

三线阵云立体探测技术

马 烁, 黄云仙*, 严 卫, 艾未华
(解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要:根据三线阵立体测绘原理,给出了探测云顶高的三线阵卫星影像模拟方法.提出了改进的SIFT匹配算法,并利用该算法结合前方交会法,获得云顶高度信息.通过实验验证了三线阵卫星影像模拟的正确性,探索了一种获取夜间低照度条件下云顶高参数的新途径.最后,针对测高误差来源,详细分析了三线阵立体探测云顶高的测高误差,并针对云移动给出了一种误差纠正方法.

关键词:三线阵卫星影像;云顶高;共线方程;SIFT匹配算法;前方交会法

中图分类号:P426.5+4 **文献标识码:**A

The stereo mapping method of three-line for cloud detection

MA Shuo, HUANG Yun-Xian*, YAN Wei, AI Wei-Hua

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: According to the theory of the stereo mapping based on three-line, the simulation of three-line satellite images for cloud-top height retrieval is presented. The matching method SIFT was improved, and the cloud top height was retrieved by the improved SIFT and forward intersection. The correctness of the simulated three-line satellite images was verified and a new way was explored to retrieve the cloud top height in low light condition at night. Finally, the sources of the errors in the cloud top height were analyzed in detail. A new method was given to eliminate the error caused by cloud motion.

Key words: three-line satellite image, cloud top height, collinearity equations, SIFT, forward intersection

PACS: 93.85.Bc, 93.85.-q, 92.60.Nv

引言

云在地球大气的能量和水汽收支中具有重要的调节作用,是影响气候变化的重要因子^[1].准确的云顶高度信息对强对流天气的研究和早期预警有非常重要的作用,包括局地强风暴、热带气旋等灾害性天气的云团结构分析和云团三维空间移动监测等^[2-6].多种云顶高度探测方法按其探测原理的不同有两条主要途径:通道辐射特性和成像几何关系.前者只能间接获取云顶高度,需借助第三方物理量(温度,大气路径长度以及微观特性等),利用物理量与云顶高度的关系得到云顶高度信息;后者利用卫星遥感器、目标等不同空间几何关系对云顶高进行探测.

在遥感技术发展早期,人们利用单个或多个红外通道(3~4 μm, 10~12 μm)反演亮温. Shawn Hollars等^[7]对此方法探测云顶高度误差进行了分析,统计误差达数公里.在利用单个或多个红外通道反演云顶高的基础上,欧空局(ESA)提出了一种利用卫星的红外和水汽通道资料来确定云顶高的方法^[8],该方法通过获取每个通道的背景辐射率以及云的辐射率计算云顶高度.但是由于水汽通道测不到对流层下层的辐射率,所以该方法只能适应于测量较高云层的云顶高度,具有一定的局限性^[9]. Simth和 platt^[10]提出利用三个CO₂通道吸收带(CO₂分层法),通过辐射传输方程来反演云顶高度.该算法误差的主要来源可归结为:比辐射率被假定为常数、薄云层的假定以及大气温湿廓线的限制

收稿日期:2013-01-24,修回日期:2013-09-12

基金项目:国家自然科学基金(41375029)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41375029)

作者简介(Biography): 马烁(1989-),男,安徽利辛人,博士研究生,主要从事大气与海洋遥感研究. E-mail: mashuo0601@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: 13813891802@163.com

Received date: 2013-01-24, revised date: 2013-09-12

等,反演误差普遍为 1.5 km 以上^[11]. 综上所述,利用通道辐射特性反演云顶高度都需要借助间接测量量,而间接测量量的误差会给测高精度带来较大的影响.

利用成像几何关系进行云顶高度探测历史悠久,在很早之前,人们提出利用云影法测云顶高,其主要利用太阳、云以及云影的位置关系计算云顶高度. 但是该方法受到许多条件的限制,主要表现在成像时必须要有合适的几何关系等^[12]. 随着气象卫星的陆续升空,立体法测云高发展迅速. 目前,应用较多的是双星立体观测法. 利用该方法在云顶高度计算方法上取得重要进展的是 Hasler 和 Fujita,他们各自提出了能够业务应用的云顶高度计算方法,并进行了大量的实践应用^[3-6]. 但是,双星联合观测时间上的不同步以及不同卫星参数的不一致给云的观测带来许多问题,并且浪费了大量的空间资源.

三线阵探测器观测目前主要应用于摄影测量,对地进行三维建模,将它用来探测云顶高,相对于双星立体观测以及单星多相机观测来说,减少了一些卫星参数带来的误差并节约了大量的空间资源,同时,解决了时间以及地区匹配上的问题,有较好的应用前景.

本文将三线阵立体测绘法引入到对云顶高的探测上,给出了三线阵卫星影像模拟的具体方法;通过改进的 SIFT 匹配算法结合前方交会法,探索了三线阵立体探测云顶高计算流程;利用美国国防气象卫星 DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) 夜间微光影像作为实验数据,模拟了三线阵卫星影像;针对模拟结果与理论分析,对三线阵探测云顶高误差进行了详细分析,并针对云移动给出了一种测高误差补偿方法.

1 三线阵立体探测原理

三线阵包含三个阵列,三个阵列相互平行并与卫星飞行方向垂直. 当卫星飞行时,每个阵列以一个同步的周期 N 连续扫描地面并产生三条相互重叠的航带图像,这三个阵列的成像角度不同,可使三条航带图像中含有相同的目标信息. 三线阵立体探测原理类似于人眼成像原理,当两眼通过不同的角度观察同一目标,利用形成的生理视差可判断目标距离的远近. 同理,三线阵立体探测可利用目标在不同影像中的位置信息求解目标的高程信息.

三线阵立体探测以共线方程为基础,表达了像点、投影中心和云顶点之间存在的几何关系,如式

(1)(2)所示.

$$\frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} X_j - X_s \\ Y_j - Y_s \\ Z_j - Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X_j - X_s) + b_1(Y_j - Y_s) + c_1(Z_j - Z_s)}{a_3(X_j - X_s) + b_3(Y_j - Y_s) + c_3(Z_j - Z_s)} \\ y = -f \frac{a_2(X_j - X_s) + b_2(Y_j - Y_s) + c_2(Z_j - Z_s)}{a_3(X_j - X_s) + b_3(Y_j - Y_s) + c_3(Z_j - Z_s)} \end{cases}, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, f 为相机焦距, λ 为比例尺分母. $a_k, b_k, c_k = 1, 2, 3$ 为某一时刻的相机姿态角元素 φ, ω, κ 构成的方向余弦,其关系如式(3)所示. (x, y) 为三线阵像点坐标,由于卫星是按 x 轴方向飞行,所以像点的 x 坐标为常数,对于正视影像 $x = 0$;前视影像 $x_l = f \tan \alpha$;后视影像 $x_v = -f \tan \alpha$,其中 α 为正视相机与前视相机以及后视相机的夹角. (X_j, Y_j, Z_j) 为云顶点的坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为某一时刻摄站坐标.

$$\begin{cases} a_1 = \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ a_2 = -\cos \varphi \sin \kappa - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ a_3 = -\sin \varphi \cos \omega \\ b_1 = \cos \omega \sin \kappa \\ b_2 = \cos \omega \cos \kappa \\ b_3 = -\sin \omega \\ c_1 = \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ c_2 = -\sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ c_3 = \cos \varphi \cos \omega \end{cases}. \quad (3)$$

共线方程是由云顶点坐标求像点坐标,也可由像点坐标求云顶点坐标,即对共线方程进行反算,如式(4)所示.

$$\begin{cases} X_j = \left[\frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \right] (Z_j - Z_s) + X_s \\ Y_j = \left[\frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \right] (Z_j - Z_s) + Y_s \end{cases}. \quad (4)$$

2 三线阵卫星影像模拟

由于云是随时间的变化而不断移动的,没有固定的高程信息,所以对云的立体探测不同于地面测绘. 本文基于立体测绘法,针对云立体探测的特性,提出了三线阵卫星影像模拟方法,如图1所示. 首先对正射影像进行云检测,获取云掩模后进行高程模

拟.接着,根据模拟的高程数据以及正射影像,通过对相关卫星基本参数以及外方位元素的模拟,并结合云移动信息,逐像元计算对应前视、正视以及后视影像的像点坐标.然后,通过高斯加权给上述三种影像进行灰度赋值,最终得到前视、正视以及后视影像.

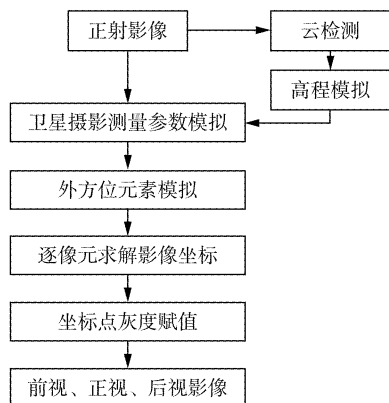


图1 探测云顶高的三线阵卫星影像模拟流程图
Fig. 1 Flow chart of simulation of three-line satellite images for detecting cloud top height

2.1 云检测

选取 DMSP/OLS 的微光影像作为模拟的对象,主要是因为夜间对云的观测具有重要的意义(对低云、大雾以及其他恶劣性天气的监测等).由于 DMSP/OLS 通道有限,只包含微光以及红外两个通道,所以采取 Alan 等^[13]提出的一种自动化动态阈值算法(DTCM 法)对夜间微光图像经处理得到的正射影像进行云检测.首先将正射图像进行分块处理,然后对每块图像的像素进行直方图统计,根据不同情况,直方图中会出现由无云像元以及有云像元所形成的两个或者多个峰,如图 2 所示.大量实验研究表明,该两个峰之间的直方图曲线最大变率处,为判断有云像元的最佳阈值.图 2 中虚线 L1 指示两个峰之间的直方图曲线最大变率.

如图 2 所示,在某块区域图像的统计直方图中,在最后部分出现一个峰,这一峰值的出现主要是存在灯光的原因.在进行云检测时要充分考虑此现象,即在后两个高峰之间,选取一个合理的阈值作为云检测的上限,如图 2 中的 L2 所示,剔除灯光影响.图 3 给出云检测的结果,图 3(a)为截取的包含一些灯光点的微光影像,图 3(b)为进行云检测之后的影像,可以看出,在云掩膜中含有灯光点所引起的误判.经过消除灯光点后,最终得到如图 3(c)中所显示的云掩膜.

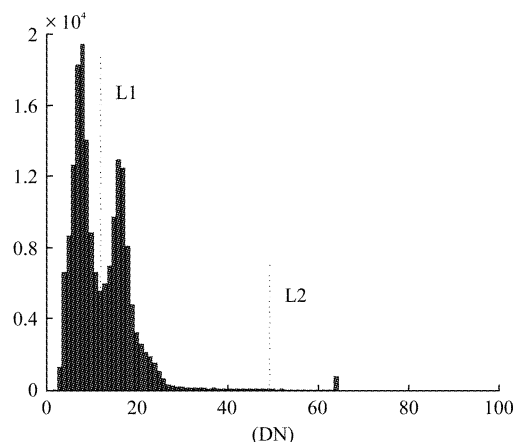


图2 某块微光图像的灰度直方图
Fig. 2 Gray histogram of a piece of low-light image

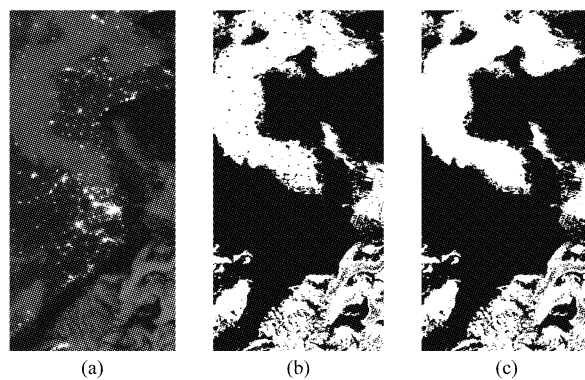


图3 微光图像云检测结果 (a) 微光云图, (b) 经过 Alan 方法的云检测结果, (c) 消除灯光影响后的云掩膜
Fig. 3 Cloud detecting result of low-light image (a) A low-light image, (b) cloud detection using Alan's method, and (c) cloud mask via light eliminating

2.2 高程模拟

微光影像没有包含云顶高信息,并且云点不像地面点有固定的高程信息,因此,难以通过现场测量的方法获取,所以要得到三线阵卫星影像,就必须对云顶高进行模拟.对云顶高进行模拟时,可以采取以下两种方法:

(1) 首先在图像中设定网格点,在有云区域的网格点中选取采样点设置高度值,再通过二维插值方法对其进行插值模拟获取云块的高程信息.在非云区域,高度设零.

(2) 在有云区域,直接用函数模拟云顶的高程信息,用函数模拟可使云顶高较前者更平滑.其它区域同上.

$$G(x, y, \sigma) = A e^{-[(x-x_0)^2/2\sigma_x^2 + (y-y_0)^2/2\sigma_y^2]} \quad (5)$$

本文采用的是第二种方法,函数为式(5)的高斯分布函数. A 为幅值, (x_0, y_0) 为中心, σ_x, σ_y 为 $x,$

y 的方差. 因云顶的高程信息是变化多端的, 所以通过对高斯分布函数的平移和尺度变换, 即改变 (x_0, y_0) 、 σ_x 和 σ_y , 模拟出多个峰的云顶.

2.3 外方位元素模拟

对三线阵立体影像测量而言, 每一时刻的面元阵列的外方位元素是不同的, 外方位元素与时间的依赖关系可以通过多项式拟合或者傅里叶级数来拟合确定^[14], 如式(6)、式(7).

$$\begin{aligned} X_s &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots, \omega = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 + \dots \\ Y_s &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots, \varphi = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 + \dots, \quad (6) \\ Z_s &= c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots, \kappa = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_s &= a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \\ Y_s &= b_0 + b_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \\ Z_s &= c_0 + c_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + c_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \\ \omega &= d_0 + d_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + d_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \\ \varphi &= e_0 + e_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + e_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots, \quad (7) \\ \kappa &= c_0 + c_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + c_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \end{aligned}$$

式中 $(X_s, Y_s, Z_s, \omega, \varphi, \kappa)$ 为三线阵立体相机的六个外方位元素, φ, ω, κ 是相机的三个姿态角信息, X_s, Y_s, Z_s 是摄站坐标信息, T 为其推扫周期. 由于三线阵运行方向沿着 x 轴方向, 所以可将外方位元素与 t 的关系转换为其与扫描线坐标 x 的关系.

为了简化实验, 根据文献[14]中在卫星飞行稳定条件下选择的参数, 将外方位元素中的三个相机姿态角设置为固定值, 摄站坐标根据当前阵列的中心和卫星的飞行高度来设定.

2.4 云速模拟

不同于地面固定点, 云是随时间而不断运动的, 所以在模拟三线阵卫星影像时, 必须将云的移动因素考虑在内. 在较短时间内, 可将云看作是匀速移动的. 所以, 在模拟时将云速设定为固定值. 如图7(a)所示, 本文只考虑红色箭头方向所示, 即在沿轨两个方向上云的移动.

2.5 影像坐标求解

影像坐标求解主要利用共线方程求解, 通过已知云点坐标求解其在影像坐标系中的坐标. 在坐标求解的过程中, 必须将云速移动考虑在内. 即在该时间段内, 将云速移动转换为像素点坐标的移动, 将此

平移对所求像素点坐标进行纠正, 获取最终的影像坐标.

2.6 灰度赋值

通过坐标求解, 可得到正射影像上每个像素点所对应的前视、正视以及后视影像的坐标. 如图4所示, 左图代表正射影像, 右图为正射影像上每个像素点经过计算之后, 落到三线阵卫星影像上的位置. 从图中可以看出, 所得位置坐标很少能正好落在影像的栅格点上. 由于高斯加权可以避免栅格点周围没有影像点或者影像点过多给灰度值赋值带来的影响, 并且使远离栅格点的影像点灰度值贡献较小, 所以本文利用落在栅格点周围的影像点通过高斯加权的方式来对三幅图像进行赋值, 如式(8)所示.

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^N F(x_i, y_i) e^{-[(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2]/2\sigma^2}, \quad (8)$$

式中 $G(x, y)$ 为栅格点 (x, y) 的灰度值, N 为高斯窗范围内所包含的像素点的个数, $F(x_i, y_i)$ 为落在栅格点周围的影像点 (x_i, y_i) 的灰度值, σ 是高斯窗的半径. 假设对图4中栅格点 O 进行赋值, 则取半径为 σ 的圆 E 范围内包含的两个影像点, 通过高斯加权得到该点的灰度值.

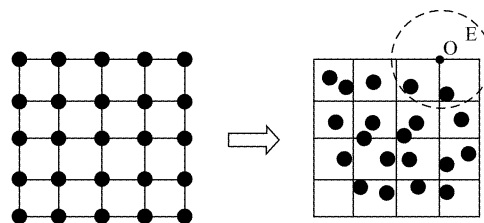


图4 灰度赋值示意图
Fig. 4 The diagram of gray assignment

3 云顶高计算

利用三线阵卫星影像计算云顶高的流程如图5所示. 首先, 选取所要求解的特征区域; 其次, 对前视影像和后视影像进行影像匹配, 经过质量控制, 获取匹配对; 然后, 在前视影像和后视影像中, 分别求解在获取匹配点时卫星的外方位元素; 最后, 通过立体像对前方交会得到云顶的高度信息.

3.1 影像匹配

近年来, 基于特征变换的算法^[15-18]被广泛应用于遥感影像的匹配上. Lowe 总结了现有的基于不变量技术的特征检测方法, 提出了基于尺度空间的并对图像缩放、旋转甚至仿射变换保持不变性的图像局部特征描述算法- SIFT (Scale Invariant Feature

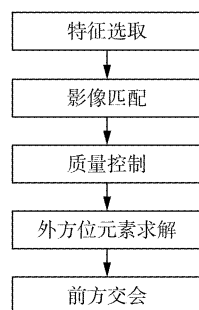


图5 云顶高度计算流程图
Fig. 5 The flow chart of cloud top height retrieval

Transform)^[19].

根据三线阵影像特点,提出角度约束和双向匹配对 SIFT 算法进行改进.角度约束即利用匹配点连线所成角度一致性的规律,将角度每 5° 为一量化阶梯, 360° 共形成 72 个量化等级,对匹配点连线的角度进行直方图统计,将其中最大值所对应的角度范围作为门限,如图 6 所示.若匹配点连线角度在此角度范围之外,则去除匹配点,由此得到一组匹配.角度约束提高了匹配的正确率.同理,将参考图像与目标图像调换重新进行匹配,得到另一组匹配.只有同时出现在两组匹配中的匹配,才被选定为正确的匹配,实现双向匹配.双向匹配进一步提高了匹配正确率.

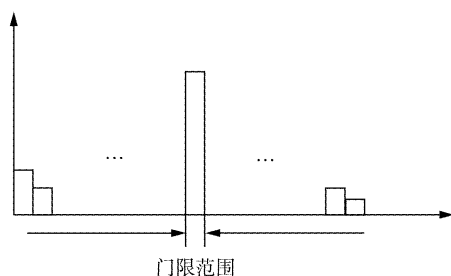


图6 角度约束门限范围选取示意图
Fig. 6 Schematic diagram of threshold range selected by angular constraint

利用 SIFT 匹配算法对前视影像和后视影像进行匹配,当优化匹配阈值为 0.3 时,得到正确匹配对数为 222 对,误匹配对数为 17 对;但是,当利用改进的 SIFT 算法进行匹配时,正确匹配对数为 209 对.由此可见,改进的匹配算法大幅提高了匹配的正确率.

3.2 前方交会法

假设由影像匹配的算法得到云点 j 在前视、正视和后视影像上的同名像点在图像坐标系中的坐标为 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 和 (x_C, y_C) ,按照摄影测量前方

交会式(9)、式(10),计算得到相应云点 j 在地面坐标系中的坐标 (X_j, Y_j, Z_j) ,从而可得到 j 的高度信息.

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{s_1} \\ Y_{s_1} \\ Z_{s_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 X_1 \\ N_1 Y_1 \\ N_1 Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{s_2} \\ Y_{s_2} \\ Z_{s_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_2 X_2 \\ N_2 Y_2 \\ N_2 Z_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} N_1 = \frac{B_x Z_2 - B_z X_2}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} \\ N_2 = \frac{B_x Z_1 - B_z X_1}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 为像点分别在左像空间辅助坐标系以及右像空间辅助坐标系的坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 、 $(X_{s_2}, Y_{s_2}, Z_{s_2})$ 分别为左摄站点和右摄站点在地面坐标系中的坐标, N_1 、 N_2 为左右投影光线点投影系数, (B_x, B_y, B_z) 为左、右摄站点坐标的差,即摄影基线分量.

4 三线阵云立体探测卫星影像模拟实验

4.1 三线阵卫星影像模拟

本次实验针对测量云顶高的特点,根据实际情况设定三线阵相机参数如下:

- 基高比 0.6;
- 卫星飞行高度 800 km;
- 面阵探测器像元尺寸 $14 \mu\text{m}$;
- 正视焦距 $f_v = 44.8 \text{ mm}$;
- 正视与前视、后视夹角 16.5° ;
- 前视、后视焦距 $F_1 = F_r = f_v / \cos \alpha$;
- 云速沿轨方向: $V_{\text{cloud}} = \pm 10 \text{ m/s}$;

实验利用 DMSP/OLS 上的微光图像,通过插值获取分辨率为 250 m 的正射影像如图 7(a) 所示.模拟的云顶高度图如图 8 所示,通过图 1 中所示的模拟流程,不考虑云速移动时,模拟得到前视、正视以及后视影像,如图 7(b)、(c)、(d) 所示.考虑云速 $V_{\text{cloud}} = \pm 10 \text{ m/s}$ 时的卫星影像与不考虑云速时的卫星影像区别不大,只是在像素上的微量移动,所以不再通过影像形式给出.

4.2 三线阵卫星影像高度计算

将模拟所得前视、后视影像通过影像匹配,选取在云掩膜区域中的匹配点,利用前方交会法,计算云顶高度.将其与模拟的云顶高度进行对比分析,差值如图 9 所示,不考虑云移动时,平均绝对误差为 203 m;当云沿轨方向移动且 $V_{\text{cloud}} = 10 \text{ m/s}$ 时,平均绝对误差为 1 154 m;当云沿轨方向移动且 $V_{\text{cloud}} =$

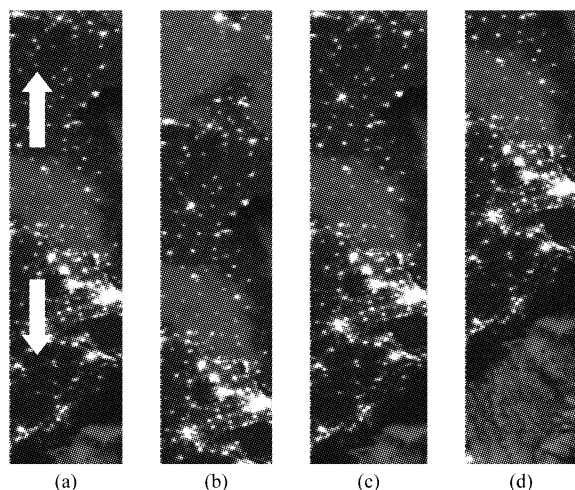


图7 正射影像与模拟影像(a)正射影像,(b)前视影像,(c)正视影像,(d)后视影像

Fig. 7 Three line satellite images of simulation (a) The orthoimage, (b) the forward-looking image, (c) the vertical-looking image, and (d) the backward-looking image

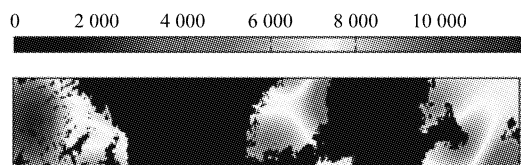


图8 模拟的云顶高度图

Fig. 8 The simulated cloud top height

10 m/s 时,平均绝对误差为 1 034.7 m.

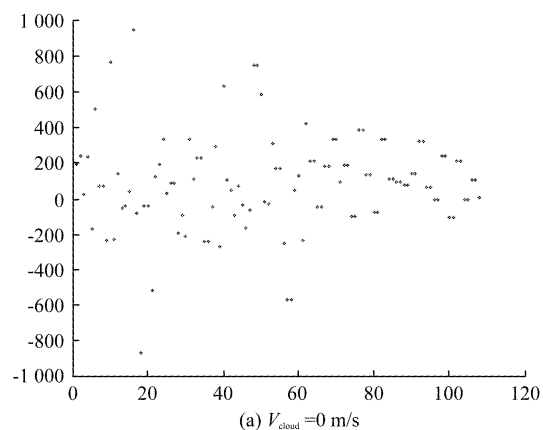
5 误差分析

5.1 误差影响因素分析

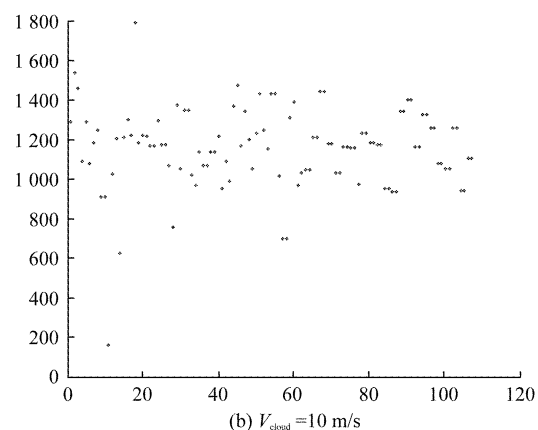
利用三线阵卫星影像获取云顶高的测高精度主要受到匹配精度以及云移动的制约. 首先,假定前视影像和后视影像对目标同时探测,即云是静止的,则立体相机对云顶的测高误差可以归结为几何关系以及对立体像对的匹配误差. 设 f 为探测器焦距, H 和 B 分别为立体摄像的摄影航高和基线距离; h 为云顶高度, τ_p 和 θ 为沿着卫星飞行方向立体像对的匹配误差像元以及面阵的像元尺寸, σ_s 为云的测高误差. 根据测量原理可得到云的测高误差如式(11)^[20], 由于定位、卫星位置及时间误差等系统误差在不同卫星上误差不同, 所以此公式计算的云顶高误差没有包含此类误差.

$$\sigma_s = \frac{\tau_p \theta (H - h) / f}{B} H \quad (11)$$

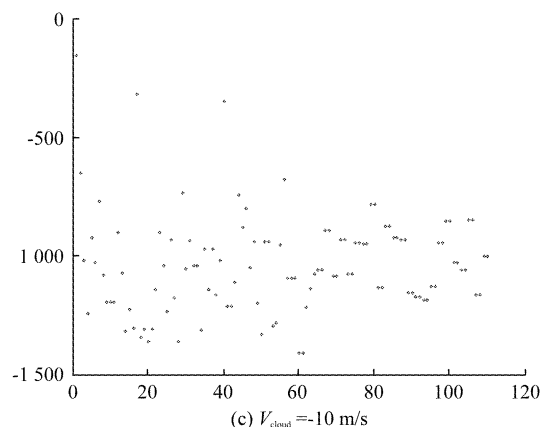
由于从不同角度对同一云点的观测时间不同步, 而且云在不断运动, 所以云的移动给测高精度带



(a) $V_{\text{cloud}} = 0$ m/s



(b) $V_{\text{cloud}} = 10$ m/s



(c) $V_{\text{cloud}} = -10$ m/s

图9 经过前方交会得到的高度值与原模拟的高度值之间的误差图

Fig. 9 Errors between the simulated heights and the computed one after forward intersection

来误差如图 10 所示, 根据几何关系, 该误差可由式(12)表示.

$$\sigma_m = \frac{V(H - h)}{\sqrt{\frac{G \cdot M}{R + H}}} \quad (12)$$

最终的测高误差可由上述两种误差的中误差计算, 如式(13).

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_m^2} \quad (13)$$

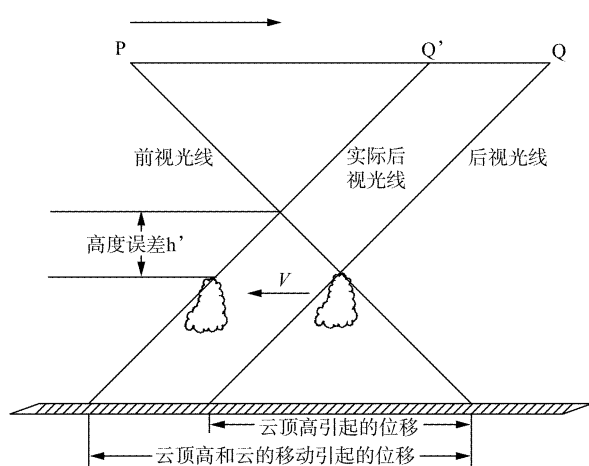


图 10 云的移动引起云顶测高误差示意图

Fig. 10 The diagram of the cloud top height error caused by cloud motion

将三线阵模拟参数代入式(13),并假定匹配精度为 0.5 个像素,在云速为 0 m/s、10 m/s 以及 20 m/s 的情况下,可得云顶测高误差如表 1 所示。

表 1 不同云速下的测高误差(单位:m)

Table 1 Error in cloud top height under different cloud motion (unit: m)

云速	0 m/s	10 m/s	20 m/s
测高误差	208.3	1 053.7	2 076.3

从表中可以看出:

(1) 通过模拟卫星影像计算所得云顶测高误差与表中云顶测高误差相吻合。通过模拟卫星影像所得云顶测高误差:当云静止不动时,所得云顶测高误差为 203 m;当云沿轨以 10 m/s、-10 m/s 的速度移动时,云顶测高误差分别为 1 054 m、1 034.7 m。表中通过理论分析所得云顶测高误差:当云静止不动时,云顶测高误差为 208.3 m;当云以 10 m/s 的速度移动时,测高误差为 1 053.7 m。

(2) 随着云的移动速度的不断增大,测高误差成倍增长,从而给测高精度带来了较大影响。据统计,对流层中的平均风速最高可达到 20 ~ 30 m/s,从而对该方法探测云顶高带来较大测高误差。

5.2 云移动误差补偿

如何消除云移动对测高带来较大影响,本文提出了一种利用云迹风来消除云顶测高误差的方法。

假设前视光线观测到该云点时云点在地面坐标系中的坐标为;当后视光线观测到该云点时,其地面坐标变为。根据摄站点、像点、地面点三点共线,有公式:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{X_j - X_{s1}}{X_1} = \frac{Y_j - Y_{s1}}{Y_1} = \frac{Z_j - Z_{s1}}{Z_1} \\ N_2 = \frac{X_j + \Delta X_j - X_{s2}}{X_2} = \frac{Y_j + \Delta Y_j - Y_{s2}}{Y_2} = \frac{Z_j + \Delta Z_j - Z_{s2}}{Z_2} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得出计算地面点公式:

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{s1} \\ Y_{s1} \\ Z_{s1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 X_1 \\ N_1 Y_1 \\ N_1 Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{s2} \\ Y_{s2} \\ Z_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_2 X_2 \\ N_2 Y_2 \\ N_2 Z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据式(15)可得:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{(B_x - \Delta X_j) Z_2 - (B_z - \Delta Z_j) X_2}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} \\ N_2 = \frac{(B_x - \Delta X_j) Z_1 - (B_z - \Delta Z_j) X_1}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} \end{cases} \quad (16)$$

式(15)、式(16)为推导的移动目标的前方交会公式,要消除云移动对计算带来的影响,需计算出云在此段时间内的位移。根据目前对云移动的探测方法,本文提出利用云迹风消除云移动带来的测高误差。该方法获取云顶高流程见图 11,可分为以下几步:

(1) 在前视影像中选取所要匹配的云区域。

(2) 利用匹配技术对前视影像和后视影像进行影像匹配,获取同名像点或立体像对。

(3) 选取对应时刻连续的静止卫星影像 1 与静止卫星影像 2,利用前视影像中云区域的位置信息,确定静止卫星影像 1 的风速反演范围。在此范围内,利用匹配技术对静止卫星影像 1 与静止卫星影像 2 进行影像匹配,获取静止卫星影像 1 范围内所对应的同名像点。

(4) 根据步骤 3 所获取的同名像点,利用云迹风反演算法反演该范围内的风速和风向信息。

(5) 利用步骤 2 中所获取的同名像点,确定获取每组像对所需时间间隔,然后根据步骤 4 中所得的风速与风向信息,计算云点位移。

(6) 将(5)中计算的云点位移带入,获取最终的云顶高度信息。

上述算法中所用的静止卫星影像根据三线阵卫星影像特性的不同而不同。例如,若三线阵卫星影像利用微光通道在夜间对云进行探测,则静止卫星影像利用红外通道资料对风速风向进行反演。在不考虑系统误差的情况下,上述算法消除了云的移动给云顶测高带来的影响,所计算得到的云顶高测高误差仅是由匹配精度所造成的。根据上述分析可知,由匹配精度所带来的误差仅为 208 m。

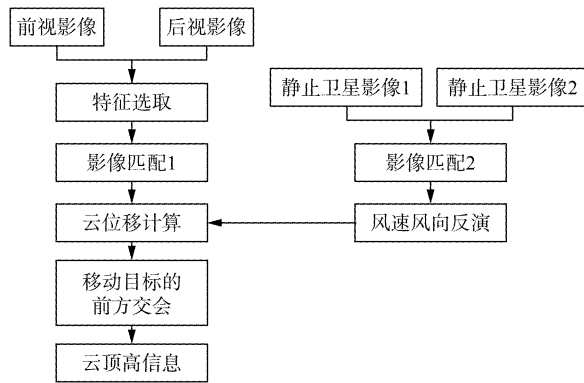


图 11 云顶高测高误差修正流程图

Fig. 11 The flow chart for eliminating error in the cloud top height caused by cloud motion

6 结论

采用三线阵立体测绘原理,提出了基于三线阵卫星影像的云顶高探测方法,探索了一种获取夜间低照度条件下云顶高参数的新途径,详细分析了三线阵立体探测云顶高的测高误差,并提出了一种误差纠正方法. 研究表明,三线阵立体探测有较好的应用前景. 需要指出的是,当无地面控制点时,外方位元素只能依靠星上测定. 受卫星传感器测角精度的限制,会使三线阵立体探测受到一定影响. 对于处于起步阶段的三线阵探测器立体云探测方法,还有一些特殊问题有待进一步深入研究.

REFERENCES

- [1] YAN Wei, HAN Ding, LU Wen, *et al.* Research of cloud-base height retrieval based on COSMIC occultation sounding data[J]. *Chinese Journal of Geophysics* (严卫, 韩丁, 陆文, 等. 基于 COSMIC 掩星探测资料的云底高反演研究. *地球物理学报*), 2012, **55**(1): 1-15.
- [2] Hasler A F. Stereographic observations from geosynchronous satellites; an important new tool for the atmospheric sciences[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1981, **62**:194-212.
- [3] Fujita T T. Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms[J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 1982, **60**: 355-368.
- [4] Hasler A F, Morris K R. Hurricane structure and wind fields from stereoscopic and infrared satellite observations and radar data[J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**: 709-727.
- [5] Hasler A F, Strong J, Woodward R H, *et al.* Automatic analysis of stereoscopic satellite image pairs for determination of cloud-top height and structure[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1991, **30**:257-281.
- [6] Mack R A, Hasler A F, Adler R F. Thunderstorm cloud-top observations using satellite stereoscopy[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**:1949-1964.
- [7] Hollars S, Fu Q, Comstock J, *et al.* Comparison of cloud-Top height retrievals from ground-based 35 GHz MMCR and GMS-5 satellite observations at ARM TWP manus site[J]. *Atmos. Res.*, 2004. **72**(1): 169-186.
- [8] Bowen R A, Fusco L, Morgan J, *et al.* Operational production of cloud motion vectors (satellite winds) from Meteosat image data; Use of data from meteorological satellites [R]. *European Space Agency*(ESA No. 143). 1979; 65-75.
- [9] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances; Application to METEOSAT[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1982. **21**: 384-393.
- [10] Smith W L, Platt C M R. Comparison of Satellite-deduced cloud heights with indications from radiosonde and ground-based laser measurement[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1979. **17**: 1796-1802.
- [11] Hawkinson J A, Fleltz W, Ackerman S A. A comparison of GOES sounder and cloud lidar- and radar-retrieved cloud-top heights [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 2005. **44**: 1234-1242.
- [12] Simpson J, McIntire T, Jin Z H, *et al.* Improved cloud top height retrieval under arbitrary viewing and illumination conditions using AVHRR data[J]. *Remote Sens Environ.*, 1997. **72**: 95-110.
- [13] Alan V, Willian J. An automated dynamic threshold cloud-masking algorithm for daytime AVHRR images over land [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, **40**(8): 1682-1694.
- [14] Wu J. Triplet evaluation of stereo-pushbroom scanner data [A]. *Xv. ISPRS com. 111 congress*, Rio de Janeiro, 1984.
- [15] XU Jian-Bin, HONG Wen, WU Yi-Rong. The study of remote sensing images matching method based on wavelet transform and genetic algorithms[J]. *Journal of Electronics & Information Technology* (徐建斌, 洪文, 吴一戎. 基于小波变换和遗传算法的遥感影像匹配方法的研究. *电子与信息学报*), 2005, **27**(2): 283-285.
- [16] CHEN Ying, LIN Yi. Image matching and translation based on lifting scheme wavelet[J]. *ACTA GEODAETICA et CARTOGRAPHICA SINICA* (陈鹰, 林怡. 基于提升小波的影像变换与匹配. *测绘学报*), 2006, **35**(1): 19-23.
- [17] WU Yi-Quan, CHEN Sa. Multi-source remote sensing image matching based on Contourlet transform and Tsallis entropy[J]. *Journal of Remote Sensing* (吴一全, 陈飒. Contourlet 变换和 Tsallis 熵的多源遥感图像匹配. *遥感学报*), 2010, **14**(5): 899-904.
- [18] WU Yi-Quan, CHEN Sa. Remote sensing image matching based on Contourlet—domain Krawtchouk moments and improved particle swarm optimization[J]. *Journal of Astronautics* (吴一全, 陈飒. 基于 Contourlet 域 Krawtchouk 矩和改进粒子群的遥感图像匹配. *宇航学报*), 2010, **31**(2): 515-520.
- [19] Lowe D G. Distinctive image features from scale - invariant keypoints[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.
- [20] HUANG Yun-Xian, MA Shuo, BAI Heng. Error analysis of cloud-top height detection by stereoscopic observation [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (黄云仙, 马烁, 白衡. 立体观测法探测云顶高度的误差分析. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 43-48.