

基于超表面的频率可重构缝隙天线设计

郭晓婷,吴箴言,史恒基,韩丽萍*

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

摘要:频率可重构天线可以降低通信平台中天线的数量,减少通信系统之间的电磁干扰。电控方式的频率可重构天线需要引入偏置电路,会对天线性能造成影响,本文提出了一种机械方式的频率可重构缝隙天线。天线由等腰梯形单元周期排列组成的超表面和缝隙天线两部分组成,在缝隙天线的接地板上刻蚀六边形槽展宽阻抗带宽,通过机械旋转超表面改变其等效相对介电常数,进而实现频率可重构。仿真和实测结果表明,天线在54.3%(2.32 GHz~4.05 GHz)频段内可以实现工作带宽的切换,整个工作频段内具有较好的辐射特性,峰值增益达到5.5 dBi。

关键词:频率可重构;超表面;超表面天线;缝隙天线

中图分类号:TN822+.8

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)05-1048-06

Design of Frequency Reconfigurable Antenna Based on Metasurface

GUO Xiaoting, WU Zhenyan, SHI Hengji, HAN Liping*

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

Abstract: Frequency reconfigurable antennas are widely used to reduce the antenna number in communication platforms, and then eliminate the electromagnetic interference between different systems. A bias circuit needs to be introduced in frequency reconfigurable antennas using electronic switches, and thus the antenna performance will be affected. In this paper, a frequency reconfigurable slot antenna through mechanical tune is presented. The antenna is composed of a Metasurface (MS) with a periodic arrangement of isosceles trapezoidal units and a slot antenna. A hexagonal groove etched in the ground plane of the slot antenna is used to broaden the impedance bandwidth. The equivalent relative permittivity can be changed by mechanically rotating the MS, and then the frequency reconfiguration is achieved. The simulated and measured results show that the operating bandwidth of the antenna can be switched in the band of 54.3% (2.32 GHz—4.05 GHz). A good radiation pattern is obtained in the operating band, and the peak gain is 5.5 dBi.

Key words: frequency reconfigurable; metasurface; metasurface antenna; slot antenna

0 引言

随着通信技术迅猛发展,同一载体搭建多个系统的情况日渐增多,天线作为系统的关键部件,数量也随之增加,这将导致系统的体积增大,电磁干扰加剧^[1]。可重构天线^[2]的提出

有效地缓解了这些问题,大大降低了天线的数量和成本,减少了电磁干扰。可重构天线可以分为频率^[3-4]、极化^[5-6]、方向图^[7]和混合^[8]可重构天线。

超表面是一种特殊的电磁超材料,由于其良好的电磁调控特性已被广泛应用于天线设

收稿日期:2023-01-17;接受日期:2023-05-04

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

作者简介:郭晓婷(1997-),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为可重构超表面天线。E-mail:t19060704@163.com

* 通信作者:韩丽萍(HAN Liping),E-mail:hlp@sxu.edu.cn

引文格式:郭晓婷,吴箴言,史恒基,等.基于超表面的频率可重构缝隙天线设计[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(5):1048-1053. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023090

计^[9]。利用超表面实现频率可重构主要有电控^[10-12]和机械^[13-17]两种方式。Cai等^[10]和Ledi-mo等^[11]将变容二极管加载在以矩形贴片或环形谐振器为单元的超表面上,通过改变二极管的电容值实现单频和双频可重构。Li等^[12]通过改变矩形贴片单元间二氧化钒薄膜的导电状态实现频率可重构,天线两个频段的工作带宽分别为2.5%和4.3%。采用电控方式实现频率可重构虽有调节速度快的优点,但引入的电子器件和偏置电路会对天线的性能产生影响,机械方式操作更加简单且无须引入电子器件。Zhang等^[13]通过旋转以弯折线为单元的超表面实现双频可重构,天线的工作带宽为17.6%、14.7%。通过采用较大长宽比的超表面单元,可以增大等效相对介电常数的变化范围,进而扩展频率可重构的范围,文献[14-16]通过机械旋转以弯折线、矩形环或三角形环为单元的超表面实现频率可重构,天线的工作带宽分别为28.6%、35.5%和42%。Majumder等^[17]采用共面波导馈电方式进一步扩展了频率可调的范围,通过旋转以I型条带为单元的双层超表面实现了频率可重构,天线的工作带宽为43.7%。上述天线频率可调的范围均小于44%,本文的设计目标是一种频率可调范围大于50%的可重构天线。

本文设计了一种基于超表面的频率可重构天线,采用宽缝隙天线激励超表面,在缝隙天线上方高度为1 mm处加载以等腰梯形为单元的超表面,通过机械旋转超表面可以在3 GHz左右实现频率可重构。天线的工作带宽为

54.3% (2.32 GHz~4.05 GHz),辐射性能较好。

1 天线设计

本文设计的天线结构如图1所示,由超表面和缝隙天线两部分组成。超表面印刷在上层介质板,缝隙天线印刷在下层介质板,均采用FR4,两层介质基板间的空气层为 $h=1$ mm。超表面由较大长宽比的等腰梯形单元周期排列组成,缝隙天线的接地板刻蚀六边形槽扩展天线的带宽,阶梯型微带馈线改善天线的阻抗匹配。仿真优化后的参数如表1所示。

表1 天线的结构参数,其中 p_1-h_1 为超表面参数, h 为空气层高度, l_s-D_2 为缝隙天线参数

Table 1 Structural parameters of the antenna, where p_1-h_1 are parameters of the metasurface, h is the height of the air layer, and l_s-D_2 are parameters of the slot antenna

Parameter	p_1	p_2	p_3	p_4	D_1	h_1	h	l_s
Value/mm	0.8	0.4	12	2.9	50	1.6	1	26.5
Parameter	W_1	W_2	W_3	W_4	l_f	d	h_2	D_2
Value/mm	1.6	3	15	9	27	4	1.6	58

2 天线工作原理

超表面由等腰梯形单元周期排列组成,其电磁特性可以通过超表面单元的周期边界模拟。超表面单元的CST (Computer Simulation Technology) 仿真模型如图2所示,单元四周设置为主从边界条件模拟周期边界,垂直于 z 轴的平面设置为Floquet端口,当 y 极化波入射时,超表面被激励,可以得到无限表面的S参数,等效阻抗 Z 和折射率 n 可由公式(1)一式

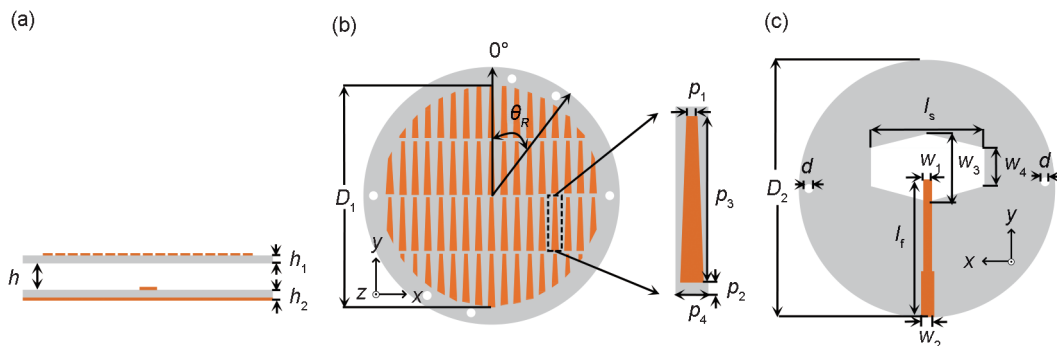


图1 天线的结构示意图(结构参数列于表1)

(a) 侧视图; (b) 俯视图; (c) 仰视图

Fig. 1 Diagram of the antenna structure, the structure parameters are listed in Table 1

(a) Side view; (b) top view; (c) bottom view

(2) 计算。

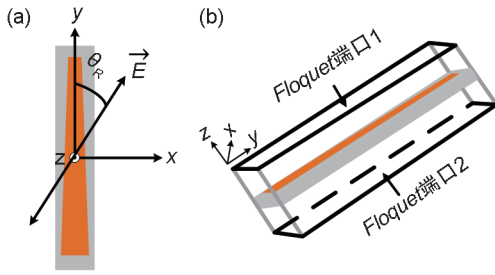


图2 等腰梯形超表面单元

(a) 超表面单元结构; (b) 超表面单元仿真模型

Fig. 2 Isosceles trapezoidal metasurface unit cell

(a) Structure of metasurface unit; (b) simulation model of metasurface unit

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (1)$$

$$e^{ink_0 H} = X \pm i\sqrt{1 - X^2}, \quad (2)$$

其中 $X = 1/[2S_{21}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)]$, k_0 为波数, H 为介质基板厚度。通过散射参数逆推法计算等效相对介电常数 $\epsilon_{\text{eff}} = n/Z$ 和等效相对磁导率 $\mu_{\text{eff}} = nZ^{[18]}$ 。图3为超表面单元旋转不同角度时的电磁特性, 结果表明随着旋转角度的增大, ϵ_{eff} 明显减小, μ_{eff} 基本不变。由此可见, 机械旋转超表面可以改变其等效相对介电常数。

为了说明天线实现频率可重构的工作原理, 研究了在缝隙天线上方加载可变介电常数基板的情况, 仿真发现天线的谐振频率随着覆层基板相对介电常数的减小而提高。通过在缝隙天线及超表面设置定位孔, 由塑料螺钉固定不同角度的定位孔实现超表面的机械旋转, 进而改变其等效相对介电常数, 等同于改变覆层基板的相对介电常数, 因此旋转超表面可以改变天线的谐振频率。图4展示了天线在不同超表面旋转角度时的S参数, 从图中可以看出随着旋转角度由 0° 增大到 80° , 天线的谐振频率从 2.48 GHz 变化到 3.6 GHz。此外, 随着旋转角度的增大, 第一谐振频率右移, 而第二谐振频率左移, 当 $\theta_R = 80^\circ$ 时, 两个谐振频率靠近出现双谐振特性。

3 敏感性分析

通过对天线进行敏感性分析, 发现超表面单元高度 p_3 、空气层高度 h 以及缝隙天线长度 l_s

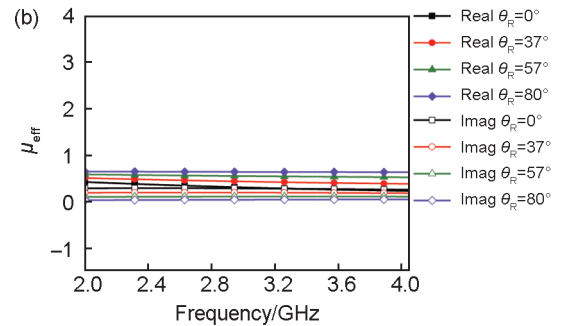
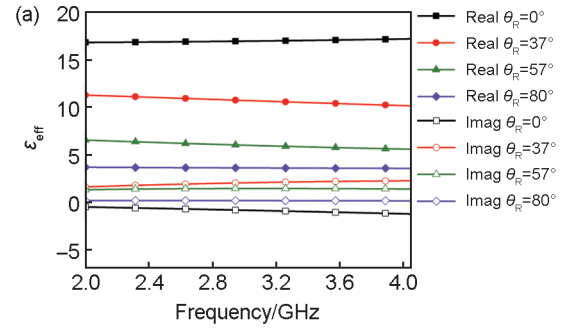


图3 超表面单元的 ϵ_{eff} 和 μ_{eff}

(a) 等效介电常数 ϵ_{eff} ; (b) 等效磁导率 μ_{eff}

Fig. 3 ϵ_{eff} and μ_{eff} for metasurface unit

(a) Effective permittivity; (b) effective permeability

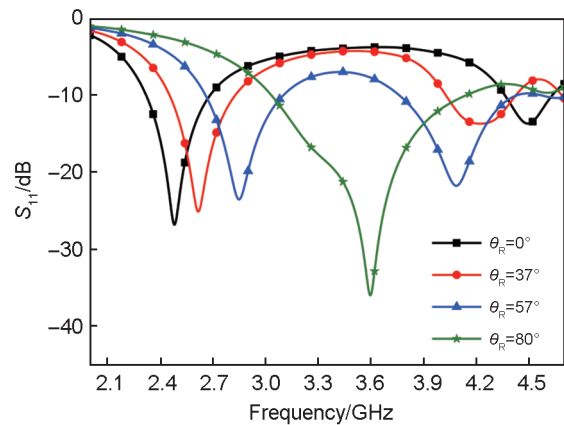


图4 天线的S参数

Fig. 4 S-parameters of antenna

对天线性能影响较大。此处以 $\theta_R = 0^\circ$ 时为例。

图5给出 p_3 对天线S参数的影响, 随着 p_3 由 10 mm 变为 14 mm, 谐振频率向低频偏移, 当 $p_3 = 12$ mm 时, 带宽为 2.32 GHz~2.69 GHz, 满足所需频段要求。图6为 h 对天线S参数的影响, 随着 h 由 0.5 mm 变为 1.5 mm, 谐振频率向高频偏移, 当 $h = 1$ mm 时, 满足所需频段要求。图7给出 l_s 对天线S参数的影响, 随着 l_s 由 24.5 mm 变为 28.5 mm, 谐振频率向低频偏移, 当 $l_s = 26.5$ mm 时, 满足所需频段要求。

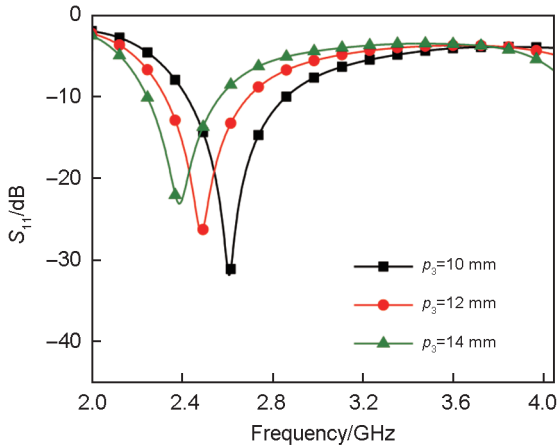


图5 不同 p_3 时的S参数

Fig. 5 S-parameters for different p_3

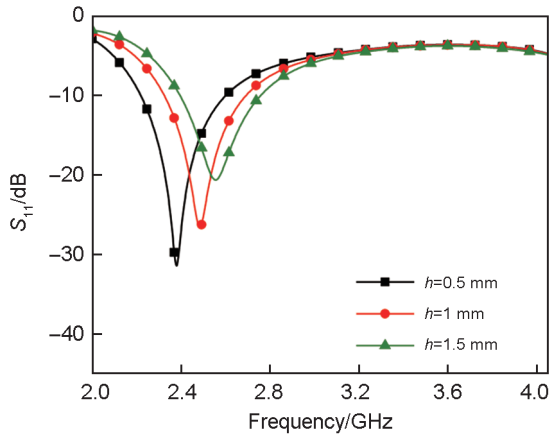


图6 不同 h 时的S参数

Fig. 6 S-parameters for different h

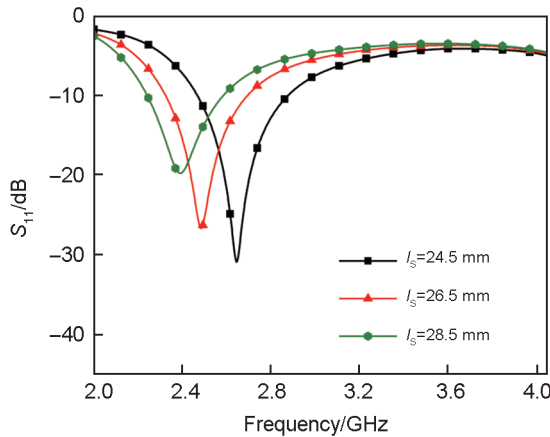


图7 不同 l_s 时的S参数

Fig. 7 S-parameters for different l_s

4 仿真与测量结果

天线印刷在FR4介质基板上,图8为天线的实物图。使用天线测量系统测量天线的S参数和辐射方向图。

图9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保持一致。当 $\theta_R=0^\circ$ 时,天线仿真和测试的阻抗带宽分别为2.32 GHz~2.69 GHz (14.8%)和2.22 GHz~2.6 GHz (15.8%);当 $\theta_R=57^\circ$ 时,天线仿真和测试的阻抗带宽分别为2.6 GHz~3.1 GHz (17.5%)和2.6 GHz~3.17 GHz (19.8%);当 $\theta_R=80^\circ$ 时,天线仿真和测试的阻抗带宽分别为3 GHz~4.05 GHz (29.8%)和3.03 GHz~3.85 GHz (23.8%)。由于加工以及测量的误差,测量的阻抗带宽略向低频偏移。

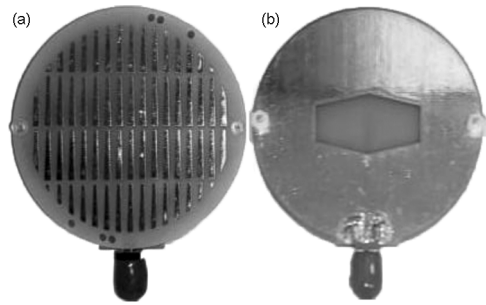


图8 天线实物图

(a) 俯视图; (b) 仰视图

Fig. 8 Fabricated photographs of the antenna

(a) top view; (b) bottom view

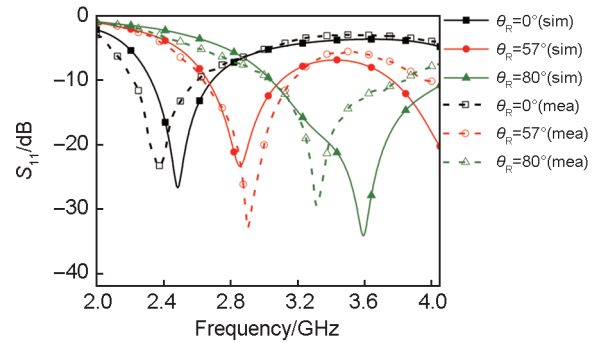


图9 天线仿真和测量的S参数

Fig. 9 The simulated and measured S-parameters of antenna

图10给出了天线的归一化辐射方向图,天线在三种角度下的辐射模式基本相似。仿真和测量的结果基本保持一致。当 θ_R 不为 0° 时,超表面关于 y 轴不再对称,交叉极化恶化。图11给出频率可重构天线在三种角度下的仿真和测量的增益曲线。由图可知,在2.32 GHz~4.05 GHz频段内天线测量和仿真结果的整体趋势大致相同,由于介质损耗以及板材介电常数的偏差使得测量值低于仿真值。

表2给出了本文天线和文献中频率可重构

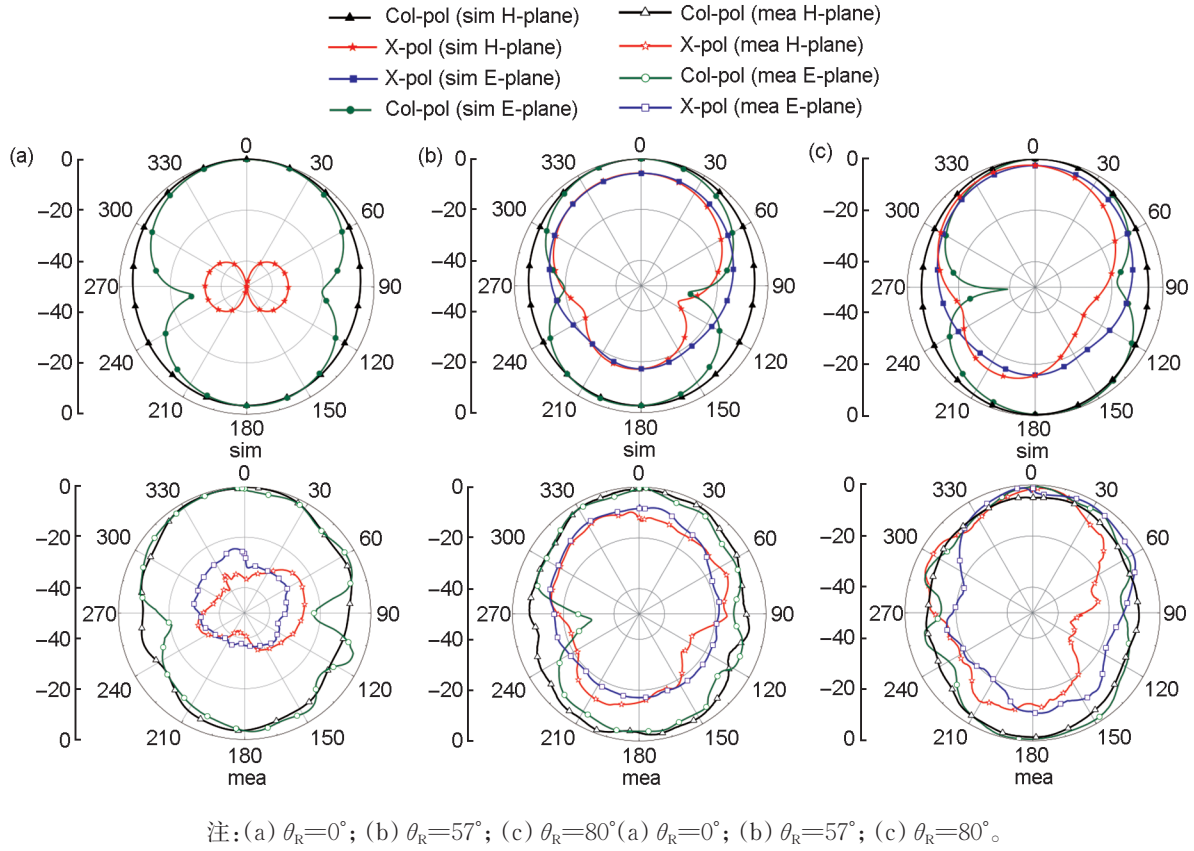


图 10 不同 θ_R 的辐射方向图
Fig. 10 Radiation patterns for different θ_R

表 2 频率可重构天线的比较

Table 2 Comparison of frequency reconfigurable antennas

文献	板材	尺寸(λ_0^3)	带宽/%	峰值增益/dBi
[13]	Rogers RT5880	$0.8^2 \times 0.06$	17.6	>5
[14]	Rogers RT5880	$0.7^2 \times 0.03$	28.6	5
[15]	Rogers RO4350B	$\pi \times 0.25^2 \times 0.03$	35.5	—
[16]	F4B	$\pi \times 0.25^2 \times 0.03$	42	5.5
[17]	Rogers RT5880	$1^2 \times 0.085$	43.7	8.3
本文	FR4	$\pi \times 0.3^2 \times 0.04$	54.3	5.5

天线的性能比较。由表可知,本文天线具有最宽的频率可调范围。与文献[13-14]、[17]相比,本文天线尺寸较小,与小尺寸天线^[15-16]相比,本文天线的工作带宽分别提高了18.8%和12.3%;除采用罗杰斯板材的文献[17]外,本文天线有较高的峰值增益。

5 结论

本文设计了一种基于超表面的频率可重构缝隙天线。较大长宽比的等腰梯形超表面单元

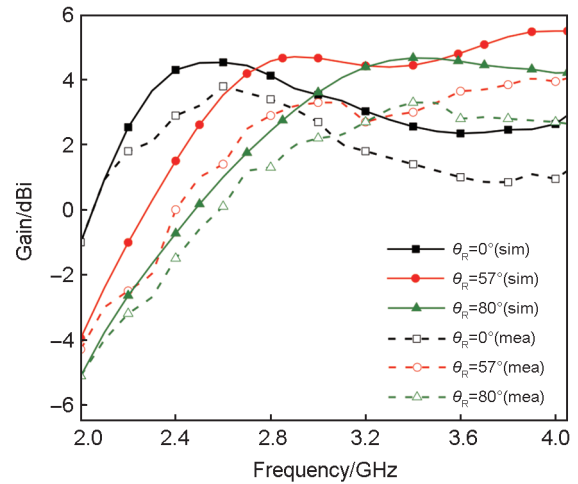


图 11 不同 θ_R 的增益
Fig. 11 Gain for different θ_R

增大了超表面等效相对介电常数的变化范围,采用宽缝隙天线激励超表面实现了宽频可调。通过分析在缝隙天线上方加载可变介电常数基板,说明了机械旋转超表面可以实现天线频率的可重构。仿真和实测结果表明,天线的频率可调范围大于50%,具有良好的可重构性能。

该天线可重构方式简单,易于加工,成本较低,可以应用于 WLAN (2.42 GHz~2.4835 GHz) 和 WiMax (2.5 GHz~3.69 GHz) 等无线通信系统。

参考文献:

- [1] 李嘉麟. 浅谈天线在5G中的发展与应用[J]. 中国新通信, 2019, **21**(3): 134-135.
LI J L. Application and Challenge of Large-scale Antenna in 5G[J]. *China New Commun*, 2019, **21**(3): 134-135.
- [2] 王安国, 张佳杰, 王鹏, 等. 可重构天线的研究现状与发展趋势[J]. 电波科学学报, 2008, **23**(5): 997-1002. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.05.039.
WANG A G, ZHANG J J, WANG P, *et al.* Recent Research and Developing Trends of Reconfigurable Antennas[J]. *Chin J Radio Sci*, 2008, **23**(5): 997-1002. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.05.039.
- [3] HUSSAIN N, GHAFAR A, NAQVI S I, *et al.* A Conformal Frequency Reconfigurable Antenna with Multi-band and Wideband Characteristics[J]. *Sensors*, 2022, **22** (7): 2601. DOI: 10.3390/s22072601.
- [4] YUAN Y J, SUN X H, ZHANG Y P, *et al.* Design of Frequency Reconfigurable Antenna Based on Metasurface [C]//2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu: IEEE, 2021: 2165-2169. DOI: 10.1109/ICCC54389.2021.9674400.
- [5] ZHANG X, CHEN C, JIANG S, *et al.* A High-gain Polarization Reconfigurable Antenna Using Polarization Conversion Metasurface[J]. *Prog Electromagn Res C*, 2020, **105**: 1-10. DOI: 10.2528/pierc20052001.
- [6] ZHU H L, CHEUNG S W, LIU X H, *et al.* Design of Polarization Reconfigurable Antenna Using Metasurface[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, **62**(6): 2891-2898. DOI: 10.1109/TAP.2014.2310209.
- [7] JANAPALA D K, CASPE F S, MOSES N. Metasurface Based Pattern Reconfigurable Antenna for 2.45 GHz ISM Band Applications[J]. *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, 2019, **29**(12): e22007. DOI: 10.1002/mmce.22007.
- [8] NI C, CHEN M S, ZHANG Z X, *et al.* Design of Frequency-and Polarization-reconfigurable Antenna Based on the Polarization Conversion Metasurface[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, **17**(1): 78-81. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2775444.
- [9] 王军会. 超表面调制天线的国内外最新进展[J]. 电波科学学报, 2021, **36**(4): 498-510. DOI: 10.13443/j.cjors.2020042101.
- WANG J H. The Latest Development of the Modulated Metasurface Antenna[J]. *Chin J Radio Sci*, 2021, **36**(4): 498-510. DOI: 10.13443/j.cjors.2020042101.
- [10] CAI Y M, YIN Y Z, LI K. A Low-profile Frequency Reconfigurable Metasurface Patch Antenna[C]//2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego: IEEE, 2017: 1375-1376. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072730.
- [11] LEDIMO B K, MOARO P, RAMOGOMANA R, *et al.* Design Procedure of a Frequency Reconfigurable Metasurface Antenna at mm Wave Band[J]. *Telecom*, 2022, **3** (2): 379-395. DOI: 10.3390/telecom3020020.
- [12] LI J H, YANG W C, CHEN D X, *et al.* Millimeter-wave Frequency Reconfigurable Antenna Using Simple VO₂-Based Paired Metasurface[J]. *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, 2022, **32**(12): e23454. DOI: 10.1002/mmce.23454.
- [13] ZHANG H, JIAO Y C, WANG R Q. Dual-band Frequency-reconfigurable Antenna with Meandered-line-based Metasurfaces[C]//2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Xi'an: IEEE, 2017: 1-3. DOI: 10.1109/apcap.2017.8420864.
- [14] CHATTERJEE J, MOHAN A, DIXIT V. A Novel Frequency Reconfigurable Slot Antenna Using Metasurface [C]//2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP). Hyderabad: IEEE, 2019: 1-4. DOI: 10.1109/INCAP.2018.8770888.
- [15] ZHU H L, CHEUNG S W, YUK T I. Frequency-reconfigurable Slot Antenna with Wide-tuning Range Using Metasurface[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2015, **57**(6): 1475-1481. DOI: 10.1002/mop.29116.
- [16] MA W D, WANG G M, ZONG B F, *et al.* Mechanically Reconfigurable Antenna Based on Novel Metasurface for Frequency Tuning-range Improvement[C]//2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Beijing: IEEE, 2016: 629-631. DOI: 10.1109/ICMMT.2016.7762390.
- [17] MAJUMDER B, KRISHNAMOORTHY K, MUKHERJEE J, *et al.* Frequency-reconfigurable Slot Antenna Enabled by Thin Anisotropic Double Layer Metasurfaces [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2016, **64**(4): 1218-1225. DOI: 10.1109/TAP.2016.2526081.
- [18] SZABÓ Z, PARK G H, HEDGE R, *et al.* A Unique Extraction of Metamaterial Parameters Based on Kramers-Kronig Relationship[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2010, **58**(10): 2646-2653. DOI: 10.1109/TMTT.2010.2065310.