

卫星平台复杂振动引起的光谱成像退化仿真研究*

唐秋艳 唐义[†] 曹玮亮 王静 南一冰 倪国强

(北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2011年5月19日收到; 2011年8月9日收到修改稿)

卫星平台不稳定性将严重影响光谱成像质量, 针对干涉型和色散型成像光谱仪受平台振动而产生的成像质量退化影响进行机理研究和仿真, 建立了两类成像光谱的退化模型. 提出的光谱微分动态成像退化仿真方法, 考虑了复杂振动的综合影响. 通过提出平均掺杂比的概念, 建立起卫星平台运动参数与光谱成像影响之间的桥梁, 详细推导了这两者间的定量关系. 并以典型光谱和模拟地物光谱为例进行了退化仿真, 退化结果表明平台振动中俯仰和侧滚的影响比偏航大, 而且不仅会影响空间分辨率, 还会带来光谱失真, 而影响较大的是地物种类较丰富的区域.

关键词: 振动, 光谱成像, 平均掺杂比, 退化

PACS: 02.70.-c, 42.30.-d, 62.25.Jk

1 引言

光谱成像数据精度要求越来越高, 卫星平台的不稳定性成为制约它的一个重要因素^[1-3]. 对退化数据进行补偿是一种既经济又有效的方法, 然而, 一方面实际的在轨数据受到多重因素的干扰, 无法单独考虑平台振动的影响; 另一方面若没有理想的地物光谱信息作为补偿标准, 则很难对补偿效果进行评价. 所以, 若能根据卫星姿态变化、平台振动等情况仿真出退化的地物光谱, 则对于补偿研究是大有裨益的. 本文即对这种仿真进行研究.

事实上, 近年来国内外有越来越多的学者关注该问题, 余成伟等人^[4]研究了卫星姿态抖动对大孔径静态干涉成像光谱仪成像质量的影响, Mahgoub等人^[5]也对傅里叶变换成像光谱仪受卫星振动影响进行了校正研究, 但他们多研究的是单一自由度的振动带来的影响, 而这往往与真实情况不太符合. 本文通过模拟成像光谱仪动态成像的过程来对退化的结果进行仿真, 全面考虑了复杂振动的综合影响.

2 卫星平台振动

卫星平台振动在频率上通常按曝光时间和振

动周期的比值分为高频和低频: 当 $T/t_0 \leq 2.5$ 时称为低频, 振幅较大; 当 $T/t_0 > 2.5$ 时称为高频, 振幅较小^[6,7]. 空间上通常有三种姿态: 俯仰、侧滚和偏航. 但实际上其振动形式可能并不单一, 而是高阶、多模的复杂形式, 它在曝光时间内有多种频率同时存在, 方向也不一定固定. 这进一步增加了退化仿真研究的难度.

3 光谱成像退化原理

3.1 干涉型

干涉成像光谱仪种类繁多, 带有狭缝的空间调制型是具有代表性的一类^[8], 它一次只能得到一维空间信息和一维干涉信息. 另一维空间信息通过垂直于狭缝的推扫产生. 根据干涉理论, 干涉强度与光谱之间存在如下关系^[9]:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(v) \cos(2\pi vx) dv, \quad (1)$$

$$B(v) = \int_0^{\infty} I(x) \cos(2\pi vx) dx, \quad (2)$$

式中 $B(v)$ 为波数 v 处的光谱密度分布; x 为光程差; I 为干涉强度.

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2009CB724005), 国家自然科学基金 (批准号: 40804048) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2007AA12Z101 和 2009AA01Z225) 资助的课题.

[†] E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

若成像时, 光学系统与探测器间存在相对运动, 则会导致其光谱成像退化. 但在退化过程中光学系统本身被认为是刚体. 为了分析退化过程, 把曝光时间 T 分割成 N 个相等时间段, 像点在曝光时间内沿着一定的路径移动. 那么探测器最终得到的像就是每个时间段内发生像移后所成像的时间等权平均. 设面阵列中任一点 A 的像素坐标为 (m, n) , 则

$$g(m, n) = \overline{f(m(t), n(t))} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N f \left[m \left(\frac{iT}{N} \right), n \left(\frac{iT}{N} \right) \right] \quad (3)$$

在曝光时间内的某时刻 t_i , 设像移为 $(\Delta m(t_i), \Delta n(t_i))$, 则某目标 g 的干涉强度为^[10]

$$I'_g(x)|_{t_i} = \int_{-\infty}^{\infty} \{B_g(v) + \eta_i[B_{g+1}(v) - B_g(v)]\} \times \cos(2\pi vx) dv, \quad (4)$$

式中 $B_g(v)$ 和 $B_{g+1}(v)$ 分别为归一化的目标地物和掺杂地物光谱, η_i 为 t_i 时刻的掺杂比, 它与像移有关.

那么最终得到的干涉图为 $\overline{I'_g(x)}$, 定义为平均干涉强度. 而由于平台稳定度一般为 $10^{-3} \sim 10^{-1}(\circ)/s$ ^[11], 所以振动的影响一般不会超过一个扫描间隔. 那么 (4) 式中 $B_{g+1}(v)$ 就是相邻像元的光谱, 但 η_i 随着不同时刻像移的变化而改变. 所以

$$\overline{I'_g(x)} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \{B_g(v) + \eta_i[B_{g+1}(v) - B_g(v)]\} \cos(2\pi vx) dv \right\}. \quad (5)$$

令 $\bar{\eta} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N \eta_i$, 把 $\bar{\eta}$ 定义为平均掺杂比则

$$\overline{I'_g(x)} = (1 - \bar{\eta}) \int_{-\infty}^{\infty} B_g(v) \cos(2\pi vx) dv + \bar{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} B_{g+1}(v) \cos(2\pi vx) dv, \quad (6)$$

故

$$\overline{I'_g(x)} = (1 - \bar{\eta})I_g(x) + \bar{\eta}I_{g+1}(x). \quad (7)$$

而根据 (2) 式, 退化之后的反演光谱为

$$B'_g(v) = \int_0^{\infty} \overline{I'_g(x)} \cos(2\pi vx) dx = (1 - \bar{\eta})B_g(v) + \bar{\eta}B_{g+1}(v). \quad (8)$$

这样, 退化过程不再需要考虑复杂的干涉成像过程, 而只要确定曝光时间内掺杂地物光谱及其平均掺杂比即可.

3.2 色散型

色散型成像光谱仪是使二维目标中的某一个一维线状部分通过狭缝进入色散系统, 然后将色散开的光束会聚在探测器上, 形成一系列单色像. 通过推扫即可得到完整的二维目标的光谱图像. 相较于干涉型, 它没有傅里叶变换的过程, 而是直接得到光谱信息.

当光学系统与探测器间存在着相对运动时, 根据上述微分成像理论可得

$$B'_g(v) = \overline{B_{gi}(v)} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N [(1 - \eta_i)B_g(v) + \eta_i B_{g+1}(v)] = (1 - \bar{\eta})B_g(v) + \bar{\eta}B_{g+1}(v). \quad (9)$$

可见, 色散型和干涉型光谱成像退化过程本质上是一致的. 而为了进行退化仿真, 首先要得到掺杂光谱及其平均掺杂比.

3.3 平均掺杂比的计算

根据混合像元理论中光谱混合的线性模型^[12]可知, 混合光谱中各成分的比例等于各地物的面积之比. 所以平均掺杂比由像移路径所覆盖的掺杂像元总的曝光面积决定. 而像移路径与卫星姿态振动密切相关, 三种姿态的影响示意图如图 1 所示.

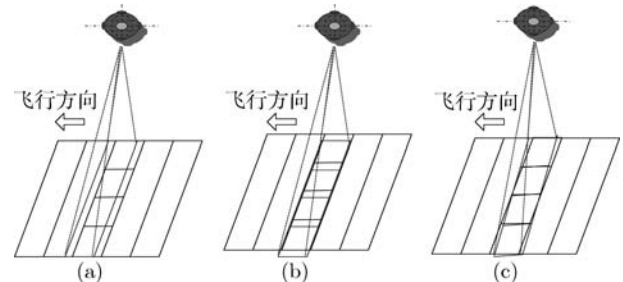


图 1 三种姿态的影响示意图 (a) 俯仰 (pitch); (b) 侧滚 (roll); (c) 偏航 (yaw)

3.3.1 俯仰、侧滚和偏航

由图 1 可见, 俯仰的影响平行于推扫方向, 在像面上, 俯仰带来的像移在曝光时间内的某时刻 t 为 $\Delta x(t) = f \tan[\Delta\alpha(t)]$, 其中 f 为系统焦距, 但由于姿态稳定度较高, 一般达到 $10^{-1} \sim 10^{-3}(\circ)/s$, 所以近似地有 $\Delta x(t) = f \cdot \Delta\alpha(t)$; 同理侧滚的影响垂直于推扫方向, $\Delta y(t) = f \cdot \Delta\beta(t)$; 偏航在平行和垂

直方向都有影响,但垂直方向的像移近似为 0,所以主要在平行方向上,且影响的程度与位置有关, $\Delta x(t) = y \cdot \Delta\theta(t)$, 其中, $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 和 $\Delta\theta$ 分别为俯仰、侧滚和偏航振动角. 下面针对三种姿态分别计算平均掺杂比.

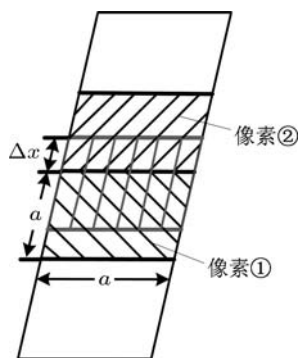


图2 俯仰

对于俯仰,假设探测器像元尺寸为 a ,且不考虑占空比和非均匀性的影响. 设像点在曝光时间内会覆盖像元 1 和 2,如图 2 所示,像元 1 为原始像元,像元 2 为掺杂像元. 那么在时刻 $t(0 \leq t \leq T)$,像元偏移像元 1 的距离为 $\Delta x(0 \leq \Delta x \leq a)$,它是关于时间的函数(而当 Δx 为负时,掺杂像元为其下面的像元). 则此时覆盖像元 2 的面积为 $\Delta x(t)a$,那么在曝光时间内,像元 2 所占的比重即为俯仰影响下的平均掺杂比

$$\bar{\eta}_{pitch} = \frac{\int_0^T \Delta x(t)adt}{\int_0^T a^2dt} = \frac{\int_0^T \Delta\alpha(t) \cdot fdt}{aT}. \quad (10)$$

侧滚影响与俯仰相似,如图 3 所示,类似地,在侧滚振动 $\Delta\beta$ 下,平均掺杂比为

$$\bar{\eta}_{yaw(m,n)} = \frac{\int_0^T \Delta x(t)adt}{\int_0^T a^2dt} = \frac{\int_0^T \Delta\theta(t) \cdot ndt}{T}. \quad (11)$$

在偏航影响下像点发生旋转,如图 4 所示,只近似考虑图中阴影部分的光谱掺杂. 设旋转中心为所扫描行的中心,在时刻 t 像元移动到像元 1 和 2 之间,则像元 (m, n) 中所覆盖的掺杂像元的面积近似为 $\Delta x(t)a$. 那么偏航振动下的平均掺杂比为

$$\bar{\eta}_{roll} = \frac{\int_0^T \Delta y(t)adt}{\int_0^T a^2dt} = \frac{\int_0^T \Delta\beta(t) \cdot fdt}{aT}. \quad (12)$$

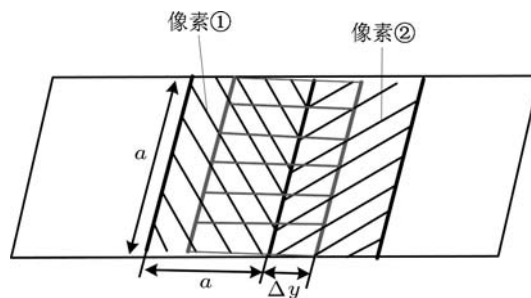


图3 侧滚

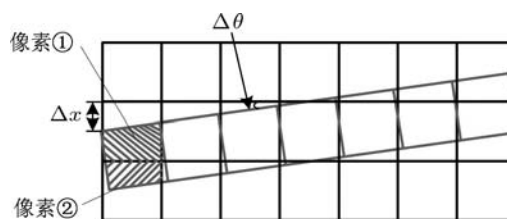


图4 偏航

3.3.2 综合作用

当三种姿态综合作用时,如图 5 所示,像移是由三姿态综合作用引起的,所以

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= f \cdot \Delta\alpha(t) + y \cdot \Delta\theta(t), \\ \Delta y(t) &= f \cdot \Delta\beta(t). \end{aligned} \quad (13)$$

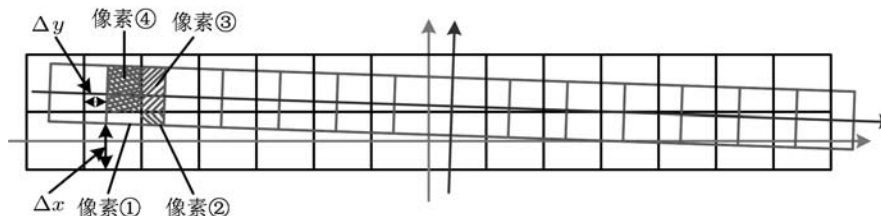


图5 综合作用

掺杂像元为原始像元的八邻域, 而根据 (8) 和 (9) 式, 当掺杂像元有多个时, 退化光谱为

$$B'_{(m,n)}(v) = [1 - \text{sum}(\boldsymbol{\eta}_{(m,n)})]B_{(m,n)}(v) + \boldsymbol{\eta}_{(m,n)} \cdot \mathbf{B}_{(m,n)}^T(v), \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{B}_{(m,n)}(v) = \{B_{(m+1,n)}, B_{(m+1,n+1)}, B_{(m,n+1)}, B_{(m-1,n+1)}, B_{(m-1,n)}, B_{(m-1,n-1)}, B_{(m,n-1)}, B_{(m+1,n-1)}\},$$

$$\boldsymbol{\eta}_{(m,n)} = \{\bar{\eta}_{(m+1,n)}, \bar{\eta}_{(m+1,n+1)}, \bar{\eta}_{(m,n+1)}, \bar{\eta}_{(m-1,n+1)}, \bar{\eta}_{(m-1,n)}, \bar{\eta}_{(m-1,n-1)}, \bar{\eta}_{(m,n-1)}, \bar{\eta}_{(m+1,n-1)}\}$$

分别为像元 (m, n) 八邻域的光谱曲线及其平均掺杂比向量, $\text{sum}(\boldsymbol{\eta}_{(m,n)})$ 表示向量 $\boldsymbol{\eta}_{(m,n)}$ 所有元素的和. 而 $\boldsymbol{\eta}_{(m,n)}$ 的各元素的计算如下:

$$\bar{\eta}_{(m+1,n)} = \frac{1}{a^2T} \int_0^T [a - \Delta x(t)_{(m+1,n)}] \cdot \Delta y(t)_{(m+1,n)} dt,$$

其中

$$\Delta x(t)_{(m+1,n)} = \begin{cases} \Delta x(t), & (\Delta x(t) > 0), \\ 0, & (\text{其他}), \end{cases}$$

$$\Delta y(t)_{(m+1,n)} = \begin{cases} \Delta y(t), & (\Delta y(t) > 0), \\ 0, & (\text{其他}), \end{cases}$$

$$\bar{\eta}_{(m,n+1)} = \frac{1}{a^2T} \int_0^T \Delta x(t)_{(m,n+1)} \cdot [a - \Delta y(t)_{(m,n+1)}] dt,$$

其中 $\Delta x(t)_{(m+1,n+1)}, \Delta y(t)_{(m+1,n+1)}$ 同 $(m+1, n)$.

$$\bar{\eta}_{(m-1,n+1)} = \frac{1}{a^2T} \int_0^T \Delta x(t)_{(m-1,n+1)} \cdot \Delta y(t)_{(m-1,n-1)} dt,$$

其中

$$\Delta x(t)_{(m-1,n+1)} = \begin{cases} \Delta x(t), & (\Delta x(t) > 0), \\ 0, & (\text{其他}), \end{cases}$$

$$\Delta y(t)_{(m-1,n+1)} = \begin{cases} -\Delta y(t), & (\Delta y(t) < 0), \\ 0, & (\text{其他}). \end{cases}$$

其余以此类推. 而在离散情况下, 上面各式中的积分可分别表示为离散和的形式.

4 退化仿真实验

根据以上理论, 分别以建筑、水体和植被三种典型地物光谱和模拟生成的地面目标两种情况为原始数据, 并选取不同的姿态振动模式进行退化仿真实验.

4.1 典型光谱的仿真实验

由于不同的姿态变化会带来不同的影响, 以如图 6 所示的建筑、水体和植被三种典型光谱为例分别进行不同姿态下的退化仿真. 根据姿态稳定精度, 并选取像元尺寸 $a = 20 \mu\text{m}$, 系统焦距 $f = 117 \text{ mm}$, 曝光时间 $T = 1/16 \text{ s}$, 计算可知, 姿态在曝光时间内变化的最大幅值约为 $30''$, 所以设定俯仰、侧滚和偏航的振动模式分别为幅值是 $10'', 20''$ 和 $30''$ 的匀速直线运动和正弦振动六种情况. 并根据以上退化理论可计算出各种姿态振动模式下的平均掺杂比如表 1 所示.

假设两种情况, 一种是建筑光谱中掺入水体光谱, 另一种是水体光谱中掺入植被光谱. 其在不同的姿态振动模式下退化后得到的光谱分别如图 7 和 8 所示.

计算各种退化光谱相对于原始光谱的光谱信息散度 (SID)^[13], 结果如表 2 和表 3 所示.

表 1 各种姿态下的平均掺杂比

	$30''t/T$	$20''t/T$	$10''t/T$	$30'' \sin(\pi t/T)$	$20'' \sin(\pi t/T)$	$10'' \sin(\pi t/T)$
俯仰	0.4254	0.2836	0.1418	0.5417	0.3611	0.1806
侧滚	0.4254	0.2836	0.1418	0.5417	0.3611	0.1806
偏航 ($n=100$)	0.0073	0.0048	0.0024	0.0093	0.0062	0.0031

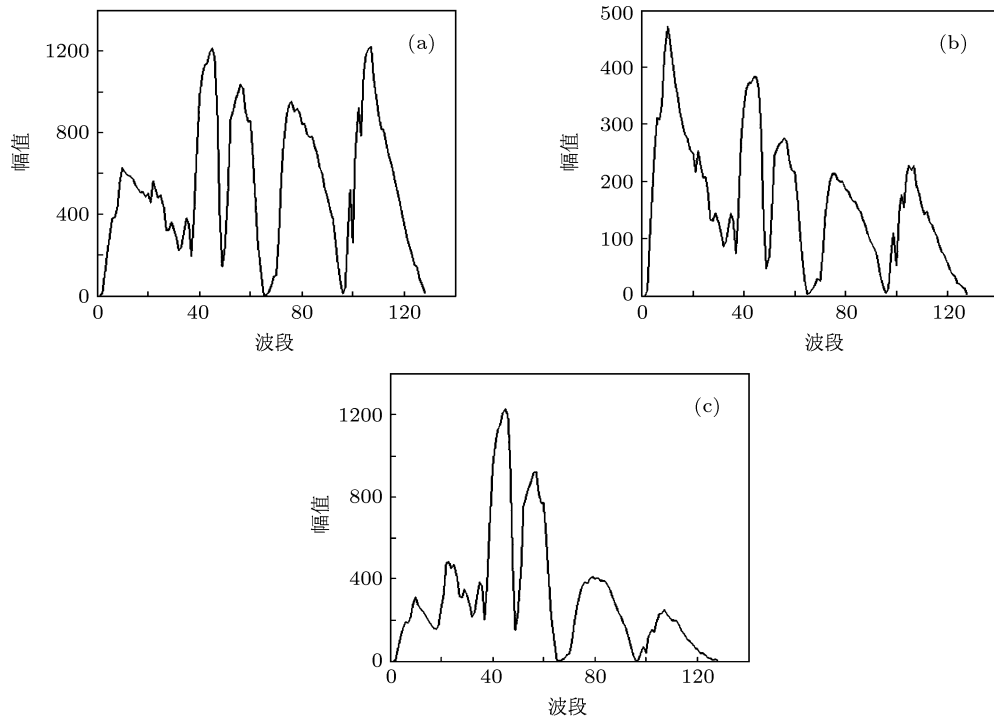


图6 三种典型地物的光谱 (a) 建筑光谱; (b) 水体光谱; (c) 植被光谱

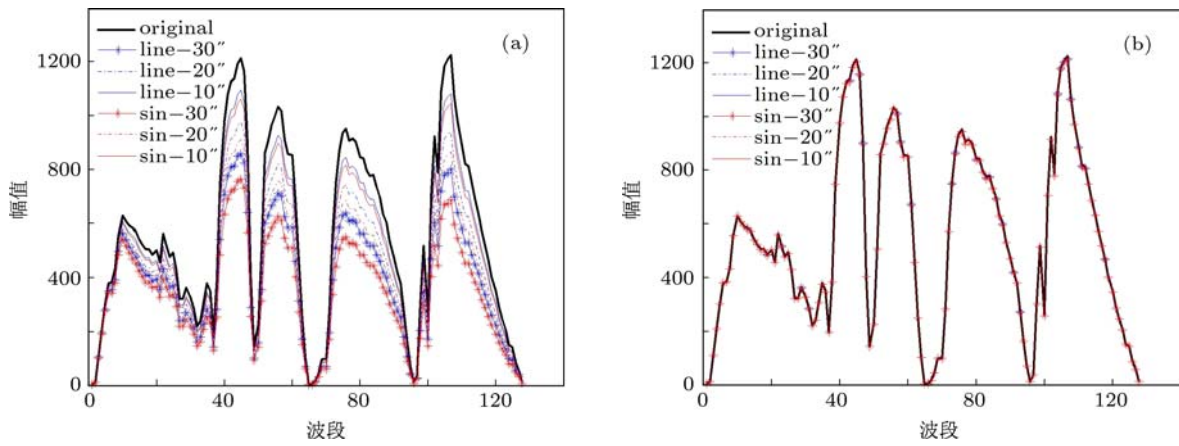


图7 建筑光谱渗入水体光谱 (a) 俯仰和侧滚影响; (b) 偏航影响

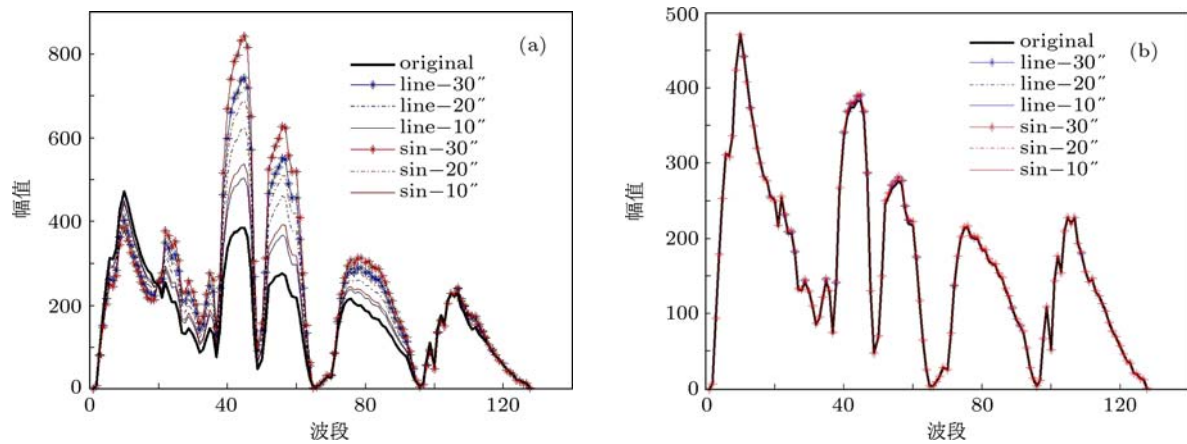


图8 水体光谱渗入植被光谱 (a) 俯仰和侧滚影响; (b) 偏航影响

表 2 各种姿态下建筑光谱渗入水体光谱的 SID

	$30''t/T$	$20''t/T$	$10''t/T$	$30'' \sin(\pi t/T)$	$20'' \sin(\pi t/T)$	$10'' \sin(\pi t/T)$
俯仰	0.0121	0.0043	8.6538×10^{-4}	0.0244	0.0078	0.0015
侧滚	0.0121	0.0043	8.6538×10^{-4}	0.0244	0.0078	0.0015
偏航 ($n = 100$)	1.9221×10^{-6}	8.2845×10^{-7}	2.0648×10^{-7}	3.1275×10^{-6}	1.3846×10^{-6}	3.4481×10^{-7}

表 3 各种姿态下水体光谱渗入植被光谱的 SID

	$30''t/T$	$20''t/T$	$10''t/T$	$30'' \sin(\pi t/T)$	$20'' \sin(\pi t/T)$	$10'' \sin(\pi t/T)$
俯仰	0.1563	0.0825	0.0251	0.2236	0.1214	0.0385
侧滚	0.1563	0.0825	0.0251	0.2236	0.1214	0.0385
偏航 ($n = 100$)	8.3285×10^{-5}	3.6173×10^{-5}	9.0828×10^{-6}	1.3468×10^{-4}	6.0197×10^{-5}	1.5134×10^{-5}

可见, 俯仰和侧滚的影响程度基本一致, 幅值越大, 光谱变形越严重, 而同幅度的姿态变化简谐振动比匀速直线运动对光谱的影响要大. 而相较俯仰和侧滚, 相同稳定度下的偏航却不会对光谱产生太大影响.

像素, 将 RGB 值转换为光谱分布来得到光谱信息, 由 RGB 产生光谱权值的转换公式 [14,15]

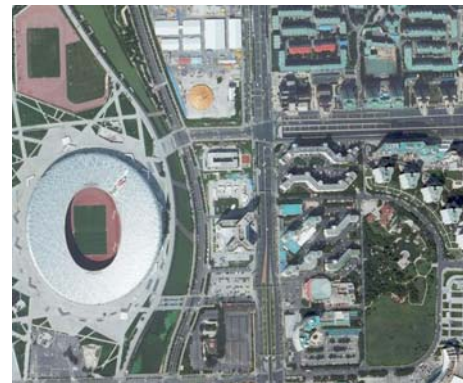


图 9 原始遥感 RGB 图像

4.2 模拟地物的仿真实验

为了对真实的卫星平台受姿态振动影响进行仿真, 以下对该过程进行模拟. 但由于退化仿真需要以未受振动影响的理想地物为原始数据, 所以首先要生成理想的地面目标及其光谱数据. 根据文献 [14] 通过一副高清的 RGB 遥感图像作为仿真的地面目标, 如图 9 所示, 图幅大小为 500 像素 × 600

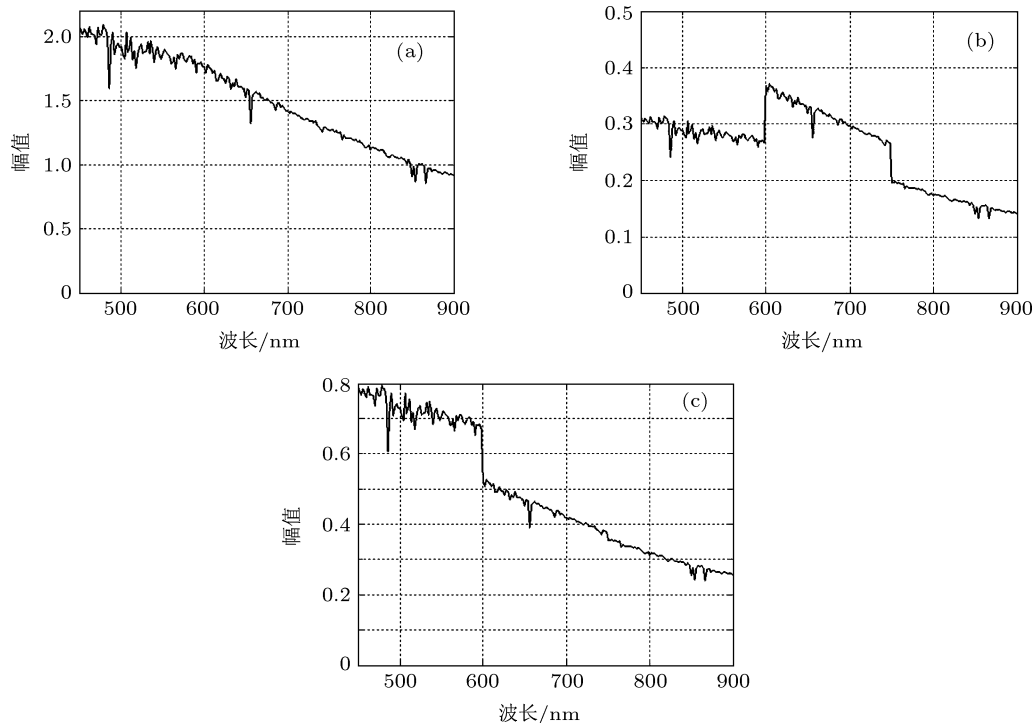


图 10 光谱图 (a) D65 光谱; (b) 仿真光谱 $R = 188, G = 207, B = 214$; (c) 仿真光谱 $R = 177, G = 149, B = 146$

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.75 & -0.25 & 0.01 \\ -0.2 & 0.4 & 0.35 \\ 0.01 & -0.21 & 0.69 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R/255 \\ G/255 \\ B/255 \end{bmatrix} \quad (15)$$

并选择 D65 标准光源作为辐射源, 如图 10(a) 所示, 按照波长分成三部分: (450—600 nm), (600—750 nm) 和 (750—900 nm), 影像中各点在不同波段的辐射强度分别被 W_1, W_2 和 W_3 加权, 形成该点的仿真原始光谱, 图 10(b), (c) 所示为两目标点经过转换后的光谱, 光谱分辨率为 0.5 nm; 图 11 所示为 650 nm 处的单色图像。

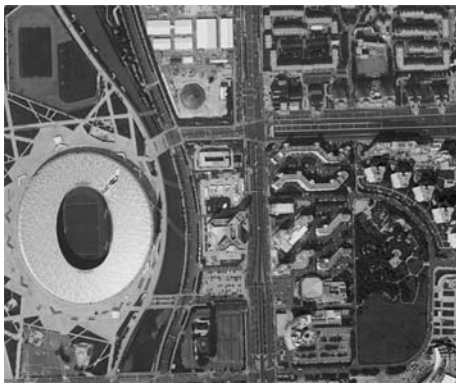


图 11 650nm 的单色图像

选取以下仿真参数: 光谱范围 450—900 nm, 波段数为 225; 像元尺寸 $a = 20 \mu\text{m}$; 系统焦距 $f = 117 \text{ mm}$; 每行曝光时间 $T = 1/16 \text{ s}$. 假设光谱动态成像过程为从图 13 中的场景中由下往上一行一行的扫描, 即共需扫描 500 次, 空间分辨率与图中的分辨率一致, 光谱分辨率为 2 nm. 设曝光时间 T 内姿态角的采样点为 10 个, 那么扫完整个场景需要的总时间为 $500 \times T$, 姿态角总的采样点为 5000 个, 可根据平台姿态敏感器在轨测量. 选取三姿态在整个扫描过程中的振动曲线如图 12 所示, 最大振幅为 $30''$. 所以第 i 行的姿态振动曲线即为图 12 中的从 $(i - 1)$ 到 i 的那一段, 其中包括 10 个采样点, 例如第 100 行在曝光时间内的振动曲线如图 13 所示。

则根据 (14) 式来模拟成像光谱仪微分动态成像, 分别计算每行的退化光谱, 通过全程扫描即可仿真出整个退化的光谱立方体。

450nm 处原始单色图与退化单色图中的一部分如图 14 所示, 退化图相对于原始图的均方误差 (MSE)^[16] 为 146.2456. 而原始图和退化图的灰度平均梯度 (GMG)^[16] 分别为 $\text{GMG}_0=14.9426$,

$\text{GMG}_D=10.3714$, 所以显然退化单色图的清晰度有所下降。

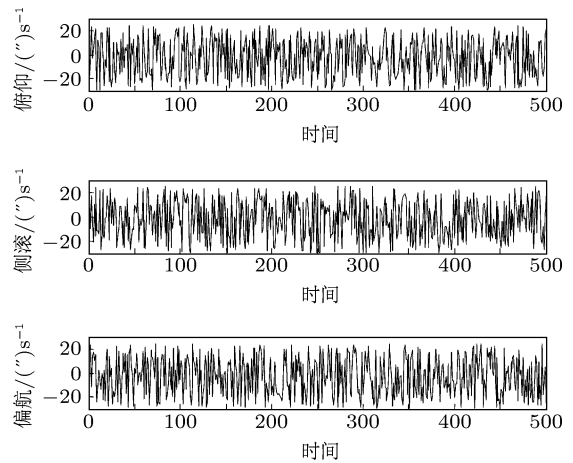


图 12 振动曲线

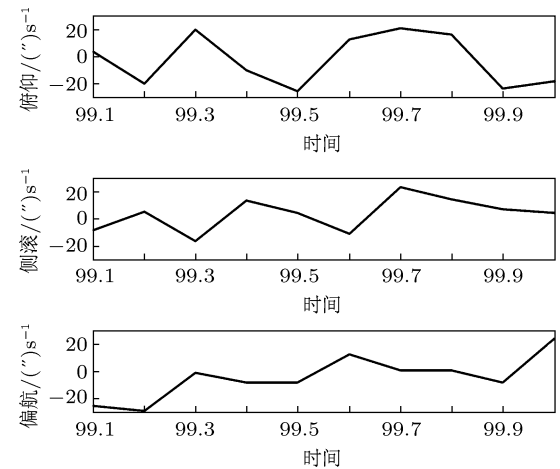


图 13 扫描第 100 行时振动曲线

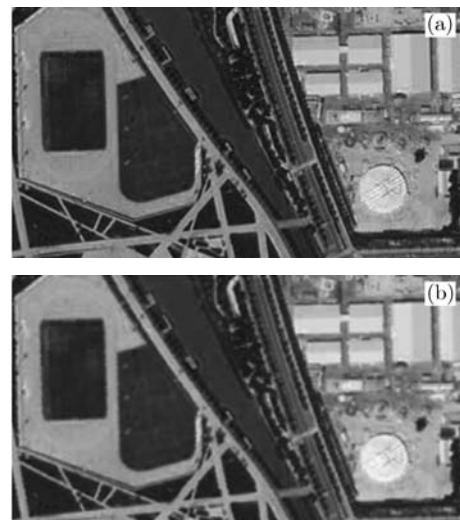


图 14 450 nm 单色图中的一部分 (a) 原始; (b) 退化后

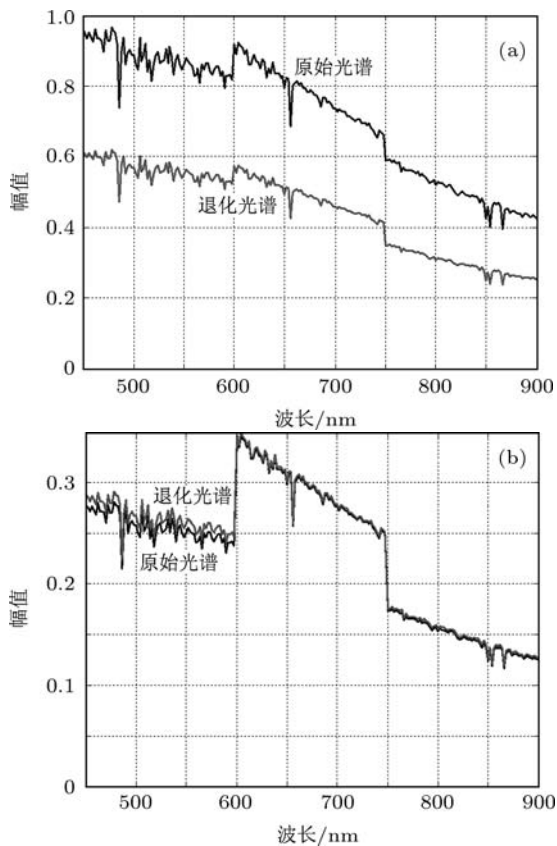


图 15 光谱退化对比 (a) 整个立方体中光谱差异最大情况; (b) 光谱差异最小情况

整个立方体中退化后和原始光谱差异最大情况和最小情况如图 15 所示, 最大情况下光谱相对均方误差 (RQE)^[13] 为 0.0193, 光谱信息散度 (SID) 为 0.0011, 最小情况下 RQE 为 4.1072×10^{-4} , SID 为 6.1067×10^{-5} . 光谱差异最大区域和最小区域如图 16 所示, 最小区域地物单一, 相邻光谱基本一致, 所以影响较小; 最大区域地物较丰富, 相邻地物光

谱差异较大, 成像时掺入相邻像元的光谱导致光谱退化较严重.



图 16 光谱差异最大和最小区域

5 结论

成像光谱仪的光谱成像质量会受卫星振动的影 响, 通过基于像移路径的微分动态光谱成像分析方法, 分别对狭缝干涉型和色散型成像光谱仪的光谱成像退化过程进行了研究, 结果表明其退化本质是一致的, 光谱成像退化的实质是光谱掺杂, 而与成像过程无关. 并提出了平均掺杂比的概念, 指出它是与运动参数密切相关的一个量. 这样, 通过确定平均掺杂比就可以仿真得到退化的光谱. 而仿真实验的结果表明姿态中的俯仰和侧滚影响比偏航大, 而平台振动不仅带来空间成像模糊、畸变, 也会带来光谱的混叠与失真, 而且对光谱影响较大的是地物种类丰富的区域. 而该仿真方法不仅能针对单一自由度的振动带来的影响, 更是全面考虑了复杂振动的综合影响. 在实际应用中只要测得平台姿态的振动曲线就能进行退化分析仿真, 得到退化的光谱立方体, 为进一步的光谱成像校正研究提供方便.

- [1] Geng W B, Zhai L P, Ding Y L 2009 *Optics and Precision Engineering* **17** 314 (in Chinese) [耿文豹, 翟林培, 丁亚林 2009 光学精密工程 **17** 314]
- [2] Hadar O, Fisher M, Kopeika N S 1992 *Opt. Eng.* **31** 581
- [3] Sun G M, Liu G S, Zhou D Q 1998 *J. Infrared Millim. Waves* 1998(6) 435 (in Chinese) [孙光民, 刘国岁, 周德全 1998 红外与毫米波学报 1998(6) 435]
- [4] Yu C W, Chen D R, Yang J F 2004 *Opto-Electronic Engineering* **31** 4 (in Chinese) [余成伟, 谌德荣, 杨建峰 2004 光电工程 **31** 4]
- [5] Mahgoub A, Nguyen T, Desbiens R, Zaccarin 2009 *IEEE ICIP*, 573–576
- [6] Hader O, Dror I, Kopeika N S 1992 *SPIE*, 1697: 183–197
- [7] Xu P, Huang CH N, Wang Y T, Hao Q 2003 *Journal of Astronautics* **24**(3) 6 (in Chinese) [徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 郝群 2003 宇航学报 **24**(3) 6]
- [8] Xiangli B, Yuan Y, Lv Q B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5401 (in Chinese) [相里斌, 袁艳, 吕群波 2009 物理学报 **58** 5401]
- [9] Xie J H, Niao N F, Cao L C 2007 *Fundamentals of Fourier Optics and Contemporary Optics* pp295–297 (in Chinese) [谢敬辉, 廖宁放, 曹良才. 2007 傅里叶光学与现代光学基础 (北京: 北京理工大学出版社) 第 295–297 页]
- [10] Xiangli B, Liu GX, Gao Z 1997 *Acta Photo. Sin.* **26**(7): 645 (in Chinese) [相里斌, 刘改侠, 高瞻 1997 光子学报 **26** 645]
- [11] Li Y H, Yi K CH, Tian H X 2007 *J. Infrared Millim. Waves*, **26** 178 (in Chinese) [李于衡, 易克初, 田红心 2007 红外与毫米波学

- 报 26 178]
- [12] Pan M ZH, Qi H X, Xiao G H, Shu R 2010 *J. Infrared Millim. Waves* **29** 357 (in Chinese) [潘明忠, 亓洪兴, 肖功海, 舒嵘 2010 红外与毫米波学报 **29** 357]
- [13] Shi D L, Lv Q B, Cui Y. 2009 *Acta Photo. Sin.* **38**(6): 1530—1532 (in Chinese) [石大莲, 吕群波, 崔燕 2009 光子学报 **38** 1530]
- [14] Yuan Y, Zhang X B, Sun CH M. 2010 *J. Optik. IJLEO* 51350
- [15] Luo Y D, Liao N F, Yang W P 2008 *Opt. Tech.* **34** 709 (in Chinese) [罗永道, 廖宁放, 杨卫平, 冯洁, 梁敏勇 2008 光学技术 **34** 709]
- [16] Eskicioglu A M, Fisher P S 1995 *IEEE Transactions on Communication* **43** 2959

Simulation of imaging spectrometers degraded by satellite vibrations*

Tang Qiu-Yan Tang Yi[†] Cao Wei-Liang Wang Jing Nan Yi-Bing Ni Guo-Qiang

(Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System (School of Photoelectricity), Beijing institute of technology, Beijing 100081, China)

(Received 19 May 2011; revised manuscript received 9 August 2011, China)

Abstract

Instability of satellite platform will seriously affect the quality of spectral imaging. The degradation mechanism of interferential and dispersive imaging spectrometers caused by satellite vibrations is studied in this paper. A simulation algorithm of degradation based on differential dynamic spectral imaging is presented. And the concept of mean mixing ratio (MMR) is proposed, which builds the bridge between the parameters of satellite vibration and the influences on spectral imaging. The quantitative relationship between them is also deduced in detail. Spectral degradation results are simulated by taking the typical spectra and the generated spectrums of surface features as the ideal original data. Simulation results show that the effects caused by pitch and roll are much greater than that by yaw, and the vibrations affect not only spatial resolution but also spectrum, and the regions of rich species are influenced seriously.

Keywords: vibration, spectral imaging, MMR, degradation

PACS: 02.70.-c, 42.30.-d, 62.25.Jk

* Project supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant No. 2009CB724005), National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40804048), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 863 Program) (2007AA12Z101 and 2009AA01Z225).

[†] E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn