光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.018

基于微波光子的光学波束合成理论与仿真

庚财斌*，梁　旭，王　超，孙力军

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 光学波束合成技术是利用光信号作为载波携带射频信息而实现的一种新型的宽带射频波束合成技术，即用光信号来传输以及分配射频信号，实现射频信号的光波控制。文章介绍了基于微波光子的光学波束合成原理，重点介绍了光非相干和光相干波束合成架构，通过详细的理论公式推导以及软件仿真，表明上述两种光学波束合成架构可对多天线接收信号实现信号合成。针对目前大阵列天线单元系统对光学波束合成技术的迫切需求，利用光相干和非相干波束合成的各自优势，提出了一种适用于千量级天线阵列规模的光学波束合成架构，为光学波束合成技术在相控阵雷达、电子对抗等领域的应用提供解决方案。

关键词： 微波光子；非相干；相干；波束合成

中图分类号： TN911.74　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0395－07

Theory and Simulation of Optical Beamforming Based on Microwave Photonics

YU Caibin, LIANG Xu, WANG Chao, SUN Lijun

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Optical beamforming technology is a new type of broadband RF beamforming technology, which uses optical signal as the carrier to carry RF information, which means it uses optical signal to transmit and distribute RF signal to realize the control of RF signal. In this paper, the principle of optical beamforming based on microwave photonics is introduced, focusing on the optical incoherent beamforming architecture and optical coherent beamforming architecture. Through detailed theoretical formula derivation and software simulation, it is shown that the above two kinds of optical beamforming architectures can realize the signal synthesis for the received signals of multiple antennas. In view of the urgent demand of large array antenna units system for optical beamforming technology, proposed is an optical beamforming architecture suitable for the scale of thousand antennas by using the advantages of optical coherent and incoherent beamforming. It provides solution for the application of optical beamforming technology in phased array radar, electronic countermeasure and other fields.

Key words: microwave photonics; incoherent; coherent; beamforming

0　引言

波束合成技术是指通过调节多个天线接收信号的相位，使信号进行有效的幅度和相位加权，获得在特定指向方向上的最大信号输出。波束合成技术已被广泛用于机载通信、5G通信、相控阵雷达以及电子对抗系统中[1-3]。传统电学波束技术中的相位加权机制带来的“孔径效应”严重制约了波束合成系统的瞬时带宽，成为制约宽带系统性能提升的瓶颈[4-5]。而基于光学真延时机制的光学波束合成成为解决这一瓶颈的核心技术。与传统的电学波束合成技术相比，光学波束合成在带宽、体积、重量、抗电

收稿日期：2021－03－17.

基金项目：重庆市博士后科学基金项目（CSTC2019jcyj-bshx0103）.

* **通信作者：**庚财斌

磁干扰、形成波束宽度等方面具有更大的优势[6-7]。光学波束合成技术主要有两种架构：多波长非相干波束合成和单波长相干波束合成。非相干波束合成是采用多个激光源发出的不同波长光信号作为载波，在幅度上进行信号加权，该方法的优点是易于实现且系统稳定性好，缺点是激光器波长通道数量少，不适用于大规模的天线阵列系统。相干波束合成是采用单个激光源发出的光信号分路后作为载波，利用光的干涉效应进行信号的加权，该方法的优点是不受激光器波长通道数量的限制，能满足大规模天线阵列的应用需求，缺点是系统对环境因素比较敏感，相应的控制方法较为复杂。

本文通过对这两种方法进行理论公式推导，并进行软件模拟仿真，给出了非相干波束合成和相干波束合成的应用条件。在分析当前技术发展趋势的基础上，利用光相干和非相干波束合成各自的优势，提出了一种适用于千量级天线阵列规模的光学波束合成架构，可为光学波束合成技术在新一代光电系统中的应用提供解决方案。

1 波束合成理论公式推导

1.1 射频域电波束合成

假设两个天线单元接收到的射频信号分别为

$$\begin{cases} s_1 = V_1\cos(\omega_{RF}t+\phi_1) \\ s_2 = V_2\cos(\omega_{RF}t+\phi_2) \end{cases} \tag{1}$$

两个射频信号通过功分器合成，合成后的射频信号为

$$\begin{aligned} S_{RF} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(s_1+s_2) = \\ &\frac{1}{\sqrt{2}}[V_1\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+V_2\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)] = \\ &\frac{1}{\sqrt{2}}[V_1\cos(\omega_{RF}t)\cos\phi_1 - V_1\sin(\omega_{RF}t)\sin\phi_1 + \\ &V_2\cos(\omega_{RF}t)\cos\phi_2 - V_2\sin(\omega_{RF}t)\sin\phi_2] = \\ &\frac{1}{\sqrt{2}}[\cos(\omega_{RF}t)(V_1\cos\phi_1+V_2\cos\phi_2) - \\ &\sin(\omega_{RF}t)(V_1\sin\phi_1+V_2\sin\phi_2)] \end{aligned} \tag{2}$$

设 $A=(V_1\cos\phi_1+V_2\cos\phi_2)$，$B=(V_1\sin\phi_1+V_2\sin\phi_2)$，则式(2)可以写为

$$\begin{aligned} S_{RF} &= \frac{1}{\sqrt{2}}[A\cos(\omega_{RF}t)-B\sin(\omega_{RF}t)] = \\ &\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{A^2+B^2}\left[\frac{A}{\sqrt{A^2+B^2}}\cos(\omega_{RF}t) - \right. \\ &\left.\frac{B}{\sqrt{A^2+B^2}}\sin(\omega_{RF}t)\right] = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{A^2+B^2}\cdot \\ &[\cos\Phi\cos(\omega_{RF}t)-\sin\Phi\sin(\omega_{RF}t)] = \\ &\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos(\phi_1-\phi_2)}\cos(\omega_{RF}t+\Phi) \end{aligned} \tag{3}$$

则接收器接收到合成射频信号的平均功率为

$$P_{RF} = \frac{(S_{RF}/\sqrt{2})^2}{R} = \frac{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos(\phi_1-\phi_2)}{4R} \tag{4}$$

由式(4)可以看出，当两个射频信号的幅度和相位相等时，即 $\phi_1=\phi_2$，$V_1=V_2=V$ 时，其合成功率为

$$P_{RF} = \frac{(V_1+V_2)^2}{4R} = \frac{V^2}{R} \tag{5}$$

与单独的两个射频信号功率直接相加时相等，即：

$$P'_{RF} = \frac{(V_1/\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(V_2/\sqrt{2})^2}{R} = \frac{V^2}{R} \tag{6}$$

故，在射频域电信号合成时，如果不考虑传输链路以及合路器的附加损耗，只有相等的两个射频信号才能实现能量的无损合成。

1.2 光非相干波束合成

假设上述两个射频信号经过两个波长分别为 ω_1，ω_2 的 E/O 转换后，其输出光场可表示为

$$E_1 = \sqrt{P_1}\,e^{j(\omega_1 t+\varphi_1)}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\right] \tag{7}$$

$$E_2 = \sqrt{P_2}\,e^{j(\omega_2 t+\varphi_2)}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\right] \tag{8}$$

式中，P_1，P_2 为两束光的光强，$\beta_1=V_1/V_{\pi 1}$，$\beta_2=V_2/V_{\pi 2}$ 为调制深度，其中 $V_{\pi 1}$，$V_{\pi 2}$ 为调制器的半波电压。两束光经过波分复用器合成，不考虑传输损耗及波分复用器附加损耗，波分复用器的输出光场可表示为

$$\begin{aligned} E_{out} &= E_1+E_2 = \\ &\sqrt{P_1}\,e^{j(\omega_1 t+\varphi_1)}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\right]+ \\ &\sqrt{P_2}\,e^{j(\omega_2 t+\varphi_2)}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\right] \end{aligned} \tag{9}$$

该光场进入响应度为 $\mathcal{R}$ 的光电探测器后，转换的光电流可表示为

$$\begin{aligned} I_{out} &= \mathcal{R}(E_{out}E_{out}^*) = \mathcal{R}(E_1+E_2)(E_1+E_2)^* = \\ &\mathcal{R}\left\{2P_1\cos^2\left[\frac{\pi}{4}+\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\right]+\right. \end{aligned}$$

$$2P_2\cos^2\left[\frac{\pi}{4}+\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\right]+4\sqrt{P_1P_2}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\right]\cdot\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\right]\cos(\Delta\omega t+\varphi_1-\varphi_2)\Big\} \tag{10}$$

式中，由于探测器无法响应两个波长的差频项（频差高达上百吉赫兹），即第三项为零，因此，其输出可以表达为

$$I_{out}=2\mathcal{R}P_1\cos^2\left[\frac{\pi}{4}+\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\right]+2\mathcal{R}P_2\cos^2\left[\frac{\pi}{4}+\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\right]=\mathcal{R}(P_1+P_2)-\mathcal{R}P_1\sin[2\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)]-\mathcal{R}P_2\sin[2\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)] \tag{11}$$

上式去掉直流项，在小信号调制近似下，交流项可表示为

$$I_{AC}=\mathcal{R}P_1\sin[2\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)]+\mathcal{R}P_2\sin[2\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)]=2\mathcal{R}P_1\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+2\mathcal{R}P_2\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)=2\mathcal{R}\pi\sqrt{(P_1\beta_1)^2+(P_2\beta_2)^2+2(P_1P_2\beta_1\beta_2)\cos(\phi_1-\phi_2)}\cos(\omega_{RF}t+\Phi) \tag{12}$$

假设两个电光转换单元相同，即，$P_1=P_2=P$，$V_{\pi1}=V_{\pi2}=V_\pi$，那么上式可表达为

$$I_{AC}=\frac{2\pi\mathcal{R}P}{V_\pi}\sqrt{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos(\phi_1-\phi_2)}\cdot\cos(\omega_{RF}t+\Phi) \tag{13}$$

经过光电转换后，探测器输出的合成射频功率可表达为

$$P_{RF}=I_{AC}^2R=\left(\frac{4\pi\mathcal{R}PR}{V_\pi}\right)^2\cdot\frac{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos(\phi_1-\phi_2)}{4R} \tag{14}$$

式(14)和射频域合成结果式(4)相比，只相差一个系数 $\gamma=\left(\frac{4\pi\mathcal{R}PR}{V_\pi}\right)^2$，该系数是光链路的电光－光电转换系数。可见，采用多波长非相干合成的方式与射频域电合成的方式具有相同的合成效果。

1.3　光相干波束合成

假设上述两个射频信号经过一个波长为 ω 的 E/O 转换后，其输出光场可表达为

$$E_1=\sqrt{P_1}\,e^{j(\omega t+\varphi_1)}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\right] \tag{15}$$

$$E_2=\sqrt{P_2}\,e^{j(\omega t+\varphi_2)}\cos\left[\frac{\pi}{4}+\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\right] \tag{16}$$

先对 E_1 进行三角函数展开，得

$$E_1=\sqrt{P_1/2}\,e^{j(\omega t+\varphi_1)}\{\cos[\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)]-\sin[\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)]\} \tag{17}$$

对上式进行贝塞尔函数展开，在小信号调制的情况下，由贝塞尔函数的性质可知高阶贝塞尔函数值相对于低阶贝塞尔函数值很小，可以忽略。因此，式(17)可以简写为

$$E_1=\sqrt{P_1/2}\,e^{j(\omega t+\varphi_1)}[J_0(\beta_1\pi)-2J_1(\beta_1\pi)\cdot\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)] \tag{18}$$

在小信号近似下，可近似为

$$E_1=\sqrt{P_1/2}\,e^{j(\omega t+\varphi_1)}[1-\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)] \tag{19}$$

以此类推，E_2 可表示为

$$E_2=\sqrt{P_2/2}\,e^{j(\omega t+\varphi_2)}[1-\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)] \tag{20}$$

式中，P_1，P_2 为两束光的光强，$\beta_1=V_1/V_{\pi1}$，$\beta_2=V_2/V_{\pi2}$ 为调制深度，其中，$V_{\pi1}$，$V_{\pi2}$ 为调制器的半波电压。两束光经过光合路器后合成，不考虑传输损耗及光合路器附加损耗，合路器的输出光场可表示为

$$E_{out}=E_1+E_2=\sqrt{P_1/2}\,e^{j\omega t+\varphi_1}[1-\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)]+\sqrt{P_2/2}\,e^{j\omega t+\varphi_2}[1-\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\varphi_2)] \tag{21}$$

该光场进入响应度为 $\mathcal{R}$ 的光电探测器后，转换的光电流可表示为

$$I_{out}=\mathcal{R}E_{out}\cdot E_{out}^*=\frac{\mathcal{R}}{2}\{\sqrt{P_1}\,e^{j(\omega t+\varphi_1)}-\sqrt{P_1}\,e^{j(\omega t+\varphi_1)}\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+\sqrt{P_2}\,e^{j(\omega t+\varphi_2)}-\sqrt{P_2}\,e^{j(\omega t+\varphi_2)}\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\}\times\{\sqrt{P_1}\,e^{-j(\omega t+\varphi_1)}-\sqrt{P_1}\,e^{-j(\omega t+\varphi_1)}\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+\sqrt{P_2}\,e^{-j(\omega t+\varphi_2)}-\sqrt{P_2}\,e^{-j(\omega t+\varphi_2)}\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\}=\frac{\mathcal{R}}{2}\{P_1-P_1\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+\sqrt{P_1P_2}\,e^{j(\varphi_1-\varphi_2)}-\sqrt{P_1P_2}\,e^{j(\varphi_1-\varphi_2)}\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)-$$

$$P_1\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+P_1[\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)]^2-\sqrt{P_1P_2}\,e^{j(\varphi_1-\varphi_2)}\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+$$
$$\sqrt{P_1P_2}\,e^{j(\varphi_1-\varphi_2)}\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)+\sqrt{P_1P_2}\,e^{-j(\varphi_1-\varphi_2)}-\sqrt{P_1P_2}\,e^{-j(\varphi_1-\varphi_2)}\cdot$$
$$\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+P_2-P_2\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)-\sqrt{P_1P_2}\,e^{-j(\varphi_1-\varphi_2)}\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)+\sqrt{P_1P_2}\,e^{-j(\varphi_1-\varphi_2)}\cdot$$
$$\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)-P_2\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)+P_2[\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)]^2\} \quad (22)$$

去掉上式中的直流项和倍频项后，得：

$$I_{AC}=|\mathcal{R}\cdot E_{out}E_{out}^{*}|=\frac{\mathcal{R}}{2}\{2P_1\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+2\sqrt{P_1P_2}\,e^{j(\varphi_1-\varphi_2)}\beta_1\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+$$
$$2P_2\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)+2\sqrt{P_1P_2}\,e^{-j(\varphi_1-\varphi_2)}\beta_2\pi\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)\}=\mathcal{R}\pi\{P_1\beta_1\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+$$
$$P_2\beta_2\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)+[\sqrt{P_1P_2}\beta_1\cos(\omega_{RF}t+\phi_1)+\sqrt{P_1P_2}\beta_2\cos(\omega_{RF}t+\phi_2)]\cos(\varphi_1-\varphi_2)\} \quad (23)$$

假设两个电光转换单元相同，即 $P_1=P_2=P$，$V_{\pi1}=V_{\pi2}=V_\pi$，那么上式可表达为

$$I_{AC}=\frac{\pi\mathcal{R}P}{V_\pi}\sqrt{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos(\phi_1-\phi_2)}\cdot$$
$$[1+\cos(\varphi_1-\varphi_2)]\cos(\omega_{RF}t+\Phi) \quad (24)$$

经过光电转换后，探测器输出的合成射频功率可表达为

$$P_{RF}=I_{AC}^2R=$$
$$\left(\frac{2\pi\mathcal{R}PR}{V_\pi}\right)^2\frac{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos(\phi_1-\phi_2)}{4R}\cdot$$
$$[1+\cos(\varphi_1-\varphi_2)]^2 \quad (25)$$

式(25)和式(4)相比，除了相差一个光链路的电光-光电转换系数 $\gamma=\left(\frac{2\pi\mathcal{R}PR}{V_\pi}\right)^2$ 外，还多了一项系数 $[1+\cos(\varphi_1-\varphi_2)]^2$，这是两束相干光的干涉系数。当两束相干光的相位差 $\varphi_1-\varphi_2=n\pi$ 时，$P_{RF}=0$，此时将完全丢失掉射频信号；当两束相干光的相位差 $\varphi_1-\varphi_2=2n\pi$ 时，P_{RF} 与非相干光波束合成一样，可以输出最大值的合成信号。由推导出的结果可知，相干光的波束合成存在不稳定性，合成输出结果与两束光的相位差有关。

2 波束合成软件仿真

我们用 VPI 软件对上述理论推导进行模拟仿真，首先对光非相干波束合成进行模拟，模拟架构如图 1 所示。构架中，四个不同波长激光器输出的光信号作为射频的载波。仿真参数设置如下：通道数量为 4，激光器波长间隔为 200 G，激光器出光功率为 50 mW，射频信号频率为 10 GHz，调制器半波电压为 5 V，插损为 4 dB，调制器工作于正交偏置点。

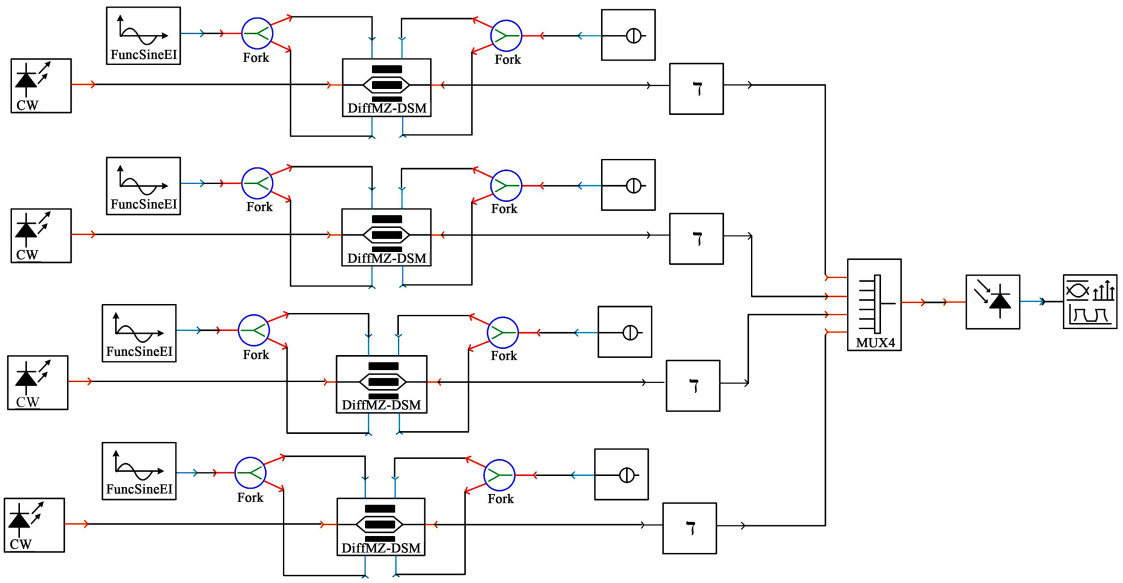


图 1 光非相干波束合成架构

首先设置各光路初始相位相同，各光链路等长，然后再设置各光路移相器的移相值，使四路光路之间的相位差 $\Delta\phi$ 分别以 0°，45°，90°，135°递增，运行程序后得到输出波形，如图 2 所示。从图中可以看

出，当移相器的相移值改变时，输出波形的峰峰值不变，故输出信号的功率不随移相器的相移值不同而改变。为了得到输出信号功率与光路相位差的关系，改变光路中光移相器的移相值，使四路光的相位依次相差一个定值，记录输出合成信号的功率值，得到输出合成信号功率与光路相位差值的变化关系，如图 3 所示。

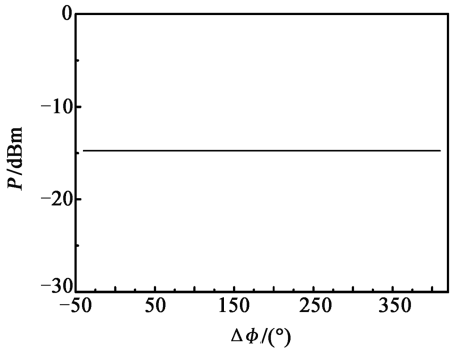
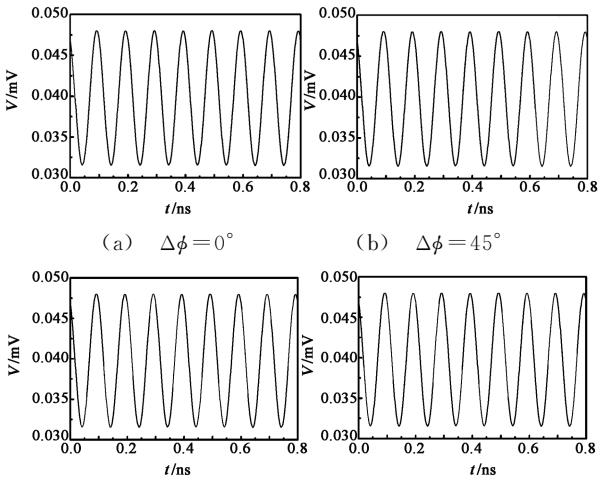


图 3　输出功率与各光路相位差的关系

仿真结果表明，无论四路光的相位差值如何变化，输出的合成信号功率保持不变，说明在光非相干波束合成系统中，各路光的相位关系不影响输出合成信号，与第二节中的理论公式推导相吻合。由于不存在因外界环境引起光相位变化而导致输出合成信号不稳定，所以光非相干波束合成系统可以由光纤和分立光器件组成，结构简单而又容易实现，但是系统规模会受光源的波长通道数限制。



（a）　Δφ＝0°　　（b）　Δφ＝45°

（c）　Δφ＝90°　　（d）　Δφ＝135°

图 2　不同相位差下非相干波束合成仿真结果

我们再对光相干波束合成进行模拟，模拟架构如图 4 所示。该构架中，一个激光器通过分路器分路后，同时给四路射频信号提供载波光信号。仿真参数设置如下：通道数量为 4，激光器出光功率为 100 mW，射频信号频率为 10 GHz，调制器半波电压为 5 V，插损为 4 dB，调制器工作于正交偏置点。

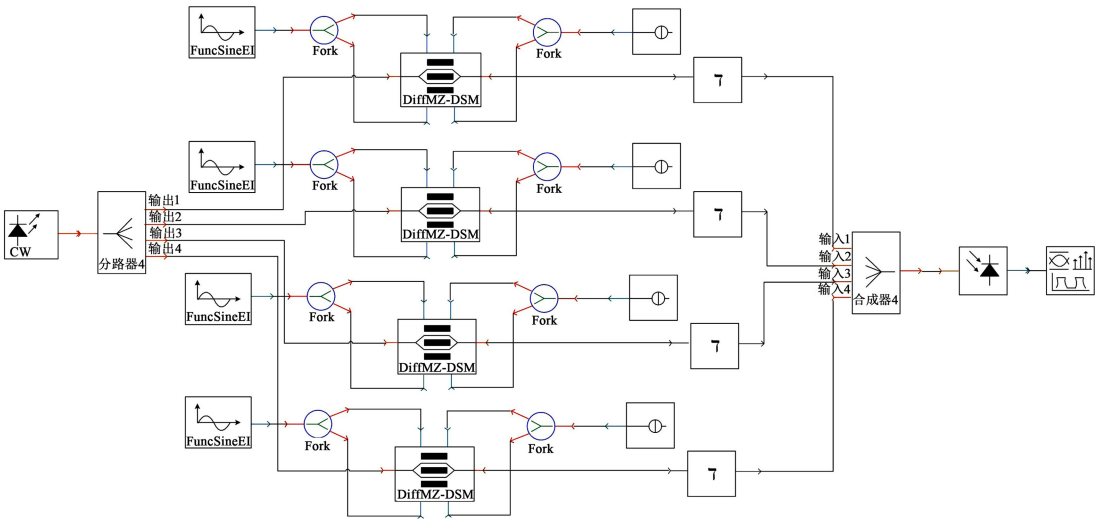


图 4　光相干波束合成架构

首先设置各光路初始相位相同，各光链路等长，然后再设置各光路移相器的移相值，使四路光路之间的相位差分别以 0°，45°，90°，135°递增，运行程序后得到输出波形如图 5 所示。从图中可以看出，当移相器的相移值为 0°时，输出波形具有最大的峰峰值，输出的合成信号功率最大，而当光路之间的相位差以 90°值递增时，输出合成信号完全消失，故输出合成信号的功率与各光路之间的相位差相关。为了得到输出合成信号功率与光路相位差的关系，改变光路中光移相器的移相值，使四路光的相位依次相差一个定值，记录输出合成信号的功率值，得到输出合成信号功率与光路相位差的关系，如图 6 所示。

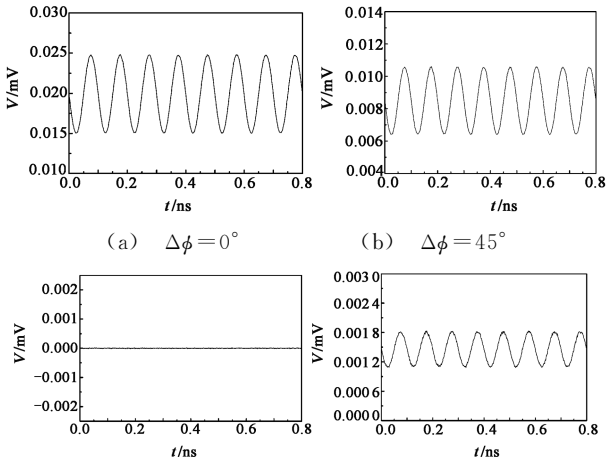


图 5 不同相位差下相干波束合成仿真结果

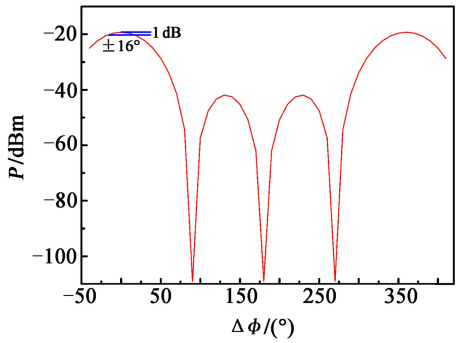


图 6 输出功率与各光路相位差的关系

仿真结果表明，当系统满足各光路之间的相位差为 360°的整数倍的条件时，输出的合成信号具有最大值，当不满足这个条件时，合成信号存在相互抵消，输出值变小，每两路光之间相位差越接近 180°的整数倍，合成信号越小。在图 6 中，标出了低于输出合成信号最大值 1 dB 时，相位差为±16°。在实际工程应用中，外界环境的温度、振动以及应力等因素很容易引起光纤中传输光的相位变化超过±16°，虽然可以通过反馈控制移相器来实时调整光的相位，但是增加了系统成本以及复杂程度，而且移相器的调节精度直接决定了系统的相关性能，这成为限制光相干波束合成技术在工程应用中的瓶颈。解决这一瓶颈问题的手段是采用光子集成芯片技术。近年来随着光子集成技术的迅速发展，无源光子集成回路(PIC)、集成微波光子技术、有源光子集成以及混合光子集成等技术逐步得到突破。通过集成，由环境因素导致的光传输链路相位变化而引起的系统不稳定性被显著消除，平台载荷受限的压力得到显著缓解；同时，通过集成可实现批量生产，能显著降低光学系统的成本。

3 混合光学波束合成架构

通过以上理论公式推导和软件仿真验证，利用光非相干和光相干波束合成技术各自的优势，提出了一种混合光学波束合成架构，如图 7 所示。将大规模的天线阵列分成 M 个子阵，每个子阵由 N 个天线单元组成，首先对百量级的 N 个子阵天线单元采用光相干波束合成进行第一级合成，然后对十量级的 M 个子阵输出信号采用光非相干波束合成进行第二级合成，最终实现整个系统的光控波束合成。在该架构中，结合了光非相干和相干波束合成各自的优势，既保证了系统的稳定性又拓展了系统的规模，为未来的新一代光电系统提供了技术方案。

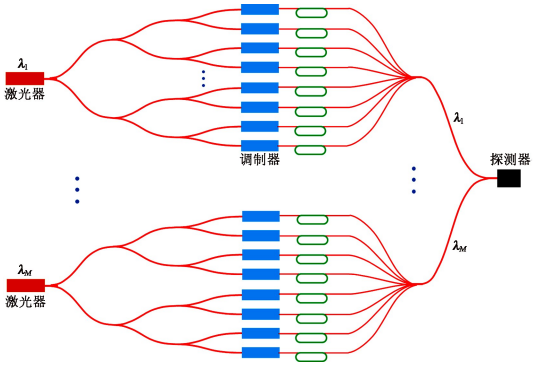


图 7 混合光学波束合成架构

在上述方案中，一般采用分立光器件的方式实现波束合成系统，使用大功率、低噪声的激光器作为光源，低半波电压、低插损的电光强度调制器作为电光转换单元，高速光开关连接不同长度的光纤作为延时单元，低插损的光合路器和波分复用器作为合波单元。在功率分配时，一般使输入调制器的光功率为 10 dBm，为了补偿单个激光器光源分光后的光功率衰减，在光源后端会加入低噪声的光纤放大器。分立器件的优点是实现方式简单，缺点是体积大、稳定性差、成本高，这些问题一方面严重限制了微波光子技术，使其不能充分发挥性能优势，另一方面制约着微波光子技术在空间受限平台上的应用。因此，在国际上，微波光子集成技术正成为重要的发展趋势。欧美等国已经开始成体系地对光波束网络芯片化进行研究，并取得了大量的成果。

集成光子开发技术以及平台得到了快速发展，当前基于硅基双波导结构的集成光路的光学损耗极低，并且具有较小的弯曲半径(小于 70 μm)，在弯曲半径为 70 μm 时，波导损耗小于 0.1 dB/cm，该光子集成工艺与 CMOS 工艺兼容，可实现复杂的结构。

借助光子集成平台，可实现芯片上的光收发模块集成，如图 8 所示。通过在片上集成激光器、调制器、延时器、分路器等光功能器件，可实现超小体积的光收发功能芯片。

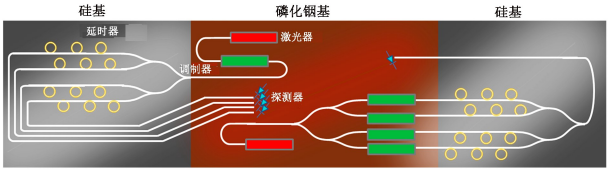


图 8　片上光收发一体构架

该芯片的核心是基于 TriplexTM 技术进一步结合混合集成技术，即通过 TriplexTM 技术完善无源光子系统，通过 InP 基实现有源光子集成，再通过两者的界面互融，实现真正意义上的片上光学波束网络系统，即阵列化的射频光调制、解调与延迟处理芯片的集成化。在混合光子集成技术中，由于有源芯片与无源芯片使用的材料不同，所以两种不同材料体系的片上低损耗互连难度极大，通过核心工艺攻关，对不同材料体系的多芯片进行亚微米级高精度三维空间阵列化耦合，并进行模斑转换对准，可以实现超低损耗的集成封装，目前可达到每面 1 dB 的低损耗耦合。

4　结论

针对基于微波光子的光学波束合成架构，本文从理论公式推导和软件仿真验证，对比分析了光非相干波束合成技术与光相干合成技术。光非相干波束合成技术稳定性好，易于实现，但非相干系统中每个通道均需使用不同波长的激光光源，而目前可用的激光器波长数量一般不超过 100，所以光非相干波束合成技术只适用于小规模天线单元系统。光相干波束合成技术需要每路光的相位具有固定等相关系，在实际应用过程中光路上不可避免地会引入一些相位抖动，这些相位抖动可以通过锁相器来进行矫正，这增加了系统成本和复杂度，但是相干系统中只需要一个波长的激光光源，可以通过分路器分给不同的天线单元作为载波，不存在波长数量不够的问题，所以光相干合成技术可应用于大规模天线阵列系统中。结合光非相干和相干波束合成各自的优势，提出了一种混合光学波束合成架构，既保证了系统的稳定性又拓展了系统的规模，为未来的新一代光电系统提供了技术方案，随着光子技术的不断发展，将逐步实现光学波束合成技术在实际工程中的应用。

参考文献：

[1] 杨绿溪，何世文，王　毅，等. 面向 5G 无线通信系统的关键技术综述[J]. 数据采集与处理，2015，30(3)：469-485.
Yang Lvxi，He Shiwen，Wang Yi，et al. Key technologies for 5G wireless communication system[J]. J. of Data Acquisition & Processing，2015，30(3)：469-485.

[2] 陈　旭. 有源相控阵雷达子阵波束控制系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
Chen Xu. Research on beam control system of active phased array radar subarray [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2015.

[3] 王　明，柳桃荣. 发射多波束形成技术在电子战中的应用[J]. 舰船电子对抗，2017，40(2)：32-34.
Wang Ming，Liu Taorong. Application of transmitting multi-beam forming technology to EW [J]. Shipboard Electronic Countermeasure，2017，40(2)：32-34.

[4] 张玉喜，王　建，秦亚萍，等. 宽带阵列雷达波束合成技术研究[J]. 雷达与对抗，2010，30(2)：13-17.
Zhang Yuxi，Wang Jian，Qin Yaping，et al. A study on beam synthesis of broadband array radars[J]. Radar & ECM，2010，30(2)：13-17.

[5] 王　超，庾财斌，肖永川，等. 基于相位调制的大动态微波光子链路仿真研究[J]. 半导体光电，2020，41(6)：902-906.
Wang Chao，Yu Caibin，Xiao Yongchuan，et al. Simulation of large-dynamic microwave photonic link based on phase modulation[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(6)：902-906.

[6] 高　晖，邓　晔，张金平，等. 微波光子相控阵的技术分析与展望[J]. 雷达学报，2019，8(2)：251-261.
Gao Hui，Deng Ye，Zhang Jinping，et al. Analysis and prospects of phased array radar based on microwave photonics [J]. J. of Radars，2019，8(2)：251-261.

[7] 瞿鹏飞，肖永川，庾财斌，等. 微波光子链路中的附加相位噪声分析[J]. 半导体光电，2020，41(4)：555-559.
Qu Pengfei，Xiao Yongchuan，Yu Caibin，et al. Analysis of addictive phase noise in microwave-photonic links with external modulation[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(4)：555-559.

作者简介：

庾财斌(1990—)，男，广西桂林人，博士，主要研究方向为微波光子技术、波束合成技术。