

编码孔径光谱成像仪光学简化彗差对图谱反演误差分析

刘扬阳 吕群波 吴戈 裴琳琳 王建威

Analysis on the simplified optic coma effect on spectral image inversion of coded aperture spectral imager

Liu Yang-Yang Lü Qun-Bo Wu Ge Pei Lin-Lin Wang Jian-Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 054205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

目标跟踪中目标模型更新问题的半监督学习算法研究

[Research on semi-supervising learning algorithm for target model update in target tracking](#)

物理学报.2015, 64(1): 014205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014205>

基于深度玻尔兹曼模型的红外与可见光图像融合

[Infrared and visible image fusion based on deep Boltzmann model](#)

物理学报.2014, 63(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184202>

米散射激光雷达剖面数据三次样条垂直水平插值法

[A method of vertical and horizontal plus cubic spline interpolation for Mie scattering lidar profile data](#)

物理学报.2014, 63(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154204>

复杂背景下目标检测的级联分类器算法研究

[Study on the cascade classifier in target detection under complex background](#)

物理学报.2014, 63(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094204>

基于结构张量的变分多源图像融合

[Variational multi-source image fusion based on the structure tensor](#)

物理学报.2013, 62(21): 214204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214204>

# 编码孔径光谱成像仪光学简化彗差对图谱反演误差分析\*

刘扬阳<sup>†</sup> 吕群波 吴戈 裴琳琳 王建威

(中国科学院光电研究院, 计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

(2014年7月4日收到; 2014年8月20日收到修改稿)

编码孔径光谱成像技术是近年来发展起来的一种新型光谱成像技术, 该技术在一次像面采用特定的编码模板对目标进行编码, 结合特殊的采样成像方式, 获得满足景物重构的采样数据量, 实现了空间信息和光谱信息的高精度重构, 具有高光通量、高信噪比等优势. 但该技术实际的光学系统设计, 以及相应加工和装调过程中各种误差的存在, 将逐一传递反映到探测器精度与编码后图谱采样精度的不匹配, 这会引发最终重构图谱质量降低. 本文侧重分析研究光学系统设计和研制装调中光学彗差相对设计值间存在的偏差, 通过几何光线追迹与波前像差联合计算的方法, 在成像面仿真出不同数值程度的彗差矩阵, 并以此来分析不同彗差下对重构图像质量的影响结果. 并用其分析结论作为依据, 改进了编码孔径光谱成像仪的设计和研制, 提供了相应图像成像反演结果, 由此确保了编码孔径光谱成像仪的成像优势.

**关键词:** 编码孔径, 光学彗差, 图谱反演

**PACS:** 42.30.Va, 42.79.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.64.054205

## 1 引言

编码孔径光谱成像技术是近几年国内外提出的一门新兴的光谱成像技术<sup>[1-3]</sup>, 相比较于传统的光谱成像系统, 使用特殊透光板——编码孔径代替传统单一狭缝, 按照预先所设置编码孔径的数学形式调制、捕捉景物空间信息和光谱信息联合成像, 再经由后续数据计算方法反演得到最终三维光谱图像立方体, 能够同时获取图谱图像的高空间分辨率和高光谱分辨率, 并保持图谱图像的高信噪比, 其基本原理如图1所示.

编码孔径光谱成像技术的关键在于引入了一种多孔的空间调制器, 称之为编码孔径. 正是由于编码孔径的出现改变了点到线的传统狭缝式光谱成像技术的光谱信息采集方式. 最初的编码孔径光谱成像技术主要是Hadamard变换光谱成像技术,

由于在成像过程中需要移动编码模板, 并且探测器与目标间不发生变化(凝视成像), 因此, 其主要应用领域限制于显微光谱成像、微光光谱成像方面. 随着信号处理技术的发展, 出现了压缩感知理论, 并应用在编码孔径光谱成像技术中, 改变了模板的编码方式和成像方法. 但是由于该技术需要足够的采样数据量, 才能够重构出比较准确的图谱信息,

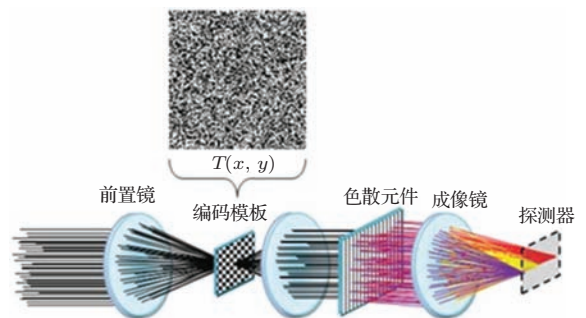


图1 编码孔径光谱成像仪模型示意图

\* 国家杰出青年科学基金(批准号: 61225024)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA7012022)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: liuyangyang@aoe.ac.cn

因此,需要多次曝光实现其良好的重构信噪比,而这与Hadamard变换光谱成像方式基本相同.综合上述技术,相里斌研究员提出了基于循环正交编码模板的推扫式编码孔径光谱成像技术<sup>[4,5]</sup>,使得该技术摆脱凝视成像方式的限制,可以应用于航空航天遥感领域.

编码孔径应用于光学系统或光电成像系统已经不鲜见,但绝大多数的编码孔径光学成像系统,都无一例外的需要借助数据处理的方式,完成最终的光学信息获取.技术上而言,静态编码孔径光谱成像技术通过光谱成像与计算方法的结合,将传统光谱成像在应用中的技术难点转移到数据处理方面,以较少的代价实现高的技术指标.但是,编码孔径光谱成像技术中数据处理环节有其自身的技术难点和关键瓶颈.

编码孔径光谱成像技术在实现过程中,通常要求一次像面(编码面)与最终探测器像面两者间满足严格的空間信息尺寸匹配,并根据这严格精确的已知匹配关系生成离散化的观测矩阵,由观测矩阵为主作为先验知识从而成功实现图谱混叠的最终数学反演.但在实际的光学系统设计,以及加工和装调过程中,由于光学系统设计和研制装调误差的存在,使得光学像差相对设计值间存在偏差,使光学系统的像差达不到理想设计状态,这种现象将使得光学像差在探测器像面一并混叠成像,从而将降低编码图谱的采样精度,导致最终重构图谱质量降低.

而如何具体衡量光学各种像差误差对编码孔径光谱成像的像质影响,以及实际装调中应控制精度范围等工程实际细节,均没有文献曾经涉及.本文从理论角度入手,首先针对编码孔径光谱成像系统的光学彗差进行建模分析,考虑到光学彗差的计算与每个光学镜片的材质、曲率等等息息相关,为了便于应用于实际系统中分析彗差影响,本文给出了一个综合参数模型建立系统彗差,理论分析了光学系统彗差对系统像质的影响,通过实验仿真了不同参数范围下光学彗差误差对重构像质的影响,给出了图像质量与系统彗差之间的曲线关系,得到了在 $128 \times 128$ 模板下获得理想像质的光学彗差容错范围,为本系统推扫式编码孔径光谱成像仪的设计和研制提供了参考依据.

编码孔径光谱成像技术是近年来发展起来的一种新型光谱成像技术,该技术在一次像面采用特

定的编码模板对目标进行编码,结合特殊的采样成像方式,获得满足景物重构的采样数据量,实现了空间信息和光谱信息的高精度重构,具有高光通量、高信噪比等优势.但该技术在实现过程中,通常要求一次像面(编码面)与最终探测器像面两者间满足严格的空間信息尺寸匹配,但在实际的光学系统设计,以及加工和装调过程中,由于光学系统设计和研制装调误差的存在,使得光学像差相对设计值间存在偏差,从而光学像差在探测器像面将降低了编码图谱的采样精度,导致最终重构图谱质量降低.本文针对光学像差中的慧差,分析了光学慧差对系统像质的影响,通过仿真不同彗差下对重构图像质量的分析,给出了图像质量与系统彗差之间的曲线关系,为编码孔径光谱成像仪的设计和研制提供了参考依据.

## 2 推扫式编码孔径光谱成像原理

数学上讲,编码孔径成像技术中模板的编码方式即是对不同算法的选用.例如,采用Hadamard正交模板的编码孔径成像技术实际上是统计学中的称量方法在光学中的应用<sup>[6]</sup>,该矩阵在增加测量次数的前提下能够有效的提高信噪比<sup>[7]</sup>.推扫式编码孔径光谱成像技术并不局限于阿达玛方式编码,只要模板具有循环正交性,便可以实现高通量和高信噪比.该技术对景物以行为单位进行采样成像,而其推扫方向与色散方向保持垂直,这样就可以保证色散方向上的行数据成像时不会与其他行上的数据产生混叠,最终通过平台的推扫,完成对目标景物的全孔径遍历成像,实现图谱重构.

系统成像过程如图2所示,以第1行为例,相同颜色数据块代表同一像素点上的光谱信息.每点所包含的光谱信息,由于色散方向与模板行方向一致,故只在行方向产生色散,数据经过编码和色散后不同谱带的信息会分布在不同的位置上,在CCD上得到数据混叠信息.

第2帧观测时,景物数据立方体沿垂直于色散方向移动1行,景物的第1行数据相应的被编码模板的第2行调制,在探测器的第2行编码混叠成像.以此类推,当图谱立方体遍历全编码模板后(既逐行推扫成像),每行数据依次通过了模板的 $N$ 行进行了 $N$ 次混叠成像,得到了 $N$ 次采样数据.

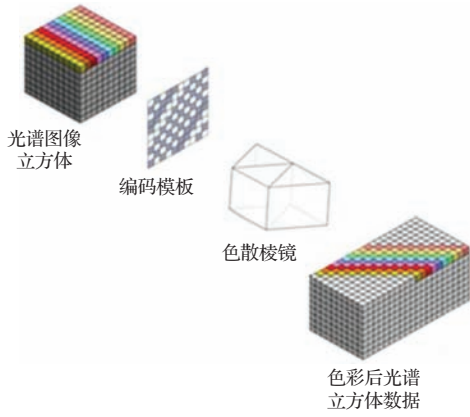


图2 推扫式编码孔径光谱成像技术成像过程示意图

以图谱立方体的任意1行 $j$ 为例, 考虑到色散对波长维的色散偏移特性,  $j$ 行色散后用矩阵 $X_j$ 来表示( $X_j$ 大小为 $n \times k$ ), 全遍历编码模板后 $M$ ( $M$ 大小为 $n \times n$ ), 通过逐行推扫成像, 则两矩阵相乘得到成像结果以矩阵 $Y_j$ 可以表示为

$$Y_j = MX_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \cdots & m_{2n} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & \cdots & m_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1k} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2(k-1)} & x_{2k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & x_{31} & \ddots & \ddots & \ddots & x_{3k} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $n$ 代表空间维采样点数,  $k$ 代表光谱维采样点数. 假设理想情况时不存在误差 $e$ , 由于编码为正交矩阵,

$$X_j = M^{-1}Y_j \quad (2)$$

为线性方程组, 可以通过(2)式直接完全重构.

### 3 几何光线与波前像差联合计算的彗差矩阵

根据编码孔径成像光谱成像原理, 理想情况下, 光场经过编码模板以及整个光学系统后, 在CCD上成像, 一般情况下, 按照编码模板的像元尺

寸应该与探测器尺寸1:1比例成像. 此时, 光线设计要求准直镜和成像镜所组成系统能够实现理想成像, 本质上也就是设计好编码模板的像元尺寸与探测器的像元尺寸之间相匹配的比例关系. 但是由于编码孔径光谱成像技术采用扩展孔径, 在其设计和研制过程中, 光学彗差的控制难度增大, 同时在仪器的实现过程中(如光机加工、装调等), 很难保证光学系统的各种参数能够精确符合设计公差, 这类误差的存在导致图谱重构的精度降低, 甚至无法实现图谱重构, 因此, 光学彗差的出现是影响编码孔径成像光谱质量精确反演的一个重要因素.

### 3.1 编码孔径光谱成像仪光学误差数学模型

为了便于分析光学彗差对于编码孔径光谱成像仪的图谱反演质量的影响, 建立了其误差数学模型.

假设编码孔径光谱成像仪其成像数学公式表示为

$$Y = MX.$$

但所受到彗差误差影响时, 其成像矩阵误差量为 $e$ , 其成像的数学公式则改写为 $Y = M'X + e$ . 其中 $X$ ,  $Y$ ,  $e$ 分别为观测过程中原始信息(包含了色散光学元件对初始光学信息的色散作用), 观测信息和误差的矩阵形式.  $M$ ,  $M'$ 分别是理想编码孔径数学形式、观测中受到彗差影响的编码孔径数学形式, 而 $\delta$ 为观测到编码孔径与理想编码孔径的误差, 可以写为

$$M' = M + \delta.$$

则反演信息 $X$ 的估计矢量 $\hat{X}$ 为

$$\hat{X} = QM'X + Qe, \quad (3)$$

即 $Q = M^{-1}$ , 则

$$\begin{aligned} \hat{X} &= M^{-1}M'X + M^{-1}e \\ &= M^{-1}(M + \delta)X + M^{-1}e \\ &= X + M^{-1}\delta X + M^{-1}e. \end{aligned} \quad (4)$$

可以看出, 光学彗差的产生将导致观测到的编码孔径数学形式与观测到的理想输入图谱信息 $X$ 时多出了一个与编码标准逆矩阵 $M^{-1}$ 有关的误差量 $\delta$ , 这将使得偏离程度不在可逆范围内. 所以, 式

中的误差分成两个部分, 分别受三个成分影响: 一是编码孔径的观测误差  $\delta$ 、输入图谱信息  $X$  和景物信息偏离理想情况的误差  $e$ , 这都将影响成像信息的反演质量.

### 3.2 几何光线追迹光学彗差

光学系统的像差来源主要在于光学系统的成像均有一定的孔径和视场, 因此不同孔径的入射光线其成像的位置不同, 不同视场的入射光线其成像的倍率也不同, 子午面和弧矢面光束成像的性质也不尽相同. 因此, 单色光成像会产生球差、彗差(正弦差)、像散、场曲和畸变. 例如光学彗差是由于靠近光轴的物点发出的大孔径光线在高斯面上仍不聚焦于同一像点形成的. 并且其不是一个简单的弥散圆斑, 而形成彗形像差. 如图 3 所示.

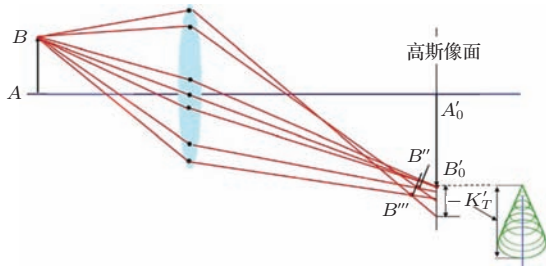


图 3 彗差形成几何光路示意图

彗差分为子午彗差和弧矢彗差, 按照几何光线追迹的光路计算方式得到初级子午彗差的分布式为

$$K'_T = -\frac{3}{2n'_k u'_k} \sum_1^k S_{II}.$$

初级弧矢彗差的分布式为

$$K'_S = -\frac{1}{2n'_k u'_k} \sum_1^k S_{II},$$

其中  $S_{II}$  为初级彗差分布系数, 其表达式如下:

$$S_{II} = l u n i_z (i - i')(i' - u),$$

$n'_k, u'_k$  分别是实际像面的折射率和孔径角,  $l$  是物面光线到折射面顶点的距离,  $u, n$  分别是物面的孔径角和折射率,  $i_z, i'$  分别是光阑处光线入射角度、像面入射光线角度. 从分布式可以看出, 一般弧矢彗差都小于子午彗差约 3 倍. 按经验手工计算光路时往往不必考虑弧矢彗差. 因此, 按照分布式方法计算光学彗差, 可以只考虑光学初级子午彗差大小, 将其视作光学镜的最终彗差, 光学彗差简化公式计算如下:

$$K'_T = -\frac{3}{2n'_k u'_k} \sum_1^k l u n i_z (i - i')(i' - u).$$

以某编码孔径光谱成像系统的前置光学系统为例, 如图 4 所示. 按照公式所计算出的光学初级子午彗差大小的曲线图如图 5 所示.

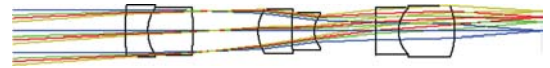


图 4 某光学系统前置镜组光学设计图

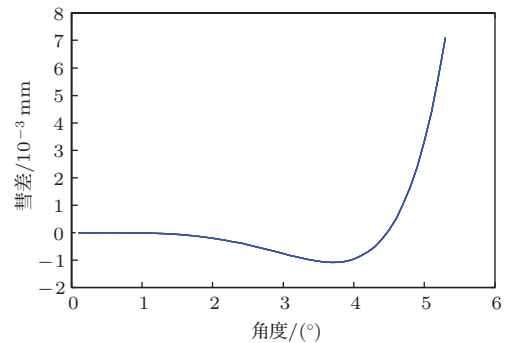


图 5 该镜组初级子午彗差曲线图

对一个光电成像系统计算其光学彗差简化分布式需要按照所实现系统的所有镜组的光学参数进行定性定量分析, 中间计算繁琐, 这里不加赘述.

### 3.3 Zernike 多项式计算光学彗差

按照该几何光线追迹方法计算彗差的优点是突破 Zemax 对光学系统彗差的定型分析, 虽然

表 1 某镜组初级子午彗差光学分布式计算数值表 (孔径角  $0^\circ - 5^\circ$ )

角度/(°)	0	0.5	1	1.5	2	2.5
彗差/mm	0	$-9.667 \times 10^{-7}$	$-1.5003 \times 10^{-5}$	$-7.1942 \times 10^{-5}$	$-2.0903 \times 10^{-4}$	$-4.5011 \times 10^{-4}$
角度/(°)	3	3.5	4	4.5	5	5.4
彗差/mm	$-7.7159 \times 10^{-4}$	$-1.0489 \times 10^{-3}$	$-9.7233 \times 10^{-4}$	$8.8706 \times 10^{-5}$	$33087 \times 10^{-3}$	$70957 \times 10^{-3}$

增大了计算时间和复杂度, 但能够明确知道光学系统彗差的实际大小数值. 但对于光学系统定量定型仿真分析光学彗差对成像结果的研究目的, 采用该方法仍具有一定局限性, 表现在光线追迹方法计算出从光线零入射角度至其他不同入射角度下的彗差总体偏移量大小, 却没有提供彗差形状的具体描述方法, 彗差对于光场中每个角度的入射光线都会会聚成一个圆环, 且随角度增大, 其圆环的圆心成直线移动(如图3所示彗差中圆环向下移动).

对于编码孔径光谱成像技术需要图像反演的成像技术而言, 为更好做其成像过程和结果的定量定性分析, 本文引入波像差的彗差描述方法, 即采用加权重的Zernike多项式以波前像差仿真彗差, 力图数字仿真出彗差具体圆环形式. 如下式所示[8]:

$$W(\rho, \theta) = \sum_n^k \sum_{m=-n}^n W_n^m Z_n^m(\rho, \theta) \\ = \sum_n^k \left\{ \sum_{m=-n}^{-1} W_n^m (-N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta)) \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^n W_n^m (N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta)) \right\}.$$

或者在笛卡尔坐标系下:

$$W(x, y) = \sum_{j=0}^{j \max} W_j Z_j(x, y),$$

其中,  $W_n^m$  或  $W_j$  为波像差多项式的权重,  $Z_j(x, y)$  为Zernike多项式,  $j$  为多项式不同模式, 代表着不同的像差种类. 但更常见的是  $Z_j(x, y)$  表示为

$Z_n^m(\rho, \theta)$ , 具体表达式如下:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta), \\ m \geq 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \\ = -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta), \\ m < 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi.$$

对于给定的  $n$ ,  $m$  可以取值为  $-n, -n + 2, -n + 4, \dots, n$ ,  $N_n^m$  是归一化因子,  $R_n^{|m|}$  是径向多项式, 具体表达式为

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}}, \\ \delta_{m0} = 1, \quad m = 0; \delta_{m0} = 0, \quad m \neq 0. \\ R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s (n-s)! \{s![0.5(n+|m|) - s]![0.5(n-|m|) - s]!\}^{-1} \rho^{n-2s}.$$

Zernike多项式在圆域上具有正交完备和归一化的特性. 当Zernike多项式在  $n = 3, m = 1, -1$  时, 该项即描述完备且归一化的光学弧矢彗差和子午彗差. 采用仿真Zernike多项式能够在径向坐标系下描述出光学彗差的所有环形形状, 更容易实现编码孔径光谱成像技术中光学彗差对成像质量的影响并加以分析, 如图6所示, Matlab描述了不同入射角度下光学彗差在出瞳波前像面(编码孔径光谱成像技术中即成像像面)的平面二维矩阵.

Zernike多项式描述的是完备且归一化的光学子午彗差和弧矢彗差, 联同前面几何光线追迹方法所计算出不同入射角度的彗差总体大小, 就可以得到实际某成像系统中的彗差实际值.

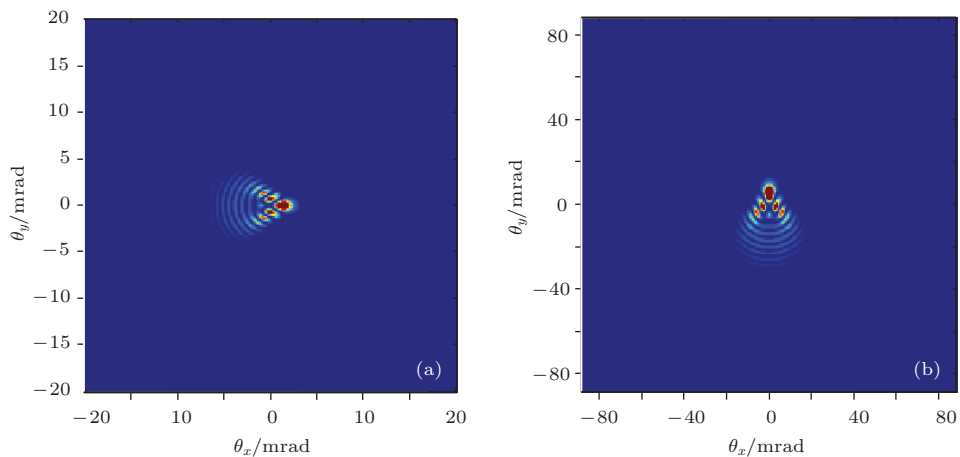


图6 (网刊彩色) Zernike多项式描述的光学子午彗差 (a) 弧矢彗差; (b) 子午彗差

## 4 仿真结果分析

### 4.1 正交编码模板推扫快速重构算法

考虑到单幅探测图像在压缩感知重构理论原则上受限于稀疏采样数据量、观测数据量与重构数据量之间的最佳比例关系<sup>[9-11]</sup>, 我们提出循环正交编码模板推扫快速重构算法(loop-mask push-broom fast reconstruction algorithm, LPFR算法), 即是通过增加观测次数实现观测数据量的增长, 期望更好的满足压缩感知重构理论原则中三个数据数量的最佳比例关系<sup>[12]</sup>.

在不考虑其他误差影响的情况下, 我们对LPFR算法进行了计算机仿真, 重构数据立方体如图7和图8所示, 图7为LPFR算法的图谱立方

体反演结果与原始二维图像的对比结果. 采用Strehl和SNR评价参数和验证, 该方法可以同原始输入图谱的Strehl评价参数为1, SNR评价参数可达近300 dB, 可以看出, 采用多帧曝光并采用LPFR重构方法, 可以将图谱数据准确重构出来. 图8给出了LPFR算法光谱立方体各个谱段图像的仿真结果.

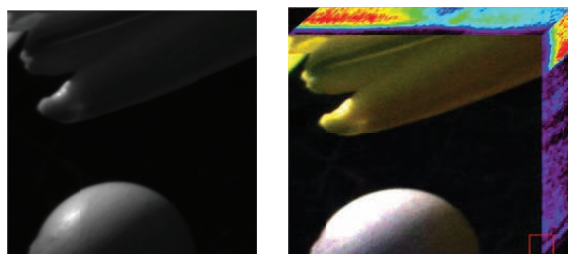


图7 (网刊彩色) LPFR算法图像和图谱仿真结果

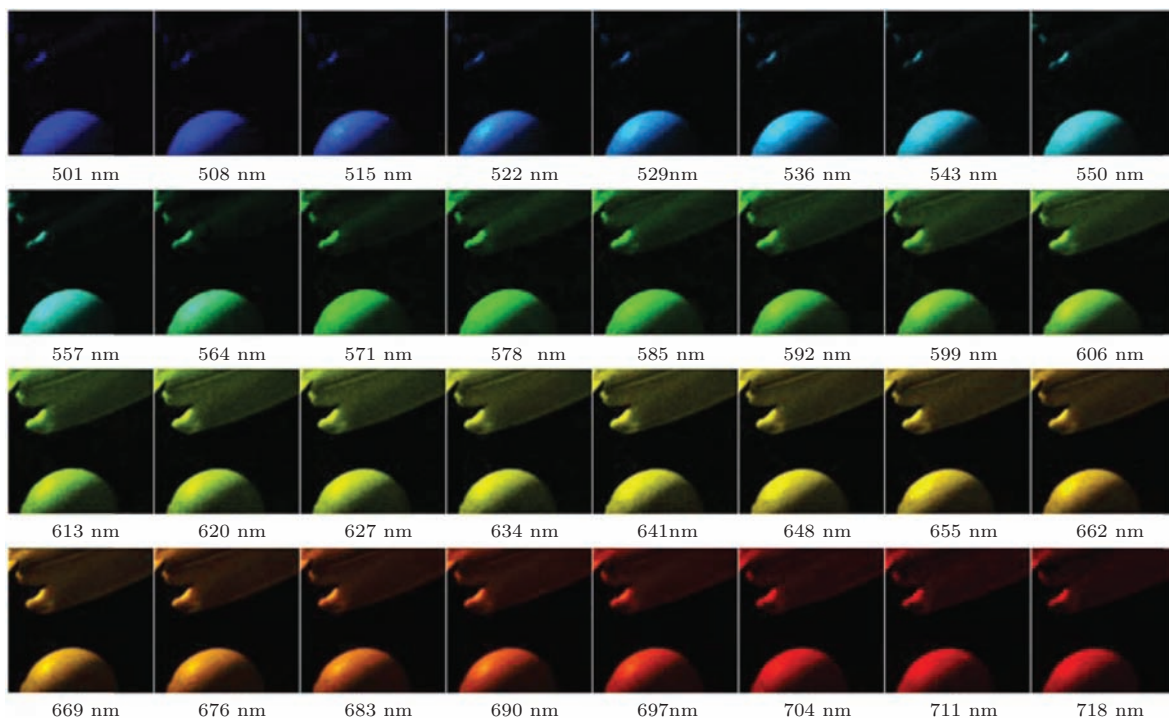


图8 (网刊彩色) LPFR算法光谱立方体各个谱段图像的仿真结果

图9为LPFR算法景物点重构光谱曲线与原始光谱曲线对比, 图中所选取点坐标为(212, 168), 图中蓝色圆圈代表输入景物的原始光谱曲线, 红色线段代表同一景物点重构光谱曲线. 如图所示, 当正交编码模板函数和曝光次数设计完备时, 重构光谱曲线与原始输入光谱曲线可以拟合到近乎完全一致.

通过上述分析, 考虑到光学系统设计、加工、装

调过程中的光学彗差一旦发生变化时, 观测到的编码模板也发生变化, 而且由于编码模板采用 $S$ 循环模板, 变化后的编码模板是否可逆直接决定重构图谱的精度.

按照前面的分析, 光学彗差对编码孔径光谱成像所带来的误差影响, 从编码模板到探测器间一直存在. 在仪器设计和研制时, 光学彗差往往尽可能控制在一个较小的范围内, 因此, 在仿真过程

中,选择光学彗差变化范围将以分布式简化光学彗差的实际计算值为依据(孔径角为 $0^\circ\text{--}5^\circ$ ),从设计光学系统时可接受的光学彗差最大范围过渡至成像光谱的工程研制时将出现的最大光学彗差范围,这里设其为 $0.2\text{--}20\ \mu\text{m}$ ,针对 $255\times 255$ 尺寸大小的编码孔径进行光学彗差影响仿真,并利用Strehl(斯特列尔)比参数,分析光学彗差影响下编码孔径结果与理想情况下编码模板逆变换结果,光学彗差总偏移量为 $0.2\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 时反演所获图谱的全波段合成的二维图像结果如图9所示.图11分别是光线彗差总偏移量为 $0.2\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 时点(212, 168)光谱反演曲线与原始光谱曲线的Strehl比.

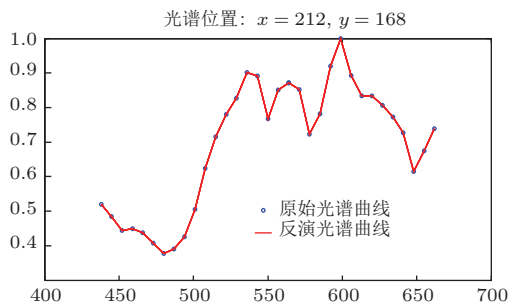


图9 (网刊彩色) LPFR算法景物点重构光谱曲线与原始光谱曲线对比

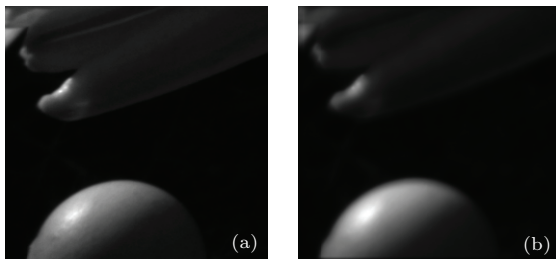


图10 光学彗差总偏移量为 $0.2\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 时的编码孔径光谱成像反演全波段合成二维图像结果对比 (a)  $0.2\ \mu\text{m}$ 彗差; (b)  $20\ \mu\text{m}$ 彗差

可以看出,由于彗差的影响,实际编码模板逆变换与理想情况下编码模板逆变换存在偏差,而且随光学彗差偏差的增加而增加.也就是说,彗差影响越大,其反演结果变差效果越明显.

表2为光学彗差为 $0.2\text{--}20\ \mu\text{m}$ 时的编码孔径光谱成像仪的反演图谱立方体的全波段合成的二维图像与原始全波段合成图像的图像Strehl比(Img\_Strehl)、相应两幅图像信噪比(Img\_SNR)、某点(212, 168)光谱曲线与原始光谱曲线的Strehl比(Spec\_Strehl)的各个参数实际计算数值.图12为根据表1所拟合获得的光学彗差为

$0.2\text{--}20\ \mu\text{m}$ 时各个参数的曲线数值.

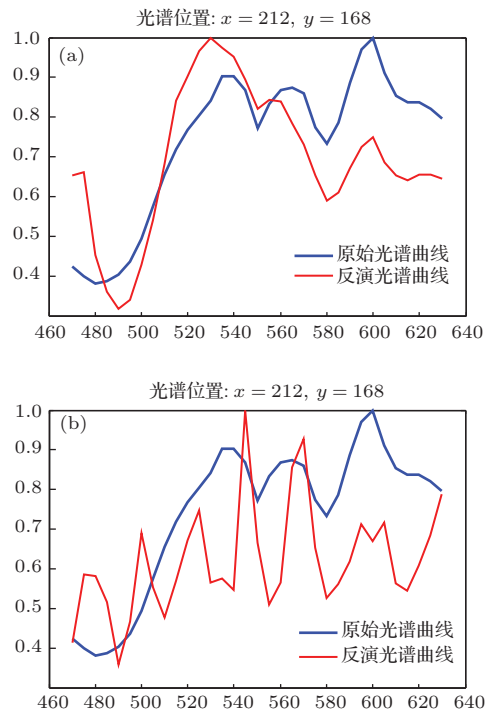


图11 (网刊彩色) 光学彗差总偏移量为 $0.2\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 时的编码孔径光谱成像点(212, 168)处光谱反演结果与原始光谱曲线对比 (a)  $0.2\ \mu\text{m}$ 彗差; (b)  $20\ \mu\text{m}$ 彗差

表2 光线彗差为 $0.2\text{--}20\ \mu\text{m}$ 时的编码孔径光谱成像仪各参数一览表

彗差/ $\mu\text{m}$	0.2	0.8	1.6	2	4
Img_Strehl	1	1	1	0.9993	0.9985
Img_SNR	72.2285	64.2292	42.4645	28.5076	23.6861
Spec_Strehl	1	1	0.9924	0.7006	0.6709
彗差/ $\mu\text{m}$	6	8	10	16	20
Img_Strehl	0.9987	0.9913	0.9958	0.9905	0.9874
Img_SNR	25.3072	17.2962	20.2197	17.0009	15.7686
Spec_Strehl	0.8938	0.7204	0.8242	0.4933	0.6329

从表2和图12中可以看出,当彗差从 $0.2\ \mu\text{m}$ 增大 $20\ \mu\text{m}$ 时,全波段合成的二维图像与原始图像的Strehl比衰减缓慢,但信噪比衰减最为显著;而彗差从 $0.2\ \mu\text{m}$ 增大 $20\ \mu\text{m}$ 呈现阶跃式下降分为 $[0.2\ \mu\text{m}\ 1.6\ \mu\text{m}]$ ,  $[2\ \mu\text{m}\ 12\ \mu\text{m}]$ ,  $[12\ \mu\text{m}\ 20\ \mu\text{m}]$ 三个阶段.当彗差增大达到某一阈值时,大于 $2\ \mu\text{m}$ 时,各个参数就会发生明显的衰减,而 $2\ \mu\text{m}$ 这个阈值,也同光学设计中镜头的设计参数不谋而合,在编码孔径光谱成像仪的工程研制中,超过 $2\ \mu\text{m}$

的镜头波前RMS设计值,一般即认为镜头设计不理想.

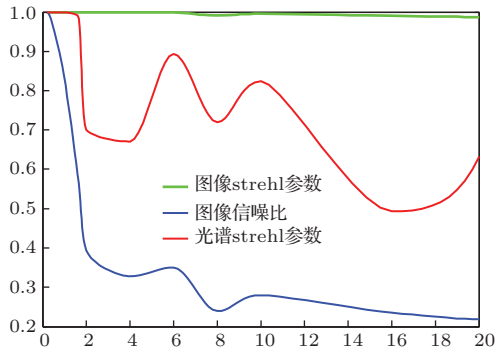


图12 (网刊彩色) 光线彗差为0.2—20 μm 时的编码孔径光谱成像仪各参数曲线表

## 5 结 论

综合来说,编码孔径光谱成像技术体现了学科的融合,其中有很多的技术可以继承传统光谱成像技术,同时又有理论上的创新,目前的编码孔径光谱成像技术图谱精确重构的主要瓶颈除了在于反演算法的研究和编码空间的有效设计上,在工程上保证入射光场信息、编码信息与成像信息之间的对应关系也十分重要,其表现在如果有光学、结构以及探测器成像上等误差时,都会引发后续不好的反演效果.

本文侧重分析研究光学系统设计和研制装调中光学彗差相对设计值间存在的偏差,通过几何光线追迹与波前像差联合计算的方法,在成像面仿真

出不同数值程度的彗差矩阵,并以此来分析不同彗差下对重构图像质量的影响结果.并用其分析结论作为依据,改进了编码孔径光谱成像仪的设计和研制,提供了相应图像成像反演结果,由此确保了编码孔径光谱成像仪的成像优势.

## 参考文献

- [1] Wagadarikar A, John R, Willett R, Brady J D 2008 *Applied Optics* **47** B44
- [2] Brady J D, Aristide D, Fiddy A M, Mahalanobis A 2008 *Applied Optics* **47** COS11
- [3] Gehm M E, John R, Brady J D, Willett MR, Schulz J T 2008 *Optics Express* **17** 14013
- [4] Xiang L B, Yuan Y, Lu Q B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5400 (in Chinese) [相里斌, 袁艳, 吕群波 2009 物理学报 **58** 5400]
- [5] Liu Y Xiangli B Lv Q 2013 *SPIE Optical Engineering Applications International Society for Optics and Photonics* Sandiego 885501
- [6] Sloane N J A, Harwit M 1976 *Applied Optics* **15** 107
- [7] Gottesman S R, Fenimore E E 1989 *Applied Optics* **28** 4344
- [8] Thibos L, Applegate R A, Schweigering J T, Webb R 2000 *OSA Trends in Optics and Photonics* 232
- [9] Sun B, Zhang J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 110701 (in Chinese) [孙彪, 张建军 2011 物理学报 **60** 110701]
- [10] Joseph M G 2002 *Introduction to Lens Design:with Practical ZEMAX Examples* (Richmond:Willmann-Bell Press) p80
- [11] Arguello H, Arce R G 2011 *J. Opt. Soc. Am.* **28** 2400
- [12] Jin L X, Zhang R F 2013 *Chin.Phys.B* **22** 064203

# Analysis on the simplified optic coma effect on spectral image inversion of coded aperture spectral imager<sup>\*</sup>

Liu Yang-Yang<sup>†</sup> Lü Qun-Bo Wu Ge Pei Lin-Lin Wang Jian-Wei

(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

( Received 4 July 2014; revised manuscript received 20 August 2014 )

## Abstract

With the novel spectrum imaging technology development in recent years, the push-broom coded-aperture spectral imaging (PCASI) shows the advantages of high throughput, high SNR, high stability etc. This coded-aperture spectral imaging utilizes fixed-code templates and push-broom mode, which can realize high-precision reconstruction of spatial and spectral information. But during optical lens designing, manufacturing and debugging, there inevitably exist some minor coma errors. Even minor coma errors can reduce image quality. In this paper, we simulate the system optical coma error which influences the quality of reconstructed image, analyze the variation of the coded aperture in different optical coma effect, and then propose an accurate curve for image quality and optic coma quality in  $255 \times 255$  coded template, which provides important references for the design and development of push-broom coded-aperture spectrometer.

**Keywords:** coded-aperture, optic coma error, spectrum aliasing

**PACS:** 42.30.Va, 42.79.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.64.054205

---

\* Project supported by the National Preeminent Youth Foundation (Grant No. 61225024), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA7012022).

† Corresponding author. E-mail: [liuyangyang@aoe.ac.cn](mailto:liuyangyang@aoe.ac.cn)