

基于光实时延迟线的波束成形技术研究回顾

夏师懿^{1,2}, 李国通^{1,2,3}

(1.中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.上海科技大学, 上海 201210)

摘要: 卫星通信在下一代通信协议中扮演了一个重要的角色, 这给研究者带来了机遇与挑战。为有效、灵活地利用卫星载荷资源, 波束成形是必不可少的技术。为探寻更优的波束成形技术, 首先对比光实时延迟线所组成的光控波束成形与传统模拟波束原理。基于光实时延迟线的相控阵波束成形技术在满足卫星通信中体积小、重量轻、功率低需求的同时还可轻易实现在波束扫描的过程中无斜视。然后分析不同技术路径下光实时延迟线的波束成形技术的优势与约束, 如基于微型环谐振腔阵列、基于光栅延迟线、基于多路径切换与光开关和基于波长选择性的光实时延迟线。最后总结光控波束成形技术研究现状, 提出在卫星互联网中实现的可能性, 并对其未来发展方向进行预测。

关键词: 卫星互联网; 波束成形; 光实时延迟线

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022017

The Review of Beamforming Technology Based on Optical True Time Delay Line

XIA Shiyi^{1,2}, LI Guotong^{1,2,3}

1.Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3.ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract: The important role satellite communications plays in next-generation communication protocols brings both opportunities and challenges. Beamforming is an essential technology for efficient and flexible utilization of onboard resources. To explore a better beamforming technology, the optical control beamforming composed of the optical real-time delay line and the traditional analog beam were compared in principle. The phased array beamforming technology based on optical true time delay line meets the expectations of small size, lightweight, and low power in satellite communication. Phased arrays based on optical true delay lines could easily achieved no squint during beam scanning. The technical advantages and constraints of beamforming of optical real-time delay lines under different technical paths were analyzed. For example, based on micro-ring resonator arrays, based on grating delay lines, based on multi-path switching and optical switches, and based on wavelength-selective optical true time delay lines. Finally, the research status of the existing optical beamforming technology was summarized. The possibility of realization in satellite interconnection was proposed, and its future development direction was predicted.

Keywords: satellite network, beamforming, optical true time delay line

0 引言

低轨道卫星网络可以实现无所不在的无线覆盖, 有利于地面网络中非城市地区互联网接入。低轨卫星服务对象较为广泛, 包括飞机、船舶、汽车等, 这对波束

的灵活性提出新的要求。为了提供更快、更廉价的通信资源, 需要根据用户类型定制设计卫星。波束成形是用户定制设计中必不可少的技术。对实际卫星采集到的ADS-B和AIS数据进行分析, 发现采用灵活的波束覆盖可

以使卫星的吞吐量提高20%^[1]。在3GPP下一代通信协议中^[2]，卫星互联网被定义为地面互联网的补充。互联网用户业务类型复杂、带宽大、时延低的特点，映射到相控阵的设计中则是要求响应速度快的宽带波束成形技术。

宽带波束成形技术目前有多种实现方案：模拟波束成形、数字波束成形、光控波束成形等。模拟波束成形主要是指通过在每根天线前面使用移相器，可以在射频领域完成模拟波束成形。模拟移相器主要制约模拟波束成形平台技术的性能。模拟波束成形通常是用直接阵列辐射或馈电阵列照射抛物面的方法得到的，因为一般的馈源激励只能形成椭圆波束。目前采用的馈电阵列照射抛物面的方法就是采用一组馈源（通常是阵元天线组合阵）对圆口径抛物面馈电，各个阵元通过波束成形网络（BFN）馈以适当的幅度和相位，而天线方向图则是各阵元产生的子波束的矢量合成。这一技术目前已经获得了广泛的应用，例如，日本的直播卫星BS-2和BS-3，我国的东方红三号卫星、Intelsat-5、6、7和 uEtelsat-2等卫星上的天线^[3]。

由于宽带宽角工作是现代低轨卫星通信的主要需求，而基于移相器的传统模拟波束成形方式在进行宽角扫描时，由于时间、孔径效应的影响，收发信号不能有效地同相合成，难以实现期望的波束指向控制。在数字基带用数字时延技术^[4]或在射频用光纤延迟线^[5]，取代传统模拟波束成形中的移相器，是相控阵实现宽带宽角扫描的两种有效手段，易于实现宽带相控阵的波束成形和波束指向控制。

光控波束成形是将光实时延迟线、光纤传输技术应用到相控阵中，在子阵上采用光实时延迟线可以减小渡越时间、孔径效应的影响，使传统相控阵实现宽带宽角扫描的难题得以解决。光学控制系统不仅可以实现超低副瓣，而且控制效果更好、带宽更大。在光控相控阵设计中光电子设计比常规技术手段可减少54.6%的重量、98.5%的体积、22.25%的功率^[6]。这非常好地契合了低轨微小宽带卫星应用。

FRIGYES等^[7]使用光学技术解决宽带相控阵最关键的波束斜视问题。紧接着XU等^[8]演示了一种基于多通道光学外差检测技术的实时延迟线相控阵天线馈电系统。CORRAL等^[9]提出并演示了一种用于相控阵天线的实时延迟（TTD）光馈线的新方法。随着光开关集成的迅速发展，光开关技术提供了较大的延迟选择，使模块能够在超宽带中运行^[10]。

基于不同波长在相同长度光纤中传播时间不同的原理，MERKEL等^[11]提出了一种新颖的全光实时延迟再生技术，该技术非常适合用于控制具有时延波束控制的相

控阵天线。YEGNANARAYANAN等^[12]提出并演示了通过使用中间级光波长转换扩展至具有方位角和仰角独立控制的二维（2D）天线阵列。LEE等^[13]提出了将DCF和多波长激光器用于相控阵天线的光学实时延迟波束成形系统。

近代光子集成技术有了飞速的发展，各种集成光实时延迟线不断更新迭代，性能也得到很大的提升。XU等^[14]展示了基于集成光频梳源的微波实时延迟线的性能显著提高。HUANG等^[15]提出了一种新颖的集中式波束成形控制系统，该系统使用光实时延迟线（OTTD），用于与相控阵天线（PAA）进行无线通信的多个基站（BS）。TSOKOS等^[16]提出了一种用于多波束操作和连续选择波束角度的光波束成形网络（OBFN），并将所提出的光波束成形网络与商业2X4天线进行实验，同时控制两个波束的转向。当接收到的光功率高于-5 dBm时，在预期角度下解码信号的误码率可以很容易地在 10^{-3} 以下。BELKIN等^[17]回顾了全球范围内在设计用于下一代超宽带毫米波相控阵天线的光学波束成形网络方面取得的进展。Starlink中也设计制作了X波段基于向列相液晶（GT3）和介晶偶氮染料（CPND7）混合的新型全光驱动无源移相器。这种高度可扩展的平面独立技术被设想为现有的电子控制相控阵天线系统的补充^[18]。

1 相控阵波束成形与光实时延迟线

1.1 相控阵波束成形

模拟相控阵波束成形主要是指采用传统相移相控阵进行信号的相位加权实现波束成形。基于一般线性阵列的模拟波束成形相控阵结构如图1所示。

对于输出

$$y(t) = x_0(t) \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\omega\tau_n} w_n^* \quad (1)$$

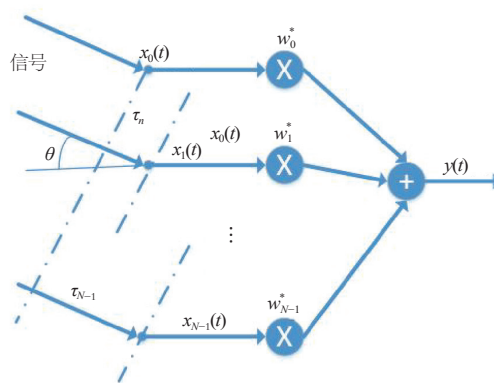


图1 基于一般线性阵列的模拟波束成形相控阵结构

假设到达阵列的第一个信号 $x_0(t)$ 的相位为0,那么第 n 个到达的信号 $x_n(t)$ 即为 $x_0(t)e^{-j\omega\tau_n}$, w_n^* 表示加权系数的转置, $y(t)$ 为阵列加权后的输出信号,对于阵列间隔为 d 的均匀线性阵列 $\tau_n=n\tau_1=n(ds\sin\theta)/c$ 。其波束成形器的响应为

$$P(\omega, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\omega\tau_n} \omega_n^* = \mathbf{w}^H \mathbf{d}(\theta, \omega) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{d}(\theta, \omega)$ 被称为阵列响应矢量^[19],表示为

$$\mathbf{d}(\theta, \omega) = [e^{-j\omega\tau_1}, \dots, e^{-j\omega\tau_{N-1}}]^T \quad (3)$$

式(3)这种结构常常适用于窄带信号,也可以成为窄带波束成形器。波束的主瓣宽度往往定义为天线方向图,即波束响应式(2)幅度的半功率点,表示为

$$\Delta\theta_{1/2} \approx \frac{1}{\cos\theta_B} \cdot \left(\frac{5f_6f_0}{N\pi f} \cdot 2\left(\frac{f_0}{f} - 1\right) \sin\theta_B \right) \quad (4)$$

从式(4)中可以得到天线主瓣宽度 $\Delta\theta_{1/2}$ 与天线阵元数 N 、工作频率 f 以及波束指向角 θ_B 都有关系。这意味着工作频率 f 的改变会影响波束的指向。

1.2 光控波束成形

光控波束成形主要采用光实时延迟线实现时延补偿技术,消除模拟波束成形时所产生的孔径效应。光控相控阵波束成形原理如图2所示,给出了实时延迟线补偿天线单元在空间的波程差。

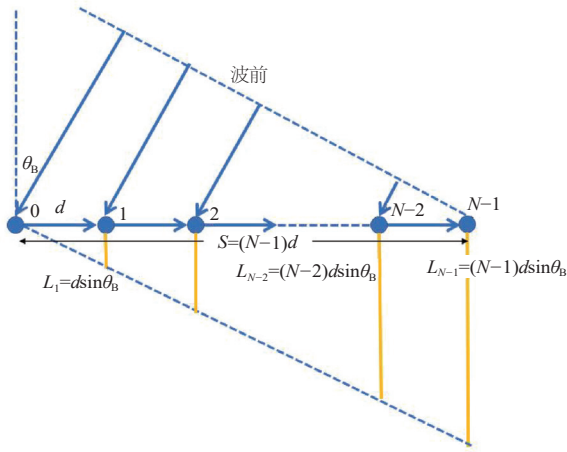


图2 光控相控阵波束成形原理

在模拟相控阵天线中,天线孔径之间移相器的总相位差 ϕ_b 可以表示为

$$\phi_b = \frac{2\pi}{\lambda} S \sin\theta_b = 2\pi f \frac{S}{c} \sin\theta_b = 2\pi f T_a \quad (5)$$

其中, $T_a = S \sin\theta_b / c$ 为天线孔径范围电磁波传播需要的时间即天线渡越时间。

$$\theta_b = \arcsin\left(\frac{\phi_b}{2\pi f T_a}\right) \quad (6)$$

可以看出如果天线频率发生改变,波束指向会发生倾斜,即可能会发生孔径效应。因此采用实时延迟线,可以使阵列所有天线单元的发射信号与目标距离相等,即对于特定的扫描角度 θ_B ,对不同的阵元补偿不同的时延,可以获得一个等效的扫描阵列。

此时新的天线孔径渡越时间为

$$T_b = S \sin\theta_b \quad (7)$$

$$\theta_b = \arcsin(S_b/S) \quad (8)$$

则波束指向不再受到射频工作频率的影响。

2 基于光实时延迟线的波束成形系统

基于光实时延迟线的波束成形系统框图如图3所示。

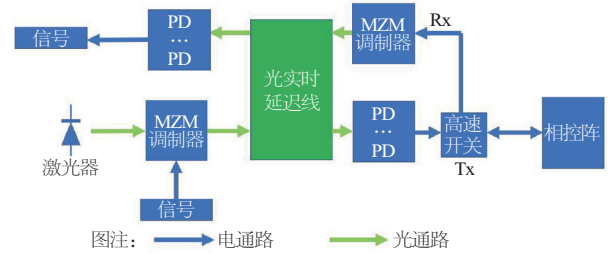


图3 基于光实时延迟线的波束成形系统框图

采用光实时延迟线的相控阵波束系统主要是由激光源、调制器、光实时延迟线器件、光电二极管(Photodiode, PD)所组成的。在发射链路,射频将发射信号通过强度调制至光载波上,承载了信号的光信号通过光实时延迟线实现不同通道之间的光路时差。然后通过光电二极管转换成电信号,馈送给相控阵不同的阵元,完成波束成形。根据光实时延迟线器件的不同,具体的系统构建有略微的差别例如XU等^[14]演示基于他们所设计的微型环谐振腔阵列芯片,搭建外围电路,通过波分复用器和光电二极管的方式将信号馈送到天线阵列中。

MORALES等^[20]提出并通过实验验证了一种光实时延迟波束成形方案,可直接集成到混合光学/毫米波接入网络中;提出在未来网络架构,可以集中在中心办公室(Central Office, CO)进行波束成形的时延,并将时延信号通过多模光纤传递到远端的天线,将天线和处理单元解耦合。

2.1 微型环谐振腔阵列

谐振型可调谐集成光纤延迟线主要由微环/微盘谐振器组成。本质上,通过共振产生慢光效应,减慢了光的传播速度。通过减速因子调整延迟量。波导本身的有效折射率变化很小,但由于慢光效应,群折射率变化很大。这样,在减小光带宽的同时,光延迟线的长度和调

谐功耗也显著降低。2013年BURLA等^[21]首次演示了宽带延续可调谐光波束进程网络,能够在DVB-S波段(10.7~12.75 GHz)提供连续可调光延迟236 ps。可调延迟基于可配置光学环形谐振腔。4个可调谐延迟线集成在一个芯片并馈送给一个16元线性阵列,并通过测量相位生成30°无斜视天线远场响应图。

TESSEMA等^[22]论证了一种集成光子实时延迟线电路的设计。该实时延迟线电路由光边带滤波器和用于宽带时延的光环谐振器组成。可调光延迟线调节范围为34~252 ps,带宽为30 GHz。该光子集成芯片可以控制工作在19.5 GHz的微波天线并测试完成-28~34°的波束扫描。XU等^[14]演示了基于由集成微环谐振器生成的克尔光梳源的先进横向射频功能,展示了基于集成微环谐振器产生的克尔光梳源的先进横向射频(RF)和微波功能;并将可调谐激光器(TLS)、掺铒光纤放大器(EDFA)、光带通滤波器(BPF)、偏振控制器(PC)和微型环谐振腔阵列(MRR)集成在一个芯片。微型环谐振腔阵列有21个通道,每个通道之间的延迟为59 ps,最大延迟量为1 239 ps;然后调制12 GHz微波信号到1 550 nm光载波上通过所设计的芯片馈电至21个阵元阵列;最后进行了波束控制的实验,可控范围为123.2°,波束扫描精度为14.6°~31.2°。

XIANG等^[23]表征基于侧耦合集成间隔序列谐振器(SCISOR)结构中的 Si_3N_4 环形谐振器的超低损耗连续可调光学实时延迟线器件。该光延迟线调节精度为0~3.4 ns,最大时延达到500 ps。SHAN等^[24]在2021年提出了一种新型的宽带连续可调谐微波光子延迟线,实现带宽为16 GHz,以最小20 ps为步长,最大可调节范围为160 ps。它由调制器、四级微型环谐振器延迟线、可调谐光带通滤波器和光探测器组成。

2.2 光栅延迟线

光栅是指一种结构,其空间结构或光学参数(如折射率)的分布具有周期性。布拉格光栅已广泛应用于光滤波、色散补偿、脉冲压缩、激光、波分复用系统、传感等领域^[26]。硅基波导光栅是通过周期性调制波导有效折射率而形成的,该光栅是紧凑型谐振延迟线的理想选择。

BRUNETTI等^[27]在紧凑石墨烯基硅实现布拉格光栅连续可调延迟线,该延迟线最小时延精度为13 ps,可调范围为200 ps,切换时间小于8 ns。通过载波在石墨烯层上的积累,对应于不同的电导率值,让纳米线的有效指数变化以实现电光调节。WANG等^[28]演示了一种基于绝缘体上硅中40个亚波长光栅波导阵列的指数可变光实时延迟线。该实时延迟线在10 GHz的带宽内实现移相步长为4.7 ps,最大可调时间为181.9 ps。

SUN等^[29]在绝缘体上硅中使用步进啁啾亚波长光栅(SWG)波导布拉格光栅(BG)实现了离散可调光延迟线,调节步长为6.6 ps,10个SWG可调节范围为60 ps。他们利用了10个SWG布拉格光栅的串联实现阶跃结构,并将实验所测数据进行仿真验证波束成形,波束扫描精度在10、5、4阵元时分别为7.56°、15.13°、23.2°。HAN等^[25]提出了一种基于绝缘体上硅技术的片上波导波束成形系统,设计载波是28 GHz的4条基于布拉格光栅的光延迟线。该波束成形系统基于集成波导实时延迟线实现,最小可调时延为4.65 ps,最大可调时延为15.46 ps。HAN等还将时延所测相位变化进行了仿真波束合成,完成-60°~60°的波束扫描。SRIVASTAVA等^[30]演示了一种基于光子的宽带TTD波束成形网络,该网络采用不同长度的升余弦变迹线性啁啾布拉格光栅(RCFBG),如1.5 cm、2 cm、2.5 cm等长度,以及不同的啁啾率,可作为控制相控阵天线辐射角的可变TTD线;可调时延精度为0.2 ps,最大可调时延范围为200 ps。其设计的光实时延迟线相控阵天线辐射的主瓣可在±36.8°之间无斜视引导,适用于X波段(8~12 GHz)微波频率下的连续波束成形。

通过对光栅的空间结构设计实现光实时延迟线是一种易于集成的方法。其中对光栅表面进行额外的材料覆盖可以形成各种不同的光实时延迟线。但是基于光栅的实时延迟线大多不能连续调节,或者需要通过改变光波长进行调节,这加大了系统的成本。在波束成形的应用中,光栅的级联可以做到较大的带宽,这对毫米波光实时延迟线的设计是极为有利的。

2.3 多路径可切换和基于光开关的延迟线

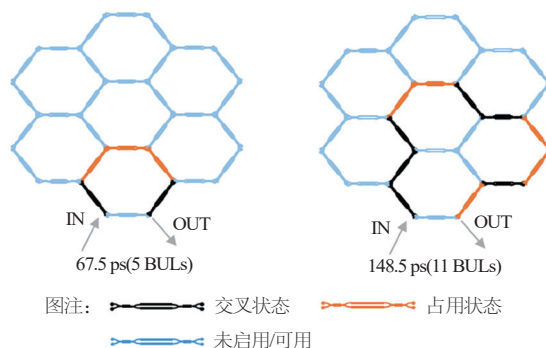


图4 离散光延迟线实现在一个7单元布局：设置两个不同的时延^[31]

实现可调延迟线的另一种方法是调整光路长度。光波导需要有不同的时延,以实现时延可调。该方法比慢光器件具有更宽的工作带宽和更大的时延调优范围,但

只提供具有一定时延调优步长的离散时延。

光开关技术提供了较大的时延选择,使模块能够在超宽频带中运行^[10]。PÉREZ-LÓPEZ等^[31]提出了一种可编程光子集成电路;并在实验中演示了另一种独立可调单位结构,这种耦合器可以实现独立的波束幅度分配和相位控制,比传统使用的Mach Zehnder干涉仪减少了插入损耗,每条路径对应13.5 ps时延,最大可时延148.5 ps。图4演示了5条路径和11条路径的六边形网络配置。

ZHU等^[32]报告了第一个基于绝缘体上硅平台可切换OTTDL的单片1×8微波光子波束成形器。该芯片由1个调制器、1个八通道OBFN和8个光电探测器组成,共包括数百个有源和无源器件。其中移相部分采用8个5 bit可调节的实时延迟线,这8个实时延迟线可调范围为2~16 ps,总可调节范围为0~496 ps。光实时延迟线基于热光开关。通过实验验证所设计的芯片可以角度在-75.51°~75.64°、带宽在8~18 GHz无斜视波束成形。

多路径可切换开关的实时延迟线最大优点是切换速度快。光开关的调节方式主要是光电效应,这可以达到ns级别的速度。但是较大的时延精度,也让基于多路径开关的光实时延迟线无法做到连续调节,通过组合优化算法能达到更好的时延精度。多路径可切换开关类似于目前市面上传统模拟移相芯片的升级。在波束成形中,无法做到连续可调节,但是可以实现无斜视的角度指向。

2.4 波长选择性光学延迟线

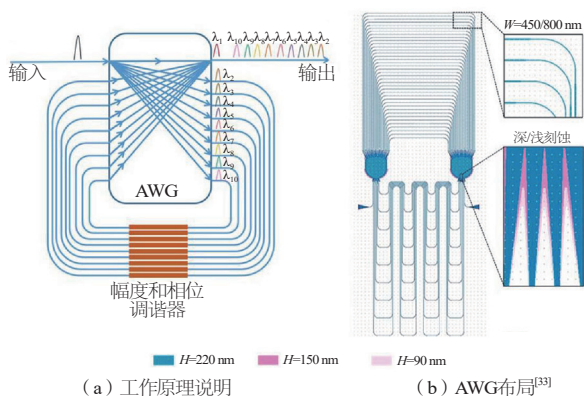


图5 基于阵列波导光栅的波长选择性实时延迟线

阵列波导光栅是一种很好的波长选择器件。当它与反馈波导阵列集成时,可以通过改变载波波长来改变时延。图5显示了该设备的结构和工作原理。波长选择性实时延迟线被应用到相控阵中,其中光实时延迟线被用于二维(2D)阵列发射机的低损耗独立控制,提供较大的瞬时带宽^[12]。

段兴等^[34]将光信号分为8路单波长光,不同波长已调信号经过不同长度的精密光纤时延线单位,最小可调时延精度为20 ps,通过法拉第旋转镜的作用返回并通过环形器输出,形成不同通道间的等间隔时延差,最大可调范围为20 μs。YANG等^[35]设计了基于高度色散光纤的波束成形网络,通过调节波长,控制两阵列相控阵完成51°的波束指向。实验验证了该波束成形网络在5.9 GHz、12.7 GHz、17 GHz载波信号的可靠性。XUE等^[36]演示了基于微型微谐振器频率梳源和色散时延的光子TTD波束成形网络。该波束成形网络可调精度为18.75 ps,可调范围是0~300 ps,并在8~20 GHz完成±60.2°波束扫描的仿真验证。

波长选择性的光时延,不同的波长对应不同时延,对激光源的连续可调性能要求较高,但是设计结构简单,工艺较为成熟。

3 系统综合性能分析

近几年用于光实时延迟线相控阵的技术总结见表1。

光控相控阵最早提出的时间是1996年,相比传统模拟移相器和数字波束提出的时间都要晚很多,这也导致了该领域的发展时间并不长。在卫星通信中,对重量、体积和功耗都有很高要求,因此光集成芯片的波束成形网络拥有天然的优势;而且卫星互联网的研发周期迭代较快,这也符合光集成芯片研发周期短的特点。

微型谐振环时延的范围误差主要来源于谐振环的大小和集成的环数量,采用热调控制减速因子的MRR可以达到连续调节的目的。采用波长控制方式调节时延量的谐振环取决于激光器的波长连续调节性能。

光栅延迟线的性能各有不同,这主要取决于光栅周期长度,如533.815 nm光栅周期可以达到300 ps的时延^[30],而最大344 nm的光栅周期仅有15.46 ps时延^[25]。路径切换与光开关的技术时延差异主要取决于所设计的单位时延长度,与最大组合数量直接相关。波长选择性技术所制造的光实时延迟线与部分谐振环类似,其精度取决于激光器的波长调谐能力。

从可调时延精度来看,最有优势的是微型谐振环。微型谐振环的可调精度受不同通道的长度差异影响,其主要受制于芯片制造的工艺,基本可以达到连续调节。其次基于光栅的时延调节是离散的,可以达到0.2 ps。基于光开关和微型微谐振器频率梳源的时延调节力度较大。

由于微波阵列天线的设计对波束扫描范围有较大的影响,大多数的并不涵盖这一部分,少数工作通过使用矢量网络分析仪测得光芯片的S21相位和幅度特性后再假设一个间距为半波长的微波天线阵列进行仿真演

表1 用于光实时延迟线相控阵的技术总结

结构	时延精度 /ps	时延可调 范围/ps	扫描范围	微波频率/ GHz	芯片平台
MRR ^[21]	—	0~236	-30°~30°	12~18	—
MRR ^[37]	—	0~200	—	20	SiN
MRR ^[23]	0~3.4	500	—	10	SiN
MRR ^[24]	—	0~160	—	16	—
MRR ^[22]	34	252	-28°~34°	19.5	SiN
GDL ^[28]	4.7	181.9	—	10	Si
GDL ^[27]	13	200	—	—	石墨烯+Si
GDL ^[38]	50	100	—	5	SOI
GDL ^[29]	6.6	60	—	10	SOI
GDL ^[25]	4.62	15.46	-60°~60°	27.5~28.35	SOI
GDL ^[30]	0.2	300	-36.8°~36.8°	8~12	SOI
路径切换	13.5	148.5	—	—	—
光开关 ^[32]	2~16	496	-75.51°~75.64°	8~18	SOI
Comb ^[36]	18.75	300	±60°	8~20	SOI
AWG ^[34]	20	20000	—	—	—

注：MRR为微型谐振环；GDL为光栅延迟线；Comb为微型微谐振器频率梳源；AWG为阵列波导光栅

示天线远场图。时延可调范围最大的阵列波导光栅可调范围达到20 μs^[34]，微型谐振环普遍可调节范围在200 ps之内，原因是微型谐振环的时延和内部谐振环的大小有关。集成光栅最小可调精度是15.46 ps。

基于Ka波段的卫星互联网应用分析，对于30 GHz的微波信号，假设相控阵间距为二分之一波长，那么1个16×16阵列，最大的时延需要266.7 ps，其相位每一度需要时延0.0926 ps。因此对照表1可以发现，以上技术多可以用在Ka波段完成至少8阵列的波束成形。光实时延迟线的带宽是一个很重要的参数，在未来Ka波段，调制到光信号上的频率会越来越高。光栅延迟线已经验证了在Ka波段上的可行性，可完成-60°~60°的扫描实验^[25]。

4 总结与展望

卫星技术重现于互联网通信的竞争，主要归功于目前芯片制造业的飞速发展，以及大规模相控阵的成熟应用。为了使卫星在当前环境中获取独立的优势，采用低轨卫星进行互联网业务通信是一个主流趋势。在这其中灵活的天线设计是必不可少的利器，灵活的天线覆盖方式，高功率、低功耗的天线研发逐渐成为热点。在大型卫星互联网中，星间激光链路的使用也会使光实时延迟线的出现更加有意义，这意味着它可以减少一级光电转换，减少较大的冗余功率消耗。基于光实时延迟线的波束成形技术将是未来潜在的更优的波束成形技术。将

光实时延迟线运用在毫米波波束成形中需要克服两个重要的难关：带宽大、功率大。带宽的约束是目前光实时延迟线芯片所研究的热点，相信不久就会有高带宽的光移相芯片的面世。由于光子芯片集成设计的周期较长，目前已经有许多科研团队展开30 GHz及以上的光实时延迟线芯片的研究。高功率的约束是卫星所独有的特性，目前的研究结果都未对这一特性展开细致的研究。由于传输距离较长，Ka波段的毫米波在空中的衰减，使得发射功率也较大。这样大的功率目前是无法加载到光实时延迟线芯片上的，未来解决光芯片所能承载的功率约束将会是一个研究的热门。

参考文献：

[1] XIA S Y, JIANG Q J, ZOU C, et al. Beam coverage comparison of LEO satellite systems based on user diversification[J]. IEEE Access, 2019, 7: 181656-181667.

[2] RINALDI F, MAATTANEN H L, TORSNER J, et al. Non-terrestrial networks in 5G & beyond: a survey[J]. IEEE Access, 2020, 8: 165178-165200.

[3] 周宇昌. 通信卫星上波束成形技术及发展[J]. 空间电子技术, 2000(3): 7-15.

ZHOU Y C. On-board beamforming technology and development of communication satellites[J]. Space Electronic Technology, 2000(3): 7-15.

[4] NORDEBO S, CLAEISSON I, NORDHOLM S. Weighted Chebyshev approximation for the design of broadband beamformers using quadratic programming[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1994, 1(7): 103-105.

[5] DOLFI D, JOFFRE P, ANTOINE J, et al. Experimental demonstration of a phased-array antenna optically controlled with phase and time delays[J]. Applied Optics, 1996, 35(26): 5293-5300.

[6] 蒋国锋. 光控相控阵天线的关键技术[J]. 现代雷达, 2014, 36(8): 57-59.

JIANG G F. Key techniques of optically controlled phased array antenna[J]. Modern Radar, 2014, 36(8): 57-59.

[7] FRIGYES I, SEEDS A J. Optically generated true-time delay in phased-array antennas[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(9): 2378-2386.

[8] XU L G, TAYLOR R, FORREST S R. True time-delay phased-array antenna feed system based on optical heterodyne techniques[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(1): 160-162.

[9] CORRAL J L, MARTI J, FUSTER J M, et al. True time-delay

- scheme for feeding optically controlled phased-array antennas using chirped-fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(11): 1529-1531.
- [10] CHEN Y, WU K, ZHAO F, et al. Reconfigurable true-time delay for wideband phased-array antennas[EB]. 2004.
- [11] MERKEL K D, BABBITT W R. Optical coherent-transient true-time-delay regenerator[J]. Optics Letters, 1996, 21(15): 1102-1104.
- [12] YEGNANARAYANAN S, JALALI B. Wavelength-selective true time delay for optical control of phased-array antenna[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(8): 1049-1051.
- [13] LEE H, JEON H B, JUNG J W. Optical true time-delay beam-forming for phased array antenna using a dispersion compensating fiber and a multi-wavelength laser[C]//2011 4th Annual Caneus Fly by Wireless Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [14] XU X Y, WU J Y, NGUYEN T G, et al. Advanced RF and microwave functions based on an integrated optical frequency comb source[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2569.
- [15] HUANG H, ZHANG C F, CHEN C, et al. Optical true time delay pools based centralized beamforming control for wireless base stations phased-array antennas[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3693-3699.
- [16] TSOKOS C, MYLONAS E, GROUMAS P, et al. Optical beamforming network for multi-beam operation with continuous angle selection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(2): 177-180.
- [17] BELKIN M E, FOFANOV D, GOLOVIN V, et al. Design and optimization of photonics-based beamforming networks for ultra-wide mmWave-band antenna arrays[J]. Array Pattern Optimization, 2019.
- [18] LI J. Optically Steerable Phased Array Enabling Technology Based on Mesogenic Azobenzene Liquid Crystals for Starlink Towards 6G[C]//2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 345-347.
- [19] VAN V B D, BUCKLEY K M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering[J]. IEEE ASSP Magazine, 1988, 5(2): 4-24.
- [20] MORALES Á, MONROY I T, NORDWALL F, et al. 50 GHz optical true time delay beamforming in hybrid optical/mm-wave access networks with multi-core optical fiber distribution[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(4).
- [21] BURLA M, MARPAUNG D, ZHUANG L M, et al. Integrated photonic μ m K μ m uS-band beamformer chip with continuous amplitude and delay control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(12): 1145-1148.
- [22] TESSEMA N M, CAO Z, VAN ZANTVOORT J H C, et al. A tunable Si_3N_4 integrated true time delay circuit for optically-controlled K-band radio beamformer in satellite communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(20): 4736-4743.
- [23] XIANG C, DAVENPORT M L, KHURGIN J B, et al. Low-loss continuously tunable optical true time delay based on Si_3N_4 ring resonators[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(4): 1-9.
- [24] SHAN W S, LU L J, WANG X Y, et al. Broadband continuously tunable microwave photonic delay line based on cascaded silicon microrings[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3375-3385.
- [25] HAN Y, SHI S J, JIN R T, et al. Integrated waveguide true time delay beamforming system based on an SOI platform for 28 GHz millimeter-wave communication[J]. Applied Optics, 2020, 59(26): 7770-7778.
- [26] ZHANG W, YAO J. A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1396-1400.
- [27] BRUNETTI G, CONTEDECA D, DELL'OLIO F, et al. Design of an ultra-compact graphene-based integrated microphotonic tunable delay line[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4593-4604.
- [28] WANG Y, SUN H, KHALIL M, et al. On-chip optical true time delay lines based on subwavelength grating waveguides[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1405-1408.
- [29] SUN H, WANG Y, CHEN L R. Integrated discretely tunable optical delay line based on step-chirped subwavelength grating waveguide Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5551-5560.
- [30] SRIVASTAVA N K, PARIHAR R, RAGHUWANSHI S K. Efficient photonic beamforming system incorporating a unique featured tunable chirped fiber Bragg grating for application extended to the ku-band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(5): 1851-1857.
- [31] PÉREZ-LÓPEZ D, SÁNCHEZ E, CAPMANY J. Programmable true time delay lines using integrated waveguide meshes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4591-4601.
- [32] ZHU C, LU L J, SHAN W S, et al. Silicon integrated microwave photonic beamformer[J]. Optica, 2020, 7(9): 1162.
- [33] ZHOU L J, WANG X Y, LU L J, et al. Integrated optical delay lines: a review and perspective[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(10): 43-58.
- [34] 段兴, 张斯滕, 姜媛媛, 等. 多通道可编程光控真时延网络方案改进与实现[J]. 光通信技术, 2017, 41(5): 1-4.
- DUAN X, ZHANG S T, JIANG Y Y, et al. Improvement and implementation of a multi-channel programmable optical

- controlled true time delay network[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(5): 1-4.
- [35] YANG D H, LIN W P. Phased-array beam steering using optical true time delay technique[J]. Optics Communications, 2015, 350: 90-96.
- [36] XUE X X, XUAN Y, BAO C Y, et al. Microcomb-based true-time-delay network for microwave beamforming with arbitrary beam pattern control[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2312-2321.
- [37] TESSEMA N M, TRINIDAD A M, MEKONNEN K A, et al. A photonics-assisted beamformer for K-band RF antenna arrays[C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [38] WANG X, ZHAO Y H, DING Y H, et al. Tunable optical delay line

based on integrated grating-assisted contradirectional couplers[J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 880-888.

[作者简介]



夏师懿（1995—），男，中国科学院微小卫星创新研究院博士生，主要研究方向为低轨卫星通信系统、毫米波相控阵、波束成形等。



李国通（1970—），男，中国科学院微小卫星创新研究院研究员，博士生导师，主要研究方向为卫星导航和卫星通信。