

基于岭估计的三线阵 CCD 影像外方位元素去相关性方法研究

甘田红, 闫利

(武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

The Study of Ridge-estimation-based Decorrelation Method for Three Line Scanner CCD Image's Exterior Orientation Elements

GAN Tian-hong, YAN Li

摘要: 线阵 CCD 技术已广泛应用于高分辨率卫星遥感成像, 但是其外方位元素的强相关性使得法方程的解算出现病态。在深入分析三线阵影像外方位元素相关性质的基础上, 讨论岭估计和广义岭估计这两种方法, 并采用一个 Ikonos 立体像对和一套模拟卫星影像进行试验, 结果表明岭估计能很好地克服定向参数之间的相关性, 广义岭估计则在零特征值不是太多的情况下, 可得到比岭估计更好的解算精度。

关键词: CCD 影像; 外方位元素; 相关性; 岭估计

三线阵 CCD 影像的成像方式灵活, 可方便地获取同轨立体影像, 分辨率高, 因而成为卫星对地观测的一个新发展。但同时, 其长焦距、窄视场角的特点又使得传感器的外方位元素之间存在着极强的相关性, 这就导致了法方程的病态, 当法方程中系数和常数项存在舍入误差而产生微小变化时, 会引起解的很大差异。这时虽然传统的最小二乘估计仍是线性无偏的估计, 但已不再是最优估计, 其均方误差

(MSE) 很大, 这时就有必要采取措施克服定向参数间的强相关性。

一、三线阵 CCD 影像(TLS) 外方位元素相关性分析

TLS 影像外方位元素的相关性体现在线元素和角元素间的相关。从旋转矩阵出发

$$\begin{matrix} X_A - X_S & \cos & 0 & -\sin & 1 & 0 & 0 & \cos & -\sin & 0 & x \\ \hline Y_A - Y_S & = & 0 & 1 & 0 & 0 & \cos & -\sin & \sin & \cos & 0 & y \\ Z_A - Z_S & \sin & 0 & \cos & 0 & \sin & \cos & 0 & 0 & 0 & 1 & -f \end{matrix} \quad (1)$$

由于 \cos , \sin , \sin 都是小值, 在式(1)中, 如果只考虑小值一次项, 则有

$$\begin{aligned} X_S &= X_A - (x - y + f) \\ Y_S &= Y_A - (x + y + f) \\ Z_S &= Z_A - (x + y - f) \end{aligned} \quad (2)$$

特别地, 对于正视影像来说, 有 $y = 0$, 如果认为外方位元素是随 y 作线性变化的, 那么

$$\begin{aligned} X_{S0} + \dot{X}_{sy} &= (X_A - x - f) - f \dot{y} \\ Y_{S0} + \dot{Y}_{sy} &= (Y_A - x - f) - (x + f) \dot{y} \\ Z_{S0} + \dot{Z}_{sy} &= (Z_A - x + f) - x \dot{y} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, X_S, Y_S, Z_S 为外方位线元素; $\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s$ 为外方

位角元素; $X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s$ 为中央扫描行外方位元素; $\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s$ 为其一阶变化率; X_A, Y_A, Z_A 为地面点坐标; x, y 为相应的像点坐标; f 为相机焦距; m 为比例尺分母。

在传统的航空摄影中, 因为相机焦距短, 线元素和角元素的相关性体现得不是很明显。但是对于星载 TLS 影像来说, 在飞行方向上为近似的平行投影, 在扫描行方向虽为严格的中心投影, 但由于传感器的长焦距和窄视场角, 焦距 f 相对于像点坐标 x, y 来说就很大, 此时摄影光线更接近于平行投影, 线元素和角元素的相关性被忽略不计。

从式(3)可以看出, 相关性主要体现在 X_S 与 \dot{X}_s ; Y_S 与 \dot{Y}_s ; Z_S 与 \dot{Z}_s 的相关性, 尤其是 X_S 与 \dot{X}_s 、 Y_S 与 \dot{Y}_s 的线性相关更为突出, 此外还表现在一

阶变化率之间的相关性。

二、基于岭估计和广义岭估计的定向参数相关性的克服方法

1. 岭估计

岭估计方法是从减少均方误差的角度出发而提出的一种有偏估计。

取: $0 < k < \infty$, 称

$$X(k) = (N + kE)^{-1} B^T PL \quad (4)$$

为参数 X 的岭估计。式中 k 为岭参数。对于 TLS 影像来说, 未知数 $t = 12$, 其中 6 个参数为中央扫描行的外方位元素改正数的岭估计值, 另外 6 个参数为外方位元素一阶变化率改正数的岭估计值。

均方误差计算公式为

$$MSE(X(k)) = \sum_{i=1}^t \frac{\sigma_i^2}{(\sigma_i^2 + k)^2} + k^2 \sum_{i=1}^t \frac{\sigma_i^2}{(\sigma_i^2 + k)^2} \quad (5)$$

式中, $\sigma_i^2 = QX$ 。

Q 是由 N 的特征向量所构成的正交矩阵。特别地, 当 $k = 0$ 时, 式(5) 退化成了最小二乘估计。

岭参数 k 的确定是问题解决的关键, 由于 σ_i^2 和 σ_0^2 未知, 式(5) 不能在 $MSE(X(k)) = \min$ 的原则下用求极值的方法解出 k 。可采用最小二乘估计方法先求出 X 和验后单位权方差 σ_0^2 , 然后再对式(5) 求导并令其等于零, 解得

$$k = t \sigma_0^2 / \sum_{i=1}^t \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2} = \sigma_0^2 / (\sum_{i=1}^t \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2} / t) \quad (t = 12) \quad (6)$$

由于初值 σ_0^2 和 σ_i^2 是近似值, 所以 k 的计算需要一个迭代过程。将 $k^{(1)}$ 代入误差方程式, 计算 $X(k)^{(1)}$ 和验后单位权方差 $\sigma_0^{(2)}$ 。对于线性形式的误差方程, 迭代过程中正交阵 Q 始终不会发生变化。而 TLS 的成像方程是非线性的, 误差方程本身已是泰

勒展开形式, 系数阵 N 会随着 X 的初始值的改变而发生变化, 所以正交阵 Q 每次都要重新计算。将 $X(k)^{(1)}$ 作为误差方程新的初始值, 重新计算出 $N^{(2)}$, $Q^{(2)}$, 再计算 $k^{(2)}$, $X(k)^{(2)}$... 直到解相对稳定, 外方位元素的变化率小于规定的阈值时为止。

2. 广义岭估计

X 的广义岭估计为

$$X(k) = (B^T PB + QKQ^T)^{-1} B^T PL \quad (7)$$

可以看出, 当 K 为常数对角阵 kE 时, 上式就成了岭估计的形式。

广义岭估计的均方误差为

$$MSE(X(k)) = \sum_{i=1}^t \frac{\sigma_i^2}{(\sigma_i^2 + k_i)^2} + \sum_{i=1}^t \frac{k_i \sigma_i^{*2}}{\sigma_i^2 + k_i} \quad (8)$$

式(8) 对 k_i 求偏导数, 并令其等于零, 则有

$$k_i = \sigma_i^2 / \sigma_i^{*2}, i = 1, 2, \dots, t \quad (9)$$

接下来的初值选择和迭代过程同岭估计。

三、算法试验与结果分析

试验一: Ikonos 卫星影像试验。本次试验选用了两幅北京清河地区的 Ikonos 全色卫星影像, 这两幅影像构成了一个立体像对。面积约 20 km^2 , 影像上有 25 个控制点。

外方位元素的初始值采用一个粗略的近似, 所以岭估计运算前先应用最小二乘法进行迭代计算。取经过最小二乘法二次迭代后的值作为初始值, 进行岭估计运算。广义岭估计运算则是取了一次最小二乘迭代的结果作为初始值, 运算结果分别见表 1 和表 2。

表 1 岭估计方法的点位精度情况

迭代次数		1	2	3	4	5	6	pixel
中误差 m_0	左像	8.156 0e+004	3.172 8e+004	38.505 5	2.961 8	2.961 5	2.961 5	
	右像	4.147 4e+004	5.275 0e+004	119.685 2	2.964 5	2.963 7	2.963 7	
均方误差 MSE	左像	9.398 6e+011	6.248 4e-004	2.304 2e-010	1.642 3e-019	2.859 6e-035	8.662 9e-067	
	右像	2.342 9e+012	0.001 9	2.234 4e-009	1.569 5e-018	2.419 0e-032	5.729 6e-060	
像点 m_x	左像	3.153 8e+004	2.001 9e+004	24.798 4	0.702 8	0.702 9	0.702 9	
	右像	4.129 1e+004	6.566 6e+003	117.885 5	1.969 7	1.967 7	1.967 7	
像点 m_y	左像	7.521 6e+004	2.461 5e+004	29.457 0	2.877 2	2.876 9	2.876 9	
	右像	3.892 3e+003	5.233 9e+004	20.677 9	2.215 6	2.216 3	2.216 3	
K 值	左像	0.292 6	1.832 2e+010	5.475 4e+012	4.765 8e+016	3.612 4e+024	2.075 5e+040	
	右像	0.093 4	9.891 2e+009	5.376 5e+012	1.525 3e+016	1.229 5e+023	7.989 1e+036	

表2 广义岭估计方法的点位精度情况

迭代次数		1	2	3	4	5	6
中误差 m_0	左像	1.535 0e+005	8.156 0e+004	3.172 8e+004	1.029 3e+005	8.351 2e+005	4.860 3e+005
	右像	1.535 0e+005	4.147 4e+004	5.275 0e+004	7.847 1e+004	1.399 5e+004	3.068 7e+003
均方误差 MSE	左像	6.082 4e+010	2.728 0e+011	3.128 4e+011	4.790 2e+012	4.354 7e+012	8.163 1e+014
	右像	4.428 0e+010	2.208 8e+011	3.201 6e+010	6.552 2e+009	2.523 6e+012	2.523 6e+012
m_x	左像	1.437 9e+005	3.153 8e+004	2.001 9e+004	3.629 6e+004	4.967 1e+005	1.128 2e+005
	右像	1.437 9e+005	4.129 1e+004	6.566 6e+003	3.410 2e+004	4.362 3e+003	1.051 0e+003
m_y	左像	5.373 2e+004	7.521 6e+004	2.461 5e+004	9.631 7e+004	6.713 4e+005	4.727 6e+005
	右像	5.373 2e+004	3.892 3e+003	5.233 9e+004	7.067 3e+004	1.329 8e+004	2.883 1e+003

试验二:模拟影像的试验。模拟卫星飞行状态得到了一套模拟影像,在参数设置时使其相关的参数不是太多。选择25个控制点和20个检查点,均

采用最小二乘二次迭代后的结果作为初值,进行岭估计和广义岭估计试验,结果见表3、表4。

表3 模拟影像的岭估计精度情况

迭代次数		1	2	3	4	5	6
控制点 /pixel	中误差 m_0	8.994 3e+003	71.005 9	1.978 0	1.300 8	1.300 7	1.300 7
	均方误差 MSE	1.433 0e+007	0.004 8	1.522 3e-008	3.853 4e-013	2.224 5e-020	4.860 3e-052
	m_x	8.944 1e+003	37.937 7	1.697 4	1.118 2	1.118 2	1.118 2
	m_y	949.050 0	60.021 4	1.015 4	0.664 5	0.664 5	0.664 5
	K 值	4.082 6	6.957 1e+004	1.211 1e+007	1.593 6e+011	2.759 2e+019	8.271 7e+035
检查点	像方 m_x/pixel	43.308 1	1.571 7	1.188 6	1.188 6	1.188 6	1.188 6
	像方 m_y/pixel	74.431 8	0.937 5	0.689 2	0.689 2	0.689 2	0.689 2
	物方 m_x/m	150.839 5	4.760 2	3.540 8	3.540 7	3.540 7	3.540 7
	物方 m_y/m	162.055 4	7.860 2	5.907 2	5.907 0	5.907 0	5.907 0

表4 模拟影像的广义岭估计精度情况

迭代次数		1	2	3	4	5	6
控制点 /pixel	中误差 m_0	8.994 3e+003	71.005 9	2.010 0	0.559 0	0.139 4	0.035 0
	均方误差 MSE	2.377 7e+008	5.781 9e+005	1.610 8e+005	3.968 5e+004	9.895 2e+003	2.501 6e+003
	m_x	8.944 1e+003	37.937 7	1.725 4	0.481 5	0.1204	0.030 1
	m_y	949.050 0	60.021 4	1.031 2	0.284 1	0.070 2	0.017 8
检查点	像方 m_x/pixel	43.308 1	1.583 5	0.448 9	0.112 3	0.028 1	0.007 1
	像方 m_y/pixel	74.431 8	0.987 1	0.265 3	0.066 0	0.017 2	0.004 9
	物方 m_x/m	150.839 5	4.611 6	1.353 5	0.336 6	0.085 1	0.022 2
	物方 m_y/m	162.055 4	7.789 8	2.240 4	0.559 8	0.140 2	0.035 3

四、结果分析

1. 本文也采用了最小二乘法进行数次迭代试验,但精度几乎没有提高。可见最小二乘估计方法对法方程的性质十分依赖,如果法方程的性质不好,增加迭代次数也不能提高精度,此时有必要采用岭估计或广义岭估计方法。

2. 岭估计能很好地改善法方程的性质。即使法方程中有多个接近于零的特征值,如试验一,左像的12特征值当中, 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-10} , 10^{-12} 级的特征值各有一个, 10^{-14} 级的特征值有两个;右像中,

10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-10} , 10^{-12} 级的特征值各有一个, 10^{-14} 级的特征值有两个,零特征值的个数都接近一半,而且特征值的级差非常大(最大的达到了 10^{27}),依然能取得比较好的效果(见表1)。

3. 相反,在试验一中,广义岭估计并没有预期的比岭估计精度更好的效果。但这并不能说广义岭估计就不如岭估计。在试验二中,特征值的差异也很大(最大的达到了 10^{29}),12特征值中, 10^{-4} 级的特征值有一个, 10^{-9} 级的特征值有两个,但是结果显示,广义岭估计比岭估计的精度更好。可见特征值的分布情况在很大程度上决定了岭估计和广义岭

估计哪个效果更好,在零特征值不是太多的情况下,广义岭估计就比岭估计效果好。在零特征值达到待估参数个数的一半,特征值的级差又非常大的情况下, k_i 的差异也过大,起不到调节法方程态性质的效果。如在试验二中就发现,采用岭估计三次迭代以后, $|N|$ 不再约等于零,即法方程的病态得到改善,而采用广义岭估计六次迭代过程中,总有 $|N|$ $\neq 0$,这就使得 σ^2 始终不能降下来。

4. 典则参数 k_i 与特征值 λ_i 的数量级基本上是成比例的,也就是说, λ_i 很大的情况下, k_i 的数量级也较高,相反 λ_i 很小, k_i 的数量级也较低,这也就是 λ_i 级差过大就会使得广义岭估计的微调效果不能很好地起到改善法方程性质的原因。

5. 点位中误差和均方误差并没有必然的正比关系(比较表3和表4),这是由于随着 K 值的加大,估计量的压缩性也越大,在其误差减小的同时,偏移量则变大(见式(5))。

五、结束语

虽然岭估计能很好地消除外方位元素的相关性,但却是一种有偏估计,其主要作用只是改善法方程的病态,它所对应的误差方程理论上应是线性方程,而 TLS 影像的误差方程却是需要初值迭代的线性展开形式,这时,如果初值本身就存在很大的偏差,势必会影响岭估计和广义岭估计方法的效果。所以,对于 TLS 影像的外方位元素相关性的处理,如果先用最小二乘法迭代数次至其稳定,将结果作为初值,再采用岭估计或广义岭估计方法,比起用预估的初值直接进行岭估计或广义岭估计运算能起到

更好的效果。

需要特别注意的是,随着迭代次数的增加, K 值呈现出以级数增大的趋势,由于估计是有偏的,相应地估计值的偏移量也必将极大地增加。如果只一味追求最小均方误差,中误差其实并不能得到多大的改善,但估计值却越来越偏移出估计中心了。相对于岭估计来说,广义岭估计的 K 值递增就不那么明显,它在提高中误差的同时, MSE 虽然提高得不那么迅速,但是偏移情况却小得多,收敛情况也更好,这也正是在零特征值不太多的情况下,广义岭估计比岭估计优越的所在(不仅仅只体现在可得到更小的中误差)。为了有效地控制估计量的过度偏移,需要合理的选择阈值,避免进行不必要的、过多的迭代运算。

参考文献:

- [1] 崔希璋, 於宗俦, 陶本藻, 等. 广义测量平差 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2001.
- [2] 张永生, 巩凡超, 等. 高分辨率遥感卫星应用——成像模型、处理算法及应用技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 李德仁, 周月琴, 金为铄. 摄影测量与遥感概论 [M]. 北京: 测绘出版社, 2001.
- [4] 江万寿, 张剑清, 张祖勋. 三线阵 CCD 卫星影像的模拟研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(4): 414-419.
- [5] GRUEN A, ZHANG L. Sensor Modeling for Aerial Mobile Mapping with Three-Line Scanner (TLS) Imagery [A]. ISPRS Commission Symposium on Integrated System for Spatial Data Production [C]. Xi'an: [s.n.], 2002.