

文章编号 1004-924X(2015)05-1490-08

基于空不变图像复原的光学遥感成像系统优化

智喜洋, 张 伟, 侯晴宇*, 孙 晔

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了依据复原处理来优化设计遥感成像系统的思想。对影响复原处理性能的主要链路环节因素及其关系进行了理论分析、半物理和仿真实验以及正交试验。通过复原问题的数学模型,从理论上提出相机调制传递函数(MTF)的空间变化性(MTF_{SV})、数据压缩比(C_R)和非均匀性校正残差(NC_R)是影响空不变复原处理的主要因素;然后通过搭建半物理平台和仿真实验,分析上述因素导致的处理误差对复原图像判读质量的影响;最后利用组合数学理论,通过 MTF_{SV} 、 C_R 、 NC_R 多因素多水平图像复原的正交试验,建立它们与处理性能间的关系量表。实验结果表明:在遥感成像系统 MTF_{SV} 小于10%、 C_R 小于4:1、 NC_R 不大于3%,而系统 MTF_N 仅为0.07的情况下,采用空不变复原处理仍可提高图像MTF面积达70%以上,且能保持图像信噪比(SNR)不变,而处理误差所致的图像失真也不会影响判读质量。

关键词:光学遥感;成像系统;优化设计;调制传递函数;空间变化性;压缩比;非均匀性校正残差;图像复原

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1490

Optimization for optical remote sensing imaging system based on space-invariant image restoration

ZHI Xi-yang, ZHANG Wei, HOU Qing-yu*, SUN Xuan

(Research Center for Space Optical Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail:houqingyu@126.com

Abstract: An optimizing design idea for optical remote sensing imaging systems based on restoration processing was proposed. The main imaging-chain components effecting restoration processing performance were explored by theoretical analyzed, semi-physical simulation experiments and orthogonal experiments. According to deducing a mathematical model of restoration problems, it points out in theory that the main factors impacting the restoration performance are the imaging system Modulation Transfer Function space-variant (MTF_{SV}), data compression ratio (C_R) and nonuniformity correction error (NC_R). Then, the restoration distortions that effect the interpretation capability of images owing to the above factors were analyzed by using a semi-physical imaging platform and simulation experiments. Finally, the relationship between restoration performance and the above metrics was established by using combined mathematics and an orthogonal experiment for the restored images with multilevel MTF_{SV} , C_R and NC_R . Experimental results indicate that the restoration performs well in a quite low MTF value at Nyquist frequency (only 0.07), the MTF_{SV} is

收稿日期:2015-01-20;修订日期:2015-02-12.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 613210)

less than 10%, C_R less than 4 : 1 and the NC_R is no more than 3%, which not only implements the MTF area more than 70% but also keeps Signal to Noise Ratio(SNR) invariant and achieves available image quality for the interpretation as well.

Key words: optical remote sensing; imaging system; system optimization; Modulation Transfer Function(MTF); space-variance; compression ratio; nonuniformity correction error; image restoration

1 引言

对于光学遥感成像系统而言,通过图像复原的方法消除相机光学系统、探测器、成像电子学以及卫星平台环境和大气路径等因素引起的图像模糊、噪声等像质退化,对充分发挥图像的应用效能具有重要意义和实际工程应用价值。国外已将地面的图像复原作为遥感全链路成像系统设计的有机和重要组成环节,充分结合复原处理进行主要链路环节的匹配优化与设计,实现了相机设计调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)较低的情况下,采用图像复原保证最终的图像质量,复原后图像 MTF_N 值提高 70% 以上^[1-4],使系统研制难度和成本大大降低。

现有复原方法^[5-9]通常是 将遥感图像质量退化过程近似为线性空间移不变系统来复原图像。然而,遥感链路中成像系统的 MTF 空间变化性及在轨的数据压缩和地面的预处理等环节会破坏这种像质退化特性,从而导致复原过程存在处理误差,直观表现为复原图像噪声放大以及边缘附近出现锯齿、寄生波纹等虚假信息的图像失真^[10-11],特别是在高分辨率遥感图像中更为明显,这将降低图像的判读质量,无法完全满足实际解译应用的需求。从现有文献来看,尽管在噪声和伪像抑制算法研究方面已开展了一定的工作^[11-13],但多是以图像本身为对象进行处理,没有充分考虑到处理前端系统对最终复原能力的制约。另一方面,成像系统的设计也没有结合全链路展开,因此复原质量不够理想。若将全成像链路作为处理作为一个整体系统进行分析、设计与优化,便可进一步提高复原图像的质量。因此,研究制约复原处理性能的主要链路环节因素,并依据

它们之间的影响关系进行遥感成像系统设计显得尤为重要。

本文从空不变复原问题的数学模型出发,得出相机 MTF 的空间变化性、数据压缩以及非均匀性校正残差是制约复原处理性能的主要链路环节因素;然后通过搭建半物理实验平台和仿真实验,分析上述因素导致处理误差对复原图像判读质量的影响;并通过上述因素与处理性能指标的正交试验设计,建立它们之间的关联关系。最后在提高图像 MTF(面积)1 倍,同时保持信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)不变和处理误差所致图像失真不影响判读质量的应用需求下,分析出遥感成像系统应满足的设计要求。

2 影响图像复原处理性能因素分析

2.1 复原问题的数学模型

光学遥感链路包含了目标景物、相机光学系统、探测器、成像电子学、卫星平台、数据压缩、地面预处理等多个环节,各环节之间存在耦合性和较复杂的误差传递关系,因此建立一个能够完整表征像质退化规律的空间移变图像复原系统十分困难,而且卫星在轨运行中也无法实时获取完整的 MTF。因此对于光学遥感成像系统而言,通常是将成像过程近似为线性空间移不变系统来复原图像。在该系统下目标景物 x 经系统成像得到观测结果 y (即退化图像)的过程可表示为^[5-7]:

$$y = Hx + n, \quad (1)$$

式中: H 表示遥感成像系统 MTF; n 表示成像过程中引入的加性噪声,一般假定为高斯白噪声。

图像复原即是利用 y 、 n 和 H 估计出 x 。该类复原方法已经十分成熟,并被广泛应用在光学遥感卫星图像的复原处理中。

2.2 复原处理误差及影响因素分析

在空不变图像复原中是假定 \mathbf{H} 是空间移不变的,即认为 MTF 不随相机视场的变化而改变。但受相机光学系统和制造工艺的限制,实际相机系统不同视场位置对应的 MTF 曲线存在一定的不一致性,这就导致了 MTF 的空间变化性,简记为 MTF_{sv} 。

假定实际系统 MTF 为 \mathbf{H}_{sv} ,空不变系统 MTF 为 \mathbf{H} ,令 $\Delta\mathbf{H}=\mathbf{H}_{\text{sv}}-\mathbf{H}$,代入式(1)得到:

$$\mathbf{y}=(\mathbf{H}+\Delta\mathbf{H})\mathbf{x}+\mathbf{n}=\mathbf{H}\mathbf{x}+\mathbf{n}+\Delta\mathbf{H}\mathbf{x}. \quad (2)$$

从式(2)到式(1)是一种近似推导,当 MTF 满足空间移不变时,式(1)是精确成立的,否则 MTF_{sv} 将给复原过程带来处理误差,从 $\Delta\mathbf{H}\mathbf{x}$ 中的元素可知,该误差与 MTF 空间变化大小密切相关,又与景物信息相互耦合。在复原过程中,耦合在 $\Delta\mathbf{H}\mathbf{x}$ 中的景物信息可能被误当作噪声项而被抑制,从而造成景物高频信息损失的图像欠恢复;也可能被当作景物信息去恢复,当空不变系统所采用的 MTF 比实际系统低时就会造成景物高频信息被过度增强的图像过恢复。

除了相机本身 MTF_{sv} 会破坏空不变的降质规律,遥感链路中数据压缩和预处理的非均匀性校正环节同样会改变系统的线性空间移不变性。下面讨论它们的影响。

数据压缩是根据各频带成分对人眼判读的重要程度及统计特性对不同频带采取不同的量化编码方案,即对图像平滑与非平滑区域进行不同的处理,这个过程必然带来图像 MTF 的空间变化性,还会引入量化误差。以目前主流的小波压缩方法为例,压缩与解压缩过程可表示为^[14]:

$$\mathbf{y}=\mathbf{W}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{W}(\mathbf{x}), \quad (3)$$

式中: \mathbf{W} 和 \mathbf{W}^{-1} 分别表示小波变换和逆变换, \mathbf{Q} 表示量化运算,即是按照不同频带的重要性和冗余性分配相应的量化比特数。

显然,在式(1)中忽略了压缩过程中量化处理误差的影响,特别是当高频系数的量化程度较深时,复原图像灰度剧烈变化的邻域(非平滑区域)将出现类吉布斯分布的振荡,造成边缘附近出现锯齿、寄生波纹等虚假信息。此外,式(1)是在假定系统噪声满足高斯白噪声时精确成立的,但压

缩会改变图像的噪声分布特征,如在高频处通常是非高斯的、有色的,而且从 $\mathbf{W}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{W}(\mathbf{x})$ 中的元素可看出非高斯白噪声可能被误当作景物的高频信息去增强,这都将造成复原过程中的处理误差。

相机探测器的非均匀性会造成不同像元间响应度和偏置有所不同,表现为图像扫描行间存在条纹,因此图像经解压缩传输到地面后,首先要根据相对辐射定标数据对其进行非均匀性校正后再进行复原处理。但受到定标和校正算法精度的限制,校正后的图像一般仍有一些残留的条纹,即非均匀性校正残差,该部分条纹噪声同样是非高斯的,而且与景物信息耦合,在复原处理过程中可能被误当作景物信息被增强,造成复原过程中的处理误差。

综上所述可得出 MTF 的空间变化性 (MTF_{sv})、数据压缩 (C_{R})、非均匀性校正残差 (NC_{R}) 是影响复原处理性能的主要因素。而且,这些因素所致的处理误差不仅与景物之间相互耦合,而且误差间的关系又较为复杂,很难剥离场景因素对这些因素所致的处理误差进行科学表征,因此仅利用后期处理方法将它们完全消除是十分困难的,这就需要对处理前端系统进行适当的设计与约束。

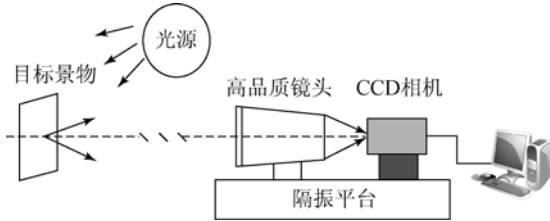
3 影响因素仿真实验及分析

为了更直观地认识上述因素所致处理误差引起的像质退化对图像判读质量的影响,本节将结合半物理实验平台和仿真实验进行图像复原处理性能的影响因素分析。

3.1 MTF_{sv} 的影响

为了分析 MTF_{sv} 对复原处理性能的影响,搭建了半物理仿真实验平台。实验平台由目标景物、高品质光学镜头和探测器组成,包含遥感成像的模糊、采样、信号转换和噪声过程,采用计算机完成图像的数据采集和处理。为模拟目标景物,实验中采用高分辨率遥感图像,通过专业制图设备进行图像重建。为模拟 MTF_{sv} ,实验中设置 3 个成像位置,放置一平面景物,3 个景物间在垂直光轴方向有一定的错位,然后再在 3 个位置处设置直边靶标,利

用直边刀口法测量 3 个平面位置处的 MTF。实验平台原理图、目标景物图、不同离焦位置的 MTF 曲线以及成像结果如图 1 所示。



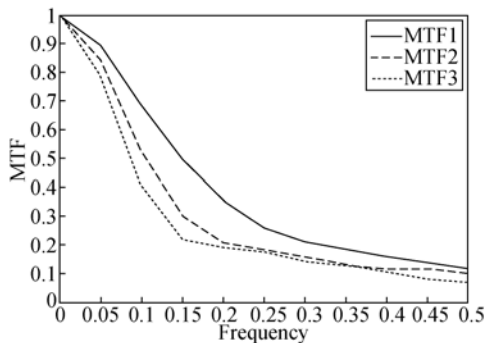
(a) 成像实验平台图

(a) Experimental imaging platform



(b) 目标景物图

(b) Target landscapes



(c) 不同离焦位置的 MTF 曲线

(c) MTFs for out-of-focus positions



(d) 成像结果

(d) Imaging results

图 1 成像实验平台图、不同离焦位置的 MTF 和成像结果

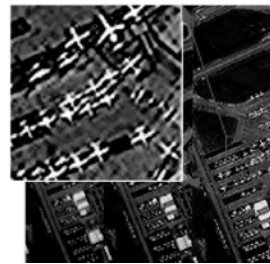
Fig. 1 Experimental imaging platform, MTF curves for different out-of-focus positions and imaging results

图 2 列出了利用 MTF1 和 MTF3 分别对离焦位置 1 和 2 图像复原的结果,从局部放大图中可以看出,采用空不变 MTF 复原图像的处理结果出现了欠恢复(如图 2 (a)所示)或过恢复(如图 2(b)所示)现象,严重影响图像的判读质量。可见,在成像系统设计中保证 MTF 的空间不变性是非常重要的。另外,获取尽可能全面、高精度的在轨 MTF 测试数据对处理性能的提升尤为关键。



(a) 利用 MTF1 复原的结果及区域 1 局部放大图

(a) Zoom on restored image using MTF1



(b) 利用 MTF3 复原的结果及区域 3 局部放大图

(b) Zoom on restored image using MTF3

图 2 利用 MTF1、MTF3 对图 1(d)复原的结果

Fig. 2 Restored results of Fig. 1(d) by using MTF1 and MTF3

3.2 C_r 的影响

目前,光学遥感卫星常采用的压缩算法为 JPEG2000,该算法本身对像质的影响较小^[15],但压缩过程中会改变图像噪声的分布特征,而且由于其对图像平滑与非平滑区域采取不同的处理方法,还会造成 MTF 的空间变化性。本节通过仿真实验分析不同压缩比对复原处理的影响。首先仿真生成系统点扩散函数和噪声已知的退化图像,实验中设定噪声方差使得图像 SNR 为 30 dB,仿真成像结果如图 3(a)所示,图 3(b)为直接对仿真图像进行复原的结果。然后对仿真图像分别进行 1:2,1:4,1:6 和 1:8 的 JPEG2000 压缩,而后对解压缩的图像进行复原,复原结果如图 3(c)~3(f)所示。

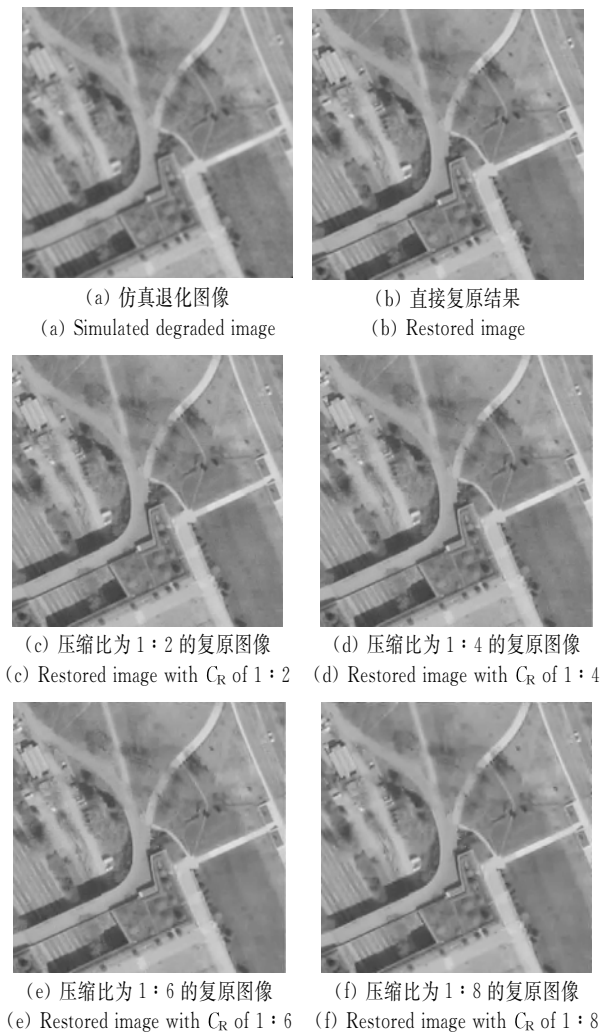


图 3 仿真图像、直接复原及不同压缩比图像的复原结果
Fig. 3 Simulated degraded image and its restored ones with different C_R levels

将图 3(a)~3(b)的仿真图像、直接复原处理结果和图 3(c)~3(f)中不同压缩比的压缩图像进行对比,可看出:压缩比为 1:2 时,复原图像中产生了少量的噪声;压缩比为 1:4 时,噪声进一步加大,同时边缘附近出现了锯齿、寄生波纹等伪像;当压缩比为 1:6,锯齿更加明显;当压缩比为 1:8 时,锯齿已经十分显著,造成图像中存在虚假信息,严重影响图像的判读质量。

3.3 NC_R 的影响

与分析数据压缩的影响类似,在分析 NC_R 对图像复原的影响中仍先进行成像仿真,仿真结果如图 4(a)所示,图 4(b)为直接对仿真图像进行复原的结果。然后在仿真图像中分别加入 0.5%、1%、3%、5%的非均匀性,而后对其进行复原,复

原后结果分别如图 4(c)~4(f)所示。

从图 4(a)~4(f)可看出:非均匀性为 0.5% 时,在复原图像中几乎看不到非均匀性引起的条纹,与直接复原处理结果相同;而在非均匀性为 1% 时,图像的局部位置出现了少量的条纹,但总体上影响不大;当非均匀性达到 5% 时,非均匀性条纹已被放大的十分显著,严重影响了图像的判读质量。

可见,尽管数据压缩和预处理本身对图像质量的影响已很小,但其导致的处理误差对复原处理的影响却很大,因此在遥感链路中压缩和预处理环节的设计中需将 C_R 和 NC_R 控制在一定范围以内。

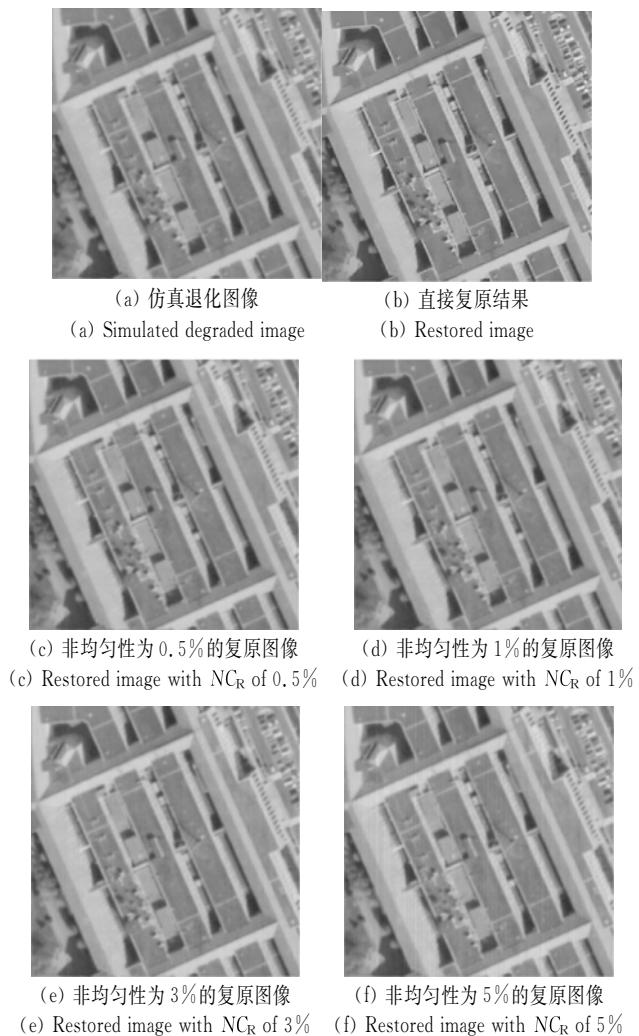


图 4 仿真图像、直接复原及不同非均匀性图像的复原结果
Fig. 4 Simulated degraded image and its restored ones with different NC_R levels

4 基于图像复原的遥感成像系统优化

本章通过复原大量不同降质程度及不同 MTF_{sv} 、 C_R 、 NC_R 组合的退化图像及相应的图像复原质量评价,进一步研究上述因素与复原处理性能之间的关系,在此基础上寻找有利于遥感成像系统设计的最优因素水平组合。

4.1 复原质量的评价

对光学遥感成像系统而言,MTF 和 SNR 是评价成像性能和图像质量的公认标准,也是图像复原处理提升的目标参量。考虑到 MTF 曲线的包络面积 (Modulation Transfer Function Area, MTFA) 能够全面反映目标景物在各个频率处的降质程度,因此采用 MTFA 来评价复原处理对 MTF 的提升性能。图像平坦区能够反映噪声大小,因此采用平坦区的图像 SNR 来评价复原处理对噪声放大的抑制性能。图像 MTFA 和 SNR 越大,复原质量越好。

考虑到压缩和非均匀性校正残差所导致的处理误差对复原结果的影响主要表现为对人眼判读质量的影响,因此主要采用主观观察来评价图像伪像对复原质量的影响。

4.2 复原处理与影响因素的关系及系统优化

考虑到正交试验设计是一种高效处理多因素多水平组合优化问题的科学计算方法,能够以较少的试验次数确定各因素的影响关系^[16],从复杂的因素关系中找到最优的组合方案,因此本节通过设计正交试验,分析不同 MTF_{sv} 、 C_R 、 NC_R 因素水平组合条件对最终复原处理结果的影响。

为了获取完备的正交试验样本,利用典型场景的高分辨率航空影像模拟真实景物,依据各种物理效应引入到成像过程中的顺序,仿真生成不同水平 MTF_{sv} 、 C_R 、 NC_R 条件下的仿真退化图像^[17],对其进行复原处理,并采用图像 MTFA、SNR 和主观视觉作为处理性能的评价指标,分析每个因素及其各个水平对复原处理性能的影响。根据正交试验结果,得到因素之间的恰当组合。为了克服复原算法的影响,本文选择了一种自身具备较强的噪声和伪像抑制能力的复原算法^[13]进行复原处理,该算法能够提高图像 MTF 的同时,提高图像 SNR 并抑制锯齿、寄生波纹等伪像。

场景选择 40 幅包含建筑物、平原、水域等地面

景物结构的航拍影像。 MTF_{sv} 在 $[7\% \sim 20\%]$ 之间以间隔 2% 取 7 个水平; C_R 在 $[2:1 \sim 16:1]$ 之间以间隔 1/4 取 7 个水平; NC_R 在 $[0.5\% \sim 7\%]$ 之间以间隔 1% 取 7 个水平,共 1 960 次试验。

我们知道, MTF_N 值同样是制约复原处理性能的因素,尽管通过添加 MTF_{sv} 的系统约束可在一定程度上降低 MTF_N 的设计要求,使得成像系统得到优化,但显然系统 MTF_N 不可过低。结合目前国内外遥感卫星成像系统 MTF 设计和在轨情况,试验中将 MTF_N 值固定为几个典型值: $[0.06, 0.07, 0.09, 0.1, 0.12, 0.15]$ 。表 1 列出了几组典型条件下的 MTF_{sv} 、 C_R 、 NC_R 与复原处理性能间的关系量表。

表 1 MTF_{sv} , C_R , NC_R 与复原性能的关系

Tab. 1 Relationship between MTF_{sv} , C_R , NC_R and restoration

序号	因素 1 MTF_N	因素 2 MTF_{sv}	因素 3 C_R	因素 4 NC_R	处理性能	
					MTFA 提升	SNR 提升
1	0.05	5%	2:1	0.5%	57.30%	-7.33%
2	0.07	5%	2:1	1%	99.27%	1.01%
3	0.07	5%	2:1	3%	87.33%	0.32%
4	0.07	8%	4:1	3%	72.91%	-6.07%
5	0.07	8%	3:1	3%	76.43%	0.48%
6	0.07	10%	3:1	3%	62.35%	-4.19%
7	0.15	10%	3:1	3%	68.08%	-3.34%
8	0.15	5%	4:1	3%	61.64%	-4.92%
9	0.15	5%	3:1	4%	69.97%	-6.09%

鉴于遥感成像系统优化及像质提升的实际需求,结合表 1 可得出:当遥感成像系统满足 MTF_{sv} 小于 10%、 C_R 小于 4:1、 NC_R 不大于 3% 时,对系统 MTF_N 的设计要求可降到 0.07,此时仍可通过复原处理实现复原图像 MTFA 提高 70% 以上的同时保持图像 SNR 不变,且处理误差所致图像失真不影响判读质量。

4.3 实验及结果分析

为了更直观地说明上述结果的有效性,本节利用仿真实验分别给出了原始图像 $MTF_N = 0.15$ 、 $MTF_{sv} = 15\%$ 、 C_R 为 8:1、 $NC_R = 4\%$ (组合条件 1) 和 $MTF_N = 0.07$ 、 $MTF_{sv} = 9\%$ 、 C_R 为 3:1、 $NC_R = 3\%$ (组合条件 2) 情况下的仿真退化

图像及其复原结果,如图 5(a)~5(d)所示。

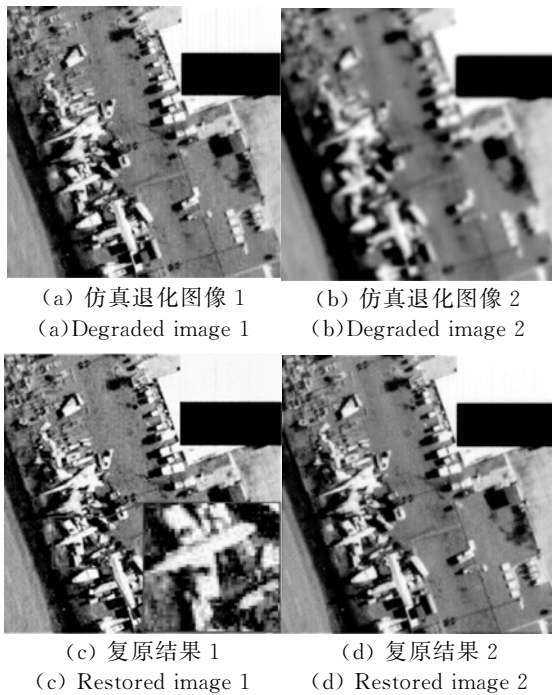


图 5 不同因素组合条件的仿真退化图像及复原结果
Fig. 5 Simulated degraded images and restored ones with different combination factors

从图 5(a)~5(d)对比看出,尽管组合条件 2 仿真生成的退化图像更加模糊,但复原图像的主观判读质量却更为理想。而组合条件 1 的复原图像边缘附近出现了锯齿等虚假信息(如图 5(c)方框区域的局部放大图),并且在图像的平滑区域出现了明显的噪声放大现象,严重影响到了人眼对图像中目标的判读解译能力。本文也基于图中包

含刀口像的图像区域和平滑区域进行了 MTF 和 SNR 的计算,得出组合条件 2 的复原图像在 MTF 提升 70% 以上的情况下,同时保持 SNR 基本不变;而组合条件 1 的复原图像 MTF 也有了一定的提升,但 SNR 却下降了 7.94%。

5 结 论

本文依据复原处理来优化设计遥感成像系统,对影响复原处理性能的主要链路环节因素及其关系进行了理论分析、半物理和仿真实验以及正交试验,得出以下结论:(1)尽管相机 MTF 的空间变化性、在轨的数据压缩比和地面的非均匀性校正残差对图像本身质量的影响已很小,但它们对复原后图像质量的影响却很大,是制约空不变复原处理性能的主要因素;(2)通过地面的复原处理可降低成像系统 MTF_N 的设计要求,从而大大降低系统研制难度。但系统设计中应保证 MTF 的空间变化性、压缩比和非均匀性校正残差在一定的范围以内;(3)在复原图像 MTF 提升 70%、SNR 保持不变的应用需求下,分析出遥感成像系统满足 MTF 空间变化性小于 10%、压缩比小于 4:1、非均匀性校正残差不大于 3% 时,在原始图像 MTF_N 很低(仅 0.07)的情况下,采用空不变复原仍可达到增强图像细节和提高图像判读质量的目的。

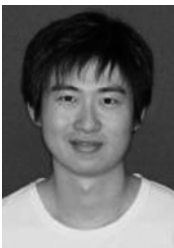
本文的分析方法以及得出的相关结论可为光学遥感成像系统的优化设计提供依据,具有理论意义和实际工程应用价值。

参考文献:

- [1] KUBIK P, PASCAL V, LATRY C, et al.. Pleiades image quality: from users' needs to products definition [C]. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX, Proc. SPIE* 5978, 2005: 188-198.
- [2] CHOI T. *IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method* [D]. South Dakota: South Dakota State University, 2002: 19-89.
- [3] LEEA D, SEO D C, SONG J H, et al. Image restoration of calibration and validation for KOMPSAT-2 [C]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing*: 2008: 57-62.
- [4] 满益云,陈世平,刘兆军,等. MTFC 在光学遥感成像系统优化设计中的应用研究[J]. *航天返回与遥感*, 2007, 28(4): 39-47.
- [5] MAN Y Y, CHEN SH P, LIU ZH J, et al.. Study on MTF compensation application to the optimization design of optical remote sensing imaging system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, 28(4): 39-47. (in Chinese)
- [6] ANDREWS H C, HUNT B R. *Digital Image Restoration* [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1977.

- [6] GUNTURK B, LI X. *Image Restoration: Fundamentals and Advances* [M]. Florida: CRC Press, 2012.
- [7] CHAUDHURI S, VELMURUGAN R, RAMESHAN R. *Blind Deconvolution Methods: A Review* [M]. Blind Image Deconvolution: Springer International Publishing, 2014: 37-60.
- [8] CAI J F, DONG B, OSHER S, *et al.*. Image restoration: total variation, wavelet frames, and beyond [J]. *Journal of the American Mathematical Society*, 2012, 25(4): 1033-1089.
- [9] SHAO K, ZOU Y, LIU Y, *et al.*. Based on total variation regularization iterative blind image restoration algorithm [J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 167(3):36-42.
- [10] JALOBEANU A, BLANC-FÉRAND L, ZERUBIA J. Satellite image deconvolution using complex wavelet packets [R]. INRIA, 2000.
- [11] WANG X Y, LIU Y C, YANG H Y. An efficient remote sensing image denoising method in extended discrete shearlet domain [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2014, 49 (2): 434-453.
- [12] MOSLEH A, LANGLOIS J M P, GREEN P. *Image Deconvolution Ringing Artifact Detection and Removal via PSF Frequency Analysis* [M]. Computer Vision-ECCV 2014. Springer International Publishing, 2014: 247-262.
- [13] WEN N, YANG S, ZHU C, *et al.*. Adaptive contourlet-wavelet iterative shrinkage/thresholding for remote sensing image restoration [J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2014 (8): 664-674.
- [14] CHRISTOPOULOS C, SKODRAS A, EBRAHIMI T. The JPEG2000 still Image coding system: an overview [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2000, 46(4): 1103-1127.
- [15] PETERS S M, KITAEFF V V. The Impact of JPEG2000 lossy compression on the scientific quality of radio astronomy imagery [J]. *Astronomy and Computing*, 2014(6): 1-51.
- [16] 赵选民. 试验设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHAO X M. *Experimental Design* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 智喜洋, 张伟, 侯晴宇, 等. 影响测绘相机匹配精度的辐射指标量化 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 387-394.
ZHI X Y, ZHANG W, HOU Q Y, *et al.*. Quantification for radiometric specifications impacting on matching accuracy of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 387-394. (in Chinese)

作者简介:



智喜洋(1982—),男,讲师,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光学遥感信息获取与处理、遥感图像处理与像质评价等方面的研究。E-mail:zhixiyang@hit.edu.cn

通讯作者:



侯晴宇(1982—),男,副教授,哈尔滨工业大学博士学位,主要从事图像处理、空间目标识别等方面的研究。E-mail:houqingyu@126.com

(本栏目编辑:李自乐)
(版权所有 未经许可 不得转载)