

基于行运算器思想的 DRSTOP 控制信息生成方法

宋 凯

(华东交通大学信息工程学院,江西南昌 330013)

摘 要: 双旋光结构三值光学处理器(DRSTOP)具有数据位可重构和巨位数并行两大特性,可同时处理数千位的数据,在计算位数宽度很大的运算请求时,速度远远高于电子计算机. DRSTOP 的超强运算能力需要依靠相应的控制信息来实现. 本文阐述了 DRSTOP 的原理和结构,提出了基于行运算器思想的 DRSTOP 控制信息生成方法. 基于该方法,DRSTOP 可以自动化的完成用户提交的运算请求,进而能够作为一个强大的计算节点,融入并行平台,解决大规模数据计算问题. 最后,本文针对所提出的控制信息生成方法进行了一系列实验验证,实验结果表明,该方法正确、完备、可行.

关键词: 双旋光结构; 三值光学处理器; 控制信息; 重构指令

中图分类号: TP301; TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1133-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.017

DRSTOP Control Information Generation Method Based on Row Operation Unit

SONG Kai

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: Double-rotator-structure ternary optical processor (DRSTOP) has two characteristics, namely, giant data-bits parallel computing and reconfigurable processor, which can handle thousands of data bits in parallel, and can run much faster than computers. The super computing power of DRSTOP depends on the corresponding control information. This paper describes the principle and structure of DRSTOP, and presents a new control information generation method based on row operation unit. Based on this method, DRSTOP can deal with user's computing requests automatically, and then it can be used as a powerful computing node and integrated into the parallel platform to solve the problem of large-scale data calculation. Finally, a series of experiments are carried out to verify the proposed control information generation method. The experimental results show that the method is correct, complete and feasible.

Key words: double rotator structure; ternary optical processor; control information; reconfiguration command

1 引言

随着科技的进步,人们对于计算速度的要求越来越高. 而电子计算机速度的提升越来越困难^[1,2]. 这迫使人们开始考虑其他的新型计算部件. 光学计算机成为人们关注的焦点之一^[3~6]. 根据研究的侧重点不同,目前的光学计算机研究可归纳为三个分支^[7~10]. 第一个分支是全光计算机的研究,其工作重点在于研究新型光学材料实现全光运算器件^[11~13]. 第二个分支是

光学并行计算方法的研究,其工作重点在于发明新型空间调制器和空间滤波器^[14]. 第三个分支是光电混合型计算机的研究,其工作重点在于探索适合光学特点的计算机理论和结构^[15~17]. 三值光学计算机属于上述的第三分支,具有数据位数众多和处理器可重构两大优势,并且能耗极低. 相对于现有的三值光学处理器,双旋光结构三值光学处理器(Double-Rotator-Structure Ternary Optical Computer; DRSTOP)在重构速度和效率等方面具有一定优势,在处理大规模数据时,它的运算能

收稿日期:2017-03-30;修回日期:2017-08-28;责任编辑:马兰英

基金项目:国家自然科学基金(No. 61672006);江西省自然(青年)科学基金(No. 20151BAB217017);江西省教育厅科研基金(No. GJJ160494)

力估计相当于数百颗 CPU,且能耗极低^[9].当然,DRSTOP 的超强运算能力需要依靠相应的控制信息来实现.本文提出了一种新的 DRSTOP 控制信息的生成方法.基于该方法,DRSTOP 可以在保持低能耗的前提下,实现任意千位量级二元三值逻辑运算,能够作为一个强大的计算节点,融入并行平台,提升电子计算机系统的计算能力,解决大规模数据计算问题.

2 相关工作

就目前的研究阶段而言,DRSTOP 的工作过程仍然需要一个 PC 机控制(称为:DRSTOP-PC),用户通过 DRSTOP-PC 以 TOC 请求文件^[17]的方式来提交运算请求,DRSTOP-PC 生成相应的控制信息,并将控制信息发送至下位机,最后从下位机获取解码结果,并以 TOC 结果文件^[17]的方式回送给用户,如图 1 所示.

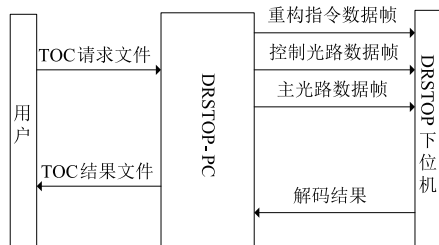


图1 DRSTOP工作过程

在 DRSTOP 的工作过程中,控制信息的生成和格式化工作最为重要,相关的工作方法不仅会影响整个控制过程的便利性,也会影响数据转换的速度和重构的效率,进而将影响 DRSTOP 整体的工作速度和效率.下文将重点论述控制信息生成和格式化的方法.

3 DRSTOP 控制信息生成方法

三值光计算机控制信息主要包括三种类型:主光路控制信息、控制光路控制信息以及重构指令.根据降值设计理论^[8],控制信息的生成过程中,确立用户逻辑字符与物理光状态的对应关系是第一个必须解决的环节,而这种对应关系是由用户逻辑字符在真值表中输出值的出现频率决定的.这就意味着在同一个用户请求中,不同的运算将会导致不同的对应关系,这将为控制信息的生成以及运算请求的统筹管理带来很大的困难,也成为三值光计算机自动化运行和实际应用的一大障碍.本文将采用基于行运算器思想的方法,结合 DRSTOP 的硬件特点,形成一套新的控制信息生成方法.

3.1 行运算器

三值光学计算机系统采用三种物理状态(无光态,垂直偏振光和水平偏振光)来表示三值信息.三种物理状态分别用符号 W、V 和 H 来表示.为方便讨论,采用表 1 所示形式表达真值表.

表 1 真值表形式

行号	主光路输入 a	控制光路输入 b	输出 c
1	W	W	c_{11}
	W	V	c_{12}
	W	H	c_{13}
2	V	W	c_{21}
	V	V	c_{22}
	V	H	c_{23}
3	H	W	c_{31}
	H	V	c_{32}
	H	H	c_{33}

由表 1 可知,二元三值逻辑运算的真值表从 $c_{11} \sim c_{33}$ 有九个输出值, c_{11} 、 c_{12} 和 c_{13} 对应的主光路输入值 a 均为 W,我们将其看作一行,行号为 1; c_{21} 、 c_{22} 和 c_{23} 对应的主光路输入值 a 均为 V,我们将其看作一行,行号为 2; c_{31} 、 c_{32} 和 c_{33} 对应的主光路输入值 a 均为 H,我们将其看作一行,行号为 3.每行所对应的运算器(称为行运算器实例)都可以用不多于 2 位液晶像素来实现.为了描述的方便,我们将这种以行为单位构造的运算器,称为行运算器.

行运算器的划分是按照主光路输入值的不同而定的,当主光路输入值分别为 W、V 和 H 态时,对应分别称为 W、V 和 H 行运算器.当主光路输入值为 W 态时,引入 W 态转换为 V 态的部件,该转换器件被称为 WtoV 部件.基于行运算器构成的光学处理器的逻辑结构如图 2 所示.图中实线是光信号的传输通路,虚线是电信号传输通路,控制部件包含了 DRSTOP 的重构电路以及控制光路的光电转换部件,叠合部件执行降值设计理论^[8]中所定义的叠合功能.

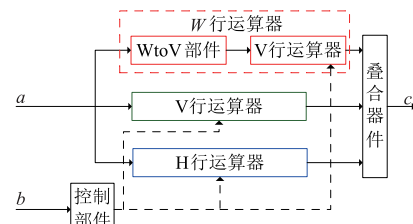


图2 基于行运算器构成的光学处理器

当基于行运算器思想来生成重构指令时,每个运算真值表都将根据其主光路输入值的情况被拆分为三个不同的行运算器实例.在构造这些行运算器实例时,可直接根据真值表的表头顺序建立用户逻辑字符与三种物理光状态的对应关系,从而实现了对应关系的统一化,简化了重构指令的生成过程,也为不同用户运算请求的统筹管理带来了便利.

3.2 基于行运算器思想的重构指令生成方法

(1) 重构指令中各位的作用

行运算器有 W、V 和 H 三种,下面将通过 V 行运算

器介绍重构指令中各位的作用. V 行运算器的硬件结构如图 3 所示.

图 3 中,绿色通路为主光路;红色通路为控制光路;S 为面光源;VP1 ~ VP5 是垂直偏振片;L1 ~ L6 均是常旋光液晶单元;ST1 和 ST2 为 2 个感光管;XOR1 ~ 4 为四个异或门;OR 为或门;R 为下拉电阻;DFS 为双四选一的选择器(IP0 ~ IP3 为四个数据输入端,C0 和 C1 控制 Y0 的数

据输出,C2 和 C3 控制 Y1 的数据输出);RS 为重构指令寄存器,四个异或门以及双四选择器(DFS)的四个控制端,共需要 8 个控制信号,对应重构寄存器的八位,即重构指令. 重构指令的第 7、6 位分别和 A1、A2 通过两个异或门为编码器的两层液晶提供控制信号,重构指令字的第 0、1 位和第 2、3 位分别连接 C0、C1 和 C2、C3,第 4 和 5 位分别改变 L6 和 L5 的旋光特性. 具体情况见表 2 所示.

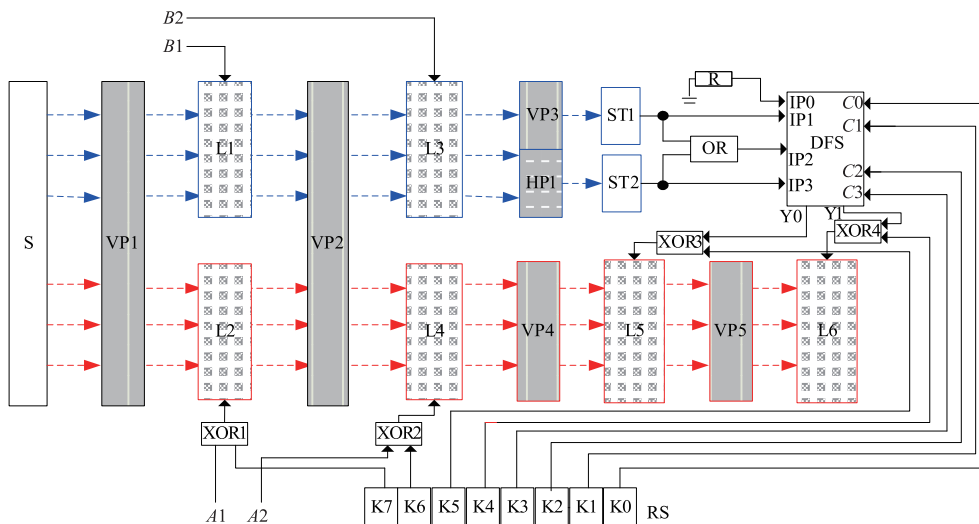


图 3 V 行运算器的硬件结构

表 2 重构指令各位使用情况说明

重构指令位序	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
对应控制信号	K7	K6	K5	K4	K3	K2	K1	K0
功能说明	00-不改变光状态 01-W 光变 V 光 11-W 光变 H 光	当 K5 = 1 时, XOR3 和 L5 一起 形成常旋光液晶 的功能	当 K4 = 1 时, XOR4 和 L6 一起 形成常旋光液晶 的功能	00, Y1 选中 IP0 输出, 为 N 型, 悬空; 01, Y1 选中 IP1 输出, 为 V 型; 10, Y1 选中 IP2 输出, 为直连; 11, Y1 选中 IP3 输出, 为 H 型.	00, Y0 选中 IP0 输出, 为 N 型, 悬空; 01, Y0 选中 IP1 输出, 为 V 型; 10, Y0 选中 IP2 输出, 为直连; 11, Y0 选中 IP3 输出, 为 H 型.			

(2) 重构指令编码表

根据上述重构指令各个数据位的作用, 不难推出全部 81 个重构指令的编码值. 比如, 要实现图 4 的单 V 型运算器实例, 则由于此时 a 光为 V 光, 不需要无光到有光的转换, 则第 7、6 位为 00; 而运算器的两层液晶均为常不旋光特性, 所以第 5 和 4 位为 11 (改变旋光特性); 第一层液晶 (对应图 2 的 L5) 的光控器为水平偏振片 (H 型), 所以第 1、0 位为 11; 第二层液晶 (对应图 2 的 L6) 的光控器为垂直偏振片 (V 型), 所以第 3、2 位为 01, 则实现该真值表的重构指令字为 00110111. 其他情况的指令字可以同样得到, 一共有 $26 * 3 = 78$ 个重构指令字, 其中 V 行运算器的重构指令编码表如表 3 所示.

表 3 V 行运算器的重构指令编码表

序号	输出排列	重构指令	序号	输出排列	重构指令
0	WWW	00000000	14	VVH	00111100
1	WVW	00010001	15	VHW	00110111
2	WWH	00000001	16	VHV	00110100
3	WVW	00010001	17	VHH	00111000
4	WVW	00110011	18	HWW	00100010
5	WVH	00111111	19	HWV	00101001
6	WHW	00000011	20	HWH	00100001
7	WHV	00110111	21	HVW	00100111
8	WHH	00100011	22	HVV	00101000
9	VWW	00011010	23	HVH	00100100
10	VVW	00110001	24	HHW	00100001
11	VVH	00111101	25	HHV	00101100
12	VVW	00111111	26	HHH	00100000
13	VVW	00110000			

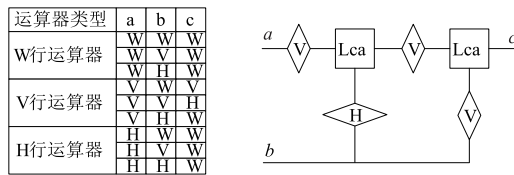


图4 单V型运算器实例

(3) 重构指令的生成过程

基于行运算思想,重构指令的生成过程可概括为三步:(1)按用户真值表的表头顺序将逻辑字符转换为W、V和H三种状态。(2)计算真值表中每行排列的位序(即运算器的ID号,取值范围是0~26)。(3)第二步中计算出的位序查询重构指令编码表,取出相应的编码值,并将其填入对应的重构指令单元。对于上述操作未涉及到的单元,填入禁止码(禁止码是指使输出恒为W的重构指令码,有多种取值方式,本文选用00H)。

3.3 操作数编码信息的生成

操作数编码信息的生成过程就是将用户提交的操作数的逻辑字符转换为二进制编码的过程。该过程也可分为两个步骤:首先根据重构指令生成过程中确立的用户逻辑字符和三种物理光状态之间的对应关系,将用户字符转化成相应的光学状态符号(W、V和H);然后再将光学状态符号转换为对应的二进制编码,最终可生成相应的操作数编码信息。

3.4 控制信息的格式化

为了区分三种不同的控制信息,在控制信息生成以后,DRSTOP-PC将根据约定的格式,为控制信息添加帧头部,形成重构指令数据帧、控制光路数据帧和主光路数据帧,最终将它们插入相应缓冲区的指定位置,等待下位机调用。

控制信息有三类:重构指令、控制光路操作数以及主光路操作数。控制信息的数据帧格式包括帧头部和数据信息两个字段。其中,帧头部用于区分当前通信数据的控制信息类型。01H表示控制信息类型为重构指令,02H表示控制信息类型为控制光路操作数,04H表示控制信息类型为主光路操作数,00H为预留码。三种控制信息数据帧的具体定义如图5所示,图中的n表示DRSTOP单个液晶模块的像素位数。

4 实验验证

4.1 实验设备及其功耗分析

4.1.1 实验设备

本文采用的实验设备由课题组成员自行研制,如图6所示。其中,DRSTOP运算部件是处理器的核心部件,包括编码器和运算单元两个部分。DRSTOP运算部件主要由液晶和偏振片两种光学器件构成。解码器用来分析液晶输出的图像结果,将其转化为二进制数据,

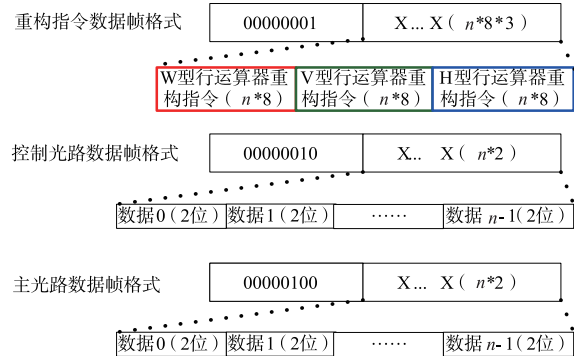


图5 控制信息数据帧的具体定义

经过 DRSTOP-PC 整理后回送给用户。

在整个实验设备中,液晶是最重要的核心组件。本文采用的液晶模块为课题组成员自行设计和定制的,有 24 * 24 的像素组成,一共有 576 个可独立控制的液晶单元。

4.1.2 功耗分析

由图6可知,本文的实验设备主要包括:DRSTOP运算部件(由液晶和液晶背光板组成)、DRSTOP解码器(摄像头)和DRSTOP控制部件(控制电路板)。另外还需要一个前端PC进行控制。液晶工作依靠两侧的电势差,几乎不耗电。实验设备的能耗主要花费在液晶的背光板、摄像头、控制电路板和前端PC。其中背光板的功耗为 5 * 3 = 15 瓦(每模块 5 瓦,共 3 个模块);摄像头的功耗为 3 * 3 = 9 瓦;控制电路板的功耗为 65 瓦;前端PC的功耗为 370 瓦;实验设备总体的功耗为 15 + 9 + 65 + 370 = 459 瓦。

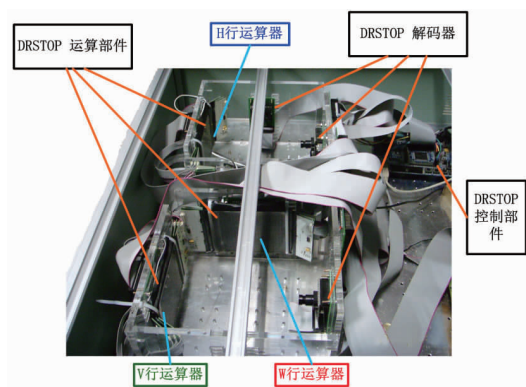


图6 实验设备全貌

4.2 实验过程及结果

4.2.1 运算能力实验

为了对比本文的实验设备与传统电子计算机的运算能力,我们设计了如下实验实例。对有一万条记录的数据库进行如下修改:字段A加110,字段B逻辑与100,字段C逻辑或101。电子计算机的CPU(假设为64位)无法直接处理数据库中的结构型数据,必须分解处

理,其操作过程为:字段 A 送入加法器,加 110 后送回 A;字段 B 送逻辑运算器,逻辑与 100 后送回 B;字段 C 送逻辑运算器,逻辑或 101 后送回 C. 将这个过程重复一万次,方可完成数据库的更新,总的运算次数为 $3 * 10^4$,所耗费的数据位资源为 $3 * 64 * 10^4$. 采用本文的实验设备(具有 576 个数据位,位序为 0 ~ 575)来处理,其过程如下:①在第 0 ~ 2 数据位上构造加法运算,第 3 ~ 5 数据位上构造逻辑与运算,第 6 ~ 8 数据位上构造逻辑或运算;②将第 0 ~ 8 数据位看作一个复合运算器,从第 9 数据位开始复制该复合运算器,直至 576 个数据位全部用完,将形成 $\lfloor 576/9 \rfloor = 64$ 个复合运算器,一次将完成 64 个数据记录的更新;③重复 $\lceil 10^4/64 \rceil = 157$ 次将完成全部的数据更新,所耗费的数据位资源为 $157 * 57$. 不难看出,本文的实验设备有更强的运算能力和更高的效率.

4.2.2 正确性与完备性实验

为了验证上述控制信息生成方法的正确性和完备性,实验的数据选择应遵循以下的原则:(1)运算全覆盖,即实验过程应包含全部的 81 个行运算器;(2)数据交互全覆盖,即实验过程中,W、V 和 H 三种状态之间都应有运算产生,各种光状态的转化也要完全覆盖.

根据上述的原则,本文在实验过程中将运算类型分为三类.(1)单运算器,包括单 W 型、单 V 型和单 H 型各有 27 个,共 81 个实例,共拍摄了 $81 * 3$ 张图片(每个运算结果包含 3 张图片);(2)双运算器,包括 WV 型、WH 型、WW 型、VV 型、HH 型和 VH 型共 6 种,每种选取 9 个代表性运算实例进行实验,共计拍摄 $6 * 9 * 3$ 张图片;(3)三运算器,即 W VH 型,选择了 27 个代表性运算实例进行实验,共计拍摄 $27 * 3$ 张图片. 全部的实验有效图片有 $81 * 3 + 6 * 9 * 3 + 27 * 3 = 486$ 张. 限于篇幅,本文仅给出表 4 所示的 W VH 型三运算器实例的实验结果. 实验照片如图 7 所示.

表 4 真值表及数据运算理论值

数据位序	主光路输入 a	控制光路输入 b	运算结果 c
0	W	W	W
1	W	V	V
2	W	H	H
3	V	W	V
4	V	V	H
5	V	H	W
6	H	W	H
7	H	V	V
8	H	H	W

实验照片与理论结果一致. 另外,全部的 486 张实验照片均匀理论结果一致. 由此可见,本文提出的 DRSTOP 控制信息生成方法是正确的、完备的、可行的.

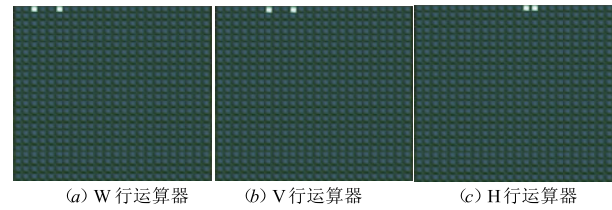


图 7 实验照片

5 结束语

DRSTOP 具有数据位可重构和巨位数并行两大特性,可同时处理数千位的数据,具有超强的运算能力. DRSTOP 的超强运算能力需要依靠相应的控制信息来实现. 本文提出了一种 DRSTOP 控制信息的生成方法,基于该方法,DRSTOP 可以在保持低能耗的前提下,实现任意千位量级二元三值逻辑运算,自动化的完成用户提交的运算请求,进而能够作为一个强大的计算节点,融入并行平台,解决大规模数据计算问题. 当然,要将 DRSTOP 投入实际应用,成为 Internet 上可方便调用的计算资源,还需解决用户互联网通信、认证、TOC 文件安全传输等问题,这些也是本文后续的研究内容.

参考文献

- [1] 卞琛,于炯,英昌甜,等. 并行计算框架 Spark 的自适应缓存管理策略[J]. 电子学报,2017,45(2):278-284.
Bian C, Yu J, Ying C T. Self-adaptive strategy for cache management in spark[J]. Acta Electronica sinica,2017,45(2):278-284. (in Chinese)
- [2] 陶晓玲,韦毅,王勇. 一种基于分层多代理的云计算负载均衡方法[J]. 电子学报,2016,44(9):2106-2113.
Tao X L, Wei Y, Wang Y. A load balancing method based on hierarchy and multi-agent for cloud computing platform [J]. Acta Electronica Sinica,2016,44(9):2106-2113. (in Chinese)
- [3] Jung J, Kim K, Yoon J, et al. Hyperspectral optical diffraction tomography [J]. Optics Express, 2016, 24(3):2006-2012.
- [4] Xu X, Wu Q, Liu J, et al. Decryption with incomplete cyphertext and multiple-information encryption in phase space[J]. Optics Express,2016,24(2):1734-1746.
- [5] Barz S, Kashefi E, Broadbent A, et al. Demonstration of blind quantum computing [J]. Science, 2012, 335(6066):303-308.
- [6] Sun L, Gao J, Yang X. Optical nonlocality induced Zitterbewegung near the Dirac point in metal-dielectric multilayer metamaterials [J]. Optics Express, 2016, 24(7):7055-7062.
- [7] Koenderink A F, Alù A, Polman A. Nanophotonics: Shrinking light-based technology [J]. Science, 2015, 348(6234):

- 516 – 521.
- [8] Yan J Y, Jin Y, Zuo K Z. Decrease-radix design principle for carrying borrowing free multi-valued and application in ternary optical compute [J]. *Science in China*, 2008, 51 (10): 1415 – 1426.
- [9] 宋凯, 金翊, 欧阳山, 等. 双旋光器结构的可重构三值光学处理器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1890 – 1898. Song K, Jin Y, Ouyang S. et al. Reconfigurable ternary optical processor with double rotator structure[J]. *Optics Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1890 – 1898. (in Chinese)
- [10] Jin Y, Wang H J, Ouyang S, et al. Principles, structures, and implementation of reconfigurable ternary optical processors[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54 (11): 2236 – 2246.
- [11] Ducin I, Shimobaba T, Makowski M, et al. Holographic projection of images with step-less zoom and noise suppression by pixel separation[J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 131 – 135.
- [12] Meehan A, Connelly M J. Experimental characterization and modeling of the improved low frequency response of a current modulated bulk RSOA slow light based microwave phase shifter [J]. *Optics Communications*, 2015, 341: 241 – 244.
- [13] Singh S, Kaler R S. Novel optical flat-gain hybrid amplifier for dense wavelength division multiplexed system [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2014, 26(2): 173 – 176.
- [14] LI W. Silent speech interface design methodology and case study [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2016, 25 (1): 88 – 92.
- [15] Wang X C, Peng J J, Li M, Shen Z Y, Ouyang S. Carry-free vector-matrix multiplication on a dynamically reconfigurable optical platform [J]. *Applied Optics*, 2010, 49 (12): 2352 – 2362.
- [16] Kai S, Yan L P. ,Reconfigurable ternary optical processor based on row operation unit[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 6 – 12.
- [17] 宋凯, 严丽平. 三值光计算机监控系统的内外存交互机制[J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(12): 3418 – 3423. Kai S, Yan L P. Memory and external memory interaction mechanism of the monitor system of ternary optical computer [J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36 (12): 3418 – 3423. (in Chinese)

作者简介



宋凯 男, 河南泌阳人, 博士, 副教授, 主要从事三值光计算机、嵌入式系统等方面的研究。

E-mail: skpark@163.com