

一种评价光学卫星辐射特性及图像质量的噪声分析方法¹

唐海蓉 向茂生 吴一戎 朱敏慧 金伟其*

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

*(北京理工大学光电工程系 北京 100081)

摘要: 该文通过分析光学卫星图像的辐射和噪声特性,引进了三维噪声分析方法,将图像噪声按时间、空间水平和垂直三维空间划分为 7 个噪声项,并分析了各噪声因子的含义。通过对实际图像加以验证和分析,为评估图像质量和评价图像质量改善方法提供了一种可行的方法。

关键词: 光学卫星图像,辐射特性,三维噪声

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)03-0370-05

A Noise Analysis Method to Evaluate Image Quality of Optical Satellites

Tang Hai-rong Xiang Mao-sheng Wu Yi-rong Zhu Min-hui Jin Wei-qi*

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

*(Dept of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A new 3D noise analysis method is introduced on the basis of analyzing the radiometric performance and noise of optical satellite image. The imaging noise can be divided into seven parts according to temporal and horizontal, vertical dimensions. The paper analyses the content of 3D noise. Several satellite images are used to validate the method. This method provides a feasible way to evaluate the imaging quality and to evaluate the methods of improving image quality.

Key words Optical satellite images, Radiometric performance, 3D noise

1 引言

利用光学探测器成像的遥感卫星是目前对地观测的重要组成部分,从而也成为遥感学科的重要研究对象。由于受探测器辐射特性和随机因素影响,使得光学遥感卫星图像存在许多问题,诸如条带、灰度失真、拖尾等现象。国内外在评价辐射特性方面和辐射校正方面已展开了大量的研究工作,并且取得了许多成果^[1-3]。

以 Landsat 卫星和 Spot 卫星为例。Landsat 卫星的典型问题是双向扫描产生的灰度级偏移以及同一波段内探测器的不均匀性,表现为横向的条带,同时还有一些饱和和影响和随机、固定噪声等问题。Spot 卫星的典型问题是探测器不均匀,造成列间条带,另外也同样存在饱和和噪声。已出现了许多方法^[1]将影响它们成像仪辐射特性的各个因子详细地分了类,同时也产生了用于改善 Landsat 的横向条纹和 Spot 的纵向条纹的一些方法^[2,3]。这些文章针对卫星的具体实际问题,从产生问题的物理机制出发,开展了分门别类的分析研究,对每一种影响图像质量的因子和它们造成的问题进行了解剖和分析。但是,由于每个因子对图像质量的影响是各不相同的,它们对图像质量的整体影响是无法通过简单地相加就可以得到的。同时,那些文献中给出的辐射校正方法的效果也缺乏一个量的描述,他们往往只是给出了校正前后的两幅图,通过目视来评价校正结果。因此有必要找到一个综合评价图像质量的方法,包括本身的成像质量和校正后的图像质量。

¹ 2002-09-25 收到, 2003-07-03 改回

本文的目的就是为了寻找一种能够评价整个辐射性能和图像质量的指标, 并且能评价辐射校正方法有效性。通过分析成像过程中的辐射特性, 引进了一种三维噪声分析方法, 把成像过程中的问题归纳为对不同的噪声因子进行处理, 并且把图像处理的作用视为对三维噪声因子的改善。

2 原理及方法

目前光学遥感卫星探测器都采用最新的焦平面技术, 概括起来成像方式主要有两种。一种是双向扫描成像, 以 Landsat 卫星为代表; 另一种是 CCD 单向扫描成像, 如 Spot 卫星。

由于焦平面技术和卫星、景物的运动特性, 使得产生辐射偏差的原因多种多样, 因而分析和归纳这些偏差更加困难。本文在分析成像过程中的噪声和辐射偏移时, 提出了一种分析方法, 把这些影响都归纳成噪声。这些噪声的大小成为影响成像好坏的因子。

在两种成像方式中, 都不可避免地存在时间空间上的随机噪声, 这种噪声是由于光子噪声和散粒噪声等白噪声经过空间和时间采样产生的噪声, 是无法避免的噪声; 上下各行的扫描影响或采样影响产生的时间性的行偏移, 被称为时间性的行噪声, 在 Landsat 中, 由于双向行扫描, 使得扫描相关时间性噪声成为其噪声的重要部分, 在 Spot 中由于采样影响也会引入这种噪声, 但是不重要; 左右各列的采样影响产生了时间性的列噪声, 这部分噪声在图像的噪声中不占重要部分; 探测器焦平面上各个探测器的增益和偏置的不均性将引入图像的失真, 称这些失真为空间的行、列、双向噪声, 在 Spot 中, 由于各个探测器的不均匀和处理不均匀, 使得空间的列噪声成为其很重要的一部分噪声, Landsat 中, 同一波段中的各个探测器往往也存在较大的差异, 使得空间的行噪声也成为其不可忽视的一部分噪声; 成像过程中图像按照一帧一帧的方式被转移和处理, 各帧的处理偏差引入了帧间偏移, 称其为帧间噪声。这些噪声都成为静态噪声。

除此以外, 探测器的滞后响应、饱和和 RC 隔直电路、直流恢复电路也影响图像的辐射质量。可以发现, 这些影响往往与卫星的运动或景物的变化相关。这些偏差称为动态噪声。

通过以上对噪声来源的分析, 针对系统静态噪声, 归纳产生了以下的三维噪声分析方法。

表 1 三维噪声因子描述及噪声来源^[4]

噪声	噪声描述	噪声来源
σ_{tvh}	时间、空间上的随机噪声	基本的探测器时间噪声
σ_{tv}	时间性的行噪声	行处理, $1/f$ 噪声, 读出噪声
σ_{th}	时间性的列噪声	扫描影响 (扫描型)
σ_{vh}	空间随机噪声, 即双向固定图形噪声	像素处理, 不均匀性, $1/f$ 噪声
σ_v	固定行噪声, 指行-行间不均匀	探测器间不均匀
σ_h	固定列噪声, 指列-列间不均匀	扫描, 探测器间不均匀
σ_t	帧-帧间噪声	帧处理
σ	所有的噪声平方和的根	

如表 1, 三维噪声方法是把系统噪声按时间 (t)、空间水平 (v) 和空间垂直 (h) 的三维空间分为 8 个部分。测量时往往要输入均匀背景, 依照输出逐一计算得到各个噪声因子。

三维噪声独特的分类方法与卫星成像中影响成像质量的各个因子是基本一致的, 如 Landsat 横向条带与固定行噪声和时间性行噪声对应, Spot 的列向条带与固定列噪声和时间性列噪声对应。当卫星成像大幅的平静海洋时, 可以直接借鉴, 作为测量背景输入, 得到三维噪声因子; 当涉及卫星图像辐射校正时, 由于校正方法往往是去掉或削弱某一影响因子的作用, 就往往可以用三维噪声因子来评价校正方法的效果。这些噪声项有如下关系:

$$\sigma^2 = \sigma_t^2 + \sigma_v^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{vh}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{tv}^2 + \sigma_{tvh}^2 \quad (1)$$

测量三维噪声时, 为了使数据的统计结果尽量精确, 因为用有限采样来预测真实期望和方差的方法, 总存在一定的误差, 所以要求选取的帧数越多越好。但也需综合考虑存储数据的容量和处理速度。

假定有平静海洋的 L 帧, M 行, N 列图像, 忽略动态噪声。按照数理统计方法, L 帧 $M \times N$ 像元的图像可看作是 $L \times M \times N$ 个单元数据, 其输出总平均以 $\bar{g}_{tvh}$ 表示; 第 h 列固定, $L \times M$ 个单元的输出平均以 $\bar{g}_{tv}$ 表示; 第 v 行固定, $L \times N$ 个单元的输出平均以 $\bar{g}_{th}$ 表示; 第 t 帧固定, $M \times N$ 个单元的输出平均以 $\bar{g}_{vh}$ 表示; 第 h 列、 v 行固定, L 个单元的输出平均以 $\bar{g}_t$ 表示; 第 t 帧、 h 列固定, M 个单元的输出平均以 $\bar{g}_v$ 表示; 第 t 帧、 v 行固定, N 个单元的输出平均以 $\bar{g}_h$ 表示。总的输出总变差 D 可表示如下:

$$\begin{aligned} D &= \sum_t \sum_v \sum_h [g(t, v, h) - \bar{g}_{tvh}]^2 \\ &= \sum_t \sum_v \sum_h \{(\bar{g}_{vh} - \bar{g}_{tvh}) + (\bar{g}_{th} - \bar{g}_{tvh}) + (\bar{g}_{tv} - \bar{g}_{tvh}) \\ &\quad + (\bar{g}_t - \bar{g}_{th} - \bar{g}_{tv} + \bar{g}_{tvh}) + (\bar{g}_v - \bar{g}_{tv} - \bar{g}_{vh} + \bar{g}_{tvh}) + (\bar{g}_h - \bar{g}_{th} - \bar{g}_{vh} + \bar{g}_{tvh}) \\ &\quad + (g(t, v, h) - \bar{g}_t - \bar{g}_v - \bar{g}_h + \bar{g}_{th} + \bar{g}_{tv} + \bar{g}_{vh} - \bar{g}_{tvh})\}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

各小括号项的交叉乘积之和为零, 因而 D 可表示为 7 项变差之和:

$$D = D_t + D_v + D_h + D_{vh} + D_{th} + D_{tv} + D_{tvh} \quad (3)$$

各噪声项的计算如式 (4), 并由此可以得到式 (1)。

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{D}{L \times M \times N - 1}}, \quad \sigma_t = \sqrt{\frac{D_t}{L \times M \times N - 1}}, \quad \sigma_v = \sqrt{\frac{D_v}{L \times M \times N - 1}}, \\ \sigma_h &= \sqrt{\frac{D_h}{L \times M \times N - 1}}, \quad \sigma_{tv} = \sqrt{\frac{D_{tv}}{L \times M \times N - 1}}, \quad \sigma_{th} = \sqrt{\frac{D_{th}}{L \times M \times N - 1}}, \\ \sigma_{tvh} &= \sqrt{\frac{D_{tvh}}{L \times M \times N - 1}} \end{aligned} \quad (4)$$

由于纯时间性噪声 σ_t 相对于其它因子来说较小, 特别是扫描型的探测器, 而卫星成像都是扫描型, 因此可将三维简化为二维:

$$\sigma'^2 = \sigma_v'^2 + \sigma_h'^2 + \sigma_{vh}'^2 \quad (5)$$

其中 $\sigma_v'^2 = \sigma_v^2 + \sigma_{tv}^2$, $\sigma_h'^2 = \sigma_h^2 + \sigma_{th}^2$, $\sigma_{vh}'^2 = \sigma_{vh}^2 + \sigma_{tvh}^2$, 这些噪声项包含空间和时间噪声。

利用三维噪声因子可以比较不同时刻的同一景物图像的质量; 同理, 对于卫星原图和经过图像处理的图像之间, 也可以利用三维噪声因子来评价图像质量的改善。噪声因子的减小反映了图像质量的改善。

3 实验结果

为了验证三维噪声分析方法用于评价图像质量及评价其改善方法的可行性和适用范围, 采用了两幅 Spot 图像作为实验对象。

图 1 和图 2 是平静海洋的 Spot 卫星图像, 分辨率为 20m, 这时候原图上的条带和条块等都是由于探测器和成像过程引入的误差。图 1 中的图像经过直方图匹配算法, 得到图 2 中的图像。

对校正前的图像, 计算实际总方差 $\sigma_s = 4.1326408418081$, 其它分量 $\sigma_h' = 3.9998031757839$, $\sigma_v' = 0.4414701085820$, $\sigma_{vh}' = 0.94095644192526$, 利用 (5) 式得 $\sigma' = 4.1326408418081$, 和 σ_s 一样;

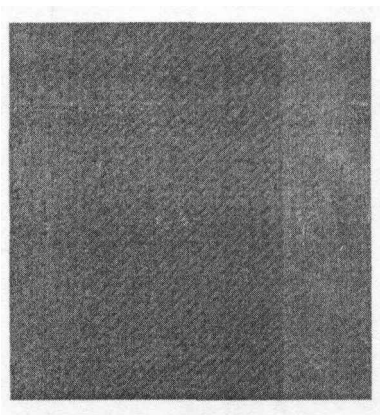


图1 原始 Spot 卫星图像

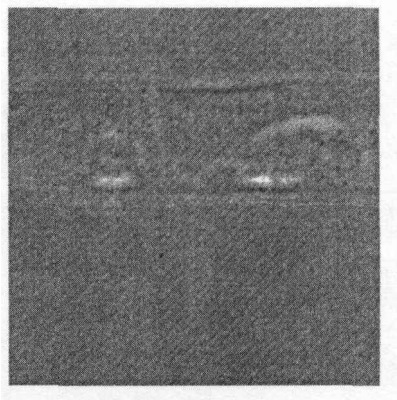


图2 辐射校正后的 Spot 卫星图像

对校正后的图像, 计算实际总方差 $\sigma_s = 2.7081777480520$, 其它分量 $\sigma'_h = 2.5007862428986$, $\sigma'_v = 0.4414701085820$, $\sigma'_{vh} = 0.94095644192526$, 利用式 (5) 得 $\sigma' = 2.7081777480520$, 和 σ_s 一样;

由于校正前图像存在列条纹, 因此 σ'_h 相对于其它因子偏大, 校正方法着重于去掉列条纹, 对列方向的噪声不作处理。通过校正, 列之间的条带减少。同时也可以看出 σ'_h 明显降低, σ'_v , σ'_{vh} 几乎不变, 总的方差降低。 σ'_h 降低, 说明固定列噪声, 即列 - 列间不均匀降低; σ'_v , σ'_{vh} 不变, 说明其它方向的噪声没有增加。因此, 三维噪声因子正确地反映了影响图像质量的各个来源, 利用它们可以有效评估卫星的图像质量, 得到各项因子的改善情况。

通过研究式 (1)~(4), 可以看出对于含景物细节的图像, 各项方差应该不但反映了图像噪声, 而且也反映了景物细节。景物细节越丰富, 方差也越大。

但是, 当噪声方差占较大比重时, 或者说噪声比较明显时, 对含景物细节的图像同样可以分析其三维或二维噪声。利用式 (6)^[5], 将图 3 的 Spot 卫星图像变换后得到图 4 的图像:

$$x' = \frac{\sigma_s}{\sigma_i}(x - m_i) + m_s \quad (6)$$

其中 x' 是校准的像素值, x 是实测的像素值。 m_i 为像素所在列的均值, m_s 为整幅图像的均值。 σ_i 为像素所在列的方差, σ_s 为整幅图像的方差。

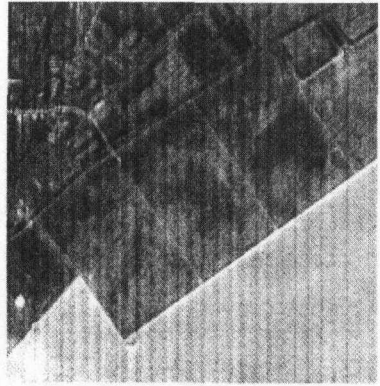


图3 原始 Spot 卫星图像



图4 辐射校正后的 Spot 卫星图像

对校正前的图像, 计算实际总方差 $\sigma_s = 62.6103103121489$, 其它分量 $\sigma'_h = 22.7955230611444$, $\sigma'_v = 49.3574469930700$, $\sigma'_{vh} = 31.0524960684069$, 利用式 (5) 得 $\sigma' = 62.61031031214677$, 和 σ_s 相近;

对校正后的图像, 计算实际总方差 $\sigma_s = 58.9617034609011$, 其它分量 $\sigma'_h = 4.3366292478382$, $\sigma'_v = 49.9630982811727$, $\sigma'_{vh} = 31.0058854400890$, 利用式 (5) 得 $\sigma' = 58.9617034609012$, 和 σ_s 相近;

同理, 通过去列条带校正, 列之间的条带减少。同时也看出 σ'_h 明显地降低, σ'_v , σ'_{vh} 几乎不变, 总的方差降低。因此, 在图像噪声并非远小于图像的景物细节变化时噪声项的降低说明了像质的改善。

对于 Landsat 卫星图像中存在的横条纹, 分析方法一样。

4 结论

通过实际图像的验证和分析, 说明了三维噪声分析方法是图像质量评估的一种可行的方法, 同时对图像质量改善方法也有一定的评价作用, 尤其是对那些完成特殊作用的方法, 如去条带。

但是, 由于丰富的景物细节或动态噪声影响三维噪声的各个因子, 所以通过三维噪声改进像质将受到一定的限制。对于前者, 由于三维噪声因子不明显, 但仍可应用于比较不同时刻同一景物图像的质量变化。对于后者, 建议先去掉动态噪声, 再进行三维噪声分析。同时, 也可以得到启发, 应用三维噪声方法可以从三维上评价景物的细节及成像的分辨率, 这有待以后进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Murphy J M, Ahern F J. Assessment of radiometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 thematic mapper data products from Canadian production systems[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51(9): 1359-1369.
- [2] Jeng-Jong Pan, Chein-I Chang. Destriping of Landsat MSS images by filtering techniques[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58(10): 1417-1423.
- [3] Banon G J F, Barrera J. Morphological filtering for stripping correction of Spot images[J]. *Photogrammetria(PRS)*, 1989, 43(3/4): 195-205.
- [4] D'Agostino J A, Webb C M. Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[J]. *SPIE Symposium on Aerospace Sensing*, 1991, 1488: 110-121.
- [5] Kiyoshi Tsuchiya. Experiments on resampling of locally unequally spaced RS data and relative radiometric correction of linear array sensor data[M]. *17th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, May 1983: 1437-1445.*

唐海蓉: 女, 1975 年生, 博士生, 从事遥感卫星图像的辐射校正、几何校正、融合和质量评估。
 向茂生: 男, 1964 年生, 研究员, 博士, 从事遥感卫星地面处理系统研究。
 吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 从事合成孔径雷达数据处理。
 朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 从事合成孔径雷达数据处理。
 金伟其: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 从事红外微光热成像技术。