光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022033003

硅基微波光子波束形成器研究进展

倪子恒[1]，陆梁军[1,2*]，刘源彬[1]，陈建平[1,2]，周林杰[1,2]

（1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室，上海 200240；
2. 上海交通大学 平湖智能光电研究院，浙江 嘉兴 314299）

摘　要： 微波波束形成器是相控阵雷达、5G通信基站等射频发射系统中的核心器件。近年来硅基微波光子波束形成器以其带宽大、尺寸紧凑、重量轻、损耗低、抗电磁干扰等优势成为微波光子学中的研究热点之一。文章从微波光子波束形成的基本原理和性能指标出发，总结了近年来应用于微波光子波束形成器的多种集成可调光学真延迟线结构和波束形成网络架构，并介绍了微波光子波束形成系统集成芯片和自动化控制的最新进展，最后对硅基微波光子波束形成器的未来发展进行了展望。

关键词： 硅基光电子学；微波光子；光控波束形成网络；光学延迟线

中图分类号： TN911.7　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0230－12

Recent Progresses in Silicon Integrated Microwave Photonic Beamformer

NI Ziheng[1], LU Liangjun[1,2], LIU Yuanbin[1], CHEN Jianping[1,2], ZHOU Linjie[1,2]

(1. State Key Lab. of Advanced Optical Commun. System and Networks, School of Electronic Information and Electrical Engin., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN; 2. SJTU-Pinghu Institute of Intelligent Optoelectron., JIaxing 314299, CHN)

Abstract: Microwave beamformer is one of the core components in phased array radar systems and 5G communication base stations. In recent years, silicon integrated microwave photonic beamformers have become one of the research hotspots in microwave photonics due to their advantages of large bandwidth, compact size, light weight, low loss, and anti-electromagnetic interference. In this paper, the basic principles and the key performance indices of microwave photonic beamforming systems are first introduced. Then, several integrated tunable optical true delay lines and optical beamforming network architectures that applied in the integrated microwave photonic beamformers in recent years are summarized. And also, the recent progresses in the integrated microwave photonic beamforming chips and the automation control and calibration methods are reviewed. Finally, the prospects of the future developments of silicon integrated microwave photonic beamformers are prospected.

Key words: silicon photonics; microwave photonics; optical beamforming networks; optical delay lines

0　引言

微波波束形成器通过改变相邻天线阵元间发射微波信号的相位差来控制微波波束发射的偏转角度，是军用微波相控阵雷达、民用新一代无线接入网射频发射基站乃至其他相控阵系统中的关键器件。随着军用相控阵雷达面临的电磁环境的复杂化和民用无线接入网频谱的不断扩展，传统电相控阵(Phased Array Antennas，PAAs)面临电子瓶颈，在大射频工作带宽下会产生波束斜视(Beam

收稿日期：2022－03－30.
基金项目：科技部重点研发计划项目(2018YFB2201702，2019YFB2203200，2019YFB1802903，2021YFB2801300)；国家自然科学基金项目(62090052，62075128，62135010，62120106010).
*通信作者：陆梁军　**E-mail：** luliangjun@stju.edu.cn

Squinting，BS)[1]。与传统电相控阵相比，光控波束形成网络(Optical Beamforming Networks，OBFNs)采用光学真延迟线实现微波移相，可以在很大的电域带宽上实现无波束斜视的波束形成和指向，具有大带宽、低损耗、抗电磁干扰等优点[1]，是目前实现宽带乃至超宽带微波波束形成网络最具潜力的技术途径。与分立光纤器件构成的微波光子波束形成器相比，集成微波光子波束形成器在尺寸、重量和功耗(Size，Weight，and Power，SWaP)方面具有显著优势[2]，成为微波光子学的研究热点之一。集成微波光子波束形成网络芯片主要依托磷化铟(InP)[3]、绝缘体上硅(SOI)[4-5]和氮化硅(Si_3N_4)[6-7]三种材料平台实现。InP 平台可以实现激光器、调制器、光电探测器等有源器件和无源器件的单片集成，但是 InP 波导传输损耗较高(1.5～3 dB/cm)。SOI 和 Si_3N_4 平台制造工艺与成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容，因此使用这两种平台可以获得较低的制造成本。SOI 平台的波导损耗相对比较小(0.1～2 dB/cm)，调制器和探测器的工艺和器件性能趋近成熟，且硅波导热光效应较强，弯曲半径小，因此 SOI 平台是实现集成波束形成器较优的材料平台。但是 SOI 平台缺少能够片上集成的激光器和放大器，且在光功率很大时非线性吸收效应明显。Si_3N_4 波导的损耗更小(0.01～0.2 dB/cm)[8]，而且损耗不受双光子吸收(Two-Photon Absorption，TPA)和自由载流子吸收(Free Carrier Absorption，FCA)等非线性吸收效应影响，可承载更高的光功率。但是 Si_3N_4 平台无法实现片上集成的有源器件，且热光效率较低，限制了芯片的集成规模。

本文从微波光子波束形成基本原理出发，介绍了评估微波光子波束形成器性能的各项关键指标，总结了近年来应用在微波光子波束形成网络中的光学真延迟线和多种波束形成网络架构，并介绍了微波光子波束形成器芯片在系统集成和自动化标定方面取得的研究进展，最后对硅基微波光子波束形成器的未来发展进行了展望。

1　微波光子波束形成原理

微波波束形成技术的核心是在各个天线阵元发射的微波信号间引入相位差，在远场形成等相位面，实现波束在特定偏转角的发射和接收。波束的偏转角由相邻通道的相位差决定。相比于在电域进行移相，微波光子波束形成在光域对调制后的各路光载微波信号进行延迟形成延迟差。经光电转换后，各路微波信号间就引入了相应的延迟差，从而实现宽带微波信号的无斜视波束形成。

微波光子波束形成器的基本工作过程如下：激光器产生光载波，微波信号通过高速电光调制器调制到光频域上；光载微波信号经由光分束器分束，通过可调光延迟线阵列进行延迟；最终由光电探测器阵列接收转换成微波信号，经电放大器放大后由天线阵列发射，在自由空间中形成沿某特定方向传播的波束。

1.1　波束形成原理

以由 N 个天线阵元构成的一维相控阵天线为例，如图 1 所示，所有的天线阵元排布在同一条直线上，设每个天线阵元间的间距为 d，波束指向功率最大的角度为 θ，发射微波信号的频率为 f。此时相邻天线阵元发射微波信号的相位差满足以下公式[9]：

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi f\cdot d\sin\theta}{c} \tag{1}$$

由式(1)可知，相邻阵元发射信号的相位差与微波频率 f 相关。若采用移相器，相位差 $\Delta\varphi$ 不随微波信号的频率而变化。因此，不同频率的微波信号发射的波束会偏转到不同的方向，这就是波束斜视现象。

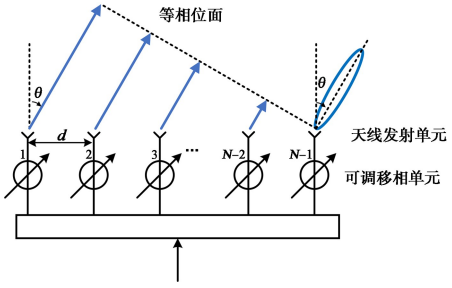


图 1　相控阵原理图

若利用真延迟进行波束形成，则相邻通道需要的延迟差为

$$\Delta\tau=\frac{d\sin\theta}{c} \tag{2}$$

由式(2)可知，相邻通道所需延迟差与频率无关。因此，采用光学真延迟线可以实现无波束斜视的宽带微波光子波束形成，其工作带宽由延迟线平坦延迟带宽决定。

1.2　光学真延迟线原理

光在均匀介质的波导中传输，光波的频率为 ω，假设传输距离为 L，波导的有效折射率为 $n_{\mathrm{eff}}(\omega)$，

光波相位变化可由下式给出[10]：

$$\phi(\omega)=-\frac{2\pi n_{\mathrm{eff}}(\omega)L}{\lambda(\omega)} \tag{3}$$

此时光波导对光信号的群延迟为

$$\tau_{\mathrm{g}}=-\frac{\partial\phi(\omega)}{\partial\omega}=\frac{L}{c}\left(n_{\mathrm{eff}}(\omega)+\omega\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}(\omega)}{\partial\omega}\right) \tag{4}$$

由式(4)可知光学真延迟线的群延迟是与频率相关的。但是，光学真延迟线的光域带宽比微波信号带宽大很多，因此利用光学真延迟的方法可以在相当大的射频工作带宽内实现无波束斜视的波束形成。

2 微波光子波束形成器关键指标

2.1 微波工作频段和带宽

微波光子波束形成器的工作频段由其应用场景决定。常见的应用波段有相控阵雷达的 L～K 波段、5G 移动通信系统中的毫米波频段等。带宽通常指微波光子波束形成器能够实现无斜视波束形成的射频带宽，主要由光学真延迟线的带宽决定。

2.2 光学插入损耗

光学插入损耗主要指的是微波光子波束形成系统中包括调制器、光学真延迟线、光分路器等器件在内的光学损耗总和。对于集成微波光子波束网络芯片而言，其光学插入损耗还包括芯片耦合损耗、波导传输损耗以及测试端口分光损耗等。

2.3 微波链路增益(Gain Link)

微波链路增益表示了微波光子系统对输入微波功率施加的增益(或损耗)随微波频率变化的情况。对于微波光子波束形成器而言，微波链路增益 G 应为光电探测器输出微波信号平均功率 P_{out} 与调制器输入微波信号平均功率 P_{in} 之比，也是该二端口网络的 S_{21} 幅度的平方[11]：

$$G=\frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}}=|S_{21}|^2 \tag{5}$$

微波光子链路增益除了与系统中光学器件的插入损耗有关外，还与光载波功率、调制器半波电压 V_π 和探测器响应度等相关。

2.4 波束切换时间

波束切换时间指波束形成器在切换成不同波束发射方向下所需要的时间。对于集成微波光子波束形成器而言，波束切换时间主要由片上可调器件、控制电路及信号处理模块的响应时间共同决定。采用热光效应的可调器件，波束切换时间最快可达微秒量级；而采用载流子色散效应的可调器件，波束切换时间最快可达纳秒量级。

2.5 波束最大偏转角度

根据式(2)，波束最大偏转角度由天线阵元的间距和微波光子波束形成器相邻通道间能实现的最大延迟差共同决定。当天线孔径越大，要实现更大偏转角度，所需延迟线的延迟量越大。

2.6 噪声因子(NF)

噪声因子是描述一个微波器件或者系统噪声性能的常用性能参数，反映着微波光子波束形成器中信噪比(SNR)的恶化情况，数学计算公式为[11]

$$NF=P_{\mathrm{N}}-G-k_{\mathrm{B}}\cdot T \tag{6}$$

其中，P_{N} 为噪声功率谱密度，G 为微波链路增益，k_{B} 为玻尔兹曼常数，T 为温度。通常，在微波光子波束形成系统噪声中占据主导地位的有激光器噪声、光放大器噪声以及探测器后电子热噪声和散粒噪声。

2.7 无杂散动态范围(SFDR)

n 阶无杂散动态范围定义为所有 n 阶交调失真低于系统底噪时最大输出基频微波功率与系统底噪的差值，其数学表达式为[11]

$$SFDR=\frac{n-1}{n}\{OIP_n-P_{\mathrm{N}}\} \tag{7}$$

其中，OIP_n 指的是 n 阶交调失真功率响应曲线和基频功率响应曲线的交点，它可以通过测量相同输入微波功率下的双音基频信号功率和失真信号功率计算得出。微波光子波束形成器中的非线性主要来源于光-电和电-光转换过程。

3 微波光子可调真延迟线

由第 1 节可得，可调光学真延迟线是决定微波光子波束形成器性能的核心器件。实现对宽带微波信号大范围且高精度的角度偏转，需要可调光学真延迟线在保持大带宽的同时，具有延迟调节范围大和调节精度高的特点。与此同时，应尽可能地降低延迟线的损耗以提高系统的规模和整体性能。

目前，用于微波光子波束形成网络的可调光学真延迟线主要可分为波长选择型、级联微环型和开关切换型三种。

3.1 波长选择型可调光学真延迟线

波长选择型可调光学真延迟线主要利用波长选择器件中光信号延迟量和波长相关来实现对延迟量的调节。阵列波导光栅(AWG)[3,12-13]、布拉格光栅[14-17]等器件结合不同长度的延迟波导就可以构成

波长选择型可调光学延迟线。根据不同波长的光信号在其中经历延迟不同的特点，可通过改变输入光信号的波长来改变光载微波信号的延迟量，进而实现对波束偏转角度的调节。图 2 所示为波长选择型可调光延迟线的工作原理示意图。不同波长的输入光信号经过波长选择器件后从不同端口输出，经过不同长度的延迟波导后回到波长选择器件，最后从同一端口输出。因此，不同波长的输入信号可获得不同的延迟量。此类器件多具有无源属性，在尺寸和功耗上具有优势，但是在使用中需要改变输入光载波波长，对激光器和调制器提出了新的要求。

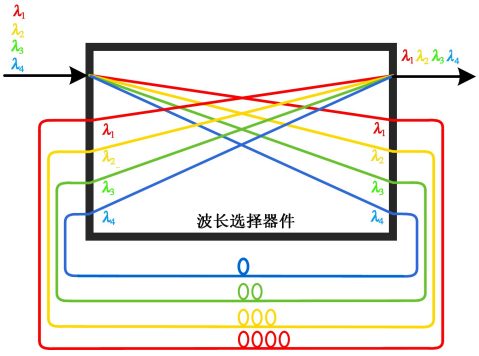


图 2　波长选择型可调光学真延迟线结构

2016 年，Zhang 等提出了一种基于线性啁啾光纤布拉格光栅（LCFBG）的微波光子波束形成网络[17]，系统结构如图 3 所示，首先使用多个输出波长不同的激光器和波分复用器件实现多波长光信号的输入，在利用马赫-曾德尔（MZI）调制器对多波长光载波进行调制后，根据不同波长微波光信号在 LCFBG 中的不同反射位置，引入延迟差，并采用光开关来调节光环绕的圈数，增加延迟量，通过波长解复用后不同波长的微波光信号就携带了不同的延迟，从而实现波束形成和扫描。在实验中研究者分别使用两种具有不同色散系数的 LCFBG，最终得到的延迟差可覆盖 −60°～60°偏转角的波束扫描范围。

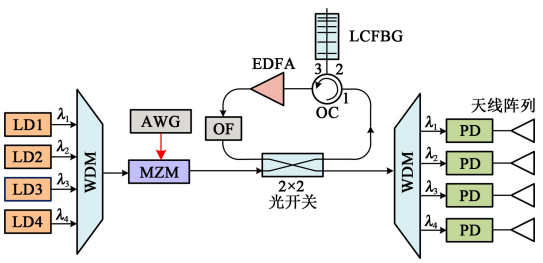


图 3　基于 LCFBG 的波束形成网络结构[17]

2019 年，Hu 等报道了一种基于 AWG 的微波光子波束形成器[12]。基本原理与图 2 所示类似，不同波长的光信号输入 AWG 后，在输出端光信号的延迟差不同。该波束形成器产生的延迟量在 0～278 ps 范围内，以 8 个衍射级 5.7 ps 的延迟步进递增。光波长范围为 1 527～1 607 nm，在光波长变化范围内器件插入损耗的变化小于 1.85 dB。实验结果表明，该架构具有插入损耗低、占用空间小和分辨率高的优势，并能实现多波束形成。

3.2　级联微环型可调光学真延迟线

级联微环型可调光学真延迟线的基本结构如图 4 所示，主要工作于微环谐振波长附近，利用微环的慢光效应来实现延迟[18-21]。微环延迟线的优点是可以实现延迟的连续调节。但是，微环的延迟响应呈洛伦兹曲线形状，单个微环的延迟-带宽积受限，要提高微环延迟线的带宽和延迟量，就需要增加微环级联的数量。此外，为获得平坦延迟响应，需要精确控制级联微环中每个微环的谐振波长和耦合系数。因此，大多设计成 MZI 辅助型微环结构。微环和波导的耦合器由一个 MZI 构成，通过调节 MZI 两臂的相位差来改变微环的耦合系数，通过调节微环上的移相器来改变微环谐振波长，从而实现微环延迟响应的灵活调节。但是，这也增加了延迟控制的系统复杂度。此外，采用此方法实现的延迟线在通带内很难实现非常平坦的延迟响应[18]。

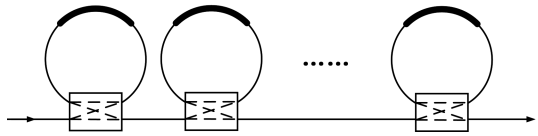


图 4　级联微环可调光学真延迟线基本结构

针对级联微环型可调延迟线带宽受限的问题，2021 年，Shan 等报道了基于反谐振点级联微环的硅基微波光子可调延迟线芯片[4]。芯片集成了 MZI 调制器、4 个级联可调微环、带宽可调的带通滤波器和光电探测器。器件结构和工作原理如图 5 所示。MZI 调制器通过双边带调制将微波信号转换到光域，再经过级联微环进行延迟，微环的反谐振波长位于双边带信号中一个边带的中心，片上滤波器滤出载波和经过延迟的边带，最终由锗探测器将光信号转换回微波信号。在级联的微环中，R_1～R_4 的单圈延迟分别为 20，20，40 和 80 ps。图 6 所示为不同耦合系数下 R_1 的传输谱和群延迟响应，可以看出在反谐振点附近平坦延迟带宽比谐振点大得多。

当耦合系数在0～1调节时，R_1工作在延迟连续调节状态，可实现0～20 ps的延迟连续调节。R_2～R_4的耦合系数只取0或1，即只需要调节为零延迟或单圈延迟状态。因此，4个微环结合，总共可实现0～160 ps延迟连续调节。由于R_2～R_4的延迟响应是平坦的，整个延迟线的延迟带宽只由工作于反谐振波长附近的R_1决定。与工作在谐振波长附近的微环延迟线相比，反谐振微环延迟线具有带宽大和延迟抖动小的优点，且有效降低了微环控制的复杂度，适用于大规模微波光子真延迟波束形成网络。单边带调制的方式进一步提高了延迟线的微波工作带宽，实验测得该延迟线带宽为16 GHz，延迟抖动小于6.2 ps。

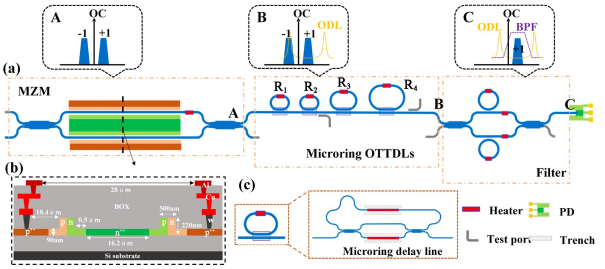
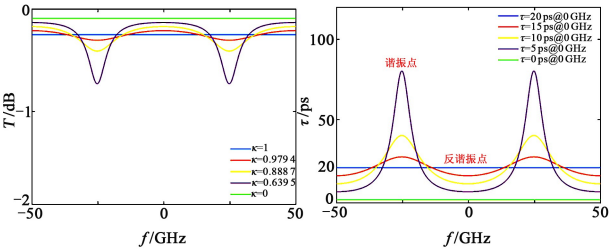


图5 器件结构和工作原理图。(a)反谐振微环延迟线结构和原理示意图；(b)MZI调制器的调制臂横截面图；(c)单个微环延迟线结构图[4]



(a) 模拟透射光谱 (b) 群延迟响应[4]

图6 逐渐调节MRR的等效耦合系数k时的模拟透射光谱和群延迟响应[4]

3.3 开关切换型可调光学真延迟线

开关切换型可调延迟线通过切换光开关的状态来改变光信号在波导中的传输路径的长度，输出光信号的延迟量随传输路径长度的变化而变化。图7所示为N级开关切换型延迟线的基本结构，由$N+1$个2×2光开关级联组成，相邻的光开关之间分别连接一对延迟波导。一对延迟波导包含一个长波导和一个短波导，短波导为参考臂，长波导与短波导延迟差即为该级可调的最大延迟量。控制2×2光开关的状态可以选择光载微波信号在长波导还是短波导传输，从而实现延迟调节。为减少延迟线级联光开关的数量，一般采用二进制法来设置每级的最大延迟量。若第1级的可调延迟量为τ，则第N级延迟单元的延迟量为$2^{N-1}\tau$。按照以上方法，对于此N级开关切换型可调延迟线，其最小延迟步进为τ，最大可调延迟量T为

$$T=\sum_1^N 2^{N-1}\tau=(2^N-1)\tau \tag{8}$$

因此，此延迟线也叫作N-bit可调延迟线。

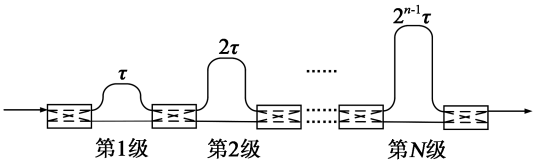


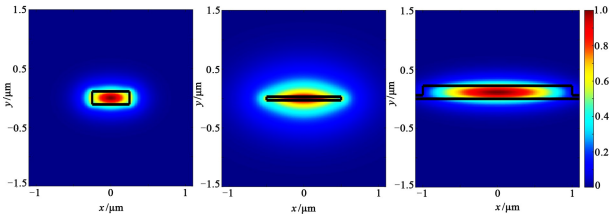
图7 开关切换型可调光学延迟线基本结构

开关切换型可调延迟线具有工作带宽大、控制简单、对环境温度不敏感等优点。但是由于延迟调节是离散的，要满足高精度、大范围延迟可调，就需要增加开关级数，即延迟位数。如果光开关消光比有限，多级开关会造成通道内泄漏噪声光信号的累积，降低信噪比，加剧延迟抖动[22]。一种有效的方法是在每两个光开关间加入可调光衰减器(Variable Optical Attenuator，VOA)来抑制泄漏的噪声光信号。2014年，Xie等报道了硅基首个纳秒量级7-bit可调延迟线。该芯片集成了基于p-i-n二极管的硅基VOA来抑制通道内的开关串扰，有效提高了信号的延迟质量。该延迟线芯片的延迟步进为10 ps，延迟调节范围为1.27 ns[23]。

开关切换型可调延迟线的损耗随延迟量增加而增加。图8(a)为常规单模硅波导(500 nm×220 nm)的模场分布图，可以看出模场与侧壁处交叠较大，导致较高的侧壁散射损耗。散射损耗也是延迟波导中最主要的损耗来源。为减小侧壁散射损耗，一方面可以通过提高制造工艺来降低波导的侧壁粗糙度，另一方面也可以通过设计延迟波导的结构来减少光模场与波导侧壁的交叠。2017年，Wang等报道了一种基于薄硅波导的开关切换型可调延迟线[24]。该芯片采用了厚度为60 nm的条形硅波导来实现延迟，为支持单模波导模式，将薄硅波导的宽度增加到1 μm，模场分布如图8(b)所示。可以看到光模场更多地泄露到波导周围的二氧化硅层中，与侧壁交叠面积较小，大大降低了波导的传输损耗。该延迟线芯片实现了7-bit的可调延迟，最大延迟量为1.28 ns，平均波导损耗为0.35 dB/cm。

2021年，Liu等报道了低损耗的4通道5 bit开

关切换型可调延迟线[25]。延迟波导采用脊型宽波导结构来减少散射损耗。波导宽度为 2 μm，厚度为 220 nm，其基模的模场分布如图 8(c)所示。由于该波导为多模波导，波导弯曲容易激发多模。为此，在弯曲波导部分将波导变窄并采用欧拉弯设计，将有效弯曲半径降到 5 μm 以下。最终，该延迟线芯片可实现最大 511.5 ps 的延迟量，插入损耗仅 6 dB，对应延迟波导损耗为 3 dB/ns。基于类似的波导结构，Hong 等通过引入欧拉弯和加宽波导的方法减小芯片尺寸和波导损耗[26]，实现 100 cm 长的螺旋型延迟波导，该延迟波导的最小弯曲半径为 10 μm，传输损耗仅 0.28 dB/cm。



(a)　0.5 μm×0.22 μm　(b)　1 μm×0.06 μm　(c)　2 μm×0.22 μm

图 8　三种横截面尺寸的硅波导模场分布图

开光切换型延迟线的延迟调节精度受限于延迟步进[26-27]，要实现延迟连续可调，一种方式是在开光切换型延迟线后增加微环延迟线[24]，利用微环实现延迟的精细、连续调节，结合开关切换型可调延迟量大的特点，可以实现连续、大范围的延迟调节。2018 年，Melati 等报道了一种基于可调 MZI 结构的连续可调延迟线结构[28]，如图 9 所示。该结构在输入和输出端采用两个 MZI 结构来实现可调耦合器，通过调节耦合器的耦合系数改变光在中间两个波导中传输的比例，实现输出光的延迟调节。若要保证所有的光能量从一个输出端口输出，两个光开关的耦合系数 K_1 和 K_2 必须满足 $K_1=K_2$ 或者 $K_1=1-K_2$ 的关系。实验中研究者利用这种结构实现了对 10 Gbit/s 的数据最大至 125 ps 的连续延迟调节。

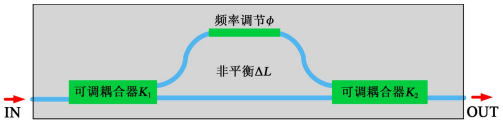


图 9　基于可调 MZI 的连续可调延迟单元[28]

4　微波光子波束形成网络架构

根据微波光子波束形成的原理，每个阵元都需要配备一个可调延迟线。此外，除一维波束形成外，还有二维波束形成、多波束形成等更复杂的波束形成网络。天线阵列规模的增加和波束数量的增加都会大大增加微波光子波束形成网络所需的可调延迟线数目和系统复杂度。近年来，研究者们提出了多种微波光子波束形成网络架构，通过延迟单元共用，并结合复用技术，来减少波束形成网络中所需的延迟线数量，降低微波光子波束形成器的系统复杂度。

由前文介绍可知，实现大范围、高精度的延迟调节需要增加可调延迟线中级联微环或者开关的数量，系统的复杂程度也会随之增加。为方便比较各种波束形成网络架构在不同天线阵列规模下的复杂度，引入延迟单元的概念，复杂度的比较因此转化为系统所需延迟单元数目的比较。在后面的介绍中，延迟单元可以为一个或多个微环、开关级联结构，其单个延迟单元的最大延迟量 ΔT 为对应阵列中相邻通道间所需的最大延迟差。

4.1　一维微波光子波束形成

一维微波光子波束形成的所有天线阵元排布在一条直线上。实现波束扫描需要在可调光学真延迟线阵列中引入一个可调的延迟差。一维微波光子波束形成根据有无共用延迟单元可分为两种架构。

4.1.1　无共用延迟单元架构

在延迟单元无共用的一维微波光子波束形成网络架构中，每个天线阵元发射信号的延迟量由单个延迟线独立控制，不同天线阵元所对应的延迟线没有共用的部分。因此各个阵元发射信号的延迟量可以独立地通过对应的光延迟线进行控制。对于阵元数为 N 的一维均匀天线阵列，阵元中延迟量大小呈线性变化，为减少系统中的延迟单元数，可在第 i 路采用包含 $i-1$ 个延迟单元的级联可调延迟线，则系统可实现的阵元间的最大延迟差为 ΔT，此时系统所需延迟单元的数量为 $N(N-1)/2$。

4.1.2　有共用延迟单元架构

根据一维均匀天线阵中任意两个相邻天线阵元的微波信号的延迟差相同的特点，有研究者提出利用二叉树型结构对不同通道的延迟单元进行共用，实现一维微波光子波束形成。对于阵元数为 N 的一维天线阵列，若采用二叉树型结构，二叉树级数为 $b=\log_2 N$，所需延迟单元的数量为 $b\times N/2$。由此可见，相比于无共用延迟单元的架构，此架构可以减少波束形成网络中的延迟单元数。

图 10 为 2007 年 Zhuang 等报道的基于二叉树结构和级联微环型延迟线的 1×8 波束形成网络芯片[29]。芯片集成了 12 个作为延迟单元的耦合系数

可调微环和 7 个可调光分束器作为二叉树结构的节点，连接上下级的可调延迟线。从输出通道 1 到通道 8，通道路径上微环的数量线性增加，实现了延迟量线性增加的一维波束形成网络。该架构对微环单元实现了共用，减少了波束形成网络需要的延迟单元数量，提高了系统的可扩展性。

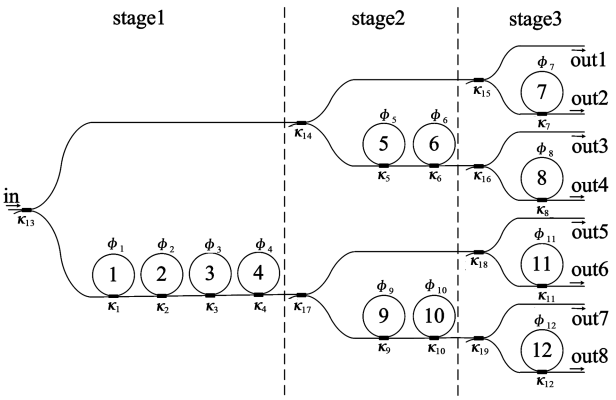


图 10 基于二叉树结构的 1×8 波束形成网络[29]

4.2 二维微波光子波束形成

二维微波光子波束形成能够独立控制波束在二维平面的发射角度，包括方向角和俯仰角。对于 $N\times N$ 的二维天线阵列，每行 N 个天线阵元间和每列 N 个天线阵元间需要引入两个互相独立可调的延迟差。若采用无共用延迟单元架构，整个系统至少需要 $N^2(N-1)/2$ 个延迟单元。为降低二维波束形成网络的复杂度，研究者使用共用延迟单元和波分复用的方法来减少延迟单元和延迟线的数量[15,30]。

4.2.1 延迟单元共用架构

图 11 所示为 2014 年 Maurizio Burla 等提出的基于延迟单元共用架构的 4×4 二维波束形成网络架构[30]。整个结构需要单波长的激光器。垂直方向延迟差由 1 组 4×1 二叉树型延迟网络调节，用来调节波束发射的俯仰角；水平方向延迟差由 4 组 4×1二叉树型延迟网络调节，用来调节波束发射的方向角，整个系统由 20 个微环型延迟单元构成。对于 $N\times N$ 二维天线阵列，采用二叉树架构，总的延迟延迟单元数为 $2b\times(N+1)$，其中 b 同样等于 $\log_2 N$。

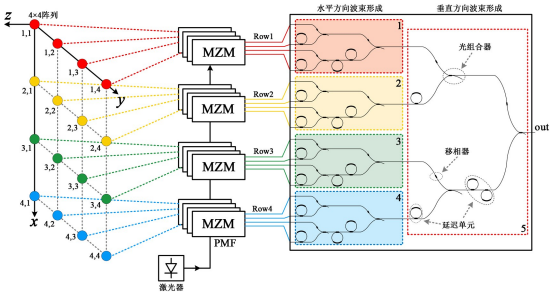
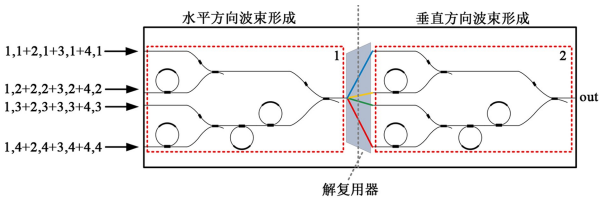


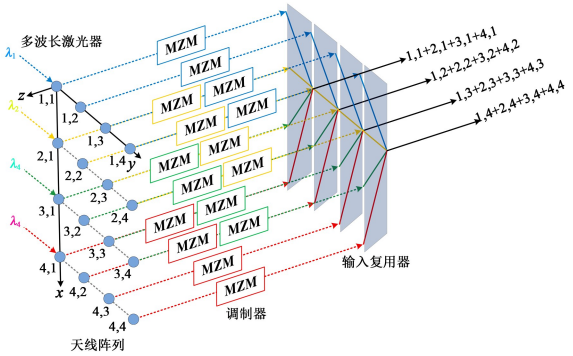
图 11 基于二叉树结构的二维波束形成网络[30]

4.2.2 波分复用架构

为进一步降低二维波束形成网络的延迟单元数目，提高系统可扩展性，研究者们提出将波分复用技术引入二维微波光子波束形成网络架构中[31]。2014 年，Maurizio 等报道了一种将延迟单元共用架构与波分复用结合的 4×4 二维波束形成网络芯片，结构如图 12(a)所示[30]。整个结构需要四个不同波长的激光器分别产生光载波，其中同一行阵元上的四个微波信号调制到同一波长的光载波上。经调制后 16 路信号首先通过波分复用器件合成 4 路多波长信号，其中同一列不同波长的 4 路光载微波信号合成 1 路，16 路光载微波信号与 4×4 天线阵列的对应关系如图 12(b)所示。4 路信号首先输入 4×1 二叉树型延迟线进行水平方向延迟差调节，这组延迟线对输入的 4 路多波长光载微波信号间的延迟差进行调节，实现波束接收方向角偏转。在输出端经解复用后分为 4 路不同波长的光载微波信号，输入另一组 4×1 二叉树型延迟线中，在不同波长信号间引入额外的延迟差，该延迟差用来调节波束接收的俯仰角。最终在输出端输出单路合成信号。



(a) 基于延迟单元共用和波分复用的 4×4 微波光子波束形成网络



(b) 16 路光载微波信号与 4×4 天线阵列的对应关系[30]

图 12 二维波束形成网络及微波信号与天线阵列的对应关系

对于 $N\times N$ 天线阵列而言，需要 N 个不同波长的激光器分别作为调制光载波，但只需要调节垂直方向和水平方向延迟差的两组 $1\times N$ 二叉树型延迟线，即可实现二维波束偏转。因此所需总的延迟单元数为 $b\times N$，其中 b 同样等于 $\log_2 N$，可见相比于前两种结构，延迟单元数大幅减少。当然，由于采用波分复用，系统中还需要加入 $N+1$ 的波分复用/解复用器件。虽然波分复用/解复用器件可以采用无源器件实现，但也增加了芯片的整体尺寸。

4.3　微波光子多波束形成

多波束形成能在一个天线阵列同时或者在极短的时间内向不同方向发射多个波束，在星载卫星通信[32]、地面无线基站等多用户接入无线通信场景中有应用需求。对于 $M\times N$ 多波束形成，其中 M 为波束数量，N 为阵元数，若应用简单并行的波束形成网络架构，则所需延迟单元的数目随形成波束的数目增加呈非线性增长。延迟单元数增加将导致波束形成器的尺寸和损耗增长，无法满足实际系统的需要。目前，研究者提出时分复用和多波束形成矩阵等方法来降低微波光子多波束形成的系统复杂度。

4.3.1　时分复用架构

基于时分复用的多波束形成通过快速改变波束形成网络中通道间延迟差来快速切换波束发射方向，从而在极短的时间间隔内向不同方向发射波束。因此，采用时分复用实现多波束形成，所需延迟线数目和单波束一样，大幅降低了系统复杂度。但是，这种方法要求可调光延迟线的响应时间和信号时长非常短，对可调光学真延迟线的实现和控制提出了较高要求，且适用场景受限。

4.3.2　多波束形成矩阵架构

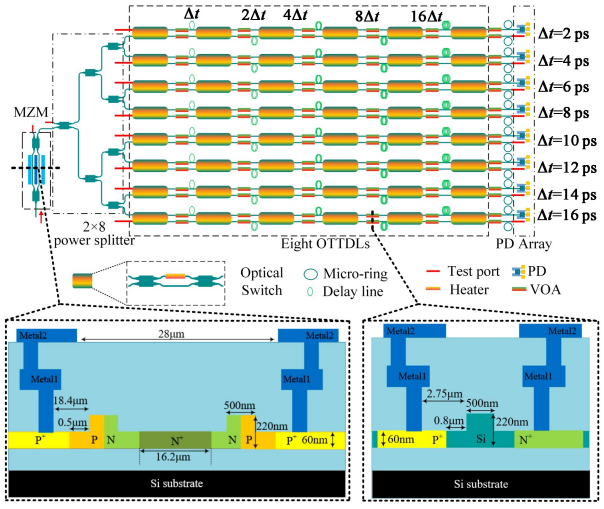
在传统电域的微波相控阵中，有时会应用特殊的多波束矩阵实现多波束形成，如巴特勒矩阵(Butler Matrix)、伯拉斯矩阵(Blass Matrix)和诺伦矩阵(Nolen Matrix)等。采用上述矩阵，虽然多波束间具有固定的角度关系，不可灵活调节，但有效降低了射频移相器数目。因此，研究人员在光域构建类似的多波束形成矩阵，来实现微波光子多波束形成[33-34]。由于此类矩阵的核心是利用 2×2 耦合器中直通端和交叉端相位差 90°来构建多波束，并不是采用真延迟线结构，多波束同样存在波束斜视问题。因此，采用多波束矩阵方法只能对窄带微波信号实现多波束形成。

5　集成微波光子波束形成器

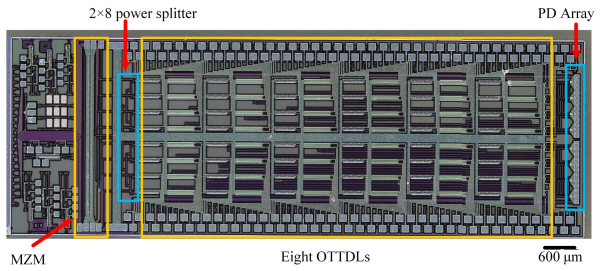
5.1　微波光子波束形成器集成芯片

微波光子波束形成器除包含可调光学真延迟线阵列外，还需要激光器、调制器、滤波器和光电探测器等器件。目前，绝大多数的研究成果聚焦于将延迟线进行芯片化，但系统整体还是比较庞大，无法体现集成化优势。光电子集成技术的逐渐成熟，使得微波光子波束形成器也开始朝单片集成或者混合集成方向发展[35]，也有研究者提出了将波束形成网络芯片和天线阵列进行集成的方案[36]。下面介绍近年来两个最具有代表性的全集成微波光子波束形成芯片。

2020 年，Zhu 等报道了基于 SOI 平台的首个单片集成微波光子波束形成器芯片[5]。该芯片集成了 MZI 调制器、基于开关切换型的 8 通道可调光学延迟线阵列和 8 通道光电探测器阵列。芯片结构图和显微镜照片如图 13(a)和(b)所示，整体尺寸仅 11.0 mm×3.9 mm。8 通道延迟线的最小延迟步进从 2～16 ps 线性增长，每个通道的延迟线都由以本通道的最小延迟步进为基准、延迟量逐级倍增的延



(a)　结构图

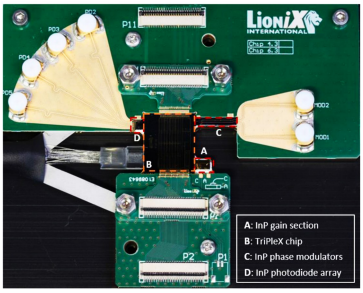


(b)　显微镜照片

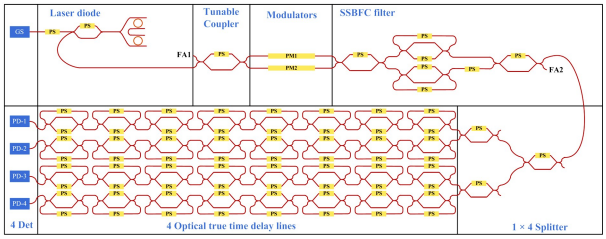
图 13　八通道开关型延迟线微波光子波束形成网络[5]

迟单元组成。该微波光子波束形成器的射频工作带宽覆盖 8～18 GHz 的范围，波束偏转角度覆盖范围为－75.51°～75.64°，波束切换时间为 56 μs。芯片总功耗为 960 mW。该芯片实现了除激光器外所有器件的单片集成，具有尺寸紧凑、功耗低、稳定性高的优点，可满足未来宽带相控阵天线的要求。

2021 年，Tsokos 等报道了基于 InP 芯片和 Si_3N_4 芯片混合集成的 1×4 波束形成网络芯片[7]。该芯片集成了 InP-Si_3N_4 外腔激光器、InP 相位调制器、Si_3N_4 全载波单边带滤波器、4 通道级联微环可调光学延迟线和 InP 光电探测器阵列。芯片照片如图 14(a)所示，结构图如图 14(b)所示。其中外腔激光器利用 InP 反射型半导体光放大器作为增益部分(GS)，使用基于 TriPleX 的 Si_3N_4 波导扩展腔长，采用基于 MZI 结构的可调耦合器将光耦合输出激光腔，同时通过 MZI 之前的附加移相器调整光的相位。相位调制器将微波信号对外腔激光器输出的光载波进行调制，产生双边带光载微波信号。双边带信号经片上滤波器滤除一个边带再经基于 MZI 可调耦合器结构的 1×4 光分束器分束后输入 4 通道级联微环可调延迟线，使通道间的光载微波信号获得延迟差，最后由 InP 光电探测器阵列将光载微波信号转换回电域。InP 芯片和 Si_3N_4 芯片通过端面直接耦合，耦合损耗为 4.9 dB。芯片实验测试了 5 和 10 GHz 微波信号波束形成性能，波束偏转角度覆盖 45°～135°，测试结果和理论值差异较小，主要由噪声导致。



(a) 实物图



(b) 原理图

图 14 1×4 混合集成光子波束形成网络芯片[7]

上述两种集成微波光子波束形成器芯片分别采用了单片集成和多片混合集成的方案。在 SOI 平台上可单片集成除激光器外的所有器件，且能获得较好的系统性能。激光器集成目前主要通过结合Ⅲ-Ⅴ增益材料来实现，包括外延生长、异质集成和混合集成等方式，其中采用混合集成的方式最为成熟，也能获得较优的激光器性能[35]。Si_3N_4 平台只能实现无源器件和热调器件，因此激光器、调制器和探测器都只能采用多芯片混合集成的方式来实现微波光子波束形成器。该方案给系统集成和封装工艺带来了巨大挑战，芯片间耦合损耗较大，但优点是能够利用各自材料平台的优点来对各个类型的器件进行单独优化，获得最优的器件性能。

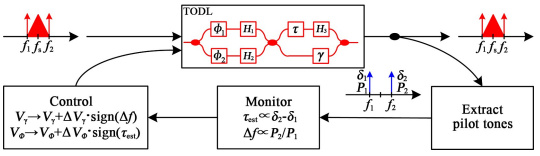
5.2 微波光子波束形成器自动化控制

从上文可知，随着微波光子波束形成器的规模增加，可调延迟线数量的增加导致系统复杂度不断提升。这主要是由于集成芯片中工艺误差、对环境温度敏感等因素导致加工后芯片中每个单元器件的初始状态是随机，使用前需要对芯片中每个单元的状态进行标定才能使芯片正常工作。随着芯片规模的扩大和单元数目的增加，导致状态标定过程复杂且费时，并且由于热串扰等问题，芯片中各个器件的状态可能会相互影响。此外，不同环境温度下状态也会发生漂移，需要控制环境温度恒定或者获得不同温度下的器件状态查找表。这也是集成光电子领域的一大共性问题。因此，要开发一种对微波光子波束形成器中各个单元快速、自动标定的方法，以获得各个延迟量下对应的工作电压[37]，简化标定过程，便于对大规模波束形成网络芯片进行控制。

近年来研究者们针对这一问题进行探索，提出并应用了零相位误差的光开关[38]来简化标定过程，提出新的控制算法实现自动化标定[39]，并在尽量不引入过多分光损耗的情况下对延迟量进行实时监控和校正[40-41]。下面具体介绍两个代表性工作。

2018 年，Duarte 等报道了一种自动调节并监控集成可调延迟线状态的方法[41]。可调延迟线结构如图 15 中 TODL 框图所示，由一个基于 MZI 结构的可调耦合器和一对延迟波导构成，延迟量通过可调耦合器的耦合比进行调节，原理与图 9 中结构类似。其中可调耦合器中的移相器 φ_1 和 φ_2 为载流子注入型移相器，移相器 H_1 和 H_2 为金属热调移相器，通过调节这四个移相器的移相量来调节可调耦合器的耦合系数，从而调节延迟线的延迟量。延迟

波导对中延迟臂与参考臂的延迟差为 T。参考臂上的载流子注入型移相器 Y 和延迟臂上的金属热调移相器 H_3 可以控制可调延迟线的延迟响应和幅频响应的中心波长位置。整个自动反馈控制系统的工作过程如图 15 所示：首先在输入光载微波信号的带外两侧加入一对关于输入载波频率对称的双音信号 f_1 和 f_2，经过延迟后的输出信号的一部分被提取出来输入监控系统（图 15 中的 Extract 部分）并提取出双音信号，监控系统（图 15 中的 Monitor 部分）根据双音信号 f_1 和 f_2 功率比值来估算可调延迟线幅频响应曲线的中心频率相对于输入信号频率的偏移量（$\Delta f \propto P_2/P_1$），控制系统（图 15 中的 Control 部分）根据计算的频率偏移量 Δf 来改变移相器 γ 或 H_3 的反馈电压（$\Delta V_\gamma \cdot \mathrm{sign}(\Delta f)$），直至反馈电压接近于 0 时停止。另外，监控系统根据输出信号中双音信号 f_1 和 f_2 的相位差可计算出输入信号的实时延迟量（$\tau_{est} \propto \delta_2 - \delta_1$），根据计算的实时延迟量和预设延迟量差值，控制系统改变移相器 φ_1 和 φ_2 或 H_1 和 H_2 的反馈电压（$\Delta V_\phi \cdot \mathrm{sign}(\tau_{est})$），直至计算延迟量与预设延迟量差值接近 0 时整个循环停止。



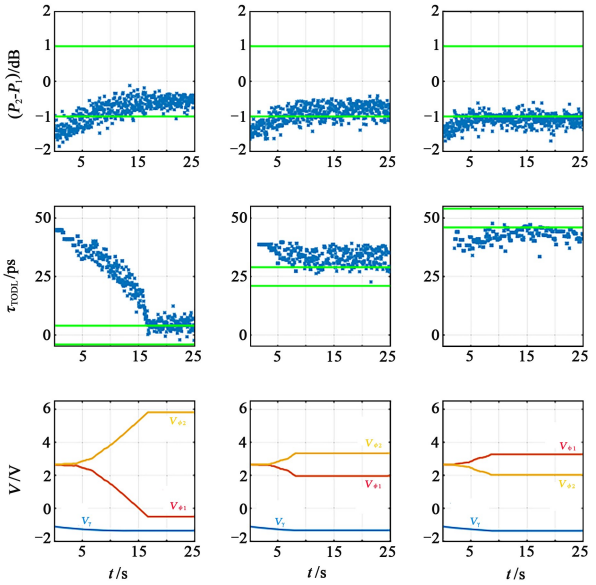
（a）$\tau_{est}=0$ ps　（b）$\tau_{est}=25$ ps　（c）$\tau_{est}=50$ ps

图 15　可调延迟线系统自动反馈控制系统示意图[41]

研究者实验验证了上述自动调节延迟线中心波长和延迟量方案的可行性，结果如图 16 所示。实验中分别将预设延迟量为 0，25 和 50 ps，该自动反馈控制系统均能将特定输入信号的延迟量自动调节到预设延迟量±5 ps 以内。对载流子注入型移相器和金属热调移相器进行移相，都可以达到相似的结果，证明了算法的通用性。

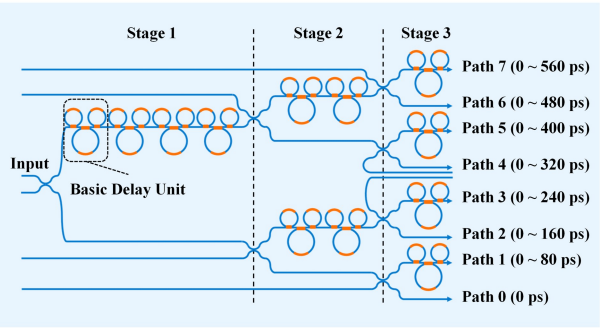
2022 年，孙寒玮等报道了一种应用于基于二叉树结构的 1×8 波束形成网络芯片的自动标定方法[39]。芯片结构如图 17(a)所示，每个延迟单元包含一组三微环结构，工作于微环的反谐振波长点，每个微环的耦合系数和谐振波长都可调，结构如图 17(b)所示。

自动化标定过程包括光谱标定和延迟谱标定两部分。自动化标定系统中的光功率计用于光传输谱测试，矢量网络分析仪（VNA）用于微波延迟谱测试，两条测试链路可通过仪器控制程序进行快速切换。

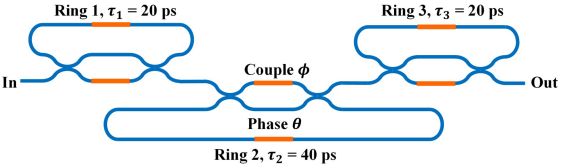


（a）$\tau_{set}=0$ ps　（b）$\tau_{set}=25$ ps　（c）$\tau_{set}=50$ ps

图 16　集成可调延迟线自动反馈控制测试结果[41]



（a）　基于二叉树结构 1×8 波束形成网络芯片结构



（b）　三微环延迟单元[39]

图 17　芯片结构图和三微环延迟单元

自动化标定算法如图 18 所示，每轮优化只选取 1×8 波束成形网络中的一个通道，逐个优化微环状态。以微环数量最多的 Path 7 为例，光谱优化阶段分为以下四个步骤：

（1）测试 Path 7 上 21 个微环上移相器的热调效率，确定芯片上热调器件的功率可调范围。

（2）标定微环耦合系数 K 为 0 和 1 时 MZI 上移相器功率。根据微环谐振峰的品质因子 Q 在耦合系数 K 为 0 和 1 的不同，微环 $K=0$ 状态通过微

环谐振点消光比最小为判断依据，微环 $K=1$ 状态以微环传输谱均方差(MSE)最小为判断依据。

(3) 标定微环相位移相器功率。对每个微环谐振器的相位移相器功率进行标定，使得微环调节到任意耦合系数 K 时，微环的相位移相器自动调整以保证微环反谐振点和工作波长对齐。

(4) 耦合系数标定和相位标定迭代。对微环MZI臂上移相器功率和微环相位移相器功率多次迭代，最终实现微环耦合系数和相位的同时精确校准。

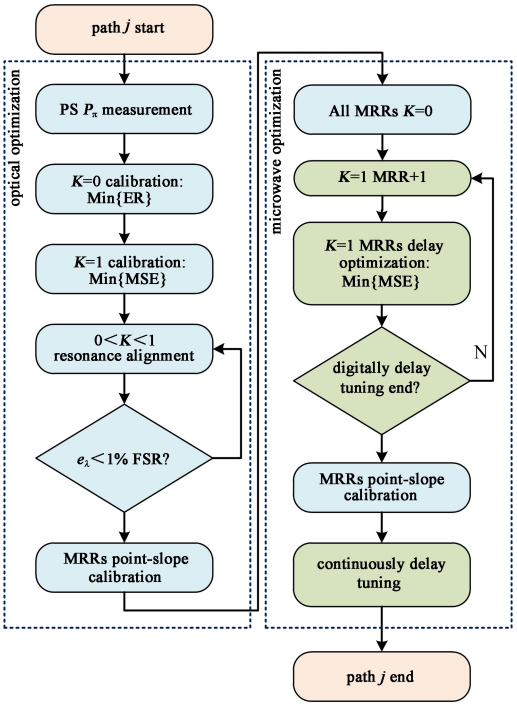


图 18 波束形成网络芯片自动化标定算法[39]

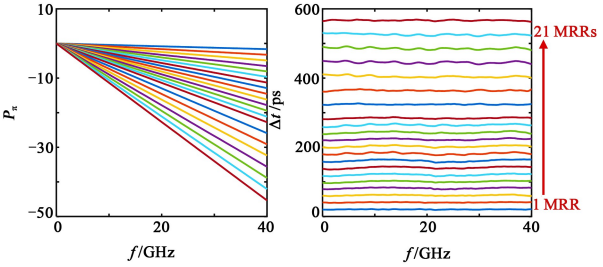
光谱优化阶段对 Path 7 中的微环进行了逐一标定，过程中其他微环调为 $K=0$ 状态。每一级只需对其中一个微环进行连续耦合系数的标定，其他微环只需要标定 $K=0$ 和 1 的移相器功率。由于微环之间存在较大的热串扰，当多个微环上电后，状态会相互影响。为解决此问题，他们又加入微波延迟校准来进行进一步优化：

(1) 根据要调节的延迟量，计算离散调节微环和每级延迟线中的一个连续调节微环延迟量。

(2) 调节离散延迟微环状态，实现 20 ps 的整数倍的延迟量。每增加一个 $K=1$ 状态的微环，优化所有微环状态以消除微环间的热串扰。

(3) 利用光谱测试，修正需要连续调节的微环的 MZI 臂上移相器和微环相位移相器的功率关系，消除离散调节微环带来的热串扰。最后调节连续延迟微环的状态，使延迟量准确达到目标延迟量。

利用上述系统和配套自动化控制算法对最长路径 Path 7 进行测量，研究者得到了如图 19 所示的实验结果。图 19(a)的微波相位响应表现出良好的线性特性，与图 19(b)中平坦的微波延迟响应相对应。最长延迟路径中共 7 级三微环延迟单元，总计 21 个微环。实验中通过微波延迟响应优化测定了最大 560 ps 的可调延迟量，结果显示在 0～40 GHz 微波频率范围内的延迟抖动小于 11.2 ps。若仅考虑和微环延迟连续调节相同的带宽，即 0～8 GHz 范围内，延迟抖动小于 7.6 ps，可见本系统可实现大带宽、低延迟抖动的微波光子延迟线的自动化标定测试工作。



(a) 微波相位响应 (b) 延迟响应

图 19 级联微环延迟线离散调节的微波相位响应和延迟响应[39]

6 总结与展望

集成微波光子波束形成芯片经过十多年的发展，在芯片规模、性能和系统应用方面得到了快速发展。在材料平台方面，SOI 和 Si_3N_4 平台已成为集成微波光子波束形成器的最佳平台。在延迟线类型方面，目前开关切换型可调真延迟线由于其对温度不敏感、控制简单的优点，被认为是大规模相控阵网络中应用的首选。同样，开关切换型可调真延迟线存在尺寸大、延迟步进大的缺点。级联微环型可调真延迟线在尺寸和延迟精度上具有一定的优势，并能跟波分复用技术结合来降低二维或多波束形成系统的复杂度。因此，基于级联微环型可调真延迟的波束形成芯片可能是未来的趋势，但是微环的温度敏感性和大规模微环的快速自动标定问题仍有待解决。

目前，集成微波光子波束形成器距离实际应用还有一定距离，还需要在如下方面进行提升。(1)降低芯片损耗：优化器件设计和制备工艺，进一步降低

延迟波导、3 dB 分光器、光纤耦合器等单元器件的损耗；开发适合微波光子波束形成应用的低噪声片上光放大技术，补偿芯片整体损耗。(2)扩大网络规模：提出可扩展的二维波束形成和多波束形成网络新架构，减少可调延迟线数量；开发多材料异质异构集成技术和封装工艺，充分利用 InP 平台、SOI 平台和 Si_3N_4 平台各自的优势，实现包括激光器、调制器、可调光学真延迟线、滤波器、光电探测器等器件在内的系统集成。(3)智能光电融合：开发基于片上光功率监控的微波光子波束形成器自动标定方法，借助神经网络等手段实现智能化控制，简化标定过程；开发光芯片与驱动控制芯片、射频芯片、天线等单片集成或 3D 封装技术，实现系统整体小型化。上述技术的突破将大幅提高集成微波光子波束形成网络芯片的功能和规模，推动微波光子波束形成网络芯片走向实用化。

参考文献：

[1] Pan S, Zhang Y. Microwave photonic radars [J]. J. Lightwave Technol., 2020, 38(19): 5450-5484.

[2] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nat. Photonics, 2019, 13(2): 80-90.

[3] Cao Z, Tessema N, Latkowski S, et al. Integrated remotely tunable optical delay line for millimeter-wave beam steering fabricated in an InP generic foundry[J]. Opt. Lett., 2015, 40(17): 3930-3933.

[4] Shan W, Lu L, Wang X, et al. Broadband continuously tunable microwave photonic delay line based on cascaded silicon microrings[J]. Opt. Express, 2021, 29(3): 3375-3385.

[5] Zhu C, Lu L, Shan W, et al. Silicon integrated microwave photonic beamformer[J]. Optica, 2020, 7(9): 1162-1170.

[6] Liu Y, Wichman A R, Isaac B, et al. Ultra-low-loss silicon nitride optical beamforming network for wideband wireless applications[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2018, 24(4): 1-10.

[7] Tsokos C, Andrianopoulos E, Raptakis A, et al. True time delay optical beamforming network based on hybrid InP-silicon nitride integration[J]. J. Lightwave Technol., 2021, 39(18): 5845-5854.

[8] Roeloffzen C G H, Hoekman M, Klein E J, et al. Low-loss Si_3N_4 TriPleX optical waveguides: Technology and applications overview [J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2018, 24(4): 1-21.

[9] Hansen R C. Phased Array Antennas[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.

[10] Zhou L, Wang X, Lu L, et al. Integrated optical delay lines: A review and perspective[J]. Chin. Opt. Lett., 2018, 16(10): 101301.

[11] Urick V J, Williams K J, McKinney J D. Fundamentals of Microwave Photonics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.

[12] Hu G, Cui Y, Yang Y, et al. Optical beamformer based on diffraction order multiplexing (DOM) of an arrayed waveguide grating[J]. J. Lightwave Technol., 2019, 37(13): 2898-2904.

[13] Zhang X, Zhao M, Jiao Y, et al. Integrated wavelength-tuned optical mm-wave beamformer with doubled delay resolution[J]. J. Lightwave Technol., 2020, 38(8): 2353-2359.

[14] Ye X, Zhang F, Pan S. Compact optical true time delay beamformer for a 2D phased array antenna using tunable dispersive elements[J]. Opt. Lett., 2016, 41(17): 3956-3959.

[15] Kumar R, Raghuwanshi S K. Efficient 2D optical beamforming network with sub partitioning capability based on raised cosine chirped fiber grating and Mach-Zehnder delay interferometer[J]. IEEE Photonics J., 2021, 13(3): 1-11.

[16] Soref R A, De Leonardis F, Passaro V M N. Integrated on-chip Bragg time-delay system for thermo-optical control of a microwave antenna[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(24): 5849-5856.

[17] Zhang J, Yao J. Photonic true-time delay beamforming using a switch-controlled wavelength-dependent recirculating loop [J]. J. Lightwave Technol., 2016, 34(16): 3923-3929.

[18] 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 J. Sel. Top. Quantum Electron., 2018, 24(4): 1-9.

[19] Liu Y, Wichman A, Isaac B, et al. Tuning optimization of ring resonator delays for integrated optical beam forming networks[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(22): 4954-4960.

[20] Cardenas J, Foster M A, Sherwood-Droz N, et al. Wide-bandwidth continuously tunable optical delay line using silicon microring resonators [J]. Opt. Express, 2010, 18(25): 26525-26534.

[21] Khurgin J B, Morton P A. Tunable wideband optical delay line based on balanced coupled resonator structures[J]. Opt. Lett., 2009, 34(17): 2655-2657.

[22] Chen Z, Zhou L, Chen J. Analysis of a silicon reconfigurable feed-forward optical delay line[J]. IEEE Photonics J., 2013, 6(1): 1-11.

[23] Xie J, Zhou L, Li Z, et al. Seven-bit reconfigurable optical true time delay line based on silicon integration[J]. Opt. Express, 2014, 22(19): 22707-22715.

[24] Wang X, Zhou L, Li R, et al. Continuously tunable ultra-thin silicon waveguide optical delay line[J]. Optica, 2017, 4(5): 507-515.

[25] Liu Y, Lu L, Chen J, et al. Silicon integrated low-loss 4-channel 5-bit optical true-time delay lines[C]// Proc. of the 26th Optoelectronics and Communications Conference (OECC), Optical Society of America, 2021: paper W3C. 3.

[26] Hong S, Zhang L, Wang Y, et al. Ultralow-loss compact silicon photonic waveguide spirals and delay lines [J]. Photonics Res., 2022, 10(1): 1-7.

[27] Zheng P, Wang C, Xu X, et al. A seven bit silicon optical true time delay line for Ka-band phased array antenna[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(4): 1-9.

[28] Melati D, Waqas A, Mushtaq Z, et al. Wideband integrated optical delay line based on a continuously tunable Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2018, 24(1): 1-8.

[29] Zhuang L, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Single-chip ring resonator-based 1×8 optical beam forming network in CMOS-compatible waveguide technology[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2007, 19(15): 1130-1132.

[30] Burla M, Marpaung D A I, Zhuang L, et al. Multiwavelength-integrated optical beamformer based on wavelength division multiplexing for 2-D phased array antennas[J]. J. Lightwave Technol., 2014, 32(20): 3509-3520.

[31] Cheng Q, Zheng S, Zhang Q, et al. An integrated optical beamforming network for two-dimensional phased array radar [J]. Opt. Commun., 2021, 489: 126809.

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

[33] Reza M, Mohammad A, Serafino G, et al. Design of an integrated-photonics RF beamformer for multi-beam satellite synthetic aperture radar[C]// IEEE Proc. of the 2020 Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2020: 87-90.

[34] Tsokos C, Kouloumentas C, Mylonas E, et al. Analysis of a multibeam optical beamforming network based on blass matrix architecture[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36 (16): 3354-3372.

[35] Xiang C, Jin W, Huang D, et al. High-performance silicon photonics using heterogeneous integration[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2022, 28(3): 1-15.

[36] Dhillon A S, Radi B, Liboiron-Ladouceur O. An analysis of RF on-chip antennas in Si-based integrated microwave photonics[J]. IEEE Photonics J., 2021, 13(2): 1-18.

[37] Pan B, Zheng S, Ren C, et al. A structure optimization for integrated binary reconfigurable true time delay lines[J]. Opt. Commun., 2022, 502: 127439.

[38] Song L, Chen T, Liu W, et al. Toward calibration-free Mach-Zehnder switches for next-generation silicon photonics [J]. Photonics Res., 2022, 10(3): 793-801.

[39] 孙寒玮, 陆梁军, 金敏慧, 等. 级联反谐振微环波束成形网络芯片自动标定研究[J]. 中国激光, 2022, 49(17):.
Sun Hanwei, Lu Liangjun, Jin Minhui, et al. Automatic calibration of anti-resonant microring delay lines based optical beamforming network chip[J]. Chinese J. of Lasers, 2022, 49 (17):.

[40] Choo G, Madsen C K, Palermo S, et al. Automatic monitor-based tuning of an RF silicon photonic 1×4 asymmetric binary tree true-time-delay beamforming network [J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(22): 5263-5275.

[41] Duarte V C, Ribeiro C F, Prata J G, et al. Reconfigurable monitoring and control system for tunable optical delay lines [J]. Opt. Lett., 2018, 43(11): 2543-2546.

作者简介:

倪子恒(1998—),男,2020 年本科毕业于天津大学,现为博士研究生,研究方向为硅基集成微波光子波束形成网络芯片;

陆梁军(1988—),男,2016 年博士毕业于上海交通大学,现为上海交通大学副教授,主要研究方向为硅基光电子学;

刘源彬(1995—),男,2018 年本科毕业于电子科技大学,现为博士研究生,主要研究方向为硅基光学真延迟线;

陈建平(1962—),男,1993 年博士毕业于上海交通大学,现为上海交通大学特聘教授,主要研究方向为硅基光电子集成技术、宽带光子信息处理技术与系统应用、光纤时间频率同步技术;

周林杰(1980—),男,浙江人,2007 年博士毕业于香港科技大学,现为上海交通大学特聘教授,主要研究方向为光电子器件与芯片。