

用于光学向量矩阵乘法器的光源阵列系统

卢洋洋, 周平, 朱巍巍, 张磊, 杨林

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 对用于光学向量矩阵乘法器的 16 路阵列光源和驱动电路进行了系统的研究。提出了采用商用分布式反馈激光器(DFB)和 16 路光纤阵列耦合的方式构造阵列光源模块,并且在驱动电路中设计了功率反馈自校正调节算法,解决了由于当前激光器制造工艺条件的限制而造成的各路激光器之间的阈值电流和 $P-I$ 转换效率等参数差异问题。实现了光源系统各个通道间的输入向量数据和输出光强之间的一致性映射。实验结果证明,所研究开发的光源阵列不仅成本低,而且数据源信号的高频响应性能良好,保证了光学向量矩阵乘法器运算性能的稳定性和准确性。

关键词: 光学向量矩阵乘法器(OVMM); 分布式反馈激光器(DFB); 光纤阵列; 驱动电路; 自校正
中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0133-07

Laser array system for optical vector-matrix multiplier

Lu Yangyang, Zhou Ping, Zhu Weiwei, Zhang Lei, Yang Lin

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Laser array with the scale of 1×16 for optical vector-matrix multiplier as long as its driven circuit was designed and implemented. A 1×16 laser array was constructed by coupling 16 commercial discrete distributed feedback (DFB) lasers with a 1×16 fiber array. Calibrating module adopting feedback algorithm was equipped with the laser array driven circuit, successfully solving problems encountered due to differences of threshold current and $P-I$ conversion efficiency among lasers of the same type. And the same mapping relationship was acquired between the input vector and output intensity power among different channels of the source array. The proposed light source array system together with its driven circuit not only reduces cost, but also possesses excellent high-frequency response, ensuring the stability and accuracy of the optical vector matrix multiplier's computing performance.

Key words: optical vector matrix multiplier (OVMM); distributed feedback laser (DFB); optical fiber array; driver; self-calibration

收稿日期:2013-05-10; 修订日期:2013-06-13

基金项目:国家自然科学基金(61205008)

作者简介:卢洋洋(1986-),男,博士生,主要从事光学数字信号处理系统方面的研究。Email:yanglu@semi.ac.cn

导师简介:杨林(1978-),男,研究员,博士生导师,主要从事光信息处理方面的研究。Email:lyang@semi.ac.cn

0 引言

向量-矩阵乘法(Vector-Matrix Multiplication), 即乘法累加 (Multiplication and Accumulation, MAC)运算,是数字信号处理领域的核心运算过程。由于光信息处理方式具有带宽大、并行性强等优点,特别适合高速并行 VMM 任务,研究基于光学向量-矩阵器的光学数字信号处理技术,可以突破电子计算的瓶颈,实现高速实时信息处理。该技术可以广泛应用于通信、雷达、图像、声纳等海量数据处理领域。光学向量-矩阵乘法器(OVMM)的理论模型最早由 Stanford 大学的 J.W.Goodman 提出^[1],随后,美国、英国等对光学 DSP 进行了一系列的探索和研究,并且取得了丰硕的成果^[2-4]。然而由于过去光学器件性能的局限性,在之前的研究工作中,研究人员主要立足于光学向量矩阵乘法器理论的分析^[5]和仿真实验^[6],形成了系统的光学处理架构和技术理论。但是对于光学 DSP 系统的数据信息表达、数据加载、自适应光源驱动等方面的研究才刚刚起步。

文中在课题组研究开发用于海量数据处理的光学数字信号处理系统的过程中,针对目标光学 DSP 的系统 and 精度要求,采用分立激光器与光纤阵列耦合的方式设计并完成了一套 16 路激光光源信息加载驱动系统,提出并实现了自适应校正算法,解决了由于激光器个体之间性能差异而导致的输入向量-输出光强曲线的不一致性问题,保证了光学向量矩阵乘法器(OVMM)数据加载的线性一致性,完成了向量-矩阵乘法器的激励光源信号的动态加载。

1 激光器阵列构建

图 1 所示为光学向量矩阵乘法器的原理图,利用空间几何光学的方式完成向量矩阵的乘法运算。

图 2 为课题组自主研发的基于光学向量矩阵乘法器的光学数字信号处理系统实物图,整个系统可分为三个部分,分别是:电学部分,光学部分以及光电接口部分。其中电学部分主要负责待计算数据的预处理和后处理操作。然后通过光电接口将数据转换为光信号,由光学部分进行并行乘法累加运算。光学部分采用 16×16 维空间光学调制器(SLM)作为向量-矩阵乘法器(OVMM)的矩阵数据源加载单元,系

统每个时钟周期可完成 256 次 MAC 运算。前端光电接口单元负责将输入的 16 维数字向量转换为 16 路光强信号并加载到光学向量-矩阵乘法器进行向量矩阵乘法运算。

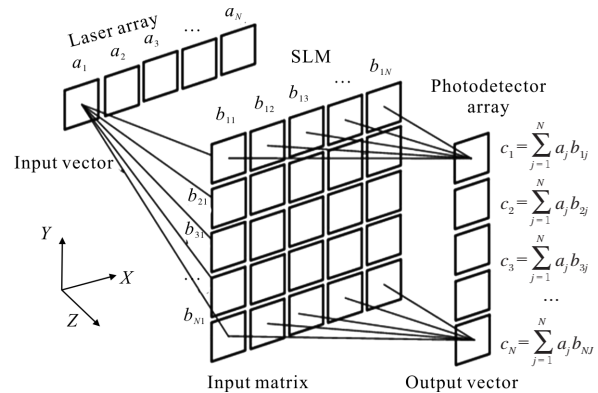


图 1 向量矩阵乘法器的结构示意图

Fig.1 Schematic of vector-matrix multiplier based on free space optics

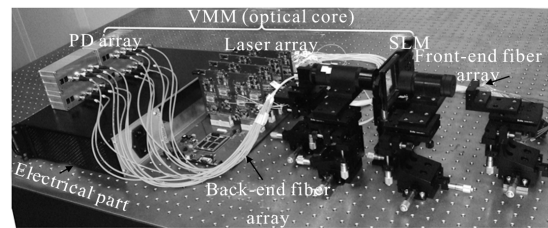


图 2 光学数字信号处理系统样机实物图

Fig.2 Photography of the prototype of the optical digital signal processing system

激光器阵列作为光学向量矩阵乘法器的向量输入接口,负责运算数据的光学信号表征和加载,其驱动电路和器件的性能,对整个系统的计算精度和速度有着重要的影响。由于市面上没有商用的 1×16 阵列的激光光源,并且定制高速高性能的激光器阵列不仅成本相当高,而且性能也难以保证。因此采用了 16 路分立分布反馈(DFB)激光器和 1×16 单模光纤阵列耦合的方式来构建激光器阵列。目前分立激光器和光纤阵列有很多成熟的产品可供选择,这一方案充分利用光纤阵列的高维数、高均匀性以及分布反馈激光器的高功率和高响应速率特性,保证了高性能、低成本 1×16 激光器阵列的构建。而且通过选择合适芯径的光纤阵列不仅能改善激光入射光束的光束质量,还能很好的保证光信号的接收和探测。

在激光器的选择的过程中,主要需要考虑以下

参数:(1) 频率响应参数, 选择高频响应速率的激光器, 可以保证系统运行在较高的时钟速率下, 提高整个系统的运算吞吐量;(2) 输出功率, 光学部分对于光强有着一定的衰减量, 因此激光器的输出光强必须保证对应于最低有效数据(LSB)的光强信号经过光路衰减以后在光电探测器接收端能够有较高的信噪比;(3) 线性度, 较高的线性度能够保证光学系统的计算精度。最终经过综合分析整个光学系统的特性和要求, 该系统的激光光源采用了 Xeston 公司的 6001A 系列 1310 nm 波段的 DFB 激光器。

由于激光器的工艺特点, 同一型号的激光器之间并不能严格保证每一个激光器具有相同的阈值电流和电光转换效率(slope efficiency)。表 1 为系统所采用的 16 路 Xeston 公司的 6001A 系列 DFB 激光器的关键参数表。由表 1 可知, 每路激光器的阈值电流和电光转换效率都不相同, 因此在进行光学向量矩阵乘法运算的时候, 采用相同的激励向量对激光器进行调制时, 不同的激光器会产生不同的光强, 这对系统计算的准确性和精度会带来严重的影响。

表 1 光源系统各通路激光器关键参数列表

Tab.1 Key parameter list of each laser used in the 16-channel source system

Index	Threshold current/mA	Slope efficiency/mW · mA ⁻¹
CH1	10.4	0.379
CH2	6.8	0.398
CH3	10.2	0.374
CH4	9.2	0.376
CH5	10.4	0.366
CH6	8.6	0.371
CH7	9.8	0.375
CH8	7.6	0.380
CH9	7.4	0.362
CH10	8.3	0.382
CH11	8.8	0.368
CH12	10.6	0.374
CH13	9.6	0.381
CH14	10.4	0.367
CH15	8.2	0.384
CH16	9.4	0.372

图 3 为系统在没有加入校正模块前, 选择系统

中的 8 路激光器为例, 利用 DAC 扫描测试各路激光器的输入激励向量和输出光强的特性曲线 (横坐标为通过 DAC 输入的激励向量, 纵坐标表示每路激光器由探测器探测到的光强), 这里主要对激光器的线性工作区进行测试, 也是向量矩阵乘法器进行运算时激光器的工作区间。由图 3 可知, 每路激光器由于其特征参数不一致, 当对激光器阵列各通路施加相同的数字信号时, 各路激光器输出端得到的光强信号存在差异, 也就是激光器阵列间存在线性非一致性。

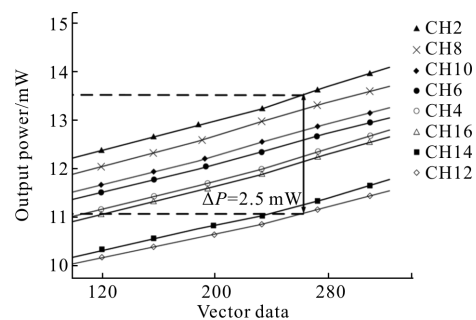


图 3 校正前激光器的输入向量-输出光强映射关系

Fig.3 Relationship between the input vector and the output power of the uncalibrated laser

光学向量矩阵乘法器在进行 0-1 二进制运算时, 光源阵列将代表着 0-1 二值的激励向量输入到维度为 16×16 向量矩阵乘法器, 经过向量矩阵乘法器运算以后得到的运算结果的分辨率为 16 个灰度级, 因此为了保证运算结果的准确性, 各通道激光器对应相同的数字向量 D 的输出光强, 应满足以下条件:

$$|P_{iD} - P_{jD}| < \frac{\Delta P}{16} \quad [i, j=1, 2, 3, \dots, 16] \quad (1)$$

$$\Delta P = P_H - P_L \quad (2)$$

式中: P_{iD} 、 P_{jD} 分别为任意两通道 i 和 j , 在相同的输入数字向量 D 激励下的输出光功率。 P_H 、 P_L 为系统预设定的用来表征输入向量 0 和 1 的输出光强。在综合考虑了系统中激光器功率输出范围以及功耗等因素, 该系统设定 $P_L = 8.5 \text{ mW}$, $P_H = 14.5 \text{ mW}$ 。因此由上面的分析可以得出, 当光源阵列不同通道输入相同数字向量时, 输出光强之差应满足条件 $P_{iD} - P_{jD} < 0.38 \text{ mW}$, 才能保证系统的运算结果的零误差。而由图 3 可以看出, 差异最大的两通道之间输出光强的

差值达到了 2.5 mW,显然不能满足上述系统的工作条件。

因此为了保证系统计算结果的准确性,在对激光器驱动系统电路的设计中,需要对各路激光器进行一致性校正,使各路激光器的输入向量和输出光强具有统一的映射关系。

2 光源驱动系统设计

传统的激光器驱动模块主要包含以下两个部分:(1) 恒流源和保护电路^[7-9],为激光器提供稳定的注入电流和保护;(2) 温度控制电路^[7],实现对激光器温度进行高稳定控制的功能。

图 4 为文中设计的用于向量乘法器的激光器阵列驱动系统框图,和传统激光器驱动系统相比,除了包含上述的两个重要组成部分以外,该系统还包括如下的模块:(1) 幅度调制单元:负责将待运算向量通过幅度调制的方式调制到激光器的输出光强上。这一模块由 FPGA 将待操作向量从数据源取出,经过在 FPGA 中进行一系列的预处理后,驱动数模转换器(DAC),输出激光器所需的调制电流信号,驱动激光器光源阵列发出载有待运算向量信息的光强;(2) 功率反馈校正模块:对系统不同通道激光器输出特性进行一致性校正。通过将激光器输出光强信号由探测器和模数转换单元(ADC)进行探测与采样后反馈传递到 FPGA 中,由 FPGA 执行文中第 3 节所提出的校正流程和算法,对每一路激光器线性输出曲线进行校正。(3) 时钟模块和电源模块:为了保证系统各通道间数据的同步性,因此采用了专门的时钟控制模块。

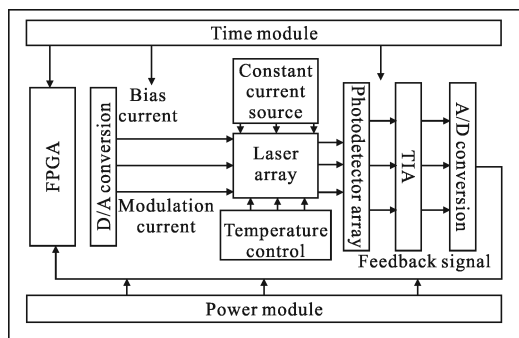


图 4 自校正光源阵列系统框图

Fig.4 Block diagram of self-calibrated laser array system

3 理论基础分析和校正实现过程

激光器输入电流超过阈值电流之后,输入电流和输出光强成线性关系^[9],而且 DA 转换器的输入向量和输出电流也成线性关系,温度对激光器的影响往往体现在改变激光器的 $P-I$ 斜率,因此可认为整个数据加载系统是一个线性的系统。激光器的输出光强和输入电流的关系如下:

$$L_{[n]} = \eta_{[n]} * (I_{[n]} - I_{0[n]}) \quad (3)$$

式中: $L_{[n]}$ 为第 n 路激光器的输出光强; $\eta_{[n]}$ 为第 n 路激光器的电流-功率转换效率; $I_{[n]}$ 为第 n 路激光器的输入电流值; $I_{0[n]}$ 为第 n 路激光器的阈值电流。当温度发生改变,激光器的输出功率可以表示为:

$$I_{[n]} = a_{[n]} * \eta_{[n]} * (I_{[n]} - (I_{0[n]} + I_{T[n]})) \quad (4)$$

式中: $a_{[n]}$ 为温度对电流-功率转换率带来的影响系数; $\eta_{[n]}$ 为表示第 n 路激光器的电流-功率转换效率; $I_{[n]}$ 为第 n 路激光器的输入电流值; $I_{0[n]}$ 为第 n 路激光器的阈值电流; $I_{T[n]}$ 为温度所造成的激光器阈值电流的偏移。将公式(4)展开,根据 DA 转换器的输出电流和输入的数字信号之间的线性转换关系,可以得到如下的等效公式:

$$L_{[n]} = k_{[n]} * V + b_{[n]} \quad (5)$$

式中: $k_{[n]} = a_{[n]} * \eta_{[n]} * m$ (m 为 DA 转换器的转换系数); $b_{[n]} = -(a_{[n]} * \eta_{[n]} * m * I_{0[n]} + a_{[n]} * \eta_{[n]} * I_{T[n]})$; V 为输入到 DA 数模转换器用来驱动激光器的数字向量值。由此可以得出,当设置激光器工作在线性工作区间时,可以将影响激光器工作曲线的因素(温度,阈值电流,电流-功率转换率)统一为线性函数的两个参数。每一路激光器在特定的温度下, $k_{[n]}$ 和 $b_{[n]}$ 都是固定的,并且通路之间相互是独立的,因此为了确保相同的输入向量能输出相同的光强,可以对输入的向量 V 进行校正和标定,通过选定一路激光器(如 CH1)作为基准,然后对其余通路激光器的输入向量进行修正,确保通路之间具有有统一的向量-光强映射关系。图 5 为添加校正模块之后的光源系统工作示意图。

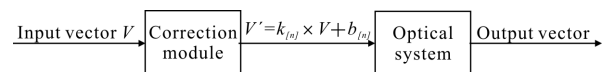


图 5 光源系统工作示意图

Fig.5 Diagram of the light source system

基于上面的分析,提出系统的标定和校正算法,其过程就是根据所选取的基准通道,求出其它各通道对应于基准通道的修正系数 $k_{[n]}$ 和 $b_{[n]}$ 。具体步骤如下。

(1) 任意选定一路作为基准,例如 CH1,FPGA 向 DA 转换器分别输入两个数字向量 D_{11} 和 D_{12} 驱动激光器产生两个输出光强(此时控制向量矩阵乘法器中空间光调制器的各元素为全通状态)。

(2) 将光电探测器探测得到的光生电流信号经过跨阻放大器得到反应光强的模拟电压,将该电压信号经 AD 芯片转换成数字量,得到的数字量 P_{11} 和 P_{12} 存储在内存中。

(3) 然后依次打开其它通路激光器 $CH[n](n=2, \dots, 16)$,FPGA 向 DA 转换器分别输入两个相同的数字向量 D_{11} 和 D_{12} 使激光器产生两个光强输出(此时控制向量矩阵乘法器中空间光学调制的各元素为全通状态)。记录输出光强 P_{n1} 和 P_{n2} ,分别将 P_{n1}, P_{n2} 和步骤一中得到的 P_{11} 和 P_{12} ,做差值比较,根据比较的结果对输入向量 D_{11} 和 D_{12} 进行调节,直到满足条件 $|P_{i1}-P_{m1}|<\varepsilon$ (其中 ε 为设定的阈值, $i=1,2$)记录下当前输入向量 D'_{n1}, D'_{n2} 根据下列方程式,计算得到 $k_{[n]}$ 和 $b_{[n]}$:

$$\begin{cases} k_{[n]}D_{11}+b_{[n]}=D'_{n1} \\ k_{[n]}D_{12}+b_{[n]}=D'_{n2} \end{cases} \quad (4)$$

(4) 系统经过自校正和初始化后,将标定参数应用于在线工作过程中,实现对系统的校正。因此在线实时运算的过程中,可以对每一路的输入向量 V 用线性修正系数修正为 $V'=k_{[n]}V+b_{[n]}$ 消除由于激光器参数不一致而产生的功率误差和通道之间的非一致性。系统校正流程如图 6 所示,为使校正程序满足设定的误差即可,避免由于 DA 转换器分辨率不足而进入死循环,所以在程序的设计过程中设置了两个标志变量 Flag1 和 Flag2。

系统整合了上述校正单元模块之后,可对每通道激光器的输入向量使用校正过程获得的修正因子进行修正。采用该模块,对文中第一部分所选择的 8 路激光器进行测试,可以得到修正之后的激光器输出光强-输入向量的曲线关系如图 7 所示,和图 3 进行比较,我们可以看出,对于相同的输入数字向量,通道之间输出光强的最大差从 2.5mW 降到了 0.25 mW,通

道间的线性一致性提高了 10 倍,并且完全满足了公式(1)所表示的系统运算精度对激光器阵列通道间一致性的要求,因此证明了上述校正模块和算法的有效性。

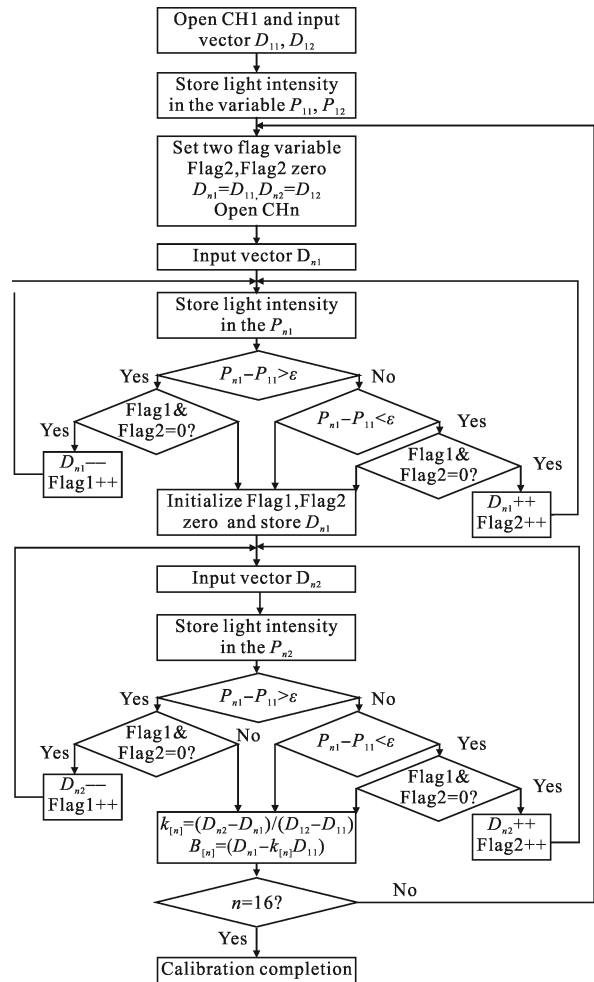


图 6 系统校正流程图

Fig.6 System calibration flowchart

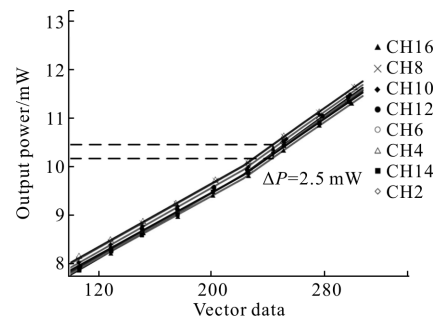


图 7 校正后激光器的输入向量-输出光强映射关系

Fig.7 Relationship between the input vector and the output power of the calibrated laser

4 实验结果验证

为了证明文中所开发的 16 通道激光光源阵列驱动系统以及所设计的校正模块能够满足光学-向量矩阵乘法器动态实时运算的精度要求,对光源系统做了进一步的测试。由于主要是测试光源系统的性能,所以在实验过程中将空间光学调制器的各元素透过率设定为 100%,并预先设定如表 2 所示的测试码型(测试码型为一个长度为 33 的首尾对称的码型序列,表 2 为整个对称输入向量序列的一半),FPGA 在 25 MHz 的速率下驱动各通路激光器输入表 2 中的码型,码型 0 代表着激光器输出光强 P_L ,码型 1 表示激光器输出光强 P_H ,通过示波器测试跨阻放大器端的输出电压,可以得到经过光学系统叠加运算之后的光强输出波形。由示波器测量得到的未经滤波的原始结果波形(图 8 所示)可以看出,运算结果的灰度阶很清晰,结合预先设定的特殊测试码型进行分析,可以证明每路激光器对应于相同的输入向量,有着同样的光强贡献量。并且输出结果区

表 2 激光器阵列测试码型

Tab.2 Test patterns of laser array vectors

Cycle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
CH1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
CH2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
CH3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
CH4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
CH5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
CH6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
CH7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
CH8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
CH9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
CH10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
CH11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
CH12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
CH13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
CH14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
CH15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
CH16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Addition	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	13	13	14

间均匀,边界清晰,足以满足数据的采样和后期处理所需要的精度,保证了运算结果的正确性。因此文中所开发设计的光源阵列系统能够成功地完成对光学向量矩阵乘法器进行动态数据加载并且数据加载速率能够达到 25 MHz,使光学数字信号处理系统(图 2 所示)能完成 6.4 GMACs/s(16×16×25 MHz)的运算性能。

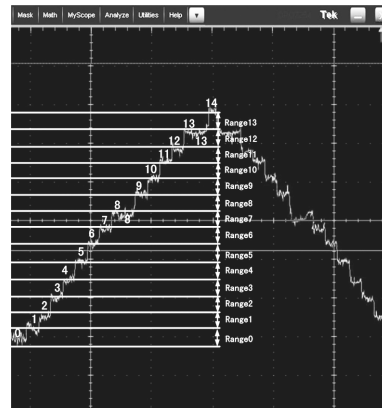


图 8 实验结果波形图

Fig.8 Waveform diagram of experimental results

5 结论

文中提出了用于光学向量矩阵乘法器的激光光源阵列的解决方案,设计开发了该激光光源阵列的驱动电路系统,并且提出了解决通道间激光器线性不一致性的有效校正算法,成功地完成了对光学向量矩阵乘法器在 25 MHz 时钟下的动态数据加载。测试实验表明该光源系统无论是在功能上还是在运算精度上均能够满足光学向量矩阵乘法器对光源阵列系统的性能要求。

参考文献:

- [1] Goodman J W, Dias A R, Woody L M. Fully parallel, high-speed incoherent optical method for performing discrete Fourier transforms[J]. *Opt Lett*, 1999, 2(1): 1-3.
- [2] Mosca E P, Griffin R D, Pursel F P, et al. Acoustooptical matrix-vector product processor: implementation issues[J]. *App Opt*, 1989, 28(18): 3843-3851.
- [3] Gruber M, Jahns J, Sinzinger S. Planar integrated optical vector-matrix multiplier [J]. *App Opt*, 2000, 39 (29): 5367-5373.

- [4] Barhen J, Kotas C, Humble T S, et al. High performance FFT on multicore processors [C]//Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications, Proceedings of the Fifth International Conference, 2010.
- [5] Gary C K. Comparison of optics and electronics for the calculation of matrix-vector products [C]//Proceedings of SPIE, Advances in Optical Information Processing V, 1992, 1704: 544-555.
- [6] Yang C, Cui G X, Huang Y Y, et al. Performance of an embedded optical vector matrix multiplication processor architecture[J]. *Optoelectronics IET*, 2010, 4(4): 159-164.
- [7] Liu Jie, Li Taihe, Liu Jun, et al. Design and realization of FOG source's driving circuit with low power dissipation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 34(3) : 364-367. (in Chinese)
- 刘杰, 李太和, 刘军, 等. 低功耗光纤陀螺用光源驱动电路的设计与实现 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(3) : 364-367.
- [8] Xu Wenhai, Yang Mingwei, Zhu Wei, et al. Development of a laser diode driver based on FPGA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 368-372. (in Chinese)
- 许文海, 杨明伟, 朱炜, 等. 基于 FPGA 技术的半导体激光器驱动电源的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(3): 368-372.
- [9] Luo Yi, Xu Jianming, Huang Jin, et al. High speed semiconductor light sources based on direct modulation and external modulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 200-204. (in Chinese)
- 罗毅, 徐建明, 黄缙, 等. 基于直接调制和外调制的高速半导体激光光源[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 200-204.