微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022021702

光控相控阵天线在卫星通信领域的应用前景

郑　伟*，杨文丽，万继响，吴春邦

（中国空间技术研究院西安分院 空间天线技术研究所，西安 710100）

摘　要： 简要回顾了光控相控阵天线的发展历程，介绍了光控相控阵天线的工作原理，探讨了光控相控阵天线在卫星载荷领域的应用优势。指出高通量卫星超宽带应用和多功能载荷多频段应用是卫星通信的发展趋势之一，光控相控阵天线在大口径、超宽带、宽角扫描方面的应用优势明显。

关键词： 光控；相控阵天线；卫星通信；应用前景

中图分类号： TN927.2　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0089－06

Application Prospects of Optically Controlled Phased-array Antenna in Satellite Communication

ZHENG Wei, YANG Wenli, WAN Jixiang, WU Chunbang

(Institute of Space Antenna of China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, CHN)

Abstract: The development of optically controlled phased array antenna is reviewed briefly, the working principles of optically controlled phased array antenna are introduced, and the advantages of optically controlled phased array antenna in satellite payload are discussed. It is pointed out that the application of high throughput satellite ultra-wideband and multi-function load multi-band is one of the development trends of satellite communication, and the optically controlled phased-array antenna has obvious advantages in the application of large aperture, ultra-wideband and wide angle scanning.

Key words: optically controlled; phased-array antenna; satellite communication; application prospect

0　引言

卫星通信是重要的现代化通信手段，在国家军事、经济建设等方面发挥着越来越重要的作用。随着卫星通信技术的不断发展以及用户通信对卫星性能依赖的不断提升，星载天线的大通信容量、高机动、宽覆盖、多用户等需求日益突显。相控阵天线自20世纪70年代开始使用以来，以其独特的优势在雷达领域处于非常重要的地位。相控阵天线无机械运动的转向、高的二维扫描灵活性、准确的波束指向，以及实现低的空间旁瓣所需的精密相位和幅度控制等优点使其在天线领域得到广泛应用。

为满足未来高速传输多种数据、快速机动通信、多功能服务等用户需求，卫星系统要具有更宽的射频带宽、更强的波束机动性和更高的融合度。而提高天线的有效工作射频带宽是提高卫星通信容量的重要途径之一。传统的相控阵天线具备灵活的波束机动性和高可靠性，但微波移相器的相移量通常不随频率变化，或者说相移量与频率不具备线性关系，因此信号频率的变化将引起天线波束的指向发生偏斜，这种“孔径效应”严重制约了相控阵天线的工作带宽[1]。为了获得更宽的工作带宽，相控阵天线需要采取基于真延时机制的延迟器件代替传统的移相器。

光控波束形成技术采用光纤或光波导作为传输线，具有频带宽、损耗低、体积小、抗电磁干扰、无电磁泄漏和保密性好等特点[1]，其技术核心是通过有

收稿日期：2022－02－14.

基金项目：国家自然科学基金项目(61701412,61627817).

*通信作者：郑　伟　E-mail：zhidaoyuan@163.com

序的光子真延迟控制实现波束扫描，优势在于能有效克服相控阵天线系统的孔径效应等瓶颈，有效利用相控阵系统的工作带宽。随着天线技术的发展，传统的微波器件在相控阵天线的发展中遇到越来越多的瓶颈。Campany 等[2]提出将光子技术与微波技术相结合，实现优势互补，形成了微波光子技术，在未来卫星载荷相控阵天线领域具有较好的应用前景。

1 发展历程

国外对光控天线的研究已经历了 20 余年的时间，从 20 世纪 80 年代至今，美国军方一直重视光电子技术在微波领域的应用，并专项专款长期支持光控相控阵天线及相关微波光子器件的研究和开发。经过国际上各大公司、研究所、高校 20 余年的联合努力，光控相控阵天线取得丰硕的研究成果。目前第一代和第二代光控相控阵天线地面和机载应用研究已进入工程化，第三代光控相控阵天线正进行实验室研究，星载应用研究即将步入飞行试验阶段。除美国外，其他国家也在积极开展有关光控相控阵天线研究。

1.1 第一代光控相控阵天线

1985 年，ITT 的 Gardone 在实验室搭建了产生 3 波束的光控相控阵系统[3]，给出了光控阵的设计思想及实验系统图。1994 年，Westinghouse 的 Akis Goutzoulis 等演示并测试了 16 单元、发射频率为 0.35～2.1 GHz 的 6 bit WDMTTD(波分复用实时延迟)系统[4]，用这种结构紧凑的系统在 TTD (True Time Delay) ± 45° 的扫描范围内获得了 0.6～1.5 GHz 稳定无偏斜的天线方向图。

第一代光控相控阵天线主要研究光控相控阵的设计思想、技术可行性以及样机测试情况，验证光控波束形成原理，确定光控相控阵天线的关键技术和设计方法。

1.2 第二代光控相控阵天线

1996 年以后，光控相控阵天线主要开展面向应用的研究。1999 年美国提出了 EHF 频段通信卫星光控相控阵天线设计，卫星采用光控波束形成网络，有效增加了天线带宽，提高了卫星的通信容量。欧洲以射电天线应用为背景开展了光控相控阵天线研究[5]，2012 年完成的光控相控阵天线样机在 1.1～1.5 G 扫描 23.5° 的情况下有效避免了传统相控阵天线的“孔径效应”。

第二代光控相控阵天线完成了光控相控阵天线的二维扫描能力验证，掌握了可变光延时、多光束集成探测等基于光控波束形成的多波束相控阵天线关键技术，将光控相控阵天线推向实用阶段。

1.3 第三代光控相控阵天线

随着单片微波集成电路(MMIC)技术的不断发展，现有光器件在体积、重量、成本等方面的不足愈发明显。面对系统多功能混合集成的发展趋势，光控相控阵天线必须要在集成光波导上实现突破。

2010 年，欧洲采用对硅基氮化硅波导微环的慢光可调谐延时开展了波束形成网络研究，其特殊的波导材料和结构克服了高密度集成和损耗的瓶颈，成功研制了多种不同规模的片上光波束形成网络。2014 年，欧洲在基于氮化硅波导材料和结构技术的基础上进一步研究混合集成技术，即通过该技术完善无源光子系统，通过集成阵列化的射频光调制芯片完成了片上的电光转换功能与无源光学波束网络系统的集成化，初步形成了有源无源混合集成光学芯片。2018 年，Duarte 等完成了光控相控阵天线射频入射频出的全光芯片的研制[6]和演示验证。

第三代光控相控阵天线实现了光控相控阵天线高集成度设计和验证，需要突破有源无源芯片级集成设计和工艺，实现光控相控阵天线的微波光子高密度集成。

2 工作原理

相控阵天线通过控制阵列天线中辐射单元的馈电相位来改变方向图形状。控制相位可以改变天线方向图最大值的指向，以达到波束扫描的目的。

相对于远场目标，天线阵面在相应扫描角度的辐射或来波等效于平面波。当相控阵天线波束扫描时，如图 1 所示，单元到达等相位面存在空间光程差，传统的相控阵天线采用相位差来补偿空间光程差。设阵元间隔为 d，阵元数为 N，微波频率为 f，当天线主瓣波束指向 θ 方向时，辐射方向或来波方向相邻单元之间需要补充的相位差为

$$\phi = \beta d \sin\theta \tag{1}$$

其中，β 为电磁波在媒质中传播的相位常数：

$$\beta = 2\pi/\lambda \tag{2}$$

其中，λ 为电磁波在媒质中的波长，在真空中：

$$\beta = 2\pi f/c \tag{3}$$

其中，c 为光速。

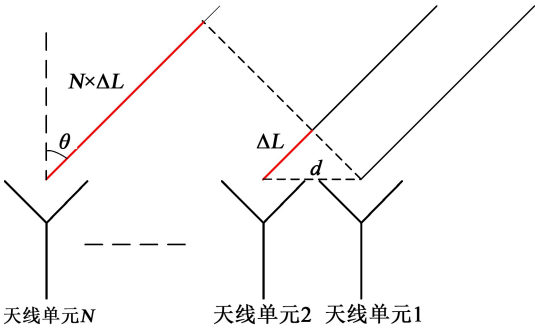

图 1　相控阵天线扫描原理图

当微波频率 f 为一固定频率 f_0 时，相邻单元固定的相移 ϕ 可以补偿辐射方向或来波方向的空间光程差，但当信号宽带为 $2\Delta f$ 时，若仍保持 ϕ 为常数，则：

$$(f_0-\Delta f)\sin\theta_L=(f_0+\Delta f)\sin\theta_H \tag{4}$$

其中，θ_L 为低频点波束指向，θ_H 为高频点波束指向。

由式(4)可以看出，在相控阵天线使用带宽内，不同频率的波束指向不同。相控阵天线在一定的频带宽度内波束指向相对于中心频点发生偏斜，频带越宽波束偏斜得越严重，如图 2 所示。

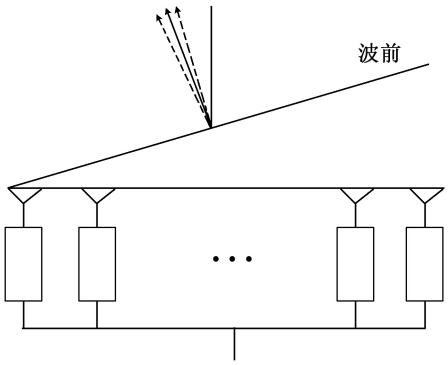

图 2　天线阵波束指向偏斜示意图

图 3 给出了不同扫描角度波束指向偏斜随频带宽度变化情况的仿真结果。

若引入光实时延技术，当天线主瓣波束指向 θ 方向时，两个相邻单元之间需要补偿的光程为

$$\Delta L=d\sin\theta \tag{5}$$

对于第 n 阵元引入时延 τ_n，则：

$$\tau_n=\frac{nd\sin\theta}{c} \tag{6}$$

光控相控阵天线通过时延补偿满足相控阵天线扫描引起的光程差，采用可变光波束形成网络实现每个单元在目标角度的等光程辐射。根据式(6)，只要相控阵天线单元间距 d 和扫描角度 θ 确定，阵中单元需要补偿的光程差即确定，光控波束形成网络需要给相应单元提供的光时延也就确定。光控相控阵天线采用光实时延技术补偿相控阵天线扫描产生的空间光程差，扫描过程中不管微波频率如何变化，天线主瓣波束总能指向 θ 方向。

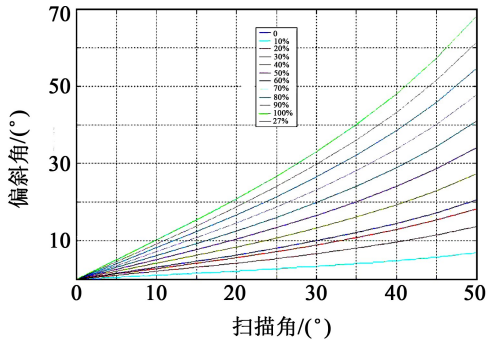

图 3　频率偏斜现象仿真结果

相控阵天线阵元提供光实时延(Optical True Time Delay，OTTD)是高性能相控阵天线系统无偏斜、宽带设计的关键，因为只有用 OTTD 技术，才能实现相控阵天线与频率无关的有效单元矢量累加(在接收模中)或分配(在发射模中)。因此现代高性能天线需采用光控相控阵技术和单元单片收/发(R/T)组件构成的光控相控阵天线。光控相控阵天线采用实时延技术需解决的主要问题包括时延范围、时延步长以及延迟精度，在实现这些指标的基础上，还需减小光链路损耗、缩短延时器开关切换时间。

光控波束形成天线原理框图如图 4 所示。

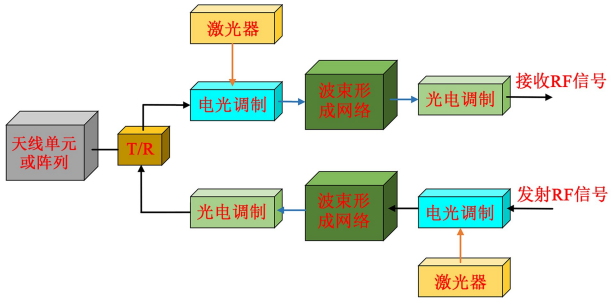

图 4　光控波束形成天线原理框图

光控相控阵天线由天线阵面、T/R 组件、电光调制器、收/发光控波束形成网络、光电解调器以及波控机组成，可以实现多波束收发功能。发射状态：射频信号(可以来自同一信号也可以是不同信号)通过电光调制器对激光器发出的光信号进行强度调制，得到调制的光波信号，再经发射光控波束形成网络进行波束形成；到达光电探测器将光信号转换成

射频信号，经放大后通过辐射单元发射射频(RF)信号；接收状态：天线单元接收到的射频信号经过低噪声放大器放大后通过电光调制器对激光器发出的光信号进行强度调制，得到调制的光波信号，再经接收光控波束形成网络进行波束形成，到达光电探测器将光信号转换成射频信号进入接收机[7]。其中发射光控波束形成网络和接收光控波束形成网络是一样的，只是用途不同，其内部采用可变延时器和固定延时器实现可动波束和固定波束。

3 星载应用

尽管传统的相控阵天线具备灵活的波束机动性和高可靠性，但微波移相器的相移量通常不随频率变化，或者说相移量与频率不具备线性关系，因此信号频率的变化将引起天线波束的指向发生偏斜，这种“孔径效应”严重制约了相控阵天线的工作带宽。为了获得更宽的工作带宽，需要采取基于真延时机制的延迟器件代替传统的移相器进行移相。

基于光控波束形成技术实现的波束形成网络称为光控波束形成网络，采用光控波束形成网络的相控阵天线称为光控相控阵天线。光控相控阵天线通过引入光实时延迟线(OTTD)，避免了传统相控阵天线因“渡越时间”和“孔径效应”对信号瞬时带宽的限制，可以满足大口径相控阵天线的宽带宽角扫描应用。另外，光纤传输具有低损耗、宽频带、抗干扰等固有优点，可以提高天线和波束形成网络的传输距离和传输性能。基于光控波束形成网络技术的天线将是未来星载天线技术发展的一个重要方向。

随着地面用户需求的增加和卫星通信能力的提升，星载大孔径阵列天线和大孔径相控阵天线逐渐增多，“渡越时间”同样制约了阵列相控阵天线的工作带宽，当宽带相控阵天线孔径渡越时间大于信号带宽的倒数时，阵列两端天线单元信号不能同时相加，需要对相控阵天线单元或子阵后端接开关控制的无色散延迟线实现信号同步。同时，大孔径相控阵天线扫描存在物理尺寸的过周期现象，大规模阵列相干合成同样需要天线单元或子阵采用大比特延迟线进行补偿。

车、船和飞机等用户对卫星通信的需求不断增加，需要传送的业务类型多，包括语音、图像、数据等多种信息，大容量是通信卫星需要解决的问题。星载通信领域工作的频段越高所获取的有效带宽越大，传输的信息越多，现阶段通信卫星载荷工作在Ka甚至更高的工作频段，并且要求星载有效载荷具有较宽的带宽。随着地面用户数量的不断增长，对通信容量的需求也不断增加，需要未来通信卫星具有更宽的射频带宽、更多的波束、更强的波束机动性。多波束天线可以通过频率复用成倍地提高通信容量，使得宝贵的频谱资源得以有效利用。在相同的服务区范围内，采用多波束代替一个波束覆盖，可以收窄单个波束，提高覆盖范围内的波束增益，使地面站的设备小型化；同时，波束还可根据需要进行扫描，从而提高系统灵活性。提高天线的有效工作射频带宽并采用多波束天线技术是未来高通量卫星发展的重要途径，采用多波束相控阵天线技术是满足多波束机动性的手段之一。

实现多波束扫描的相控阵技术有多种，以波束形成方式来分，目前多波束相控阵技术包括射频波束形成、数字波束形成、光控波束形成三类。多波束相控阵技术都具备灵活的波束机动性和高可靠性。各类星载相控阵技术的适用范围如图5所示，基于射频的相控阵多波束网络实现的可动多波束随波束数目的增加付出的代价也成倍增加，实际工程中较大规模的波束数目难以实现。基于数字的相控阵多波束网络目前不易实现宽带特性，工程中难以在超宽带系统中应用。光控波束形成技术采用光纤作为传输线，具有频带宽、损耗低、容易实现多波束等特点，基于光控波束形成的多波束相控阵技术在同时实现宽带和多波束方面优势明显，是通信卫星有效载荷技术发展的重要方向之一。

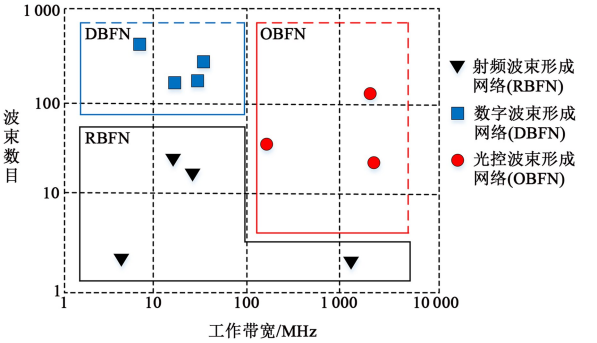

图5 星载相控阵技术的适用范围

光控相控阵技术的关键是光控波束形成网络，其核心是光控波束形成技术。光控波束形成技术在实现途径上又可以分为基于光色散的光控波束形成[8]、基于罗特曼透镜的光控波束形成[9]、基于空间光调制的光控波束形成[10]、基于光学谐振环的光控波束形成[11]、基于光程切换的光控波束形成[12]等。

其中，基于光色散的光控波束形成技术通过改变输入波长实现连续扫描，该方案完成了一维扫描的演示，但是受限于光波长的稳定性，其普适性不足，并未成为主流方案进行推广。基于罗特曼透镜的光控波束形成技术只能实现一维扫描，即使通过两级罗德曼透镜进行拓展，仍存在波位相对固定，不能对波束外形进行主动调控等问题，限制了其应用范围。基于空间光调制的光控波束形成技术易于实现集成化和空间多波束[13]，一度作为日本超高速因特网同步轨道通信卫星的后继方案，但该方案对力学和空间环境要求较高，截至目前并未实现星载应用。基于光学谐振环的光控波束形成技术结构易于集成化，可以在光芯片上实现多通道光学波束形成网络[14]的设计，经过长期研究与试验，该方案地面已经达到实用阶段，但是其对温度相对敏感，阻碍了其空间应用的工程化进程。基于光程切换的光控波束形成技术具有技术成熟、结构简单等特点，通道延时完全由光通道长度决定，理论上可以任意延时，其他指标，如切换时间、隔离度、插入损耗等主要由光开关决定[15]，该方案的空间环境适应性好，是目前星载通信领域光控相控阵天线研究的热点。

早在 20 世纪末，美国就已经对通信卫星相控阵技术设计进行了多方案比较研究，其中相控阵技术采用光控波束形成网络设计可以有效增加带宽，提高卫星的通信容量。近年来，Thales，AirBus，DAS 等宇航公司均开展了大量针对航天应用的微波光子载荷研究。国内在 20 世纪 90 年代开始了光控相控阵天线的研究，中国电科 29 所在 2012 年研制的 16 元阵光控相控阵天线样机，其瞬时带宽达到 6 GHz，掌握了光控波束形成技术的基本原理、设计方法、调控手段和实现途径。2011 年，西安空间无线电技术研究所率先开展了星载光控相控阵天线技术研究，采用基于磁光开关的光程切换光控波束形成技术方案，完成了星载 S 波段 19 元 8 波束光控相控阵天线原理样机的研制，突破了高灵敏电光转换、可变光延时、多光束集成探测等多项关键技术，研制的 8 波束光控波束形成网络具有带宽大、抗电磁干扰、尺寸小等优点。2016 年突破了可变光延迟网络的芯片化研究，采用基于片上热光开关的光程切换光控波束形成技术方案，完成了基于集成光波导的 Ka 频段 4 波束高集成度光控相控阵天线研制，突破了亚皮秒级高精度可变光延时控制、微波光子芯片的混合集成与封装等关键技术，针对性地开展了微波光子器件和芯片的空间环境试验，提升了光控相控阵天线空间应用的技术成熟度。

4　需要解决的问题及挑战

光控相控阵天线在超宽带相控阵天线领域具有明显的优势，但是由于电光变换的差入损耗大，光电器件体积重量大，可变光网络的高精度延时控制问题，以及光电器件空间环境适应性验证的充分性，都限制了光控相控阵天线的星载应用。截至目前，国际上鲜有光控多波束超宽带相控阵天线在轨应用的报道。随着集成光学的不断发展，星载光控相控阵天线的应用前景变得愈发明朗。

基于微波光子芯片的光控相控阵天线技术是未来光控相控阵天线发展的趋势之一，也是未来光控相控阵天线实现星载应用的主要途径，但是现阶段微波光子芯片还面临一些关键技术需要攻关。

光控相控阵天线系统中高频段电光外调制器的电光转换损耗大，这个问题短时间内难以解决，加上光分路器、光芯片等无源光器件的差入损耗，整个光通道射频差入损耗较大，在接收天线阵列系统中，需要高增益、低噪放组件来保证系统噪声系数满足星载使用要求，高增益、高集成度、低噪放组件的功耗、散热以及多通道时延一致性[16]等技术需要进一步攻关。

光控相控阵接收天线的一个单元或一个子阵需要配置一组调制器和激光器，激光器的自动温度控制和自动功率控制功耗较大，大规模阵列星载应用必将导致系统的体积、重量、功耗、成本等约束难以控制，需要开展有源光阵列的高密度集成和高效率散热等关键技术攻关。

现阶段国际上可变光延时网络芯片采用的光开关大都采用工艺比较成熟的热光开关方案，但是在星载通信领域应用中存在开关速度慢、功耗大等工程问题，基于集成光波导的低功耗高速响应片上光开关技术是解决工程应用的主要方向，也是现阶段研究的热点。

片上光放大器受制于工艺和高集成芯片散热等技术问题，很大程度上制约了大规模光控相控阵天线片上一体化设计。现阶段光控相控阵天线片上系统中的光放大器大多采用光纤连接的方式外挂到芯片外围，单独封装设计，很大程度上影响了光控波束形成片上系统的一体化集成水平。在现有的光芯片体系下实现高效率片上光放大器集成是光控波束形

成片上系统需要解决的关键技术之一。

光控相控阵天线实现星载通信领域应用除上述几个问题及挑战外，随着工程应用的研究深入还有可能遇到空间环境等诸多需要解决的问题。

5 结论

本文介绍了相控阵天线在星载通信领域的应用现状和光控相控阵天线的优势，总结了光控相控阵天线的进展历程，论述了光控相控阵天线的工作原理。光控相控阵天线是未来星载大孔径多波束相控阵天线宽带宽角扫描的重要实现途径，是下一代高通量卫星发展的方向之一。国内外对光控相控阵天线星载应用的探索取得了一定的成果，但是在大规模高集成阵列的星载工程应用上还面临诸多问题和挑战。光控波束形成一体化片上系统是未来光控相控阵的发展趋势，对卫星通信载荷的发展具有重要意义。

参考文献：

[1] Yao J. Microwave photonics[J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(3): 314-335.

[2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.

[3] Gardone L G. Ultra-wideband microwave beamforming technique[J]. Microwave J., 1985, 28(4): 121-123.

[4] Dakin J P. Design and fabrication of accousto-optic devices [J]. Progress in Quantum Electronics, 1995, 19(3): 305-306.

[5] Zhuang L, Burla M, Roeloffzen C, et al. RF-to-RF characterization of a phased array receive antenna steering system using a novel ring resonator-based integrated photonic beamformer [C]// International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2009: 1-4.

[6] Duarte V C, Prata J G, Ribeiro C F, et al. Modular coherent photonic-aided payload receiver for communications satellites [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1984.

[7] 崔兆云，田步宁，郑 伟. 一种基于密集波分复用技术的光控多波束天线[C]// 全国天线年会论文集，2011：944-947.
Cui Zhaoyun, Tian Buning, Zheng Wei. An optical controlled multiplex beams antenna based on DWDM[C]// Proc. of the National Antenna Annual Conf., 2011: 944-947.

[8] Lin C Y, Hosseini A, Subbaraman H, et al. Wavelength-tunable on-chip true time delay lines based on photonic crystal waveguides for X-band phased array antenna applications[C]// CLEO: Science and Innovations IEEE, 2012: 1-2.

[9] Christie S, Cahill R, Mitchell N, et al. Electronically scanned rotman lens antenna with liquid crystal phase shifters[J]. Electron. Lett., 2013, 49(7): 445-447.

[10] Wang Xinghua. Performance evaluation of a liquid-crystalon-silicon spatial light modulator[J]. Optical Engin., 2004, 43 (11): 2769-2774.

[11] Fakharzadeh M, Chaudhuri S K, Safavi-Naeini S. Optical beamforming for receiver phased array systems using periodic slow-wave structures [C]// Proc. of the 40th European Microwave Conf., 2010.

[12] Jung B M, Kim D H, Jeon I P, et al. Optical true time-delay beamformer based on microwave photonics for phased array radar [C]// Proc. of 3rd Inter. Asia-Pacific Conf. on Synthetic Aperture Radar, 2011: 1-4.

[13] Akiyama T, Matsuzawa H, Sakai K, et al. Multiple-beam optically controlled beamformer using spatial-and-wavelength division multiplexing [C]// Proc. of IEEE Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics, 2009.

[14] 庾财斌，梁 旭，王 超，等. 基于微波光子的光学波束合成理论与仿真[J]. 半导体光电，2021，42(3)：395-401.
Yu Caibin, Liang Xu, Wang Chao, et al. Theory and simulation of optical beamforming based on microwave photonics[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 395-401.

[15] 苏 君. 宽带光延迟移相网络波束形成技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2014.
Su Jun. Research on beamforming technology of broadband optical delay phase-shifting network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technol. of China, 2014.

[16] Akaishi A, Shoji Y, Fujino Y, et al. An optically controlled beam forming network for Ka-band antenna[C]// 61st Inter. Astronautical Congress, 2010: 1-6.

作者简介：

郑 伟(1982—)，男，山东省齐河市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为空间飞行器载荷天线设计和新型卫星载荷光通信技术。