光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022062601

基于加权光耦合阵列的任意波形产生

赵　灏[1]，林靖凯[2]，王　航[1]，李沼云[1*]

（1. 中国电子科技集团公司第三十四研究所，广西 桂林 541004；2. 国防科技大学 军事基础教育学院，长沙 410073）

摘　要： 提出了基于加权光耦合阵列的光电任意波形产生方案，利用不同波长加权和并行耦合的方法实现信号光域的数模转换。通过对信号的频谱分析发现，多波加权存在拍频噪声，经过波长预设和滤波处理，可以将高频噪声有效滤除，但在信号交变的时刻会有尖峰干扰出现，进一步通过与变换信号带宽匹配的滤波平滑处理后，尖峰干扰得到一定的抑制，可实现输入信号速率为10 Gb/s、量化精度为5 bit的光学数模转换，实现了三角波、锯齿波、高斯脉冲和方波序列等光学波形的输出。

关键词： 任意波形产生；光学加权；光耦合阵列；平滑滤波；光学数模转换

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0835－04

Research on Arbitrary Waveform Generation Technology Based on Weighted Optical Coupling Array

ZHAO Hao[1], LIN Jingkai[2], WANG Hang[1], LI Zhaoyun[1]

(1. 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin 541004, CHN;
2. Undergraduate School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, CHN)

Abstract: A weighted optical coupling array-based photoelectric arbitrary waveform generation scheme was proposed. In this scheme, different wavelength weighting and parallel coupling method were used to realize the DAC transform of signal optical domain. Through the spectral analysis of the signal, the time domain waveform was interfered by beat noise which was concentrated in the high frequency region. After wavelength presetting and filtering process, the high frequency noise could be effectively filtered out. However, some peak interference would appear at the time of signal alternation. When further filtering and smoothing process matching the bandwidth of the transform signal, the peak interference could be suppressed to a certain extent. Finally, the triangle wave, sawtooth wave, Gaussian pulse and square wave sequence were realized by the optical digital-to-analog conversion with signal rate of 10 Gb/s and quantization accuracy of 5 bits.

Key words: arbitrary waveform generation; optical weighted; optical coupled array; smoothing filter; optical digital-to-analog conversion

0　引言

随着光电对抗、数据通信、遥感等光电技术的快速发展，系统要求的信号波形向着多样化、复杂化、大带宽等方向发展[1-3]，这对任意波形产生技术提出了新的要求。传统的任意波形发生器主要依靠可编程逻辑器件(FPGA)、电子数模变换(DAC)、数字信号处理(DSP)技术实现，其核心部件DAC涉及的电子电路复杂，受到电子带宽瓶颈的限制，其产生波形受限，影响使用效果[4]。利用电光调制器阵列[5-7]、非线性光学环路镜[8]、基于偏振调制的萨格纳克干涉环路[9]、光纤色散相位调制[10-11]、基于色散的波长复用[12-14]等光子技术实现DAC的功能具有采样速

收稿日期：2022－03－26.
基金项目：广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA19254015)；广西重点研发计划项目(桂科AB20175009).
* 通信作者：李沼云　E-mail：13557231066@163.com

度快、带宽大、干扰小等诸多优点。但还存在结构复杂、信号控制难度大、可扩展性差、不利于未来的光子集成等缺陷。

本文提出了基于加权光耦合阵列的光电任意波形产生方案，利用易于光子集成的光耦合阵列进行不同波长加权耦合的方法，实现信号光域的 DAC。通过对信号的频谱分析发现，多波加权存在拍频噪声，经过波长预设和滤波处理，可以将高频噪声有效滤除，但在信号交变的时刻会有尖峰干扰出现，进一步通过与变换信号带宽匹配的滤波处理后，尖峰干扰得到一定的抑制，可实现输入信号速率 10 Gb/s、量化精度为 5 bit 的光学任意波形输出，可解决传统电子技术结构复杂、带宽受限的问题，为雷达、通信、卫星导航、电子侦察与电子干扰、水下声纳等领域高集成度的任意波形的产生奠定了技术基础。

1 理论分析

基于加权光耦合器阵列的任意波形产生原理如图 1 所示，该方案主要由 FPGA、直调激光器阵列、光延时线、定向耦合器和光电滤波器组成。其中 FPGA 进行波形数据的运算与加载，产生 N 路并行的二进制编码信号$\{a_1,a_2,\cdots,a_i,\cdots,a_N\}$，直调激光器阵列将 FPGA 产生的数字电信号转换为数字光信号，并经光延时线对齐后，由 2×2 加权耦合器在光域中实现数模转化，光电滤波主要是滤除光学 DAC 的拍频噪声，实现变换后的模拟波形平滑输出。

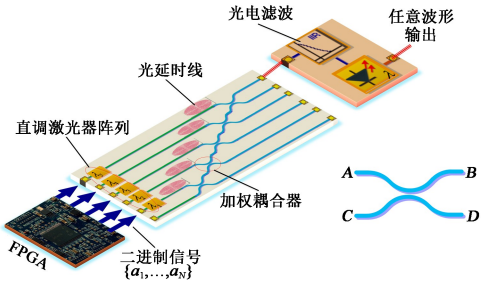


图 1 基于加权光耦合器阵列的任意波形产生原理图

根据耦合模理论[15]，对于分束比为 1∶1 的 2×2 耦合器的传输矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix}B\\D\end{pmatrix}=\frac{\sqrt{2}}{2}\begin{pmatrix}1 & i\\ i & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}A\\C\end{pmatrix} \tag{1}$$

式中，A 和 C 为耦合器输入光场，B 和 D 为输出光场幅度，可以得到对于 N 个耦合器组成的耦合器阵列，在其输出信号时延同步的条件下，输出功率为

$$P_N=\frac{1}{2^N}\sum_{n=1}^{N}2^{n-1}a_nP_n(\lambda_n)+\sum_{m=1}^{N}\sum_{n=1}^{N}{}_{n\neq m}C_{mn}A_m(\lambda_m)[A_n(\lambda_n)]^* \tag{2}$$

式中，$[\cdot]^*$ 表示共轭运算，$a_n\in\{0,1\}$ 表示第 n 位二进制信号，$A_n(\lambda_n)$ 表示波长为 λ_n 的直调激光器的输出光场信号，$P_n(\lambda_n)$ 表示波长为 λ_n 的直调激光器输出光功率。式中右边第一项表示光信号的直流分量，第二项表示不同激光波长 λ_m，$\lambda_n(m\neq n)$之间的拍频信号，C_{mn} 表示拍频系数。

将光耦合器阵列输出的光信号进行滤波，得到转换后的光功率模拟信号为

$$P_N=\frac{1}{2^N}\sum_{n=1}^{N}2^{n-1}a_nP_n(\lambda_n) \tag{3}$$

若输入光耦合器阵列的激光功率均为 P，则得到输出的模拟信号为

$$A=\frac{P}{2^N}\sum_{n=1}^{N}2^{n-1}a_n \tag{4}$$

这样通过改变输入的二进制信号 a_n，即可得到任意的模拟波形输出 A，实现任意波形输出的功能。

2 结果与讨论

本文采用 FPGA 产生 10 Gb/s 的 5 路非归零码信号$\{a_1,a_2,a_3,a_4,a_5\}$，该信号可通过光学 DAC 实现任意波形的产生，其中光学 DAC 中直调激光器阵列的波长分别为 1 548.52，1 549.32，1 550.12，1 550.92 和 1 551.32 nm，波长间隔为 0.8 nm，间隔频率为 100 GHz，如图 2 所示。

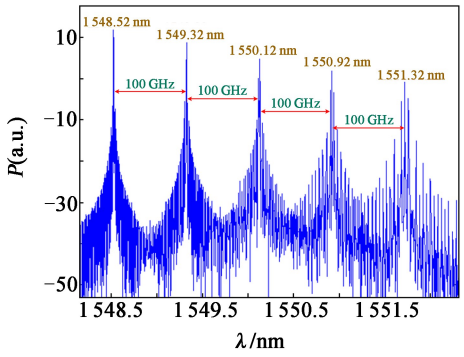


图 2 光学 DAC 输入信号光谱

为研究 DAC 输出信号的特性，产生如图 3 的光学数据序列$\{a_1,a_2,a_3,a_4,a_5\}$，数据位序从最高到最低以 2 倍频率周期递增，a_5 为最高位，信号如图 3(a)所示，a_5=(00000000000000001111111111111111)，其余数据位序 a_4,a_3,a_2,a_1 分别如图 3(b)～(e)所

示，a_4 =（0000000011111111000000001111111），a_3=（00001111000011110000111100001111），a_2 =（0011001100110011001100110011），a_1 =（01010101010101010101001010101）。a_1 为最低位，其信号速率为 10 Gb/s，对应于生成波形的采样频率。

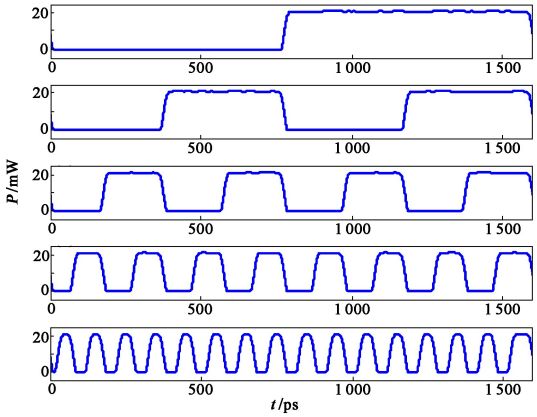
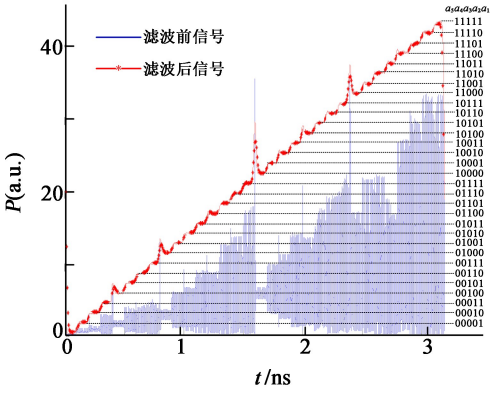
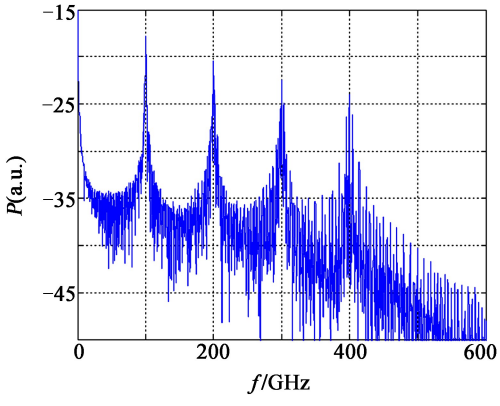


图 3　光学 DAC 输入信号序列

图 4(a)所示为在图 3 输入{a_1，a_2，a_3，a_4，a_5}数据序列情况下，光学 DAC 输出的信号波形。图中的蓝色实线为滤波前的信号输出，此时输出的信号完全被拍频噪声所淹没，无法实现 DAC 的功能。通过对信号的频谱分析发现，如图 4(b)所示，拍频噪声主要包括 100，200，300，400 GHz 的高频成分，可以通过低通滤波器滤除。图 4(a)中红色点线表示通过 10 GHz 低通滤波器滤波后 DAC 输出的信号，从图中可以得到，经过滤波后高频的拍频噪声得到有效的抑制，DAC 的功能得以实现。但在信号交变的时刻会有一定的尖峰存在，这是由于输入信号的突增或突减对 DAC 的响应有冲击，造成信号的过冲，该冲击信号包含的频率成分较宽，所以通过滤波后还不能进行完全的消除。



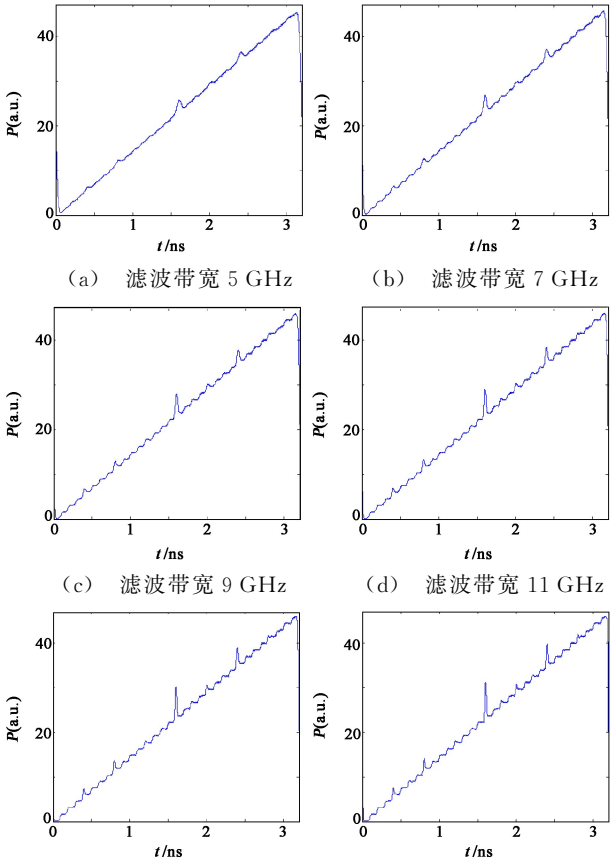
（a）　滤波前后的时域波形



（b）　滤波前频率信号

图 4　光学 DAC 输出信号

图 5 是 5～15 GHz 不同带宽滤波器滤波的效果图，由于信号的速率为 10 Gb/s，从图中可以得到，在滤波带宽为 5 GHz 时，远小于信号带宽，信号特征被滤除，DAC 变换类似一条直线，没有反映出信号特征；在滤波带宽为 15 GHz 时，由于有部分高频噪声引入，DAC 滤波后的噪声也较大，所以滤波器带宽在信号频率附件为最优。



（a）　滤波带宽 5 GHz　　（b）　滤波带宽 7 GHz

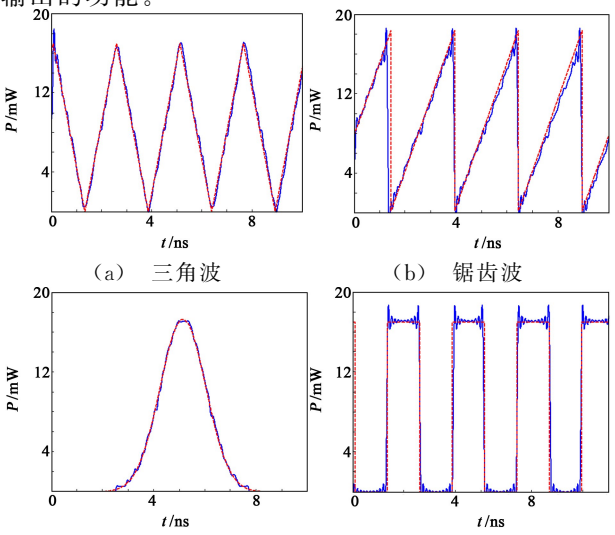
（c）　滤波带宽 9 GHz　　（d）　滤波带宽 11 GHz

（e）　滤波带宽 13 GHz　　（f）　滤波带宽 15 GHz

图 5　信号滤波效果

经滤波平滑处理后输出的波形与目标波形对比如图 6 所示，蓝色实线表示任意波形发生器输出的

光脉冲，红色虚线表示目标脉冲。从图中可以得到，通过光学 DAC 变换输出的波形与目标波形吻合较好，最大输出幅度可以达到 18 mW，实现任意波形输出的功能。



(a) 三角波 (b) 锯齿波

(c) 高斯脉冲 (d) 方波序列

图 6 任意波形产生效果

3 结论

本文利用光电子技术具有的带宽大、损耗低、速率高等优势，通过光电域的融合，提出了基于加权光耦合阵列的光电任意波形产生方案，理论研究了加权光耦合实现光学 DAC 变换原理，采用不同波长信号加权耦合，在不作滤波处理前，输出的信号完全被拍频噪声所淹没，无法实现 DAC 变换。通过对信号的频谱分析发现，拍频噪声集中在高频部分，经过低通滤波处理，高频的拍频噪声能够得到有效滤除，但在信号交变时刻会有尖峰干扰出现，进一步通过与变换信号带宽匹配的滤波处理后，尖峰干扰得到一定的抑制，可实现输入信号速率 10 Gb/s、量化精度为 5 bit 的 DAC 转换，实现了三角波、锯齿波、高斯脉冲和方波序列光学波形输出，为雷达、通信、卫星导航、电子侦察与电子干扰、水下声纳等领域高品质任意波形的产生奠定了技术基础。

参考文献：

[1] 张方正，潘时龙. 面向雷达应用的微波光子信号产生技术[J]. 数据采集与处理，2014，29(6)：922-929.
Zhang Fangzheng，Pan Shilong. Microwave photonic signal generation for radar applications[J]. J. of Data Acquisition and Processing，2014，29(6)：922-929.

[2] Owen J W，Ravenscroft B，Kirk B H，et al. Experimental demonstration of cognitive spectrum sensing & notching for radar[C]// 2018 IEEE Radar Conf.（RadarConf18），2018.

[3] Yin M，Wang X，Zou D，et al. Low cost O-band inter-data center interconnect utilizing a 4-bit resolution digital-to-analog converter for PAM-4 signal generation[J]. Opt. Express，2021，29(20)：31527-31536.

[4] Kurosawa N，Kobayashi H，Kogure H，et al. Sampling clock jitter effects in digital-to-analog converters[J]. Measurement，2002，31(3)：187-199.

[5] Araz Y，Pankaj K D. Digital-to-analog conversion using electrooptic modulators[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2003，15(1)：117-119.

[6] Kondratko P K，Leven A，Chen Y K，et al. 12.5-GHz optically sampled interference-based photonic arbitrary waveform generator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2006，17(12)：2727-2729.

[7] Sobu Y，Huang G，Tanaka S，et al. High-speed optical digital-to-analog converter operation of compact two-segment all-silicon Mach-Zehnder modulator[J]. J. of Lightwave Technol.，2021，39(4)：1148-1154.

[8] Oda S，Maruta A. All-optical digital-to-analog conversion using nonlinear optical loop mirrors[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2006，18：703-705.

[9] Liu W，Yao J. Photonic generation of microwave waveforms based on a polarization modulator in a Sagnac loop[C]// IEEE Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics，2014：3637-3644.

[10] Gao B，Zhang F Z，Pan F S. Experimental demonstration of arbitrary waveform generation by a 4-bit photonic digital-to-analog converter[J]. Opt. Communications，2017，383：191-196.

[11] Zhang F，Gao B，Pan S. Serial photonic digital-to-analog converter based on time and wavelength interleaving processing[C]// 2016 25th Wireless and Optical Communication Conf.（WOCC），2016.

[12] Zhang T，Qiu Q，Su J，et al. Optical assisted digital-to-analog conversion using dispersion-based wavelength multiplexing[J]. Opt. Communications，2018，432：44-48.

[13] Yue P，Zhang H，Zhang Y，et al. Photonic digital-to-analog converter based on summing of serial weighted multiwavelength pulses[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2008，20(24)：2135-2137.

[14] Zhang T，Qiu Q，Su J，et al. Experimental study on a 4-bit serial optical digital to analog convertor[J]. IEEE Photon. J.，2018，10(2)：5501009.

[15] Agrawal G P. Application of Nonlinear Fiber Optics[M]. (Second Edition)：Burlington：Elsevier，2008：54-95.

作者简介：

赵 灏(1978—)，男，四川省盐亭县人，硕士，高级工程师，主要研究方向为光电子和光通信技术；

李沼云(1982—)，男，四川省泸州市人，博士，高级工程师，主要研究方向为光电子和光通信技术。