

基于有源超表面天线罩的窄截面方向图可重构天线

王浩, 周永金

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海, 200444)

摘要 针对无人机数据链通信存在抗干扰性能差、防捕获能力弱等问题, 提出了一种具有良好气动性能的基于有源超表面天线罩的窄截面方向图可重构天线。该天线由宽带平面印刷全向天线、窄截面有源超表面天线罩以及双频阻抗匹配网络组成。当超表面天线罩上二极管均截止(未加偏置电压)时, 天线罩处于全透波状态, 天线工作于宽带全向通信模式。当超表面天线罩特定区域二极管导通时, 该区域天线罩处于全屏蔽状态, 天线工作于双频定向通信模式, 此时通过引入双频阻抗匹配网络显著改善天线的阻抗匹配。全向通信模式下, 天线相对带宽达到44.6%, 全向增益可达1.37 dBi, 不圆度小于2.5 dBi; 定向模式下, 双频天线上下频带分别为1.4 GHz和1.8 GHz, 相对带宽分别为9.1%和15.3%, 最大定向增益达5.2 dBi。该天线具有窄截面、低成本等优点, 能够在宽带全向通信和双频定向通信工作模式之间灵活切换, 有望提高无人机抗干扰、防捕获的性能。

关键词 数据链通信; 方向图可重构天线; 有源超表面天线罩; 阻抗匹配; 无人机

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.02.013

中图分类号 V279; TN820 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)02-0110-05

A Narrow Cross-Section Pattern Reconfigurable Antenna Based on Active Meta-Surface Radome

WANG Hao, ZHOU Yongjin

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract Aimed at the problems that military unmanned aerial vehicle (UAV) data link communication is poor in anti-interference performance and weak in anti-captured capability, a narrow cross-section pattern-reconfigurable antenna is proposed based on an active meta-surface radome with excellent aerodynamic performance. The antenna is comprised of a broadband planar omnidirectional antenna, a narrow cross-section active meta-surface radome with excellent aerodynamic performance, and a dual-frequency impedance matching network. When all the diodes on the meta-surface radome are off (without bias voltage applied), the radome is in a fully transparent state, and the antenna operates in a broadband omnidirectional communication mode. However, when specific diodes on the meta-surface radome are turned on, the corresponding area of the radome becomes fully shielded, and the antenna works in a dual-frequency directional com-

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61971469)

作者简介: 王浩(1996-), 男, 江西上饶人, 硕士生, 研究方向为机载方向图重构天线。E-mail: 15279101016@163.com

通信作者: 周永金(1982-), 男, 山东荣成人, 教授, 研究方向为智能超表面、新型天线与传感系统。E-mail: yjzhou@shu.edu.cn

引用格式: 王浩, 周永金. 基于有源超表面天线罩的窄截面方向图可重构天线[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(2): 110-114. WANG Hao, ZHOU Yongjin. A Narrow Cross-Section Pattern Reconfigurable Antenna Based on Active Meta-Surface Radome[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(2): 110-114.

munication mode. In this case, the impedance matching of the antenna is improved significantly by introducing a dual-frequency impedance matching network. In the omnidirectional communication mode, the antenna exhibits a relative bandwidth of 44.6%, a maximum gain of 1.37 dBi, and an out-of-roundness of less than 2.5 dBi. In the directional mode, the dual-frequency antenna has upper and lower frequency bands of 1.4 GHz and 1.8 GHz, respectively, with relative bandwidths of 9.1% and 15.3%. The maximum directional gain can reach 5.2 dBi. The proposed antenna offers the advantages of a narrow cross-section and low cost while allowing flexible switching between broadband omnidirectional communication mode and dual-frequency directional communication mode. The proposed antenna is expected to enhance the anti-interference and anti-capture performance of UAVs.

Key words data link communication; pattern reconfigurable antenna; active meta-surface radome; impedance matching; unmanned aerial vehicle

随着科技的发展和现代战争的需要,无人机逐渐被广泛应用于侦察、探测、通信等军事领域^[1-2]。它具有成本低、适应性强和执行任务能力强的优点。然而,无人机对抗技术也日趋成熟,极大地增加了无人机被干扰和捕获的可能性。目前无人机数据链通信通常采用窄截面全向天线,比如常见的刀型天线^[3-5],其具有轻量化、小尺寸、气动性能和全向辐射性能良好的优点,但也存在抗干扰能力弱的缺陷。定向天线技术通过控制天线辐射方向,可以实现将能量集中在自己的目标方向并减少其他方向的能量,从而达到抗干扰和反捕获目的,提高无人机的生存能力。窄截面方向图可重构天线在保持全向通信优势的同时,还可以实现全向/定向切换,因而能够利用定向天线技术提高无人机抗干扰、反捕获的能力,因而引起人们的广泛关注。

目前,实现方向图可重构的主要方法有 3 种。第 1 种方法是通过调控开关器件改变天线的辐射结构^[6-8],改变其表面电流分布,进而实现全向/定向方向图切换。该方法多用于微带贴片天线,由于其带宽较窄,还难以满足现代化军事通信需求。第 2 种方法是定向天线作为阵元组阵^[9-11],通过馈电网络切换辐射单元,实现方向图重构。不过,该方法会导致天线辐射效率降低。第 3 种方法是通过超表面天线罩与天线的联合实现方向图可重构^[12-13],利用超表面对电磁波的调控,改变天线波束指向。第 3 种方法具有低成本、轻质量、易调控等优点,在无人机领域具有潜在的重要研究意义。

本文所提出的基于有源超表面天线罩的窄截面方向图可重构天线如图 1 所示,由宽带平面印刷全向天线、窄截面有源超表面天线罩以及双频阻抗匹配网络组成。其中,宽带平面印刷全向天线具有低成本、小尺寸、全向性能良好等优点;通过调控有源超表面天线罩特定区域二极管的通断状态,天线罩透波/屏蔽状态发生改变,使得天线能够在全向通信

模式与双频定向通信模式之间灵活切换;天线工作于双频定向时,通过双频阻抗匹配网络显著改善有源超表面天线罩对天线阻抗的影响,提升通信带宽。

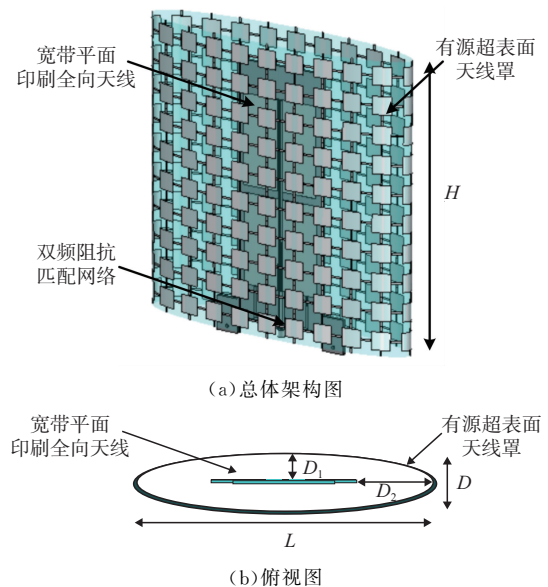


图 1 基于有源超表面天线罩的窄截面宽带方向图可重构天线结构示意图

1 宽带平面印刷全向天线设计

宽带平面印刷全向天线的结构如图 2 所示。该天线以共面波导为基本结构,沿中心馈线两侧分布的两对半波振子作为阵元,在介质基板的同一面,另一面印刷两根连接线。为确保与同轴外导体相连的贴片上的电流相位相同保持每一段辐射贴片与下一段辐射贴片分别连接不同的馈电端。天线基板材料为 FR4,相对介电常数为 4.4,损耗正切值为 0.025。在馈电端与天线之间引入四分之一波长平面印刷巴伦,以改善同轴馈电引起的不均匀电流分布。在天线顶部加载终端负载以改善天线全向性。该结构与传统的同轴共线天线相比,具有小型化、窄截面、易集成等优点。天线参数尺寸列在表 1 中。

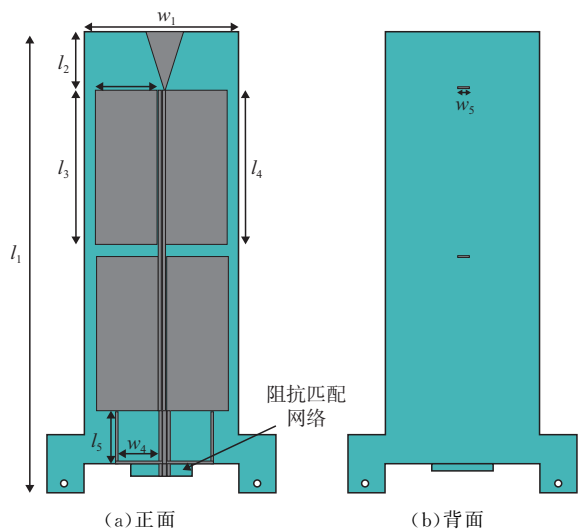


图 2 宽带平面印刷全向天线结构示意图

表 1 宽带平面印刷全向天线各参数尺寸

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
l_1	141.0	w_1	50.9
l_2	18.0	w_2	12.0
l_3	50.2	w_3	19.9
l_4	54.3	w_4	14.1
l_5	18.0	w_5	2.8

2 窄截面有源超表面天线罩设计

如图 1 所示,本文所提出的有源超表面天线罩呈椭圆柱形,由 200 个超表面单元排布而成。天线罩宽度 $L=154.6\text{ mm}$,最大厚度 $D=30\text{ mm}$,高度 $H=160\text{ mm}$ 。天线罩与天线间隔 D_1 和 D_2 分别为 14 mm 和 39.8 mm 。超表面单元由正方形贴片和四周的矩形金属条带组成,并通过二极管连接,如图 3 所示。单元周期 $p=16\text{ mm}$,正方形贴片边长 $a=10\text{ mm}$,金属条带长度 $b_1=2.7\text{ mm}$,宽度 $b_2=0.9\text{ mm}$ 。介质基板材料为聚酰亚胺(PI),厚度 $t=0.2\text{ mm}$,相对介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.001。

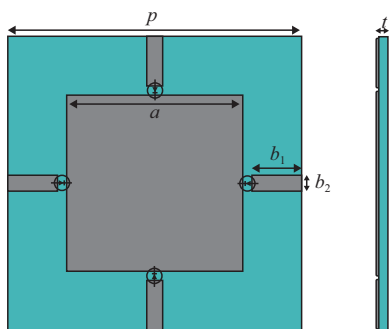


图 3 超表面单元结构示意图

本文使用的二极管型号为 MA4AGP907。如图 4 所示,当二极管导通时,等效为 $R_1=4.2\ \Omega$ 的小电阻;当二极管截止时,等效为 $R_2=300\text{ k}\Omega$ 的大电

阻和 $C=0.042\text{ pF}$ 的电容并联。

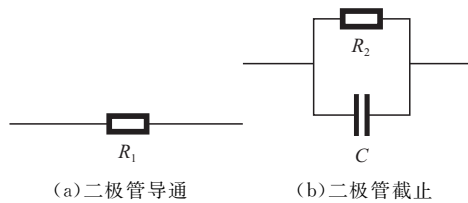
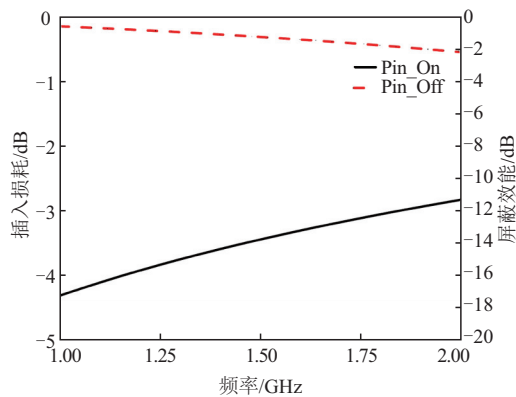
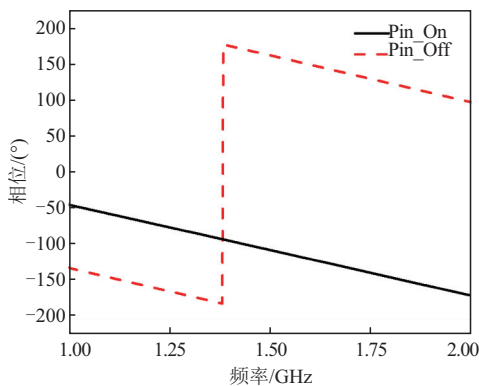


图 4 二极管导通/断开等效电路

超表面单元的传输系数 S_{21} 曲线如图 5(a)所示,可以看出,当二极管截止时,超表面处于全透波状态,插入损耗(insertion loss, IL)在 $1\sim 2\text{ GHz}$ 范围内小于 0.7 dB ;当二极管导通时,超表面处于屏蔽状态,屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)大于 10 dB 。由于二极管截止状态的等效电路中存在并联电容,两状态下的 S_{21} 相位相差 90° ,如图 5(b)所示。



(a) S_{21} 幅值曲线



(b) S_{21} 相位曲线

图 5 超表面单元 S_{21} 曲线

将超表面单元排布成 20×10 阵列,并将其曲面共形成有源超表面天线罩。当天线罩上全部二极管均截止时,天线罩处于全透波状态,天线工作于全向模式;当仅控制天线罩宽边中心 3 列二极管截止,其余二极管导通时,天线罩仅在该 3 列区域透波,天线工作于双频定向模式。

3 天线和超表面天线罩的联合设计

通过对比裸天线与加载有源超表面天线罩后天

线反射系数 S_{11} 曲线的变化,说明有源超表面天线罩对天线性能的影响以及引入双频匹配网络的意义。

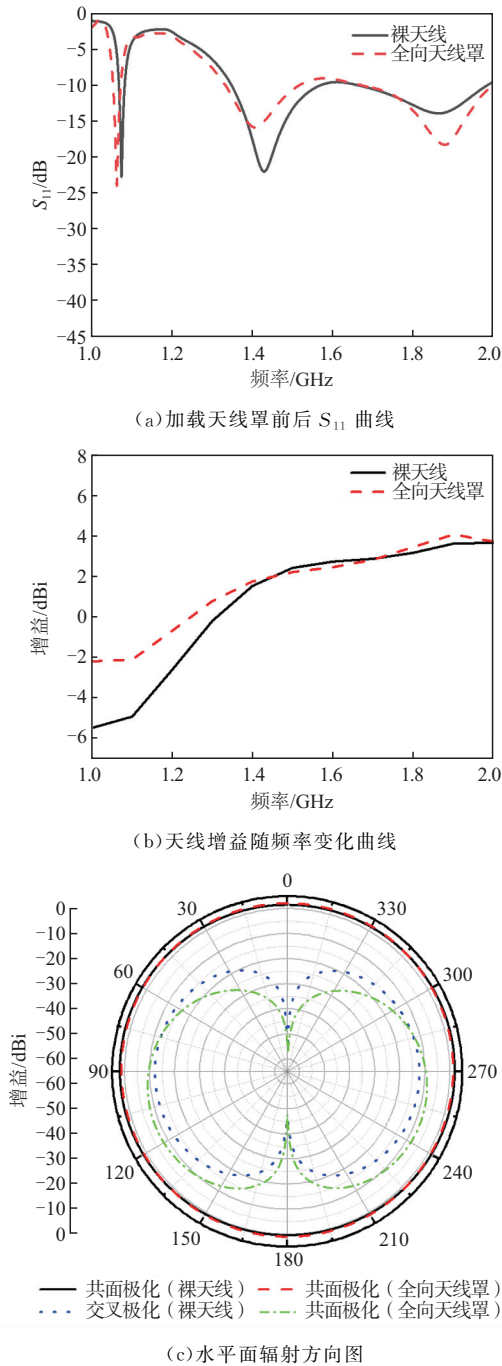


图 6 加载全向天线罩前后天线 S_{11} 曲线、增益曲线及方向图
当天线罩处于全透波状态时,天线工作于全向模式。裸天线与加载透波超表面天线罩的 S_{11} 曲线分别如图 6(a)中黑线与红线所示。从图中可以看出,裸天线的相对带宽为 37.8%,加载透波超表面后,阻抗带宽无明显变化。

加载全向超表面天线罩前后天线的增益曲线以及水平面辐射方向图如图 6(b)和图 6(c)所示。从图中可以看到,在 1.4~2.0 GHz 范围内,天线增益及方向图无明显变化,而在 1.0~1.2 GHz 范围内,

天线增益得到提升。

然而,当天线罩部分区域透波,其余区域屏蔽电磁波时,加载定向超表面天线罩后天线的 S_{11} 曲线如图 7(a)中黑色实线所示。此时,天线罩屏蔽区域可等效为金属壁,为保证天线罩的窄截面特性,天线与天线罩的距离不能过大,否则会导致天线阻抗带宽显著恶化。为解决上述问题,本文在天线与馈电端引入双频阻抗匹配网络。引入双频阻抗匹配网络后,天线 S_{11} 曲线如图 7(a)中红色虚线所示,阻抗带宽明显改善,天线在 1.4 GHz 和 1.8 GHz 处实现双频通信,且相对带宽分别可达 9.1%和 15.3%。

本文所提出的双频阻抗网络由 L 型低频匹配网络、L 型高频匹配网络与电阻 R 串联构成,如图 7(b)所示。由于匹配网络采用共面波导结构,因此所加载的集总元件呈左右对称分布。其中,L 型低频匹配网络由并联电感和串联电容组成,L 型高频匹配网络由串联电感和并联电容组成。相应的集总元件值为: $R=22 \Omega, L_1=L_2=11.6 \text{ nH}, L_3=0.22 \text{ nH}, C_1=8 \text{ pF}, C_2=C_3=1 \text{ pF}$ 。

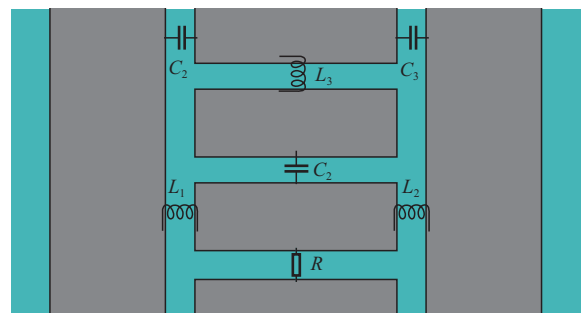
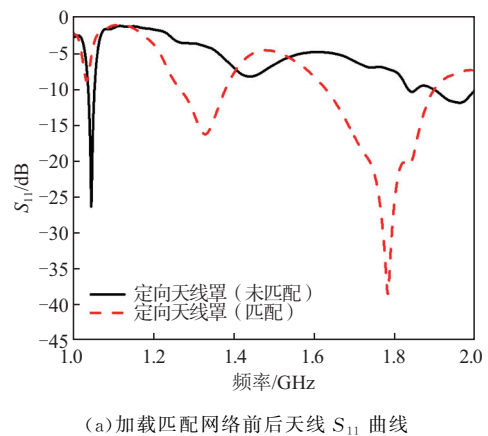


图 7 定向模式下加载匹配网络前后天线 S_{11} 曲线及双频阻抗匹配网络平面示意图

引入双频阻抗匹配网络后,1.4 GHz 和 1.8 GHz 频率处天线水平面方向图如图 8(a)和图 8(b)所示。从图中可以看出,天线可在全向通信模式和双频定向通信模式之间灵活切换,并且天线全向不圆度小于 2.5 dBi,最大定向增益可达 5.2 dBi。

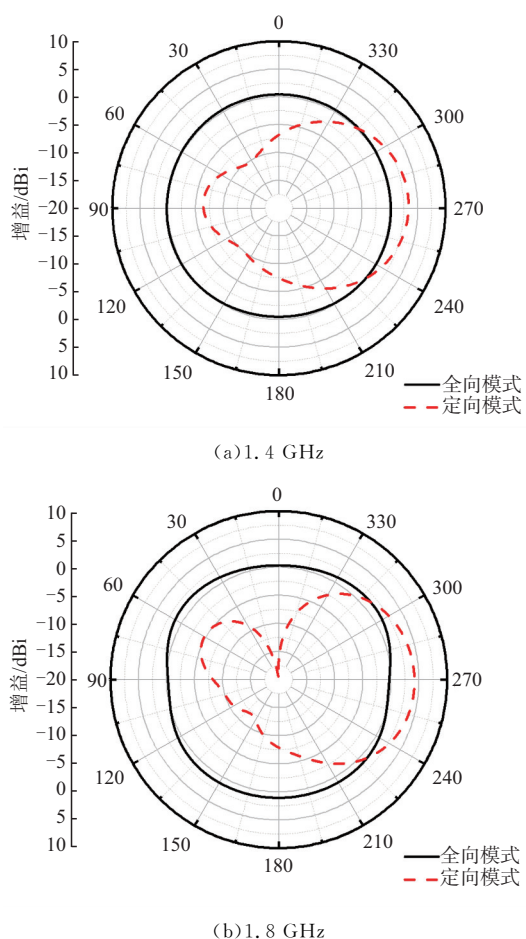


图 8 加载匹配网络后天线水平面方向图

4 结语

本文提出了一种基于有源超表面天线罩的窄截面方向图可重构天线。该天线由宽带平面印刷全向天线、窄截面有源超表面天线罩以及双频阻抗匹配网络组成。通过对有源超表面的调控,该天线可在全向宽带通信模式与定向双频通信模式之间灵活切换。该天线具有气动性能良好、窄截面、低成本等优点,有望成为无人机通信系统抗干扰、反捕获的重要组成部分。

参考文献

[1] 刘屹巍, 朴海音, 肖林, 等. 无人机数据链抗干扰技术综述[J]. 飞机设计, 2017(6): 13-16.

[2] 张攀. 无人机数据链抗干扰技术的研究与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[3] DING K, GAO C, WU Y, et al. A Broadband Circularly Polarized Printed Monopole Antenna with Parasitic Strips[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2509-2512.

[4] 耿心. 小型化机载天线设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

[5] 刘璐. 高增益宽频带全向印刷天线研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[6] LIU Z G, GUO Y X. Compact Low-Profile Dual Band Metamaterial Antenna for Body Centric Communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 14: 863-866.

[7] CUI Y, QI C, LI R. A Low-Profile Broadband Quad-Polarization Reconfigurable Omnidirectional Antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4178-4183.

[8] LEE H, TAK J, CHOI J. Wearable Antenna Integrated into Military Berets for Indoor/Outdoor Positioning System [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1919-1922.

[9] WANG Z, DONG Y. Low-Profile Omnidirectional WIFI Antennas with Pattern Reconfigurability Inspired by Meta-Resonators[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(10): 6935-6942.

[10] CAO W, ZHANG B, LIU A, et al. A Reconfigurable Microstrip Antenna with Radiation Pattern Selectivity and Polarization Diversity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 453-456.

[11] ROW J S, HUANG Y J. Reconfigurable Antenna with Switchable Broadside and Conical Beams and Switchable Linear Polarized Patterns [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3752-3756.

[12] MAHMOOD S M, DENIDNI T A. Pattern-Reconfigurable Antenna Using a Switchable Frequency Selective Surface with Improved Bandwidth[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 1148-1151.

[13] NIROO-JAZI M, DENIDNI T A. Electronically Sweeping-Beam Antenna Using a New Cylindrical Frequency-Selective Surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 61(2): 666-676.

(编辑:徐楠楠)