

文章编号: 1671-7449(2023)01-0073-06

基于超表面的紧耦合阵列天线设计

乔大育, 韩丽萍

(山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要: 设计了一种应用于 WiMAX 的紧耦合阵列天线。基于超表面解耦原理, 设计了一种具有负介电常数和正磁导率的耶路撒冷十字超表面单元。在二单元紧耦合贴片天线上方加载 5×6 的超表面以减小单元间互耦, 矩形贴片上刻蚀一个 U 形缝隙改善天线的阻抗匹配。阵列天线的尺寸仅为 $55 \text{ mm} \times 74 \text{ mm} \times 8.2 \text{ mm}$ ($0.64\lambda_0 \times 0.86\lambda_0 \times 0.10\lambda_0$, λ_0 为 3.5 GHz 时自由空间的波长), 天线单元的间距(边到边的距离)为 1.3 mm ($0.015\lambda_0$)。测量结果表明, 阵列天线能够工作在 WiMAX 的 3.5 GHz 频段, -10 dB 阻抗带宽为 13.83% (3.23 GHz~3.71 GHz), -18 dB 解耦带宽为 10.34% (3.3 GHz~3.66 GHz), 天线具有良好的辐射特性。

关键词: 阵列天线; 紧耦合; 低剖面; 超表面解耦

中图分类号: TN822+.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2023.01.012

Design of Tightly Coupled Array Antenna Based on Metasurface

QIAO Dayu, HAN Liping

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A tightly coupled array antenna for WiMAX application is demonstrated. Based on the decoupling principle of metasurface, a Jerusalem-cross metasurface unit cell with negative permittivity and positive permeability is designed. The mutual coupling between the antenna elements is reduced by loading 5×6 metasurface above the tightly coupled two-element patch antennas, and the impedance matching is improved by etching a U-shaped slot on the rectangular patch. The overall size of the array antenna is $55 \text{ mm} \times 74 \text{ mm} \times 8.2 \text{ mm}$ ($0.64\lambda_0 \times 0.86\lambda_0 \times 0.10\lambda_0$, λ_0 is the wavelength of free space at 3.5 GHz), the element spacing (edge-to-edge separation) of antenna element is 1.3 mm ($0.015\lambda_0$). Measured results show that the array antenna can work in the 3.5 GHz frequency band of WiMAX. The -10 dB impedance bandwidth of the array antenna is 13.83% (3.23 GHz~3.71 GHz), and the -18 dB decoupling bandwidth is 10.34% (3.3 GHz~3.66 GHz). Also, a good radiation pattern is obtained.

Key words: array antenna; tightly coupling; low-profile; metasurface decoupling

0 引言

随着无线通信技术的快速发展, 图像、音频等通讯信息量日益增大, 对天线的带宽、增益等各方面的性能提出了更高的要求。阵列天线因具

有高增益、高功率、相位扫描、方向图赋形等优势, 在无线通信系统中得到了广泛的应用。然而, 由于通信系统空间受限, 实际中阵列天线单元的间距逐渐压缩, 单元间的紧耦合导致了阵列天线的信道容量减小、工作效率降低、方向图畸变等

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071282); 山西省自然科学基金资助项目(201901D111026)

作者简介: 乔大育(1999-), 女, 硕士生, 主要从事紧耦合阵列天线研究。E-mail: 3281875513@qq.com。

通信作者: 韩丽萍(1970-), 女, 教授, 主要从事可重构天线、MIMO 天线和超表面天线等研究。E-mail: hlp@sxu.edu.cn。

问题。目前,应用广泛的解耦方法有缺陷地结构解耦^[1-2]、解耦网络解耦^[3]及谐振结构解耦^[4]等,这些方法存在带宽窄、结构复杂或占用空间大的问题。近年来,超表面(MTS)凭借其强大的电磁波调控能力在天线解耦方面得到了广泛应用,超表面加载于阵列天线上方,会改变天线单元间耦合电磁波的传播波数,从而减小耦合电场,降低互耦^[5],基于超表面解耦的阵列天线具有结构简单、天线单元间距小等优点。

阵列天线的解耦超表面分为开槽型和贴片型。文献[6-7]通过刻蚀 4×6 “H”形槽或 4×5 方形槽的超表面解耦,隔离度均提高了15 dB以上,天线的单元间距(边到边的距离)均为 $0.023\lambda_0$,剖面高度均为 $0.194\lambda_0$ 。文献[8-9]利用圆形或方形开口谐振环组成的 5×7 超表面解耦,隔离度提高到25 dB,天线的单元间距均为 $0.02\lambda_0$,剖面高度分别为 $0.15\lambda_0$ 和 $0.18\lambda_0$ 。文献[10-11]通过矩形条带组成的 4×10 双层超表面解耦,隔离度均提高了15 dB,天线的单元间距分别为 $0.035\lambda_0$ 和 $0.15\lambda_0$,剖面高度分别为 $0.443\lambda_0$ 和 $0.306\lambda_0$ 。文献[12]利用“工”字形单元组成的 5×7 双层超表面解耦,隔离度提高了8 dB,天线的单元间距为 $0.017\lambda_0$,剖面高度为 $0.183\lambda_0$ 。上述文献中天线的剖面较高,单元间距较大。

本文设计了一种低剖面紧耦合阵列天线,加载 5×6 耶路撒冷十字单元组成的超表面提高天线单元间的隔离度,通过在矩形辐射贴片上刻蚀U形缝隙改善阻抗匹配。天线单元间距为 $0.015\lambda_0$,剖面高度为 $0.1\lambda_0$ 。测量结果表明,该天线的工作频段为 $3.3 \text{ GHz} \sim 3.7 \text{ GHz}$,隔离度提高了10.5 dB,在频带内具有良好的辐射特性。

1 超表面解耦原理及单元设计

图1为超表面解耦原理图,其中天线1被激励,天线2接 50Ω 负载。未加载超表面时,天线间的耦合电磁波沿 x 轴正方向传播,传播波数 k 可以表示为

$$k = \omega \sqrt{\mu \cdot \epsilon} \quad (1)$$

在阵列天线上方加载不同介电常数和磁导率的超表面,会对耦合电磁波的传播波数产生影响。根据式(1)可知,加载具有负介电常数($\epsilon_x < 0$)和正磁导率($\mu_x > 0$)的超表面后,电磁波传播波数可表示为^[6]

$$k = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_x \epsilon_0 \cdot \mu_x \mu_0} = jk_0 \cdot \sqrt{|\mu_x| \cdot |\epsilon_x|} \quad (2)$$

沿 x 轴正方向传输的耦合电场可以进一步表示为

$$E(x, t) = E_0 e^{jkx} e^{j\omega t} = E_0 e^{j(k_0 \cdot \sqrt{|\mu_x| \cdot |\epsilon_x|} \cdot x)} \cdot e^{j\omega t} = E_0 e^{-k_0 \sqrt{|\mu_x| \cdot |\epsilon_x|} \cdot x} \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

式(3)表明耦合电场在 x 轴方向上随着距离的增大而减小,电磁波主要沿 z 轴方向传播,因此,加载负介电常数($\epsilon_x < 0$)和正磁导率($\mu_x > 0$)的超表面能有效减小天线单元间的互耦。

在超表面解耦原理的基础上,设计了耶路撒冷十字超表面单元。图2(a)为超表面单元的仿真模型,采用Floquet端口法对超表面单元进行仿真,得到无限表面的反射和透射系数,如图2(b)所示,超表面单元在 3.5 GHz 处具有最大反射系数和最小透射系数。利用Matlab反演算法计算出超表面单元的结构参数,如图2(c)所示,超表面单元在 $3.3 \text{ GHz} \sim 3.7 \text{ GHz}$ 频段,介电常数实部为负,磁导率实部为正。

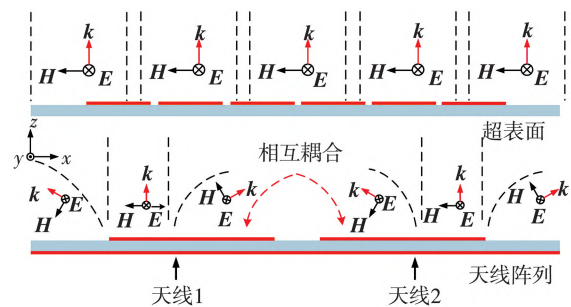
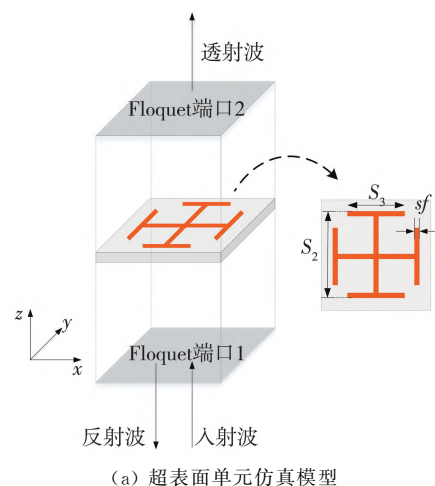
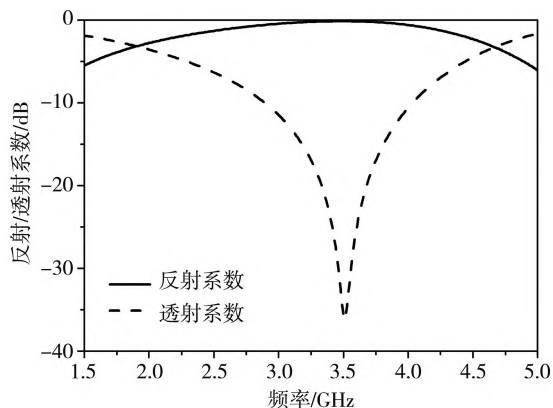


图1 超表面解耦原理

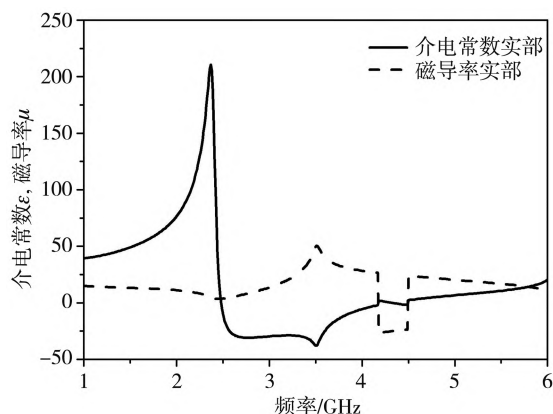
Fig.1 Principle of metasurface decoupling



(a) 超表面单元仿真模型



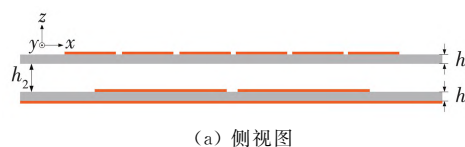
(b) 超表面单元的 S 参数



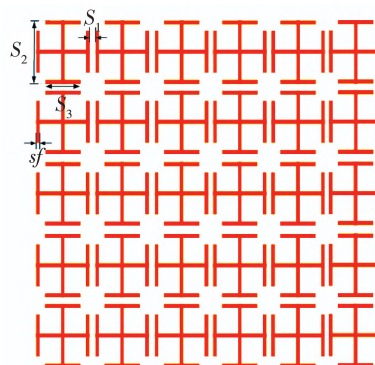
(c) 超表面单元的介电常数和磁导率

图 2 耶路撒冷十字超表面单元

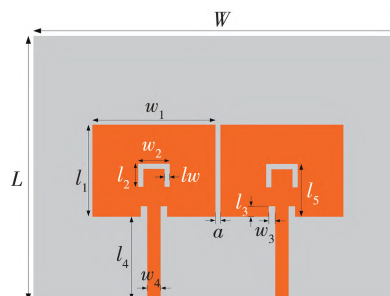
Fig.2 Jerusalem-cross metasurface unit cell



(a) 侧视图



(b) 超表面俯视图



(c) 天线俯视图

图 3 天线结构示意图

Fig.3 Configuration of antenna structure

2 基于超表面的紧耦合阵列天线

本文设计的天线结构如图 3 所示，由超表面和阵列天线组成。超表面印刷在上层介质基板，二单元贴片天线印刷在下层介质基板，两层介质基板用高度 h_2 的空气层隔开。超表面由 5×6 耶路撒冷十字单元组成，矩形贴片上蚀刻一个 U 形缝隙用于改善天线的阻抗匹配。介质基板选用厚度为 1.6 mm 的 FR4，相对介电常数和损耗角正切分别为 4.4 和 0.02，采用商业电磁软件 HFSS 仿真分析，优化的参数如表 1 所示。

表 1 天线结构参数

Tab.1 Parameters of antenna structure

参数	L	W	l_1	w_1	l_2	w_2	l_3
单位/mm	55	74	20	26	4.5	7	2
参数	w_3	lw	l_4	w_4	l_5	a	s_1
单位/mm	1.5	1	18	3	7	1.3	1
参数	s_2	s_3	h_1	h_2	sf		
单位/mm	9.4	6	1.6	5	0.5		

图 4 为加载超表面前后天线的 S 参数曲线，由图可知，未加载超表面时，天线的阻抗带宽为 3.42 GHz~3.57 GHz，单元间隔离度为 7.5 dB；加载超表面后，由于天线与超表面之间耦合产生了新的谐振点，阻抗带宽展宽为 3.19 GHz~3.77 GHz，天线隔离度提高到 18 dB。

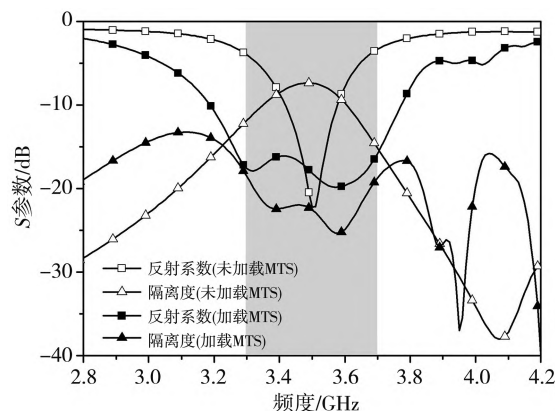


图 4 天线 S 参数

Fig.4 S-parameters of antenna

为了进一步解释超表面的解耦原理，研究了天线的表面电流分布。图 5 为加载超表面前后的

表面电流分布, 天线 1 被激励, 天线 2 接 50Ω 负载。由图 5(a)可知, 未加载超表面时, 天线 2 存在较强的耦合电流; 由图 5(b)可知, 加载超表面后, 天线 2 的耦合电流明显减少, 说明超表面能有效地减少单元间的耦合波, 实现良好的解耦效果。

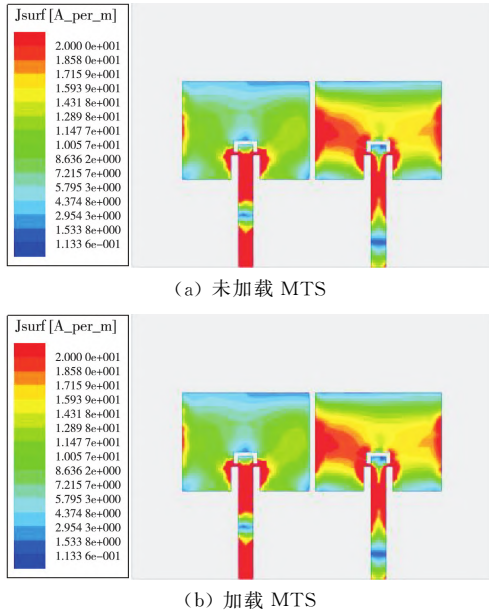


图 5 天线表面电流分布

Fig.5 Surface current distribution of antenna

3 参数分析

通过对天线进行敏感性分析, 发现 U 形缝隙的长度、空气层的高度以及超表面单元的数量对天线性能影响较大。分析某一参数对天线性能的影响时, 其他参数均保持不变。

图 6 给出了 U 形缝隙的长度 l_s ($l_s = 2 * l_2 + \omega_2$) 对天线 S 参数的影响, 在工作频段内, 随着 l_s 的增大, 低频段的阻抗匹配逐渐变好, 高频段的阻抗匹配逐渐变差, 隔离度变化不大。当 $l_s = 7 \text{ mm}$ 时, 天线的 S_{11} 在工作频段内达到 -15 dB 以下, 匹配性能最好。

图 7 给出空气层的高度 h_2 对天线 S 参数的影响, 在工作频带内, 随着 h_2 的增大, 天线的阻抗匹配逐渐变差, 低频段隔离度逐渐增大, 高频段隔离度逐渐减小。当 $h_2 = 5 \text{ mm}$ 时, 天线的 S_{21} 在工作频段内达到 -18 dB 以下, 满足设计要求。

图 8 给出超表面单元的数量对天线 S 参数的影响, 在工作频带内, 随着超表面单元数量的增加, 天线的阻抗匹配逐渐变好, 低频段隔离度逐渐减小, 高频段隔离度先增大后减小。 5×6 超表面在工作频段内, S_{11} 达到 -15 dB 以下, S_{21} 达到

-18 dB 以下, 同时实现了最好的匹配性能和解耦效果。

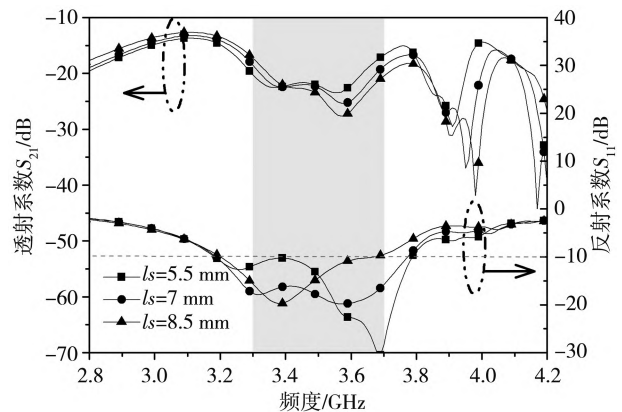


图 6 不同 l_s 时的 S 参数

Fig.6 S-parameters for different l_s

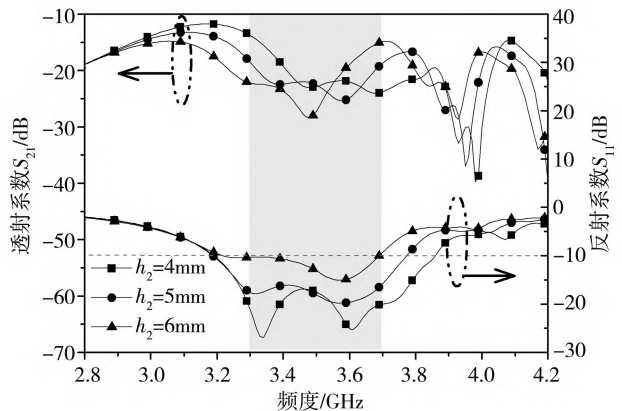


图 7 不同 h_2 时的 S 参数

Fig.7 S-parameters for different h_2

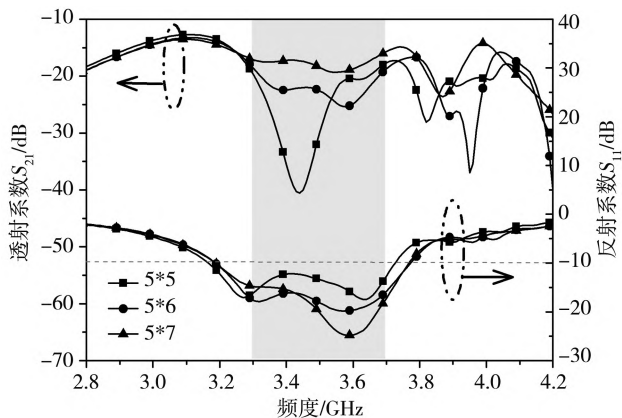


图 8 不同超表面单元数量的 S 参数

Fig.8 S-parameters for different numbers of metasurface units

4 结果与讨论

天线印刷在相对介电常数为 4.4 的 FR4 介质基板上, 图 9 为天线的实物图。采用 Agilent 公司 N5221A 矢量网络分析仪测量天线的 S 参数, Lab-Volt 公司 8092 型自动天线测量系统测量天

线的辐射方向图。

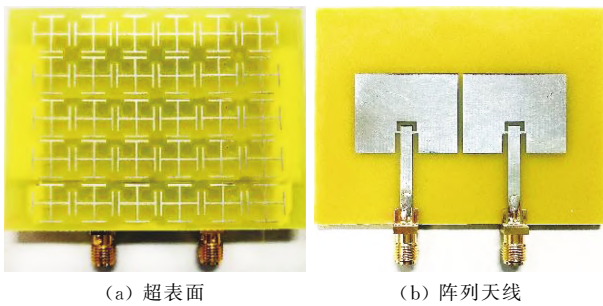


图 9 天线实物图

Fig.9 Fabricated photographs of antenna

图 10 为天线仿真和测量的 S 参数曲线, 由图可知, 仿真与测量结果基本一致, 仿真的 -10 dB 阻抗带宽为 16.98% (3.18 GHz ~ 3.77 GHz), -18 dB 解耦带宽为 11.40% (3.3 GHz ~ 3.7 GHz); 测量的 -10 dB 阻抗带宽为 13.83% (3.23 GHz ~ 3.71 GHz), -18 dB 解耦带宽为 10.34% (3.3 GHz ~ 3.66 GHz)。测量结果与仿真结果的差异主要源于介电基板的介电常数偏差以及加工误差。

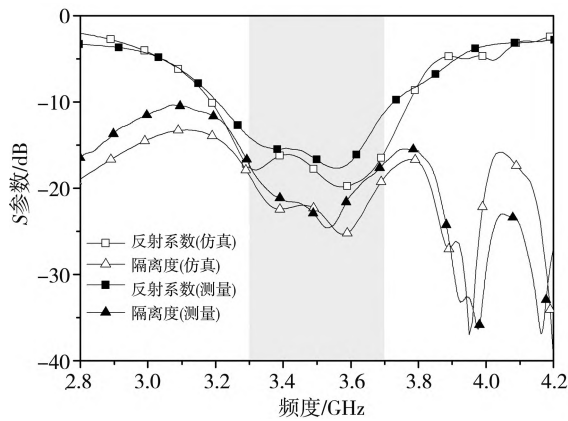
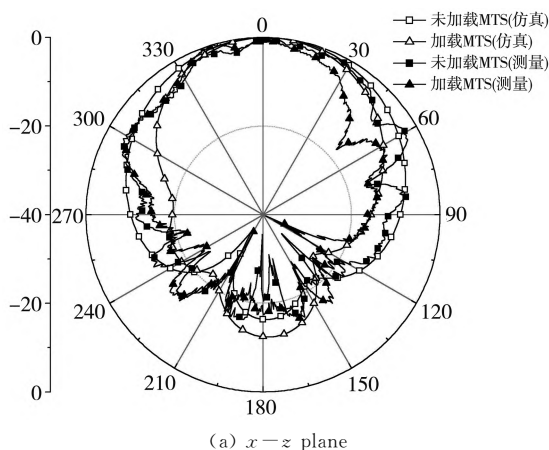


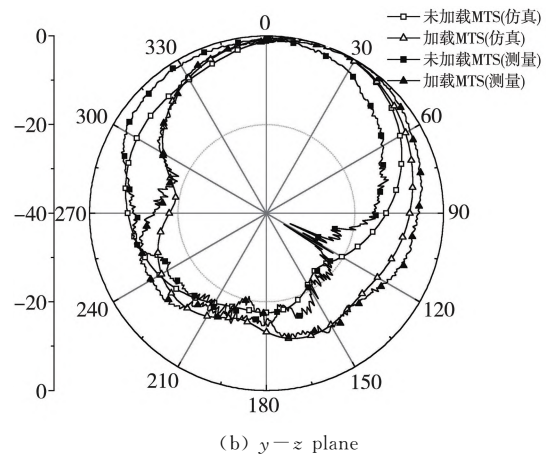
图 10 天线 S 参数

Fig.10 S-parameters of antenna

图 11 为天线在 3.5 GHz 处的归一化辐射方向图, 其中天线 1 被激励, 天线 2 接 50 Ω 负载。



(a) x-z plane



(b) y-z plane

图 11 天线辐射方向图

Fig.11 Radiation patterns of antenna

由图 11 可知, 测量与仿真结果基本一致, 加载超表面前后, 阵列天线能够实现较好的宽边辐射。图 12 为天线的增益曲线, 由图可知, 加载超表面前后, 天线的仿真峰值增益从 2.56 dB 提高至 5.7 dB, 天线的实测峰值增益从 1.28 dB 提高至 4.52 dB。

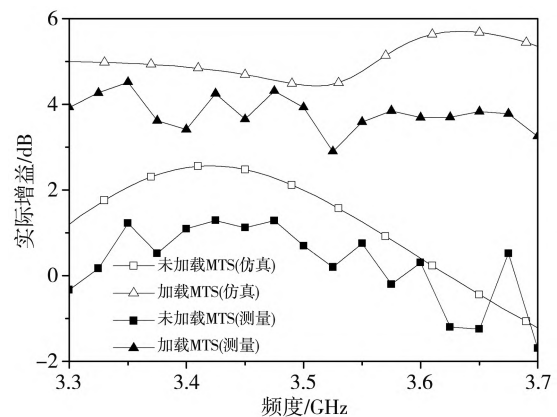


图 12 天线增益

Fig.12 Gain of antenna

表 2 基于超表面解耦的天线性能对比

Tab.2 Performance comparison of antennas based on metasurface decoupling

文献	频率/GHz	解耦带宽/%	边-边距离	高度	隔离度提高/dB
[6]	3.5	1.14	0.023λ ₀	0.19λ ₀	15
[7]	3.51	1.4	0.023λ ₀	0.32λ ₀	15
[8]	5.8	7.25	0.02λ ₀	0.15λ ₀	12
[9]	5.8	8.69	0.02λ ₀	0.15λ ₀	12
[10]	3.5	11.4	0.035λ ₀	0.44λ ₀	15
[11]	2.5	15.6	0.15λ ₀	0.31λ ₀	15
[12]	4.9	22.3	0.017λ ₀	0.18λ ₀	8
本文	3.5	10.34	0.015λ ₀	0.1λ ₀	10.5

表2给出了本文天线和文献中天线的性能比较。由表可知,本文天线的单元间距最小($0.015\lambda_0$),剖面最低($0.1\lambda_0$)。

5 结论

本文设计了一种应用在 WiMAX 3.5 GHz 频段的紧耦合阵列天线,加载耶路撒冷十字超表面提高天线单元间隔离度,单元间距为 1.3 mm ($0.015\lambda_0$),剖面高度为 8.2 mm ($0.1\lambda_0$)。测量结果表明, -10 dB 阻抗带宽为 13.83% (3.23 GHz~3.71 GHz), -18 dB 解耦带宽为 10.34% (3.3 GHz~3.66 GHz)。天线结构简单,成本较低,易于加工,具有良好的辐射特性。

参考文献:

- [1] TANG C, ZHENG H, WANG M, et al. A dual-band antenna array with high gain and miniaturized structure[C]//2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), IEEE, 2019: 735-738.
- [2] SUN Q, SUN B, SUN L, et al. Broadband two-element array with hybrid decoupling structures for multimode mobile terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1431-1434.
- [3] ZHAO L, WU K, Wu. A dual-band coupled resonator decoupling network for two coupled antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(7): 2843-2850.
- [4] VISHVAKSENAN K S, MITHRA K, KALAIARASAN R, et al. Mutual coupling reduction in microstrip patch antenna arrays using parallel coupled-line resonators[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2146-2149.
- [5] QAMAR Z, NAEEM U, KHAN S A, et al. Mutual coupling reduction for high-performance densely packed patch antenna arrays on finite substrate[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(5): 1653-1660.
- [6] LUAN H, CHEN C, CHEN W, et al. Mutual coupling reduction of closely E/H-plane coupled antennas through metasurfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10): 1996-2000.
- [7] LUAN H, WANG Y, CHEN C, et al. Mutual coupling reduction of closely E/H-coupled MIMO antennas through metasurfaces[C]//International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2019: 1-3.
- [8] WANG Z, LI C, YIN Y. A meta-surface antenna array decoupling (MAAD) design to improve the isolation performance in a MIMO system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 61797-61805.
- [9] ZHAO L, WANG Z, SHEN X, et al. Introduction of the meta-surface antenna array decoupling (MAAD) method for 5G systems[C]//IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2018: 20-22.
- [10] GUO J, LIU F, ZHAO L, et al. Meta-surface antenna array decoupling designs for two linear polarized antennas coupled in H-plane and E-plane[J]. IEEE Access, 2019, 7: 100442-100452.
- [11] LIU F, GUO J, ZHAO L, et al. A meta-surface decoupling method for two linear polarized antenna array in Sub-6 GHz base station applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 2759-2768.
- [12] SI L M, JIANG H X, LV X, et al. Broadband extremely close-spaced 5G MIMO antenna with mutual coupling reduction using metamaterial-inspired superstrate[J]. Optics Express, 2019, 27: 3472-3482.

声 明

本刊已许可中国知网、万方数据知识服务平台、超星网等多家单位以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述各家网络著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。