

# 基于半导体光放大器的光学向量矩阵乘法器的实现方法

谢静雅\*, 李新碗, 陈建平

(上海交通大学 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)

**摘要:** 提出了一种基于半导体光放大器(SOA)的光学向量矩阵乘法器(OVMM)的实现方法。与传统的向量矩阵乘法器相比,本文方法采用的是非空间光的实现方案,且 SOA 的增益补偿作用可对计算所得的光功率进行校正,从而提高计算精度。对提出的方法进行了 $1 \times 2$ 向量与 $2 \times 2$ 矩阵乘法运算的实验验证,结果表明可以实现向量矩阵乘法器的运算功能。利用 SOA 的大范围增益可调特性,可有效提高信号动态范围,利于多路信号间均匀性的改善,且易于集成。

**关键词:** 光计算; 光学向量矩阵乘法器(OVMM); 半导体光放大器(SOA); 增益补偿

**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2012)04-0654-05

## Implementation scheme of SOA-based optical vector-matrix multiplication

XIE Jing-ya\*, LI Xin-wan, CHEN Jian-ping

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In this paper we propose a new scheme that realizes the optical vector-matrix multiplication (OVMM) based on semiconductor optical amplifier (SOA). Compared with classical method, this design is based on non-spatial light architecture and the gain of SOA can compensate for optical loss to improve the computing precision. The scheme is verified experimentally via multiplying of a  $1 \times 2$  vector by a  $2 \times 2$  matrix. The results show that the proposed architecture can act as an OVMM. The wide range of gain adjustability provided by SOA can be used to improve the signal uniformity between different channels and thus optimize the dynamical range. It also has the potential to be integrated on a chip.

**Key words:** optical computing; optical vector-matrix multiplication (OVMM); semiconductor optical amplifier (SOA); gain compensation

## 1 引言

随着数据处理速度需求的增加,进一步提高芯片性能将受到物理尺寸、制备工艺多方面的限制<sup>[1~3]</sup>,光的高速、并行、低功耗特性使其成为克服电计算瓶颈的有效途径<sup>[4]</sup>。国内外已提出了几种新的光学处理器的结构<sup>[5~11]</sup>,其中向量矩阵乘法运算广泛用于傅里叶变换、线性方程求解等。在图像处理、波束形成、雷达探测和无线通信系统等都有大量相关的计算任务<sup>[5,9,10,12]</sup>。因此,光学向量矩阵乘法器(OVMM)有着重要的研究

意义。

OVMM 最早在 1978 年由 Goodman 等人<sup>[13]</sup>提出,上世纪 90 年代得到较大发展。典型研究包括:1989 年贝尔实验室提出了光互连流水线结构<sup>[14]</sup>,这是 OVMM 的雏形;同年美国海军研究院设计了声光型向量矩阵乘法器,能进行 $128 \times 128$ 的矩阵与 $128 \times 1$ 的矢量之间的乘法运算,运算速度是 $8 \times 10^5/s$ <sup>[15]</sup>。1996 年 OptiComp 公司也发表了关于高速低功耗的数字光处理器研究成果<sup>[16]</sup>。OVMM 研究的转折点是 2003 年以色列的 lenslet 公司推出的世界上首个商用矢量光数字信号处理

\* E-mail: xiejingya.ok@163.com

收稿日期:2011-09-16 修订日期:2011-11-18

基金项目:国家自然科学基金(61127016,61071011)和上海市重大基础研究(10DJ1400402)资助项目

器——EnLight256<sup>[17]</sup>,它可以实现 256 位向量-矩阵乘法,运算速度是  $8 \times 10^{12}/s$ 。Caulfield 等人<sup>[4,18]</sup>将原 EnLight256 中的空间光调制器(SLM)调制速度从 30 kHz 增加到了 125 MHz。上述方案均为传统空间光的实现结构,用透镜作为发散或者聚焦光路的元件。为了减小不同计算光路之间的串扰,透镜的体积无法做到很小,因而整个系统较为庞大,在有些应用场合受到限制。

本文提出并实验演示了非空间光实现方案。为了补偿系统的光功率,从而提高计算精度,没有采用普通的光开关,而是选择了具有增益调节功能的半导体光放大器(SOA)<sup>[19]</sup>。依靠经典的 Stanford OVMM 结构,设计了一种基于光纤链路的  $2 \times 2$  OVMM 运算系统。本文将首先给出 OVMM 计算原理及其在离散傅里叶变换(DFT)中的应用加以理论论述,而后是基于 SOA 的 OVMM 结构以及实验结果,最后进行理论分析和总结。

## 2 OVMM 运算原理及其应用

### 2.1 OVMM 运算原理

Stanford OVMM 结构如图 1 所示<sup>[20]</sup>。输入向量由  $n$  个非相干光源产生,待乘矩阵是一个光调制矩阵,经过调制矩阵后每一行光分别汇聚到由  $n$  个光探测器组成

的输出向量端,通过 AD 转换输出计算结果。此结构可用作典型的矩阵运算。

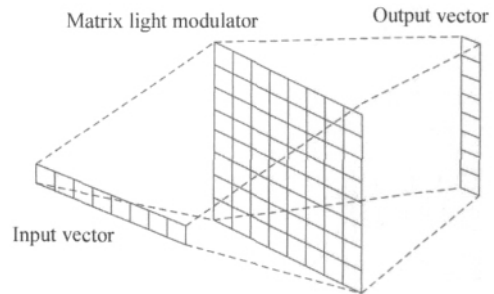


图 1 Stanford OVMM 结构

Fig. 1 Structure of Stanford OVMM

以  $2 \times 2$  矩阵为例,输入向量  $A(a_1, a_2)$  与调制矩阵  $B \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}$  相乘得到输出向量  $C(c_1, c_2)$ 。运算规则同矩阵乘法。给定一些随机的初始向量  $A$  和矩阵  $B$  的数值,相应解得的向量  $C$ ,见表 1。

表 1 测试向量及矩阵组合

Tab. 1 Groups of vectors and matrices

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Vector $A$	(0 0)	(1 0)	(0 1)	(1 0)	(0 0)	(1 1)	(1 0)	(1 1)
Matrix $B$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
Vector $C$	(0 0)	(1 1)	(1 0)	(0 1)	(0 0)	(2 2)	(1 1)	(2 1)

### 2.2 OVMM 的应用

快速的矩阵运算可以实现很多运算功能,如卷积、FIR 滤波器等等。以下从理论上说明向量矩阵乘法运算实现 DFT 的方法。

实际中的 DFT 均采用有限长序列的计算,即 DFS,其理论计算公式为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1)$$

#### 2.2.1 无需电符号处理的 OVMM 计算方法

两个复数相乘运算等同于输入向量  $f$  (由  $N$  个复数样点)与  $N \times N$  矩阵  $H$  (第  $n, m$  个元素为  $\exp(-j2\pi nm/N)$ )相乘得到输出向量  $g$  (由  $N$  个复数傅

里叶系数)<sup>[13]</sup>。

$3 \times 3$  矩阵是保证系数为非负数并可进行复数相乘运算的最小矩阵。每个复数  $f, H$  都可以写成

$$f = f^{(0)} + f^{(1)} \exp(j2\pi/3) + f^{(2)} \exp(j4\pi/3) \quad (2)$$

$$H = H^{(0)} + H^{(1)} \exp(j2\pi/3) + H^{(2)} \exp(j4\pi/3) \quad (3)$$

使得系数均为非负数。其复数相乘可以写为

$$\begin{pmatrix} g^{(0)} \\ g^{(1)} \\ g^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^{(0)} & H^{(2)} & H^{(1)} \\ H^{(1)} & H^{(0)} & H^{(2)} \\ H^{(2)} & H^{(1)} & H^{(0)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f^{(0)} \\ f^{(1)} \\ f^{(2)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

故三点复数 DFT 运算可以写成

$$\begin{pmatrix} X(0)^{(0)} \\ X(0)^{(1)} \\ X(0)^{(2)} \\ \dots \\ X(1)^{(0)} \\ X(1)^{(1)} \\ X(1)^{(2)} \\ \dots \\ X(2)^{(0)} \\ X(2)^{(1)} \\ X(2)^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(0)^{(0)} \\ x(0)^{(1)} \\ x(0)^{(2)} \\ \dots \\ x(1)^{(0)} \\ x(1)^{(1)} \\ x(1)^{(2)} \\ \dots \\ x(2)^{(0)} \\ x(2)^{(1)} \\ x(2)^{(2)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.2.2 需要电符号处理的 OVMM 计算方法

带符号的复数 DFT 运算可按常规算法计算,即分为实部虚部,实部虚部的分别计算得到 4 个矩阵,通过电处理器进行和差运算,从而得到所求矩阵的实部虚部。复数  $1 \times n$  向量  $A$  和  $n \times n$  矩阵  $B$  的元素为  $a_i = u_i + jv_i, b_i = x_i + jy_i$ ,可以得到 4 个向量  $U = \{u_i\}_{i=1}^n, V = \{v_i\}_{i=1}^n, X = \{x_i\}_{i=1}^n$  和  $Y = \{y_i\}_{i=1}^n$ ,则  $A \cdot B$  可以由点积  $[U \cdot X - V \cdot Y]$  和  $[U \cdot Y + V \cdot X]$  得到。

3 基于 SOA 的 OVMM 实验平台

图 2 是本文提出的基于 SOA 的 OVMM 运算实验系统。传统输入向量采用激光阵列,而本文系统采用了 ASE 光源和波分复用器输出多路不同波长的非相干光,从而减小了能耗和成本。图中的 VMM 运算单元是整个实验系统的核心,SOA 1 和 2 对应于向量  $A$  中的  $a_1, a_2$  元素,SOA 3~6 对应于矩阵  $B$  中的  $b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}$  元素。经过耦合器输入到光电探测器 (PD) 1 和 2,其输出信号对应于向量  $C$  的  $c_1$  和

$c_2$ 。通过 FPGA 控制 SOA 驱动电路开关,实现输入向量矩阵的实时编程,调节 SOA 的驱动电流达到调节增益的效果。最终在 PD 上得到模拟光信号的计算结果。

按照 VMM 计算原理,将每一路光信号经过 PD,转化为电信号,最终再由电子模数转换器 (ADC) 转换成数字信号。在实验中,为了观测更精确的模拟结果,先不采用 ADC 进行量化,输入向量和矩阵仍然采用表 1 中的数据,则理论上输出结果应当如图 3 所示。

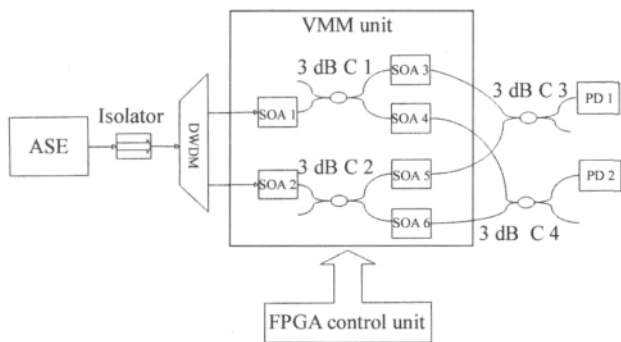


图 2 基于 SOA 的  $2 \times 2$  OVMM 系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of  $2 \times 2$  OVMM system based on SOA

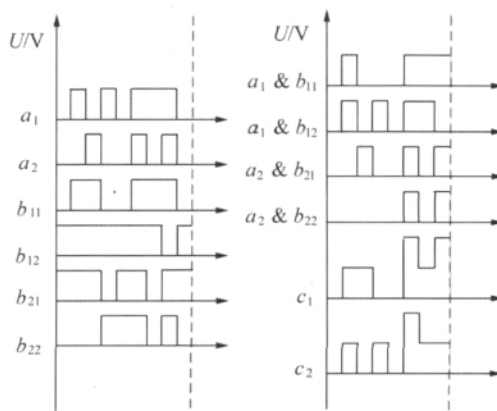


图 3 理论计算结果

Fig. 3 Theoretical calculation result

4 实验结果与分析

系统中的实验参数,开关速率为 1 MHz, DWDM 波长输出 1 端口为 1570.42 nm, 2 端口为 1575.37 nm。

图 4 中,上路是向量  $C$  中元素  $c_1$  波形结果,量化为“2”的信号幅值为 700.0 mV,量化为“1”的信号幅值分别为 140.0 mV 和 490.0 mV。实验结果所显示的逻辑关系与图 3 所示的理论分析是一致的。

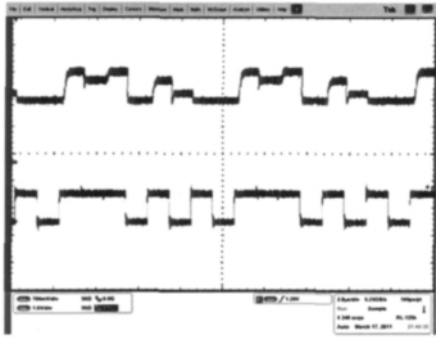
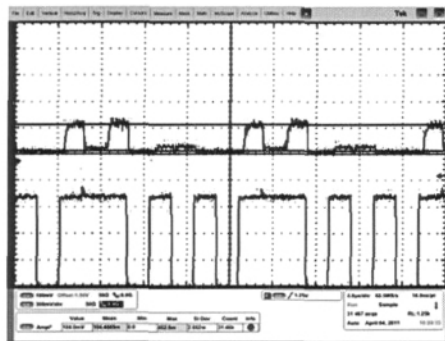


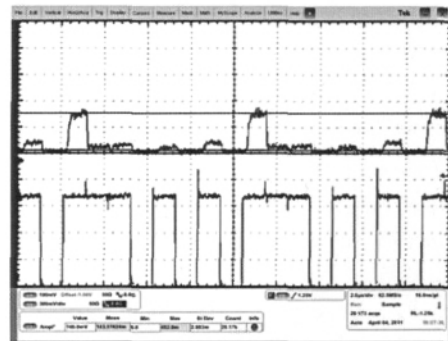
图 4 SOA 大增益输出时  $c_1$  的测量结果  
 Fig. 4 Experimental result of  $c_1$  under high SOA output gain scenario

图 4 中,量化为“1”的信号离散较大是由于串扰引起的误差。我们所使用的 SOA 驱动电最初设计为每两个驱动共用一个电源,导致电驱动信号之间

存在串扰,即一个 SOA 增益输出较大时,会有小部分信号叠加到另一个 SOA 的信号上,影响计算精度。调节(减少)每路 SOA 的增益,可在一定程度上降低串扰,使各运算级功率均衡。图 5 所示是调节后的测量结果。图 5(a)中上路信号是所测得的向量  $C$  中  $c_1$  波形结果,其中量化为“2”的信号幅值为 104.0 mV,量化为“1”的信号幅值为 20.0 mV,图 5(b)中的上路信号是  $c_1$  波形结果,其中量化为“2”的信号幅值为 140.0 mV,量化为“1”的信号幅值为 22.0 mV(两图中下路信号是参照信号  $a_1$ )。可以看到,串扰得到明显改善。不过这种简单的调节方式不能彻底解决问题,因为理想情况下幅值量化为“2”的信号幅度应该是量化为“1”的信号的 2 倍。图 5 显示的实测结果却大于 2 倍,这主要是 3 dB 耦合器的附加损耗(每个大约 0.5 dB)引起的。当 SOA 输出功率降低时,使附加损耗的影响突显。当然,这些问题通过采用独立的 SOA 驱动电路即可解决。独立驱动电路可使系统获得更大的动态范围。



(a)  $c_1$



(b)  $c_2$

图 5 向量  $C$  的测量结果  
 Fig. 5 Experimental result of vector  $C$

在 OVMM 系统中,动态范围是一个重要的参数,提高系统的动态范围,有利于将来增加向量维数以及矩阵维数。较大的动态范围可以实现更高精度输入信号的计算。输入、输出信号的 bit(比特)位与动态范围的关系为<sup>[21]</sup>

$$d = 2n + \log_2 M \quad (6)$$

其中: $d$  为输出的 bit 位; $n$  为输入信号 bit; $M$  为运算矩阵的阶数。由此可以判断,随着输入信号维数及精度的增大,输出信号的精度也将会增加,故需要更大的动态范围。

## 5 结论与讨论

OVMM 实现的是一个二维并行运算的光计算过程。提出了一种基于 SOA 的 OVMM 实现架构,并对其进行了理论分析以及演示性的实验验证。结果表明,本文方法是可行的。由于采用了 SOA,系统可以根据每一光路上的实际功率损耗调节 SOA 的增益,从而抑制输出光功率的不均匀性,提高计算精度。实验中的 SOA 是分立有源器件,在功耗和成本上虽不存在优势,但 SOA 的可集成性保证了集成后

的系统会在这方面有所改善。由文中算法论证也可以看出,OVMM 架构在 DFT 等运算中具有诱人的应用前景,故基于 SOA 的 OVMM 结构具有前瞻性的研究价值。

#### 参考文献:

- [1] Shahidi G G. Evolution of CMOS technology at 32nm and beyond[R]. Proc. of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2007, 413-416.
- [2] Iwai H. CMOS technology after reaching the scale limits [R]. Proc. of the IEEE-EDS 8th International Workshop on Junction Technology, 2008, 2-3.
- [3] XIAO Xin-dong, MAO Lu-hong, YU Chang-liang, et al. A monolithic optical interconnection based on the standard CMOS process[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 2010, **21**(11):1631-1634.  
肖新东,毛陆虹,余长亮,等.一种基于标准 CMOS 工艺的  
单片光互连[J].光电子·激光,2010, **21**(11):1631-  
1634.
- [4] Caulfield H J, Dolev S. Why future supercomputing requires optics[J]. Nature Photonics, 2010, **4**(5):261-263.
- [5] Goren A, Sarel S, Levit Y, et al. Vector-matrix multiplication[P]. U. S. Patent: 2004/0243657 A1, 2004.
- [6] Shaked N T, Messika S, Dolev S, et al. Optical solution for bounded NP-complete problems [J]. Appl. Opt., 2007, **46**(5):711-724.
- [7] Shaked N T, Tabib T, Simon G, et al. Optical binary-matrix synthesis for solving bounded NP-complete combinatorial problems[J]. Opt. Eng., 2007, **46**(10):1-11.
- [8] Dolev S, Nir Y. Optical implementation of bounded non-deterministic turing machines[P]. U. S. Patent: 7, 130, 093 B2, 2006.
- [9] Dolev S, Fitoussi H. The traveling beams optical solutions for bounded NP-complete problems[R]. Italy: Proceedings of the fourth international conference on fun with algorithms. 2007, 120-134.
- [10] Mathias Gruber. Multichip module with planar integrated free-space optical vector-matrix type interconnects[J]. Appl. Opt., 2004, **43**(2):463-470.
- [11] ZHANG Yan-xin, ZHAI Hong-chen, SHEN Jin-yuan, et al. Opto-electronic Hybrid Parallel Computing Based on a Single LCD[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 2000, **11**(1):11-13.  
张延新,翟宏琛,申金媛,等.基于单个 LCD 的光电混合  
并行计算[J].光电子·激光,2000, **11**(1):11-13.
- [12] Barhen J, Imam N. Sensor data processing for tracking underwater threats using terascale optical core devices [A]. In Harbor Protection Through Data Fusion Technologies[C]. 2009, 267-282.
- [13] Goodman J W, Dias A R, Woody L M. Fully parallel, high speed incoherent optical method for performing discrete Fourier transforms[J]. Optics Letters, 1978, **2**(1):1-3.
- [14] YU Rong-jin. Integrated optics and photonics[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 1998, **9**(2):162-165.  
于荣金.集成光学与光子学[J].光电子·激光,1998, **9**  
(2):162-165.
- [15] Eugene P M, Richard D G, Frank P P, et al. Acoustooptical matrix-vector product processor: implementation issues[J]. Appl. Opt., 1989, **28**(18):3843-3851.
- [16] Peter S G, David S M. High-speed low-energy digital optical processors[J]. Opt. Eng., 1996, **35**(2):436-442.
- [17] Eisenbach S. Optical signal processing practical implementation and applications[R]. Israeli: Lenslet Marketing Presentation, 2003.
- [18] Tamir D E, Shaked N T, Wilson P J, et al. High-speed and low-power electro-optical DSP coprocessor[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, **26**(8):11-20.
- [19] SHI Yan, YU Chong-xiu, XIN Xiang-jun, et al. Investigation on the combined orthogonal FSK/ASK labeled signal based on cross gain modulation in a SOA[J]. Optoelectronics Letters, 2010, **6**(3):214-217.
- [20] Goodman J W. Introduction to fourier optics[M]. US: McGraw-Hill. 1996, 282-286.
- [21] Gary C K. Matrix-vector multiplication using digital partitioning for more accurate optical computing[J]. Appl. Opt., 1992, **31**(29):6205-6211.

#### 作者简介:

陈建平 (1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光子信息处理、光纤传感器件与技术的研究工作。