

DOI: 10. 20079/j. issn. 1001-893x. 221225002

# 基于超表面的卫星天线设计进展综述\*

韩 冷, 谢文宣, 龚安民, 杨于飞

(武警工程大学 信息工程学院, 西安 710086)

**摘要:**超表面是由亚波长尺寸单元密集排布组成的平面结构, 具有强大的电磁波调控能力, 而基于超表面的新型卫星天线在缓解业务多样化和用户数量激增方面极具潜力。介绍了目前卫星天线发展现状趋势, 对传统天线加载超表面和单一超表面天线加以区分, 归纳了加载超表面后天线所具有的低剖面、多极化、波束控制等优势, 综述了超表面作为主要辐射元件的天线设计。分析了超表面在不同天线设计方案中的工作原理、效能以及存在的优势与不足, 最后讨论了超表面卫星天线的发展方向, 指出超表面技术在卫星天线设计领域中具有实用价值。

**关键词:**卫星通信; 卫星天线; 超表面; 电磁调控

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码  
听独家语音释文  
与作者在线交流  
享本刊专属服务

中图分类号: TN828.5 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2024)03-0488-09

## Research Progress of Satellite Antenna Based on Metasurface: an Overview

HAN Leng, XIE Wenxuan, GONG Anmin, YANG Yufei

(School of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** Metasurface is a plane structure composed of sub-wavelength size units densely arranged, which has strong electromagnetic wave regulation capability. The new satellite antenna based on metasurface has great potential in alleviating the diversification of businesses and the surge of users. The authors introduce the current development trend of satellite antenna, divide metasurfaces into two categories, namely traditional antennas loaded with metasurface and pure metasurfaces, summarize the advantages of the antenna loaded with metasurfaces such as low profile, multi-polarization, beam control, and describe the antenna design of the metasurface acting as the main radiation element. They analyze the working principle, efficiency, advantages and disadvantages of metasurfaces in different antenna design schemes, and finally discuss the development direction of metasurface satellite antennas and point out that metasurface has practical value in the design of satellite antennas.

**Key words:** satellite communication; satellite antenna; metasurface; electromagnetic manipulation

### 0 引言

卫星具有通信覆盖面积大、通信频率资源丰富、通信链路建立迅速等优异特点<sup>[1]</sup>, 在国防军事、民用通信、航空海运等多方面均有应用。随着功能多元化、场景多样化, 卫星网络面临的高标准服务需求

以及用户容纳压力也随之增大。因此, 如何实现卫星无缝覆盖, 提高卫星通信容量, 已成为研究热点之一。

现有卫星天线主要使用反射面天线和相控阵天线, 前者存在着质量大、剖面高的问题, 后者存在馈

\* 收稿日期: 2022-12-25; 修回日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771490); 陕西省自然科学基金(2018JM6055)

通信作者: 韩冷 Email: 381278982@qq.com

电网络复杂、波束扫描窄、研制成本高等问题。超表面作为一种新型电磁人工二维材料, 具有天然介质所不具备的超常物理性质, 以其各向异性的特征提供了更多电磁波调控自由度, 正逐步成为目前多个交叉学科的研究热点和前沿。超表面理论基础最早由 Kuester 等人<sup>[2]</sup>提出, 美国空军于 2009 年在航空器上首次开展了关于超表面结构产生固定辐射场的探索, 而后 Minatti 等人<sup>[3]</sup>又开始对超表面波机理展开研究。2015 年, 欧洲航天局也对圆极化固定波束的星载超表面天线进行过研究<sup>[4]</sup>。近年来重点关注的是超表面反射和折射问题以及其对于天线阵列匹配、辐射、波束等调控。天线性能优劣直接影响着卫星通信系统的效能发挥, 因此有必要针对超表面在卫星天线中的应用进行梳理总结, 进而为下一步研究指明方向。

本文综述了超表面在卫星天线设计中的主要工作, 总结了单纯由超表面构成的辐射天线, 分析了超表面的工作原理, 讨论了目前超表面应用中的优势与不足, 最后展望了基于超表面的卫星天线应用方向, 以期为卫星通信设计提供参考。

## 1 卫星天线发展现状与趋势

卫星通信天线类型包括反射面天线、平板阵列天线和相控阵天线。如图 1(a) 所示, 反射面天线通常其口径效率可以达到 70% 以上<sup>[5]</sup>, 极化隔离度能达到 30 dB 以上, 具有增益大和成本低的特点。平板阵列天线如图 1(b) 所示, 通过调整子阵阵元数量和排布, 为平板阵列天线提供了设计自由度, 且其剖面可以低至 30 cm 以下<sup>[6]</sup>。相控阵天线剖面最低, 可小于 10 cm, 如图 1(c), 能解决移动载体颠簸情况下的对星问题。相较于机械跟踪, 其电扫面特性也使得天线波束扫描更快。

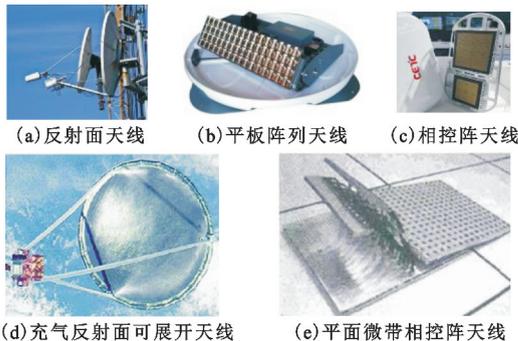


图 1 卫星天线

Fig. 1 Satellite antenna pictures

为满足百万公里以上的星地远距离通信, 要求卫星天线具有高增益特性。星载天线又可以分为反射面和相控阵两种类型<sup>[7-8]</sup>, 其中反射面天线由馈源和反射面组成。考虑有效载荷、运载火箭和轨道特点, 大口径反射面天线多为可展开天线, 如图 1(d) 所示, 具有增益高、收纳性强的特点。平面相控阵天线则更具轻量型、易共形的特点, 如图 1(e) 所示。

然而上述卫星天线均存在一定问题。一方面, 反射面天线口径大、剖面高, 需大体积机械结构在 3D 范围旋转天线主体以实现波束控制, 限制了其在空间局限载体中的应用。此外, 星载发射面天线如出现馈源位置失配的情况, 极易造成卫星通信链路的丢失。另一方面, 传统电子扫描相控阵需要高功耗有源射频网络, 存在天线馈电网络复杂、波束扫描宽度窄、研制成本高等问题。随着卫星业务拓展与天线技术不断发展, 特别是大容量宽带业务以及应急通信、移动通信方面的需求不断增加, 促使卫星天线向低剖面、多极化、多波束的方向发展。超表面以其平面结构、易共形、低成本等特点成为卫星天线的另一选择。

## 2 加载超表面的卫星天线

在卫星通信中, 天线需有高增益、宽频带等性能, 以满足远距离的星地通信需求。在传统研究中, 学者们通过增加介质板厚度、堆叠贴片、增大天线口径等方法设计高性能天线, 但这样做的缺点是会增加天线尺寸, 难以符合天线小型化、低剖面的要求。而平面结构的超表面正以其易共形、剖面低、成本低等优势成为学者们新的关注热点。因此, 学者们利用超表面设计卫星天线, 主要集中在对天线尺寸、多极化、波束控制等 3 个方面进行优化。

### 2.1 低剖面

天线的带宽和增益对于远距离通信和提高信息传输速率都很关键, 而在保证辐射性能的同时应满足低剖面的要求。研究表明, 在辐射天线上加载低剖面超表面可以有效拓宽通信频带。

Ta 等人<sup>[9]</sup>设计了单点馈电双截角方形圆极化贴片天线, 如图 2(a) 所示, 在贴片上方加载  $4 \times 4$  金属超表面后激发了表面波, 从而引入了额外谐振点和最小轴比点, 阻抗带宽提高为 44%, 而剖面仅为  $0.056\lambda_0$ 。在此基础上, Tran 等人<sup>[10]</sup>将所有辐射单元印刷在单层基板上, 降低了设计复杂度和成本, 如

图 2(b)所示,超表面作为次要辐射天线包围在圆极化贴片天线附近,表面波引起的谐振点使得天线阻抗带宽提高了 23%,轴比带宽提高了 19%,而天线剖面更是降低至  $0.05\lambda_0$ 。上述两种微带贴片天线在不外加介质板、空气层和金属柱的情况下拓宽了频带,均具有低剖面的优势。但是微带贴片天线等开放结构在高频段工作时具有较高的传播损耗,影响了天线辐射效能,需要进一步研究。

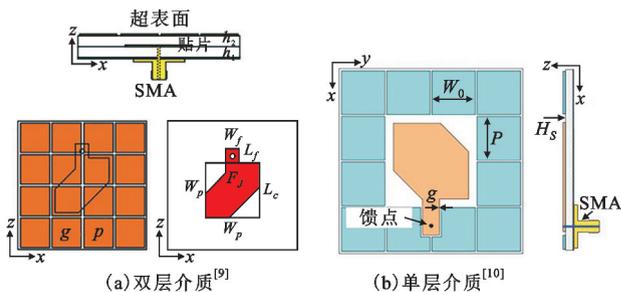


图 2 单馈电超表面天线

Fig. 2 Single feed metasurface antenna

此外,低剖面超表面还可以用于提高增益。Samantaray 等人<sup>[11]</sup>在 2021 年设计了一种更为复杂的基于超表面的低剖面高性能卫星天线,在带有 5 个矩形槽的缺陷地结构上放置切角辐射贴片天线与超表面天线。实验证明,辐射贴片内的开口环谐振器减小了交叉极化辐射的表面波,提高了增益。而在贴片周围均匀排布的超表面消除了不需要的镜面反射,与主辐射天线相互耦合,在辐射贴片与地表面的缝隙周围电场强度分布尤为强烈。加载超表面后,天线增益提高了近 4.5 dBi,而剖面仅为  $0.06\lambda_0$ 。

除此之外,超表面已被证实可以用于卫星有限载荷能力下的性能提升,最终构建点对点的星际通信网络<sup>[12]</sup>。Tubbal 等人<sup>[13]</sup>提出了一类加载超表面的高增益 S 频段立方体卫星天线。已知现有 S 频段平面立方体卫星天线在 2.45 GHz 的最高增益只有 5.96 dB,而  $7 \times 6$  的方环谐振超表面起到了一个辐射腔的作用,将后向辐射转而指向期望方向,提高了 3.15 dBi 的增益。在置于铝制立方体卫星基座后,总增益达到 9.71 dBi。Bakkali 等人<sup>[14]</sup>设计了对称的四缝隙共面波导馈电卫星天线,在 2.45 GHz 上达到了 10.7 dBi 的增益,但带宽由原来的 780 MHz 降低至 130 MHz。值得注意的是,其在工作频率上有  $133^\circ 56'$  的大波束宽度角,适用于低轨道立方体卫星通信。综上考虑到有效载荷以及火箭运力,加载有超表面的高增益卫星天线可以互相通信,建立蜂群以覆盖更多区域,增加与地面站的接触周期以扩

大通信窗长,从而更好效力于深空通信、微波遥感等领域<sup>[15]</sup>。

低剖面的天线性能对比如表 1 所示。

表 1 低剖面超表面天线性能对比  
Tab. 1 Performance comparison among low profile metasurface antennas

天线	尺寸/ $\lambda_0$	工作频率/GHz	阻抗带宽/%	增益/dBi	口径效率/%
文献[9]	$0.58 \times 0.58 \times 0.056$	4.70~7.48	45.60	10.00~10.60	>90.00
文献[10]	$0.60 \times 0.60 \times 0.05$	5.10~6.20	19.70	9.90	
文献[11]	$1.16 \times 1.82 \times 0.06$	9.03~9.60 11.23~14.52	4.02 28.24	10.66	67.00
文献[16]	$1.04 \times 1.04 \times 0.08$	4.46~5.20 4.55~4.98	15.40 9.10	11.42	97.46
文献[13]	$0.735 \times 0.735 \times 0.086$	2.45	55.90	12.71	
文献[14]		2.45	5.30	13.7	

注:文献[14]中未提供完整尺寸数据,故此项未列出。

## 2.2 多极化

极化转换是卫星天线所需具备的主要功能之一,是提高天线性能的重要保证。超表面天线按极化转换类型可以分为线极化转换为正交分量 (Linearly-polarized to Linearly-polarized, LTL)、左/右旋圆极化相互转换 (Circularly-polarized to Circularly-polarized, CTC) 和线极化转换为圆极化 (Linearly-polarized to Circularly-polarized, LTC) 3 种类型。学者通过引入各向异性超材料<sup>[17]</sup>和手性超材料,利用法拉第效应和双折射效应来实现极化偏转的功能<sup>[18-20]</sup>。为了表示极化转换的效率,引入参数极化转换率 (Polarization Convert Rate, PCR) 评估线极化的转换效率,其定义为

$$R_{pC} = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{xy}|^2 + |r_{xx}|^2} \quad (1)$$

式中:  $r_{xy} = \left| \frac{E_{rx}}{E_{ly}} \right|$  为交叉极化的反射系数;  $r_{xx} = \left| \frac{E_{rx}}{E_{lx}} \right|$  为主极化反射系数。可以看出,主极化的功率越低,超表面的转换效率 PCR 越高。通常,超表面卫星天线按技术类型分为反射型和透射型。

反射型超表面通常选用有高效转换效率的单元。非对称谐振器可以降低同极化反射,提高交叉极化反射。Ahmad 等人<sup>[21]</sup>设计了具有各向异性的 LTL 超表面单元,顶层超表面和底层金属地之间的反向电流产生了强磁场,而超表面起到了高阻抗表

面或人工磁导体的作用。其在 15.63~29 GHz 的频率范围内 PCR 大于 90%, 且有 40° 的入射角不敏感特性。2022 年, Shukoer 等人<sup>[22]</sup> 设计非对称宽度曲折性超表面, 在 18.31~38.95 GHz 实现了 LTL, 转换率超过 90%。而其曲线结构的不对称宽度和周期性有着抑制高入射角度对工作频段干扰的优势, TE 和 TM 分别有 43° 和 45° 的入射角稳定度。该紧凑、宽带、宽角度稳定性的超表面天线适用于卫星通信 K 和 KA 频段。长安大学 Jin 等人<sup>[23]</sup> 所设计的双 M 与十字结构的复合型超表面在 9.85~21 GHz 实现了 LTC。超表面单元上顶角处所产生的的缺口用于产生多个谐振点, 工作带宽为 72.29%, 能量转换为 98%, 在宽频带范围内实现了极化转换。然而, 其 PCR 仅有 50%, 转换效率不佳, 天线性能在 15° 内保持良好。

Quratulain 等人<sup>[24]</sup> 设计了一款非对称传输的手性超表面单元实现 LTL, 上下 90° 旋转的双层开口方环谐振器破坏了 Z 轴方向上的对称性, 引起了强电磁耦合, 从而提高了转换效率, 在工作频段内 PCR 大于 95%, 且存在 30° 的入射角不敏感性。武汉大学 Cheng 等人<sup>[25]</sup> 基于各项异性和类法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 腔提出了由亚波长金属光栅和双层分裂圆盘构成的 CTC 转换单元, 分别在 4.5 GHz 和 7.9 GHz 两个频点获得了超过 99% PCR。Zhang 等人<sup>[26]</sup> 将具有频率选择性表面的十字形复合材料应用于宽带 LTC 的设计中, 入射波从 z 轴方向照射在

该超表面上时, y 轴方向由于金属条的存在而呈感性, x 轴呈容性, 因而产生了不同的透射特性, 导致两坐标轴上透射波存在一定的相位差。同时, 设计的两种不同大小的十字形结构提高了相位调整的自由度。在入射角小于 20° 的范围内, 该超表面 PCR 约为 90%, 适用于不同卫星应用背景下的极化转换。

此外, 还可以利于超表面实现多功能极化转换。2020 年, 巴基斯坦国立科技大学 Ahmed 等人<sup>[27]</sup> 设计了开有缝隙的 45° 放置伞状超表面单元, 分别在 2 个频段和 3 个频段内完成了 LTL 和 CTC, 转换率均达到 90% 以上, 并且其单元性能在 45° 入射角范围内均保持稳定。次年, Muhammad 课题组<sup>[28]</sup> 又设计了镰刀型单元, 在三频段内均内完成 LTL 和 LTC, 转换率也达到了 90%, 入射角稳定则在 30° 范围内。多功能极化转换的超表面使得卫星天线更多功能性, 但通常工作频带较窄, 需要进一步设计解决。

从上述文献来看, 超表面极化转换主要源于电磁偶极子的耦合共振, 分析单元的表面电流能更好掌握设计原则。此外, 超表面所具备的偏振不敏感特性是其对称结构所决定的, 加之介电常数大、板薄的介质板都能提高入射角的稳定度。但追求高效率多功能极化转换的同时牺牲宽带能力, 最好的办法仍是合理设计金属片的结构。如何在高转换下获得更宽的频带以满足大容量卫星需求仍待进一步研究。

表 2 列出了目前部分极化转换超表面天线性能指标。

表 2 极化转换超表面天线  
Tab. 2 Polarization conversion metasurface antenna

技术类型	极化转换类型	天线	单元类型	工作频率/GHz	阻抗带宽/%	PCR/%	入射角稳定范围/(°)
反射型	LTL	文献[21]	H 型贴片	15.63~29		>90	40
		文献[22]	非对称宽度曲折线	18.31~38.95	72.1	90	43,45
	LTC	文献[23]	双 M 与十字复合结构	5.8~20.4	112	99.6	
透射型	LTL	文献[24]	双层开口方环谐振器	9.85~21.00	72.29	50	15
	CTC	文献[25]	双层圆盘分裂结构	4.5,7.9		>90	
	LTC	文献[26]	十字形复合材料	5.15~11.2	74	90	20

### 2.3 波束控制

移动载体要求天线能克服其行动、摇摆、颠簸等引起的位置和状态变化对于电磁波束指向的影响<sup>[29]</sup>, 而波束控制天线能为动中通卫星提供不间断连接, 解决共道干扰问题<sup>[30]</sup>, 保证了端到端无干扰、高质量、稳定的通信链路, 是学者们广泛研究的课题。一般用 3 dB 波束宽度作为指标表征天线多波束的能力。

传统反射面天线和相控阵天线分别存在着体积大和功耗大、成本高的问题, 在通信卫星实际应用中受到一定限制。为解决该问题, 受光学器件里斯利 (Risley) 棱镜的启发, Afzal 等人<sup>[31]</sup> 于 2017 年首次提出了新型的加载超表面波束控制方法 NFMS (Near-Field Meta-Steering)。旋转超表面 TM1 和 TM2 两块无源超表面置于基天线上方, 两块超表面的光束 OA 和 OB 倾角为固定值  $\delta_1$  和  $\delta_2$ , 通过独立

旋转与锯齿形时间延迟轴所成夹角  $\psi_1$  和  $\psi_2$ 。结合一阶近轴估计法和矢量加法,可得

$$\theta = \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + 2\delta_1\delta_2\cos(\psi_1 - \psi_2)} \quad (2)$$

$$\angle OC = \arctan \frac{\delta_j}{\delta_i} = \arctan \frac{\delta_1 \sin(\psi_1) + \delta_2 \sin(\psi_2)}{\delta_1 \cos(\psi_1) + \delta_2 \cos(\psi_2)} \quad (3)$$

$$\phi = \begin{cases} \angle OC, & \delta_i \geq 0, \delta_j \geq 0 \\ 180^\circ + \angle OC, & \delta_i < 0 \\ 360^\circ + \angle OC, & \delta_i \geq 0, \delta_j < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $OC$  为合成光束矢量;  $\delta_i$  和  $\delta_j$  为  $OC$  在  $i$  轴和  $j$  轴上的投影;  $\theta$  和  $\phi$  分别为整体天线的波束偏转的俯仰角和方位角。此外, Afzal 等人<sup>[32]</sup>指出,当具有相位延迟的波束照射在超表面时,需要先放置一块时域均衡超表面 TDEM 以产生均匀相位的定向波束。文献[32]提出的超表面谐振器天线的波束能够在顶角为  $102^\circ$  的锥形区域内偏转任意方向,增益变化均小于 3 dB。值得注意的是, NFMS 选用相位梯度超表面 PGM, 而其相位包裹和周期性都导致了所设计的天线具有较高的光栅型旁瓣,影响了主瓣方向上的性能。Singh 等人<sup>[33]</sup>设计了 4 款旋转对称的超表面单元,并对其在斜入射波下的性能进行了分析。结合粒子群算法对所选 4 层单元进行优化后,所设计的天线口径直径为  $7.3 \lambda_0$ ,能生成偏离主轴方向  $100^\circ$  的波束,且成功抑制了  $-32$  dB 以下的栅瓣,提高了天线性能。

2017 年,清华大学 Zhao 等人<sup>[34]</sup>设计了一款 X 频段的全金属波束扫描天线用于高功率微波应用,在喇叭馈源前放置两块由可变旋转交叉槽单元构成的超表面,通过 CTC 实现了相位变化,达成波束控制的目的。为满足覆盖  $180^\circ$  相移和高透射幅度两个条件,他们设计了 4 层金属片。又由于波导的存在,超表面天线失去了平面优势反而变得更加笨重,提高了制造复杂度和总体成本。此外,该全金属超表面通过圆极化转换实现相位变换,有限的带宽限制了其在卫星通信中的应用。针对该设计理念, Ahmed 等人<sup>[35]</sup>于 2022 年提出了全新的耶路撒冷型窄槽全金属超表面 MM 替代原有的介质板,在喇叭馈源上方放置两块 4 层全金属超表面,实现了  $76^\circ \sim 84^\circ$  的大顶角波束控制。无需任何机械支撑结构或介质基板,其机械鲁棒性降低了设计复杂度与生产成本,这是 NFMS 超表面天线往低成本、轻量化通信应用的重大进步。

综上, NFMS 通过同步或独立旋转近场相位变换超表面,可以实现俯仰角和方位角独立的波束扫描。区别于传统卫星天线, NFMS 超表面天线无需有源射频网络,降低了天线设计的复杂度与成本;在 2D 平面内旋转超表面实现波偏转功能而无需移动基天线等特点都使 NFMS 在空间有限的通信卫星中极具设计优势。但如何抑制由上层超表面旋转带来的高副瓣,确保天线在主瓣方向上的高性能仍需进一步研究。

表 3 对比了 NFMS 超表面天线性能指标。

表 3 NFMS 超表面天线性能

Tab. 3 Performance analysis of NFMS metasurface antenna

天线	超表面层	口径大小/ $\lambda_0$	剖面高度/ $\lambda_0$	超表面与基天线距离/ $\lambda_0$	峰值增益/dBi	3 dB 增益变化角度范围/ $(^\circ)$	副瓣
文献[31]	TDEM/TM1/TM2				19.4	102	高
文献[33]	PGM1/PGM2	7.3		1	24.9	100	低
文献[34]	Lens1/Lens2	7.975	8.125	0.65			高
文献[35]	MM1/MM2	6	4.9	0.04	16.0	76~84	中

### 3 基于辐射超表面的卫星天线

超表面除了加载在原基天线上用于提高天线的增益、带宽等性能,学者们还设计了单纯由超表面构成的辐射天线。本节主要介绍两种不同馈电方式的超表面天线以及新型全息液晶结构超表面。

#### 3.1 基片集成波导馈电

基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)以其准闭合的结构特点,能有效降低天线表面波损耗并将能量限制在某一特定区域<sup>[36]</sup>,在高增益的前提下具有较低剖面。由此,学者们针对 SIW 馈

电的超表面天线展开了大量研究。

新加坡国立大学 Li 等人<sup>[37]</sup>提出了一种用于宽带工作的垂直极化 SIW 馈电端射超表面天线阵列,单层介质基板的正反两面印刷有  $3 \times 3$  的矩形贴片且厚度仅为  $0.16 \lambda_0$ ,在 SIW 和超表面之间引入叉指条以提供稳定的电流耦合。通过研究超表面的传播模式,利用特征模分析法发现,超表面作为主要辐射天线起着多模辐射器的作用,拓宽了天线阻抗频带,达到 37%。

中国船舶重工集团公司第七二三研究所 Xu 等人<sup>[38]</sup>提出了一个工作在 Ka 频段的宽频带高增益

1×8 端射超表面天线阵列, 通过一个集成波导 T 型结和两个集成波导 Y 型结组阵, 取消了 SIW 和超表面间的贴片, 同时延长了介质板, 没有扩大超表面面积, 提高增益至 11.8~17.3 dBi。同年, 该课题组深入比较了单层和双层端射 SIW 超表面的性能, 在端射处加载了另一个较小尺寸的 3×3 超表面, 构成了双层超表面天线, 比单层的辐射方向图更集中, 增益提高超过 1.6 dBi。

2021 年, 空军工程大学 Bai 等人<sup>[40]</sup>对 SIW 超表面天线增益进行了针对性研究。首先, 他们在 SIW 馈电上蚀刻 C 字缝隙, 改变了腔体工作模式, 激发新的谐振点, 降低了截止频率, 提高了工作带宽。其次, 在天线主体两侧加入两排 L 形金属通孔, 限制

能量传播, 降低旁瓣和后瓣电平。最终, 该 X 频段卫星端射超表面天线前后辐射比得到了改善, 最大增益为 14.9 dBi, 阻抗带宽为 54%, 剖面仅为  $0.06\lambda_0$ , 性能优异。

为了提高卫星天线的带宽和增益, 主要依靠选择合适的辐射结构和低损耗传输线。基片集成波导是一种与平面印刷天线集成的低损耗馈线, 电磁波也更容易从开放的传输线中辐射出去。此外, 端射超表面天线具有工作频带宽、方向性高等优良特性。因此, SIW 端射超表面天线结合了微带贴片和金属波导的优势, 一定程度上解决了传播带宽窄和增益低的问题, 在卫星和无线通信系统中具有重要的应用价值。

表 4 比较了不同 SIW 超表面天线性能指标。

表 4 SIW 超表面天线性能  
Tab. 4 Performance analysis of SIW metasurface antenna

类型	天线	尺寸/ $\lambda_0$	阻抗带宽	增益/dBi
加载耦合馈电叉指条	文献[37]	4.35×3.05×0.16	37% (26.6~38.7 GHz)	9.1~13.8
延长基板	文献[38]		25.0~39.5 GHz	11.8~17.3
加载双层超表面	文献[39]		28~37 GHz	12.0~18.1
蚀刻 C 缝隙 & 双排 L 金属通孔	文献[40]	7.33×3.82×0.06	54% (7.50~13.05 GHz)	14.9

### 3.2 缝隙耦合馈电

华南理工大学 Yang 等人<sup>[41]</sup>提出了具有可控馈电机制的新型双波束超表面天线, 底层由阶梯阻抗线构成了一个对称的二端口可控馈电网络, 通过中间层的哑铃缝隙耦合能量激发最上层串联电容加载的周期矩形片超表面。馈线长度和耦合槽间距构成了调整能量幅度和相位的两个自由度, 构成的超表面天线在  $\pm 30^\circ$  方向形成 15 dB 以下的高隔离双波束, 峰值增益达到 12.8 dBi。区别于传统行波缝隙激励天线, 该天线仅需  $0.05\lambda_0$  的剖面, 针对卫星基站天线有潜在应用, 易扩展至更高增益的多波束阵列。

2021 年, Gu 等人<sup>[42]</sup>通过双频段双波束控制法, 利用方环谐振器分别设计了高增益和紧凑型双频段双波束控制超表面, 通过调整缝隙宽度降低高增益

型的第一旁瓣电平, 两波束分别下降至 2.5 dB 和 7 dB。又通过减小缝隙槽和超表面单元, 在馈线上增加短截线, 使得隔离度提高了 3.5 dB。同年, 该课题组为消除长线效应带来的影响, 利用四端口交叉馈电网络设计了  $\pm 45^\circ$  双极化双波束超表面天线, 生成的稳定波束随频率变化小于  $6^\circ$ , 而传统阵列变化范围在  $19^\circ$  左右。

由上述文献可知, 无需复杂的波束赋形网络或移相器, 将行波激励的原理与高性能多波束超表面天线相结合, 可以利用空间分集, 在不占用额外频率资源的基础上控制各单元的幅度和相位, 生成可控多频段多波束, 以达成全覆盖提高卫星通信容量, 而基站天线也可以在链路效果差时顺利切换至更优路径的能力以保障通信的顺利进行。

表 5 列出了本节所述天线性能指标。

表 5 天线性能分析  
Tab. 5 Antenna performance analysis

类型	天线	尺寸/ $\lambda_0$	阻抗带宽	天线效率/%	增益/dBi
双波束超表面天线	文献[41]	1.3×1.85×0.06	11.9%	93	10.4~12.3
高增益双频段双波束控制超表面	文献[42]	0.75×2.22×0.05	3.3~3.5 GHz; 4.8~5.0 GHz		10, 12.5
紧凑型双频段双波束控制超表面		0.72×1.12×0.05	3.3~3.6 GHz; 4.8~5.0 GHz		8.2, 8.9
$\pm 45^\circ$ 双极化双波束串联馈电超表面天线	文献[43]	0.75×2.5×0.05	10%		10

### 3.3 全息液晶结构超表面

作为一种漏波天线,全息可重构超表面天线(Reconfigurable Holographic Surface, RHS)给卫星通信提供了新的发展方案。在微波领域中,亚波长结构的超表面单元同光学中的感光材料一般,按照全息图案的幅度和相位调节各超表面单元,最后在期望方向上叠加形成波束。其中全息图案是由参考波和物波相干涉而形成的,如图 3(a)所示。2017 年, Kymeta 公司基于超材料技术推出了全球首款用于卫星通信的商用平板电子扫描天线<sup>[44]</sup>。该天线不包含机械运动部件,通过高双折射液晶实现电子扫描,实现了 75°以上的大角度波束扫描以及每秒 30°的快速跟踪能力,功耗仅有 30 W,却能提供高达 10 Mb/s 通信所需的带宽。图 3(b)所示越野车上端为 Kymeta 设计的 70 cm 天线集成终端,可以在移动载体上实现高通量卫星通信。2019 年,该公司 Mehdi pour 等人<sup>[45]</sup>提出了广角阻抗匹配的超表面结构,如图 3(c)所示,在 Ku 频段上对传输和接收端的卫星天线水平和垂直极化下分别提供了 5 dB 和 3 dB 的增益改善。2020 年,台湾群创公司同 Kymeta 再推出液晶超表面平板卫星天线,无需马达装置就能追踪卫星,在功耗低的同时具有宽带、高指向性、大角度扫描、剖面低等优异性能,迎着 5G 时代,迎合未来低轨道卫星通信的发展。同年,英国 Yurduseven 等人<sup>[46]</sup>提出了 X 频段的全息波束超表面天线,将其运用于 1U 立方体卫星上进行全波仿真,获得了 15.5 dBi,口径效率为 41%,如图 3(d)所示。

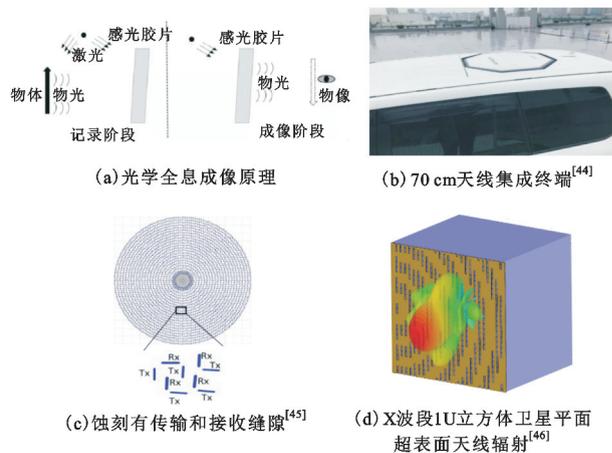


图 3 全息可重构超表面天线

Fig. 3 Holographic reconfigurable metasurface antenna

有别于传统卫星天线,例如 NASA 的可折叠平

面反射阵天线 MarCO<sup>[47]</sup>和 JPL 设计的 ISARA<sup>[48]</sup>,全息可重构超表面天线具有以下 3 点优势:

一是 RHS 的馈源位于印制电路板上,无需添置额外链路,规避了繁杂的馈源部署机制。

二是有效利用了超表面单元小体积的优势,减轻了耦合带来的不良影响,更具波束成形的能力。

三是在同一物理孔径上交错放置收发元件并独立控制,为移动载体或固定设施上的宽带互联网连接提供了高可靠性、低功耗和高数据吞吐量。

## 4 结束语

本文介绍的加载超表面的卫星天线具有低剖面、多极化、波束控制的优势,符合目前发展趋势与设计要。由于结构简单和超强的电磁波调控能力,超表面在卫星天线设计中有着广阔的应用前景,譬如通过卫星通信解决飞机航行期间与运营商的高宽带数据连接,满足商业海事市场对移动卫星通信服务的激增需求,以及各国之间货运、铁路等的互联网接入和远程信息处理。

超表面在卫星天线中的应用已有一定的进展,但针对性能提高和实际需求仍有研究空间。关于星载可折叠超表面天线存在问题,随着平面反射阵天线于立方体卫星上在轨实验成功<sup>[47-48]</sup>,超表面解决了馈源失配带来的断链问题,但是铰链折叠处的不平整度影响的天线性能仍有待研究。关于实际应用问题,可根据需求设计有源可重构天线,提高现役基站天线和在轨星载天线的适应能力。

## 参考文献:

- [1] 易克初,李怡,孙晨华,等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报,2015,36(6):161-176.
- [2] KUESTER E F, MOHAMED M A, PIKET-MAY M, et al. Averaged transition conditions for electromagnetic fields at a metamaterial[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(10):2641-2651.
- [3] MINATTI G, SABBADINI M, MACI S. Surface to leaky wave transformation in polarized metasurfaces [C]// Proceedings of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory. Hiroshima:IEEE, 2013:298-301.
- [4] MINATTI G, FAENZI M, MARTINI E, et al. Modulated metasurface antennas for space: synthesis, analysis and realizations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4):1288-1300.
- [5] 项阳,施伟,杨华,等. Ku 频段低剖面“动中通”卫星天线技术综述[J]. 军事通信技术,2014,35(3):34-39.
- [6] 伍金霄. 应用于卫星通信系统的高增益双极化平板

- 天线[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [ 7 ] 段浩, 蒲理华, 武永美, 等. 大型环形可展开天线型面高精度测试方法研究[J]. 空间电子技术, 2022, 19(6): 107-114.
- [ 8 ] MA X, LI T, MA J, et al. Recent advances in space-deployable structures in china[J]. Engineering, 2022, 17: 207-219.
- [ 9 ] TA S X, PARK I. Low-profile broadband circularly polarized patch antenna using metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5929-5934.
- [10] TRAN H H, HUSSAIN N, LE T T. Single - layer low - profile wideband circularly polarized patch antenna surrounded by periodic metallic plates[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(12): e2196901-e2196909.
- [11] SAMANTARAY D, BHATTACHARYYA S. A metasurface based gain enhanced dual band patch antenna using SRRs with defected ground structure[J]. Radio Science, 2021, 56(2): 1-13.
- [12] PEREZ G E. Enhancement of beamforming antenna array using a CSRR metasurface for satellite applications [C]//Proceedings of 2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. Oxford: IEEE, 2015: 253-255.
- [13] TUBBAL F, RAAD R, CHIN K W, et al. A high gain S-band slot antenna with MSS for CubeSat[J]. Annals of Telecommunications, 2019, 74(3/4): 223-237.
- [14] EL BAKKALI M, TUBBAL F, RAAD R, et al. A novel high gain CPW-feed circular slot antenna with MSS for 3U CubeSats [C]//Proceedings of 2020 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications. Bandung: IEEE, 2020: 1-5.
- [15] 王建晓, 尚社, 宋大伟, 等. 用于立方体卫星的高增益天线技术与发展趋势[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 1-12.
- [16] WU T, WANG W, ZHANG Z, et al. Multi-mode substrate integrated waveguide broadband circularly polarized antenna array based on metasurface[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(12): 1-9.
- [17] LIN B, WANG B, MENG W, et al. Dual-band high-efficiency polarization converter using an anisotropic metasurface[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(18): 18310301-18310306.
- [18] BU T, CHEN K, LIU H, et al. Location-dependent metamaterials in terahertz range for reconfiguration purposes[J]. Photonics Research, 2016, 4(3): 122-125.
- [19] YIN J Y, WAN X, ZHANG Q, et al. Ultra wideband polarization-selective conversions of electromagnetic waves by metasurface under large-range incident angles [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-10.
- [20] XU H X, WANG G M, QI M Q, et al. Compact dual-band circular polarizer using twisted Hilbert-shaped chiral metamaterial[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24912-24921.
- [21] AHMAD T, RAHIM A A, MUHAMMAD HASAN BILAL R, et al. Highly efficient, ultra-broadband and wide-angle cross polarization converter based on anisotropic metasurface[C]//Proceedings of 2021 1st International Conference on Microwave, Antennas and Circuits. Islamabad: IEEE, 2021: 1-4.
- [22] SHUKOOR M A, DEY S, KOUL S K. Broadband chiral-type linear to linear reflecting polarizer with minimal bandwidth reduction at higher oblique angles for satellite applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(7): 5614-5622.
- [23] JIN Z, ZHANG J, ZHANG X, et al. Design of reflective broadband linear-to-circular polarization conversion metasurface[C]//Proceedings of 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology. Hangzhou: IEEE, 2022: 52-55.
- [24] QURATULAIN, SHOAB N. Broadband cross polarization conversion for linear transmission via bilayered chiral metasurface[C]//Proceedings of 2021 1st International Conference on Microwave, Antennas and Circuits. Islamabad: IEEE, 2021: 1-4.
- [25] CHENG Y, FAN J, LUO H, et al. Dual-band and high-efficiency circular polarization convertor based on anisotropic metamaterial [J]. IEEE Access, 2020, 8: 7615-7621.
- [26] ZHANG W, LI J Y, XIE J. A broadband circular polarizer based on cross-shaped composite frequency selective surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5623-5627.
- [27] AHMED F, AITBAR I, SHAH S M Q A, et al. A wide-band metasurface with wide angle polarization conversion [C]//Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal: IEEE, 2020: 879-880.
- [28] MUHAMMAD Q A S S, AHMED F, SHOAB N, et al. An angularly stable anisotropic metasurface for polarization conversion applications [C]//Proceedings of 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation. Dusseldorf: IEEE, 2021: 1-4.
- [29] 吴姣. 车载卫星通信天线控制的关键技术[J]. 河北省科学院学报, 2020, 37(1): 36-40.
- [30] MAJUMDER B, MUKHERJEE J, KRISHNAMOORTHY K, et al. A novel beam steering dipole antenna using phase varying metasurface as reflector[C]//Proceedings

- of 2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations and Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications. Bangalore: IEEE, 2017:1-4.
- [31] AFZAL M U, ESSELLE K P. Steering the beam of medium-to-high gain antennas using near-field phase transformation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4):1680-1690.
- [32] AFZAL M U, ESSELLE K P. Application of near-field phase transformation to steer the beam of high-gain antennas in two dimensions[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego: IEEE, 2017:1947-1948.
- [33] SINGH K, AFZAL M U, ESSELLE K P. Designing efficient phase-gradient metasurfaces for near-field meta-steering systems[J]. IEEE Access, 2021, 9:109080-109093.
- [34] ZHAO X, YUAN C, LIU L, et al. All-metal beam steering lens antenna for high power microwave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12):7340-7344.
- [35] AHMED F, AFZAL M U, HAYAT T, et al. A near-field meta-steering antenna system with fully metallic metasurfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11):10062-10075.
- [36] MOSCATO S, TOMASSONI C, BOZZI M, et al. Quarter-mode cavity filters in substrate integrated waveguide technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(8):2538-2547.
- [37] LI T, CHEN Z N. Wideband substrate-integrated waveguide-fed endfire metasurface antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12):7032-7040.
- [38] XU K, LI X, ZHANG Z, et al. End-fire substrate extended metasurface antenna array for mm-Wave applications[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Guangzhou: IEEE, 2019:1-3.
- [39] TAO J, LI X, LI Y, et al. SIW-fed double layer end-fire metasurface antenna array with improved gain[C]//Proceedings of 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Taiyuan: IEEE, 2019:1-3.
- [40] BAI H, WANG G, ZOU X. Broadband substrate integrated waveguide feed endfire metasurface antenna array with gain enhancement[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2021, 31(4):1-11.
- [41] YANG W, GU L, CHE W, et al. A novel steerable dual-beam metasurface antenna based on controllable feeding mechanism[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2):784-793.
- [42] GU L, YANG W, XUE Q, et al. A dual-band steerable dual-beam metasurface antenna based on common feeding network[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10):6340-6350.
- [43] GU L, YANG W, XUE Q, et al. A  $\pm 45^\circ$  dual-polarized dual-beam series-fed metasurface antenna array with stable beam angle[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(12):8366-8375.
- [44] STEVENSON R A, FOTHERINGHAM D, FREEMAN T, et al. High-throughput satellite connectivity for the constant contact vehicle[C]//Proceedings of 2018 48th European Microwave Conference. Madrid: IEEE, 2018:316-319.
- [45] MEHDIPOUR A, SAZEGAR M, STEVENSON R. Broadband WAIM metasurface structure for electronically beam scanning holographic antenna for Ku-band satellite communications[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta: IEEE, 2019:429-430.
- [46] YURDUSEVEN O, PODILCHAK S, KHALILY M. Towards holographic beam-forming metasurface technology for next generation cubesats[C]//Proceedings of 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies. Glasgow: IEEE, 2020:1-4.
- [47] HODGES R E, CHAHAT N, HOPPE D J, et al. A deployable high-gain antenna bound for Mars: developing a new folded-panel reflectarray for the first CubeSat mission to Mars. [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(2):39-49.
- [48] HODGES R E, RADWAY M J, TOORIAN A, et al. ISARA-integrated solar array and reflectarray CubeSat deployable Ka-band antenna[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Vancouver: IEEE, 2015:2141-2142.

### 作者简介:

韩冷女, 2000年生于安徽宣城, 2022年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为新型天线设计。

谢文宣女, 1982年生于陕西西安, 2014年获硕士学位, 现为副教授, 主要研究方向为信息与通信系统。

龚安民男, 1991年出生于河南邓州, 2019年获博士学位, 现为副教授, 主要研究方向为通信信号处理。

杨于飞男, 1997年出生于辽宁鞍山, 2020年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为新型天线设计。