

面向应急通信的3.5 GHz超表面反射阵天线设计

虞旺红, 王 玉*, 张 雷, 尚玉龙, 曾 雯

江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2026年9月15日; 录用日期: 2026年10月8日; 发布日期: 2026年10月13日

摘 要

针对应急通信场景中天线前端对定向增益、覆盖稳定性及结构低复杂度的需求, 本文提出了一种工作于3.5 GHz的喇叭馈电超表面反射阵天线。设计了一种双层对称回纹十字超表面单元, 通过调节单元几何参数实现超过360°的反射相位覆盖, 并在目标频点保持较高的反射幅度。基于馈源近场相位分布, 采用非周期相位补偿方法构建18 × 18单元反射阵, 实现球面波向准平面波的转换。仿真结果表明, 该天线在3.5 GHz处获得19.8 dBi峰值增益, $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 两个主切面上的3 dB波束宽度分别为10.3°和12.5°, 对应的旁瓣电平均为-12.6 dB。验证了该结构在Sub-6 GHz应急通信定向覆盖中的应用潜力。

关键词

超表面反射阵, 3.5 GHz, 应急通信, 反射阵天线, 非周期相位补偿

A 3.5 GHz Metasurface Reflectarray Antenna for Emergency Communications

Wanghong Yu, Yu Wang*, Lei Zhang, Yulong Shang, Wen Zeng

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: September 15, 2026; accepted: October 8, 2026; published: October 13, 2026

Abstract

To meet the requirements of directional gain, coverage stability, and low structural complexity for antenna front ends in emergency communication scenarios, this paper proposes a horn-fed metasurface reflectarray antenna operating at 3.5 GHz. A dual-layer symmetric meandered-cross metasurface

*通讯作者。

文章引用: 虞旺红, 王玉, 张雷, 尚玉龙, 曾雯. 面向应急通信的3.5 GHz超表面反射阵天线设计[J]. 无线通信, 2026, 16(5): 67-81. DOI: 10.12677/hjwc.2026.165007

element is designed, where a reflection phase coverage exceeding 360° is achieved by adjusting the geometric parameters of the unit cell while maintaining a high reflection amplitude at the target frequency. Based on the near-field phase distribution of the feed source, an 18×18 -element reflectarray is constructed using a non-periodic phase compensation method to realize the transformation from spherical waves to quasi-plane waves. Simulation results demonstrate that the proposed antenna achieves a peak gain of 19.8 dBi at 3.5 GHz. The 3-dB beamwidths in the two principal planes of $\varphi = 0^\circ$ and $\varphi = 90^\circ$ are 10.3° and 12.5° , respectively, while the sidelobe levels in both principal planes are maintained at -12.6 dB. The results demonstrate the potential of the proposed structure for directional coverage in Sub-6 GHz emergency communication applications.

Keywords

Metasurface Reflectarray, 3.5 GHz, Emergency Communication, Reflectarray Antenna, Non-Periodic Phase Compensation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前,极端灾害与突发公共事件对通信系统的快速部署能力与环境适应性提出了更高要求。研究表明,灾害发生后地面通信基础设施易受破坏,导致网络覆盖中断与信息传输受限,从而严重影响救援效率[1]。提升灾后通信保障能力,研究者已将 5G 与新型无线接入技术引入应急通信系统,以支持临时网络的快速构建与灵活部署[2]。与此同时,无人机辅助通信等技术被用于扩展覆盖范围并增强复杂环境下的链路可靠性[3]。然而,在城市遮挡或室内环境中,无线信号仍面临显著的路径损耗与多径衰落问题,这对天线前端的辐射性能提出了更高要求[4]。传统宽波束或全向天线虽具备较好的覆盖能力,但其能量分散,不利于远距离通信;相反,高增益定向天线虽然能够提升链路预算,但其窄波束特性对指向精度高度敏感,难以适应动态场景[5]。此外,低剖面阵列天线在实现高增益时通常依赖复杂馈电结构,增加了系统设计与实现成本[6]。因此,在应急通信中实现高增益、宽覆盖与低复杂度之间的协同优化仍具有挑战性。

超表面为解决上述问题提供了一种有效途径。基于相位突变的广义斯涅尔定律,研究者证明可通过亚波长结构实现对电磁波前的灵活调控[7]。在此基础上,反射阵及超表面天线因其平面化结构与较高设计自由度,被广泛应用于波束赋形与高增益辐射系统[8][9]。近年来,随着无线通信系统向高容量与智能化方向发展,超表面技术进一步拓展至智能反射面与可编程电磁环境等领域,用于改善传播条件并提升系统性能[10]。相关研究表明,超表面在复杂传播环境中能够实现对电磁波传播路径的有效调控,从而增强通信链路的稳定性[11]。同时,针对高增益与波束控制的需求,已有工作提出多种反射阵与超表面天线结构,并在毫米波及高频段取得了显著进展[12]。然而,这些研究多集中于高频或窄波束场景,对于 Sub-6 GHz (如 3.5 GHz) 应急通信应用,在有限口径条件下同时实现高反射效率、较高增益与相对宽波束仍然存在不足[13]。此外,最新研究指出,在复杂环境中实现高效波束调控与低复杂度实现仍具有进一步优化空间[14][15]。

在反射阵天线研究中,已有工作针对不同频段和应用场景开展了系统设计与性能优化。Rosado-Sanz 等面向 11 GHz 的 DVB-S 无源雷达地面目标监测设计了优化波束反射阵[16]; Xue 等采用单层分形单元实现了 13.58 GHz 宽带反射阵[17]; Mayank 等针对 30 GHz 大口径可展开反射阵分析了部署与安装结构对天线性能的影响[18]。这些研究验证了反射阵在波束赋形、宽带设计和大口径部署等方面的可行性,但

工作频率均高于本文所关注的 Sub-6 GHz 频段。进一步聚焦 Sub-6 GHz 频段, 反射阵单元需要在较大的物理尺寸、完整相位覆盖、反射损耗、带宽和实现复杂度之间进行权衡。Yang 等面向 3.5 GHz S 波段 5G 网络提出了 2 bit 可编程反射阵单元, 采用两层介质、三层金属以及每单元 4 个 PIN 二极管实现四种离散反射相位状态, 并在 12×12 反射阵原型上验证了二维波束扫描能力, 3.5 GHz 处最大口径效率为 31.20% [19]。该方案具有动态波束调控与极化不敏感特性, 但有源器件及偏置控制网络会增加阵面硬件复杂度。Rao 等面向 5.75 GHz 设计了蜘蛛网状多谐振单元, 实现约 750° 的反射相位范围并用于宽带 OAM 反射阵, 其多谐振结构通过几何尺寸变化拓展线性相位带宽 [20]。Zhang 等在 5.8 GHz 采用矩形贴片与四组 E 形谐振结构, 在中心频点获得约 500° 的连续相位范围, 并在 4.5~6.5 GHz 内保持超过 360° 的相位覆盖, 体现出较好的频率稳定性, 但需要 E 形谐振结构与 4 mm 空气层协同实现相位调控 [21]。另有研究采用两种不同单元共同覆盖完整 360° 相位区间, 在 5.75 GHz 实现反射阵设计, 但阵面综合时需同时管理两类单元的映射关系 [22]。对于约 6 GHz 的可重构反射阵, Zhao 等采用 2 bit 有源移相单元, 在 5.6~6.2 GHz 范围内实现四种相位状态, 单元损耗低于 2.2 dB 且相位误差低于 35° , 但 3 个 PIN 二极管及 3 条直流偏置线增加了实现复杂度 [23]。上述研究表明, Sub-6 GHz 反射单元的宽相位范围、低损耗、宽带与低复杂度通常难以同时取得最优。基于应急通信对低复杂度和稳定定向覆盖的需求, 本文重点面向 3.5 GHz 中心频点, 通过无源双层对称回纹十字结构和单一几何参数调控, 在保证完整相位覆盖的同时尽量降低反射损耗与阵列综合复杂度。

针对上述问题, 本文提出一种工作于 3.5 GHz 频段的喇叭馈电超表面反射阵天线。通过设计低复杂度单元结构并结合非周期相位补偿方法, 在有限口径条件下实现高增益与相对宽波束的协同优化。本文首先介绍超表面波前调控原理, 其次给出单元结构设计 with 阵列综合方法, 最后通过全波仿真验证天线性能, 并结合链路预算分析其在应急通信场景中的应用潜力。

本文的主要工作和创新点如下:

(1) 面向 3.5 GHz 应急通信应用, 设计了一种双层对称回纹十字超表面单元, 通过单一几何参数调节实现超过 360° 的反射相位覆盖, 降低了单元设计复杂度。

(2) 考虑喇叭馈源近场入射条件, 采用非周期相位补偿方法完成 18×18 反射阵列设计, 提高了有限口径条件下的波前重构精度。

(3) 在 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 口径条件下, 仿真得到峰值增益为 19.8 dBi, $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 两个主切面上的 3 dB 波束宽度分别为 10.3° 和 12.5° , 对应的旁瓣电平均为 -12.6 dB。

2. 超表面波前调控原理

超表面是一种由亚波长尺度单元在二维平面上构成的人工电磁结构, 通过在界面引入空间变化的相位响应, 可实现对电磁波波前的灵活调控。与传统依赖传播路径累积相位的方式不同, 超表面能够在亚波长尺度上直接调制反射相位, 从而在紧凑结构下实现波束控制。在反射型超表面天线中, 其核心设计目标是通过构建合理的相位分布, 将馈源辐射的球面波前转换为指定方向的准平面波前。因此, 阵列单元的相位补偿设计是实现高定向辐射的关键。

2.1. 广义斯涅尔定律

基于广义斯涅尔定律, 当电磁波入射到具有空间相位梯度的超表面时, 其反射方向将由界面相位分布决定, 其关系可表示为:

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx} \quad (1)$$

其中, θ_i 、 θ_r 分别为入射角与反射角, λ 为自由空间波长, $\Phi(x)$ 为沿界面方向的相位分布函数。由式(1)可知, 通过设计超表面上的相位梯度, 可以实现对反射波方向的有效调控。在本文中, 该原理用于指导反射阵列的相位分布设计, 实现波前重构。

2.2. 相位补偿原理

对于反射阵天线, 其基本设计思想是对馈源辐射的球面波进行相位补偿, 使反射波在目标方向上形成同相叠加, 从而实现高增益辐射。设馈源相位中心位于点 $F(0, 0, F)$, 反射阵列位于 $Z = 0$ 平面。阵列上任意一点 $P(x, y, 0)$ 处, 则该单元接收的入射波相位延迟可表示为:

$$\Phi_{inc}(x, y) = k_0 \cdot \sqrt{(x^2 + y^2 + F^2)} \quad (2)$$

其中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为自由空间波数, λ_0 为中心频率对应的自由空间波长。为使反射波在法向方向($\theta = 0^\circ$)形成相干叠加, 单元需引入补偿相位:

$$\Phi_{comp}(x, y) = -k_0 \cdot [\sqrt{x^2 + y^2 + F^2} - F] \quad (3)$$

式(3)表明, 阵列中心处补偿相位为零, 而边缘单元需提供更大的相位补偿, 以抵消路径差所带来的相位延迟。需要指出的是, 与传统远场馈源假设不同, 本文考虑馈源位于近场区域, 此时阵列口径上的入射相位分布具有明显的非均匀性。因此, 采用非周期相位补偿方法, 根据单元空间位置逐点计算补偿相位, 从而提高有限口径条件下的波前重构精度。

2.3. 单元相位调控机理

实现上述相位补偿的前提是单元结构具备可调反射相位特性。对于本文提出的双层对称回纹十字超表面单元, 其电磁响应可等效为 LC 谐振系统, 其反射系数可表示为:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (4)$$

其中, Γ 为反射系数, Z_{in} 为单元输入阻抗, Z_0 为自由空间波阻抗。通过调节关键几何参数, 可改变单元的等效电抗, 从而实现反射相位的连续调控。与传统多参数调控方式相比, 该方法通过单一参数即可实现宽范围相位覆盖, 有效降低了设计复杂度。

2.4. 阵列效率分析

反射阵天线的整体性能由多种效率因子共同决定, 包括馈源照射效率、口径利用效率、相位误差效率及极化效率等, 其总体效率可表示为:

$$\eta = \eta_s \cdot \eta_i \cdot \eta_p \cdot \eta_a \cdot \eta_{pol} \quad (5)$$

其中, η_s 为馈源溢出效率, η_i 为口径照射效率, η_p 为相位误差效率, η_a 为口径效率, η_{pol} 为极化效率。在本文设计中, 通过优化单元结构及非周期相位分布, 有效降低了相位误差, 同时结合合理的馈源布局, 提高了口径利用率, 从而保证整体辐射性能。

3. 天线设计与分析方法

3.1. 超表面单元拓扑结构与设计

本文提出的反射型超表面单元结构如图 1 所示。该单元采用双层对称回纹十字结构, 沿垂直于单元

平面的 Z 轴自上而下依次为上层金属贴片层、第一介质基板层、空气间隔层、下层金属贴片层、第二介质基板层和金属地板层。其中, 上层金属贴片层与下层金属贴片层的几何结构、尺寸参数完全一致, 第一介质基板层与第二介质基板层的材料、厚度、尺寸参数完全一致, 整体结构具备中心对称性, 可实现对入射电磁波的高效、稳定调控, 为高增益宽波束超表面天线提供核心相位调控单元。金属贴片层(上层/下层)均为中心对称的回纹十字金属贴片, 所用金属材料均为铜。整体位于正方形单元周期内, 由等宽铜质线条构成, 以贯穿单元中心的十字形铜质主筋为核心, 十字结构将单元平面划分为 4 个尺寸相等的矩形镂空区域, 十字主筋的四个端点分别向外延伸出回纹延伸结构, 形成“十字为骨、回纹为翼”的复合结构, 贴片结构同时满足 180° 中心对称, 所有线条转角均为 90° 直角, 金属线条宽度均为 w , 回纹延伸结构中 $L2$ 的长度为可调参数, 其余结构尺寸可结合目标工作频段及辐射性能要求通过电磁仿真确定, 所述回纹延伸结构通过其几何参数变化改变电流路径分布, 从而引入多模谐振耦合效应, 实现对入射电磁波反射相位的连续调控。所述回纹延伸结构包括回纹延伸臂长度 $L2$ 及回纹内侧臂长度 $L3$, 其中 $L2$ 为可调参数, 用于调节反射相位特性, $L3$ 用于确定回纹结构的基本几何形态。介质基板层(第一/第二)均为正方形平板结构, 边长与单元周期一致, 厚度为 H_{sub} , 采用低介质损耗材料, 例如 Rogers5880 介质材料, 其介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ 、损耗角正切 $\tan\delta = 0.0009$, 具备优异的低介电损耗和稳定特性, 其中第一介质基板层贴合于上层金属贴片层的下表面, 第二介质基板层贴合于下层金属贴片层的下表面与金属地板层的上表面之间, 可有效支撑金属贴片并降低电磁波传输损耗。空气间隔层为正方形空腔结构, 边长与单元周期一致, 厚度为 H_{air} , 夹设于第一介质基板层与下层金属贴片层之间, 形成空气谐振腔结构, 通过低介电损耗的空气介质降低单元的整体损耗, 同时调控谐振结构的等效阻抗匹配特性。金属地板层为完整的正方形铜质平板, 边长与单元周期一致, 厚度为 h , 作为反射型超表面的反射地, 可完全阻断电磁波的透射, 实现全反射式电磁波调控, 保障超表面天线的高增益辐射性能, 铜质材料的选用进一步降低了欧姆损耗, 提升了单元的电磁调控效率。本超表面单元的具体结构参数如表 1 所示。

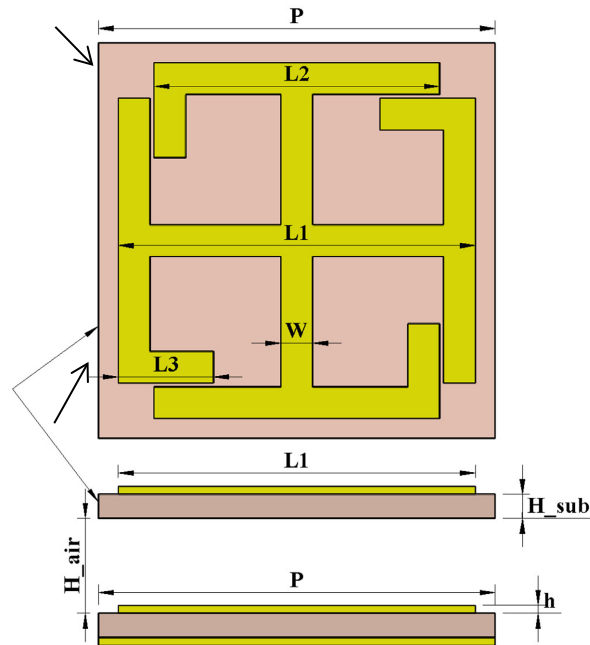


Figure 1. Schematic of metasurface unit cell

图 1. 超表面单元结构图

Table 1. Reflective metasurface unit structural parameter table
表 1. 反射型超表面单元结构参数表

参数名	尺寸(mm)
介质基板厚度(H_sub)	1.524
反射面的周期边长(p)	25
十字形主筋长度(L1)	22.5
回纹延伸臂长度(L2)可调	
回纹内侧臂长度(L3)	6
金属线宽(w)	2
铜的厚度(h)	0.035
空气间隔层的厚度(H_air)	6

3.2. 单元参数分析与相位调控性能

为评估单元的相位调控能力,采用全波仿真软件 CST Studio Suite 对单元进行参数化扫描分析。图 2、图 3 所示为不同回纹延伸臂长度 L2 对应的反射相位曲线和反射幅度曲线。本超表面单元通过可调结构参数的参数扫描设计,在目标工作频率 3.5 GHz 处实现了优异的电磁调控性能:通过调节回纹延伸臂的几何参数改变单元内部电磁耦合关系,使其在目标频段形成连续变化的等效谐振状态,从而实现反射相位的全范围连续覆盖,满足反射超表面天线的相位补偿设计要求。通过不同参数取值的单元组合,实现任意波前调控,为高增益宽波束辐射提供核心相位调控基础;在本实施例的仿真结果中,对应全相位范围的单元反射幅度均保持在-0.2 dB 以上,幅度波动较小,可有效降低超表面天线的辐射损耗。双层对称回纹十字金属贴片与空气间隔层的复合结构,在实现全相位覆盖的同时,可在 3.5 GHz 目标频点保持较低反射损耗,并为后续斜入射条件下的稳定相位调控提供结构基础。需要说明的是,本文单元围绕 3.5 GHz 中心频点优化,研究重点并非追求最大工作带宽,而是兼顾低损耗、完整相位覆盖与单参数调控的实现复杂度。

Table 2. Comparison of representative Sub-6 GHz reflectarray/metasurface unit cells
表 2. 近年来 Sub-6 GHz 反射阵/反射型超表面单元性能对比

文献	频率	相位范围	反射损耗/幅度	带宽或频率稳定性	结构与调控复杂度
[19]	3.5 GHz	2 bit, 四种离散相位状态	公开摘要未给统一单元反射损耗	3.5 GHz 验证; 未报告独立单元带宽	2 基板/3 金属层; 4 个 PIN 二极管/单元; 极化不敏感
[20]	5.75 GHz	约 750°	原文摘要未给统一最差反射损耗	多谐振拓展线性相位带宽; 面向宽带 OAM	单层蜘蛛网状多谐振单元; 几何尺寸调相
[21]	5.8 GHz	约 500°	幅度受尺寸和频率影响很小; 未给统一最差值	4.5~6.5 GHz 内相位覆盖均 > 360°	单层矩形贴片 + 4 组 E 形; 2 mm F4B + 4 mm 空气层
[22]	5.75 GHz	两类单元联合实现完整 360°	原文未给统一最差反射损耗	5.75 GHz 设计与实验验证	1 mm FR4 + 5 mm 空气层; 两种拓扑联合映射
[23]	6.0 GHz (5.6~6.2 GHz)	2 bit, 四相位状态; 相位误差<35°	<2.2 dB	5.6~6.2 GHz	E 形贴片 + 反射电路; 3 个 PIN 二极管 + 3 条直流偏置线
本文	3.5 GHz	>360°	反射幅度 > -0.2 dB	中心频点优化, 未定义宽带指标	双层回纹十字 + 6 mm 空气层; 统一拓扑, 仅 L2 调控

上述特性证明, 本文提出的单元通过单一几何参数 L_2 , 成功实现了相位响应、阻抗匹配与极化特性的有效解耦。在构建反射阵列时, 仅需按需选取不同 L_2 的单元即可获得所需的相位分布, 而无需为维持高效率对每个单元进行复杂的多目标优化。该设计为后续高性能反射阵列的构建提供了理想的单元基础。

为进一步突出本文单元的设计定位, 表 2 对近年来 Sub-6 GHz 及邻近频段的代表性反射阵/反射型超表面单元进行横向比较。可以看出, 文献[19]和[23]均通过 2 bit 有源单元获得动态相位调控能力, 其中[19]直接工作于 3.5 GHz, 但需要 PIN 二极管及相应偏置/控制结构; 文献[20][21]则通过多谐振或复合谐振结构获得更大的连续相位范围和更突出的宽带或频率稳定性。相比之下, 本文设计的优势并非宽带或动态可重构, 而是在 3.5 GHz 中心频点实现超过 360° 的连续相位覆盖、全相位范围内反射幅度高于 -0.2 dB, 同时仅以回纹延伸臂长度 L_2 作为主要调控参数。相较需要两类单元联合映射的方案[22], 本文可采用统一拓扑进行阵面相位映射; 相较有源可重构方案[19][23], 本文无需 PIN 二极管及偏置网络, 有利于降低阵面实现与控制复杂度。需要指出的是, 本文采用双层金属贴片与空气间隔层, 结构剖面并非最低, 这也是后续进一步轻量化设计需要关注的问题。

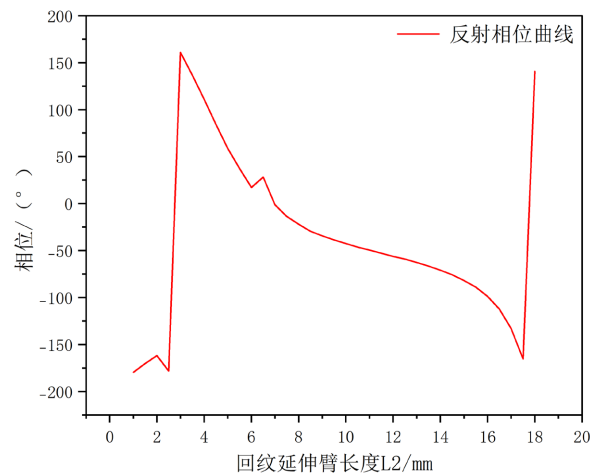


Figure 2. Reflection phase curves of metasurface unit cells versus varying meander extension arm length L_2 at 3.5 GHz
图 2. 3.5 GHz 处不同回纹延伸臂长度 L_2 对应的超表面单元反射相位曲线

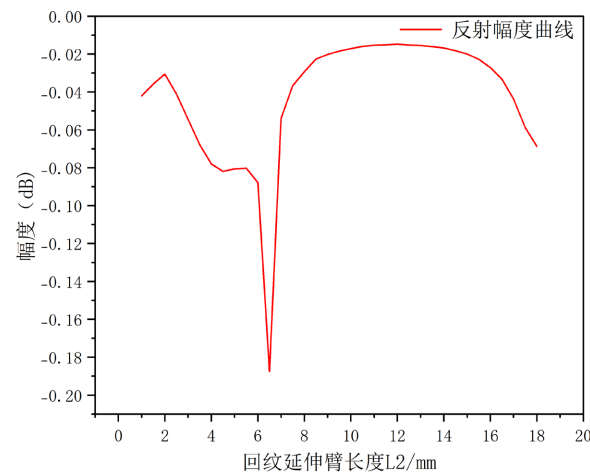


Figure 3. Reflection amplitude curves of metasurface unit cells with different lengths L_2 of meander extended arms at 3.5 GHz

图 3. 3.5 GHz 处不同回纹延伸臂长度 L_2 对应的超表面单元反射幅度曲线

为进一步评估所设计超表面单元在喇叭馈源斜入射条件下的工作稳定性,对不同入射角下单元的反射相位和反射幅度进行了仿真分析,结果如图4所示。仿真中选取入射角 $\theta = 0^\circ$ 、 10° 、 20° 、 30° 和 40° ,以覆盖反射阵中心区域至边缘区域可能对应的主要入射角范围。

由图4(a)可见,不同入射角下单元反射相位均随频率变化呈现连续调制特性。在3.5 GHz附近,各入射角对应的反射相位保持良好的可区分性,说明该单元在斜入射条件下仍具有有效的相位调控能力。需要注意的是,当入射角变化时,单元谐振点附近的相位曲线会产生一定偏移,表明斜入射会对单元等效电磁响应产生影响。因此,在反射阵综合设计中考虑馈源近场入射条件是必要的。

由图4(b)可见,在3.5 GHz中心频点附近,不同入射角下单元的同极化反射幅度整体保持在较高水平,反射损耗较小,表明该结构在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 入射角范围内具有较好的反射效率。综合相位与幅度结果可知,所提出的双层对称回纹十字单元能够适应喇叭馈源照射下的斜入射工作环境,为后续非周期反射阵列设计提供了单元基础。

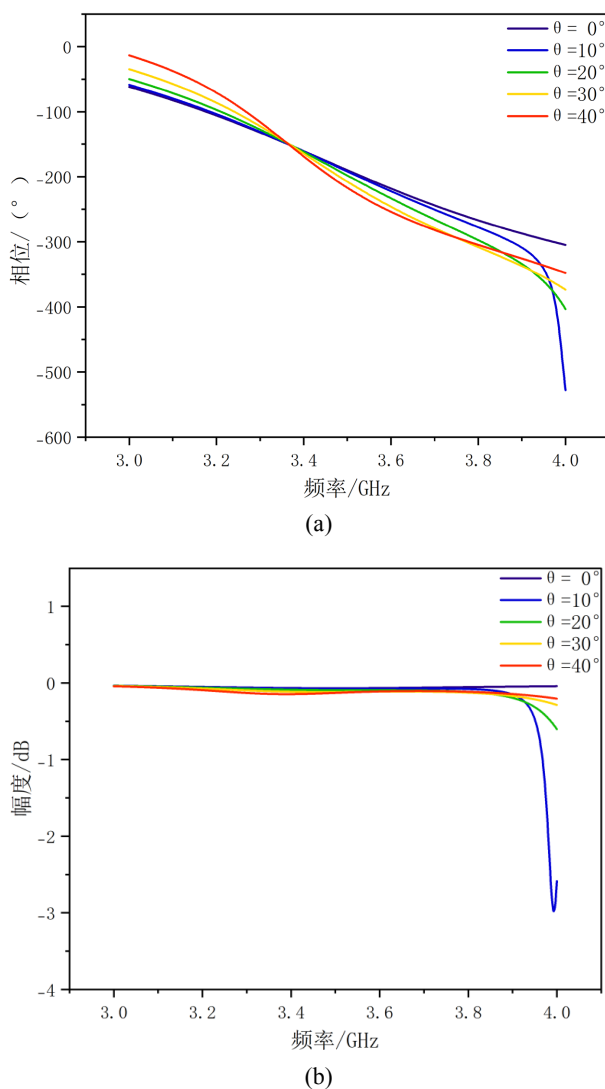


Figure 4. Reflection characteristics of the metasurface unit cell under different incident angles. (a) Reflection phase curve; (b) Reflection amplitude curve

图4. 不同入射角下超表面单元的反射特性。(a) 反射相位曲线; (b) 反射幅度曲线

3.3. 反射阵列综合与相位分布设计

基于上述单元, 构建 18×18 的反射阵列, 总口径尺寸为 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 。喇叭馈源置于阵列正前方, 其相位中心位于点 $F(0, 0, F)$, 焦距 $F = 350 \text{ mm}$, 对应的焦径比 $F/D \approx 0.78$ 。为实现馈源球面波前至平面波前的转换, 基于式(3)的相位补偿模型, 并引入参考常数 φ_0 , 阵列中位于 (x_i, y_i) 处单元所需补偿相位可写为:

$$\varphi_{comp}(x_i, y_i) = \varphi_0 - k_0 \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + F^2} - F \right) \quad (6)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为自由空间波数, λ_0 为中心频率 3.5 GHz 对应的波长, φ_0 为参考相位常数, 通常取使中心单元补偿相位为零的参考值。根据图 2 所示的相位 - 尺寸映射关系, 将式(6)计算得到的补偿相位矩阵转化为每个单元对应的具体回纹延伸臂长度 L_2 的值, 从而完成整个非周期反射阵列的构建。

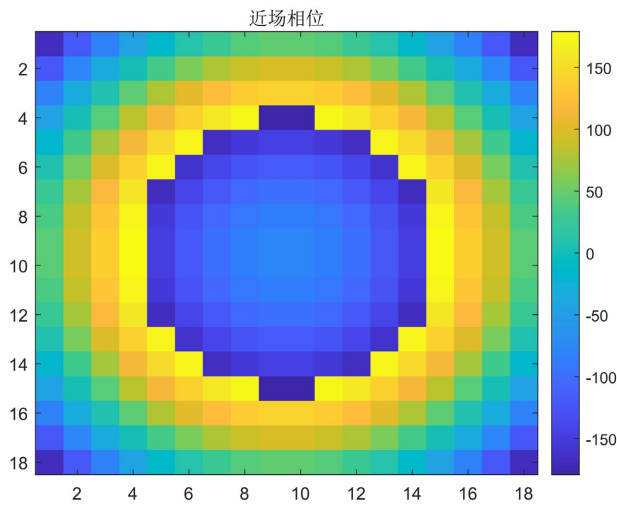


Figure 5. Near-field phase distribution of the feed antenna

图 5. 馈源天线的近场相位分布

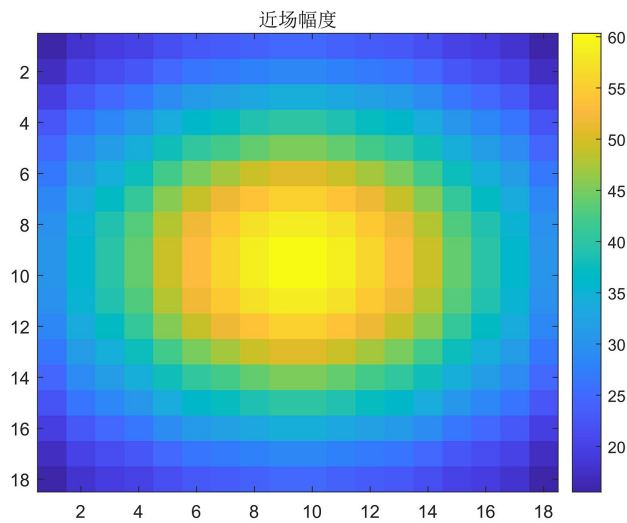


Figure 6. Near-field amplitude distribution of the feed antenna

图 6. 馈源天线的近场幅度分布

图 5 和图 6 分别展示了在 3.5 GHz 处，馈源在阵列口径面上的近场相位与幅度分布。由图 5 可见，在阵列整个口径面上，相位分布高度均匀，起伏范围控制在 $\pm 30^\circ$ 以内，表明所设计反射阵能够有效补偿馈源球面波前，并实现准平面波重构。图 6 所示的幅度分布呈现中心强、边缘平滑递减的类锥削特征，这种有益的幅度渐变有利于抑制远场旁瓣，提升辐射效率。

完成单元排布后，最终构建的反射阵天线整体结构如图 7 所示。该天线由喇叭馈源、 18×18 超表面反射阵列及空气间隔层构成，总口径尺寸为 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 。喇叭馈源置于阵列正前方，其相位中心与阵列中心的距离(焦距)为 $F = 350 \text{ mm}$ ，对应的焦径比 $F/D \approx 0.78$ 。该结构布局为后续远场辐射性能的实现提供了物理基础。本文采用标准增益喇叭作为馈源。在中心频点 3.5 GHz 处，馈源增益为 11.9 dBi，3 dB 波束宽度为 50.4° ，可较好覆盖整个阵列口径。由几何关系可得阵列边缘照射角约为 $\pm 33^\circ$ ，能够保证阵列边缘单元获得充足的照射电平。

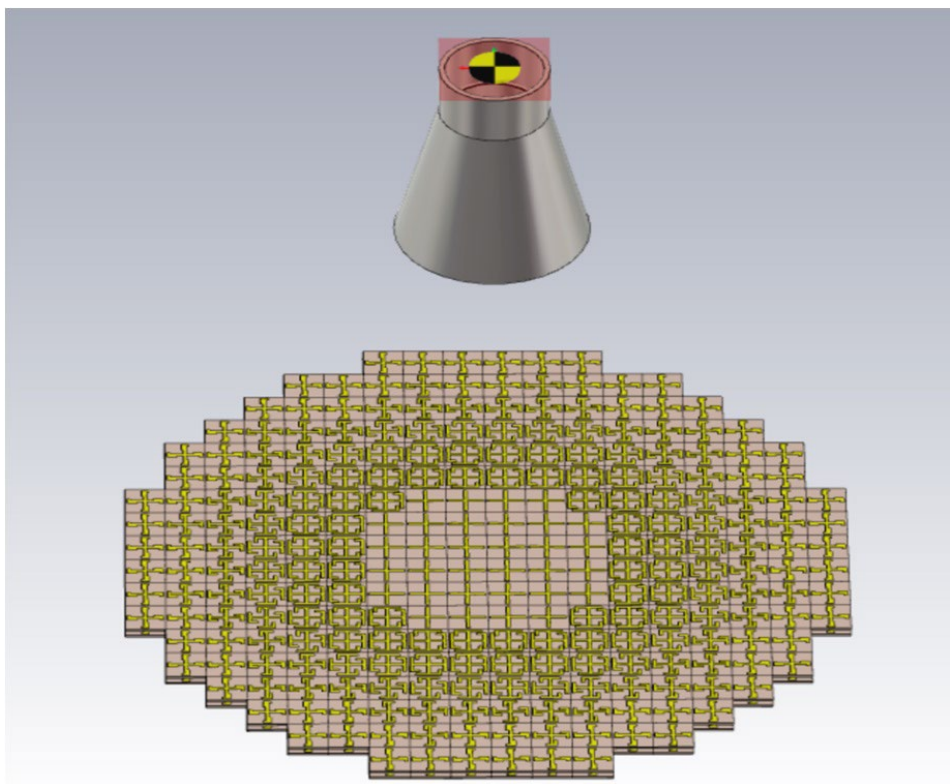


Figure 7. Schematic diagram of the overall reflectarray antenna structure
图 7. 反射阵天线整体结构示意图

4. 仿真结果与分析

4.1. 输入匹配特性分析

为验证完整反射阵天线系统在目标频点附近的输入匹配特性，对 3~4 GHz 范围内加载超表面反射阵后的馈源端口反射系数 S_{11} 进行了仿真分析，结果如图 8 所示。由图 8 可见，在目标工作频点 3.5 GHz 附近，天线系统的 S_{11} 低于 -10 dB，表明加载反射阵后馈源端口仍保持较好的输入匹配状态。该结果说明所设计的超表面反射阵不会对喇叭馈源正常工作造成明显不利影响，能够满足后续远场辐射性能分析的要求。

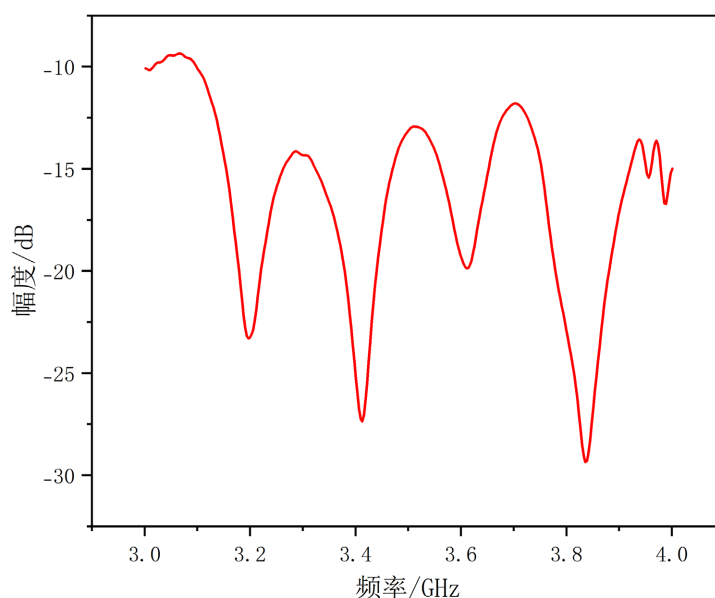


Figure 8. Simulated S11 of the feed port after loading the reflectarray in the range of 3~4 GHz

图 8. 3~4 GHz 范围内加载反射阵后的馈源端口反射系数 S11 曲线

4.2. 增益随频率变化分析

为进一步分析所设计反射阵天线在不同频点下的辐射响应,对 3~4 GHz 范围内以 0.1 GHz 为步长的峰值增益进行了提取,结果如图 9 所示。由图 9 可见,天线增益随频率变化呈现一定的频率选择性。在目标工作频点 3.5 GHz 处,天线峰值增益达到 19.8 dBi,说明所设计反射阵在 3.5 GHz 处能够较好地实现馈源球面波向准平面波的转换。由于本文反射阵列的相位分布和单元尺寸映射关系均围绕 3.5 GHz 中心频点设计,因此不同频点下的相位补偿精度会发生变化,导致峰值增益出现波动。综合来看,该结果验证了天线在 3.5 GHz 目标频点处的有效辐射性能,但本文不将其作为宽带天线进行讨论。

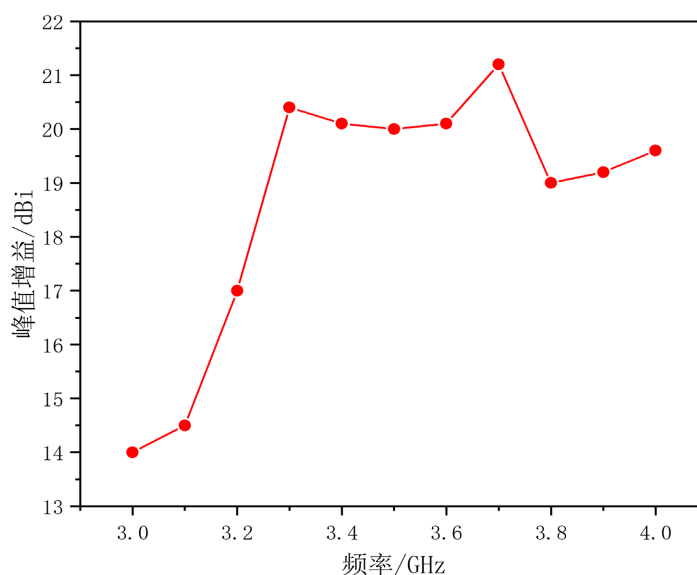


Figure 9. Peak gain variation of the antenna from 3 GHz to 4 GHz

图 9. 3~4 GHz 范围内天线峰值增益随频率变化曲线

4.3. 反射阵远场辐射特性

为验证所设计反射阵列天线的辐射性能, 采用 CST Studio Suite 对完整天线模型进行全波仿真分析。图 10 给出了天线在中心频点 3.5 GHz 处的两个主平面二维方向图。由图 10(a)可见, 在 $\Phi = 0^\circ$ 平面内, 天线主瓣指向法向方向, 即 $\theta = 0^\circ$, 峰值增益为 19.8 dBi, 3 dB 波束宽度为 10.3° , 旁瓣电平约为 -12.6 dB。该结果表明, 反射阵能够在目标方向上实现较强的能量汇聚, 并形成较明显的定向辐射特性。图 10(b)为 $\Phi = 90^\circ$ 平面方向图。可以看出, 该平面内天线同样在法向方向形成主瓣, 峰值增益保持在 19.8 dBi 附近, 3 dB 波束宽度约为 12.5° , 旁瓣电平低于 -12.6 dB。两个主平面方向图均表明, 所设计反射阵列能够有效补偿喇叭馈源辐射的球面波前, 使反射波在法向方向形成相干叠加。相比单独喇叭馈源, 加载超表面反射阵后天线方向性明显增强, 说明所设计非周期相位补偿方法具有较好的波前调控效果。

图 11 给出了对应的三维远场增益方向图。由图可见, 辐射能量主要集中在法向方向, 形成较明显的前向主瓣, 主瓣以外区域辐射电平相对降低, 说明该天线具有较好的定向辐射能力。综合二维和三维方向图结果可知, 在 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 有限口径条件下, 所设计反射阵天线在 3.5 GHz 处实现了 19.8 dBi 的峰值增益, 并获得 10° 左右量级的 3 dB 波束宽度, 体现出一定的增益-波束宽度折中特性, 适用于对方向性和覆盖稳定性均有需求的应急通信场景。

从通信系统角度看, -12.6 dB 旁瓣电平意味着最强旁瓣方向的辐射功率约为主瓣峰值功率的 5.5%。虽然主能量仍集中于目标方向, 但在多链路并发、同频复用或城市多径环境中, 旁瓣方向仍可能产生非期望能量泄漏: 在发射端可能增加对非目标方向用户或相邻链路的同频干扰, 在接收端则可能提高对离轴干扰信号的耦合, 从而降低空间隔离度并对信噪比产生不利影响。需要强调的是, 旁瓣电平本身并不能直接等同于系统链路质量, 其实际影响还取决于干扰源角度分布、收发距离、发射功率、传播环境及接收机抗干扰能力等因素。

针对上述问题, 后续可在保持主瓣增益和覆盖范围的前提下进一步开展旁瓣优化。一方面, 可在阵列边缘引入相位加权或相位扰动, 通过仅相位综合(phase-only synthesis)使边缘单元在旁瓣方向形成更强的相消叠加; 另一方面, 可联合优化馈源 F/D 、口径照射锥削和阵列相位分布, 以降低边缘过强照射带来的旁瓣贡献。还可采用遗传算法、粒子群或迭代傅里叶类方法, 对峰值增益、3 dB 波束宽度和旁瓣电平进行多目标联合优化。需要注意的是, 旁瓣进一步降低通常会伴随一定的主瓣展宽或峰值增益下降, 因此未来工作应围绕“增益-覆盖-旁瓣”三者之间的折中关系进行系统设计。

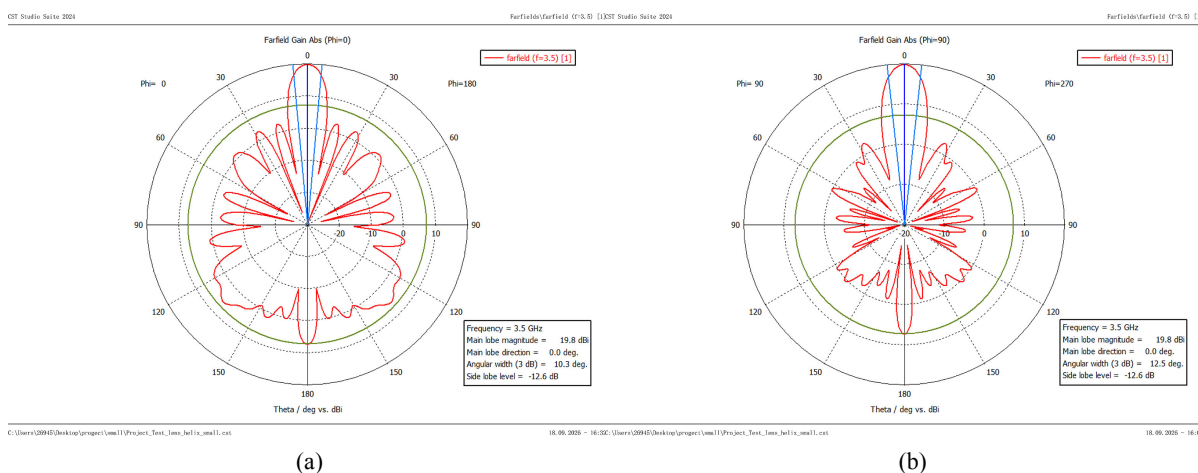


Figure 10. Two-dimensional radiation patterns of the reflectarray antenna at 3.5 GHz. (a) Radiation pattern in the $\Phi = 0^\circ$ plane; (b) Radiation pattern in the $\Phi = 90^\circ$ plane

图 10. 3.5 GHz 处反射阵天线二维方向图。(a) $\Phi = 0^\circ$ 平面方向图; (b) $\Phi = 90^\circ$ 平面方向图

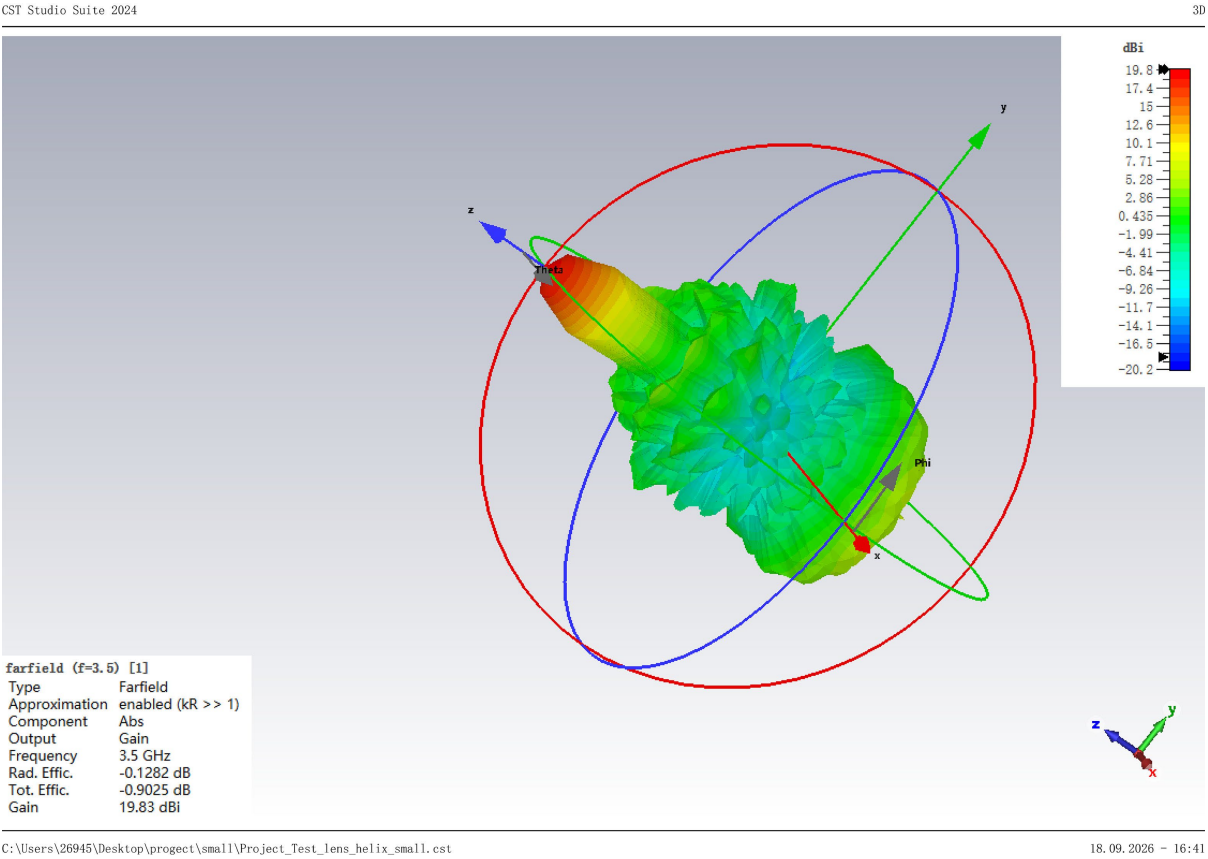


Figure 11. 3D far-field gain radiation pattern
图 11. 三维远场增益方向图

4.4. 喇叭馈源与加载反射阵后的辐射性能对比

为进一步说明超表面反射阵对馈源辐射性能的改善作用，对喇叭馈源单独工作和加载反射阵后的辐射性能进行了对比，结果如表 3 所示。由表 3 可见，喇叭馈源单独工作时峰值增益为 11.9 dBi，3 dB 波束宽度约为 50.4°，辐射能量分布相对分散。加载超表面反射阵后，天线峰值增益提高至 19.8 dBi，相比喇叭馈源单独工作提升约 8 dB；同时，两个主平面内的 3 dB 波束宽度约为 10.3°~12.5°，波束明显收窄。该结果表明，所设计反射阵能够有效补偿喇叭馈源辐射波前，使反射波在法向方向形成相干叠加，从而显著增强天线的定向辐射能力。

Table 3. Radiation performance comparison between the feed horn and the reflectarray antenna
表 3. 喇叭馈源与加载反射阵后的辐射性能对比

天线形式	峰值增益/dBi	3 dB 波束宽度/°	说明
喇叭馈源	11.9	50.4	波束较宽，方向性较弱
加载反射阵后	19.8	10.3~12.5	增益提高，方向性增强

4.5. 整天线性能对比分析

为进一步从整天线层面评价所设计反射阵的辐射性能，表 4 给出了本文设计与相关反射阵天线的系统级性能对比。与表 2 主要针对反射单元的相位范围、反射损耗、频率稳定性及结构复杂度进行比较不

同，本节重点比较完整天线的工作频段、口径尺寸、验证方式、峰值增益及 3 dB 波束宽度等指标。由于不同文献在工作频率、口径电尺寸、馈源形式及验证条件等方面存在差异，因此表中数据主要用于说明不同设计的系统性能特点与应用定位，而不作严格的直接优劣比较。

Table 4. Comparison of performance and structural characteristics of different reflectarray antennas
表 4. 不同反射阵天线的性能与结构特性对比

文献	工作频段	口径尺寸	验证方式	峰值增益/dBi	3 dB 波束宽度/°	特点
[16]	11 GHz	约 374 mm × 273 mm, 22 × 16 单元	仿真 + 实测	仿真 19.13, 实测 最大 19.82	仿真 9.4 × 5.2, 实测 8.7 × 5.2	扇形波束, 面向 DVB-S 无源雷达
[17]	13.58 GHz	D = 325 mm, 469 单元	仿真 + 实测	仿真 30.04, 实测 29.8	约 4.96	单层分形反射阵, 1 dB 增益带宽 15.3%
[18]	30 GHz	1 m × 1 m	仿真	理想 46.9, 含非理想 结构约 44.7	未明确给出	大口径 Ka 波段可展开 反射阵误差敏感性分析
本文	3.5 GHz	450 mm × 450 mm, 18 × 18 单元	仿真	19.8	10.3~12.5	面向应急通信, 低复杂度 单参数调控

5. 结束语

本文设计了一种面向 3.5 GHz 应急通信应用的高增益超表面反射阵天线。通过构建双层对称回纹十字超表面单元，实现了单参数调控下的全相位覆盖，并在此基础上结合非周期相位补偿方法完成 18 × 18 反射阵列设计。仿真结果表明，在 450 mm × 450 mm 口径条件下，该天线在 3.5 GHz 处实现了 19.8 dBi 增益， $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 两个主切面上的 3 dB 波束宽度分别为 10.3° 和 12.5°，对应旁瓣电平均为 -12.6 dB。本研究在应急通信定向覆盖场景中具有一定应用潜力，可为 Sub-6 GHz 频段低复杂度反射阵天线设计提供参考。后续将重点研究边缘相位加权、馈源照射锥削与幅相联合优化方法，在维持主瓣增益和覆盖能力的同时进一步降低旁瓣电平，并通过样机测试评估复杂应急环境中的链路及抗干扰性能。

参考文献

- [1] Carreras-Coch, A., Navarro, J., Sans, C. and Zaballos, A. (2022) Communication Technologies in Emergency Situations. *Electronics*, **11**, Article 1155. <https://doi.org/10.3390/electronics11071155>
- [2] Song, H. and Chung, J. (2025) Next-Generation Wireless Communication Technologies for Improved Disaster Response and Management. *ETRI Journal*, **47**, 375-392. <https://doi.org/10.4218/etrij.2024-0546>
- [3] López-Villegas, I., Martínez-Rios, E.A., Izquierdo-Reyes, J., Bustamante-Bello, R. and Falcone, F. (2026) A Systematic Literature Review of Emergency Communications Assisted by Unmanned Aerial Vehicles. *Ad Hoc Networks*, **182**, Article 104063. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.104063>
- [4] Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., et al. (2013) Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *IEEE Access*, **1**, 335-349. <https://doi.org/10.1109/access.2013.2260813>
- [5] Hum, S.V. and Perruisseau-Carrier, J. (2014) Reconfigurable Reflectarrays and Array Lenses for Dynamic Antenna Beam Control: A Review. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62**, 183-198. <https://doi.org/10.1109/tap.2013.2287296>
- [6] Pozar, D.M. (1985) Microstrip Antenna Aperture-Coupled to a Microstripline. *Electronics Letters*, **21**, 49-50. <https://doi.org/10.1049/el:19850034>
- [7] Yu, N., Genevet, P., Kats, M.A., Aieta, F., Tetienne, J., Capasso, F., et al. (2011) Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science*, **334**, 333-337. <https://doi.org/10.1126/science.1210713>
- [8] Faenzi, M., Minatti, G., González-Ovejero, D., Caminita, F., Martini, E., Della Giovampaola, C., et al. (2019) Metasurface Antennas: New Models, Applications and Realizations. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 10178. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46522-z>

- [9] Joy, J.A., Palaniswamy, S.K., Kumar, S., Kanagasabai, M., Bashyam, S. and Hussein, M.I. (2024) Modern Reflectarray Antennas: A Review of the Design, State-of-the-Art, and Research Challenges. *IEEE Access*, **12**, 46717-46740. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3380358>
- [10] Ataloglou, V.G., Taravati, S. and Eleftheriades, G.V. (2023) Metasurfaces: Physics and Applications in Wireless Communications. *National Science Review*, **10**, nwad164. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad164>
- [11] Ra'di, Y., Nefedkin, N., Popovski, P. and Alù, A. (2023) Metasurfaces for Next-Generation Wireless Communication Systems. *National Science Review*, **10**, nwad140. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad140>
- [12] Xu, G., Overvig, A., Kasahara, Y., Martini, E., Maci, S. and Alù, A. (2023) Arbitrary Aperture Synthesis with Nonlocal Leaky-Wave Metasurface Antennas. *Nature Communications*, **14**, Article No. 4380. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39818-2>
- [13] Ali, J., Ahmad, A. and Choi, D. (2024) Single-Layer Metasurface-Based Reflectarray Antenna with H-Shaped Slotted Patch for X-Band Communication. *Nanomaterials*, **14**, Article 1495. <https://doi.org/10.3390/nano14181495>
- [14] Yang, H.Q., Dai, J.Y., Li, H.D., Wu, L., Shen, Z.H., Zhou, Q.Y., *et al.* (2025) Adaptively Programmable Metasurface for Intelligent Wireless Communications in Complex Environments. *Nature Communications*, **16**, Article No. 6070. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61409-6>
- [15] Ghaneizadeh, A., Peik, S.F., Schneider, M. and Joodaki, M. (2025) Analysis, Design, and Fabrication of a High-Gain Low-Profile Metasurface Antenna Using Direct Feeding of Sievenpiper's His. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 42940. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30458-8>
- [16] Rosado-Sanz, J., Jarabo-Amores, M., Dauvignac, J., Mata-Moya, D., Lanteri, J. and Migliaccio, C. (2021) Design and Validation of a Reflectarray Antenna with Optimized Beam for Ground Target Monitoring with a DVB-S-Based Passive Radar. *Sensors*, **21**, Article 5263. <https://doi.org/10.3390/s21165263>
- [17] Xue, F., Wang, H., Yi, M. and Liu, G. (2016) A Broadband Ku-Band Microstrip Reflectarray Antenna Using Single-Layer Fractal Elements. *Microwave and Optical Technology Letters*, **58**, 658-662. <https://doi.org/10.1002/mop.29637>
- [18] Mayank, Lundén, V., Schumacher, J., Pedivellano, A. and Praks, J. (2025) Deployment and Mounting System Effects on a Ka-Band Reflectarray Antenna: A Sensitivity Analysis. *CEAS Space Journal*, **18**, 951-961. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00647-2>
- [19] Yang, N., Zhong, Y.C., Wang, Y., Jia, Y., Zhu, J., Liu, Z., *et al.* (2024) A 2-Bit Programmable Reflectarray Antenna Based on a Polarization-Insensitive Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **72**, 5539-5549. <https://doi.org/10.1109/tap.2024.3403419>
- [20] Rao, M.V., Malik, J., Yuvaraj, S. and Kartikeyan, M.V. (2023) Polarization Insensitive Reflectarray for OAM Beam Generation over Octave Bandwidth for 5G Applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, **170**, Article 154775. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154775>
- [21] Zhang, H., Wang, Y., Wang, J., Xiao, H., Chen, X. and Wang, X. (2023) A Single-Layer Circularly Polarized Reflectarray Antenna with High Aperture Efficiency for Microwave Power Transmission. *International Journal of Antennas and Propagation*, **2023**, Article ID: 1569710. <https://doi.org/10.1155/2023/1569710>
- [22] Rao, M.V., Malik, J., Yuvaraj, S. and Kartikeyan, M.V. (2024) A Novel Approach for the Generation of OAM Beam with High Mode Purity Using the Reflectarray. *Optik*, **296**, Article 171557. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171557>
- [23] Zhao, J., Qiao, S., Topozlu, H., Wu, J., Honari, M.M., Booske, J.H., *et al.* (2025) Electronically Reconfigurable Reflectarray Antennas Using 2-Bit Phase Shift Unit Cells Embedded with Reflecting Circuits. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **73**, 314-328. <https://doi.org/10.1109/tap.2024.3511945>