

MODIS 数据 Bowtie 效应快速消除算法研究

刘良明, 文雄飞, 余凡, 张丰, 陈晶
(武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要: Bowtie 效应是 EOS/MODIS L1B 级图像数据的一个几何畸变问题, 虽然目前已经提出了几种消除方法, 但在计算效率和实际应用等方面还有许多限制。本文在分析国内外消除 Bowtie 效应的基本原理和算法的基础上, 在不使用星历表数据的前提下, 对中国、美国和澳大利亚及其周边地区数据进行了实验, 找出了这些地区 Bowtie 效应的规律, 提出了一种简单有效的消除算法。实验结果表明, 该算法可以在不使用星历表数据情况下快速有效地消除 Bowtie 效应。

关键词: Bowtie 效应; EOS/MODIS; 相关系数法; 曲线拟合

中图分类号: TP 751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2007)02-0010-06

1 Bowtie 效应及其产生原因

MODIS 数据是目前研究地球科学的重要遥感数据源之一。然而, 由于 MODIS 传感器自身的成像特点——其横向扫描角度的变化范围达到 $\pm 55^\circ$, 再加上其探测器对地观测的视场几何特征、地球表面曲率、地形起伏和运动中自身抖动等等因素的共同影响, 导致 MODIS L1B 数据存在几何畸变^[1], 俗称“Bowtie 效应”, 如图 1 所示。

MODIS 数据在扫描角达到 15° 后就会产生 Bowtie 效应, 而且随着扫描角度的增大, Bowtie 效应越明显, 这部分数据占据了相当大的一部分(图 2)。

所以, 要想充分利用 MODIS 数据, 首先就要消除 Bowtie 效应。

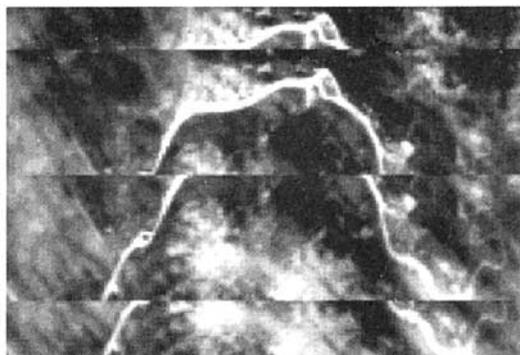


图 1 MODIS 数据的 Bowtie 效应^[2]

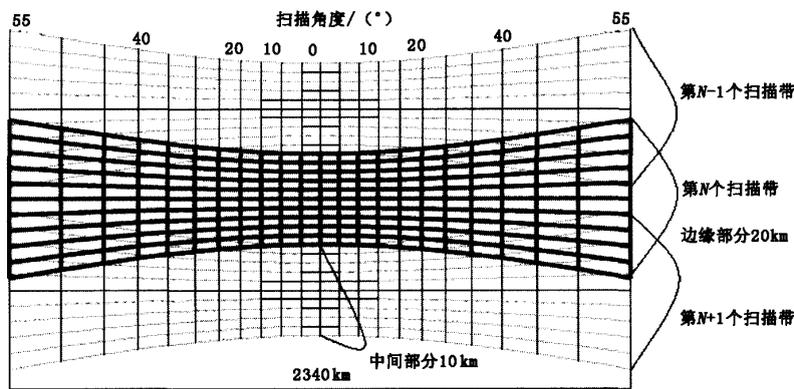


图 2 Bowtie 效应产生的原因(以 1 000 m 分辨率数据为例)

2 常用算法简介

目前, 国内外有关去除 Bowtie 效应的处理算法

主要有星历表法和非星历表法 2 种, 其中, 星历表法是根据卫星的星历表生成标准地理网格, 将数据按照其地理坐标投影到该网格上进行匹配, 在地理定

标的同时消除 Bowtie 现象。国际 MODIS/AIRS 处理软件包 (IMAPP, International MODIS/AIRS Processing Package) 和美国国家航空航天局戈达德空间飞行中心 (NASA GSFC) 对 MODIS L1B 级数据处理均使用这种方法。美国冰雪数据中心开发的 MS2GT 软件也是利用这样的原理。由于 Terra 和 Aqua 的 MODIS L1B 数据产品均不包含星历表,普通用户无法使用星历表法对 MODIS L1B 数据进行 Bowtie 消除处理^[2]。

在没有卫星星历表数据前提下,国内外很多学者在去除 MODIS 数据的 Bowtie 效应方面做了不少研究。俄罗斯 R&D ScanEx 公司开发的 Modistools 模块可以很好地去除 Bowtie 效应,但是这个模块必须在 ENVI 环境中使用^[2],因此运行环境限制了这种算法的推广。英国 Dundee 卫星接收站研究者认为,可以用投影变换来去除 Bowtie 效应,但是这种方法的缺点是在做过投影变换后很难再利用 L1B 级数据中带有天顶角、高度角等角度信息,除非在做投影变换同时对天顶角、高度角等信息也做同样的处理^[3]。南京大学徐萌通过将 MODIS 数据中带有经纬度插值后再做投影变换来去除 Bowtie 效应^[4];中国科学院郭广猛通过计算相关系数得到相邻条带间的重叠行数来去除 Bowtie 效应^[5];南京大学余钧辉等人也提出类似的观点,利用数字摄影测量学中寻找图像同名点的方法来找到扫描带之间的重叠行数,把重叠的部分去掉就可以在不使用星历表的情况下把 MODIS 数据的 Bowtie 效应去除^[6],但这种方法的缺点是计算量大,效率低,满足不了 MODIS 海量数据处理的要求,实用性不强。本文提出的快速算法可以解决上述分析中存在的不足。

3 快速算法的基本原理

针对非星历表类方法的缺点,本文提出了一种基于统计的快速去除 MODIS L1B 数据 Bowtie 效应的算法。该算法建立在 MODIS L1B 影像的几何畸变与 MODIS 传感器的成像特点密切相关的基础上。如图 2 所示,在探测器从左向右扫描过程中,两边的重叠度关于星下点(即卫星飞行方向)基本对称,而且扫描带之间重叠的行数也是由卫星的扫描特点决定的,与某条具体的 MODIS 数据没有必然关系,即 MODIS L1B 数据的 Bowtie 效应有一定规律,而且这个规律是可以通过统计计算某个区域大量 MODIS L1B 数据的重叠行数得出。由于扫描带的重叠是关于星下点对称的,可以首先使用一种对称函数(如 $Y = aX^2 + c$)来模拟这个规律,然后利用这个规

律直接去处理 MODIS L1B 数据,这样就可以快速消除 Bowtie 效应。

4 算法概述

以 500 m 分辨率的 MODIS 数据为例,把数字摄影测量学中的相关系数法概念引入到 MODIS 数据处理中^[2]。对于 500 m 分辨率的数据而言,每一次扫描产生 2708 列、20 行的条带,每两个相邻扫描带之间存在 Bowtie 效应,一幅 NASA 标准 500 m 分辨率的 MODIS 影像有 203 个扫描带。首先要计算相邻的两个条带每一列存在多少行重叠。考虑可能出现随机噪声,而且 MODIS 数据相邻条带存在横向错动,本文选择 3 像元 × 39 像元窗口为目标区,搜索区大小是 20 像元 × 39 像元窗口^[6],具体过程如下:

(1) 利用相关系数法计算整个影像在第 20 列每两个扫描带之间的重复行数^[7];

(2) 取出频率最大的数作为整幅影像在第 20 列上的重叠行数;

(3) 使用相同的方法,从左向右计算出整幅影像在各列的重叠行数,对于前 19 列和后 19 列,可以利用线性插值法求出重叠行数;

(4) 重复(1)~(3)步骤,计算某地区多条 500 m 分辨率 MODIS L1B 数据,得到每条数据从重叠 10 行到重叠 4 行各有多少列,取平均值,即利用统计方法得到该地区数据左右两边各 1 354 列中重叠 10 行的有多少列,重叠 9 行的有多少列,……,重叠 4 行的有多少列;

(5) 利用第(4)步得到的结果,用多项式拟合曲线方程,计算得出重叠 3 行、2 行、1 行和没有重叠的列数;

(6) 对于 MODIS L1B 级数据的每个扫描带,根据重叠行数的情况将其分成一段一段进行处理:对于重叠 10 行的部分,中间没有重叠的行数为 0,如图 3 所示,将每一个扫描带 20 行分成 4 个 5 行、1 个 0 行进行处理,从每个扫描带的第 6 行开始读入 10 行数据,即读入图 3 所示部分,然后将读入的部分重采样成 20 行;对于重叠 9 行的部分,中间没有重叠的行数为 2,如图 4 所示,将每一个扫描带 20 行分成 2 个 5 行、2 个 4 行、1 个 2 行进行处理,从扫描带第 6 行开始读入 11 行数据,再把读入的 11 行重采样成 20 行。按照类似的方法处理其它情况,对于没有重叠的部分不用处理,这样对整幅影像处理完成后就得到没有重叠的影像,即去除了 Bowtie 效应后的影像。

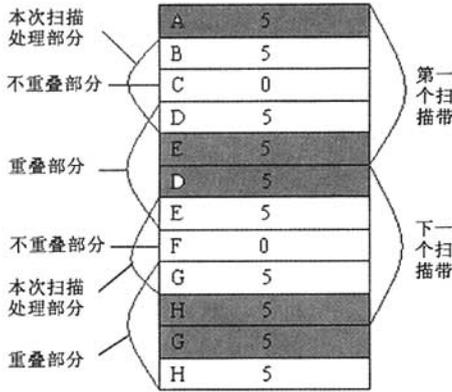


图 3 重叠 10 行的处理方式

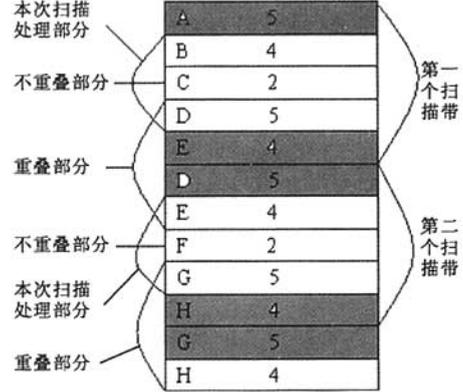


图 4 重叠 9 行的处理方式

5 曲线拟合方程的求取

本实验用到了 3 个图像数据,分别是中国、美国、澳大利亚及各自周边地区。选择美国是因为它和中国的纬度接近,但分别位于东、西两个半球,选

择澳大利亚是因为澳大利亚位于南半球。Terra 卫星的轨道不是正圆形,对于不同的区域,MODIS L1B 级数据的 Bowtie 效应可能会有一定的差异,这一点需要用不同地区的数据来验证。

对中国及周边地区 50 余条 MODIS L1B 级数据的处理结果如表 1 所示。

表 1 中国区域 MODIS 数据重叠情况统计

重叠行数	10	9	8	7	6	5	4
左边列数	45(44.94) ^①	69(68.84)	74(73.7)	80(80.28)	85(85.4)	95(95.4)	106(105.84)
右边列数	33(32.52)	68(68.46)	73(73.3)	80(79.9)	86(86.46)	95(95.3)	106(106.34)
平均值	39(38.73)	69(68.65)	74(73.5)	80(80.09)	86(85.93)	95(95.35)	106(106.09)

^①括号内数据是直接求平均得到的列数值,括号外是取整后的值。

由表 1 可以看出,左右两边除了影像最边缘的重叠 10 行的列数差别比较大外,从重叠 9 行到重叠 4 行的列数都非常对称,这证实了影像左右两边的确是关于中间(飞行方向)对称的,与 MODIS 成像特点一致。以飞行方向为中心,这种重叠变化可以近似用一条对称曲线($Y = aX^2 + c$)来描述。利用

表 1 平均值数据,使用多项式曲线拟合,有

$$Y = 0.00000554405280 X^2 + 0.39642248067909 \quad (1)$$

利用式(1)再计算出重叠 3 行、2 行、1 行和没有重叠的列数,可得中国及周边地区 MODIS L1B 级数据的重叠规律(表 2)。

表 2 中国区域 MODIS 影像重叠规律

重叠行数	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
列数	39	69	74	80	86	95	106	121	148	207	329

利用表 2 结论,将 MODIS L1B 级数据的每个扫描带分成一段一段进行处理,使用前面算法实现中提到的方法,对不同列数的数据进行不同处理,最后得到结果图像的大小和处理前是一样的。

用同样的方法分别处理美国、澳大利亚及周边

地区各 50 余条数据,得到多项式曲线拟合方程式(2)、式(3)和重叠规律(表 3)。

$$Y = 0.00000555944774 X^2 + 0.36056758923400 \quad (2)$$

$$Y = 0.00000556380757 X^2 + 0.45090330818790 \quad (3)$$

表 3 美国和澳大利亚区域 MODIS 影像重叠规律

重叠行数	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
列数(美国)	39	68	73	80	87	94	105	120	146	203	339
列数(澳大利亚)	44	71	73	81	87	96	105	121	149	213	314

对比式(1)~(3)以及表2和表3数据,可以看出,3个区域数据得到的 Bowtie 效应多项式曲线总体接近,但是在重叠10行和没有重叠两个部分存在较明显的差异。实验结果证明,这是由于 Terra 卫星轨道不是正圆形,在飞行轨道、高度及速度等参数方面存在有一定的地域性,从而导致 Bowtie 效应存在一定的区域性。

6 结果比较与分析

(1)目视定性比较。对同一幅影像(MOD02HKM.A2006196.0430.005.2006196111234.hdf 的第一波段,图5),分别用 Terascan 算法、本文算法和 ENVI Modistool 模块进行处理,其结果依次见图6~8。从目视定性看,其效果区别不大。



图5 Bowtie 效应去除之前的局部图像



图6 Terascan 算法去除 Bowtie 效应后局部图像

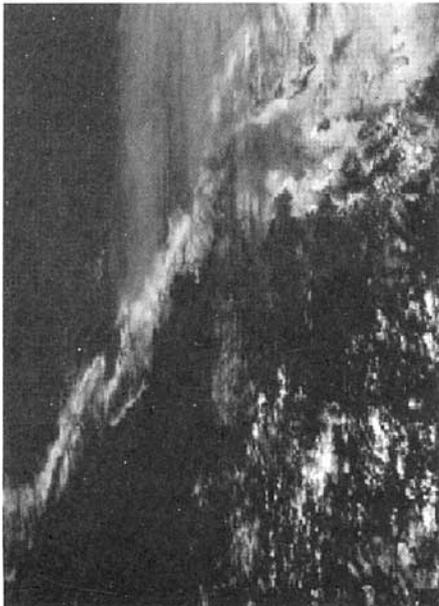


图7 本文算法去除 Bowtie 效应的局部影像

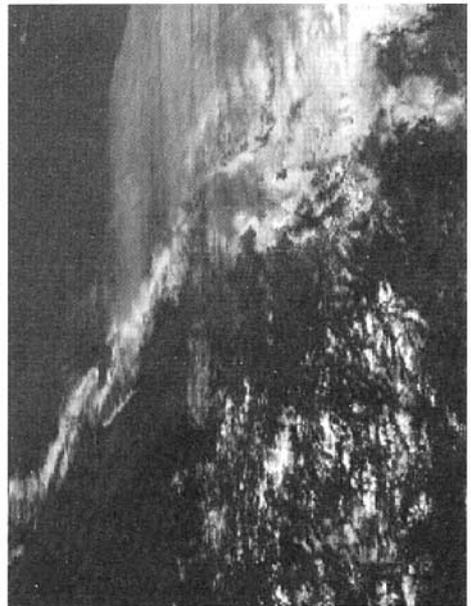


图8 ENVI Modistool 模块去除 Bowtie 效应的局部影像

(2)效率比较。本文算法与 ENVI 算法测试用的机器配置相同(奔腾 IV, CPU 1.7G, 内存 256 M, Windows XP 系统),与 Terascan 系统运行的机器配置(奔腾 IV, CPU 1.7G, 内存 256M, Red Hat Linux 7.2 系统)不同。通过测试发现, Terascan 对每幅 500 m 分辨率影像 5 个波段去除 Bowtie 效应大约需要 13 s, 本文算法需要 15 s 左右, ENVI Modistool 模块需要 210 s 左右。即本文提到的算法效率比 Modistool 要高一个数量级, 与 Terascan 系统性能相当(目前还无法将 Terascan 系统移植到相同的系统上

进行比较)。本算法是在国内郭广猛、余钧辉等研究者提出的利用相关系数法去除 Bowtie 效应的基础上作了更深一步的探讨, 没有对每条数据都去求取相关系数, 而是先通过大量数据测试得到一个规律, 然后利用这个规律再去处理海量数据, 这样处理的效率大大提高。

(3)定量对比。为了定量确定本文算法是否有效, 分别将本文算法的结果(图 7)与另外两种算法的结果(图 6 与图 8)进行了统计分析, 其对比结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 本文算法和 Terascan 系统结果对比

结果图	最小值	最大值	平均值	Terascan 算法标准差	本文算法标准差	协方差	相关系数
图 7	0	31 729	10 826. 779		6 254. 132	39 076 122. 547	0. 990 162
图 6	0	32 539	10 828. 375	6 310. 125			

表 5 本文算法和 Modistool 模块结果对比

结果图	最小值	最大值	平均值	Modistool 模块标准差	本文算法标准差	协方差	相关系数
图 7	0	31 729	10 826. 779		6 254. 132	39 142 058. 929	0. 994 984
图 8	0	32 192	10 828. 264	6 290. 143			

从表 4 和表 5 可以看到, 本文算法与 Terascan、Modistool 采用的算法去除 Bowtie 效应的结果非常一致, 其相关系数均达到 0.99 以上。从相关系数看, 这个结果比 Enrique Gomez - Landesa 提出的方法要好^[8]。可以认为, 本文提出的算法在不使用星历表数据的前提下, 既没有丢失信息, 同时也保证了精度。

7 结论

本文根据 MODIS 传感器成像方式的特点, 研究了 MODIS Bowtie 效应的基本规律, 提出了一种不使用星历表数据去除 Bowtie 效应的高效算法, 并对分析了该算法的高效性和实用性。通过本文研究, 可以得到如下结论:

(1)MODIS Bowtie 效应有其自身的规律。由于 Terra 卫星和 Aqua 卫星的飞行轨道不是正圆形, 在不同的区域, 卫星的飞行速度、飞行高度和姿态等有细小差别, 因此, Bowtie 效应的规律具有一定的地域性。

(2)Bowtie 效应的规律可以近似用一条对称曲线来描述。对称曲线可以事先通过一定的实验数据得到, 利用该曲线, 结合本文提出的快速算法可以对同一地区的批量数据进行快速 Bowtie 校正。

(3)对本文算法进行的对比分析表明, 该算法的效率比 Terascan 系统略慢一些(因为测试平台有

差异), 但比 ENVI 的 Modistool 模块效率要高接近 10 倍, 该算法的计算结果不但没有丢失信息, 而且还保证了精度要求。

(4)本文算法对软件、硬件没有特殊要求。

(5)本文算法只针对 500 m 分辨率 MODIS 1B 数据, 通过改变参数可以推广到 250 m、1 000 m 分辨率的数据处理。

至于通过 3 个地区不同时间多幅数据对比所发现的在重叠 10 行上左右两边涉及的列数相差比较大, 而在重叠 9 行、8 行、7 行等左右两边非常对称的原因, 还有待进一步探讨。

致谢: 本工作受到 AMD 大学计划的支持。感谢武汉大学 MODIS 卫星数据接收站代江山老师、向大享、周正、董新弈等同学在提供 Seaspace Terascan 对比数据方面提供的帮助; 感谢香港理工大学地理资讯系郑伟生同学在研究方面给予的帮助。

参考文献

- [1] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 国家 EOS - MODIS 共享平台资源、标准、技术获取与应用培训班培训教材[EB/OL]. <http://www.nfiicos.cn/html/training/material/all.doc>
- [3] 英国 Dundee 卫星接收站 MODIS 常见问题列表[EB/OL]. <http://www.sat.dundee.ac.uk/modis-faq.html#geo>
- [4] 徐萌, 郁凡. 去除 EOS/MODIS 1B 数据中“弯弓”效应的方法

[J]. 气象科学, 2005, (3): 257 - 264.

[5] 郭广猛. 非星历表法去除 MODIS 图像边缘重叠影响的研究 [J]. 遥感技术与应用, 2003, (3): 172 - 175.

[6] 余钧辉, 张万昌. 一种近似核线影像相关法在遥感图像处理中的应用 [J]. 计算机应用研究, 2004, (7): 239 - 240.

[7] 张剑清, 潘 励, 王树根. 摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.

[8] Enrique Gomez Landesa, Albert Rango, Max Bleiweiss. An Algorithm to Address the MODIS Bowtie Effect [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(4): 644 - 650

THE APPROACH ON REMOVING THE BOWTIE EFFECT IN MODIS L1B IMAGES

LIU Liang - ming, WEN Xiong - fei, YU Fan, ZHANG Feng, CHEN Jing
(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The Bowtie effect is a kind of geometry distortions of the EOS/MODIS L1B data. Although several methods have been proposed to eliminate the Bowtie effect, there exist many limitations in their efficiency and practical application. This paper makes a thorough research on the factors which result in the Bowtie effect. With a comprehensive comparison and evaluation of the existing algorithms for eliminating the Bowtie effect all over the world, the paper offers a new algorithm which is succinct and effective in eliminating the Bowtie effect without utilizing the ephemeris data. The new algorithm is derived from the regularity shown by the experiments made in China, the USA and Australia (mainly with MODIS data of 500 m resolution). The examination results demonstrate that, without ephemeris data, the new algorithm is capable of removing the Bowtie effect of MODIS L1B data effectively and rapidly.

Key words: Bowtie effect; EOS/MODIS; Correlation coefficient method; Curve fitting

第一作者简介: 刘良明(1969 -), 教授, 主要从事摄影测量与遥感、GIS 等方面的教学和科研工作。

(责任编辑: 刁淑娟)

=====

(上接第 5 页)

[22] Williams S, Bock Y, Fang P. Integrated Satellite Interferometry: Tropospheric Noise, GPS Estimates and Implications for Interometric Synthetic Aperture Radar Product [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B11): 27051 - 27068.

[23] 才建鹏. GPS 与 InSAR 监测地面沉降变形的数据融合研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.

THE ATMOSPHERIC EFFECT IN REPEATED TRACK INSAR MEASUREMENTS AND ITS RESEARCH PROGRESS

XU Jia¹, GUAN Ze - qun¹, HE Xiu - feng²

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on researches on the physical mechanism of atmospheric delay, this paper has studied the atmospheric effects in repeated track InSAR measurements and put forward four ways to analyze the effects based on SAR interferograms. The research progress, especially in the correction of atmospheric effects, is reviewed comprehensively. Different approaches to mitigating the atmospheric effects as well as their problems and limitations are discussed and compared with each other. At last, some suggestions are given for future studies.

Key words: InSAR; Atmospheric effect; Atmospheric refraction delay

第一作者简介: 徐 佳(1983 -), 女, 博士研究生, 主要从事遥感信息处理与应用方面的研究。

(责任编辑: 刁淑娟)