

我国“海洋 1”号卫星(HY- 1) CCD 图像 数据定量化条带消除研究

孙 凌¹, 唐军武², 张 杰³

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;
3. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛
266061)

摘要: 条带(striping)对于大量的航天和航空传感器来说是一种普遍存在的现象,任何使用多个探测器进行数据获取的遥感器图像数据中均存在条带. 目前消除条带的算法主要是针对光机扫描仪,对于 CCD 相机工作做得比较少. 针对 HY- 1 CCD 线阵推扫式多光谱相机的特点,以及发射前辐射定标的结果,对遥感器图像数据中的条带问题进行了预研,提出了一种定量化的消条带算法. 该方法根据卫星数据特性求出各探测器间的均衡化曲线以反映探测器之间的差异,并据此来消除条带. 实验结果表明该方法能够有效解决 CCD 相机的条带问题,而且可以保持数据原有的物理意义,并可与在轨辐射校正衔接,保证发射前后定标算法的一致性.

关键词: CCD 相机; 条带消除算法

中国分类号: V474. 2⁺ 91; TN911. 73

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193(2002)

06- 0020- 14

1 引言

随着我国国民经济的发展,保护生态环境和进行可持续发展的重要方面是对水体(江、河、湖、海)的合理利用和有效管理,因此对水体信息定量遥感的要求日益迫切. HY- 1 卫星是我国即将发射的第一颗海洋卫星,该卫星将搭载两个有效载荷,其中之一就是 4 波段 CCD 相机或称为 CCD 成像仪. 该相机是线阵推扫式多光谱相机,在可见光、近红外设计了 4 个波段,主要用于海洋和海岸带方面的科学研究及应用(见表 1).

CCD 相机的观测几何图如图 1 所示. 该传感器各个通道有 2 048 个探测器,以垂直于卫星轨道的方向排列,在卫星飞行时进行推扫,其间每个探测器获取一列的数据. 对于不同的图像

表 1 HY-1 CCD 传感器特性

波段	HY-1 CCD			
	1	2	3	4
光谱范围/ μm	0.42~0.50	0.52~0.60	0.61~0.69	0.76~0.89
最大入射光谱辐亮度 $/\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$	132.4	234.5	145.0	133.5
S/N	617	578	463	471
应用对象	污染、植被、水色、 冰、水下地形	悬浮泥沙、污染、 植被、冰、滩涂	悬浮泥沙、土壤、 水汽总量	土壤、大气校正、 水汽总量
星下点空间分辨率/m	250			
扫描带宽/km	500			
每行像元数	2048			
偏振度(%)	≤ 5			

数据产品(1A, 1B)条带均可能存在. 由于 CCD 阵列各探测单元的响应并不一致, 因此在相同的辐亮度 L 下, 每一个探测单元的输出数码 DN 值稍有不同, 形成了 1A 层次上的条带. 为了降低传感器阵列的非均匀性, 可以在发射前定标期间对每一个探测单元进行绝对定标(将探测器的数码值 DN 转换成传感器接收到的辐射量), 期望在实际输入亮度相同的情况下各个探测单元能获得相同的辐亮度. 如果各个探测器的定标精度足够高, 能够实际反映卫星接收的辐射量, 那么 1B 层次上的条带也就不会产生, 但是定标所采用的积分球的光能等级有限, 另外也不太可能产生非常低的照明(特别在近红外), 因此探测单元的特性得不到很好的标定, 尤其在非线性较强的低信号区更是如此. 由于整个探测器阵列的定标情况并不完美, 因此在相同的入射辐亮度 L 下, 探测器输出的数码值 DN 经定标方程获得的 L 会稍有不同, 形成 1B 层次上的条带. 总的来说, 如果传感器扫过均匀的地面, 那么每个探测单元所输出的 DN 和 L 值是不同的, 会沿探测器阵列方向产生起伏, 形成沿扫描方向的纵向条带.

任何使用多个探测器进行数据获取的传感器图像数据中, 条带的出现是不可避免的, 这对于大量的航天和航空传感器来说是一种普遍存在的现象^[1]. HY-1 CCD 使用的是 12 位的 A/D 转换器, 信号较小的差异也能够表现出来, 因而在一些光谱响应非常均匀的地区, 如水体, 条带现象表现得尤其突出, 这不仅严重影响波谱特征增强及空间特征增强和提取的效果, 而且对进行大气校正进而定量反演水体光学特性也是十分不利的. 因此, 在对数据进行进一步应用之前, 必须消除这种影响, 另外由于目前的海洋遥感越来越趋于量化, 也必须保证数据的准确性, 这对于卫星数据后续应用的有效性至关重要.

归根结底, 条带的产生源于各个探测器响应的差异, 这包括探测器研制时的差异以及由于探测器光电和光学特性随时间的推移而产生的变化. 消条带主要是利用卫星图像数据所反映

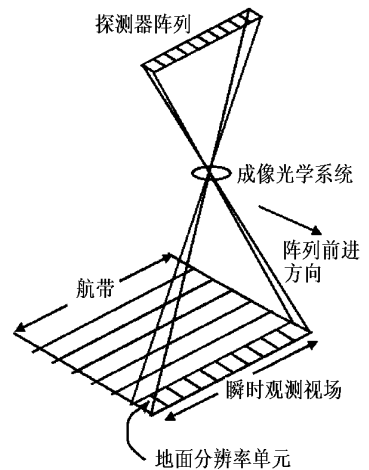


图 1 CCD 相机观测几何图

出的信息对每个探测器的输出值进行校正,修正各个探测器之间的差异。

目前基于卫星图像数据质量缺陷而进行的条带消除工作所使用的方法主要有内定标^[2]、相对定标^[3-4]、辐射均衡化^[5-8]、主成分分析和滤波^[9-13]等。这些消条带的方法几乎都是基于像 TM 这样的光机扫描仪图像数据中的横向条带进行的,而且都是为了满足陆上应用的目的。大部分方法均假设探测器的响应是线性的,而且其中一些方法虽然可以将图像数据中的条带消除,但并不能保证各像元的处理结果与实际探测物理量的正确对应关系。对于 CCD 线阵图像数据中的条带国外多采用内定标的方法(如 SPOT)^[13], Giovanni 等^[15]针对 MOS-1B (384 个探测器)的图像数据进行了基于均衡化曲线的校正, Wang 等^[14]对于 MOS-1B 的亮度数据采用一种较为简单的消条带方法。

与普通的图像处理不同,为了保证对卫星数据的后续量化研究,在消除条带的同时必须保证数据原有的物理意义,另外还需保证一定的精度,以免影响水体信息的反演。由于不同探测器单元的输入/输出响应不同而形成条带,因此对于条带最根本的消除是在 1A 数据上进行,通过对探测器的响应分别进行修正,使它们能够完全重合。要达到这个目的,就需要以其中的一个探测器单元为基准,估计其他探测器单元相对于基准单元的均衡化曲线来表征其与基准单元的差异。由于海洋的信号偏低,因此均衡化曲线应具有一些一般的特征:对于较小的输入辐亮度值,由于该区域探测器响应的非线性,曲线呈二次的形式;对于较大的输入辐亮度值,曲线基本呈线性(处于探测器响应的线性区)。

本文前面所提到的各种方法除了主成分分析和滤波方法外,其实都以某种方式试图反映和补偿各个探测器间响应的差异,但是多数方法都是建立在响应线性的假设基础上,这对于海洋来说是不能成立的,因此其效果也就不会太好。虽然直方图校正并没有基于线性响应的假设,但是仅仅根据数据的概率分布进行校正,对于定量的校正目的来说,其物理意义不明确,而且对于离散数据来说,统计的量化等级决定了其最小误差。

在前人工作的基础上^[8,13,15],笔者针对 HY-1A CCD 数据进行了基于均衡化曲线的定量条带消除算法的尝试,具体算法和实现于 2,3 部分中叙述。

2 基于均衡化曲线的条带消除算法

2.1 建立条带模式

为确定均衡化曲线,首先需建立条带模式。设定图像点坐标为 (x_j, y_i) ,其中 j 为探测器号, i 为行号。假定探测器输入辐亮度为 $I(x_j, y_i)$,输出数码值为 $DN(x_j, y_i)$,两者的关系可以表示为

$$DN(x_j, y_i) = f_j[I(x_j, y_i)], \quad (1)$$

式中, f_j 是一个线性或非线性的函数,依赖于输入亮度 I 和探测器号 j 。考虑两个不同的扫描列 j, k ,

$$DN(x_j, y_i) = f_j[I(x_j, y_i)], \quad DN(x_k, y_i) = f_k[I(x_k, y_i)], \quad (2)$$

式中, $j \neq k$; f_j 和 f_k 是未知的, f_j 和 f_k 是 I 的单调函数。如果 (x_j, y_i) 与 (x_k, y_i) 的亮度值相等,则应满足

$$DN(x_j, y_i) = f_j\left\{f_k^{-1}[DN(x_k, y_i)]\right\}, \quad (3)$$

式中, f_k^{-1} 为 f_k 的反函数,且 f 与行号无关,于是

$$DN_j = f_{jk}(DN_k), \quad (4)$$

其中 $f_{jk} = f_j[f_k^{-1}]$, 为从 k 到 j 的均衡化曲线.

均衡化的任务就是基于样本数据集的统计信息估计 f_{jk} , 但直接求出各个探测器的响应曲线难度比较大, 因此可根据各个探测器间响应的不同, 设法确定均衡化曲线, 即响应差异曲线. 实际应用时, 利用均衡化曲线求出并减去其与基准探测器的差值, 即可得到校正后的数据, 使得各探测单元的输入、输出响应与基准单元的一致. 若用 X_j 表示第 j 个探测器的原始值, 则均衡化后的值 X_j^{eq} 可用下式表示(以二次为例):

$$X_j^{eq} = X_j - e_j(X_j), \quad j = 1, \dots, N_c, \quad (5)$$

式中, $e_j(X) = a_jX^2 + b_jX + c_j$, 为第 j 个探测器的均衡化曲线.

要进行 HY-1 卫星 CCD 条带的消除, 就必须估计 2 047(除去基准探测单元) 个探测单元的均衡化曲线. 这种条带消除的方法实际上算是一种相对定标的工作.

像 TM, AVHRR 这样的光机扫描仪图像数据中的横向条带所引起的起伏随时间变化, 因此均衡化曲线的方法只适用于特定的处理图像. CCD 是一种推扫式的传感器, 其产生条带的机制与前两种不同, 其独特之处在于尽管条带随着信号水平的不同而变化, 但是这种特性并不随着时间变化, 因此均衡化曲线只需估计一次即可.

2.2 求均衡化曲线

我们假设所获得的图像是较为均匀的, 即图像信号的空间差异相对于图像的均值来讲很小. 每一行数据由 N_c 个探测器获取, 其中第 i 行的第 j 个探测器所记录的信号可表示为^[16]

$$DN_i[j] = S[j] + R[j; S_i[j]] + N_i[j], \quad i = 1, \dots, N_c, \quad (6)$$

式中, $S_i[j]$, 表示探测器输入端的辐射量对输出信号的贡献; $R[j; S_i[j]]$ 表示条带, 包含有暗电流的影响; $N_i[j]$ 表示热噪声, 我们认为对于实际探测器, 减去暗电流后该项对于不同的 j 是零均值、方差为 σ_N^2 白噪声.

从式(6)可以看出, 要从探测器输出值 $DN_i[j]$ 中估计条带 $R[j; S_i[j]]$, 必须把占绝大多数的 $S[j]$ 分离出来, 同时减少热噪声的影响, 因此取 N_r 个相邻行进行平均:

$$m_{DN}[j] = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} DN_i[j], \quad j = 1, \dots, N_c. \quad (7)$$

由式(6)和(7)可以得到

$$m_{DN}[j] = m_S[j] + R[j; m_S[j]] + n[j], \quad j = 1, \dots, N_c, \quad (8)$$

式中, $m_S[j] = (1/N_r) \sum_{i=1}^{N_r} S_i[j]$, $n[j] = (1/N_r) \sum_{i=1}^{N_r} N_i[j]$ (其方差 $\sigma_n^2 = \sigma_N^2/N_r$),

$$R[j; m_S[j]] = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} R[j; S_i[j]]. \quad (9)$$

式(9)的假设对于准均匀区域是合理的, 因为该区域内每个探测器所接收到的信号变化很小, 同时每个探测器的响应曲线也比较平缓, 故可忽略, 这样去条带的问题就变成了从式(8)中估计 $R[j; m_S[j]]$. 为简单起见, 假设区域是完全均匀的, 即

$$m_S[j] = m_0, \quad j = 1, \dots, N_c. \quad (10)$$

考虑

$$\delta_{DN}[j] \mid m_{DN}[j] - m_{DN}[j-1], \quad j = 2, \dots, N_c, \quad (11)$$

由式(8)、(10)、(11)即得

$$\delta_{DN}[j] = \mathcal{R}[j; m_0] + \delta_n[j], \quad j = 2, \dots, N_c, \quad (12)$$

式中,

$$\mathcal{R}[j; m_0] \mid R[j; m_0] - R[j-1; m_0], \quad (13)$$

$$\delta_n[j] \mid n[j] - n[j-1], \quad (14)$$

其中 $\delta_n[j]$ 的方差 $\sigma^2 = 2\sigma_n^2$. 根据式(12)和(13), 可用下式进行条带项的估计:

$$\left. \begin{aligned} R[j; m_0] &= R[j-1; m_0] + \delta_{DN}[j], \quad j = 2, \dots, N_c \\ R[1; m_0] &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

式中, $R[j; m_0]$ 为把第一个探测器作为参考时第 j 个探测器相对于 m_0 的均衡化曲线. 式(15)是在 $m_S[j] = m_0$ 的假设下得到的, 但对于实际的图像来说, $m_S[j]$ 是随着 j 而变化的, 因此更为一般的情况是

$$\delta_{DN}[j] = \delta_S[j] + \mathcal{R}[j; m_S[j]] + \delta_n[j], \quad j = 2, \dots, N_c, \quad (16)$$

式中,

$$\delta_S[j] \mid m_S[j] - m_S[j-1], \quad j = 2, \dots, N_c, \quad (17)$$

$$\mathcal{R}[j; m_S[j]] \mid R[j; m_S[j]] - R[j-1; m_S[j-1]]. \quad (18)$$

式(17)表征了区域的不均匀性. 基于准均匀目标的假设, 加上 N_r 行平均的平滑效应, 可以认为 $m_S[j]$ 是 j 的缓变函数, 可以用多项式描述. $\delta_S[j]$ 也具有这种趋势, 我们用 $\text{detrnd}(x, N)$ 表示 x 序列去除最佳 N 阶多项式拟合的操作, 并将此操作应用于式(16), 得

$$\Delta_{DN}[j] \mid \text{detrnd}(\delta_{DN}[j], N) = \mathcal{R}[j; m_S[j]] + \delta_n[j], \quad j = 2, \dots, N_c, \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} R[j; m_S[j]] &= R[j-1; m_S[j-1]] + \Delta_{DN}[j], \quad j = 2, \dots, N_c \\ R[1; m_S[1]] &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

为了对第 j 个探测器的信号进行均衡化, 需要针对 $m_S[j]$ 的每个值估计 $R[j; m_S[j]]$, 这样才能得出第 j 个探测器的均衡化曲线. 假定我们已经得到了准均匀目标的样本数据集, N_D 表示数据集中不同灰度的图像区域的数目, $R_k[j; m_k[j]]$ 表示由第 k 个图像估计出的均衡化曲线值, $m_k[j]$ 表示第 k 个图像中的第 j 个探测器所测得的信号的均值.

若用 X_j 表示第 j 个探测器的输出值, $e_j(X)$ 为第 j 个探测器的均衡化曲线, 则均衡化后的值 X_j^{eq} 可用下式表示:

$$X_j^{\text{eq}} = X_j - e_j(X_j), \quad j = 1, \dots, N_c, \quad (21)$$

$$e_j(X) = a_j X^2 + b_j X + c_j, \quad j = 1, \dots, N_c, \quad (22)$$

式中, $[a_j, b_j, c_j] = \arg \left\{ \min_{[a_j, b_j, c_j]} \sum_{k=1}^{N_D} [R_k[j; m_k[j]] - e_j(m_k[j])]^2 \right\}, j = 1, \dots, N_c$, 它们是利用 $R_k[j; m_k[j]]$ 和 $m_k[j]$ 进行最小二乘拟合估计得到的系数.

以上的推导结果均是以第一个探测器为基准而得出的, 实际上选择其他探测器为基准也是一样的.

3 试验结果

3.1 针对 HY-1 CCD 的测量数据进行条带消除

为了验证该方法的有效性, 我们将其应用到 HY-1 CCD 的实验室测量数据. HY-1 CCD 4 个波段的测量数据如图 2 所示, 该图反映出在相同辐照度下波段内各探测器的输出差异是很大的, 其中既包含观测视场角的影响, 也包含探测器响应差异的影响. 在进行了场区校正、去除了观测视场角的影响之后, 剩下的差异即是各探测器的不同响应率所造成的, 如图 3 所示(仅以波段 1 的一个亮度等级示意). 我们利用第 2 部分所叙述的方法, 以第 1 024 个探测器为基准, 对探测器间的差异进行了校正, 结果如图 4 所示. 可以看出校正的效果是很明显的, 如果再配合以第 1 024 探测器的定标系数, 那么在 1B 图像数据产品中的条带就会很少了.

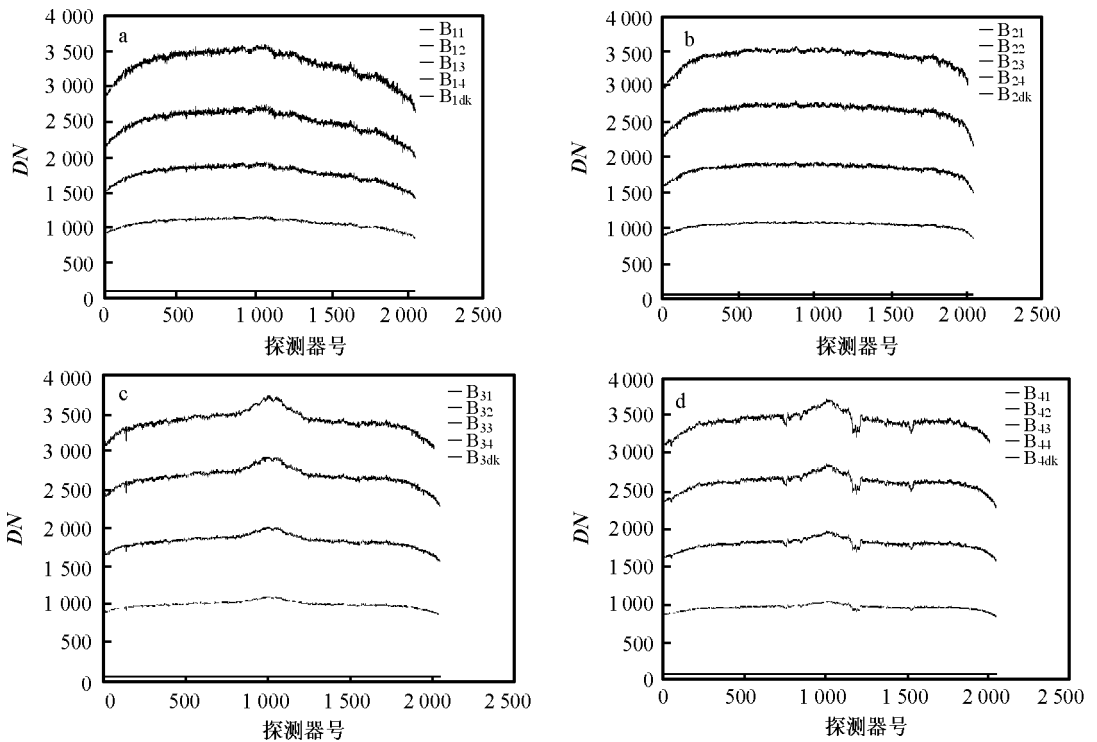


图 2 HY-1 CCD 在不同入射辐亮度下 4 个波段的响应

- a. 为波段 1 的测量数据, B_{11} , B_{12} , B_{13} , B_{14} 所对应的辐亮度分别为 $12.373\ 440$, $8.949\ 440$, $6.208\ 310$, $3.669\ 440\ \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$, B_{1dk} 为暗电流的测量值; b. 为波段 2 的测量数据, B_{21} , B_{22} , B_{23} , B_{24} 所对应的辐亮度分别为 $26.091\ 810$, $21.220\ 250$, $15.026\ 690$, $9.071\ 750\ \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$, B_{2dk} 为暗电流的测量值; c. 为波段 3 的测量数据, B_{31} , B_{32} , B_{33} , B_{34} 所对应的辐亮度分别为 $15.223\ 190$, $11.806\ 250$, $8.047\ 130$, $4.295\ 960\ \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$, B_{3dk} 为暗电流的测量值; d. 为波段 4 的测量数据, B_{41} , B_{42} , B_{43} , B_{44} 所对应的辐亮度分别为 $13.400\ 580$, $10.084\ 420$, $6.881\ 730$, $3.549\ 190\ \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$, B_{4dk} 为暗电流的测量值

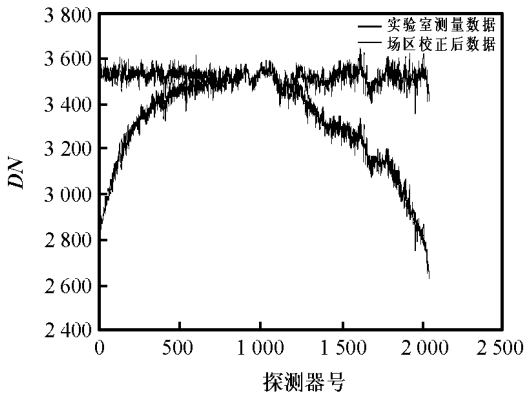


图3 对B11进行场区校正后的结果

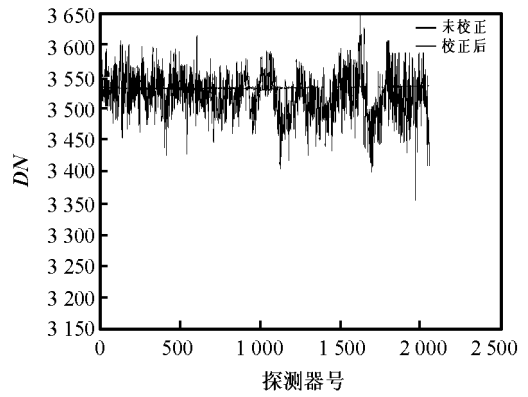


图4 对B11进行探测器响应差异的校正结果

3.2 利用模拟数据进行条带消除

在卫星发射前我们可以从实验室的测量数据得知各个探测器的响应差异,并根据上述方法进行校正,如3.1所述,但是卫星入轨后探测器的响应一般会发生变化,其内部的暗电流也会发生偏移,如果此时仍然利用发射前获取的探测器条带模式和定标系数进行数据处理,势必会产生偏差。因此,卫星在轨期间,为了保证数据的准确性我们必须再进行定标,同时也必须重新获取探测器的条带模式。由于不能像发射前一样利用标准光源进行探测器响应的测试,因此条带模式的获取主要是利用实际探测器的输出数据。

我们利用24景SeaWiFS L1B数据进行了CCD数据的模拟,人为增加了随机二次条带,用以验证算法的有效性,实验结果同样会适用于1A数码值。

3.2.1 均匀样本数据的选择

根据2中所述算法,首先要积累均匀样本数据。由于HY-1 CCD有2048个探测器,覆

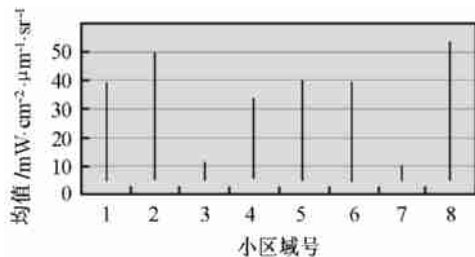


图5 样本数据范围

盖范围很大,选择同时覆盖2048像元的均匀区是不可能的,因此我们将其分成8个区域,针对各个区域分别进行均匀区的选择。对均匀区行数的确定应该根据实际探测器的噪声水平,如要尽可能降低噪声,则该值应该较大,但是如要保证区域的均匀性,则该值应该较小,折衷考虑两个因素我们选择均匀区的行数为100。从1波段8个小区域获取的均匀样本数据的均值范围如图5所示,各个区域均匀样本数据的实际均值分布如图6所示。

3.2.2 算法实现

针对每个小区域选择该区域的一个基准探测器,并利用2节中所述的方法对该区域进行处理,得到该区域内各探测器的均衡化系数,再用类似的方法得到各个区域基准探测器相对于第1024探测器的均衡化系数,这样每个探测器经过本区域内的校正和区域间的校正就可以完成整个的校正工作,将各探测器校正到1024探测器的水平上。处理流程如图7所示。

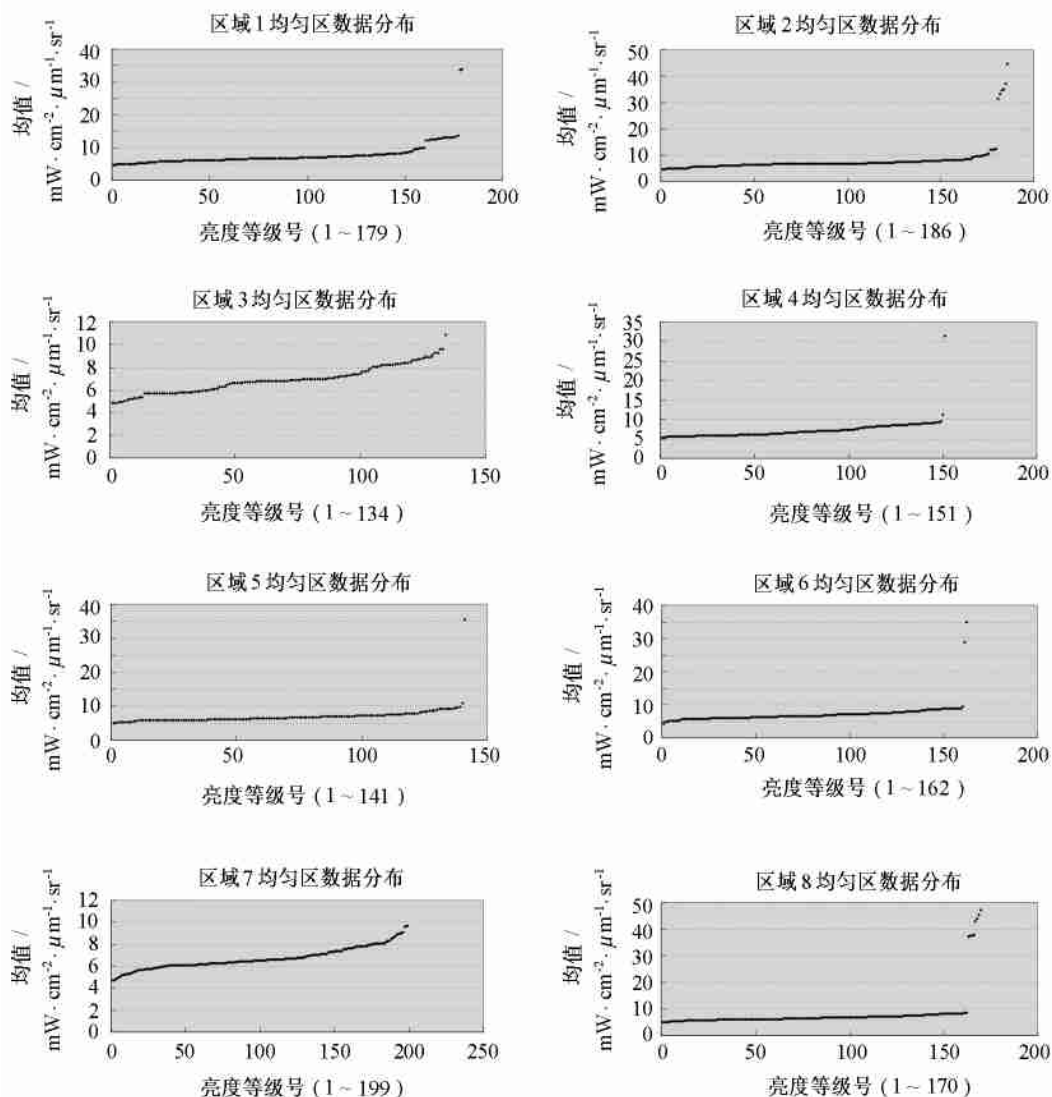


图6 各小区域数据分布

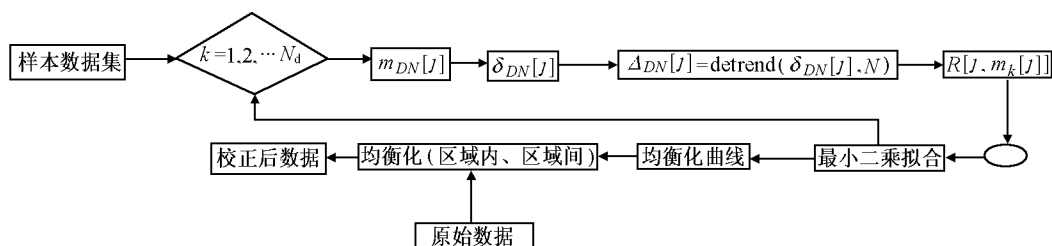


图7 处理流程图

3.2.3 结果分析

图 8 为最终获得的 4 个探测器的均衡化曲线, 图中的点代表由每个样本数据得到的估计值, 实线代表估计出的均衡化曲线, 该曲线是根据式(21)、(22)对各个估计值进行二次拟合后所得的结果。

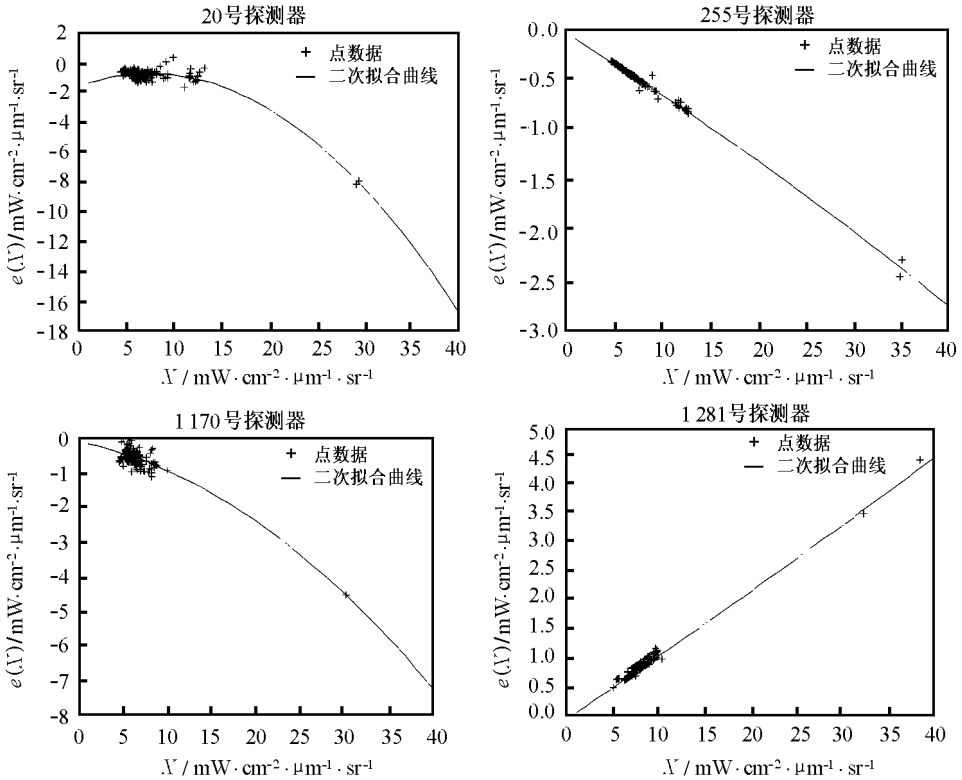


图 8 4 个探测器的均衡化曲线

我们选了 6 幅校正前、后的图像作为处理效果的示意图, 每幅图像的尺寸为 4 000 行, 2 048 列。图 9 为增加条带前的数据图像, 图 10 为校正前带有条带的原始数据图像, 图 11 为校正后的结果图像, 图 12 为经过增强的条带图像(校正前、后的差值图像)。通过图 9, 10 和 11 的比较, 可以明显看出校正过的数据图像中条带已经没有了, 且图像的纹理几乎没有什么变化。图 11d 的左下侧偏暗, 这是由于该区的亮度比较高, 校正不够; 图 11e 的右下侧有一条黑色区域, 这是由于该区的亮度比较高, 校正值过大, 产生了失真。这种现象产生的原因在于选择均匀区数据时数据集多集中在低端, 高端数据相对来说太少, 因此得出的均衡化曲线有偏差。

从数值上我们可以更容易看出校正的效果。图 13 为数据图像 a, b 的列均值统计结果, 从图可以看出校正后数据基本可以达到无条带时的水平。图 14 为数据图像 a, b 的相邻探测器差异的统计结果, 由于消除了条带, 相邻探测器的差异主要由观测景观决定, 而相邻探测器所观测的景观几乎相同, 因此相邻探测器的差异会很小。

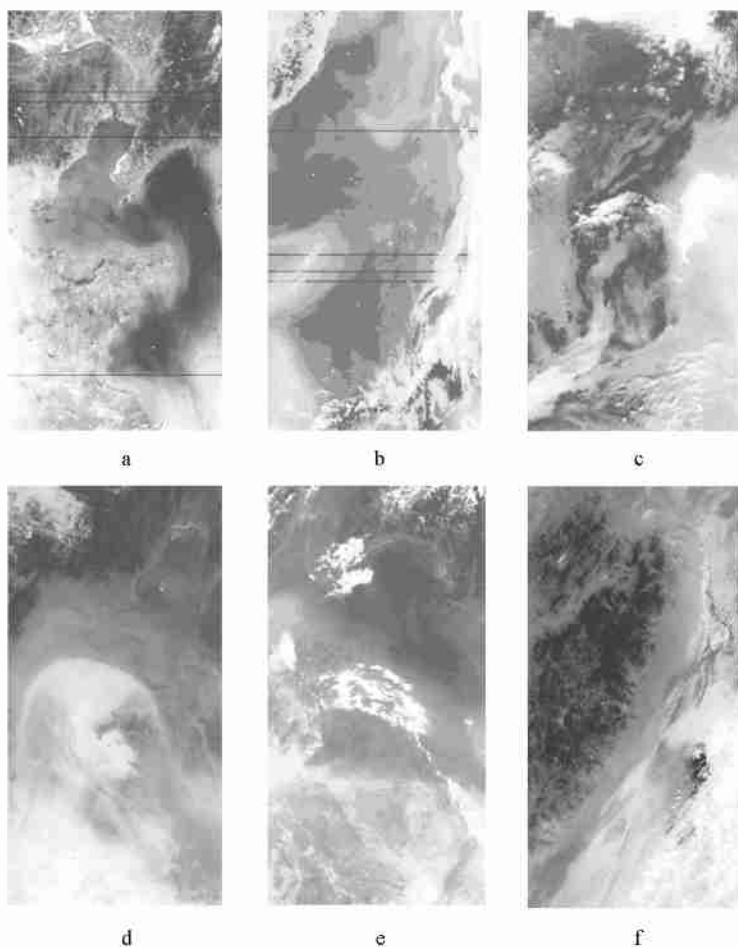


图9 6幅无条带图像(增强后结果)

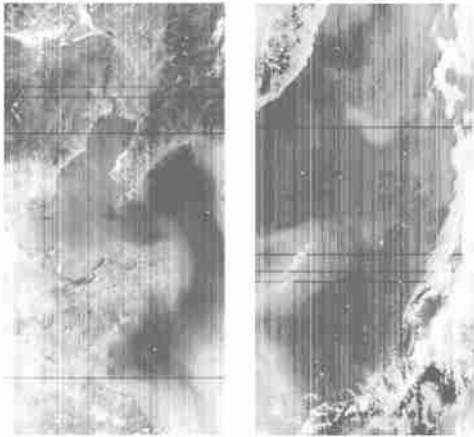
4 结论

使用该方法估计均衡化曲线的很重要一点就是样本数据集中的 X 值应该覆盖整个传感器的动态范围;样本数据要尽可能的均匀.因此,实际应用时需要累积不同均匀性地物的图像数据,工作量较大.另外,由于CCD线阵的探测器数目太多,有2048个,必须分成几个小区域分别做,因此区域间的校正也很关键,以免各个区域的边界较为明显.

经过实验,我们认为该方法对于CCD数据的条带消除是很有效的,不仅提高了图像数据的视觉效果,而且能够保证数据的有效性,以便数据的进一步应用.

对于卫星数据的预处理来说,只要根据传感器的实际工作情况定期更新均衡化曲线,则CCD数据的条带就可以很好地被消除,并可与在轨定标很好地结合,保证发射前与发射后定标处理方法的一致性.

本研究得到国家卫星海洋应用中心HY-1卫星工程的支持,在此表示感谢.



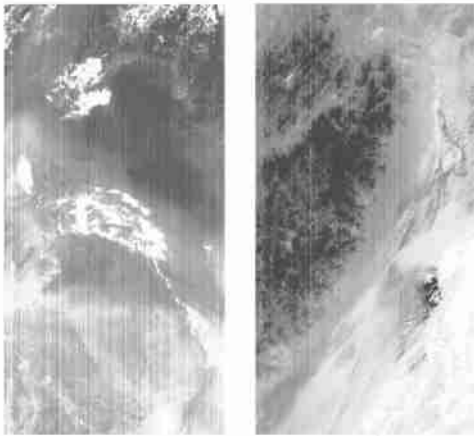
a

b



c

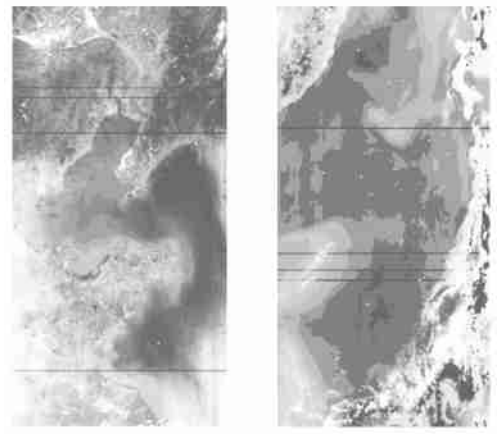
d



e

f

图 10 6 幅未经校正的图像(增强后的结果)



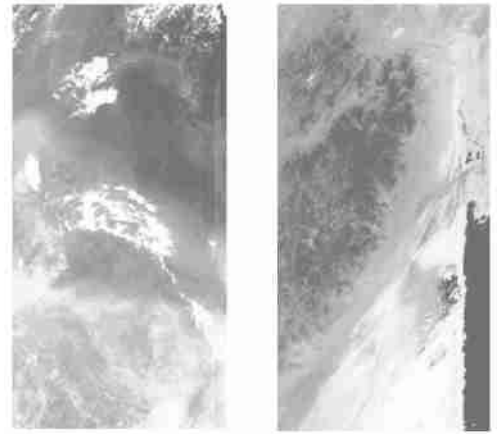
a

b



c

d



e

f

图 11 6 幅校正后的图像(增强后的结果)

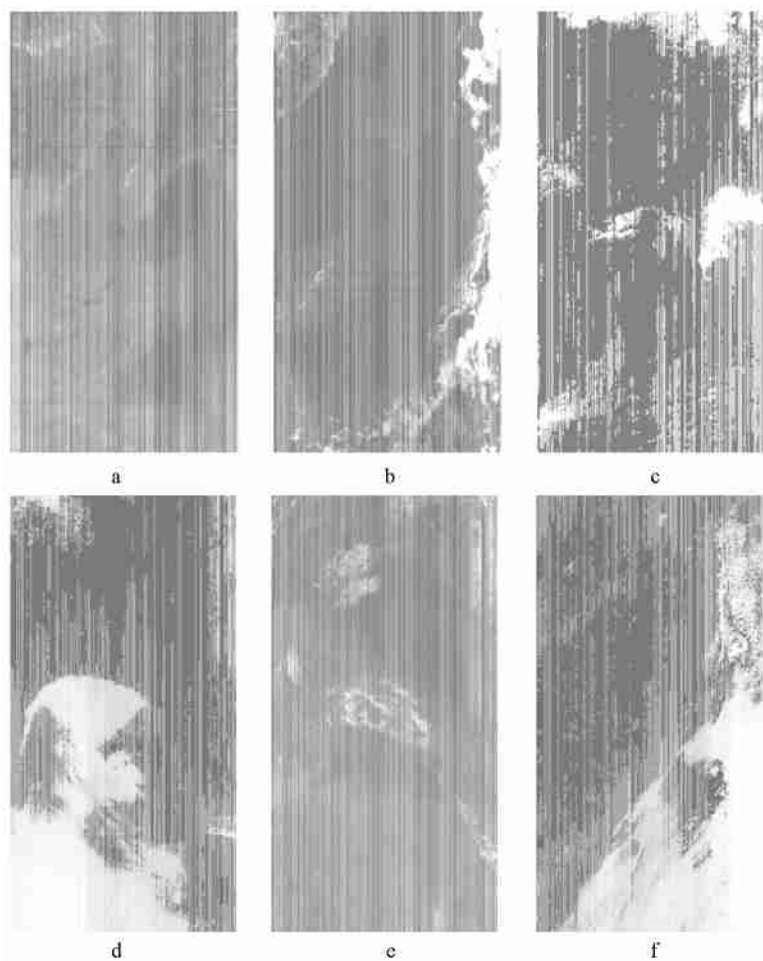


图 12 6幅条带图像(增强后的结果)

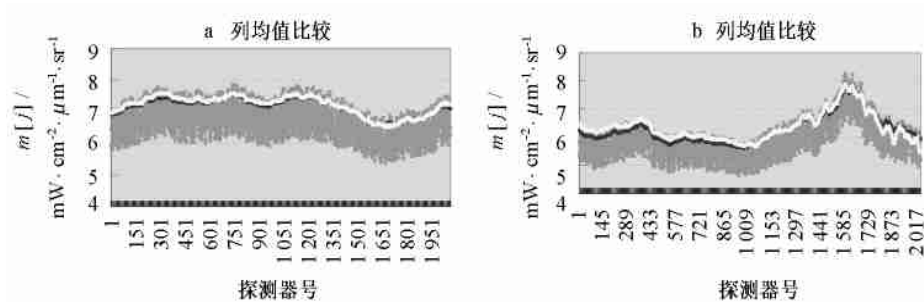


图 13 列均值的比较结果

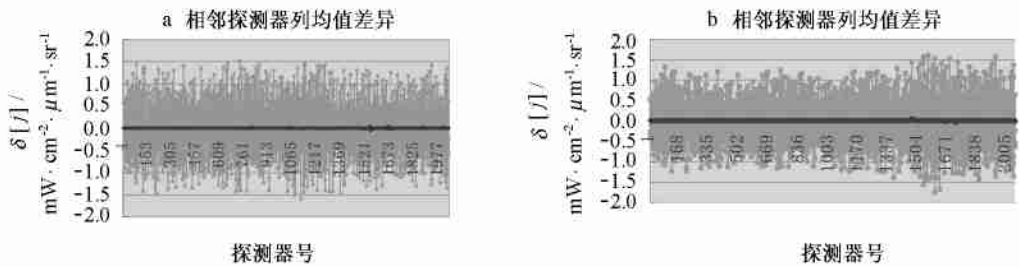


图 14 相邻探测器信号差异比较结果

参考文献:

- [1] 莫伊克 J G. 遥感图象的数字处理[M]. 徐建平等译. 北京: 气象出版社, 1987. 88—111.
- [2] FISCHER D. Validation of the thematic mapper radiometric and geometric correction algorithms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1984, GE- 22(3): 237—242.
- [3] CNES. SPOT Image[A]. SPOT User's Handbook(Reference Manual)[M], Volume 1. Centre National d' Etudes Spatiales and SPOT Image Corporation, Toulouse, France and Reston, 1989.
- [4] DESACHY J, BEGNI G, BOISSIN B, et al. Investigation of Landsat- 4 thematic mapper line to line and band to band registration and relative detector calibration[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1985, 51(9): 1 291—1 298.
- [5] POROS D J, PETERSON C J. Methods for destriping Landsat thematic mapper images—a feasibility study for an online destriping process in the thematic mapper image processing system(TIPS)[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1985, 51(9): 1 371—1 378.
- [6] 丰茂森. 遥感图像数字处理[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 49—55.
- [7] 骆剑承, 刘庆生, 刘高焕, 等. 资源一号卫星影像预处理方法研究[J]. 地球信息科学, 2000, 2: 47—51.
- [8] HORN B K P, WOODHAM R J. Destriping LANDSAT MSS images by histogram modification[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 10: 69—83.
- [9] SRINIVASAN R, CANNON M, WHITE J. Landsat data destriping using power spectral filtering[J]. Optical Engineering, 1988, 27(11): 939—943.
- [10] PAN J J, CHANG G-I. Destriping of Landsat MSS images by filtering techniques[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(10): 1 417—1 423.
- [11] ZHANG M, CARDER K, MULLER-KARGER F E, et al. Noise reduction and atmospheric correction for coastal applications of Landsat thematic mapper imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70: 167—180.
- [12] CRIPPEN R E. A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan line noise from Landsat TM P-tape imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1989, 55: 327—331.
- [13] ALGAZI V R, FORD G E. Radiometric equalization of nonperiodic striping in satellite data[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 16: 287—295.
- [14] WANG M, FRANZ B A. Comparing the ocean color measurements between MOS and SeaWiFS: a vicarious intercalibration approach for MOS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 184—197.
- [15] GIOVANI Corsini, MARCO Diani, THOMAS Walzel. Striping removal in MOS-B data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000, 38(3): 1 439—1 445.
- [16] PRICE J C. Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22(3): 3—9.
- [17] SCHOTT J R, SALVAGGIO C, VOLCHOK W J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 26: 1—16.

A study of quantitative striping removal algorithm for HY-1 CCD data

SUN Ling¹, TANG Jun-wu², ZHANG Jie³

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *State Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China*; 3. *Key Laboratory of Marine Sciences and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Striping is a common phenomenon in remote sensing data, but relatively little work has been done in the realm of CCD. According to the characteristics of HY-1 CCD push-broom multispectral camera and the result of pre-launch radiometric calibration, striping arising from the nonuniformity of the detectors is removed using a quantitative method by estimating equalization curves. This method can preserve the physical meaning of the raw data, and can work together with “in-orbit” calibration without much modification.

Key words: CCD; striping removal