

文章编号:1001-9014(2011)01-0015-07

## 超分辨率图像重建引起的噪声放大与滤波

陈博洋<sup>1,2</sup>, 郭强<sup>1</sup>, 陈桂林<sup>2</sup>, 陈凡胜<sup>2</sup>

(1. 国家卫星气象中心 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081;

2. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

**摘要:**总结了图像序列相位关系对超分辨率图像重建效果的影响规律,对超分辨率图像重建引起的高斯噪声和散粒噪声的放大予以研究.通过叠加不同方差的高斯噪声的图像序列重建实验,得到结论维纳滤波可以有效地滤除放大后的高斯噪声,但是超分辨率图像重建后散粒噪声放大成为“波纹”形状的噪声,传统的中值滤波法不能有效地滤除放大后的“波纹”形状噪声.根据算法处理的是图像序列的特点,提出了基于图像序列的中值滤波法,在滤波前通过图像序列的冗余信息判断图像序列上哪些点是受到噪声污染的,对受到噪声污染的点予以非线性“截断”滤波,而未受噪声污染的点则不进行滤波,比传统的中值滤波更有效地滤掉了“波纹”形状的噪声,而且不会带来图像平滑.

**关键词:**图像序列;超分辨率图像重建;散粒噪声;基于图像序列的中值滤波

**中图分类号:**TP751.1 **文献标识码:**A

## Amplificatory noise raised by super resolution image reconstruction and filter

CHEN Bo-Yang<sup>1,2</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>, CHEN Gui-Lin<sup>2</sup>, CHEN Fan-Sheng<sup>2</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, CAS Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The equation that describes the effect of phase relation of the sequence images on the super resolution image reconstruction was summarized. The amplification of Gaussian noise and shot-noise raised by super resolution image reconstruction was studied. Wiener Filter can restrain the amplified Gaussian noise effectively after super resolution image reconstruction. The shot noise, however, becomes ripple noise after image reconstruction. This brings image confusion because that traditional median filter can not restrain the ripple noise. Considering that the images processed are in sequence, a method of median filter based on sequence images was proposed. The pixels with noise, determined by pleonastic information in sequence images, were eliminated by median filter while the pixels without noise were kept untouched. Median filter based on sequence images restrains noise more powerfully than the one based on single image. It does not bring image confusion and thus improves the quality of the image.

**Key words:** sequence images; super resolution image reconstruction; shot noise; median filter based on sequence images

**PACS:** 95.75.Mn

### 引言

超分辨率图像重建是图像处理领域中的一个重要分支,该方法有效地提高了图像的空间分辨率,现已解决了超分辨率图像重建过程中的点扩散函数、运动估计等问题,基于超分辨率图像重建技术的亚像元探测仪器已经工程化,在提高图像空间分辨率方面显示出了效果,在航天遥感领域和民用光电仪

器领域发挥了重要的作用.

SPOT-5 卫星搭载的 HRG 成像仪在焦平面上放置两个 12000 个像元的线阵 CCD 传感器:这两个线阵传感器在沿卫星飞行方向和垂直于飞行方向均相互错开 1/2 个像元,在同一地区同时采集两幅 5m 分辨率的图像,通过数据计算处理,从同时采集的相对精确定位的 5m 分辨率图像生成了 2.5m 到 3m 分辨率的图像;以色列 EROS-A 卫星利用该技术从仪

收稿日期:2010-03-21,修回日期:2010-12-18

Received date: 2010-03-21, revised date: 2010-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40905013);国家自然科学基金(40971200);国家自然科学基金(41075019);国家 863 课题(2009AA12Z150)

作者简介:陈博洋(1980-),男,黑龙江哈尔滨人,国家卫星气象中心副研究员,博士,主要从事遥感仪器顶层设计,卫星资料预处理和定量遥感.

Email:chenby@cma.gov.cn.

器拍摄得到的 1.8m 空间分辨率的图像序列重建得到 0.9m 空间分辨率的图像;欧洲 MSG 静止轨道气象卫星利用该技术从仪器拍摄得到的 1.6km 空间分辨率的图像序列重建得到 1km 空间分辨率的图像. 这些实例可以说明,超分辨率图像重建技术是在目前的器件加工工艺和仪器设计制造水平条件下,提高成像仪器空间分辨率的有效方法.

但是,已经实现的亚像元探测仪器以光学成像和侦查为主,没有涉及遥感数据的定量应用,原因是超分辨率图像重建的核心问题是求满足不定方程组的解的过程,在求解过程中原始图像的噪声会传递到超分辨率图像中,导致超分辨率图像噪声增大、信噪比降低. 本文针对超分辨率图像重建引起的噪声放大开展研究,利用维纳滤波和基于图像序列的中值滤波有效地滤掉了放大后的高斯噪声和散粒噪声,提高了图像质量,使遥感数据在定量应用中发挥作用.

## 1 超分辨率图像重建

从理论上分析,可以从任意相位关系的图像序列中重建得到超分辨率图像,但是考虑到仪器获取图像的效率和数据传输带宽的限制,希望用最少的图像帧数重建得到效果最好的超分辨率图像,因此分析了图像序列的相位关系对重建效果的影响. 然后通过仿真实验实现了超分辨率图像的重建过程.

### 1.1 图像相位对超分辨率图像重建的影响

调制传递函数 MTF (Modulate Transfer Function) 可以作为仪器空间分辨率的评价方法:普通线阵传感器的 MTF 为

$$MTF_1 = \text{sinc}(\alpha f) \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  是传感器敏感元的中心距,  $f$  是空间频率.

用该传感器构成 2 倍过采样图像采集系统,采集有 50% 相位位移的图像序列时,设传感器敏感元的偏移为理想的  $\frac{\alpha}{2}$ ,传感器的 MTF 为

$$MTF = \text{sinc}\left(\frac{\alpha f}{2}\right) \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  和  $f$  的意义同公式(1)中一样.

进行 50% 相位位移的图像序列采集时,相邻敏感元的配准程度决定了图像序列的相位关系. 当相邻敏感元配准不是  $\frac{\alpha}{2}$  时,会造成图像序列相对理想位置的空间位移  $\Delta_\alpha$ ,把  $\Delta_\alpha$  表示为  $\Delta_\alpha = k\alpha$  ( $0 \leq k \leq 0.5$ ) 的形式:即由于各种原因造成的图像序列相对

理想位置的空间位移为采样间隔的  $k$  倍,那么在目标上,相邻的两个采样点被拉开到  $\frac{\alpha}{2} + \Delta_\alpha = \frac{\alpha}{2} + k\alpha = \left(\frac{1}{2} + k\right)\alpha$  的距离,显然,图像序列未配准造成的后果等于采样频率的变化,相当于改变了空间滤波器的性能,传感器新的 MTF 变为

$$MTF_3 = \text{sinc}\left[\left(\frac{1}{2} + k\right)\alpha f\right] = \text{sinc}\left[(1 + 2k)\frac{\alpha f}{2}\right] \quad (3)$$

与  $MTF_2 = \text{sinc}\left(\frac{\alpha f}{2}\right)$  相比,  $1 + 2k$  就是图像序列的相位误差给 MTF 带来的恶化效果<sup>[1]</sup>. 我们在同一坐标系中画出

$MTF_1, MTF_2, MTF_3$ : 图中以  $k = 0.1$  为例,即图像序列偏离理想位置 0.1 像元,如图 1 所示. 由图 1 可知,图像序列配不准会引起重建图像的实际空间分辨率和理论值相比的降低.

### 1.2 超分辨率图像重建

图 2 显示了超分辨率图像重建的工作过程,图 2(a) 表示景物信息的目标图像,图 2(b) ~ (e) 是在 X(水平)和 Y(竖直)方向各有 50% 像素相位差的图像序列,图 2(f) 是重建后的超分辨率图像,通过对图像线对的分析可以得到结论,重建后的图像分辨率大幅度提高. 为了便于观察和比较,本文把所有图像放大到相同尺度显示.

## 2 重建后的噪声放大与滤波

超分辨率图像重建提高了图像分辨率,相当于增加了图像的高频分量,会带来噪声的扩散,导致图像信噪比的下降,因此需要分析超分辨率图像重建引起的噪声放大,并研究相应的有效滤波方法. 对图像中最常见的高斯噪声和散粒噪声予以研究.

### 2.1 高斯噪声的放大与维纳滤波

给图 2(b) ~ (e) 所示的图像序列中的 4 幅图像

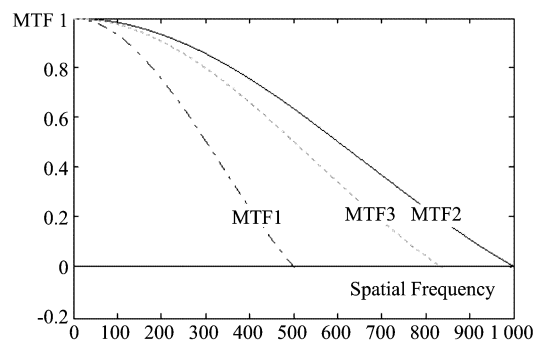


图 1 3 种采样情况的传感器 MTF

Fig. 1 MTF of detector under three situations

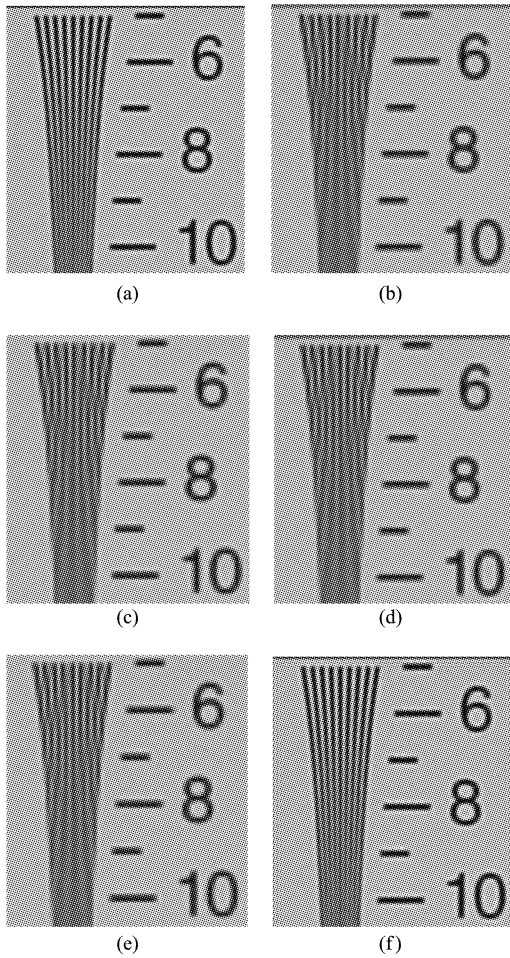


图2 超分辨率图像重建数学建模和工作过程仿真 (a) 目标图像 (b) 序列图像 1 (c) 序列图像 2 (d) 序列图像 3 (e) 序列图像 4 (f) 超分辨率图像  
 Fig.2 Model of super resolution image reconstruction and simulation (a)original image (b) sample image1 (c) sample image2 (d)sample image3 (e) sample image4 (f) reconstruction image

加上均值为 0、方差为 0.005 的高斯噪声,得到了受到高斯噪声污染的图像序列,如图 3(a) ~ (d),将该图像序列通过凸集投影(POCS)法进行超分辨率图像重建,得到有高斯噪声影响的重建图像,如图 3(e).采用  $3 \times 3$  子图像模板的维纳滤波器对图像 3(e)进行滤波,得到图 3(f).工作过程中各图像的质量评价见表 1(a).

表 1 高斯噪声图像重建的质量评价表  
 Table 1 Appreciation of reconstruction image with gauss noise

a. 方差为 0.005 的高斯噪声图像融合仿真结果评价  
 a. Appreciation of original images with  $\delta = 0.005$  noise and reconstruction image

$\delta = 0.05$ 噪声	原始图像	插值放大图像	重建图像	维纳滤波图像
SNR	17.549	19.347	7.780	15.672
与高分辨率图像方差		0.068	0.135	0.072

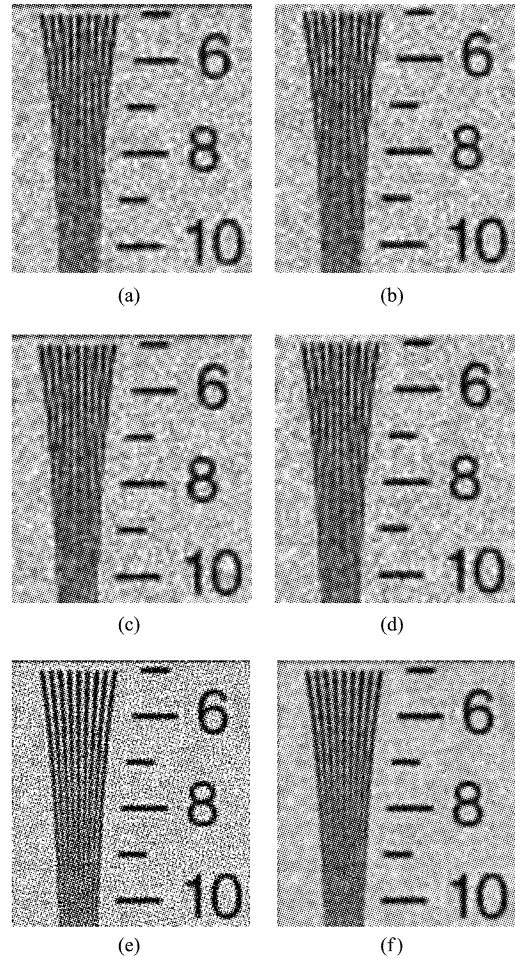


图3 叠加方差为 0.005 的高斯噪声的图像序列融合重建和滤波仿真过程 (a) 噪声序列图像 1 (b) 噪声序列图像 2 (c) 噪声序列图像 3 (d) 噪声序列图像 4 (e) 超分辨率图像 (f) 维纳滤波后的图像  
 Fig.3 Process of image reconstruction with gauss noise and filtering noise (a) image1 with noise (b) image2 with noise (c) image3 with noise (d) image4 with noise (e) super-resolution image (f) image after wiener filter

b. 方差为 0.01 的高斯噪声图像融合仿真结果评价  
 b. Appreciation of original images with  $\delta = 0.01$  noise and reconstruction image

$\delta = 0.01$ 噪声	原始图像	插值放大图像	重建图像	维纳滤波图像
SNR	14.568	16.365	6.599	14.617
与高分辨率图像方差		0.073	0.150	0.073

c. 方差为 0.02 的高斯噪声图像融合仿真结果评价  
 c. Appreciation of original images with  $\delta = 0.02$  noise and reconstruction image

$\delta = 0.02$ 噪声	原始图像	插值放大图像	重建图像	维纳滤波图像
SNR	11.755	13.550	5.727	13.342
与高分辨率图像方差		0.080	0.156	0.076

对叠加不同方差的高斯噪声的图像序列进行重建和定量分析,结果见表 1,通过表 1 的对比分析,

可以得到结论:

(1) 高斯噪声的存在会影响图像重建的效果,但仍然可以提高图像的空间分辨率;

(2) 高斯噪声在图像融合过程中得到了放大,导致了图像信噪比的降低,实验中信噪比降低的幅度大约为 7dB,和郭强等人<sup>[2]</sup>分析的 10dB 基本一致;

(3) 维纳滤波可以有效地抑制融合后图像的高斯噪声,提高图像信噪比.

## 2.2 散粒噪声的放大与中值滤波

图像中另一种常见的噪声是散粒噪声. 给图 2 (b) ~ (e) 中的 4 幅图像叠加上散粒噪声,得到了受到散粒噪声污染的图像序列,如图 4(a) ~ (d),把该图像序列通过 POCS 法进行超分辨率图像重建,得到有散粒噪声影响的重建图像,如图 4(e). 采用  $3 \times 3$  子图像模板的中值滤波器对图像 4(e) 进行滤波得到图 4(f),与图 4(e) 相比得出结论:在散粒噪声存在的条件下,超分辨率图像重建仍然可以提高图像的空间分辨率,但是在图像重建的过程中散粒噪声得到了放大,而传统的中值滤波只能抑制部分散粒噪声,不能有效地滤除“波纹”形状的散粒噪声,同时也使图像发生了平滑. 详细的图像质量评价见表 2.

## 3 基于图像序列的中值滤波

针对图 4(e) 中出现的由超分辨率图像重建引起的散粒噪声放大形成的“波纹”形状的噪声,以及图 4(f) 中传统的中值滤波不能有效地滤除“波纹”形状的噪声的情况,本文提出了基于图像序列的中值滤波法,有效地解决这个问题,基于图像序列的中值滤波法处理过的重建图像如图 4(g):“波纹”形状的噪声得到了很好的滤除,也没有使图像平滑<sup>[3]</sup>. 图像重建过程中的图像质量评价如表 2.

从图 4(e) 可以看出,无论是否进行噪声抑制,超分辨率图像的空间分辨率都好于图像序列的空间分辨率,但是从表 2 的信噪比栏可以发现,超分辨率

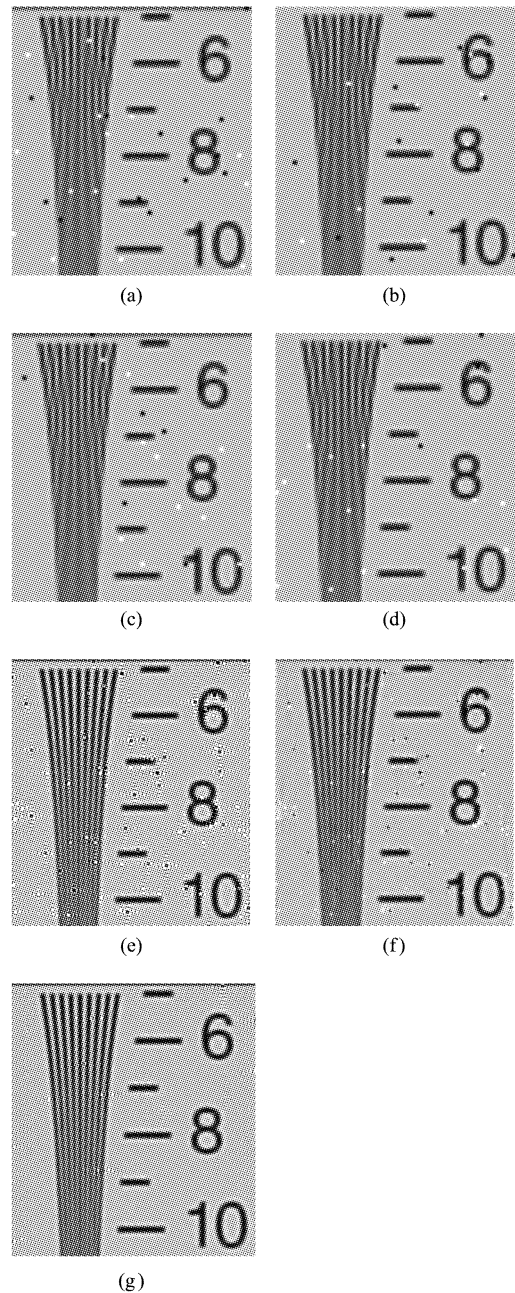


图 4 叠加散粒噪声的图像序列融合重建和滤波仿真过程 (a) 噪声序列图像 1 (b) 噪声序列图像 2 (c) 噪声序列图像 3 (d) 噪声序列图像 4 (e) 超分辨率图像 (f) 中值滤波后的图像 (g) 基于图像序列的中值滤波后的图像

Fig. 4 Process of image reconstruction with shot noise and filtering noise (a) image1 with noise (b) image2 with noise (c) image3 with noise (d) image4 with noise (e) reconstruction image (f) image after media filter (g) image after media filter based on image sequence

图像的信噪比有所下降,这和图 4(e) 上的噪声点增多给我们的直观感觉是相符合的;基于单帧图像的中值滤波法滤除噪声的图像的信噪比有了提高,但是改善效果有限,而基于图像序列的中值滤波法滤

表 2 散粒噪声图像的质量评价表

Table 2 Appreciation of reconstruction images with shot noise

图像	信噪比	与标准图像方差
获取的图像序列第一帧	31.064	24.123
超分辨率重建图像	23.269	28.827
基于单帧图像的中值滤波图像	44.657	25.356
基于图像序列的中值滤波图像	158.680	10.860

除噪声的图像的信噪比有了极大提高,从图 4(g)上也可以看出来,几乎所有的散粒噪声都受到了抑制,数值计算和图像给我们的直观感觉是一样的,同时它与标准图像的方差也是最小的,也表征了图像的能量分布细节更趋近于景物真实能量分布。

分析基于图像序列的中值滤波为何能达到比较好的滤波效果,同时没有带来图像的平滑.首先分析传统的中值滤波的工作过程,中值滤波一般使用  $3 \times 3$  的子图像模板,把模板内的 9 个像素的灰度按照大小排列,取序列中值赋值给模板中心像素,对于图像低频区域的孤点散粒噪声效果最好.但是对于“波纹”形状的散粒噪声,由于子图像模板内的像素有多余 1 个受到了噪声污染,而滤波模板不能有效地区分哪些像素点受到了噪声的污染,因此不能对受到噪声的像素进行强制有效的像素灰度替换;同时,对没有受到噪声污染的像素点,也进行了像素灰度替换工作,对图像进行了平滑操作,降低了图像分辨率。

基于图像序列的中值滤波法的核心思想是利用图像序列的先验信息,结合图像重建算法,用同一空间点在不同序列图像上的像素灰度值进行中值滤波,在滤波之前对图像上的点是否受到了噪声污染进行分析,在图像重建中,没有受到噪声污染的像素点并不进行滤波处理,而只对受到噪声污染的像素点进行滤波,即不利用该受到噪声污染的像素点对估计图像进行修正,不仅更有效地滤除了“波纹”形状的噪声,而且在滤波过程中没有对图像区域进行平滑操作,不会降低图像的空间分辨率.基于图像的中值滤波法工作流程如图 5。

基于图像序列的中值滤波算法步骤:

① 首先求出图像序列中包含相同景物信息的像素点的灰度均值,建立预估计图像;

② 然后计算图像序列中对应像素到该均值的灰度差值;

③ 判断一个不同图像上的、空间相关的“像素串”中的哪个点与均值的灰度差值最大,即该点受到散粒噪声的污染概率最大;

④ 比较受噪声污染概率最大的像素点到该均值的灰度差与该“像素串”中的次大灰度差的 3 倍的大小,如果该值大于次大灰度差的 3 倍,就认为该图像像素点受到了噪声污染,则标记该点为“受到散粒噪声污染”;

⑤ 图像重建过程中图像序列中被标记为“受到散粒噪声污染”的点被强行非线性“滤除”:即不参

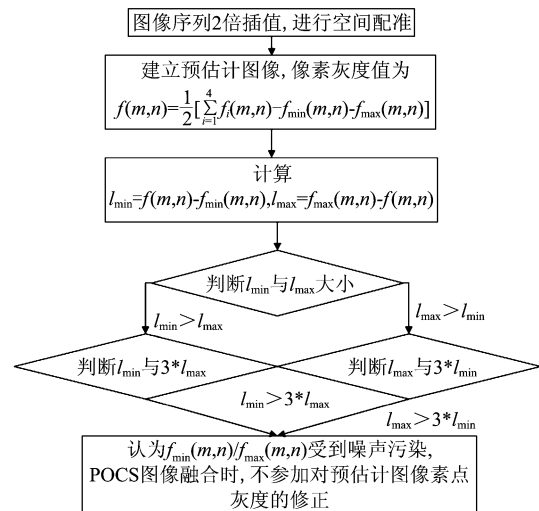


图 5 基于图像序列的中值滤波法流程图  
Fig. 5 Process of media filter based on image sequence

与图像重建,达到滤波效果。

基于图像序列的中值滤波法准确地判断了应该滤除的噪声点,不仅更有效地抑制了散粒噪声,同时也避免了传统中值滤波法带来的图像平滑作用,使散粒噪声对超分辨率图像重建的影响降到了最低,基本可以忽略不计.基于图像序列的中值滤波法的滤波过程和传统的中值滤波法的工作过程一样,不同的是基于图像序列的中值滤波法使用的滤波模板不是同一帧图像上相邻的  $3 \times 3$  的子块,它使用的滤波模板是属于不同图像上的、空间位置相关的“像素串”,因此算法的额外开销是图像配准、建立预估计图像、求图像序列上各像素点的相对距离与判断,但是图像配准和建立预估计图像是图像重建必须的过程,所以滤波算法只需要进行相对距离的计算与判断,计算量大概为  $2 \times 2 \times 2 \times m \times n$  次减法和  $2 \times 2 \times m \times n$  次比较判断, $m$  和  $n$  分别表示图像序列中图像的大小。

#### 4 样机实验

在上文的分析和仿真实验后,利用可见光 CMOS 探测器制作了可以微小位移的成像系统,并对标准分辨率鉴别板进行成像得到图像序列,图像序列在 X(水平)和 Y(竖直)方向有 50% 像素相位差,超分辨率图像重建过程中的相关图像见图 6.图 6(a)~(d)是相机系统采集到的图像序列,图 6(e)是图 6(a)上的感兴趣区域的局部放大,图 6(f)是重建图像上的感兴趣区域的局部放大.图 6(g)和图 6(h)分别是原始图像和重建图像的频谱图.包含系

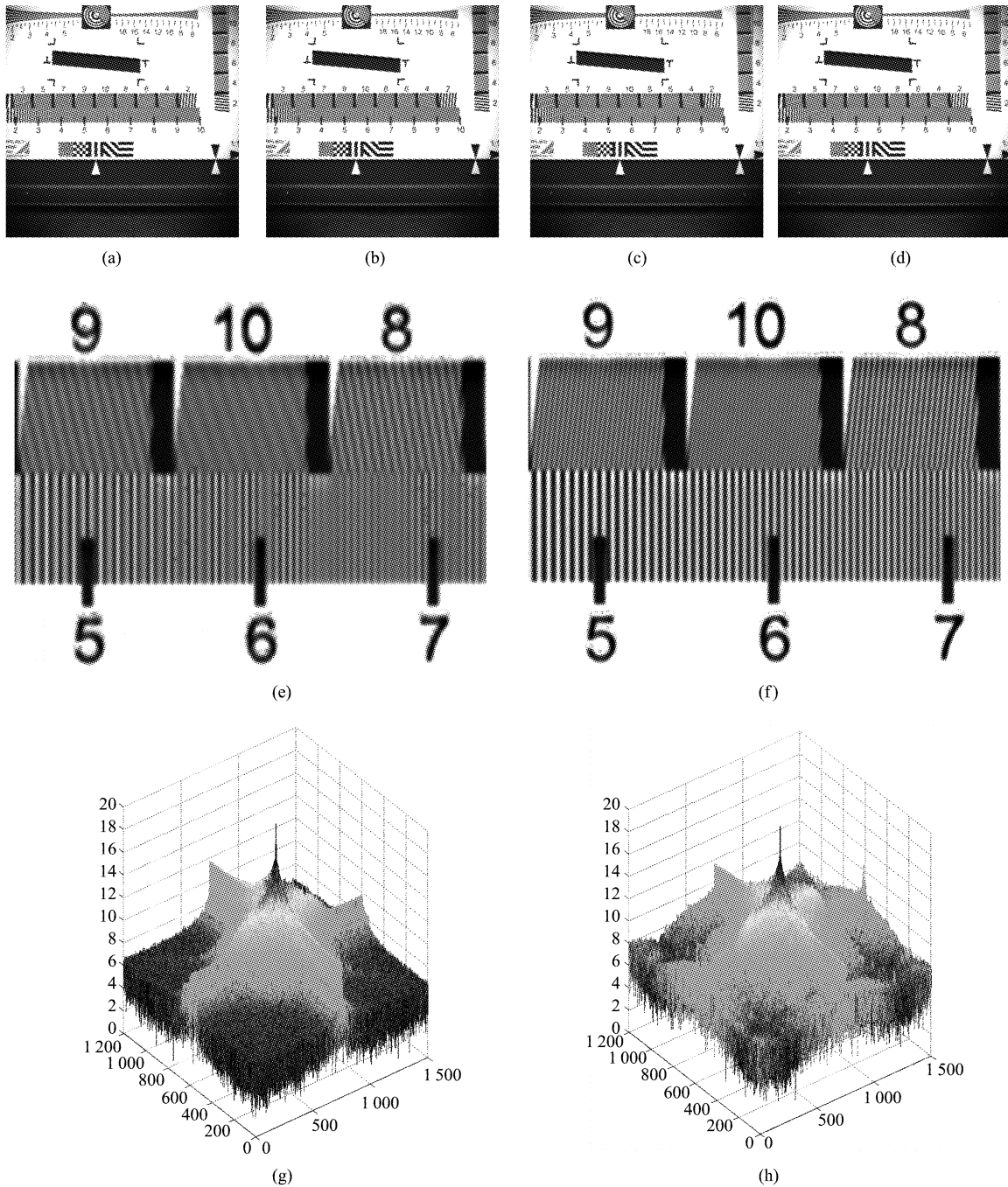


图6 原始图像和重建图像比较 (a)序列图像1 (b)序列图像2 (c)序列图像3 (d)序列图像4 (e)序列图像1上的感兴趣区域局部放大 (f)重建图像上的感兴趣区域局部放大 (g)原始图像频谱 (h)重建图像频谱

Fig. 6 Comparison between original image and reconstruction image (a)sequence image1 (b)sequence image2 (c)sequence image3 (d)sequence image4 (e)ROI of sequence image1 (f)ROI of reconstruction image (g)frequency image of original image (h)frequency image of reconstruction image

统误差的样机实验显示,超分辨率图像重建的效果明显:目视检验,空间分辨率可以达到图像序列的1.8倍以上。从频谱的比较也可以得到结论,重建图像的能量更多地集中在高频部分,反映了重建得到的超分辨率图像空间分辨率和原始图像相比有所提高。

## 5 结论

通过仪器 MTF 的理论分析,总结了图像序列中图像相位关系对超分辨率图像重建效果的影响规律,相位误差系数  $k$  的存在统一了传统探测仪器的  
(下转 60 页)

- Science Press (B. A. 柯夫达. 土壤科学原理. 北京: 科学出版社), 1983.
- [2] ZHANG Fei, DING Jian-Li, Tashpolat · Tiyp, *et al.* Spectral Data Analysis of Salinity Soils with Ground Objects in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (张飞, 丁建丽, 塔西甫拉提 · 特依拜, 等. 渭干河—库车河三角洲绿洲盐渍化地物光谱数据分析. 光谱学与光谱分析), 2008, **28** (12): 2921—2926.
- [3] SONG Tao, BAO Yi-Dan, HE Yong. Research on the Method for Rapid Detection of Soil Moisture Content Using Spectral Data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (宋韬, 鲍一丹, 何勇. 利用光谱数据快速检测土壤含水量的方法研究. 光谱学与光谱分析), 2009, **29** (3): 675—677.
- [4] J. Farifteh, F. van der Meer, M. van der Meijde, *et al.* Spectral characteristics of salt-affected soils: A laboratory experiment. *Geoderma*. 2008, **145**: 196—206.
- [5] Ignacio Melendez-Pastor, Jose Navarro-Pedreño, Ignacio Gomez, *et al.* Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. *Geoderma*. 2008, **145**: 1—7.
- [6] ZHU Deng-Sheng, WU Di, SONG Hai-Yan, *et al.* Determination of organic matter contents and pH values of soil using near infrared spectroscopy [J]. *Transactions of the CSAE* (朱登胜, 吴迪, 宋海燕, 等. 应用近红外光谱法测定土壤的有机质和 pH 值. 农业工程学报), 2008, **24** (6): 196—199.
- [7] LI Shu-Gang, WANG Zhou-Qiong. Desert Alkaline Soil [M] (李述刚, 王周琼. 荒漠碱土. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社), 1988.
- [8] WANG Lu, LIN Qi-Zhong, Jia Dong, *et al.* Study on the Prediction of Soil Heavy Metal Elements Content Based on Reflectance Spectral [J]. *Journal of Remote Sensing*, (王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究. 遥感学报), 2007, **11** (6): 906—913.
- [9] Agricultural Bureau of Uygur Autonomous Region of Xinjiang, Soil Survey Office of Uygur Autonomous Region of Xinjiang. Soil in Xinjiang. Beijing: Science Press (新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室. 新疆土壤. 北京: 科学出版社), 1996.
- [10] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, WANG Zong-Ming, *et al.* Soil Saline-alkalization Evaluation Basing on Spectral Reflectance Characteristics [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (刘焕军, 张柏, 王宗明, 等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价. 红外与毫米波学报), 2008, **27** (2): 138—142.
- [11] Institute of Soil Science, CAS, Nanjing. Soil standard color System of China [M]. Nanjing: Nanjing Press (中国科学院南京土壤研究所. 中国标准土壤色卡, 南京: 南京出版社), 1989.
- [12] LIANG Shun-Lin. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. Beijing: Science Press (梁顺林. 定量遥感. 北京: 科学出版社), 2009, 20.

(上接 20 页)

探测器 MTF 和亚像元探测仪器的探测器 MTF, 解释了实际应用的亚像元探测仪器为何选择 50% 像素位移, 指导亚像元探测仪器的设计和效果分析。

对于不可避免的图像噪声, 通过仿真实验验证了超分辨率图像重建会引起严重的噪声放大, 使图像信噪比降低, 质量恶化. 结合图像处理方法, 采用维纳滤波器对高斯噪声进行滤波, 发现维纳滤波器对放大后的高斯噪声可以有效滤除; 散粒噪声在放大过程中会产生“波纹”形状的噪声, 因此传统的中值滤波不能有效地滤除, 针对这一问题, 本文提出了基于图像序列的中值滤波. 基于图像序列的中值滤波利用了图像序列包含的冗余信息, 首先对图像序列上各像素点是否被噪声污染进行了判断, 然后通过非

线性的“截断”操作对受到噪声污染的点进行强行滤除, 该方法比传统的中值滤波更有效地滤除“波纹”形状的噪声, 也不会带来图像的平滑, 达到了很好的滤波效果。

本文对超分辨率图像重建引起的噪声放大予以

研究, 并且针对放大后的散粒噪声设计出了有效的滤波方法, 对实际的超分辨率图像重建应具有指导意义。

## REFERENCES

- [1] CHEN Bo-yang, CHEN Gui-lin, SUN Sheng-li. Application of sub-pixel technology for image collection system [J]. *Infrared Technology* (陈博洋, 陈桂林, 孙胜利. 亚像元技术在图像采集系统中的应用. 红外技术), 2007, **29** (4): 226—230.
- [2] GUO Qiang, XU Jian-min, CHEN Gui-lin. Study on improving image spatial resolution of optical instruments with linear sensors in three-axis body-stabilized platform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭强, 许健民, 陈桂林. 三轴稳定平台下提高线列探测器光学遥感仪图像空间分辨率的方法研究. 红外与毫米波学报), 2005, **24** (01): 39—44.
- [3] CHEN Bo-yang. Study on improving the apparatus resolution of the apparatus on geosynchronous meteorological satellite for visible light [D]. *Doctoral Thesis of Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy Sciences* (陈博洋. 提高静止轨道气象卫星可见光对地观测的研究. 上海技术物理研究所博士学位论文), 2008, **5**: 69—73.