

# 凝视成像降质模型的超分辨率重建

姚 焱<sup>1,2</sup>, 乔彦峰<sup>1</sup>, 钟 兴<sup>1,3</sup>, 于树海<sup>3</sup>, 戴 路<sup>1,3</sup>, 白 杨<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对吉林一号视频 03 星凝视成像的特点, 为提高其图像空间分辨率, 解决光学系统分辨率不足的问题, 提出一种视频卫星超分辨率重建的新算法——凸集中间映射。以主动观点分析视频卫星凝视成像特点, 建立了基于凝视成像的图像降质模型。为求解该降质模型的逆过程, 以凸集理论为基础, 建立了基于中间降质过程的约束集和相应的点投影算子, 通过点投影算子逐帧修正高分辨率图像灰度值, 最终将重建的高分辨率图像约束于凸集的交集上。实验结果表明, 该算法使图像分辨率提高近 30%, 克服了同类算法具有投影误差和重叠伪影的缺点, 图像质量评价指标均优于所列其他算法, 8 帧重建得到收敛解, 对不同清晰度的图像重建均具有可行性和稳健性。说明该算法适用于视频卫星图像超分辨率重建。

**关键词** 图像处理; 超分辨率重建; 凝视成像降质模型; 凸集中间映射; 点投影修正

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0810003

## Super-Resolution Reconstruction of Staring Imaging Degraded Model

Yao Ye<sup>1,2</sup>, Qiao Yanfeng<sup>1</sup>, Zhong Xing<sup>1,3</sup>, Yu Shuhai<sup>3</sup>, Dai Lu<sup>1,3</sup>, Bai Yang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** According to the characteristics of the staring imaging of Jilin-1 No. 3 video satellite, in order to improve the spatial resolution of the image and overcome the insufficient resolution of optical system, a new algorithm of super-resolution reconstruction of a video satellite, intermediate convex sets mapping, is proposed. The characteristics of satellite staring imaging are analyzed based on the active view, and the degraded model is established based on the staring imaging. In order to solve the inverse process of the degraded model, the residual constraint set and the corresponding point projection operators in the intermediate degradation process are set up based on the convex set theory. The gray value of the high resolution image is corrected by the point projection operators, and finally the reconstructed high resolution image is constrained to the intersection of convex sets. The experimental results show that the new algorithm improves the image resolution by nearly 30%, and overcomes the disadvantages of the similar algorithms such as projection error and overlapping artifact. The image quality evaluation index is better than that of the other algorithms, and the convergence solution of the eight frames is obtained. It is feasible and robust to the image reconstruction with different definitions. All those show that the new algorithm is suitable for the super-resolution reconstruction of video satellite images.

**收稿日期:** 2017-03-29; **收到修改稿日期:** 2017-04-23

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(61505203)、中科院青促会专项基于智能仪器理念的一体化光学微小卫星关键技术

**作者简介:** 姚 焱(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事超分辨率重建、短波红外镜头设计方面的研究。

E-mail: yaoye115@mailsucas.ac.cn

**导师简介:** 钟 兴(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间相机光学系统设计、小卫星光学总体技术研究等方面的研究。E-mail: ciomper@163.com(通信联系人)

**Key words** image processing; super-resolution reconstruction; staring imaging degraded model; intermediate convex sets mapping; point projection correction

**OCIS codes** 100.6640; 110.4155; 100.3010

## 1 引 言

随着遥感和航天领域对高分辨率图像需求的不断增长,如何获得更高分辨率图像成为目前的研究热点。然而,从硬件上提高分辨率往往受到工艺水平和卫星造价的限制,且最新研究表明,现有传感器制造工艺已经接近像元尺寸极限<sup>[1]</sup>。像元尺寸有限,意味着像元尺寸一定大于光学系统分辨率,卫星图像分辨率一定低于光学系统分辨率。因此,一味依靠硬件提高分辨率并不现实。如果成像系统获得同一景物在不同时相、不同位移或不同传感器下的多帧图像,就有可能获得足够的互补信息,通过亚像素精度的图像配准技术,产生高分辨率(HR)图像<sup>[2]</sup>。这一数学理论结合信号处理的方法成为提高图像分辨率的研究热点——图像超分辨率重建。这一领域被誉为遥感应用领域的三大研究重点之一。

超分辨率重建方法可概括为基于频域、空域和学习三类。其中,基于频域的算法数学模型简单,但适用面窄且难以加入先验知识和处理噪声<sup>[3]</sup>。近年来,基于学习的超分辨率重建逐渐发展,如邻域复原法、卷积神经网络法等<sup>[4]</sup>,但基本上适用于单帧超分辨率重建。目前,超分辨率重建方法主要是在空域内实现分辨率增强,如最大后验概率法、凸集投影法(POCS)等,具有算法灵活、便于加入先验知识和数学模型等优点,但收敛性差且重叠伪影和马赛克现象是图像重建普遍存在的缺点<sup>[5-9]</sup>。

吉林一号视频 03 星是我国新型多功能商业视频遥感卫星。针对该卫星凝视成像特点,本文对其序列影像进行超分辨率重建,提出一种视频序列图像超分辨率重建算法——凸集中间映射(ICMS)。通过主动观点建立基于凝视成像的图像降质模型;详细介绍了求逆过程算法,实现超分辨率重建;利用实验验证算法有效性,对比多种算法验证算法优良性,探讨了重建帧数对重建结果收敛性的影响,对不同类型卫星图像的重建效果进行了验证,证实了算法的可行性和稳健性。

## 2 基于视频卫星凝视成像的图像降质模型

在遥感图像获取过程中,经过光学系统衍射、散焦等造成的光学模糊,卫星与地面间的运动模糊,传感器下采样造成的混叠效应,以及不同图像间的运动位移等一系列图像降质过程,最终导致图像分辨率降低<sup>[1]</sup>。为重建高分辨率图像,应明确高分辨率图像和低分辨率(LR)图像序列之间的降质过程。建立正确的降质模型是实现超分辨率重建的首要任务。以主动观点和被动观点分析视频卫星成像特点,并建立基于视频卫星凝视成像的图像降质模型。

### 2.1 被动观点

被动观点即传统观点<sup>[1,7-9]</sup>认为几何形变是降质过程的第一步,以场景为坐标系,场景变动决定几何形变。HR 图像依次经过几何形变、模糊、欠采样和噪声这一系列降质过程最终得到 LR 图像,其过程如图 1

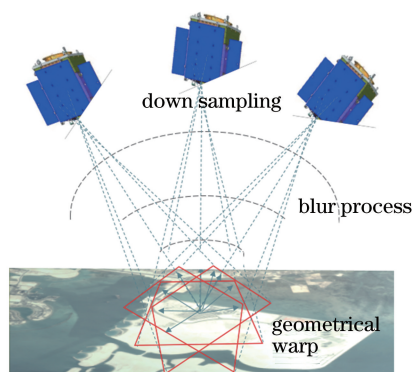


图 1 凝视成像下,被动观点降质模型

Fig. 1 Passive view degraded model of staring imaging

然而,这一观点易引入计算误差,原因有以下三点:

1) 该视频卫星的成像模式为凝视成像,是指随着卫星的运动,光学成像系统始终盯住某一目标区域,可以连续观察视场内的变化。这时,相机姿态的变动大于场景的变动,求解相机姿态的几何形变矩阵要比求解场景变动的几何形变矩阵精确。

2) 被动观点通过 HR 图像间的配准求解几何形变矩阵,而 HR 图像经原始 LR 图像升采样、去模糊后,存在人为处理误差。原始 LR 图像不存在人为误差,其间的图像配准可认为是精确的。

3) 信息利用率差,因为被动观点认为 HR 图像经几何形变后与模糊矩阵进行卷积,但其经几何形变后通常是非整数位移,在数字图像处理中,模糊矩阵是离散的,这就造成了几何形变后的高分辨率网格与模糊矩阵窗口网格对不上,显然会造成信息的丢失甚至错位。

综上,被动观点降质模型不适用于视频卫星成像特点。

## 2.2 主动观点

主动观点认为几何形变是由卫星姿态主动决定的,应以相机为参考系,发生在降质模型的最后一步,该观点可有效克服上述被动观点降质模型缺点。采用主动观点,建立基于视频卫星成像模型的新型降质模型,如图 2 所示。

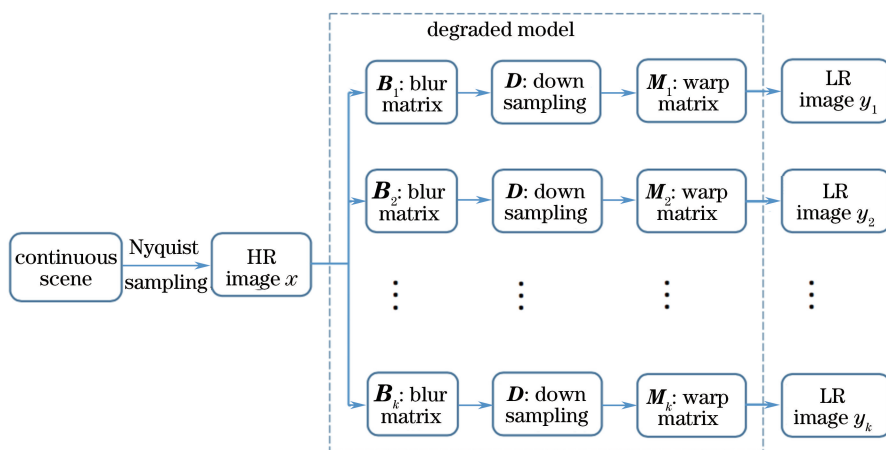


图 2 主动观点降质模型

Fig. 2 Degraded model of active view

由于研究中卫星图像无明显噪声,故不考虑传感器像元密度决定的欠采样和由相机姿态决定的几何形变。因此这一降质过程可描述为 HR 图像依次经过大气模糊、光学模糊、传感器模糊等模糊模型,最终由传感器得到 LR 图像序列。这一降质过程可表示为

$$y_k = M_k D B_k x, 1 \leq k \leq p, \quad (1)$$

式中  $x$  为原始 HR 图像,  $M_k$  为第  $k$  帧图像的几何形变矩阵,  $B_k$  为第  $k$  帧图像的模糊矩阵,  $D$  为欠采样矩阵,  $p$  为 LR 图像总张数。超分辨率重建过程是这一过程的逆过程,即  $B^{-1} D^{-1} M_k^{-1} y_k = x_k$ 。已知 LR 图像序列,对基于视频卫星凝视成像降质模型求逆,通过新算法重建理想 HR 图像。

无论是主动观点还是被动观点,描述的都是同一个物理过程,即场景成像到传感器,本质差别在于参考系的选取。被动观点之所以被广泛采用,在于其直观、便于理解。然而文献[10]指出,当模型不符合或参数估计不精确时,图像数据不再符合模型,重建效果很差。降质模型的选取主要由几何配准和图像模糊哪种占主要降质因素决定。当低分辨率图像中几何形变占据主要贡献时,如果先进行退模糊、升采样,再进行图像配准会增加数值误差,这种情况下采取主动观点更占有优势。当图像模糊和降采样过于严重时,直接配准会导致更大的数值误差,此时采取被动观点更好。

## 3 基于新降质模型的 ICSM 算法

根据凝视成像降质模型,介绍了相应的视频卫星图像超分辨率重建的新算法。算法以凸集理论为基础,

首先建立 HR 图像与 LR 图像序列之间坐标的映射关系,再将 LR 图像插值得到的 HR 网格的灰度值近似看作真实值,将理想 HR 图像模糊后的灰度值看作模拟值,求两者之间的插值,建立基于中间降质过程的残差约束集,并通过点投影算子逐帧修正 HR 图像灰度值,最终将重建的 HR 图像约束到凸集的交集上,并重复投影算子修正过程,迭代直至获得最优图像。

### 3.1 凸集理论

凸集理论是一种重要的信号重建理论,是一大类迭代算法的数学理论基础。其核心思想是以集合论为理论基础,在超分辨率重建中,HR 图像对应希尔伯特空间的一个元素,各种不同的先验知识和约束条件组成不同的凸集  $\{C_i\}$ 。当这些凸集的交集为非空集时,可认为最终重建的 HR 图像的最优解属于这些集合的交集  $C_s$ ,即

$$x \in C_s = \bigcap_{i=1}^m C_i. \quad (2)$$

凸集理论认为,最优解的求解过程就是一个将初始值投影到约束集上反复迭代的过程。定义约束集  $\{C_i\}$  的相应投影算子为  $\{\dot{P}_i\}$ ,该算子将给定点映射到相应凸集上最近的一个点,选取一个初始解,由下式迭代,直到得出满足所有先验知识和条件的解<sup>[11-17]</sup>

$$\begin{cases} x^{(0)} = x_0 \\ x^{(k+1)} = \dot{P}_m \dot{P}_{m-1} \cdots \dot{P}_1 x^{(k)} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.2 ICSM 算法

凸集理论是一个开放的理论,关键在于对可行解的解空间定义约束集和相应投影算子。基于视频卫星凝视成像降质模型,ICSM 算法通过 LR 图像序列与 HR 图像间的映射关系,建立基于降质过程的残差约束集及相应点投影算子,重建视频卫星图像。

#### 3.2.1 约束集

##### 1) 残差约束集 $C_D$

新算法定义的残差约束集指的是以  $B_k$  和  $D$  之间为中间过程,将理想 HR 图像经过模糊矩阵后的灰度值看作模拟值,在 HR 网格映射到 LR 网格过程中将插值法得到的灰度值近似看作真实值,之间的差值限定在某个常数  $\delta$  范围内,建立残差约束集。这一过程可用图 3 简单描述。

首先,计算残差模拟值。理想 HR 图像经过模糊矩阵变成  $B_k x$ 。

其次,计算残差真实值。即建立 HR 网格  $x_{\text{grid}} = [n_1, n_2]^T$  与每一帧 LR 网格  $y_{k-\text{grid}} = [m_1^k, m_2^k]^T$  间的

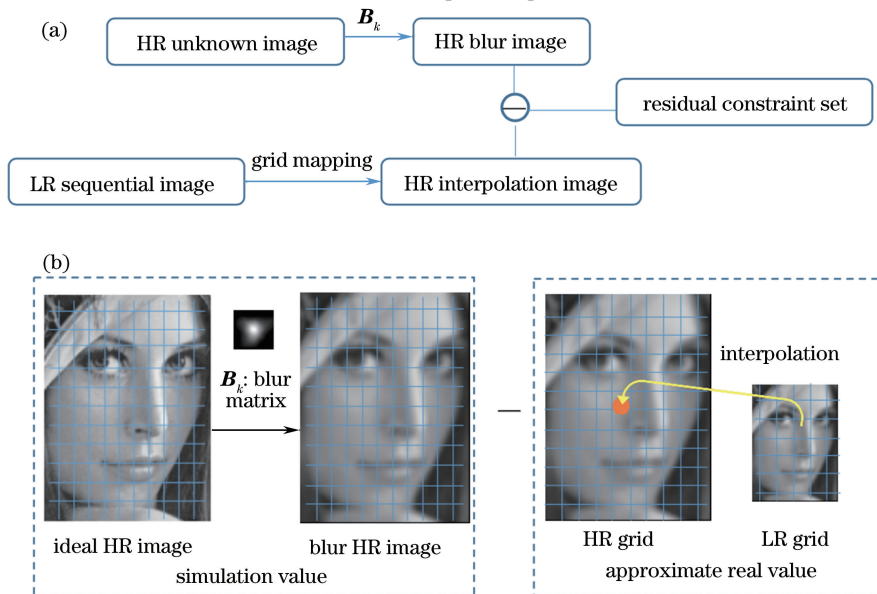


图 3 残差约束模型。(a)流程图;(b)模拟图

Fig. 3 Residual constraint model. (a) Flow chart; (b) simulation process

映射,其中  $[n_1, n_2]$  为高分辨率图像坐标,  $[m_1^k, m_2^k]$  为第  $k$  帧低分辨率图像坐标。通过映射关系求解真实值,这种映射关系表示如下:

$$y_{k\text{-grid}} = \mathbf{M}_k \mathbf{D} x_{\text{grid}}, \quad (4)$$

$$\mathbf{D}^{-1} \mathbf{M}_k^{-1} y_{k\text{-grid}} = x_{\text{grid}} \circ \quad (5)$$

在实际过程中可通过图像配准求得 LR 图像间的几何变换矩阵  $\mathbf{M}_k^{-1}$  及放大倍数的升采样矩阵  $\mathbf{D}^{-1}$ , HR 网格坐标  $x_{\text{grid}}$  映射到第  $k$  帧 LR 网格坐标为  $y_{k\text{-grid}}$ , 即

$$y_{k\text{-grid}} = (\mathbf{D}^{-1} \mathbf{M}_k^{-1})^{-1} x_{\text{grid}}, \quad (6)$$

因为 LR 网格上的点都是真实值,可近似认为 HR 网格映射到 LR 网格使用双线性插值得到的灰度值也是真实值,其值可表示为

$$x' = y_k [(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{M}_k^{-1})^{-1} x]_{\text{bilinear}}, \quad (7)$$

最后,新算法残差如下:

$$r [n_1, n_2] = \mathbf{B}_k x - y_k [(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{M}_k^{-1})^{-1} x]_{\text{bilinear}}, \quad (8)$$

新算法残差约束集可表示如下:

$$C_D^k = \{x [n_1, n_2] : |r^{(x)}| \leq \delta\}, \quad (9)$$

$$C_D^k = \{x [n_1, n_2] : |\mathbf{B}_k x - x'| \leq \delta\}, \quad (10)$$

式中常数  $\delta$  的确定十分重要。选取过大会导致约束集收敛性差,太小则会导致数值问题使得重建方法不稳定。在实验中对  $\delta$  值的估计进行了收敛性测试,选取收敛后的  $\delta$ ,重建效果表明选取的  $\delta$  具有一定的可移植性,测试后选取常数  $\delta=1.5$ 。

#### 2) 振幅约束集 $C_A$

振幅约束集指的是将图像的灰度值限制在一个范围内,和图像的位数有关:

$$C_A = \{x [n_1, n_2] : \alpha \leq x [n_1, n_2] \leq \beta\}. \quad (11)$$

### 3.2.2 点投影算子

建立与约束集相对应的投影算子,改变高分辨率图像的值,将其限制在凸集内,不断迭代找到最优解。

#### 1) 残差约束集点投影算子 $P_D$

该投影算子采取点投影的方式,通过修正高分辨率图像的每一个点的值,将其限制在残差约束集上,以获得分辨率提高的高分辨率图像。那么,高分辨率图像  $x [n_1, n_2]$  投影到残差约束集  $C_D^k [n_1, n_2]$  上的新的高分辨率图像的过程可表示为

$$x^{(k+1)} [n_1, n_2] = x^{(k)} [n_1, n_2] + \begin{cases} [r^{(x)} [n_1, n_2] - \delta] \cdot \frac{\mathbf{B}_k [n_1, n_2]}{\sum_p \sum_q \mathbf{B}_k^z}, & r^{(x)} [n_1, n_2] > \delta \\ 0, & r^{(x)} [n_1, n_2] = \delta \\ [r^{(x)} [n_1, n_2] + \delta] \cdot \frac{\mathbf{B}_k [n_1, n_2]}{\sum_p \sum_q \mathbf{B}_k^z}, & r^{(x)} [n_1, n_2] < \delta \end{cases} \quad (12)$$

式中  $(p, q)$  是模糊矩阵大小。通过计算残差与约束的差值和模糊矩阵该点权重的乘积来修正残差约束集外的点,将每一帧都通过投影算子投影到该约束集上,不断更新高分辨率图像的值,直到最后一帧。很多基于凸集理论的算法对  $(p, q)$  区域进行块投影,这样一旦投影修正不准确,就会影响整个块区域,造成马赛克效应、重叠伪影现象<sup>[13-19]</sup>。ICSM 算法则克服了这种缺点。

#### 2) 振幅约束集点投影算子 $P_A$

吉林一号视频 03 星遥感图像为 R、G、B 三通道,每通道有 256 个级别,因此可将各通道的灰度值限制在  $[0, 255]$  之间,投影算子为

$$x [n_1, n_2] = \begin{cases} 255, & x > 255 \\ x [n_1, n_2], & 0 \leq x \leq 255. \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

### 3.2.3 先验知识

- 1) 模糊矩阵  $B_k$ : 求解吉林一号视频 03 星的点扩展函数作为模糊矩阵先验知识。
- 2) 几何形变矩阵  $M_k^{-1}$ : 采用基于特征点的图像配准技术求解该矩阵<sup>[20-21]</sup>。
- 3) 高分辨率图像初始帧  $x_0$  的构造, 如图 4 所示。

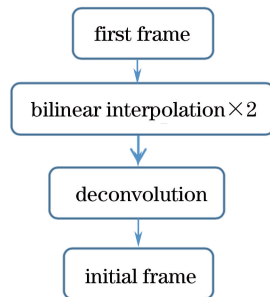


图 4 初始帧的构造

Fig. 4 Structure of the initial frame

这一过程是可迭代的, 重复实现 3.2 节算法, 直到获得最优解。以下通过测试帧数变化对重建效果的影响, 表明本文算法具有一定收敛性。

## 4 实验结果

### 4.1 主动观点与被动观点超分辨率重建结果对比及分析

采用吉林一号视频 03 星卫星图像, 原图尺寸为  $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ , 帧数为 8, 通道为 RGB, 放大倍数为 2。图 5 分别为 8 帧原图、双线性插值、被动观点降质模型重建图与 ICSM 算法重建图。其中, 被动观点重建图为 LCAV 实验室开源代码重建, 对其加入相同的模糊矩阵和几何形变矩阵以达到控制单一变量。为了便于观察图像细节, 对单帧原图用黄框标注, 对局部区域的细节图用红框标注。

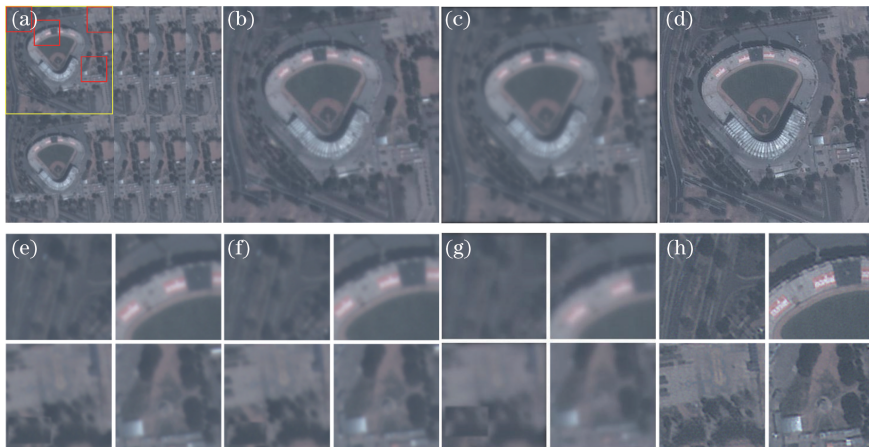


图 5 (a)原图;(b)双线性插值;(c)被动观点重建效果图;(d) ICSM 算法重建图;(e)(f)(g)(h)对应的细节图

Fig. 5 (a) Original image; (b) bilinear interpolation; (c) reconstruction of passive view; (d) reconstruction of ICSM algorithm; (e)(f)(g)(h) corresponding details

由于超分辨率重建研究领域的原始参考影像未知, 无法采用信噪比等有参评价, 因此采用主观评价方法与无参考影像质量评价相结合的方式, 对以上四个图像进行分析<sup>[11, 18-19]</sup>。首先, 在主观评价上, 相比图 5(a)~(c), 图 5(d)更能分清马路标志线、垒球场的边缘、建筑的轮廓、类似五角的公园、阴影细节以及其他景物特征, 说明 ICSM 算法重建图主观反映效果良好。其次, 在无参考图像质量评价上, 以信息熵、标准差、空间频率以及灰度平均梯度等 4 个无参考评价指标对上述四幅图像进行分析, 如表 1 所示。

表 1 中有一个反常的现象, 就是被动观点重建图像图 5(c)在其他各方面指标均差于图 5(b)的情况下, 却在空间频率上高于图 5(b), 原因就在于被动观点采用块投影的方式, 对局部图像整体进行修正, 容易出现马赛克

效应造成局部锐化,导致用于描述影像空间总体活跃程度的空间频率的增大。因此需从各个指标综合评价图像质量的好坏。ICSM 重建图像在以上 4 个指标上均优于其他图像指标,证明了 ICSM 算法的优良性。

表 1 多种客观指标评价超分辨率重建图像

Table 1 Super-resolution reconstruction image evaluated by different objective indexes

Image	Entropy	Standard deviation	Spatial frequency	Gray mean grads
Fig. 5(a)	6.1008	20.1046	3.6564	13.4260
Fig. 5(b)	6.1102	20.6279	1.8456	7.1850
Fig. 5(c)	6.0190	19.8486	4.1856	5.0142
Fig. 5(d)	6.2777	22.5324	7.0371	19.9835

在提高图像分辨率上, Elad 等<sup>[22]</sup>指出,重建采用的帧数与提高倍数的关系为

$$D \leq \sqrt{p}. \quad (14)$$

8 帧重建,放大倍数应为  $D \leq \sqrt{8}$ 。但考虑到本文实际尺寸放大倍数为 2,分辨率倍数为  $\sqrt{2}$ ,映射到单个像元分辨率倍数为  $\sqrt{2}/2$ ,则最终分辨率提高  $1 - \sqrt{2}/2 \approx 30\%$ 。

无论是主观评价还是客观评价,基于凝视成像降质模型的多帧超分辨率重建图像效果明显,优于被动观点重建效果图。说明 ICSM 算法信息利用率高,具有提高图像分辨率的能力,并能避免重叠伪影和马赛克现象的产生<sup>[12]</sup>。

#### 4.2 其他算法与本文算法重建效果对比

采用其他基于空域的超分辨率重建软件和本文算法结果进行了对比,重建效果对比如图 6 所示,运行时间对比如表 2 所示。其中图 6(a)为 superresolution\_v\_2.0<sup>[23]</sup>软件(瑞士洛桑联邦理工学院)运用 keren-POCS 法重建效果图;图 6(b)为 SR 软件运用 POCS 法重建效果图<sup>[24]</sup>;图 6(c)为迭代反投影 IBP 算法的效果图<sup>[25]</sup>;图 6(d)是 ICSM 算法的重建效果图。



图 6 不同算法重建效果图。(a) Superresolution\_v\_2.0 软件;(b) SR 软件;(c) IBP 算法;(d) ICSM 算法

Fig. 6 Reconstruction images of different algorithms. (a) Superresolution\_v\_2.0 software;

(b) SR software; (c) IBP algorithm; (d) ICSM algorithm

表 2 不同重建算法运行时间对比

Table 2 Run time of different reconstruction algorithms

Algorithm	Superresolution_v_2.0	SR	IBP	ICSM
Time /s	16.41	2226.73	8.43	373.27

由此可见,虽然 ICSM 算法在运行时间上不是表现最出色的,但从主观评价上看,其重建效果明显优于其他软件,更能分清景物细节,图像分辨率提升明显,效果十分出色。

#### 4.3 帧数对重建效果的影响

以放大倍数为 2,分别对 3~12 帧图像进行重建,探讨帧数对重建效果的影响。如图 7 所示,分别以帧数为横坐标,以图像质量评价指标(E 为信息熵,GMG 为灰度平均梯度,SF 为空间频率,SD 为标准差)为纵坐标,对上述 4 种重建算法进行分析。

随着重建帧数的增加,前 9 帧各个指标均呈上升趋势或缓慢上升趋势,说明随着重建帧数的增多,有用的信息在增加,重建效果也越来越好。然而,第 10 帧指标先下降后平缓,说明过多的帧数已经出现过冗余信

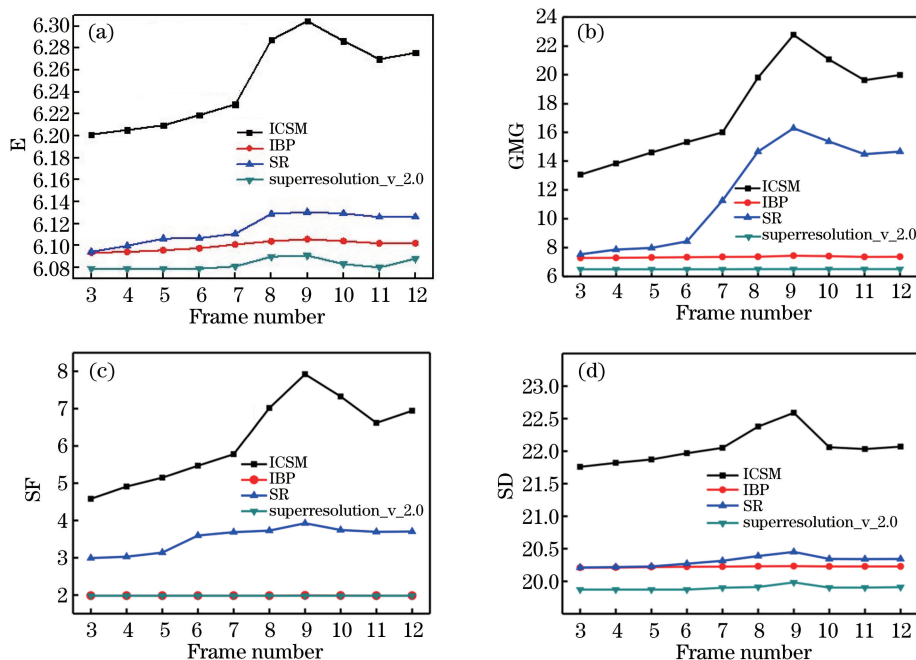


图 7 帧数对 4 种算法重建效果的影响。(a)信息熵;(b)灰度平均梯度;(c)空间频率;(d)标准差

Fig. 7 Influence of frame number on reconstruction effect using the four algorithms. (a) Entropy; (b) gray mean grads; (c) spatial frequency; (d) standard deviation

息,ICSM 算法具有一定收敛性。虽然 9 帧重建效果指标最高,但第 10 帧后,客观评价指标趋于平缓且和第 8 帧接近,说明第 8 帧已经接近收敛,第 9 帧个别像素约束在凸集外,客观评价指标的升高有伪影(过度锐化)的可能。为了保证重建效果并同时避免伪影,选择 8 帧重建。正如(14) 式所述,放大倍数为 2 时,重建帧数为[4,9),因此 8 帧重建较为合理。在各个指标上,ICSM 算法都优于其他算法,说明本文算法有效信息利用率高。

#### 4.4 验证 ICSM 算法的可行性与稳健性

卫星发射后,由于相机受到发射环境以及太空环境的影响,相机焦面的位置会发生变化,与地面装定状态有所不同。这时需要调焦来获得清晰的图像。通过选用不同调焦状态图像,来表征图像的模糊程度,即选用不同清晰度的卫星图像,验证 ICSM 算法的稳健性。如图 8 所示,图 8(a)为吉林一号视频 03 星初始入轨影像图,图 8(b)为进行第 1 次调焦后影像,图 8(c)为调焦完成后影像。三幅影像的清晰度由低到高。图 8(d)~(f)为相应的 ICSM 算法重建图。

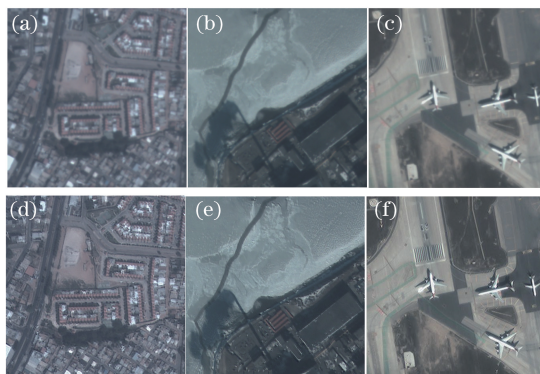


图 8 不同清晰度卫星图像重建效果图。(a)初始入轨影像图;(b)第 1 次调焦后影像;  
(c)调焦完成后影像;(d)(e)(f)相应的 ICSM 算法重建图

Fig. 8 Satellite reconstruction images of different definitions. (a) Initial image entering orbit; (b) image after the first focusing; (c) image after the focusing completed; (d)(e)(f) corresponding reconstruction images of ICSM algorithm



由图 8 可知,主观上重建图像更能区分细小差别、识别景物等。表 3 所示为以上 3 组图像重建前后 4 种无参考图像质量评价指标对比。

在 4 个图像质量评价指标上,重建图像指标均优于原图像,反映了重建图像能量分布更均匀、信息量更大。这一结果表明,无论基于主观评价还是客观评价,ICSM 算法对不同清晰度图像具有可行性和稳健性,且均能达到提高分辨率的结果。

表 3 不同清晰度超分辨率重建前后图像的客观指标评价

Table 3 Objective indexes to evaluate the different definitions images before and after super-resolution reconstruction

Image	Entropy	Standard deviation	Spatial frequency	Gray mean grads
Fig. 8(a)	6.4758	23.6282	6.4163	25.4965
Fig. 8(b)	6.7404	28.8847	12.3757	33.9094
Fig. 8(c)	6.7218	36.3623	4.7364	14.0680
Fig. 8(d)	6.8615	37.7301	9.3411	23.3139
Fig. 8(e)	6.7043	23.0247	4.7364	8.9956
Fig. 8(f)	6.8136	34.3387	10.5559	22.6625

## 5 结 论

针对吉林一号视频 03 星影像特点,提出了一种基于凝视成像降质模型的新算法——ICSM。以主动观点分析凝视成像,并建立相应数学模型,并通过求解该模型,提出 ICSM 算法,通过所列算法步骤,重建效果明显,分辨率得到了很大的提升。无论基于主观评价还是客观评价,新算法均优于所列软件包重建效果,说明了 ICSM 算法的正确性。

同时,采用真实卫星影像,对比许多文献采用模拟序列影像,具有处理真实影像的实际意义。实验结果表明,新算法具有一定的收敛性、可行性与稳健性。

## 参 考 文 献

- [1] Park S C, Park M K, Kang M G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 21-36.
- [2] Stark H, Oskoui P. High-resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections[J]. J Opt Soc Am A, 1989, 6(11): 1715-1726.
- [3] Huang T S. Multi-frame image restoration and registration[J]. Advances in Computer Vision and Image Processing, 1984, 1(2): 317-339.
- [4] Romano Y, Isidoro J, Milanfar P. RAISR: rapid and accurate image super resolution [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2017, 3(1): 110-125.
- [5] Shi Aiye, Xu Feng, Xu Mengxi. Image super-resolution reconstruction method and application[M]. Beijing: Science Press, 2016: 4-15.  
石爱业, 徐 枫, 徐梦溪. 图像超分辨率重建方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 4-15.
- [6] Wu Wei, Yang Xiaomin, Chen Mo, *et al.* Super-resolution restoration algorithms based on improved nonsubsampling contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1493-1501.  
吴 炜, 杨晓敏, 陈 默, 等. 基于改进的非下采样 Contourlet 变换的超分辨率复原算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1493-1501.
- [7] Su Heng, Zhou Jie, Zhang Zhihao. Survey of super-resolution image reconstruction methods [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1202-1213.  
苏 衡, 周 杰, 张志浩. 超分辨率图像重建方法综述 [J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1202-1213.
- [8] Zheng Xiangtao, Yuan Yuan, Lu Xiaoqiang. Single image super-resolution restoration algorithm from external example to internal self-similarity[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0318006.  
郑向涛, 袁 媛, 卢孝强. 自外而内的单幅图像超分辨率复原算法 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0318006.
- [9] Xiao Su, Han Guoqiang, Wo Yan. Survey of digital image super resolution reconstruction technology [J]. Computer Science, 2009, 36(12): 8-13.  
肖 宿, 韩国强, 沃 焱. 数字图像超分辨率重建技术综述 [J]. 计算机科学, 2009, 36(12): 8-13.

- [10] Farsiu S, Robinson D, Elad M, *et al.* Advances and challenges in super-resolution[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2004, 14(2): 47-57.
- [11] Xu L, Jia J Y. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring[C]. European Conference on Computer Vision, Springer, 2010, 6311: 157-170.
- [12] Xie Wei. Key techniques of multiframe super-resolution image restoration reconstruction [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.  
谢 伟. 多帧影像超分辨率复原重建关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [13] Häfner M, Liedlgruber M, Uhl A. POCS-based super-resolution for HD endoscopy video frames[C]. Proceedings of the 26th IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems, 2013: 185-190.
- [14] Xiao Chuangbai, Duan Juan, Yu Jing. POCS super-resolution reconstruction from image sequence [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 108-113.  
肖创柏, 段 娟, 禹 晶. 序列图像的 POCS 超分辨率重建方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 108-113.
- [15] Yang Xin. The principle and application of image super-resolution technique[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.  
杨 欣. 图像超分辨率技术原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [16] Liu Wei, Gao Huiting, Cao Shixiang, *et al.* Study on super resolution of GF-4 satellite staring plane array camera[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2016, 37(4): 87-95.  
刘 薇, 高慧婷, 曹世翔, 等. “高分四号”卫星面阵凝视相机超分辨率技术[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(4): 87-95.
- [17] Chen Jian, Wang Weiguo, Liu Tingxia, *et al.* Research on fast POCS super-resolution restoration algorithm based on gradient image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 327-338.  
陈 健, 王伟国, 刘廷霞, 等. 基于梯度图的快速 POCS 超分辨率复原算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 327-338.
- [18] Wang Zhiming. Review of no-reference image quality assessment[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(6): 1062-1079.  
王志明. 无参考图像质量评价综述[J]. 自动化学报, 2015, 41(6): 1062-1079.
- [19] Tan Wei, Yang Bingxin, He Hongyan. A new definition evaluation method for remote sensing images of satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(2): 50-57.  
谭 伟, 杨秉新, 何红艳. 一种新的遥感影像清晰度评价方法[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(2): 50-57.
- [20] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [21] Lowe D G Demo software : SIFT keypoint detector[EB/OL]. [2017-03-29]. <http://www.cs.ubc.ca/lowe/keypoint/>.
- [22] Elad M, Feuer A. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1646-1658.
- [23] The Ecole Polytechnique Federal de Lausanne. Super-resolution[EB/OL]. [2017-03-29]. <http://lcav.epfl.ch/software/superresolution>.
- [24] Cheng S. Superresolution demo [EB/OL]. [2017-03-29]. <http://cn.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30488-superresolution-demo?requestedDomain=www.mathworks.com>.
- [25] Irani M, Peleg S. Improving resolution by image registration[J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(3): 231-239.