

压缩光谱成像空间编码的调制效应

陈宇恒^{1,2,3,4} 陈新华^{1,2,3,4} 周建康^{1,2,3,4} 季轶群^{1,2,3,4} 沈为民^{1,2,3,4}

¹苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006

²苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

³苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

⁴苏州大学教育部/江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 空间光调制过程是空间编码压缩光谱成像方法中影响光谱成像数据保真度的重要环节。为拓展现有压缩光谱成像空间光调制的编码种类,揭示其与成像数据保真度的关联规律,针对压缩光谱成像中的编码调制效应展开研究。基于成像系统物理模型,拓展现有二值化编码振幅调制方法,开展非二值化连续型编码振幅调制研究,进而验证相位型调制方法的施用方法,以全波段图像均方根差作为评价成像数据保真度的参数,量化各类编码调制方法与成像数据保真度的关联。构建具有特定空间特征和谱线特征的仿真场景,实施压缩光谱成像仿真实验,对比六类空间编码调制效应下的成像效果,验证非二值化振幅编码调制的施用可行性及相位型空间光调制对提高此类成像方法数据保真度的有效性。

关键词 光谱学;光学压缩;编码优化;数据保真度;相位调制

中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1015001

Spatial Coding Modulation Effect of Compressive Spectral Imaging

Chen Yuheng^{1,2,3,4} Chen Xinhua^{1,2,3,4} Zhou Jiankang^{1,2,3,4}

Ji Yiqun^{1,2,3,4} Shen Weimin^{1,2,3,4}

¹*Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*

²*Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*

³*Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*

⁴*Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*

Abstract The spatial light modulation process makes direct effort on imaging data fidelity of the spatial coding compressive spectral imaging. To expand existing coding patterns for spatial light modulation in compressive spectral imaging and reveal its relation it and the imaging data fidelity, the research on coding modulation effect in compressive spectral imaging is carried out. Based on the physical model of imaging system, present binaryzation coding amplitude modulation method is extended, the research on non-binaryzation continuous amplitude modulation is adopted and the phase modulation method is also verified. The root-mean-square error of the full-spectrum images is worked out so that the correlation between modulation coding pattern and the imaging data fidelity is quantitatively revealed. The simulation scenery of certain spatial and spectral features is constructed so that the imaging simulating experiment is carried out. The imaging results under six kinds of spatial coding modulation conditions are compared.

收稿日期: 2012-05-28; **收到修改稿日期:** 2012-06-29

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20113201110016)资助课题。

作者简介: 陈宇恒(1980—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光谱成像方面的研究。

E-mail: yuhengchen@suda.edu.cn

导师简介: 沈为民(1963—),男,博士,研究员,主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。E-mail: swm@suda.edu.cn

中国光学学会会员号: s0400200265

The employing feasibility of non-binaryzation amplitude coding modulation is verified and the validity of data fidelity improved by the spatial light phase modulation is testified.

Key words spectroscopy; optical compression; coding optimization; data fidelity; phase modulation

OCIS codes 110.4234; 300.6380; 110.3010; 110.3000

1 引 言

压缩光谱成像技术是由传统光谱成像术与新型压缩感知方法融合而成的新型光谱成像技术^[1~3], 其在成像过程中直接实现拍摄景物光谱数据的并行压缩, 继而依据大比率压缩成像数据及特定算法求解算出拍摄景物的原始光谱数据立方体。较之传统扫描式光谱成像^[4], 新型压缩光谱成像具有显著降低数据采集量、有效提高成像信噪比、能对一定范围景物实施瞬时拍摄等优点。

作为新型压缩光谱成像技术的一个分支, 空间编码压缩光谱成像通过对三维光谱信号实施编码调制和色散以实现其混叠与降维^[2,5]。此类技术兼备压缩光谱成像的上述性能优点, 较其他压缩光谱成像技术展现出较为突出的性能优势与应用前景^[6,7]。受压缩感知机理局限, 现有成像方法下的空间编码压缩光谱成像数据保真度受限, 限制了其实际应用能力的提高。在空间编码压缩光谱成像技术中, 空间光调制过程是影响成像数据保真度的重要环节, 当前的空间编码压缩光谱成像的空间光调制仅限于二值化振幅调制。本文拓展施用于空间编码压缩光谱成像的空间光调制方法及其编码种类, 构建成像场景, 开展仿真成像实验, 以全波段光谱成像数据的均方根差(RMSE)作为评价依据, 量化分析不同空间光编码调制效应下的成像数据保真质

量, 拓展了基于非二值化振幅编码调制的空间编码光学压缩光谱成像方法, 验证了相位型空间光调制对提高此类光谱成像数据保真度的有效性。

2 空间编码压缩光谱成像

2.1 系统成像模型及数据变换方法

空间编码压缩光谱成像系统的成像系统如图 1 所示, 其成像过程为: 一定视场内的景物由物方成像系统聚焦至空间编码调制器件的调制面上, 全波段光信号经编码调制器件实现光信号调制, 再由中继成像系统聚焦至色散器件实现分光, 空间-光谱信息调制混叠的光信号最后经像方成像系统聚焦至探测器焦平面。基于上述成像链路, 探测器上采集的光信号可用表示为^[5]

$$g_{mn} = \iiint_{\lambda y x} f_0[x + \alpha(\lambda - \lambda_c), y, \lambda] \times T[x + \alpha(\lambda - \lambda_c), y] \times \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) dx dy d\lambda + \omega_{mn}, \quad (1)$$

式中 g 为探测器采集的压缩图像灰度值, f_0 为聚焦至调制面的全波段光信号, T 为编码调制器件的等效调制函数, ω 为系统噪声, λ 为波长值, λ_c 为色散效应预设的参考中心波长值, α 为色散器件的线色散系数, Δ 为焦平面像元尺寸, m 为像素横坐标, n 为像素纵坐标。

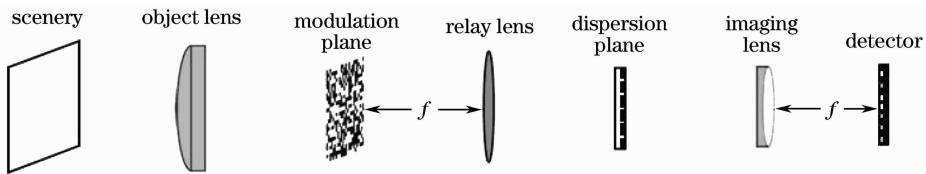


图 1 空间编码压缩光谱成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of spatial coding compressive spectral imaging system

图 2 直观展示了空间编码光学压缩光谱成像过程中光谱数据的压缩降维过程: 三维光谱数据立方体经由空间编码调制(过程 a), 再经色散器件实现

色散(过程 b), 最后被投射至探测器焦平面上(过程 c), 焦平面接收到的是一维空间信息和一维光谱信息调制混叠后的二维压缩图像数据。因此, 由压缩

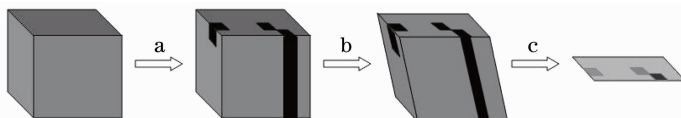


图 2 空间编码压缩光谱成像的数据压缩过程

Fig. 2 Data compression flow in spatial coding compressive spectral imaging

图像数据重构原始三维光谱数据立方体的实质是在一定约束条件下的求解欠定问题,可借助于特定的最优化方法求解^[8]。

2.2 空间光编码调制方法

空间光编码调制对光谱数据立方体实施采样调制,是由二维光谱-空间混叠数据重构原始三维光谱数据的必要条件。鉴于空间光调制器件的离散特性,实际的空间光调制过程亦是离散的。空间光调制器件可被视为一定数量矩形调制单元集合,受离散采样条件下的配准要求限制,调制单元在焦平面上的像方尺寸应为像元尺寸的整数倍。设像元尺寸为 Δ ,调制间隔(即调制单元尺寸)为 $q\Delta$,取矩阵元素 $t_{n'm'}$ 表示空间光调制器件上坐标 (n', m') 调制单元的编码效应,则(1)式中表征空间光调制器件调制作用的传递函数 T 可进一步表示为^[5]

$$T(x, y) = \sum_{m', n'} t_{n'm'} \text{rect}\left(\frac{x}{q\Delta} - m', \frac{y}{q\Delta} - n'\right). \quad (2)$$

依据不同的编码种类构建不同编码矩阵,即可通过空间光调制器件实施相应的空间光编码调制过程。S编码与随机编码这两类二值化编码是目前施用于压缩光谱成像空间光调制的主要编码^[5,7]。在空间光振幅调制中,亦可使用连续型编码实施调制^[9]。作为一种基于余弦函数行间非相关的连续编码,Harmonic编码矩阵可表示为

$$t_{H(ji)} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(i \frac{j\pi}{m}\right) \right], \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, m\}, \quad (3)$$

式中 i 为编码单元横坐标, j 为编码单元纵坐标, m 为编码矩阵阶数。

相应的,Legendre编码矩阵的可表示为

$$t_{L(ji)} = \frac{1}{2} \left[1 + P_i\left(\frac{j}{m}\right) \right], \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, m\}, \quad (4)$$

$$P_u(v) = \frac{1}{2^u} \sum_{t=0}^{\lfloor u/2 \rfloor} (-1)^t \binom{2u-2t}{t} v^{u-2t}. \quad (5)$$

易验证,由(3)~(5)式构造的Harmonic编码矩阵和Legendre编码矩阵,其中元素均为 $[0, 1]$ 区间内的小数。

有别于空间光信号的振幅调制,相位调制在保证编码采样效果的前提下,具有提高光能使用率等优点。受宽波段范围对相位调制实现能力的限制,相位调制当前仅被施用于单色光或窄波段的各类光学成像应用领域^[10]。对振幅型编码调制实施拓展,从相位型调制编码构建及其调制效应下的数据重构效用研究入手,研究在空间编码光学压缩光谱成像

中实施 $0/\pi$ 两类相位调制的空间光相位调制方法,进而分析并比对空间编码光学压缩光谱成像系统中振幅型调制与相位型调制的施用效果,为调制技术提高后的成像系统性能提升奠定研究及仿真实验研究基础。

2.3 数据评价方法

为定量评价压缩光谱成像数据保真度这一重要成像性能,需选用能同时体现成像数据“空间保真度”及“光谱保真度”的指标参数,为此引入全波段图像均方根差这一客观统计参量,其表达式为

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_{i,j,k} - \bar{f}_{i,j,k})^2}{c \cdot m \cdot n}}, \quad (6)$$

式中 f 为重构图像对应特定空间位置及特定波段像素的灰度值, \bar{f} 为对应特定空间位置及特定波段的像素的理论灰度值,参量下标 i, j 表征空间坐标, k 表征波段数。全波段图像均方根差的统计完整覆盖了拍摄图像二维空间信息和一维光谱信息,能通过“图”“谱”信息完整地评价成像数据质量。

3 仿真成像实验

为研究各类振幅与相位调制编码在空间编码压缩光谱成像中的调制效应,需开展仿真成像实验,为此构建多光谱仿真成像场景。仿真成像场景的空间尺寸为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$,波段数为21。图3为仿真成像场景全波段图像,场景包含两类几何形态:场景左方为一上窄下宽的等腰梯形,场景右方为一竖直放置的等腰三角形,该几何形态分布使该场景中包含水平、竖直、斜 45° 方向直线及阶梯状折线等空间特征。图4为两类几何形态范围内的光谱曲线分布图,图4(a)梯形的谱线包含一个双峰,图4(b)三角形的谱线含一个单峰。

依据仿真成像场景空间尺寸,选用32阶编码矩阵图案实施仿真成像所需的空間光调制。仿真实验选取4类振幅调制编码与2类相位调制编码实施空间光编码调制,编码图案见图5。4类振幅调制编码矩阵图案见图5(a)~(d),编码单元的光强调制率由其灰度表示。其中,S编码[图5(a)]和随机编码[图5(b)]为二值化编码,Harmonic编码[图5(c)]与Legendre编码[图5(d)]为连续编码。基于S编码与随机编码的相位调制编码矩阵图案居于图5(e)和(f),编码单元的光强调制率均为1,其不同相位值由其色调区分(彩图请见网络电子版)。

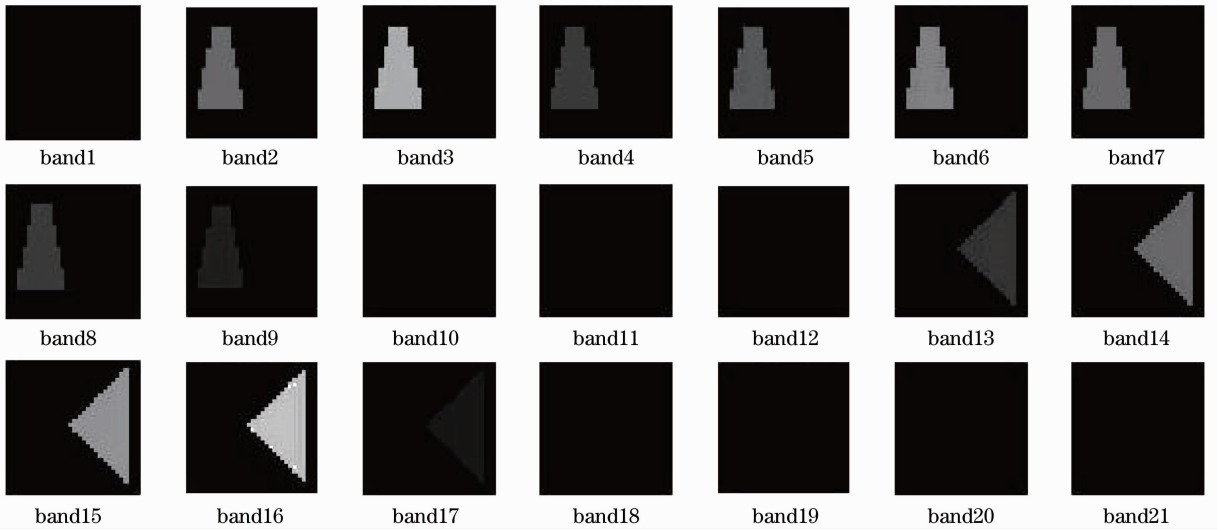


图 3 仿真场景全波段图像

Fig. 3 Full-band images of the simulating scenery

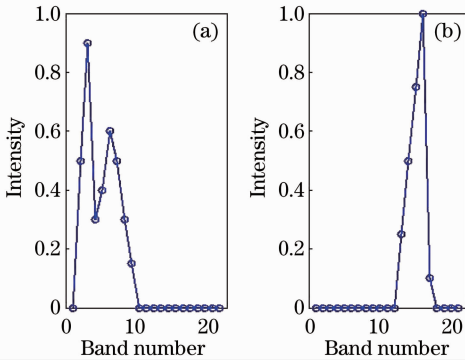


图 4 几何形态区域对应谱线。(a)梯形；(b)三角形

Fig. 4 Spectral curves of the two geometric shapes.

(a) Trapezoid; (b) triangle

仿真成像模拟不同空间光调制作用下的压缩光谱成像过程,获得相应的压缩图像,图 6 展示的是经图 5 对应编码矩阵图案实施调制及压缩光谱成像后所得的压缩图像,以此作为数据重构的输入,由基于两步迭代阈值法的算法模块实施数据重构^[11],获得拍摄场景全波段光谱数据。计算不同重构参数设置条件下重构光谱数据的均方根差,以此关联评价成像数据保真度这一重要成像参数,验证不同空间光编码调制效应下的仿真成像结果。

4 结果与讨论

图 7 列举了 6 类空间光编码调制方式下的压缩光谱成像仿真实验重构数据的均方根差统计结果,

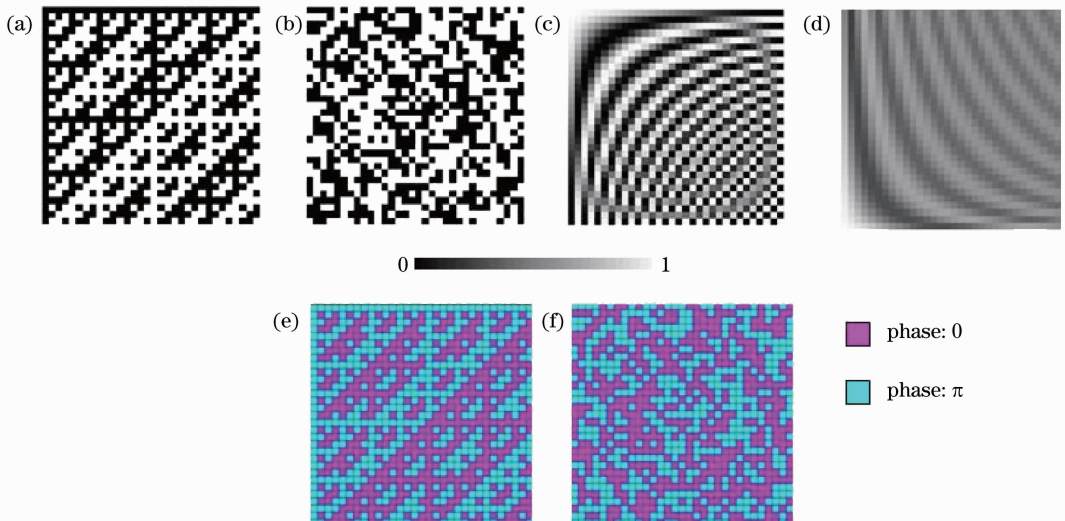


图 5 振幅与相位调制编码矩阵图案

Fig. 5 Coding matrix patterns for the amplitude and phase modulations

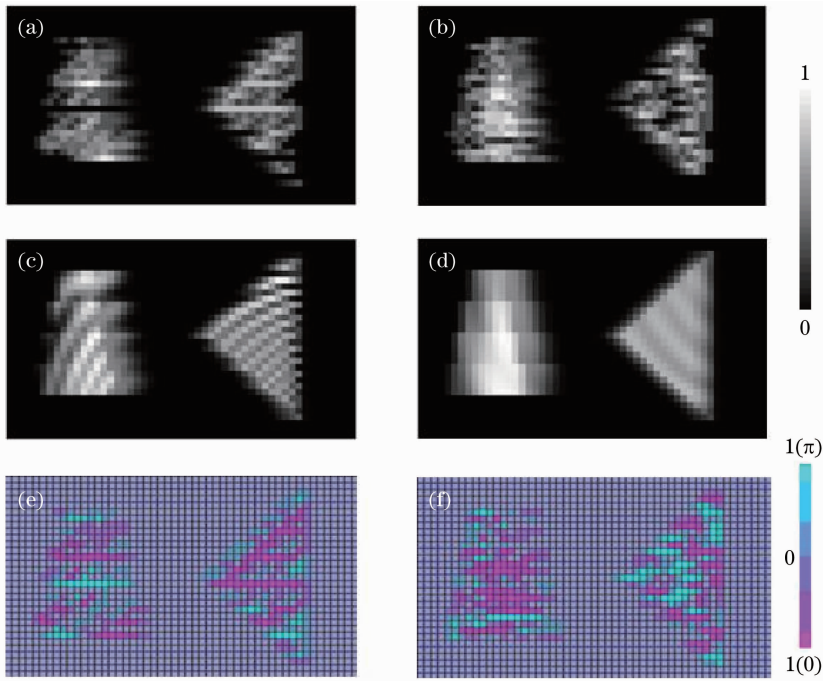


图 6 仿真成像实验压缩图像结果

Fig. 6 Compression images of the simulation imaging experiment

其中,各曲线对应的调制效应为 a:振幅型 S 编码; b:振幅型随机编码;c:振幅型 Harmonic 编码;d:振幅型 Legendre 编码;e:相位型 S 编码;f:相位型随机编码。由各曲线整体变化趋势可得,随正则化因子(Tau)的提高,各类仿真成像重构数据的均方根差均呈现出一定程度的下降,当正则化因子达到特定值时,重构数据的均方根差达到极小值,并在之后出现幅度不一的反弹。对应不同的空间光编码调制方式,均方根差曲线拐点的位置不同,其最小值亦具有差别。表 1 列举了各类编码调制方式下仿真成像结果的最小均方根差值。对于振幅型调制,经二值化编码调制的成像结果优于连续型编码调制结果(前者的均方根差值接近 6%,后者高于 10%量级)。在相位调制中,S 编码的调制效果较同种编码的振

幅调制获得了显著提升(均方根差的下降近四成),但随机编码的相位调制效果不佳,其成像数据均方根差在振幅型调制基础有所上升。

表 1 各类编码调制效应下仿真成像结果极小误差

Table 1 Minimum error of the simulation imaging result under different coding modulation conditions

Modulation category	Coding pattern	Minimum RMSE / %
Amplitude modulation	S coding	6.43
	Random coding	11.55
	Harmonic coding	10.07
	Legendre coding	6.69
Phase modulation	S coding	3.96
	Random coding	15.66

仿真成像实验结果表明,将连续型振幅空间光调制方法应用于空间编码压缩光谱成像技术中的尝试是有效的,但基于传统二值化调制编码的空间光调制方式更利于维系压缩光谱成像数据保真度。基于 S 编码的相位调制较同类编码振幅调制能显著提高压缩光谱成像重构数据的数据保真度,围绕此类技术的实验验证工作有望成为下阶段的研究重点。

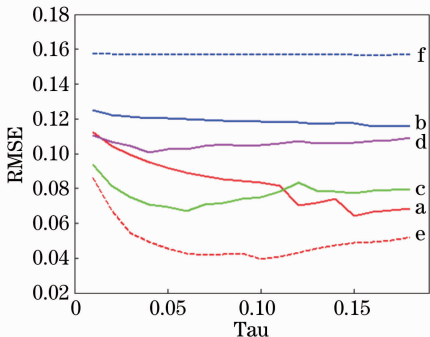


图 7 各类编码调制下全波段图像均方根差

Fig. 7 Root-mean-square errors of the full-band images under different coding modulation conditions

5 结 论

围绕数据保真度这一重要成像性能参数,对空间编码压缩光谱成像中的空间光调制方法及效应展开研究,在构建空间编码压缩光谱成像系统物理模

型的基础上,开展仿真成像实验,拓展了连续型振幅调制和二值化相位调制等空间光调制方法在此类成像系统中的施用方法,通过比对6类空间光调制作用下压缩光谱成像数据的客观统计参数,证实了相位型空间光调制对提高此类光谱成像数据保真度的有效性。

参 考 文 献

- 1 M. R. Descour, C. E. Volin, E. L. Dereniak *et al.*. Demonstration of a high-speed non-scanning imaging spectrometer [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1271~1273
- 2 M. E. Gehm, R. John, D. J. Brady *et al.*. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 1198~1202
- 3 L. Gao, R. T. Kester, T. S. Tkaczyk. Compact image slicing spectrometer (ISS) for hyperspectral fluorescence microscopy[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12293~12308
- 4 Y. Garini, I. T. Young, G. McNamara. Spectral imaging: principles and applications [J]. *Cytometry A*, 2006, **69**(8): 735~747
- 5 A. Wagadarikar, R. John, R. Willett *et al.*. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): B44~B51
- 6 C. F. Cull, K. Choi, D. J. Brady. Identification of fluorescent beads using a coded aperture snapshot spectral imager [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(10): B59~B70
- 7 A. A. Wagadarikar, N. P. Pitsianis, X. B. Sun *et al.*. Video rate spectral imaging using a coded aperture snapshot spectral imager [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6368~6388
- 8 A. A. Wagadarikar, N. P. Pitsianis, X. B. Sun. Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers [C]. *SPIE*, 2008, **7076**: 707602
- 9 A. E. Wagadarikar, M. E. Gehm, D. J. Brady. Performance comparison of aperture codes for multimodal, multiplex spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(2): 4932~4942
- 10 Luo Haijun. Research of Phase-Only Liquid Crystal Spatial Light Modulator [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008
 骆海军. 相位型液晶空间光调制器的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008

栏目编辑: 李文喆