文章编号:1005-6122(2023)01-0008-05

DOI:10.14183/j. cnki. 1005-6122. 202301002

基于结构复用的双频圆极化共口径天线设计

王 闯 曹文权 马文宇 李丹华

(陆军工程大学 通信工程学院,南京 210007)

摘 要:提出了一款低剖面宽波束高口径利用率的双频圆极化共口径天线。天线采用结构复用的设计理念,规 划拓扑布局,设计不同类型的天线单元。上层采用微带环形贴片使其工作在无人机数据传输频段(1430~1444 MHz), 下层采用微带圆形贴片使其工作在无人机遥控频段(2408~2440 MHz)。环形贴片既是低频辐射器,同时也作为高频引 向器进行波束调控,实现宽波束特性。仿真和测试结果表明,该天线具有良好的阻抗匹配和圆极化特性,阻抗和轴比带 宽均覆盖了无人机通信系统的两个工作频段,同时天线的剖面高度仅为 0.07入₀。因此,实现了结构紧凑、性能可控的 宽波束双频圆极化共口径天线,在无人机通信系统中具有潜在的应用价值。

关键词: 结构复用,低剖面,宽波束,双频,圆极化,共口径

A Dual-Band Circularly Polarized Shared-Aperture Antenna Based on Structure Reuse

WANG Chuang, CAO Wen-quan, MA Wen-yu, LI Dan-hua

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: A low-profile wide-beam dual-band circularly polarized (CP) shared-aperture antenna with high aperture reuse efficiency is proposed in this paper. The antenna adopts the structure reuse design concept, plans the topology layout and designs different types of antenna elements. The top layer uses microstrip ring antenna and works in the band of unmanned aerial vehicle (UAV) data transmission (1430–1444 MHz). The bottom layer uses microstrip circular patch antenna and works in the band of UAV remote control (2408–2440 MHz). The ring patch is not only a low-band radiator, but also serves as a high-band director for beam control to achieve wide beam characteristics. Simulated and measured results show that the antenna has good impedance matching and CP radiation characteristics with the impedance and axial ratio bandwidth both cover the two operating bands of UAV communication. At the same time, the height is only 0. $07\lambda_0$. Therefore, a wide-beam dual-band CP shared-aperture antenna with a compact structure and controllable performance is realized, which has application value in UAV communication systems.

Key words: structure reuse, low-profile, broad beamwidth, dual-band, circularly polarized, shared-aperture

引 言

随着移动通信系统的发展,对天线波束覆盖范 围的要求也越来越高。在无人机等飞行平台的通信 系统中,为了能满足各种飞行姿态下的通信需求,也 要求天线具有宽波束宽角覆盖能力^[1]。同时,多频 共口径天线有利于实现整个通信系统的小型化、多 功能化、高集成化^[2]。因此,如何在满足天线低剖 面的情况下,提高波束宽度和口径复用率,是多频共 口径天线研究的一个难点。

目前最常用的多频共口径天线大多基于交错、 重叠、镂空和嵌套技术的排列布局^[3-7]。然而,采用 这种传统理念设计的多频共口径天线通常具有较高 的剖面^[8-10],重叠、镂空等共口径技术难以满足低剖 面特性的阵列布局需要;同时这类天线的结构布局 较为复杂,不利于系统的高集成化。在结构复用共 口径天线中^[11-13],不同辐射器间仅为结构融合但性 能互不相关,即可独立控制每一辐射器性能且相互 影响很弱,因此易于实现多种功能组合,具备灵活功 能配置能力。

^{*} 收稿日期:2022-03-18;修回日期:2022-05-20 基金项目:国家自然科学基金(61871399)

本文利用结构复用的设计理念,采用不同类型 的天线单元来规划共口径天线的拓扑布局。上层环 形贴片既是低频辐射结构,同时也作为高频寄生结 构,利用其辐射场耦合能力,调控下层圆形贴片天线 的波束宽度,实现了宽波束特性。同时天线具有低 剖面特性。因此,实现了结构紧凑、性能可控的宽波 束双频圆极化共口径天线,在无人机通信系统中具 有潜在的应用前景。

1 天线设计与分析

1.1 天线结构设计

本文提出的天线结构如图 1 所示。该天线利用 结构复用的设计,采用不同类型的天线单元来规划 共口径天线的拓扑布局。天线设计为层叠结构,其 中上层介质板(Roger RT/duroid5880, ε_r =2.2, tan δ = 0.0009)厚度为 h_1 ,微带环形贴片(宽度 W_1)为辐射 结构,并采用耦合条带馈电, L_3 为耦合条带长度, W_2 为耦合条带宽度,s为耦合条带与环形贴片间距, t为耦合条带上馈电探针距中心线的距离。微带环 形贴片天线工作在无人机数据传输频段(1430~ 1444 MHz),其工作频率由式(1)确定^[14]。

$$f_{n} = \frac{nc}{4[L_{1} - \frac{1}{2}(L_{1} - L_{2})] \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}, n = 1, 2, 3 \cdots$$
(1)

其中,c代表光速, ε_{eff} 代表等效介电常数, L_1 和 L_2 为环形天线的两条边长,当环形天线工作在基本模式(n=1),即 $L_1=L_2=\lambda/4$ (这里 λ 为导波波长),可以实现天线的小型化。下层介质板(Roger RT/duroid5880)厚度为 h_2 ,微带圆形贴片为辐射结构,并采用多馈点馈电, f_s 为其馈电探针距中心线的距离,中间空气层高度为 d_a 微带圆形贴片天线工作在无人机遥控频段(2408~2440 MHz),其半径 R_1 由式(2)确定^[14], ε_r 代表相对介电常数。优化后的天线参数尺寸如表1所示。

$$R_1 = \frac{1.841c}{2\pi f \sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2}$$

表1 天线参数尺寸

| 参数 | 数值/mm | 参数 | 数值/mm |
|-------|-------|-------------|-------|
| L | 100 | \$ | 1 |
| L_1 | 40 | t | 6 |
| L_3 | 20 | $f_{\rm s}$ | 9 |
| R_1 | 23. 8 | d | 11 |
| W_1 | 4. 5 | h_1 | 1 |
| W_2 | 5 | h_2 | 3 |



单馈点馈电是利用微扰产生正交简并模来实现 圆极化特性的,其缺点是轴比带宽较窄,轴比特性对 馈电位置变化比较敏感,加工精度要求高,调试困 难。同时通过前期的研究工作发现,上层微带环形 贴片使用单馈点馈电会造成下层圆形贴片辐射方向 图的不对称性。因此本文中采用多馈点馈电技术可 以有效抑制交叉极化,提高圆极化性能。我们独立 设计了两个顺序旋转的一分四功分馈电网络^[15],分 别印刷在介电常数 2.2,厚度为 1 mm 的介质板上, 对两个天线进行独立馈电,其结构如图 2 所示。环 形天线的馈电网络幅度和相位特性仿真结果如图 3 所示,可以看出四个端口输出信号幅度波动小于 0.5 dB,相邻端口的相位差约为 90°,可以实现良好 的圆极化特性。



1.2 结构复用设计作用机理

环形贴片对圆形贴片天线在 xoz 平面内 2424 MHz 处的辐射方向图及增益影响曲线如图 4 所示。可以 发现环形贴片天线产生的辐射场会有效降低圆形贴 片天线的增益,从而达到展宽半功率波束宽度(HP-BW)的效果,尤其是在环形贴片天线的谐振点附 近。图 5 展示了圆形贴片天线对环形贴片天线在 1437 MHz 处 xoz 平面内的方向图和轴比特性的影 响曲线,发现其对上层环形贴片天线辐射特性影响 很小。因此,上层低频天线性能相对独立,下层高频 天线性能可控,这可以独立设计上层低频辐射结构, 并可以针对不同频段的应用场景需求进行修改。



为了阐释结构复用设计作用的机理,图6展示 了天线在2424 MHz 处的场分布情况,可以看出上 层环形贴片天线也会产生辐射场,对下层圆形贴片 天线的辐射场产生耦合作用。因此,上层环形贴片 不仅作为低频辐射器,而且还可作为高频引向器进 行波束调控,实现宽波束特性。



1.3 天线特性分析

本节将仿真分析空气层高度 d 和环形天线边长 L₁ 对天线阻抗匹配和辐射特性的影响(分析某个参数的影响时,其他参数的取值情况与表 1 一致),以此来研究上层环形贴片天线对下层圆形贴片天线辐射性能的作用关系。图 7(a)展示了环形贴片天线的反射系数随空气层高度变化曲线。由图可知,天线的谐振频率随空气层高度的增加而降低,当 d = 11 mm 时环形贴片天线工作频段覆盖目标频段(1430~1444 MHz)。圆形贴片天线在 xoz 平面内2424 MHz 处辐射方向图随空气层高度的变化曲线如图 7(b)所示。因为天线辐射结构对称,我们只需 研究其中的一个面即可(本文选择 xoz 面)。由图可 知,空气层高度 d 对下层圆形贴片辐射方向图的影 响极小,因此优化后的空气层高度 d=11 mm。



图 8 展示了环形贴片天线边长 L_1 对圆形贴片 天线辐射性能的影响。圆形贴片天线在 xoz 平面内 2424 MHz 处辐射方向图如图 8(a)所示。可以发 现,天线的波束宽度受到环形贴片长度的影响,当 $L_1 = 40 \text{ mm}$ 时圆形贴片天线的波束展宽效果最好, HPBW 为 117°(-59°~+58°)。圆形贴片天线在 xoz 平面内 2424 MHz 处轴比波束宽度如图 8(b)所 示。由图可知,轴比波束宽度随着 L_1 的增大而增 加,当 $L_1 = 40 \text{ mm}$ 时圆形贴片天线的 3 dB 轴比波束 宽度为 144°(-72°~+72°)。综合 HPBW 和轴比 波束宽度性能表现,优化后的环形贴片天线长度 $L_1 = 40 \text{ mm}$ 。



2 结果与讨论

为验证设计方案的有效性,根据上述优化后的 天线尺寸加工实物并进行测试。如图9所示,上下 层天线均印刷在 Roger RT/duroid5880 的介质板上, 两层结构间的空气层由空气螺钉调整固定间距。实 际测试中4根电缆分别与四端口的馈电网络相连, 图2中两个输入端口1和端口2分别连接测试输入 端口。测试结果与仿真结果基本吻合,证明了设计 方法的有效性。

图 10 展示了天线仿真与测试的 *S* 参数和增益 曲线。可以看出,仿真和测试的曲线趋势基本一致, 测试结果略有偏差,主要是由于介质板在加工过程 中特性发生轻微改变造成的。由图 10(a)可知,低



图 9 天线实物及测量

频段测试的阻抗带宽约为 7% (1400~1500 MHz), 在带宽范围内,测试的增益(6~6.2 dBic)具有稳定 的性能表现。图 10(b)表明在高频段测试的阻抗带 宽约为 5.8% (2385~2525 MHz),测试的增益在 4~ 6.5 dBic 范围内。测试的带宽范围覆盖了无人机数 据传输和遥控的工作频段,测试和仿真的差异主要 由馈电网络的损耗造成。



图 10 仿真与测试的 S 参数和增益

图 11 和图 12 分别描绘了环形贴片和圆形贴片 天线仿真与测试的轴比特性曲线,可以看出天线的 轴比带宽和波束宽度较宽,足以满足无人机通信的 工作需求。其中,1437 MHz 处测试的 3 dB 轴比波 束宽度为 210°(-105°~+105°),2424 MHz 处测试 的 3 dB 轴比波束宽度为 152°(-77°~+75°)。因 此,天线采用多馈点馈电技术,可以有效提升圆极化 性能。在 1437 MHz 和 2424 MHz 处 xoz 平面内仿真 与测试的辐射方向图如图 13 所示。可以看出,天线 仿真与测试的方向图吻合较好,在最大辐射方向上 辐射左旋圆极化(LHCP)特性。同时,由于使用了 结构对称的辐射结构,天线的辐射方向图对称性良 好。1437 MHz 处测试的增益和 HPBW 分别为 6.1 dBic 和 90°(-45°~+45°), 2424 MHz 处测试的增益和 HPBW 为 5.6 dBic 和 112°(-56°~+56°)。



表 2 展示了本文所提出的天线与其他同类型天 线的性能对比。其中, RAR (Ratio of Aperture Reuse)定义为较小和较大辐射结构的占用面积之比, λ₀ 为低频点处自由空间中的波长。文献[11]和 [12]提出的是大频率比共口径天线,当比拟高频点 处波长时天线的剖面较高。对比发现,本文提出的 天线具有低剖面、宽波束、高口径复用率和圆极化特 性。同时,结构复用的设计理念可以推广到设计大 频比共口径天线,采用的天线形式可以针对不同设 计目标进行选择。当在大频比情况下,对于低频来 说依然可以保持低剖面优势,以高频的波长作对比 其剖面高度会增加。

表 2 本文与参考文献的天线性能对比

| 文献 | 频率/ GHz | 频比 | 高度/ (<i>λ</i> ₀) | 极化 方式 | HPBW/ (°) | RAR/ (%) |
|------|-------------|-----|----------------------------------|----------|--------------|-------------|
| [8] | 2.7/4.9 | 1.8 | 0.25 | 线极化 | 120/120 | 33 |
| [9] | 2.6/3.45 | 1.3 | 0.26 | 双线极化 | 61/66 | 37 |
| [10] | 2.2/3.6 | 1.6 | 0.19 | 双线极化 | 63/88 | 29 |
| [11] | 3.5/60 | 17 | 0.02 | 线极化 | 60/15 | 77 |
| [12] | 2.6/25 | 9.6 | 0.1 | 线极化 | 70/25 | 50 |
| 本文 | 1.437/2.424 | 1.7 | 0.07 | 圆极化 | 90/112 | 90 |

3 结论

本文采用结构复用技术,提出了一款基于无人 机飞行平台的宽波束双频圆极化共口径天线。环形 贴片既是低频辐射结构,同时也作为高频寄生结构 进行波束调控,实现宽波束特性。天线工作在 1437/2424 MHz,具有小频率比为1.7。仿真和测试 结果表明,该天线具有良好的阻抗匹配和圆极化辐 射特性,阻抗和轴比带宽覆盖了无人机飞行的两个 工作频段,同时天线的剖面高度仅为0.07λ₀。因 此,本文设计的天线结构紧凑、性能可控,在无人机 通信系统中具有潜在的应用前景。

参考文献

- Liu S, Yang D, Pan J. A low-profile circularly polarized metasurface antenna with wide axial-ratio beamwidth[J].
 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1438-1442
- [2] 陈旷达,钟顺时,延晓荣. S/X 双波段双极化共口径 天线阵的设计[J]. 微波学报, 2008, 24(6): 65-67
 Chen K D, Zhong S S, Yan X R. Design of S/X dualband dual-polarized shared-aperture microstrip antenna array[J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(6): 65-67
- [3] Zhang J D, Wu W, Fang D G. Dual-band and dual-circularly polarized shared-aperture array antennas with single-layer substrate [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 64(1): 109-116
- [4] Zhou G N, Sun B H, Liang Q Y, et al. Triband dual-polarized shared-aperture antenna for 2G/3G/4G/5G base station applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(1): 97-108
- [5] Yang D, Cao F, Pan J. A single-layer dual-frequency shared-aperture SIW slot antenna array with a small frequency ratio [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(6): 1048-1051
- [6] Zhang J, Shen Z. Dual-band shared-aperture UHF/UWB RFID reader antenna of circular polarization [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66 (8): 3886-3893
- [7] Chen Y, Zhao J, Yang S. A novel stacked antenna configuration and its applications in dual-band shared-aper-

ture base station antenna array designs [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(12): 7234-7241

- [8] Yang G W, Zhang S. A dual-band shared-aperture antenna with wide-angle scanning capability for mobile system applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5): 4088-4097
- [9] Liu Y, Wang S, Li N, et al. A compact dual-band dualpolarized antenna with filtering structures for sub-6 GHz base station applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(10): 1764-1768
- [10] He D, Yu Q, Chen Y, et al. Dual-band shared-aperture base station antenna array with electromagnetic transparent antenna elements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 5596-5606
- [11] Zhang J F, Cheng Y J, Ding Y R, et al. A dual-band shared-aperture antenna with large frequency ratio, high aperture reuse efficiency, and high channel isolation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 67(2): 853-860
- [12] Zhang J, Zhang S, Pedersen G F. Dual-band structure reused antenna based on quasi-elliptic bandpass frequency selective surface for 5G application [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68 (11): 7612-7617
- [13] Liu Y, Cheng Y J, Zhao M H, et al. Dual-band sharedaperture high-efficiency reflectarray antenna based on structure-reuse technique[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(3): 366-370
- [14] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子 科技大学出版社, 1991
 Zhong S S. Theory and application of microstrip antenna [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1991
- [15] Maddio S. A compact wideband circularly polarized antenna array for C-band applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1081-1084

王 闯 男,1997年生,博士生。主要研究方向:共口径与 共形天线技术,天线理论与技术。

E-mail: cwang@ aeu. edu. cn

曹文权(通信作者) 男,1985年生,副教授,博士生导师。 主要研究方向:新型人工电磁结构天线,天线理论与技术。