

引用格式: YANG Shu-na, LIU Zhi-wei, YANG Bo, *et al.* Photonic Analog-to-digital Conversion with Differential Encoding Based on Vector Superposition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3):0306004

杨淑娜, 刘志伟, 杨波, 等. 基于矢量叠加实现差分编码的光子模数转换方案[J]. 光子学报, 2020, **49**(3):0306004

基于矢量叠加实现差分编码的光子模数转换方案

杨淑娜, 刘志伟, 杨波, 曾然

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘 要:提出并验证了一种基于矢量叠加原理对输入射频信号进行差分编码的光子模数转换方案.该方案采用两路不同波长脉冲源通过一个相位调制器对输入射频信号进行调制,调制输出接入延时线干涉仪从而产生两路具有固定相位差的差分调制信号.利用矢量叠加模块对两路差分调制信号的强度进行不同程度的衰减和组合,从而获得系统量化所需的各路传递函数之间的相移量.该方案能够对输入射频信号实现差分编码,有效提高了系统的比特精度.同时该方案结构简单,只需要一个相位调制器,一个延时线干涉仪和一个矢量叠加模块即可构建.另外,各路传递函数之间的相移量是通过衰减两路差分调制信号的强度来实现,避免了传统光子模数转换方案中调制器对温度、环境敏感而引入的相位漂移问题.本文对 4 比特模数转换系统进行了原理性验证,实验结果证实了基于矢量叠加原理的光子模数转换方案的可行性.

关键词:光子模数转换;差分编码;延时线干涉仪;矢量叠加;有效比特位

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0306004

Photonic Analog-to-digital Conversion with Differential Encoding Based on Vector Superposition

YANG Shu-na, LIU Zhi-wei, YANG Bo, ZENG Ran

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In this paper, a novel photonic analog-to-digital conversion scheme with differential encoding based on vector superposition is proposed and demonstrated. Two pulse sources with different center wavelengths are employed to modulate the input signal by a phase modulator, the modulated signal is sent to a delay-line interferometer to achieve two differential modulated signals with a specific phase difference. By adjusting and combining the intensity of two differential modulated signals with a vector superposition module, the desired phase shifts among different transfer functions can be obtained. Compared with most existing photonic analog-to-digital conversion schemes, the proposed scheme can differentially encode the input signal with improved bit resolution; furthermore, this scheme features its relative simpler configuration, because only one phase modulator, one delay-line interferometer and a vector superposition module are required; in addition, since the desired phase shifts of transfer functions are realized by attenuating the signal intensities, the proposed scheme can effectively alleviate the problem of phase bias-drift induced by modulators. Proof-of-concept experiment of a 4-bit photonic analog-to-digital conversion system based on the proposed scheme is successfully carried out, which demonstrates the feasibility of the approach.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61901148, 61975048, 11574068),浙江省自然科学基金(Nos. LQ18F050002, Q20F010020, LQ20F010008)

第一作者:杨淑娜(1982—),女,讲师,博士,主要研究方向为光子模数/数模转换. Email:shunayang@hdu.edu.cn

通讯作者:曾然(1980—),男,副教授,博士,主要研究方向为量子光学与新型材料光学特性. Email:zengran@hdu.edu.cn

收稿日期:2019-11-02; **录用日期:**2019-12-16

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Photonic analog-to-digital conversion; Differential encoding; Delay-line interferometer; Vector superposition; Bit resolution

OCIS Codes: 060.4510; 260.2110; 140.3460; 230.5160

0 引言

作为连接客观世界模拟信号和现代高速数字信号处理系统之间的桥梁,高速模数转换器(Analog to Digital Conversion, ADC)有着重大的意义和应用前景.不管在卫星通信和移动通信网络等民用通信领域,还是在飞行器导航、身份识别以及宽带雷达系统等国防领域,都对模数转换器件的性能(采样速率、转换精度等)提出了越来越高的要求^[1-2].然而由于采样保持电路带宽、比较器弛豫以及采样时钟抖动等因素的影响,传统的电子 ADC 已经不能同时满足高采样速率和高转换精度的需求^[3].随着光子技术的迅速发展,尤其是以锁模激光器为代表的超短采样光脉冲源和能够屏蔽外界电磁干扰的新型电光调制器的出现,利用光子技术的显著优势来实现高速模数转换已受到国内外的广泛关注^[4-6].

1979年,TAYLOR H提出了一种基于马赫-曾德尔调制器(Mach Zehnder Modulator, MZM)阵列的光子 ADC 方案^[7],其利用 MZM 调制曲线的周期特性来实现对输入信号的量化编码.但在该方案中,为实现不同调制曲线的周期倍增,调制器阵列的电极长度呈指数关系增长.当系统的比特数达到 3 以上,则要求调制器的最小半波电压小于 1 V 左右,这样的高速电光调制器至今还难以实现.为了克服这一难题,STIGWALL J 等于 2005 年提出采用空间光干涉的方式实现对输入射频信号的量化编码^[8-9].该方案通过将多个光探测器按一定的空间位置集成于一个芯片上,从而实现移相光量化,但结构操作需要复杂的器件工艺,技术上难以实现.为改进并实现移相光量化,CHI Hao 等提出了一种基于等臂长 MZM 阵列的光子量化方案^[10],通过调整各个 MZM 的静态偏置电压获得不同传递函数之间的恒定相位差,从而实现输入信号的量化编码.该方案结构简单易于集成,但所需调制器个数较多,对于实现 $2N$ 个量化级的系统需要 N 个 MZM.为减少系统所需的调制器个数,该作者还提出了基于一个相位调制器(Phase Modulator, PM)级联延时线干涉仪(Delay Line Interferometer, DLI)阵列的方案^[11],实现对输入信号的差分编码,极大地提高了系统比特精度.但该方案需要大量 DLI,对于实现 $2N$ 个量化级的系统需要 N 个 DLI.此外,已提出的移相光量化方案还包括采用并联 MZM 的方案^[12-13];采用偏振光干涉的光子量化方案^[14-17];以及采用非等臂长的 MZM 方案^[18-19]等等.

近期一种基于正交矢量叠加原理的光子量化方案被提出,该方案通过使用 PM 级联两个 DLI 实现对输入信号的差分调制,并通过信号强度的调整和叠加实现对输入射频信号的数字化过程.该方案利用信号强度衰减实现了调制曲线的精确相移,避免了传统光量化方案中调制器相位漂移的问题,极大的提升了系统的稳定性和比特精度^[20].然而该方案中由于差分调制信号的正交特性,需要两个 DLI 并对其施加偏置电压来保证正交特性;同时为了实现不同调制曲线的精确相移,需要矢量叠加模块(Vector Superposition Module, VSM)使用大量的加法器和减法器来实现信号的求和以及差分,导致矢量叠加模块相对复杂,不易集成.本文提出了一种新型的光子模数转换方案,采用非正交矢量叠加的方法实现对输入射频信号的差分编码输出.在该方案中,两路不同波长的光脉冲经复用后作为系统的采样源,通过一个相位调制器对输入射频信号进行调制,已调信号接入一个延时线干涉仪从而产生两路具有固定相位差的差分调制信号.利用矢量叠加模块对两路差分调制信号的强度进行不同程度的衰减和组合,即可获得各路传递函数之间所需的相移量.和方案^[7, 10, 11]相比,该方案结构简单,对于一个 N -bit 的量化系统,只需要一个相位调制器、一个延时线干涉仪和一个矢量叠加模块即可构建.通过调整两路光脉冲波长间隔实现具有固定相位差的两路差分调制信号,避免了方案^[20]中两路 DLI 和外加偏置电压的使用.同时,各路传递函数之间的相移量同样通过矢量叠加(信号强度衰减)的方式实现,避免了传统移相光量化方案^[10]中由于调制器受温度、环境影响而产生的相位漂移等问题,提升了系统稳定性.而且,矢量叠加模块通过波分复用器实现两路信号的叠加,避免了大量加法器和减法器的实用,简化了结构并利于集成.此外,该方案实现了对输入信号的差分编码,极大地提高了系统比特精度.本文对 4 比特模数转换系统进行了原理性验证实验,其结果证实了该方案的可行性.

1 方案设计及工作原理

基于矢量叠加原理实现差分编码的光子模数转换方案,其工作原理如图 1 所示.两个锁模激光器产生的

两路不同波长(λ_1, λ_2)的光脉冲通过光复用器复用后作为系统的采样源,采样光脉冲接入一个相位调制器 PM 对输入射频信号 $V_s(t)$ 进行相位调制,已调制信号接入延时线干涉仪经延时后输出差分调制信号,并由光解复用器分为两路.通过调整两路光脉冲的波长间隔,可使输出的两路差分调制信号具有固定的相位差.将两路差分调制信号接入 $2:N$ 矢量叠加模块,通过对两路信号的强度(I_1, I_2)进行不同程度的衰减和组合后输出 N 路光信号,从而实现两路差分调制信号的矢量叠加过程.然后将 $2:N$ 矢量叠加模块的 N 路输出光信号分别接入光电转换器进行光电转换后再接入相应的比较器,通过和预先设定好的比较器判决阈值进行比较,当输入电压大于阈值时判决输出为 1,否则输出为 0,从而实现输入模拟信号的数字化编码.

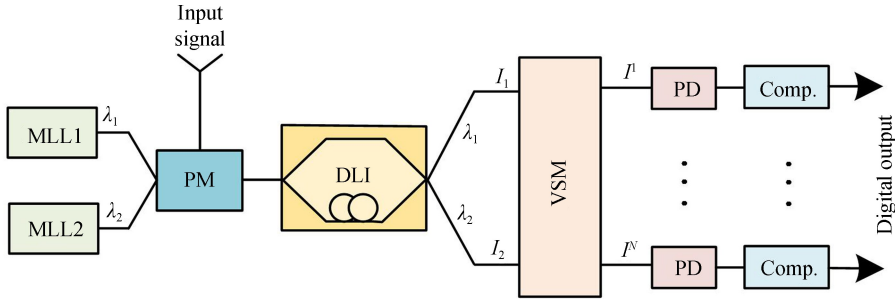


图 1 光子模数转换方案原理图

Fig.1 Schematic of the proposed photonic analog-to-digital scheme

$2:N$ 矢量叠加模块的具体结构如图 2 所示,其由光分束器(Splitter)、可调光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)和光复用器(Multiplexer)组成.两路输入光差分调制信号(I_1, I_2)分别由光分束器分为 N 路光信号,每一路光信号都接入一个可调光衰减器进行强度衰减后再由光复用器进行复用输出.通过调整每一路可调光衰减器的衰减系数,可以实现复用输出信号的强度以及相位的变化.

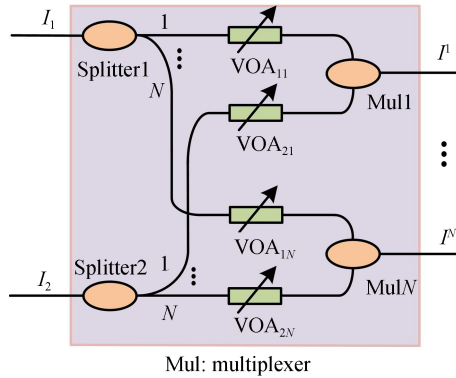


图 2 矢量叠加模块结构示意图

Fig.2 The configuration of vector superposition module

激光器输出的光脉冲可用 $E_{in}^i(t) = g(t) \exp(j\omega_i t)$ ($i=1, 2$) 来表示,其中 $g(t)$ 代表重复周期为 τ 的光脉冲串, ω_i 表示光载波的中心角频率.经 PM 调制后的信号用 $E_m^i(t) = g(t) \exp\{j[\omega_i t + \varphi_s(t)]\}$ 来表示,其中 $\varphi_s(t) = (\pi/V_\pi)V_s(t)$ 表示由输入射频信号 $V_s(t)$ 引入的相移, V_π 表示调制器的半波电压.调制信号经过延时为 τ 的延时线干涉仪后,输出的差分调制信号表示为

$$E_b^i(t) = (1/2)[E_m^i(t) + E_m^i(t - \tau)] = (1/2) \exp(j\omega_i t) \{g(t) \exp[j\varphi_s(t)] + g(t - \tau) \cdot \exp[j\varphi_s(t - \tau) - j\omega_i \tau]\} \quad (1)$$

由于光脉冲串 $g(t)$ 满足 $g(t) = g(t - \tau)$,所以式(1)可简化为

$$E_b^i(t) = (1/2)g(t) \exp(j\omega_i t) \{\exp[j\varphi_s(t)] + \exp[j\varphi_s(t - \tau) - j\omega_i \tau]\} \quad (2)$$

从而,延迟线干涉仪输出端的输出光强为

$$I_i \propto |E_b^i(t)|^2 = (1/2) |g(t)|^2 \{1 + \cos[\varphi_d(t) + \varphi_i]\} \quad (3)$$

式中, $\varphi_d(t) = \varphi_s(t) - \varphi_s(t - \tau)$ 表示由差分信号 $V_s(t) - V_s(t - \tau)$ 引入的相移, $\varphi_i = \omega_i \tau = 2\pi c \tau / \lambda_i$ 表示由延时线干涉仪引入的静态相移(由 τ 和 λ_i 共同决定).通过调整两路光脉冲的波长间隔,可调节两路差分调制信号的静态相位差.当两路光脉冲的波长间隔固定时,给定其中一路光脉冲的波长,另一路光脉冲的波长也随

之确定.针对一个实现 $2N$ 量化级的系统,两路差分调制信号的静态相位差须满足 $\varphi_1 - \varphi_2 = (N-1)\pi/N$,在下面的讨论中,我们为简化可设定 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = (N-1)\pi/N$.

两路差分调制信号 (I_1, I_2) 接入 $2:N$ 矢量叠加模块后首先分别由光分束器分为 N 个光通道.通过调节衰减器的衰减系数来调整每一个光通道的信号强度.用 $\gamma_{1j} (1 \leq j \leq N)$ 表示输入信号 I_1 分束后第 j 个光通道中衰减器的衰减系数, $\gamma_{2j} (1 \leq j \leq N)$ 表示输入信号 I_2 分束后第 j 个光通道对应的衰减系数.此处定义 $2:N$ 矢量叠加模块任一通道的输出光信号强度与差分相位信号 $\varphi_d(t)$ 的函数关系为该光通道的传递函数曲线.为获得任一通道 j 的传递函数所需的相移量,调整 γ_{1j} 和 γ_{2j} 使其满足 $\gamma_{1j}/\gamma_{2j} = \sin(\theta + \pi/N)/\sin\theta$, 其中 θ 表示 $2:N$ 矢量叠加模块输出端第 j 个通道所对应的静态相移量,为实现均匀量化,任意相邻两路输出信号的相位差 $\theta_j - \theta_{j-1} = \pi/N$.设定 $\theta_1 = 0$, 则 $\theta_j = j\pi/N$.矢量叠加模块中不同光通道的信号经过光复用器复用后输出,任一通道 j 输出光信号的强度可表示为

$$I_{\text{out}}^j = \gamma_{1j} I_1 + \gamma_{2j} I_2 = (1/2) |g(t)|^2 (\gamma_{1j} + \gamma_{2j}) + (1/2) |g(t)|^2 \gamma_{2j} \frac{\sin(\pi/N)}{\sin\theta} \cdot \cos[\varphi_d(t) + \theta] \quad (1 \leq j \leq N) \quad (4)$$

式中, $(1/2) |g(t)|^2 (\gamma_{1j} + \gamma_{2j})$ 代表第 j 个通道上比较器预先设定的判决阈值.由式(4)可以看出矢量叠加模块的输出信号 I_{out}^j 随差分相位信号 $\varphi_d(t)$ 呈正弦变化趋势.

该方案通过矢量叠加的方式实现了各路传递函数之间所需的相移量,其量化编码的方式与其他移相光量化方案相似,不同之处在于该方案是对差分相位信号 $\varphi_d(t)$ 进行量化编码,而不是对原始相位信号 $\varphi_s(t)$ 进行量化编码.由于差分信号的峰-峰值通常远小于原始信号的峰-峰值,在实现相同比特精度的情况下,差分编码数字信号的量化噪声要远小于直接编码数字信号的量化噪声,因此通过对差分信号进行编码能够极大的提升系统的比特精度.另外该方案基于移相光量化的思想实现量化编码,若系统实现 $2N$ 个量化级,则系统的矢量叠加模块需 N 路光信号输出,即通过 N 路传递函数的恒定相位差来实现对输入信号的差分编码,其对应的比特精度为 $\log_2(2N)$.

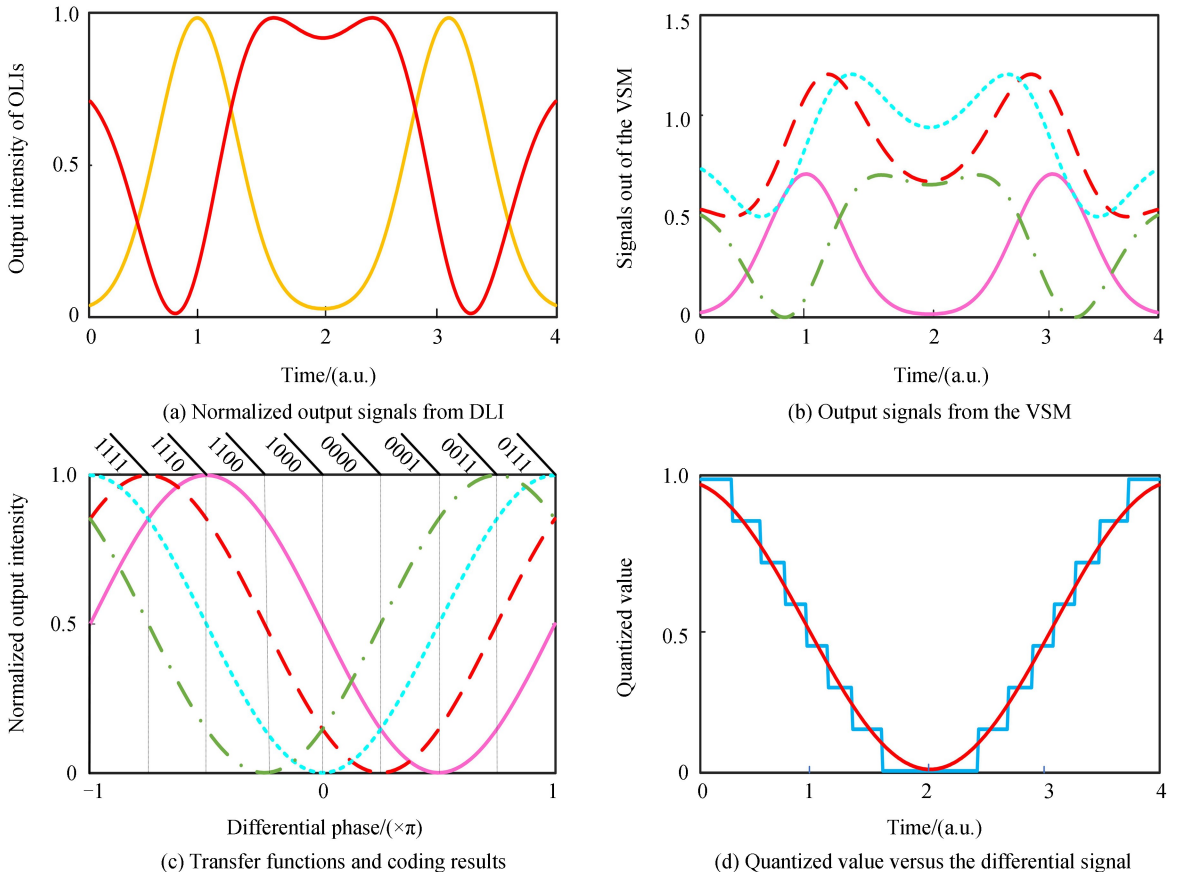


图3 3-bit 光子模数转换系统量化编码过程
Fig.3 Quantization process of a 3-bit photonic ADC system

以 3 比特量化系统为例,以正弦信号作为待量化的输入信号,其量化编码过程如图 3 所示.图 3(a)为延时线干涉仪输出的两路差分调制信号.由于 3 bit 模数转换系统实现 8 个量化级,故两路差分调制信号经矢量叠加模块输出 4 路光信号.据上所述,通过调整两路光脉冲的波长间隔使得延时线干涉仪的两路输出差分调制信号的静态相位差为 $3\pi/4$.分别设置矢量叠加模块中每一路的可调光衰减器的衰减系数为: $\gamma_{11} = 0.707, \gamma_{12} = 1, \gamma_{13} = 0.707, \gamma_{14} = 0; \gamma_{21} = 0, \gamma_{22} = 0.707, \gamma_{23} = 1, \gamma_{24} = 0.707$,则矢量叠加模块的 4 路输出如图 3(b)所示.为实现对输入信号的差分编码,4 路光通道的传递函数所需的相移量分别为 $0, \pi/4, 2\pi/4, 3\pi/4$.各路传递函数由图 3(c)给出,其横坐标表示差分信号所引入的相移量,纵坐标表示 4 路光通道信号强度的归一化大小.通过设定每路信号所对应的比较器判决阈值为最大信号强度的一半,当信号强度大于对应的阈值时,比较器输出“1”,否则输出“0”.其输出的编码也在图 3(c)给出.可以看出,该系统输出为格雷码,其任意相邻码字只有一个比特位变化,当输入信号电平在比较器判决点附近时,这种特性将大大减小系统误码发生的概率.图 3(d)给出了对 4 通道输出波形的量化结果,以及对量化结果进行拟合得到的正弦曲线.

2 实验结果和讨论

为了验证基于矢量叠加原理实现光子模数转换这一方案的可行性,对 4 比特模数转换系统进行了原理性验证实验.由于实验室暂不具备方案所要求的具有合理延时的集成式延时线干涉仪,我们通过分别设置两个 MZM 的偏置电压取代两路不同波长的采样源来获取两路具有固定相位差的调制信号,并将该两路信号作为矢量叠加模块的输入.根据方案设计原理所述,针对 4 比特的转换系统,两路差分调制信号的静态相移量分别为 0 和 $7\pi/8$.实验中,利用中心波长为 1550 nm 、输出功率为 5 dBm 的连续谱激光器(Yokogawa AQ2201)作为系统采样源.为减小由偏振引入的损耗,激光器的输出经偏振控制器后接入带宽为 20 GHz 的 MZM(JDS-Uniphase).由信号发生器(Agilent E8254A)产生 4 GHz 的正弦信号接入 MZM 的射频端口. MZM 的输出经过光电转换器(New Focus 1104)进行光电转换后由数字采样示波器(Agilent 86116A)读取调制信号,在实验中采用单通道的模式来读取数据.记录好示波器显示的两路波形后,采用计算机软件来模拟矢量叠加模块的矢量叠加过程以及后期的阈值判决的过程.值得注意的是我们在实验中利用 MZM 代替了原理方案中利用一个相位调制器级联一个延时线干涉仪来产生固定相位差的调制信号.由于该调制信号不是差分信号,因此最终实现的是对原始信号的直接编码,和差分编码相比,系统实现的比特精度较低.

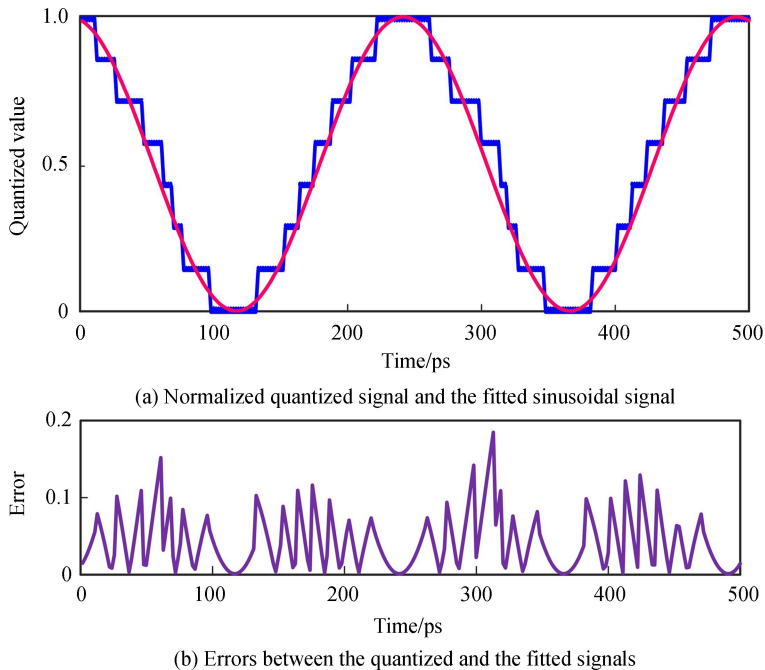


图 4 4-bit 模数转换系统实验结果

Fig.4 Results of a 4-bit photonic digitization system

输入矢量叠加模块的两路调制信号分别通过光分束器分为 8 个通道.第一路调制信号 I_1 经分束后每一

个通道的衰减系数分别设定为： $\gamma_{11}=0.383, \gamma_{12}=0.707, \gamma_{13}=0.924, \gamma_{14}=1, \gamma_{15}=0.924, \gamma_{16}=0.707, \gamma_{17}=0.383, \gamma_{18}=0$ ；第二路调制信号 I_2 经分束后每一个通道的衰减系数分别设定为： $\gamma_{21}=0, \gamma_{22}=0.383, \gamma_{23}=0.707, \gamma_{24}=0.924, \gamma_{25}=1, \gamma_{26}=0.924, \gamma_{27}=0.707, \gamma_{28}=0.383$ 。8 个比较器的阈值分别设定为该通道最大输出信号强度的 0.192, 0.545, 0.816, 0.962, 0.962, 0.816, 0.545, 0.192 倍。图 4(a) 所示为对 8 通道输出波形进行等时间间隔采样和阈值判决后得到的量化结果，以及对量化结果进行拟合得到的正弦曲线。图 4(b) 给出了量化结果和拟合曲线之间的误差。根据图 4(b) 可以计算得到量化结果的数字信噪比 (digital Signal-to-Noise Ratio, dSNR) 为 22.9 dB，根据有效比特位 (Effective Number of Bits, ENOB) 计算公式

$$\text{ENOB} = \frac{(\text{dSNR} - 1.76)}{6.02} \quad (5)$$

计算得到有效比特位为 3.5 比特，和理想值 4 比特相比，实验结果偏离理想值 0.5 比特。该 0.5 比特的误差由系统噪声、调制器的相位漂移、比较器滞驰等问题引入。

此外，由于该方案采用光信号强度衰减的方式来实现矢量叠加，当系统的比特位数增大时，输入矢量叠加模块的调制信号将会被进一步细分且对信号的衰减更强烈。我们对系统的功率要求进行估算。以 4 比特模数转换系统为例，假设输入射频信号是满幅度调制 (即引入的相移在 0 和 π 之间)，为模拟衰减最大的情况，我们把矢量叠加模块中每一通道对应的衰减系数都设定为最大衰减值 0.924，光电转换器的带宽和响应度分别为 40 GHz 和 0.8 A/W，相位调制器的插入损耗为 3 dB，延时线干涉仪引入的信号衰减为 0.5。如果要实现大于 30 dB 的信噪比，则激光器的输出信号功率应不低于 85 mW。对于更高比特位的系统来说，将会在矢量叠加模块中引入更多的信号划分和更大的信号衰减，此种情况下可加入光放大器来保证系统的信噪比。

3 结论

本文提出并验证了一种新型的基于矢量叠加原理实现差分编码的光子模数转换方案。该方案利用两个固定波长间隔的光脉冲源，经一个相位调制器级联一个延时线干涉仪输出两路差分调制信号。适当调整两路光脉冲的波长间隔，可使两路差分调制信号具有固定相位差。通过矢量叠加模块对两路调制信号的强度进行不同程度的衰减和组合，从而实现对输入射频信号的差分编码并显著提升了系统的比特精度。该方案结构简单，仅用一个相位调制器级联一个延时线干涉仪即可实现模数转换，而且不同传递函数之间的相移量通过利用矢量叠加模块改变信号强度的方式来实现，避免了传统的基于调制器方案中由于温度或环境变化引入的相位漂移问题，有效提升了系统的稳定性。同时本文还针对 4 比特系统进行了原理性验证试验，实验实现有效比特位数为 3.5 比特，其结果表明了该方案的可行性。

参考文献

- [1] WALDEN R H. Analog-to-digital converter survey and analysis[J]. *Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, **17**(4): 539-550.
- [2] PENG Di, ZHANG Zhi-yao, YANG Fan, *et al.* Demonstration of a 10-fold stretch-factor photonic analog-to-digital converter for a 5 GHz radio-frequency signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 107-111.
彭迪, 张旨遥, 杨帆, 等. 基于十倍光学拉伸的 5 GHz 微波信号模数转换研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(7): 107-111.
- [3] WANG Shu-bing, ZHANG Zhi-yao, PENG Di, *et al.* Sagnac-loop-based optical coding for all-optical analog-to-digital conversion employing soliton self-frequency shift[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(11): 1125002.
王舒冰, 张旨遥, 彭迪, 等. 基于 Sagnac 环梳状滤波编码的全光模数转换[J]. 光子学报, 2017, **46**(11): 1125002.
- [4] BHUSHAN A, KELKAR P, JALALI B. 30 Gsample/s time-stretch analogue-to-digital converter [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(18): 1526 - 1527.
- [5] KEDA K, ABDUL J, NAMIKI S, *et al.* Optical quantizing and coding for ultrafast A/D conversion using nonlinear fiber-optic switches based on Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(11): 4296-4302.
- [6] BECKER R A, WOODWARD C E, LEONBERGER F J, *et al.* Wideband electrooptic guided-wave analog-to-digital converters[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1984, **72**(7): 802-819.
- [7] TAYLOR H. An optical analog-to-digital converter-design and analysis[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1979, **15**(4): 210-216.
- [8] STIGWALL J, GALT S. Demonstration and analysis of a 40-gigasample/s interferometric analog-to-digital converter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1247-1256.
- [9] STIGWALL J, GALT S. Interferometric analog-to-digital conversionscheme[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(2): 468-470.

- [10] CHI Hao, YAO Jian-ping. A photonic analog-to-digital conversion scheme using Mach-Zehnder modulators with identical half-wave voltages[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(2): 567-572.
- [11] CHI Hao, LI Ze, ZHANG Xian-min, *et al.* Proposal for photonic quantization with differential encoding using a phase modulator and delay-line interferometers[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(9): 1629-1631.
- [12] FU Xin, ZHANG Hong-ming, ZHANG Zhuang-qian, *et al.* Demonstration of quadrature-intensity-modulation-based phase-shifted optical quantization[C]. Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, 2008.
- [13] ZHANG Zhuang-qian, ZHANG Hong-ming, FU Xin, *et al.* A new approach for analog to digital conversion based on double parallel optical intensity modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(3): 378-382.
章壮前, 张洪明, 傅鑫, 等. 一种采用并行光强度调制器的模数转换方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 378-382.
- [14] LI Wang-zhe, ZHANG Hong-ming, WU Qing-wei, *et al.* All-optical analog-to-digital conversion based on polarization-differential interference and phase modulation[J]. *Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(8): 625-627.
- [15] MA Ling-mei, ZHANG Yuan-cheng, ZHANG Hong-ming, *et al.* Improvement of all optical ADC based on phase-shifted optical quantization by using a polarization modulator [C]. Optical Fiber Communication Conference & Exposition, 2011.
- [16] FU Xin, ZHANG Hong-ming, YAO Min-yu. A new proposal of photonic analog-to-digital conversion based on polarization modulator and polarizer[C]. Conference on Communications, 2010: 572-574.
- [17] LI Bo, WU Gui-ling, SU Fei-ran, *et al.* Analysis and experimental study on phase-encoded photonic analog-to-digital conversion based on phase modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(5): 154-159.
李博, 吴龟灵, 苏斐然, 等. 基于相位调制器的相位编码光模数转换分析和实验研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(5): 154-159.
- [18] SARANTOS C H, DAGLI N. A photonic analog-to-digital converter based on an unbalanced Mach-Zehnder quantizer [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(14): 14598-14603.
- [19] SARANTOS C H, DAGLI N. An unbalanced MZM based photonic analog-to-digital converter[C]. Lasers & Electro-optics Society, Leos the Meeting of the IEEE, 2007: 4382300.
- [20] YANG Shu-na, CHI Hao, YANG Bo, *et al.* Photonic digitization with differential encoding based on orthogonal vector superposition [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, **11**(6): 1-9.