

光学透明超表面透镜及其无线通信效率增强*

李豪¹⁾²⁾ 庞永强^{1)†} 屈冰玥¹⁾ 郑江山¹⁾ 徐卓¹⁾

1) (西安交通大学, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (西安交通大学电子科学与工程学院, 西安 710049)

(2024年4月3日收到; 2024年4月27日收到修改稿)

玻璃作为目前室内常用的建筑材料, 无线信号通过玻璃时较大的插损会降低通信效率. 本文设计了一种工作在 2.4 GHz Wi-Fi 频段的光学透明超表面, 通过贴到玻璃两侧将无线信号实现区域聚焦以提高通信效率. 为了获得满足区域聚焦的相位设计, 超表面由耶路撒冷十字形和圆环两种双层结构组成, 透明导电薄膜采用导电性好、光学透明度高的铜网. 通过在微波暗室中扫描场强空间分布验证超表面的区域聚焦效果, 与空白玻璃对比, 在设计整个聚焦区域均实现 7.3 dB 以上的场增强, 与仿真结果较为符合. 进一步测试了不同场景下的下载速度和网速稳定性验证透明超表面玻璃增强无线通信效率. 结果表明, 在实际使用环境中, 设计的超表面玻璃较空白玻璃的下载速度可提高 10 Mb/s, 且下载速度浮动平稳. 本文设计的光学透明超表面结构简单, 使用便利, 同时具备可移动性, 可以根据通信增强需要进行随意摆放, 为室内通信增强提供了一种可行的技术途径.

关键词: 超表面, 光学透明, Wi-Fi, 信号增强**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci, 84.40.Ua**DOI:** 10.7498/aps.73.20240464

1 引言

现代无线通信技术, 如蓝牙、Wi-Fi 和蜂窝网络等, 成为现代社会环境中必不可少的基础设施, 并且推动社会发展. 伴随着无线通信发展带来的优势, 日常使用对无线信号的通信效率也提出了严格的要求. 信号通过阻挡物到达通信区域时会发生衰减, 导致室内或相邻房间的信号弱^[1-3]. 目前对 800 MHz—18 GHz 频率进行的测量研究表明, 信号衰减在现代建筑中平均增大 20—25 dB^[4]. 为满足信号的日常使用需求, 通常增加天线数量和信号发射功率, 但这些会消耗大量能源. 为构建更环保、可持续的无线基础设施, 目前提出了补偿衰减来提高信号强度的方法, 即将发射波聚焦到阻碍物后方, 通过聚焦补偿衰减^[5]. 聚焦通过波束调控实

现, 关于波束调控的研究可追溯于 2011 年提出的超表面和广义斯涅耳定律^[6-9], 超透镜作为利用超表面实现波束调控的平面透镜也因此得到进一步的研究^[10-16]. 如利用圆形多层金属谐振结构获得透射波的相位连续可调, 实现高效率波束调控^[17]; 采用相位梯度超表面将平面波聚焦在一个点上^[18,19]; 采用超透镜实现长红外波长聚焦^[20]. 接着超透镜在通信领域得到应用, 如 2022 年 Hong 等^[21]将超透镜应用到汽车夹层玻璃中降低穿透损耗, 实现场强 5 dB 的增加; Meng 等^[5]采用超薄金属透镜将入射波聚焦到墙体的另一侧, 弥补微波的衰减. 同时, 玻璃作为现代建筑与交通工具中关键的通信窗口, 它造成的衰减引起了重视. 这些应用场景要求玻璃在保持光学透明的同时, 还应具有低的电磁损耗特性以保证良好的通信效率. 因此超表面在玻璃上的聚焦应用有着广泛的发展前景.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3806200) 和国家自然科学基金 (批准号: 61971341) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pangyongqiang@xjtu.edu.cn

本文提出了一种光学透明超表面透镜的设计, 根据广义斯涅耳定律和传输相位调制机理^[22-24]设计相位梯度. 通过 CST 软件分析单元结构在 2.4G Wi-Fi 频段内的透射系数, 将单元结构按相位梯度排列, 实现在距离超表面 50—60 cm 范围内的 5 cm×5 cm 矩形区域通信效率增强. 在微波暗室中测试验证仿真中 7.3 dB 以上的场强增强. 测试日常使用的效果, 与空白玻璃相比, 下载速度增强 11 Mb/s, 下载速度波动性小. 并且设计的超表面采用透光性好的铜网, 对玻璃的光学性能影响较小. 通过在玻璃两侧贴附超表面, 可以实现指定区域的通信效率增强, 超表面贴附的位置灵活, 可以自由选择增强通信效率的使用场景.

2 超表面单元结构的设计与仿真

2.1 相位梯度排列

在实际通信环境中, 路由器发射的信号通常到接收端距离较远, 因此接收端接收到的无线信号可以被视为平面波. 本研究旨在利用超表面透镜将这些平面波偏折聚焦至通信频繁发生的区域, 以提高通信效率, 如图 1 所示. 根据惠根斯原理, 电磁波以平面波入射时, 其波阵面相位分布均匀. 通过超表面单元赋予的相位增量, 使得部分电磁波相较于原平面波前沿“提前”或“滞后”了一定的传播路程. 当同一波束内不同位置的电磁波携带的相位差异足够大时, 相位较快的电磁波将对相位较慢的电磁波产生“领先”效应, 从而使整个波束产生向相位较慢区域的偏折现象.

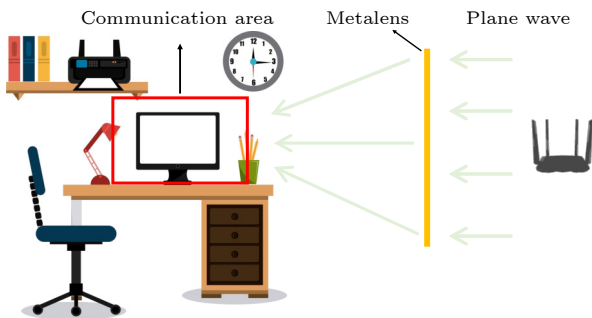


图 1 聚焦超表面增强通信效率的原理示意图

Fig. 1. Schematic of the focusing metasurface for enhancing communication efficiency.

实现入射波聚焦功能, 超表面上每一点的相位需要满足 (1) 式:

$$\varphi(\theta) = \frac{2\pi(\sqrt{F^2 + R^2} - F)}{\lambda}, \quad (1)$$

其中 $\varphi(\theta)$ 为聚焦需要满足的相位差, λ 为目标波长; F 为目标焦距; R 为超表面上的单元结构距离焦点的位置. 根据 (1) 式计算相位梯度排布, 聚焦区域为超表面中心 4 个单元结构 5 cm×5 cm 的范围, 聚焦效果如图 2 所示.

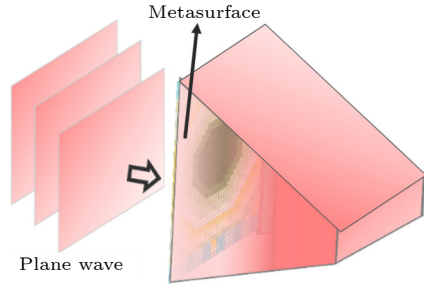


图 2 平面波穿过超表面后实现区域聚焦

Fig. 2. Regional focusing of the plane waves after passing through the metasurface.

超表面相位梯度排列时, 中心区域的相位为零, 相位向四周逐渐增大, 将尺寸为 0.8 m×1.2 m 的超表面分为 19 个单元, U1 为聚焦中心, 相位为零. U2 单元中的每个结构相位不同, 且相邻图案间相位差较小, 可以提高相位排布的精确度, 使得相位梯度的变化更加连续, 过渡更加平滑. U3—U19 每个单元选用的相位相同, 可以减少结构的种类. 排布如图 3 所示.

2.2 单元结构设计

根据相位排布需求, 提出了金属结构-玻璃-金属结构的双层单元结构. 该结构在玻璃表面上覆盖双层铜网结构, 金属铜网结构附着在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜上. PET 薄膜的厚度为 0.125 mm, 介电常数为 3, 损耗角正切为 0.06, 玻璃的厚度为 5 mm, 结构如图 4 所示. 选取耶路撒冷十字和圆环两种结构, 结构周期为 25 mm, 通过调整结构的参数, 圆环的外径 R_1 和内径 R_2 , 耶路撒冷十字的十字长度 L , 宽度 W , 分支长度 a 和宽度 x 控制结构的相位变化.

超表面单元结构和空间排布对称, 具有极化不敏感性, 且通过仿真, x 极化和 y 极化对仿真结果无影响, 因此在后续研究中不考虑电磁波的极化. 在 Wi-Fi 频段内, 选取的两种结构能够覆盖 360° 的相位, 并且插入损耗均小于 -3 dB, 保证了良好

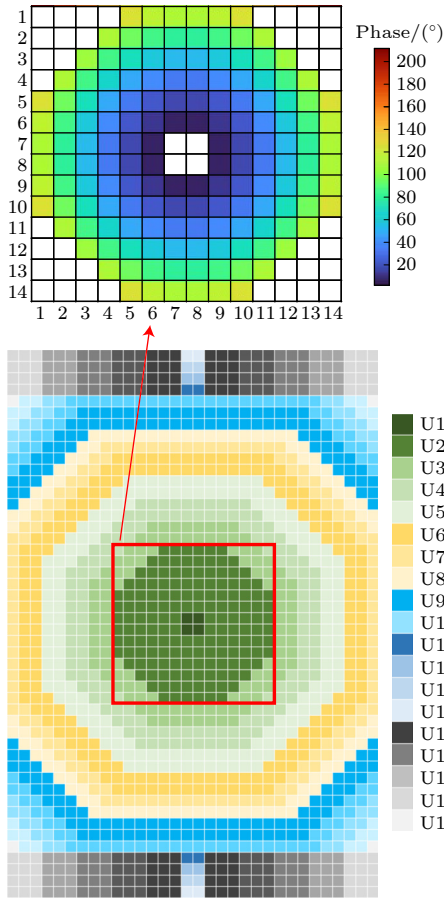


图 3 超表面的相位排列单元分布图

Fig. 3. Schematic of the phase distribution for the designed metasurface.

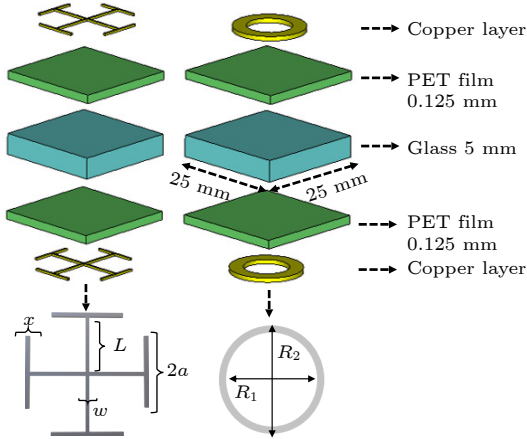


图 4 超表面的两种基本单元, 耶路撒冷十字和圆环

Fig. 4. Design of the Jerusalem cross and circle ring cells of the metasurface.

的电磁波透过性, 可以很好地满足相位排布需求. 图 5 展示了相位梯度排列中所需 65 个结构中的 2 个结构耶路撒冷十字及 3 个圆环的插入损耗和相移, 图中结构尺寸单位均为 mm.

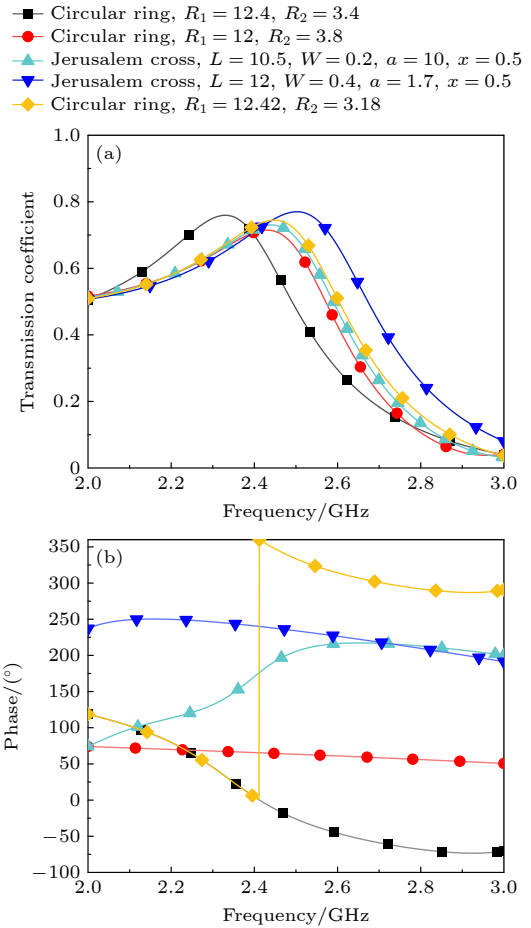


图 5 单元结构的仿真透射系数 (a) 幅值; (b) 相位

Fig. 5. Simulated transmission of the unit cells: (a) Amplitude; (b) phase.

3 超表面整体结构的仿真与验证

3.1 整体结构仿真

在 CST 软件中进行建模和仿真, x 轴和 y 轴边界条件设置为 open, z 轴边界条件设置为 open (add space), 选择平面波作为端口并放置 2.4 G Wi-Fi 常用的 14 个信道中心频点场监视器. 超透镜和空白玻璃具有相同的尺寸和边界条件设置, 忽略空气等因素的影响, 以便准确识别超透镜本身的性能.

仿真结果如图 6 所示, 图 6(a) 展示了距离空白玻璃正面 50 cm 处的场强分布, 图 6(c) 展示了距离超透镜正面 50 cm 处的场强分布. 对比超透镜和空白玻璃的情况, 可以观察到电磁波通过超透镜后场强增加了 8.5 dB. 图 6(b) 展示了空白玻璃侧面的场强分布, 图 6(d) 展示了超透镜侧面的场强分布. 对比图 6(b), (d), 可以发现聚焦区域 50—60 cm 范围内存在明显的聚焦效果. 在 60 cm 处,

电磁波通过超透镜的场强相比空白玻璃增大了 8.3 dB.

仿真超透镜在 Wi-Fi 频段内的聚焦效果, 结果如图 7 所示. 分别观察 2.4 G Wi-Fi 无线通信 14 个信道的中心频点, 对比超透镜和玻璃在 500 mm,

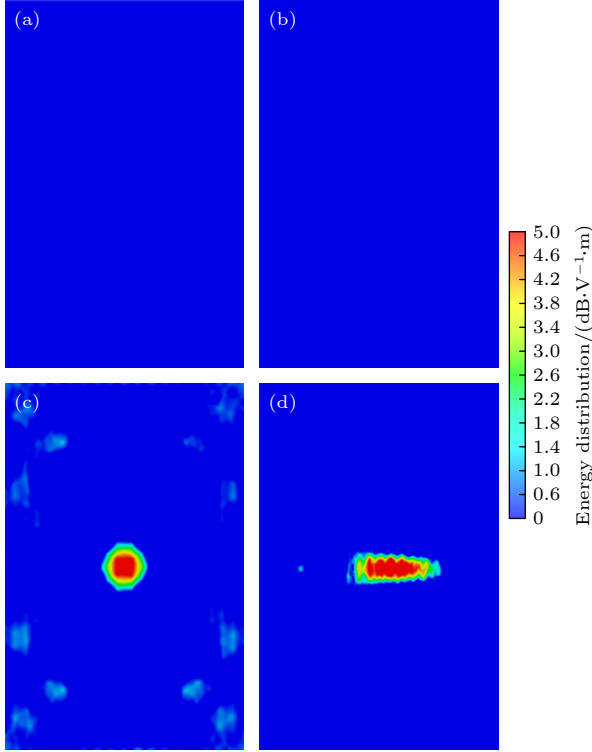


图 6 空白玻璃和超透镜的能流分布图 (a) 空白玻璃的正面能流分布; (b) 空白玻璃的侧面能流分布; (c) 超透镜的正面能流分布; (d) 超透镜的侧面能流分布

Fig. 6. Simulated energy distributions of the pure glass and the metalens: (a) Energy distributions on the front of the pure glass; (b) energy distribution on the side of the pure glass; (c) energy distributions on the front of the metalens; (d) energy distributions on side of the metalens.

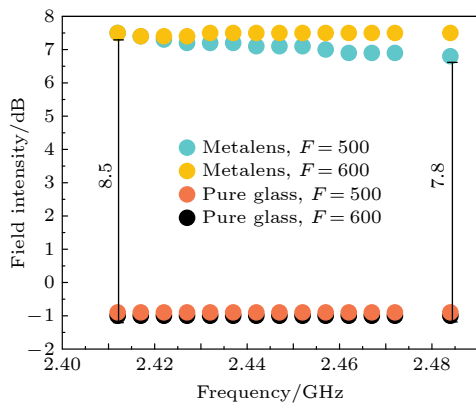


图 7 Wi-Fi 频段内超透镜和空白玻璃在不同焦距处强度 Fig. 7. Comparison of the field intensity at the focusing areas between the pure glass and the metalens in the Wi-Fi working band.

600 mm 处的不同频点下的场强. 玻璃在不同频点, 不同焦距处的场强都约为 -1 dB. 焦距为 500 mm 时, 超透镜在 2.412 GHz 的聚焦效果最强, 对比空白玻璃增强 8.5 dB, 在 2.484 GHz 频点处增强 7.8 dB. 在焦距 600 mm 时, 超透镜在 11 个频点都可以实现 8.4 dB 的增强, 在其他频点处最少有 8.3 dB 的增强, 因此设计的超透镜可以实现通信频段的区域信号增强.

3.2 仿真结果测试验证

超透镜和空白玻璃实物图 8 示, 超表面选取的单元结构尺寸和面积占玻璃整体面积小, 因此玻璃透明度和光学性能受到影响小, 可以满足对室内玻璃光学性能的要求.

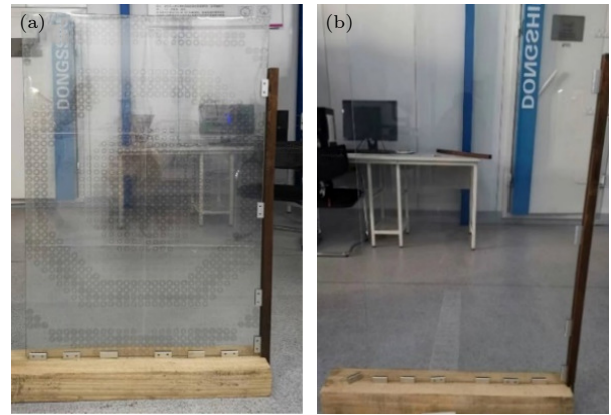


图 8 超透镜和空白玻璃实物图 (a) 超透镜; (b) 空白玻璃 Fig. 8. Photograph of the fabricated metalens (a) and pure glass (b).

图 9 展示微波暗室的测试环境, 将喇叭天线放置在距离超透镜前 3.5 m 处, 满足远场条件, 电磁波入射在样品表面可以看作平面波, 探针放置在空白玻璃和超透镜后作为接收端, 使用矢量网络分析仪测量 S21 参数, 验证仿真效果.

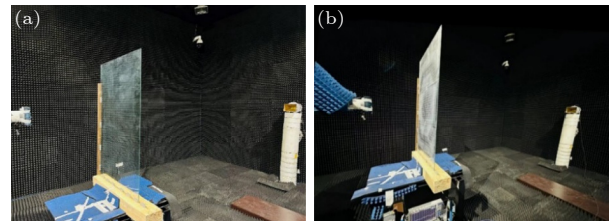


图 9 透镜聚焦性能测试验证 (a) 空白玻璃的测试环境; (b) 超透镜的测试环境 Fig. 9. Experimental demonstration for the focusing properties of the metalens in the microwave unreflected chamber: (a) Pure glass; (b) metalens.

测试中, 选取距离超透镜 46—68 cm 处 30 cm × 30 cm 范围作为观察区域. 首先观测 2.412 GHz, 在 46 cm 处开始有聚焦效果, 增加 3.9 dB, 在 50 cm 处聚焦效果最强, 增强 8.4 dB. 在 60 cm 处聚焦开始减弱, 增强 7.3 dB, 在 68 cm 处增强 4.3 dB. 在 2.484 GHz, 46 cm 处增强 3.4 dB, 50 cm 处增强 8.1 dB. 60 cm 处聚焦效果减弱, 增强 7.3 dB, 68 cm 处聚焦效果为 4.1 dB. 对比仿真中聚焦范围

内增强 7.8 dB 的结果, 仿真与测试的差异是因为仿真时采用理想状态, 加工时超表面贴附玻璃具有一定的插入损耗和加工误差. 空白玻璃在 46—68 cm 范围内的测试结果如图 10(a), (b) 所示, 能量分布均匀, 约为 -57 dB. 在同样范围内超透镜测试结果如图 10(c), (d) 所示, 对比空白玻璃, 超透镜可以实现所设计的 5 cm × 5 cm 区域聚焦功能, 提高目标区域信号强度.

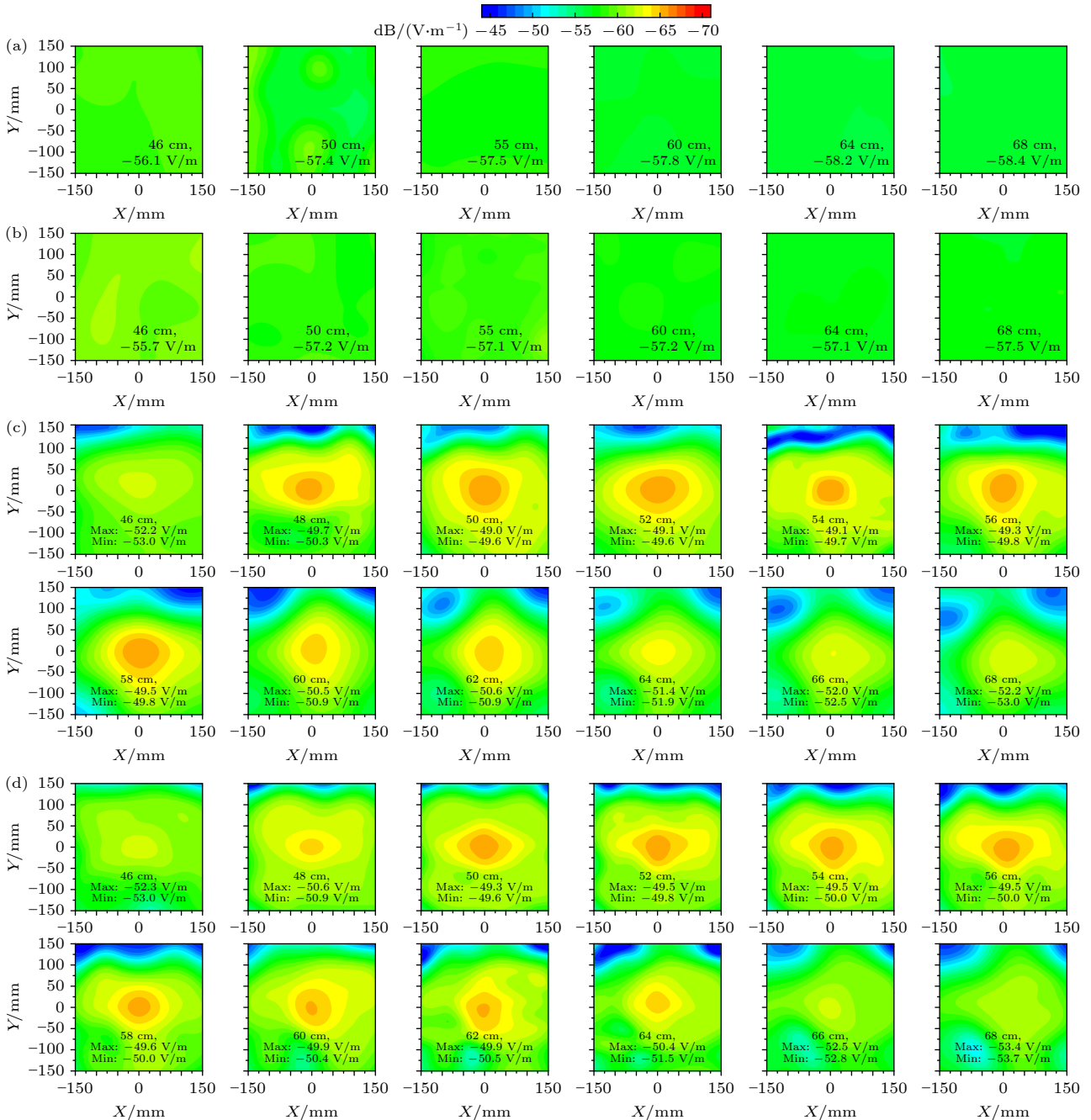


图 10 超透镜信号增强实验测试 (a) 空白玻璃在 2.412 GHz 不同焦距处强度; (b) 空白玻璃在 2.484 GHz 不同焦距处强度; (c) 超透镜在 2.412 GHz 不同焦距处强度; (d) 超透镜在 2.484 GHz 不同焦距处强度

Fig. 10. Experimental test field-intensity enhancement of the metalens: Intensity at different focal lengths of 2.412 GHz (a) and 2.484 GHz (b) of the pure glass; intensity at different focal lengths of 2.412 GHz (c) and 2.484 GHz (d) of the metalens.

通过对 Wi-Fi 频段起始与终止中心频点的计算, Wi-Fi 频段内各频点对应的电磁波波长差异极为微小. 而实现聚焦所需的相位与波长直接相关, 小的波长间隔意味着在起始与终止频点间所需相位调整量极其有限. 因此, 无论是频段起始还是结束位置, 超透镜均能保持出色的聚焦特性, 从而确保在整个 Wi-Fi 通信频段范围内实现连续且一致的聚焦效果. 为进一步呈现频段内聚焦性能的连贯性, 测试了距离样品 50 cm 处 Wi-Fi 频段其他中心频点的能量分布, 测试结果如图 11 所示, 对比空白玻璃, 超透镜在该频段内均有 8.2 dB 以上的场强增加.

4 通信效率增强验证

4.1 微波暗室信号强度测试

为了演示信号强度的增强效果并避免外部干扰因素, 在微波暗室进行了无线通信强度的测试. 实验设置包括两部手机: 一部作为信号发射端, 放置在超透镜前发射 2.4 GHz 频段的 Wi-Fi 信号; 另一部作为接收端, 放置在超透镜后的聚焦区域. 对玻璃和超透镜后相同区域的下载速度进行测试, 测试环境如图 12 所示.

测试结果显示, 在距离玻璃后 50—68 cm 范围内, 下载速度在 29.42—31.15 Mb/s 之间波动,

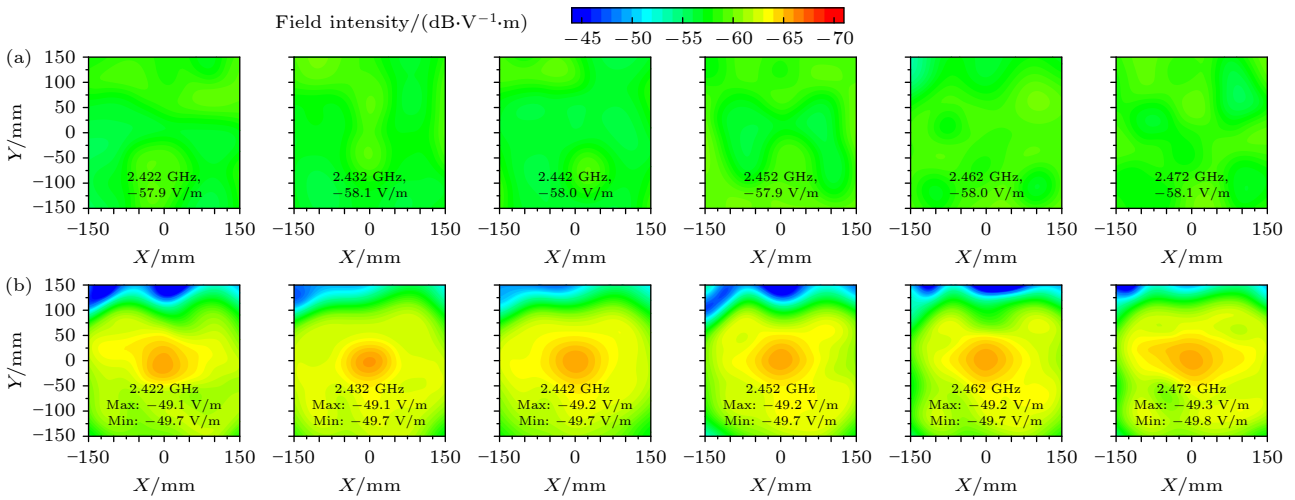


图 11 超透镜在 50 cm 处不同频点的信号强度测试 (a) 空白玻璃在不同频点的信号强度; (b) 超透镜在不同频点的信号强度
Fig. 11. Experimental test field-intensity of the metalens at different frequency points at 50 cm: Intensity of different frequency points of the (a) pure glass and (b) the metalens.

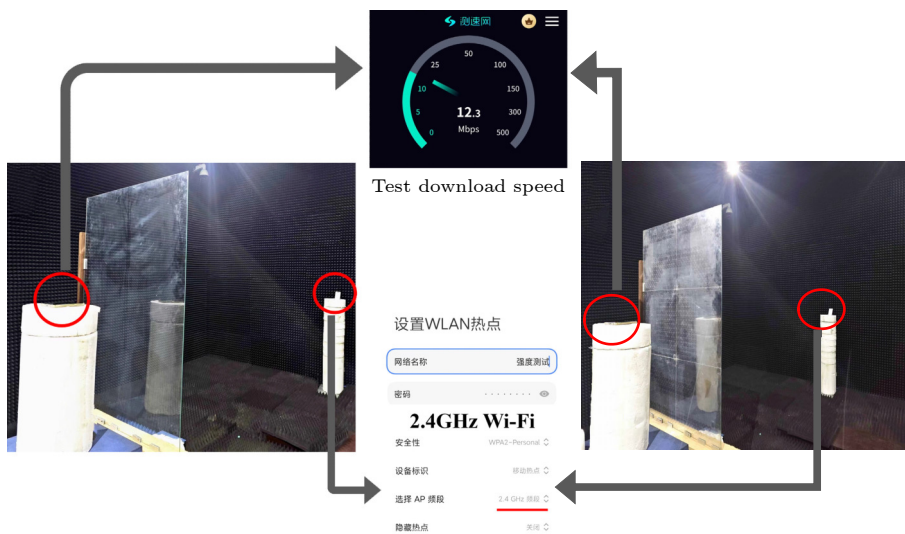


图 12 在微波暗室中基于超透镜的 Wi-Fi 通信实验演示

Fig. 12. Experimental demonstration of wireless communication based on the metalens in microwave unreflected chamber.

表 1 信号穿过空白玻璃和超透镜对应的下载速度

Table 1. Comparing the download speeds of signals traversing the pure glass and the metalens.

距离/cm	50	55	60	68
穿过玻璃的下载速度/(Mb·s ⁻¹)	31.15	30.88	30.28	29.42
穿过超透镜的下载速度/(Mb·s ⁻¹)	51.90	50.89	49.98	32.56

随着距离的增大, 下载速度逐渐减小, 这与场强测试结果的趋势一致. 在超透镜后 50—60 cm 范围内, 下载速度在 49.98—51.9 Mb/s 之间波动, 在 68 cm 聚焦范围外, 下载速度为 32.56 Mb/s. 在焦距范围内, 明显观察到下载速度提高了 20 Mb/s 以上. 在 68 cm 处, 下载速度几乎没有提高, 结果如表 1 所示.

4.2 使用环境信号强度测试

本节对超透镜的日常使用进行下载网速的强度测试. 选择室内和楼梯间两个场景作为测试地点, 模拟真实使用环境. 在室内测试环境中, 将 2.4G 路由器放置在超透镜前作为信号发射端, 发射 Wi-Fi 信号. 超透镜后聚焦区域内的手机作为接收端, 接收路由器发射的信号. 比较手机连接无线信号后, 在无障碍物、玻璃和超透镜 3 种情况下的下载速度, 结果如图 13 所示.

在没有任何障碍物的情况下, 信号衰减仅由传播距离决定. 在 50 cm 处, 下载速度为 53.48 Mb/s, 在 60 cm 处, 下载速度为 53.13 Mb/s, 如图 13(a) 所示. 当玻璃作为障碍物时, 信号的衰减受到玻璃的影响. 在 50 cm 处, 下载速度为 49.81 Mb/s, 在 60 cm 处, 下载速度为 48.59 Mb/s. 信号受到玻璃的影响, 下载速度对比无障碍物时下降, 测试结果如图 13(b) 所示. 将超透镜放置在玻璃的位置时, 下载速度在 50 cm 处为 64.5 Mb/s, 比玻璃提高约 15 Mb/s, 比无障碍物提高约 11 Mb/s; 在 60 cm 处为 62.15 Mb/s, 比玻璃提高约 12.6 Mb/s, 比无障碍物提高 9 Mb/s, 测试结果如图 13(c) 所示.

楼梯间因其半封闭性成为了常见的通信场景, 但其半封闭性也导致了楼梯间的无线信号强度低, 难以满足通信需求. 测试时, 无线信号受到墙壁影响, 主要通过楼梯门到达接收端. 将测试分为 3 种情况, 楼梯门打开无阻碍, 楼梯门打开用玻璃遮挡, 楼梯门打开用超透镜遮挡. 手机放在距离楼梯门 50—60 cm 处, 测试环境及结果如图 14 所示.

在超透镜后 50 cm 处, 下载速度分别比无阻碍、玻璃阻碍提高约 7 Mb/s 和 12.4 Mb/s, 在超透

镜后 60 cm 处, 下载速度分别比无阻碍、玻璃阻碍提高约 6.3 Mb/s 和 11.4 Mb/s. 因此超透镜在楼梯间依旧有很好的信号增强效果.

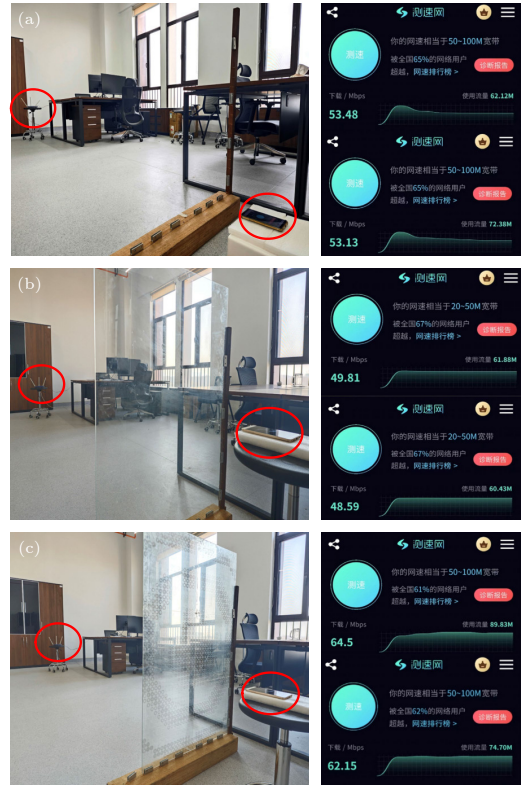


图 13 超透镜的信号增强实验演示 (a) 空气测试结果; (b) 玻璃测试结果; (c) 超透镜测试结果

Fig. 13. Experimental demonstration of signal enhancement by the metalens: (a) Speed-test result with the air; (b) speed-test result with the pure glass; (c) speed-test result with the metalens.

4.3 信号稳定性测试

对比微波暗室中无干扰因素的环境, 在实际使用环境中, 信号到达接收端的过程中会受到多种干扰因素的影响, 导致信号不稳定. 因此, 增强通信效率包括提高信号强度和稳定性. 本节通过在两种测试环境下连续进行 60 min 的下载速度测试, 评估通信效率的稳定性, 以确保实验数据的可靠性. 在 60 min 的测试中, 每隔 5 min 进行一次下载速度测试, 结果见图 15.

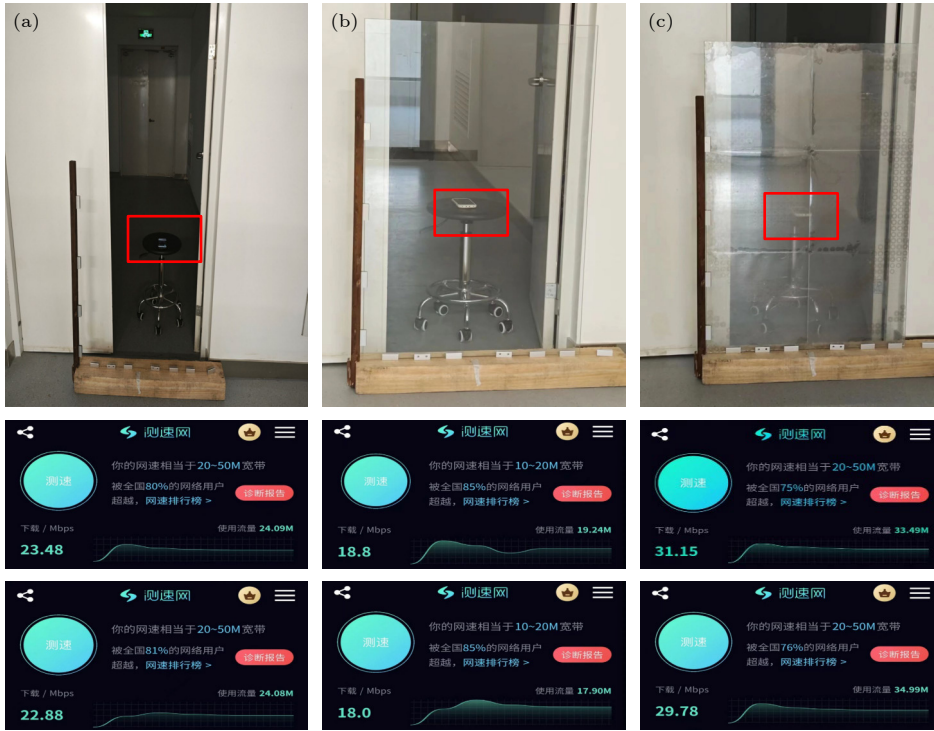


图 14 楼梯内信号增强的实验演示 (a) 空气测试结果; (b) 玻璃测试结果; (c) 超透镜测试结果

Fig. 14. Experimental demonstration of wireless communication based on the metalens inside the staircase: (a) Speed-test result with the air; (b) speed-test result with the pure glass; (c) speed-test result with the metalens.

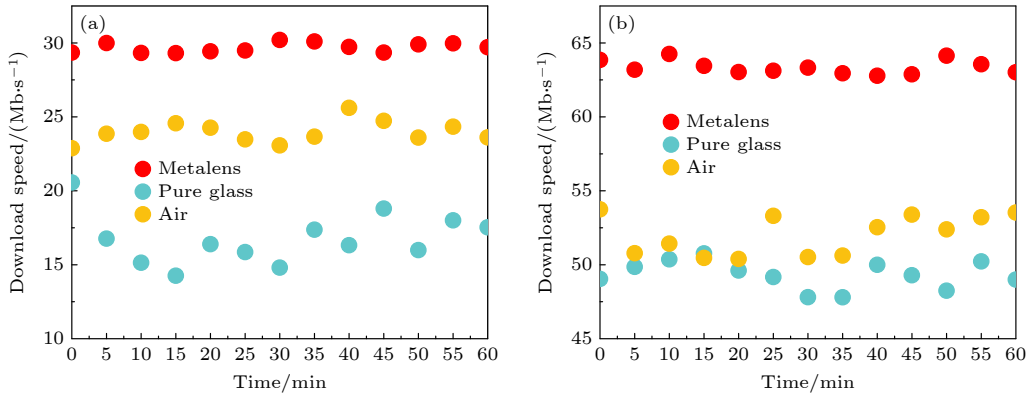


图 15 在不同环境中 Wi-Fi 信号的稳定性测试 (a) 楼梯间测试; (b) 室内测试

Fig. 15. Stability testing of wireless signals in different environment: (a) Speed-test result of stairwell; (b) speed-test result of indoor.

标准差作为一种量化统计量, 其数值的增大代表数据集离散程度的提升, 即个体观测值相对于均值的偏离程度加剧. 数值越大, 表明数据离散程度越高, 因此, 标准差是评估数据波动性、稳定性和一致性的重要工具. 本文使用标准差评估信号的稳定性, 标准差越大, 代表记录中的下载速度数据离散程度越高, 无线信号的稳定性越差, 标准差的计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}, \quad (2)$$

式中, N 为总体大小, X_i 是总体中第 i 个数的值, μ 是总体均值.

根据标准差的计算公式, 对室内与楼梯间两种典型场景下的无线信号下载速度数据分析. 在室内测试条件下, 当信号未经任何介质干扰, 直接穿越空气传播时, 计算所得的下载速度标准差标准值为 1.3; 当信号穿透普通玻璃介质时, 标准差为 0.9, 采用超透镜后, 标准差为 0.4. 在楼梯间进行测试, 空气作为参照介质时, 下载速度的标准差为 0.7; 当信号穿越普通玻璃时, 标准差为 1.7, 应用超透

镜后, 标准差降低至 0.3. 因此, 无论是在室内或楼梯间中, 超透镜相较于空气和普通玻璃, 均展现出显著降低下载速度数据标准差的能力, 即有效地平抑了速率波动, 增强了信号传输的稳定性. 且与普通玻璃作为对比, 信号穿过超透镜的下载速度均提高 12 Mb/s 以上, 有效提高了通信效率.

5 结 论

针对普通玻璃对电磁波的损耗导致目标通信区域通信效率降低的问题, 本文提出了一种解决方案: 在普通玻璃表面贴附超表面, 以进行波束调控, 从而实现信号的聚焦功能. 经过实验测试, 超表面提高了目标通信区域的信号强度和稳定性, 有效提升了通信效率. 同时, 采用耶路撒冷十字和圆形金属图案的设计, 对玻璃本身光学透明度的影响较小, 适用于需要优秀光学性能的场景, 如室内玻璃窗户. 并且超表面可以灵活选择贴附位置或通过调整摆放位置实现波束调控功能, 进而提高指定区域的通信效率, 显示出较高的商业可用性. 综上所述, 当前室内无线通信中面临的高穿透损耗问题, 本文提出的光学透明超表面方案将是解决之道之一.

参考文献

- [1] Yang G, Du J F, Xiao M 2015 *IEEE Trans. Commun.* **63** 3511
- [2] Mumtaz S, Rodriguez J, Dai L 2016 *Mmwave Massive MIMO: A Paradigm for 5g* (London: Academic Press)
- [3] Busari S A, Mumtaz S, Al-Rubaye S, Rodriguez J 2018 *IEEE Commun. Mag.* **56** 137
- [4] Martinez-de-Rioja E, Vaquero A F, Arrebola M, Carrasco E, Encinar J A, Achour M 2021 *Proceedings of the 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* Dusseldorf, Germany, Mar 22–26, 2021 p22
- [5] Meng X D, Liu R X, Chu H C, Peng R W, Wang M, Hao Y, Lai Y 2022 *Phys. Rev. Appl.* **17** 064027
- [6] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F 2013 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **19** 4700423
- [7] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [8] Luo X 2015 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **58** 594201
- [9] Yu N F, Genevet P, Kats M A 2011 *Science* **334** 6054
- [10] Khorasaninejad M, Capasso F 2017 *Science* **358** 6367
- [11] Lalanne P, Chavel P 2017 *Laser Photonics Rev.* **11** 1600295
- [12] Ming L T, Hsiao H H, Cheng H C, Mu K C, Sun G, Liu A Q, Tsai D P 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800554
- [13] Chen M K, Wu Y F, Feng L, Fan Q B, Lu M H, Xu T, Tsai D P 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2001414
- [14] Banerji S, Meem M, Sensale-Rodriguez B, Majumder A, Vasquez F G, Menon R 2019 *Optica* **6** 805
- [15] Zou X J, Zheng G G, Yuan Q, Zang W, Zhu S 2020 *Photonics* **1** 2
- [16] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F 2020 *Nat. Rev. Mater.* **5** 604
- [17] Wei Z Y, Cao Y, Su X P, Gong Z J, Li H Q 2013 *Opt. Express* **21** 010739
- [18] Li H P, Wang G M, Liang J G, Gao X J, Hou H S, Jia X Y 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 11452
- [19] Li X, Ma X L, Luo X G 2017 *Opto-Electron. Eng.* **44** 255 (in Chinese) [李雄, 马晓亮, 罗先刚 2017 光电工程 **44** 255]
- [20] Xu P, Li X C, Xiao Y F, Yang T, Zhang X L, Huang H X, Wang M Y, Yun X, Xu H D 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 014208 (in Chinese) [徐平, 李雄超, 肖钰斐, 杨拓, 张旭琳, 黄海漩, 王梦禹, 袁霞, 徐海东 2023 物理学报 **72** 014208]
- [21] Hong S, Kim Y, Oh J 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 6671
- [22] Sun Y Y, Han L, Shi X Y, Wang Z N, Liu D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104201 (in Chinese) [孙彦彦, 韩璐, 史晓玉, 王兆娜, 刘大禾 2013 物理学报 **62** 104201]
- [23] Khorasaninejad M, Capasso F 2015 *Nano Lett.* **15** 6709
- [24] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carnes C, Chen W T, Oh J, Mishra I, Devlin R C, Capasso F 2016 *Nano Lett.* **16** 7229

Optical transparent metasurface lenses and their wireless communication efficiency enhancement*

Li Hao¹⁾²⁾ Pang Yong-Qiang^{1)†} Qu Bing-Yue¹⁾
Zheng Jiang-Shan¹⁾ Xu Zhuo¹⁾

1) (*Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 3 April 2024; revised manuscript received 27 April 2024)

Abstract

This paper presents the design of an optically transparent metasurface tailored for the 2.4 GHz Wi-Fi band. It is optically transparent and attaches to both sides of the glass to improve communication efficiency. The shape of focusing region is a rectangle with an area of 5 cm by 5 cm and a length of 10 cm. The metasurface attaches to both sides of the glass and realizes area focusing. To meet the requirements for area focusing, the metasurface possesses a double-layer structure of a Jerusalem cross and a circle, and the conductive thin film is a conductive and optically transparent copper mesh. The spatial distribution of field strength in a microwave unreflected chamber is scanned to verify the regional focusing effect of the metasurface. Compared with ordinary glass, the metalens achieves field enhancement of more than 7.3 dB in the designed aggregation region, with an average download speed increasing 20.2 Mb/s. Subsequently, the download speed and network speed stability in different scenarios are tested. The standard deviation is used to calculate the dispersion of the download speed. The results demonstrate that in the focusing area, comparing with ordinary glass, the average download speed of the signal across is increased by 13.8 Mb/s in the indoor environment, accompanied by a reduction in the standard deviation by 0.5. In the stairwell, the average download speed of the signal across of the metalens is observed to increase 12.1 Mb/s, accompanied by a reduction in the standard deviation by 1.4. In conclusion, the metasurface lens demonstrates the better ability to significantly reduce the standard deviation of download speed data in both indoor and stairwell test environments than in air and ordinary glass. This results in the effective smoothing out of the speed fluctuations and the enhancing of signal transmission stability. Therefore, the ability of metalens to effectively reduce the amplitude of download speed fluctuations in various indoor environmental contexts confirms its key role in adapting to complex environments and improving the wireless communication performance. Moreover, the download speed of signals passing through the metalens is increased by more than 12 Mb/s in both test environments than that of ordinary glass. This effectively improves not only the signal strength but also the communication efficiency. Concurrently, the designed optically transparent metasurface lens is straightforward in structure and user-friendly, and at the same time, it is moveable and can be positioned according to the needs of communication enhancement. The optically transparent metasurface lens scheme proposed in this study provides a potential solution to the high penetration loss problem currently encountered in indoor wireless communication.

Keywords: metasurface, optical transparency, Wi-Fi, signal enhancement

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 84.40.Ua

DOI: [10.7498/aps.73.20240464](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240464)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFB3806200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61971341).

† Corresponding author. E-mail: pangyongqiang@xjtu.edu.cn

光学透明超表面透镜及其无线通信效率增强

李豪 庞永强 屈冰玥 郑江山 徐卓

Optical transparent metasurface lenses and their wireless communication efficiency enhancement

Li Hao Pang Yong-Qiang Qu Bing-Yue Zheng Jiang-Shan Xu Zhuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 144104 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240464

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240464>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非线性调频信号激励下非线性系统的最优共振响应

Optimal resonance response of nonlinear system excited by nonlinear frequency modulation signal

物理学报. 2022, 71(5): 050503 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211959>

基于Pancharatnam–Berry相位超表面的二维光学边缘检测

Two-dimensional optical edge detection based on Pancharatnam–Berry phase metasurface

物理学报. 2020, 69(1): 014101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191181>

超透镜聚焦光环的产生及其在冷分子光学囚禁中的应用

Generation of focusing ring of metalens and its application in optical trapping of cold molecules

物理学报. 2021, 70(16): 167802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210443>

单壁碳纳米管太赫兹超表面窄带吸收及其传感特性

Narrow band absorption and sensing properties of the THz metasurface based on single-walled carbon nanotubes

物理学报. 2024, 73(2): 026102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231357>

基于超表面的Tamm等离子激元与激子的强耦合作用

Strong coupling between metasurface based Tamm plasmon microcavity and exciton

物理学报. 2020, 69(1): 010201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191225>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material–metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>