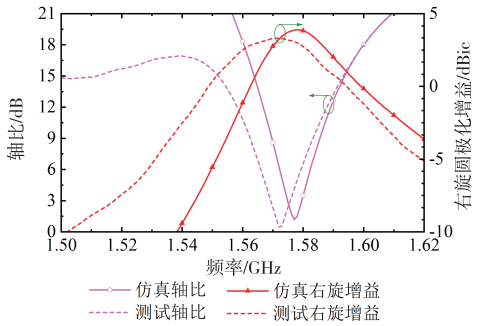
图 10　加工天线照片

Fig. 10　Fabricated prototype of the antenna

天线的仿真及测试结果如图 11 所示，在图 11（a）中可观察到，天线仿真的 −10 dB 反射系数带宽为 1.566 GHz ~ 1.588 GHz，测试的天线带宽为 1.557 GHz ~ 1.581 GHz，可覆盖 BDS-B1 和 GPS-L1 两个工作频段。在 −10 dB 反射系数带宽内仿真和测试的实际增益都可保持 3.25 dBi 以上。在图 11（b）中，天线仿真的 3 − dB 轴比带宽为 1.575 GHz ~ 1.579 GHz，测试的 3 − dB 轴比带宽为 1.570 GHz ~ 1.575 GHz。另外在 3 − dB 轴比带宽内仿真和测试的右旋圆极化（right-handed circular polarization，RHCP）增益均可保持在 3.19 dBic 以上。



（a）反射系数和增益结果



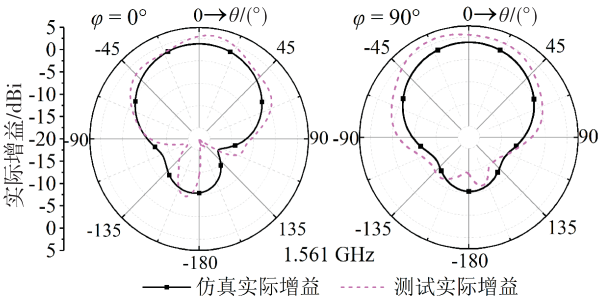
（b）轴比和右旋圆极化增益结果

图 11　天线仿真及测试结果

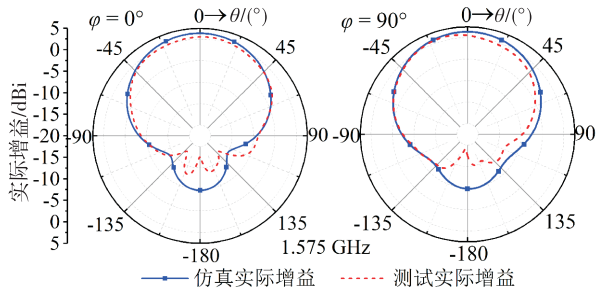
Fig. 11　Simulated and measured results of the antenna

图 12 所示的是天线在 1.561 GHz 和 1.575 GHz 的仿真和测试的方向图。在 1.561 GHz 和 1.575 GHz，天线仿真的 F/B 分别为 9.2 dB 和 11.17 dB，测试分别为 10.07 dB 和 13.71 dB。

结合以上的仿真和测试结果，可发现加工出的天线明显向低频偏移，这可能是加工误差使天线的耦合间距 D_s 减小的结果，耦合间距越小，天线与短路贴片之间的耦合越强，其并联电容的加载效应越强，频率降低的效果越明显。



（a）天线在1.561 GHz的仿真与测试的方向图



(b) 天线在1.575 GHz的仿真与测试的方向图

图 12　天线仿真及测试方向图

Fig. 12　Simulated and measured radiation patterns of the antenna

表 2 中所列的是本天线与以往的低剖面高 F/B 圆极化天线的尺寸及性能对比,通过对比可发现,本文所设计的天线在保持较高 F/B 的前提下,拥有更小的天线尺寸和更低的剖面。因此,相比之下本天线应用于小型化的移动终端内拥有更大的优势。

表 2　本天线与其他天线的尺寸与性能对比

Tab. 2　Comparison of the antenna size and performance between this and other antennas

尺寸性能	文献[7]	文献[9]	文献[10]	本天线
天线尺寸 $/\lambda_g^2$	0.24 × 0.24	0.27 × 0.27	0.29 × 0.29	0.24 × 0.24
天线剖面/λ_g	0.04	0.063	0.035	0.028
阻抗带宽	0.83%	10.1%	3.2%	1.5%
轴比带宽	0.25%	2.8%	1.8%	0.4%
前后比/dB	15.2	8	8	10

其中,λ_g 为介质波长,前后比取值为频带内最低值。

3　结论

文章设计出了一种具有较高 F/B 的低剖面圆极化环天线。在 ANSYS HFSS 三维电磁仿真软件对天线进行建模仿真,通过观察天线的近场电场分布和寄生环的电流分布,研究寄生环抑制后向辐射的工作机制,最终成功使天线在保持较高 F/B 的前提下实现了寄生环的小型化。同时,所设计的天线还可通过改变短路贴片与辐射环之间的耦合间距和寄生环凹槽深度实现天线 F/B 与辐射效率之间的灵活调控。另外,本文还对参数优化后的天线进行加工测试,测试结果表明,所设计的天线具有良好的后向辐射抑制效果,其阻抗带宽可覆盖 BDS-B1 和 GPS-L1 两个工作频段。所设计的天线具有尺寸小、剖面低、质量轻、F/B 高的优点,可应用于小型化的移动终端导航定位中。

参考文献:

[1] WANG J H. Antennas for global navigation satellite system (GNSS)[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(7): 2349-2355.

[2] WU Z W, YAO M L, MA H G, et al. Low-cost antenna attitude estimation by fusing inertial sensing and two-antenna GPS for vehicle-mounted satcom-on-the-move [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1084-1096.

[3] CHLAVIN A. A new antenna feed having equal E-and H-plane patterns[J]. Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation, 1954, 2(3): 113-119.

[4] LUK K M, WONG H. Complementary wideband antenna: US7843389[P]. 2010-11-30.

[5] GE L, LUK K M. A low-profile magneto-electric dipole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(4): 1684-1689.

[6] GE L, LUK K M. A wideband magneto-electric dipole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(11): 4987-4991.

[7] JIN P, ZIOLKOWSKI R W. Metamaterial-inspired, electrically small Huygens sources [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 501-505.

[8] TANG M C, WANG H, ZLOLKOWSKI R W. Design and testing of simple, electrically small, lowprofile, Huygens source antennas with broadside radration perfor mance [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(11): 4607-4617.

[9] LIN W, ZIOLKOWSKI R W. Electrically small, low-profile, Huygens circularly polarized antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(2): 636-643.

[10] 蔺炜,理查德·齐奥尔科夫斯基. 用于物联网中无线能量传输的电小尺寸惠更斯整流天线[J]. 空间电子技术, 2020, 17(2): 44-50.

[11] LI Y, SUN S, YANG F. A miniaturized yagi-uda-oriented double-ring antenna with circular polarization and directional pattern[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12(1): 945-948.

[12] YUAN J D, ZHENG J M, CHEN Z D. A compact mean-

dered ring antenna loaded with parasitic patches and a slotted ground for global navigation satellite systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(12):6835-6843.

[13] YUAN J D,WU S J,CHEN Z Z,et al. A compact low-profile ring antenna with dual circular polarization and unidirectional radiation for use in RFID readers[J]. IEEE Access,2019,7:128948-128955.

[14] YUAN J D,LI Y J. A compact circularly polarized microstrip ring antenna using a slotted ground for GNSS applications[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters,2020,88(1):29-36.

[15] YUAN J D,CHEN Z P,CHEN Z D,et al. A compact dual-band microstrip ring antenna using multiring ground for GPS L1/L2-band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2021,20(12):2250-2254.

[15] 陈修继,万继响. 每束多馈源天线的设计特点研究[J]. 中国空间科学技术,2017,37(4):49-55.

作者简介:杨玉凡(1997—),河南南阳人,硕士研究生。主要研究方向为圆极化天线。E-mail:2060432077@email.szu.edu.cn

通讯作者:张晓(1987—),广东高州人,博士,深圳大学助理教授。截至 2022 年 8 月,共发表 SCI 论文超过 50 篇,主持国家自然科学基金 1 项,深圳市基础研究面上项目 1 项,横向项目 3 项,授权专利 10 余项,成果转化 5 项。2018 年获澳门科技奖之研究生科研奖,同时被评为深圳市海外高层次人才(孔雀计划 C 类)、南山区领航人才。主要研究方向为微带贴片天线,终端天线,圆极化天线,反射阵,特征模理论等。E-mail:xiao.zhang@szu.edu.cn