

文章编号: 1007-4619(2007)06-0860-08

# HY-1A 卫星 COCTS 数据条带消除的 两种定量化方法比较

牛生丽, 唐军武, 蒋兴伟, 郭茂华, 宋庆君  
(国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

**摘 要:** HY-1A 卫星是中国第一颗海洋遥感卫星, 水色水温扫描仪 (COCTS) 是其主要探测器。由于各探测单元的信号响应特性不同, 导致 COCTS 数据含有大量条带噪声。这严重影响了图像的质量和可视性, 对资料的定量化应用也是十分不利的。为了解决这个问题, 本研究采用矩匹配及直方图匹配法, 对 COCTS 数据进行条带消除。结果表明, 两种方法都是有效的, 能够在消除条带的同时保持数据原有的物理意义, 并避免细节特征的丢失。但是从整体效果看, 直方图匹配法更好一些。本研究的结果同样适用于其他以并扫方式获取数据的遥感器的条带消除。

**关键词:** 探测器响应差异; 条带消除; 矩匹配; 直方图匹配

**中图分类号:** TP751.1      **文献标识码:** A

## The Comparison of Two Quantitative Striping Removal Algorithms for HY-1A COCTS Data

NIU Sheng-li TANG Jun-wu JIANG Xing-wei GUO Mao-hua SONG Qing-jun  
(National Satellite Ocean Application Service Beijing 100081, China)

**Abstract:** The HY-1 satellite is the first satellite for remote sensing of ocean environment in China and COCTS is one of the main sensor. Striping noise is unavoidable for most data of the COCTS because each detector's response to radiant signal is different. The striping noise can seriously affects the quality of image and quantitative application of COCTS data. In order to decrease this effect we try to remove these stripes in COCTS images using moment matching correction and histogram matching correction in this paper. The final results indicate these two methods are both effective but considering the overall effect the histogram matching correction is better. The result of this study is also applicable in striping removal of other multisensor's remote sensing data.

**Key words:** the response difference of detectors; striping removal; moment matching; histogram matching

### 1 引 言

于 2002 年 5 月 15 日发射的 HY-1A 卫星是中国的第一颗海洋遥感卫星, 其有效载荷为十波段水色水温扫描仪 (COCTS) 和四波段海岸带成像仪 (CZI)。COCTS 的量化等级为 10-bit 在可见光到红外光谱内共有 10 个波段, 探测获取有关水色及水温等方面的信息。后续发射的 HY-1B 卫星, 除波段的增益和中心波长位置有所变化外, 其基本特性参数、

扫描机制基本与 HY-1A 卫星相似。

为满足对遥感仪器在光谱分辨率、空间分辨率及信噪比等方面越来越高的需求, 目前卫星平台上的大多数遥感器都采用多个探测器并列扫描的方式, 即多元并扫对地观测来获取数据。HY-1 系列卫星 COCTS 传感器采用了 4 元并扫的方式。由于各个探测器对接收到的地物辐射信号的响应不同, 其获得的图像存在沿探测器阵列方向的条带。在光谱响应比较均匀的地面目标, 如水体、雪、沙漠等目标上, 条带现象尤为严重, 这不仅严重地影响了遥感图

像的质量和可视性,而且给遥感器的在轨外定标和资料的定量化处理造成了很大困难,导致大气校正、水体光学特性的反演存在较大的误差。因此在对数据进行定量化分析应用之前,必须消除这种影响。

国内外许多学者针对条带噪声的消除,进行了研究和探讨,目前用于以并扫方式获取数据的遥感器,如 TM、MSS、MODIS、CMODIS 等的几种主要方法是直方图匹配法<sup>[1-3]</sup>,矩匹配法<sup>[4-5]</sup>,空间一频率域的滤波方法<sup>[6-10]</sup>等,并且针对不同的遥感器及地物目标特征,对上述主要的条带去除方法进行了改进<sup>[11-13]</sup>;对于以推扫方式获取数据的遥感器如 MOS-B 和 HY-1A CZI(一种 CCD 推扫相机)等,常用的方法有基于均衡化曲线的补偿消除法<sup>[14-15]</sup>,Wang 等人提出的多项式拟合方法等<sup>[16-17]</sup>。

基于空间一频率域的滤波消除条带方法,是将条带看成为一种周期性的噪声,其周期相当于探测器的数目,由此确定条带所出现的频率,设计一滤波器进行滤波。滤波有空域和频域两种,前者需要设计一个合适的空间滤波器,并直接与图像在空间域进行卷积,但是这会造成图像模糊、边缘对比度下降等;后者需要先对图像进行傅立叶变换,并在频域上找到与条带相联系的尖峰,舍弃该频率并做反变换。该方法存在的一个很大问题是,很容易将处于条带频率的非条带有用信息去除掉,即对非条带噪声区域产生了负面作用。因此,滤波方法不宜应用于定量化遥感数据处理中。

直方图和矩匹配方法针对图像本身的灰度值特征进行归一化和匹配。从理论上讲,不同探测器对同一目标区域进行观测时,其得到的辐射值应该是相同的,而实际上由于每个探测器的性能不同,其测量得到的数值会有一定的偏差,这一偏差在图像上则表现为条带。当遥感器观测大范围下垫面时,每个探测器观测不同地物的机会几乎是相同的。因此,可以假定每个探测器接收到的不同地物辐射的几率是相等的,当知道某一探测器观测值的分布时,其他探测器的输出,可以根据参考探测器输出值的统计特性来修正,以便与参考探测器相一致。在实际应用中,通常每个通道选择一个确定的探测器作为参考,其他探测器以此为标准进行调整,从而实现图像条带的消除。该探测器一般选实验室定标时的参考探测器。

由于海洋遥感定量化的要求很高,为保证卫星数据后续应用的有效性,在消除条带的同时必须保证数据的准确性及原有的物理意义。同时由于 HY-1 系列卫星地面应用系统业务化运行的需要,必

须找出一种可以对整轨大幅数据进行自动化高效运行的条带消除方法。本研究尝试运用基于图像灰度值统计特征的矩匹配和直方图匹配法,对 COCTS 数据消除条带方法进行研究。

## 2 方法简介

### 2.1 矩匹配法

矩匹配法是一种基于均值(一阶矩)和标准差(二阶矩)统计的条带消除方法,即利用图像数据本身,对各个探测器输出值的均值和标准差进行调整,使各探测器的输出值在统计上与参考探测器的输出相一致。

首先,假设探测器的响应是线性的,则探测器的输出  $y$  可写成输入辐射量  $x$  的函数:

$$y = f(x) = ax + b \tag{1}$$

每个探测器都有其固定的增益  $a$  和偏置  $b$ 。如果这些量都已知,那么可以通过下式计算出入射辐射量:

$$x = g(y) = (y - b) / a \tag{2}$$

经验表明,条带的产生主要是由于不同探测器的响应增益及偏移值存在差异,消条带的目的就是将各探测器的响应纠正到同一水平,使得整幅图像数据看起来像是用同一个探测器获取的一样。基于这种思想,只要确定出各个探测器的增益  $a$  和偏置  $b$  即可。

对于多元并扫传感器来说,由于每个波段都有  $n$  个探测器以垂直于轨道的方向并排扫描,所以每个探测器记录一幅分图像,交叉起来构成完整的扫描图像。假定相邻扫描行的地物具有相似性,则对于足够大的图像,每个分图像的辐射量具有相同的概率分布,即各个分图像的真实辐射的均值和标准差是相同的。通过将各个探测器输出值的均值和标准差,与参考探测器的均值和标准差建立关系,即可估算出正确的增益和偏置。首先根据一定的准则确定出参考探测器,如均值及方差最接近所有探测器平均值的那个探测器,校正其他各探测器的输出,使单个探测器记录的分图像的均值和标准差与参考图像的均值和标准差相一致。

具体的,假定  $m$  和  $\sigma$  分别是标准参考探测器的均值和标准差,则其他各探测器输出值的均值  $m'$  和标准差  $\sigma'$  应该是:

$$m' = am + b \tag{3}$$

$$\sigma' = a\sigma \tag{4}$$

则可以得到:

$$a = \sigma' / \sigma \tag{5}$$

$$b = m' - m\sigma' / \sigma \tag{6}$$

用  $x_{ij}$  表示第  $i$  个探测器、第  $j$  个像元的输出值,  $y_{ij}$  为相应的条带消除后的值, 根据式 (2), (5) 和 (6), 即可得到校正式:

$$y_{ij} = m + (x_{ij} - m')\sigma'/\sigma \tag{7}$$

由于一轨数据基本上涵盖了从低端到高端的整个动态范围内的数码值, 除正常的景观辐射值外, 还有一些超过探测器可能输出范围的值, 这些值将会使计算得到的均值及标准差出现偏差。因此需要在具体的数据处理过程中指定阈值, 去除范围之外的数码值, 并且剔除异常值。

2.2 直方图匹配法

直方图匹配法就是使单个探测器分图像的累积直方图与参考探测器图像的累积直方图相匹配。该方法试图利用探测器输出值的统计信息直接获取各个探测器的响应差异。已知参考探测器观测值的累积分布, 其他探测器的输出, 就可以根据其输出值的统计特性来调整, 使其累积分布与参考探测器的一致。

该算法的流程为:

(1) 统计每个探测器观测值的累积概率分布, 即分别计算作为参考探测器  $r$  和探测器  $i$  的累积直方图。  $m$  和  $n$  分别表示图像的行数和列数,  $num$  为探测器的个数,  $P_r(x)$  表示参考探测器  $r$  所有  $N(=m \times n/num)$  个输出值中小于等于  $x$  的像素个数占全部像素数的比率,  $P_i(x')$  表示探测器  $i$  所有  $N$  个输出值中小于等于  $x'$  的像素个数占全部像素数的比率;

(2) 通过  $P_r(x)$  和  $P_i(x')$  建立  $x \rightarrow x'$  的查找表。对于相同的  $P$  值, 有其相对应的  $x$  及  $x'$ , 这个差值即为条带消除的校正量;

(3) 将探测器  $i$  的输出值  $x'$ , 利用查找表找出该值对应的  $P$ , 再由  $P$  值查找出参考探测器  $r$  对应的输出  $x$  该过程如图 1 所示。

图 1 是利用探测器输出值的累积分布函数生成查找表的示意图, 其横坐标表示探测器的输出值, 纵坐标表示对应的每个输出值的累积概率分布值。图中各探测器的分布函数是连续的, 而实际上探测器输出为整型,  $P(x)$  是离散的。由于这个原因, 探测器  $i$  输出值中小于等于  $x'_1$  的个数和  $P_i(x'_1)$  有可能找不到与之完全相等的  $P$ , 而是正好处在两个相邻的离散值  $P_r(x_1)$  和  $P_r(x_2)$  之间, 因此对于  $x'_1$ , 有两个相对应的校正值  $x_1$  及  $x_2$ , 如图 2 所示, 这就需要一定的查找规则, 以便确定出对应于  $x'_1$  的惟一校正值  $x$ 。具体地, 一方面可对各探测器的累积分布函数进行平滑处理, 尽可能使  $x'_1$  仅对应一个校正值, 同

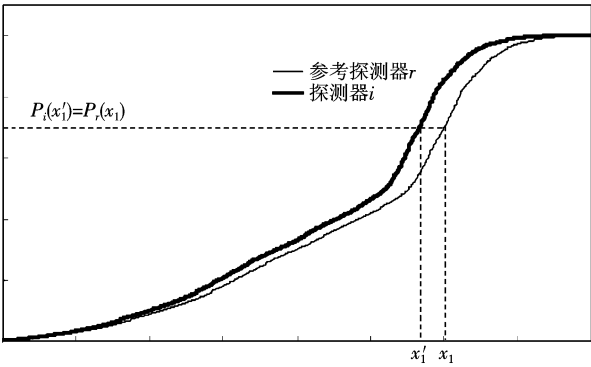


图 1 利用探测器输出值分布函数生成查找表的示意图 (连续分布)

Fig 1 The sketch to build look up table using cumulative distribution functions of the detectors' output (successive distribution)

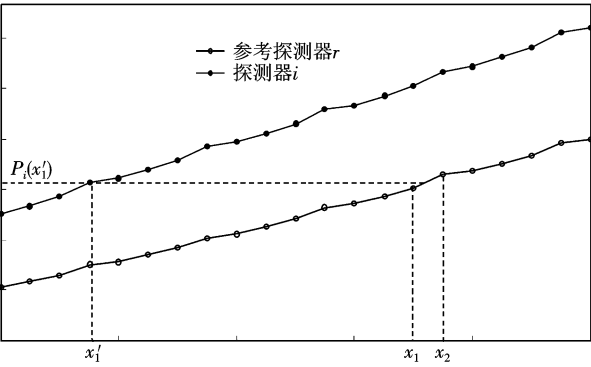


图 2 利用探测器输出值分布函数生成查找表的示意图 (实际分布)

Fig 2 The sketch to build look up table using cumulative distribution functions of the detectors' output (practical distribution)

时约定一个查找规则, 即: 若  $P_r(x_1) \leq P_i(x'_1) \leq P_r(x_2)$ , 则统一取其中较小的那个, 即  $P_r(x_1)$  所对应的  $x_1$  作为  $x'_1$  的校正值。

3 数据处理与分析

COCTS 遥感器的主要探测目标是海洋, 故大范围的晴空海域数据是条带消除处理的理想数据。由于实验室定标时是以第二个探测器为基准的, 考虑到数据处理的连续性, 所以在条带消除过程中, 也以第二个探测器作为参考探测器。另外, 为保证最佳的条带消除效果, 也可以以最接近探测器分布均值的那个探测器作为参考探测器。

在运用矩匹配法消除条带时, 需在整轨数据范围内分别计算 4 个探测器的均值及标准差, 以参考探测器的均值和标准差作为基准, 把其他 3 个探

器的原始值根据式 (7)修正到参考探测器的水平上,从而完成条带校正。由于在一景 COCTS 图像上,不可避免地存在一些高端 (云、雪、冰等) 输出值,这些景观的辐射值有可能超过了探测器可能的输出范围,这将会导致计算的均值和标准差出现偏差,所以在计算 4 个探测器的均值及标准差时设定一个阈值 (一般选动态范围最大值的 85% 左右作为阈值),用以去除范围之外的数值,从而使大部分正常辐射值受到的影响最小。

在运用直方图匹配法消除 COCTS 数据条带之前,首先计算出 4 个探测器输出值的累积分布函数 P,如图 3 所示,其中 sensor1—4 分别表示并扫的 4 个探测元。由图可看出,4 个探测器输出值的累积分布函数存在一定的差异,表现在数码值高低上,若某个探测器所对应的曲线越高,则其数码值相对较小,在图像上表现为一较暗的扫描行。不同的探测器获取明暗不同的扫描行数据,交叉起来形成了具有一定排列规则的带有条带的图像。

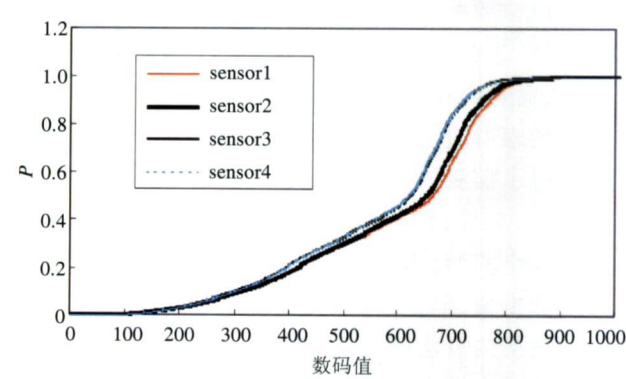
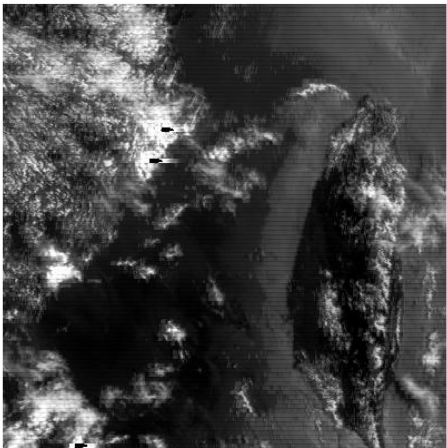


图 3 COCTS 第 3 通道 4 个探测器输出值的累积分布函数  
Fig 3 The cumulative distribution functions of 4 detectors' output for COCTS band 3

在具体的处理过程中,分别提取所选 COCTS 数据各个通道的每个探测器原始数据,首先统计每个数值的概率,然后计算小于等于这个数码值  $x$  的累积概率值  $P(x)$ ,并且对其进行适当的平滑处理。最后以第二个探测器的  $P(x)$  作为基准,根据 2.2 节所述算法对各个通道的其余 3 个探测器的输出进行匹配处理。

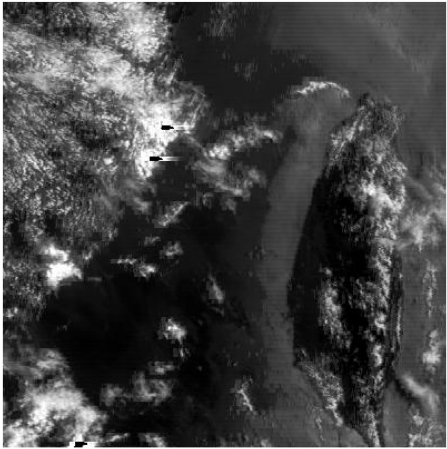
用矩匹配、直方图匹配算法处理后,原始图像的条带现象得到了很大的改善。由于一轨完整的 COCTS 数据较大,所以仅以某几个通道的其中几个小区域作为处理效果的示意。图 4 (a) 和图 5 (a) 分别为第 1 和 6 通道校正前带有条带的原始数据图



(a)



(b)

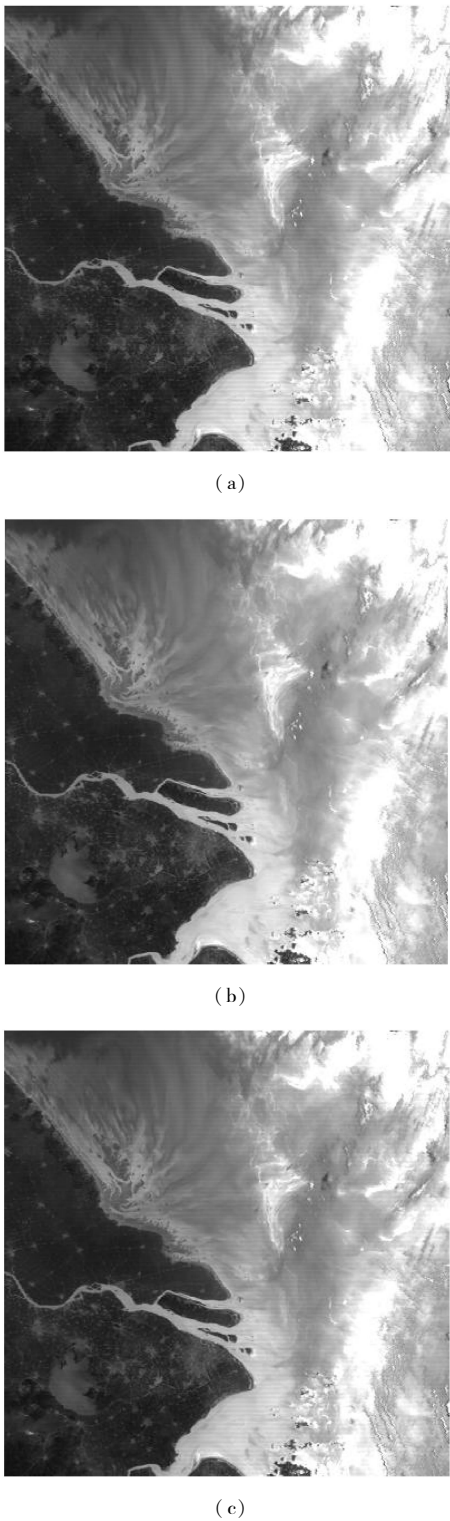


(c)

图 4 通道 1 原始、直方图匹配及矩匹配校正后的图像  
(a) 通道 1 原始图像; (b) 通道 1 直方图匹配校正后的图像;  
(c) 通道 1 矩匹配校正后的图像

Fig 4 The images of band 1 originally, after H istogram Matching correction and Moment Matching correction

(a) The original image of band 1;  
(b) The image of band 1 after H istogram Matching correction;  
(c) The image of band 1 after Moment Matching correction



(a)

(b)

(c)

图 5 通道 6 原始图像、直方图匹配及矩匹配校正后的图像

(a) 通道 6 原始图像; (b) 通道 6 直方图匹配校正后的图像

(c) 通道 6 矩匹配校正后的图像

Fig 5 The images of band 6 originally, after Histogram Matching correction and Moment Matching correction

像,图 4(b)和图 5(b)为相应通道运用直方图匹配法消除条带后的图像,图 4(c)和图 5(c)为矩匹配后的图像,校正前后的图像经过了相同的增强处理。可以看出,校正过的数据图像,特别是水体部分,大部分条带已经消除,且图像中的空间频率信息仍然保留着。

由上图可看出,矩匹配法和直方图匹配法对于 COCTS 数据条带的消除都很有效,在消除条带的同时保持了数据的原始信息,并且基本上未丢失细节特征;但是从整体的消除效果来看,直方图匹配法要优于矩匹配法。

分析矩匹配法和直方图匹配法消除条带的原理,不难发现,虽然都是在“相邻扫描行的地物具有相似性,则对于足够大的图像,每个探测器接收不同辐射的几率相等”的假定条件之下,但是矩匹配法是在假定探测器响应线性的前提下进行处理的,而探测器本身的响应是非线性,因此探测器之间的差异一般也是非线性的,不能简单的用线性的偏置、增益来近似。如果探测器的输出值大部分为正常的地物辐射值,落在探测器响应的线性段,则该方法的效果较好;而若存在较多的低端和高端输出值,由于这些地物的辐射值通常位于探测器响应的非线性段,或者超过了探测器可能的输出范围,所有这些非线性的影响,会导致计算的均值和标准差出现偏差。为解决这个问题,本研究指定了阈值,用以去除范围之外的数据值,但是在遥感器数据正常的情况下,这种指定阈值的方法所带来的改善是很有限的。直方图匹配法没有探测器响应线性的假定,保留了探测器本身的响应特性,所以,其效果要优于矩匹配法,但数据处理上要稍微复杂一些。

为进一步从数值上说明直方图匹配法要优于矩匹配法,可用 COCTS 任意一个较均匀小区域条带消除前后数码值的比较来做具体说明,如图 6 所示。

$ori\_sensor^{1-4}$  分别表示 4 个探测器原始的数码值;而  $his\_sensor^{1-4}$  和  $mom\_sensor^{1-4}$  分别表示对其采用直方图匹配、矩匹配消除条带后的数码值。由图可明显看出,条带消除前 4 个并扫探测器的数码值之间存在较大差异,其值在 667—720 之间较大的一个范围内,最大最小值相差近 8%;用矩匹配法消除条带后,4 个并扫探测器的数码值之间差异较小,基本在 700—711 之间,最大差异约 1.6%,而用直方图匹配法的结果,其差异更小,最大差异仅约为 1.3% (其中包括由地物的不均匀性导致的差异)。

从图 6 可明显看出直方图匹配法要优于矩匹配

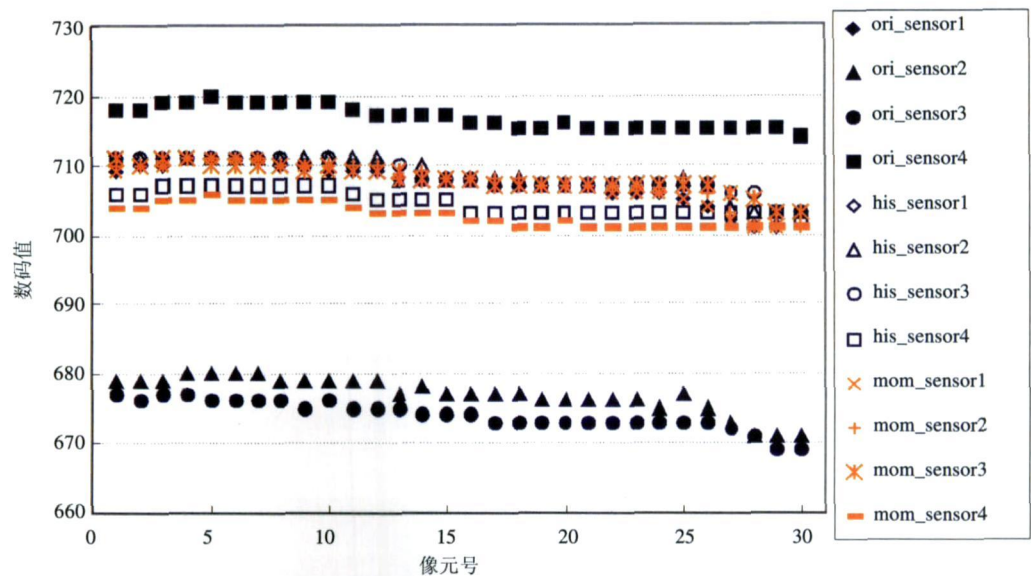


图 6 消除条带前后各探测器数码值的分布

Fig.6 The distribution of each detector's output before and after striping removal

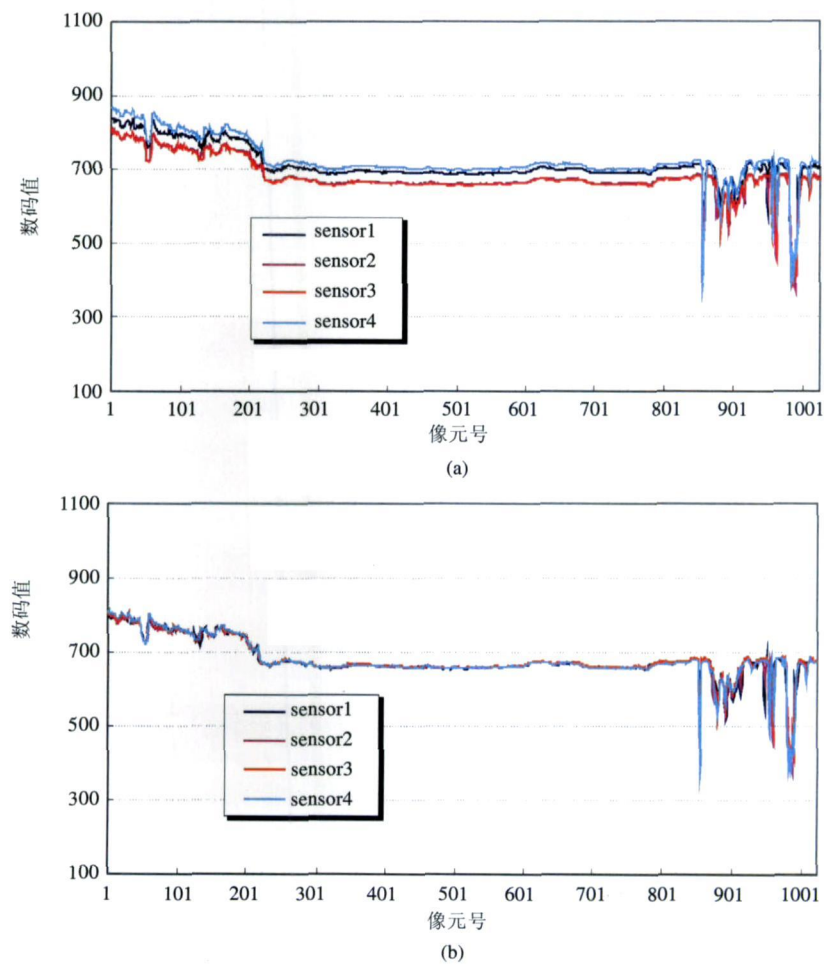


图 7 条带消除前、直方图匹配法消除条带后并扫单元扫描行像元值分布

(a) 条带消除前并扫单元扫描行像元值分布; (b) 直方图匹配法消除条带后并扫单元扫描行像元值分布

Fig.7 The pixel values of a multi-sensor scanning line originally, after Histogram Matching correction

(a) The original pixel values of a multi-sensor scanning line; (b) The pixel values of a multi-sensor scanning line after Histogram Matching correction

法。对于 COCTS 整个扫描行 (1024 个像元)较大范围内遍布整个动态范围的数据,其在直方图匹配法消条带前后的比较如图 7 所示 (仅以第 3 通道为例),图 7(a)和图 7(b)分别为消除条带前及直方图匹配后像元的数码值分布。

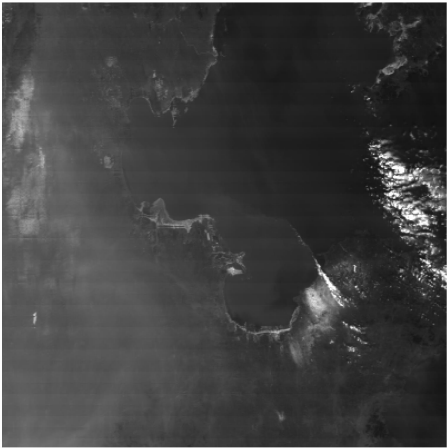
由图 7 可看出,对 COCTS 数据进行条带消除处理之后,其任意 4 个并扫探测器输出值之间的差异基本被消除。

将上述去除 COCTS 数据条带的方法,即矩匹配法和直方图匹配法应用于 EOS-Terra/Aqua 卫星上的 MODIS 遥感器,结果表明:矩匹配法和直方图匹配法对于 MODIS 数据条带的消除同样有效,并且直方图匹配法同样要优于矩匹配法,但这两种方法的条带消除效果比较接近,没有前述 COCTS 那么大的差异,这是因为 MODIS 的响应线性度要比 COCTS 好的缘故。图 8 给出了分别运用直方图匹配法及矩匹配法消除 Terra/MODIS 数据条带前后的部分图像。

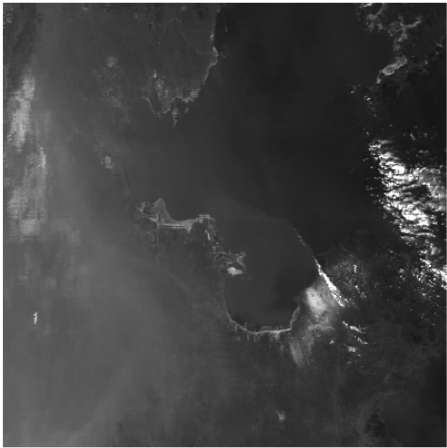
4 结 论

通过大量的数据试验,结果表明:矩匹配和直方图匹配法对 COCTS 数据条带的消除都是有效的,而直方图后者匹配法的效果更好。通过消除条带前后的图像及数据的比较可看出,数据条带得到了有效的处理,图像质量明显改善,且图像的空间频率信息仍然保留着,特别是对于水体及中等灰度的陆地部分,条带去除效果更佳。匹配方法是建立在统计基础之上的,因此当图像足够大、地物分布相对均匀时,其得到的结果较好;对于地物较复杂、灰度分布非均匀状况下成像的小幅图像,由于受到统计样本的限制,其结果要稍差一些。要解决这个问题,可对多轨连续的数据统计其平均的数码值与修正量之间的关系,用该关系式对小幅数据进行消条带处理,即在业务化运行时,用相邻几天的多轨数据统计得出的关系,对该轨数据进行条带消除处理。

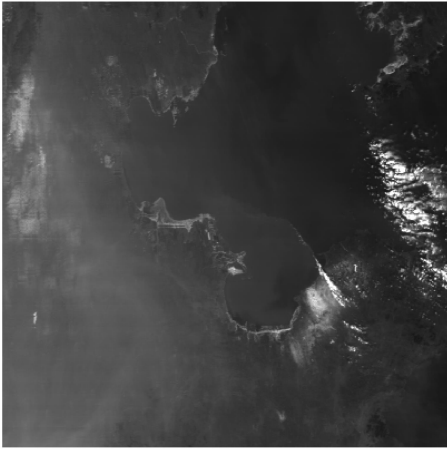
本研究的结果具有较好的应用前景。一方面该方法可以自动且高效地对 COCTS 数据进行条带的消除,处理一轨正常的的数据 (一般大小约 100—150M),用时在 15s 之内;另外该方法同样适用于其他类似以并扫方式获取数据的遥感器的条带消除,比如即将发射的 HY-1B COCTS 遥感器,本研究的结果将纳入其业务化数据处理中,对提高其图像与定量化产品的质量有很大的帮助。



(a)



(b)



(c)

图 8 原始、直方图匹配及矩匹配校正后的部分图像  
(a) 条带消除前部分图像; (b) 运用直方图匹配法消除条带后部分图像; (c) 运用矩匹配法消除条带后部分图像

Fig 8 The partial images originally, after H istogram Matching correction and M oment Matching correction

(a) The partial original image; (b) The partial image after H istogram Matching correction; (c) The partial image after M oment Matching correction

**致 谢** 本研究得到了国家卫星海洋应用中心地面站、技术一部的孙从容、徐玉柱、吴奎桥和张为良等同志们的大力帮助,在此一并表示感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] Hom B K P, Woodham R J. Destriping LandsatMSS Imagery by Histogram Modification [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, **10**: 69—83.
- [2] Kautsky J, Nichols N K, Jupp D L B. Smoothed Histogram Modification for Image Processing [J]. Computer Vision Graphics and Image Processing, 1984, **26**: 271—291.
- [3] Weinreb M P, Xie R, Lienesch JH. Destriping GOES Images by Matching Empirical Distribution Functions [J]. Remote Sens Environ, 1989, **29**(2): 185—195.
- [4] Gadallah F L, Csillag F. Destriping Multisensor Imagery with Moment Matching [J]. Int J Remote Sensing, 2000, **21**(12): 2505—2511.
- [5] Wang J S. Horizontal Striped Noise and Elimination of TM Thermal Band 6 Imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995, **10**(1): 53—56. [王杰生. TM 热红外图像的横纹条带噪声及消除 [J]. 遥感技术与应用, 1995, **10**(1): 53—56.]
- [6] Pan J J, Chang C I. Destriping of Landsat MSS Images by Filtering Techniques [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, **58**(10): 1417—1423.
- [7] Simpson J J, Gobat J I, Frouin R. Optimized Destriping of GOES Images Using Frequency Domain Filters [J]. Remote Sens Environ, 1995, **52**: 15—35.
- [8] Srinivasan R, Cannon M, White J. Landsat Data Destriping Using Power Spectral Filtering [J]. Optical Engineering, 1988, **27**(11): 939—943.
- [9] Guo X F, Wang R S. Removal of Random Noises of Imaging Spectrometer Data Based on Wavelet Analysis [J]. Journal of Remote Sensing, 1999, **3**(3): 183—190. [郭小方, 王润生. 基于小波分析的成像光谱图像随机噪声消除 [J]. 遥感学报, 1999, **3**(3): 183—190.]
- [10] Jiang G M, Niu Z, Ruan W L, et al. A Study on Removing the Stripe Noises in MODIS Images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, **18**(6): 393—398. [蒋耿明, 牛铮, 阮伟利等. MODIS 影像条带噪声去除方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2003, **18**(6): 393—398.]
- [11] Wegener M. Destriping Multiple Sensor Imagery by Improved Histogram Matching [J]. Int J Remote Sensing, 1990, **11**(5): 859—875.
- [12] Chen J S, Shao Y, Zhu B Q. Destriping in CMODIS Data by a Improved Moment Matching [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, **18**(5): 313—316. [陈劲松, 邵芸, 朱博勤. 一种改进的矩匹配方法在 CMODIS 数据条带去除中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2003, **18**(5): 313—316.]
- [13] Liu Z J, Wang C Y, Wang C. Destriping Imaging Spectrometer Data by an Improved Moment Matching Method [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, **6**(4): 279—284. [刘正军, 王长耀, 王成. 成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法 [J]. 遥感学报, 2002, **6**(4): 279—284.]
- [14] Giovani Corsini Marco Diani Thomas Walzel. Striping Removal in MOS-B Data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000, **38**(3): 1439—1446.
- [15] Sun L, Tang J W, Zhang J. A Study of Quantitative Striping Removal Algorithm for HY-1 CCD Data [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, **24**(6): 20—34. [孙凌, 唐军武, 张杰. 我国“海洋 1 号”卫星 (HY-1) CCD 图像数据定量化条带消除研究 [J]. 海洋学报, 2002, **24**(6): 20—34.]
- [16] Wang M, Franz B A. Comparing the Ocean Color Measurements between MOS and SeaWiFS: A Vicarious Intercalibration Approach for MOS [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000, **38**(1): 184—197.
- [17] Tang J W, Gu X F, Niu S L, et al. Cross Calibration between CBERS-02/CCD and MODIS Based on the Water Targets [J]. Science in China Series E, 2005 (supplement): 59—69. [唐军武, 顾行发, 牛生丽等. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标 [J]. 中国科学, E 辑, 2005 (增刊): 59—69.]