

卡尔曼滤波器在卫星遥感影像大地校正中的应用

梁泽环

(中科院卫星遥感地面站)

1989年12月18日收稿

摘 要

在卫星遥感图像的预处理中,通过系统校正可以基本上消除影像内部的变形误差。然而,整幅影像的大地定位误差仍然是很大的,甚至几百米至1公里的数量级。本文介绍利用少量的地面控制点,采用递归算法而不是批处理算法,大大地提高大地定位精度。在单幅影像处理中,可以重新对卫星的轨道参数与姿态参数进行估值,从而提高影像的大地定位精度。在一条轨道上连续的多幅影像中,可以预报下一幅影像的大地位置,从而对那些不具有地面控制点的影像的大地校正中,实现外推计算。文中介绍并推导了卡尔曼滤波器方程中的转移矩阵和测量矩阵的系数,并推荐用数值回归的办法求得其数值解。文中最后介绍模拟试验及算法计算结果,并讨论其优缺点。

关键词 卡尔曼滤波器 地面控制点 系统校正 递归算法 批处理算法 时间序列 自回归模型

一、引 言

卫星遥感影像预处理的重要任务是系统校正。所谓系统校正就是利用从卫星传送到地面来的关于卫星轨道数据及姿态数据,以及扫描仪器在地面成像的几何参数,对影像的逐个像元进行大地几何位置计算,从而实现几何校正的目的。系统校正处理几乎可以完全消除影像内部的变形,但是作为整幅影像在大地坐标的定位精度仍然是很粗糙的,这是由于系统校正的依据是卫星的轨道参数及姿态参数,而这些参数的测量精度又是很粗糙的。例如 SPOT 的姿态测量在 0.15° 的精度左右,单由这一项引起的影像大地定位误差就可能达到 1 公里的范围。本文讨论的问题就是利用少量的地面控制点对影像实现大地精校正,从而消除系统校正的残余误差,提高大地定位的精度。所采用的算法是应用卡尔曼滤波器的递归算法,这种算法是基于下面的假定:由于系统校正可以消除影像内部变形在 1 个象元以内^[1],因此在进行影像的大地校正时,可以把整幅影像看成是个刚体,在进行大地校正时仅仅是把整幅图像在大地坐标系中移动到它的正确位置^[2]。同时,影像中任何一点(或像元)在大地坐标系中的定位偏差,都应该等于影像中心点的定位偏差,因此,我们关心的或我们的研究对象就只是影像的中心点。在下面介绍的卡尔曼滤波方程组,例如运动方程组,都是以影像中心作为研究对象,并推导出本递归算法。我们选择 12 维的状态参数向量,包括六个轨道参数和六个姿态参数。利用一个控制点进行一次递归计

算,对 12 维的状态参数进行一次估值,影像中心点在大地坐标中的定位参数,即其经度 λ 和纬度 φ ,向着其真实值逼进一步,递归算法也就前进了一步。如此一个一个的控制点的引入,递归算法一步一步地前进,当状态参数以及影像中心点的定位参数向着其真实值收敛时,算法的回归也就完成了。由此看到,本算法的实质是利用地面控制点不断地修正或更新卫星的轨道参数和姿态参数,从而提高系统校正的精度,消除上面所提到的定位偏差。在单一的影像景幅中,利用少量的地面控制点,就可以提高该景幅的卫星轨道参数和姿态参数的估值精度,从而提高影像大地定位的估值精度。在同一轨道多幅影像的处理中,利用前面若干幅的校正结果,预报或外推到后面若干幅的上述参数的估值,从而使得那些不具备地面控制点的地区也能实现大地精校正处理^[3,4]。

二、递归算法

本递归算法所采用的方程是卡尔曼滤波器方程组。每引入一个地面控制点,递归算法前进一步,对卫星轨道诸参数、姿态诸参数,以及影像中心点的大地定位参数(也就是其经度 λ 与纬度 φ) 进行一次估值。直至上述的参数收敛于它们的真实值。由于前面所述,经过预处理后的卫星遥感影像具有刚体特性,所以我们只关心影像中心点在大地坐标系的经度和纬度参数,从而把它们与卫星的运动学特性建立关系。基本的卡尔曼滤波方程包括如下几组方程组^[5]:

1. 运动方程

$$X(K+1) = \Phi(K+1/K) \cdot X(K) + G(K) \cdot W(K) \quad (1)$$

这里的向量 $X(K+1)$ 称为状态误差向量。 $\Phi(K+1/K)$ 称为转移矩阵。 $W(K)$ 是白色噪声向量, $G(K)$ 是噪声向量系数。此处的下标 K 与 $(K+1)$ 表示利用第 K 次的估值参数进行第 $(K+1)$ 次的递归计算。

我们选择的状态误差向量是一个 12×1 维的向量矩阵,其 12 个参数正是我们所关心的六个卫星轨道参数和六个姿态参数,即

$$X(K) = [P_x(K), V_x(K), P_y(K), V_y(K), P_z(K), V_z(K), \theta_p(K), \dot{\theta}_p(K), \theta_r(K), \dot{\theta}_r(K), \theta_y(K), \dot{\theta}_y(K)]^T \quad (2)$$

此处采用的是地心直角坐标系 (OXYZ) 原点在地心, OZ 轴与地轴重合, OX 轴指向春分点(参看插图 1)。式中 P_x, P_y, P_z 和 V_x, V_y, V_z 是卫星质量中心点在地心坐标系的三个位置分量和三个速度分量。 $\theta_p, \dot{\theta}_p, \theta_r, \dot{\theta}_r, \theta_y, \dot{\theta}_y$ 分别是卫星的姿态俯仰、滚动、偏航在姿态坐标系 ($o_1p_1r_1y_1$) 的分量,包括三个角位移和三个角速率。至于扫描仪坐标系与姿态坐标系之间的不对准误差可包含在姿态的误差中。由于状态误差向量是一个 12×1 维的向量,此处的 $\Phi(K)$ 应该是一个 12×12 维的向量矩阵,其元素的推导极其烦琐,可用分块矩阵,分别由卫星动力学和姿态动力学的分量方程求得。当卫星在轨道运行时,可以看成是个保守系统,其动力学运动方程可用下式表示:

$$\frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} + \omega_0^2 \cdot \bar{r} = 0 \quad (3)$$

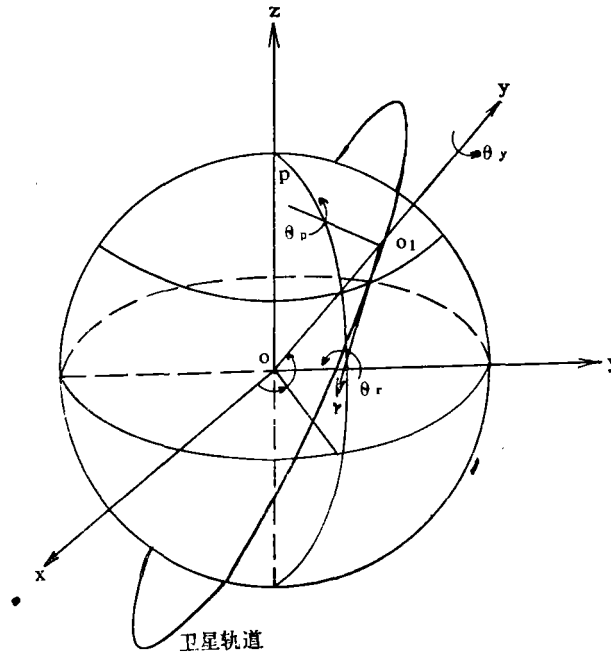


图 1 地心坐标系 OXYZ 姿态坐标系 o₁p₁r₁

Fig. 1 Coordinate System of Earth' center oxyz Coordinate System of Attitude o₁p₁r₁

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k} \tag{4}$$

此处 \vec{r} 是卫星质量中心点的位置向量, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 分别是地心坐标系 (OXYZ) 三个坐标轴的单位向量, ω_0 是卫星运行的轨道圆频率。为了方便, 可将 (3) 式分解为 3 个标量方程, 以 x 轴为例, 可有

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \tag{5}$$

可求得转移矩阵 $\Phi(K + 1/K)$ 中的 4 个元素的表达式分别如下,

$$\Phi_{1,1}(K + 1/K) = \cos[\omega_0(t_K + 1)/t_K] \tag{6}$$

$$\Phi_{1,2}(K + 1/K) = \frac{1}{\omega_0} \cdot \sin[\omega_0(t_K + 1/t_K)] \tag{7}$$

$$\Phi_{2,1}(K + 1/K) = -\omega_0 \cdot \sin[\omega_0(t_K + 1/t_K)] \tag{8}$$

$$\Phi_{2,2}(K + 1/K) = \cos[\omega_0(t_K + 1/t_K)] \tag{9}$$

此处关于 Φ 的下标分别表示 Φ 的矩阵中的行列元素, 例如 Φ_{12} 就是矩阵中第 1 行第 2 列元素。由于我们讨论的是时间序列, 因此应以时间 t_K 取代 K 。

同样, 从姿态动力学出发, 可有以下式姿态动力学方程,

$$\left. \frac{d\bar{\theta}}{dt} \right|_{\text{惯性坐标系}} = \left. \frac{d\bar{\theta}}{dt} \right|_{\text{姿态坐标系}} + \bar{\omega}_0 \times \bar{\theta} \tag{10}$$

此处 $\bar{\theta}$ 是姿态误差角向量, 它包括俯仰, 滚动, 偏航。当姿态误差角很小时, 才可近似为向量形式, 即有

$$\bar{\theta} = \theta_p \cdot \vec{i}_a + \theta_r \cdot \vec{j}_a + \theta_y \cdot \vec{k}_a \tag{11}$$

其中 \bar{i}_o , \bar{j}_o , \bar{k}_o 分别是姿态坐标系 ($O_1p_1r_1$) 三个轴的单位向量。由于遥感卫星通常采用陀螺参考单元的控制系统对卫星平台实现姿态控制, 所以卫星平台的姿态误差角速率可以假定为常值漂移, 可用下式表示

$$\bar{\theta}(t_{K+1}) = \bar{\theta}(t_K) + C \cdot \bar{\dot{\theta}}(t_K) \quad (12)$$

其中 C 为常量。向量方程式 (10) 可以分解为 3 个 2 阶的标量方程, 从而可求得下列诸元素表达式。

$$\Phi_{7,7}(K+1/K) = 1 \quad (13)$$

$$\Phi_{7,8}(K+1/K) = t_K \quad (14)$$

$$\Phi_{8,8}(K+1/K) = 1 \quad (15)$$

$$\Phi_{9,9}(K+1/K) = \cos(\omega_0 \cdot t_K) \quad (16)$$

$$\Phi_{9,10}(K+1/K) = t_K \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_K) \quad (17)$$

$$\Phi_{9,11}(K+1/K) = -\sin(\omega_0 \cdot t_K) \quad (18)$$

$$\Phi_{9,12}(K+1/K) = -t_K \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_K) \quad (19)$$

$$\Phi_{10,10}(K+1/K) = \cos(\omega_0 \cdot t_K) \quad (20)$$

$$\Phi_{10,12}(K+1/K) = -\sin(\omega_0 \cdot t_K) \quad (21)$$

$$\Phi_{11,9}(K+1/K) = \sin(\omega_0 \cdot t_K) \quad (22)$$

$$\Phi_{11,10}(K+1/K) = t_K \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_K) \quad (23)$$

$$\Phi_{11,11}(K+1/K) = \cos(\omega_0 \cdot t_K) \quad (24)$$

$$\Phi_{11,12}(K+1/K) = t_K \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_K) \quad (25)$$

$$\Phi_{12,10}(K+1/K) = \sin(\omega_0 \cdot t_K) \quad (26)$$

$$\Phi_{12,12}(K+1/K) = \cos(\omega_0 \cdot t_K) \quad (27)$$

在 $\Phi(K+1/K)$ 的矩阵中, 除了上面诸元素以外, 其它元素为 0, 同时 K 应以 t_K 代之。值得指出的是, 上面公式的推导是很烦琐的, 同时在推导过程中也有某些近似的假定, 以求得简单。因此, 为检验上面公式的正确性, 我们曾用批处理算法, 对 $\Phi(K+1/K)$ 矩阵中的诸元素进行数值回归, 其方法采用参考文献 [6] 中的算法, 可以直接求得上面诸元素的数值解。其实, 方程 (1) 的模型从时间序列的角度来看, 它就是一个 AR 模型 (自回归模型), 而 $\Phi(K+1/K)$ 就是 AR 模型的系数。状态误差向量中的参数就是被观测的卫星轨道参数及姿态参数, 因此是可以采用数值回归的办法求得 AR 模型中的系数。值得提出的另一个问题是在上面公式中关于 t_K 的选择, 它是递归算法的步长, 也是时间序列中的时间进程。具体到卫星遥感图像问题上, 它是一景幅成像的时间, 对于我们本次试验而言它是为 SPOT 数据处理而设计的, 其值为

$$t(K+1) - t(K) = 9.024 \text{ 秒。}$$

如果是陆地卫星 5 号的 TM 影像, 则应是 26.72 秒。

2. 测量方程

$$Z(K) = H(K) \cdot X(K) + V(K) \quad (28)$$

此处 $H(K)$ 称为测量矩阵, $V(K)$ 是测量噪声, 关于测量噪声, 有如下的假设, 即

$$E[V(K)] = 0$$

$$E[V(K) \cdot V(l)^T] = R(K) \cdot \delta(K, l) \quad \delta(K, l) = \begin{cases} 0 & K \neq l \\ 1 & K = l \end{cases} \quad (29)$$

此处 $\delta(k, l)$ 称为克龙纳克尔 (Kroneter) 函数。方程 (29) 描述了噪声的性质。它说明了当我们引入地面控制点时, 其测量噪声应是近似满足方程 (29) 的。

由于实际对地面控制点的测量参数只能是控制点的大地坐标值, 即经度和纬度, 所以我们定义的测量应是 $\tilde{Z}(K)$,

$$\tilde{Z}(K) = \begin{bmatrix} \Delta\lambda(K) \\ \Delta\varphi(K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda(K) \\ \varphi(K) \end{bmatrix} - H(K) \cdot X(K) + V(K) \quad (30)$$

因此, 测量矩阵 H 应是个 2×12 维的矩阵。关于测量矩阵中的元素, 其表达式的推导也是很烦琐的, 可根据其定义直接导出^[3]。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda(K) \\ \Delta\varphi(K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1,1}, H_{1,2}, H_{1,3}, \cdots \cdots H_{1,11}, H_{1,12} \\ H_{2,1}, H_{2,2}, H_{2,3}, \cdots \cdots H_{2,11}, H_{2,12} \end{bmatrix} \cdot X(K) \quad (31)$$

其中

$$H_{1,1} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta x} = \frac{-y}{x^2 \cdot [1 + (y/x)^2]} \quad (32)$$

$$H_{1,3} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta y} = \frac{1}{x \cdot [1 + (y/x)^2]} \quad (33)$$

$$H_{1,7} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta_p} = \frac{-h \cdot \sin(B) \cdot \cos(\lambda)}{x} \quad (34)$$

$$H_{1,9} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta_r} = \frac{h \cdot \cos(B) \cdot \cos(\lambda)}{x} \quad (35)$$

$$H_{2,1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{-z \cdot \cos(\lambda)}{x^2 [1 + (y/x)^2] \cdot [1 + (z \cdot \sin(\lambda)/y)^2]} \quad (36)$$

$$H_{2,3} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} = \frac{-z \cdot \sin(\lambda)}{x^2 \cdot [1 + (y/x)^2] \cdot [1 + (z \cdot \cos(\lambda)/x)^2]} \quad (37)$$

$$H_{2,5} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta z} = \frac{\sin(\lambda)}{y \cdot [1 + (z \cdot \sin(\lambda)/y)^2]} \quad (38)$$

$$H_{2,7} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\theta_p} = \frac{-h \cdot \cos(B) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda)}{y} \quad (39)$$

$$H_{2,9} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\theta_r} = \frac{-h \cdot \sin(B) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda)}{y} \quad (40)$$

$$H_{1,2} = H_{1,4} = H_{1,5} = H_{1,6} = H_{1,8} = H_{1,10} = H_{1,11} = H_{1,12} = 0 \quad (41)$$

$$H_{2,2} = H_{2,4} = H_{2,6} = H_{2,8} = H_{2,10} = H_{2,11} = H_{2,12} = 0 \quad (42)$$

在 (30) 式中的左边, 测量值是控制点真实值与计算值之差值。式中右边的影像中心 x, y, z 应理解为卫星星下点在地心坐标系中的坐标值。式中 h 是卫星的地面高度, B 是卫星速度向量与当地子午圈切线方向的夹角。

3. 传播方程

$$\hat{X}(K+1/K) = \Phi(K+1/K) \cdot \hat{X}(K/K) \tag{43}$$

$$P(K+1/K) = \Phi(K+1/K) \cdot P(K/K) \cdot \Phi^T(K+1/K) \tag{44}$$

此处 $P(K+1/K)$ 称为误差协方差矩阵。从方程 (43) 及 (44) 中可以看出, 所谓“传播”的含义就是根据目前的 $X(K/K)$, $P(K/K)$ 估值, 分别向前外推求得下一景幅的 $X(K+1/K)$, $P(K+1/K)$ 的估值。关于 $X(K+1/K)$ 及 $P(K+1/K)$ 的初值可以选取为

$$\left. \begin{aligned} X(0/-1) &= E[X_0] = X_0 \\ P(0/-1) &= P_0 \end{aligned} \right\} \tag{45}$$

为了方便, 可选择轨道参数与姿态参数中传送到地面站的第一组参数值作为 X_0 , 并选取

$$P_0 = 100$$

实验证明, P_0 的选取范围比较大而对算法的收敛性影响不大, 选取上值是合适的。

4. 更新方程

$$\hat{X}(K/K) = \hat{X}(K/K-1) + K(K) \cdot \tilde{z}(K) \tag{46}$$

$$P(K/K) = P(K/K-1) - K(K) \cdot H(K) \cdot P(K/K-1) \tag{47}$$

$$K(K) = P(K/K-1) \cdot H^T(K) \cdot \{H(K) \cdot P(K/K-1) \cdot H^T(K) + R(K)\}^{-1} \tag{48}$$

此处 $K(K)$ 称为卡尔曼滤波器的增益, $R(K)$ 是一个白色噪声矩阵。从上面方程 (46) 及 (47) 可以看出, 所谓“更新”的含义就是根据上一次对状态误差向量诸参数的估值, 加上引入的地面控制点的修正值, 从而求得本次对状态误差向量诸参数的估值, 如此一个的控制点的引入, 递归算法一步一步地前进, 从而一步一步地更新状态误差向量诸参数

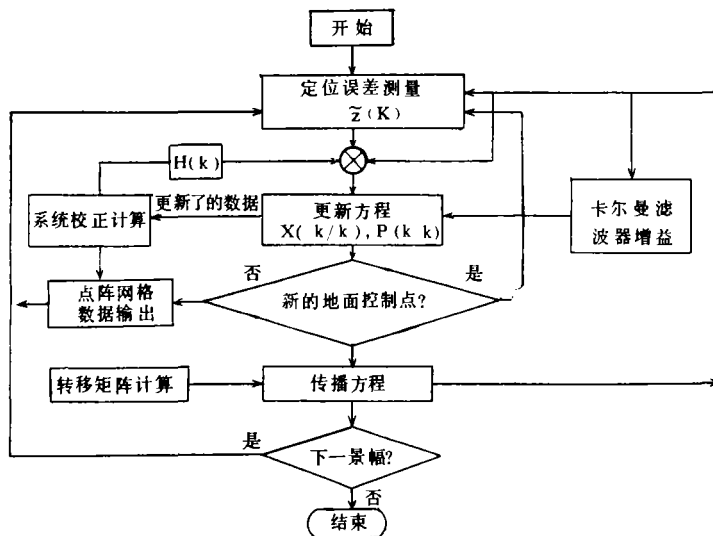


图 2 递归算法数据计算流程图

Fig. 2 Data Flow Chart of Recursive Algorithm

的估值,直至收敛于其真实值。递归算法的计算流程图示于图 2 中,各方块内的含义及其公式已于上面说明,其中 SCD 就是表示“系统校正”,根据更新了的轨道参数及姿态参数进行系统校正,以求得影像中全部像元的大地坐标值。事实上这里所说“全部”既无必要也不可能,实际中只是计算足够多的像元点,构成一个覆盖全景的网格点阵,即图上 GCM 点阵网格,而其余的像元点则可由此点阵网格进行插值。

三、实验与结果

本递归算法已编成专用的软件包,编程是用 C 语言完成的,包括全部矩阵的运算工作。试验是在我们地面站“SPOT 数据处理系统”上进行的,主机是 Micro VAX II,操作系统是 VMS。原始数据是根据 SPOT 数据提供的 1 条轨道上的轨道参数及姿态参数。这些参数是法国空间中心事后用电传的形式传送给我们的。它们的数据是以 1 分钟的间隔提供 1 组上述的参数。控制点的引入应是从地图上的经纬度值与影像中同名点的经纬度值之差值,也就是式(30)中的测量值。因为如前面所述,本递归算法的前提是经过系统校正后的影像已经消除了影像内部的变形,因此,大地校正的任务就只需要计算出影像中心点的大地定位偏差。在控制点的引入的模拟试验中,我们加入了 20% 的白色噪声作为控制点的测量误差。本试验主要目的是验证本算法的可行性;它的一般特性例如收敛性;并利用 SPOT 给出的轨道参数,姿态参数和其它实际参数,用数值回归的方法求出卡尔曼滤波器各系数矩阵的数值解,以验证上述推导各系数矩阵的表达式的正确性。因此这不失去它的一般性。本算法的实际应用效果将在另一课题中得到检验,该课题是有关 SPOT 立体影像中提取高层信息的处理,它需要较高精度的星历表数据及姿态

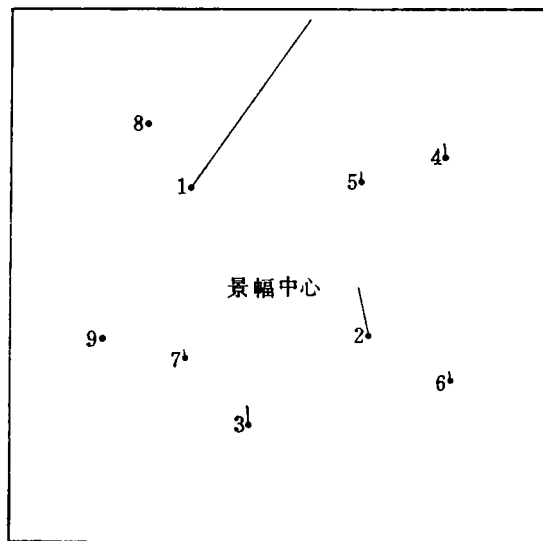


图 3 单一景幅控制点分布情况

Fig. 3 Distribution of GCPs in the corrected scene

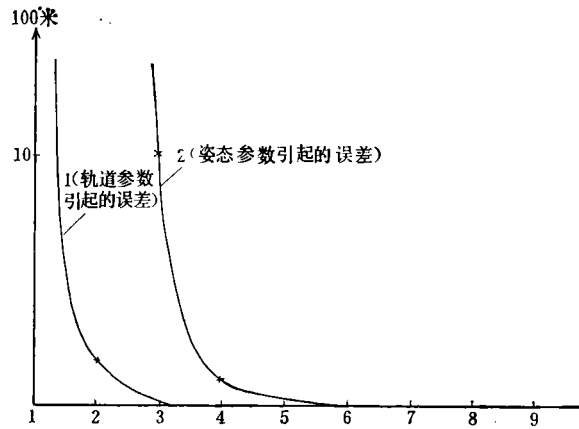


图 4 在单一景幅控制点校正后的残余误差

Fig. 4 Residual Error with GCPa correction in a scene

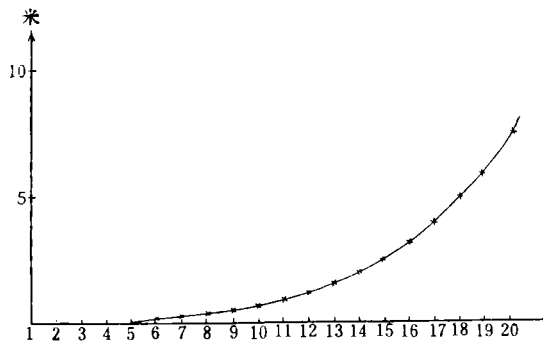
图 5 同一轨道多幅景像的传播残余误差($\times 10$ 倍)

Fig. 5 Propagation of the residual error in a path

信息数据, 因此利用地面控制点及本算法从而提高对上述诸数据估值的精度。由于篇幅关系, 它将在另一文章中叙述。本文着重介绍算法本身, 模拟试验的目的是验证各公式推导的正确性。当然, 它可应用于 SPOT, TM 以及高精度卫星遥感影像大地校正处理中。

本递归算法用于下面的两种情况, 第一种情况是在单一的景幅中进行大地校正, 控制点是逐个地引入(参看图 3)。试验证明, 递归算法收敛性很好, 表 1 及表 2 的前面几幅的原始数据中可以看到, 一般在 8—9 个控制点, 算法便能很好地收敛。从图 4 的曲线可以看出, 轨道参数的估值收敛于其真实值的速度比姿态参数的收敛速度快得多。第二种情况是验证本递归算法的外推性能, 也就是在同一轨道中多景幅的情况, 根据上面介绍的传播方程, 可以预报后面景幅的状态误差向量中的诸参数。在试验中, 头三幅引入控制点进行校正, 以后的景幅完全没有控制点, 仅仅是由传播方程对这些景幅中的状态误差向量的诸元素以及对景像中心的大地经度纬度进行估值, 其结果列于表 2 中, 并绘出图 5 的曲线, 从结果可以看到, 完全由传播方程进行外推, 在外推至 20 景幅的影像中, 其定位误差仍然

表 1 试验 1 的结果
Table 1 the Result of Test 1

景幅号	1	2	3	4	5
控制点数目	8	1	1	1	1
更新了的 λ	0	-3.9E-8	-1.67E-8	1.5E-9	-2.0E-9
更新了的 φ	1.0E-10	1.98E-7	3.69E-8	-2.0E-8	-1.0E-9
预报 λ		-1.24E-7	-8.0E-9	1.85E-8	-4.2E-9
预报 φ		6E-7	-1.1E-7	-1.5E-7	-5.2E-9
景幅号	6	7	8	9	10
控制点数目	1	1	1	1	1
更新了的 λ	-7.0E-10	-5.0E-10	2.7E-9	-2.2E-9	6.8E-9
更新了的 φ	-8.1E-9	4.1E-9	-1.8E-9	3.8E-9	7.7E-9
预报 λ	-1.2E-7	-2.1E-8	-2.26E-8	-3.7E-8	-3.1E-8
预报 φ	-3.28E-7	1.2E-8	2.4E-8	5.5E-8	8.5E-8
景幅号	11	12	13	14	15
控制点数目	1	1	1	1	1
更新了的 λ	-7.0E-10	1.0E-10	5.0E-10	-3.0E-9	8.7E-9
更新了的 φ	-1.26E-8	1.65E-8	2.58E-8	-4.9E-9	9.0E-9
预报 λ	-4.9E-8	-5.5E-8	-6.1E-8	-7.2E-8	6.39E-8
预报 φ	8.5E-8	1.58E-7	2.1E-7	2.1E-7	2.8E-7
景幅号	16	17	18	19	20
控制点数目	1	1	1	1	1
更新了的 λ	-7.4E-9	-1.18E-8	-9.2E-9	1.48E-8	-9.2E-9
更新了的 φ	-3.15E-8	-5.1E-8	-4.29E-8	-4.74E-8	8.26E-8
预报 λ	-9.1E-8	-1.0E-7	-1.0E-7	-8.2E-8	-1.2E-7
预报 φ	2.8E-7	3.18E-7	3.0E-7	4.7E-7	7.2E-7

注: (-3.9E-8 表示 -3.9×10^{-8} , 相对误差)

在 4—5 个象元以内,这是按 SPOT 的数据计算的。SPOT 的景幅约为 60 公里 \times 60 公里,所以外推至 1 200 公里仍然可以获得很好的精度。当然,这是假定当卫星在获取 20 景幅图像信息的过程中,不会受到外界大的扰动,卫星在此期间在轨道上平稳地运行。SPOT 影像每一景幅的成像时间为 9.024 秒,因此,也就是说卫星在 3 分钟的运行时间内不受干扰。事实上,由于 SPOT 的成像是 CCD 推扫形式,没有扫描仪的扫描运动,因此,在大多数情况下,卫星在运行中是很平稳的。

四、讨 论

尽管本试验是按 SPOT 提供的数据进行的,但算法的本身也应该适合于陆地卫星 TM 影像的情况。本递归算法的本质是利用较少量的地面控制点就能实现对影像进行大地校正,提高影像大地定位精度;并能修正或更新所在景幅的卫星轨道和姿态的测量参数,而后者在进行几何校正及轨道的预报都是些很有用的参数。

表 2 试验 2 的结果
Table 2 the Result of Test 2

景幅号	1	2	3	4	5
控制点数目	8	6	4	0	0
预报 λ		$-5.5E-9$	$-8.9E-9$	$-3.0E-8$	$-6.9E-8$
预报 φ		$3.3E-9$	$5.9E-9$	$2.2E-8$	$5.5E-8$
景幅号	6	7	8	9	10
控制点数目	0	0	0	0	0
预报 λ	$-1.0E-7$	$-2.0E-7$	$-3.1E-7$	$-4.6E-7$	$-6.4E-7$
预报 φ	$1.1E-7$	$2.0E-7$	$3.3E-7$	$5.1E-7$	$7.6E-7$
景幅号	11	12	13	14	15
控制点数目	0	0	0	0	0
预报 λ	$-8.5E-7$	$-1.1E-6$	$-1.4E-6$	$-1.7E-6$	$-2.1E-6$
预报 φ	$1.1E-6$	$1.5E-6$	$2.0E-6$	$2.7E-6$	$3.5E-6$
景幅号	16	17	18	19	20
控制点数目	0	0	0	0	0
预报 λ	$-2.5E-6$	$-3.0E-6$	$-3.5E-6$	$-4.0E-6$	$-4.6E-6$
预报 φ	$4.5E-6$	$5.7E-6$	$7.2E-6$	$8.0E-6$	$1.1E-5$

注: ($-5.5E-9$ 表示 -5.5×10^{-9} , 相对误差)

在单一景幅的校正中,它与普通的控制点校正相同,只是它是递归算法而不是普通所采用的成批处理方法。事实上,卡尔曼滤波器的本质就是最小二乘法,所以说它是递归形式的最小二乘法。同时它的收敛性能很好,由于(30)式中有 12 个未知参数需要修正,故在开始时的一景中最好有 6 个以上的控制点。实验证明,约需 8—9 个控制点,算法便能很好地收敛。

这种算法最大优点在于它的“传播”特性,也就是在同一轨道上,在前几幅中引入控制点进行校正,就能预报以后的景幅的参数,或者说利用历史的校正结果,外推到将来的景幅中,从而实现对那些不具备地面控制点的地区的影像进行大地校正,也能达到同样的效果。例如上面介绍的试验中,仅对前面三景幅的影像引入控制点校正,则可以外推到 20 景幅的影像中,也能获得良好的效果。

值得指出的是,在实验过程中发现有某个别参数,例如姿态角中俯仰速率 $\dot{\theta}_p$ 是不可预报的,但由于前面所介绍,假定它是以等速漂移的方式是足够近似的。算法的另一个缺点是需要进行高阶的矩阵运算,从而使编程复杂化,并消耗更多的计算时间(机时)。目前我们的编程都是单独作为子程序的形式收集于数学库中,一旦编程完毕,也就一劳永逸了。至于计算时间,由于仅是对轨道参数,姿态参数及影像中心参数等为数不多的参数进行计算,所以消耗机时是很少的,就目前我们的程序而言,净机时只有几分钟就足够了。主要的时间是消耗于控制点的引入,它比起程序本身的机时大得多。

参 考 文 献

- [1] 王新民,章蕾,陆地卫星五号 TM 图像系统纠正产品的几何精度分析,环境遥感,Vol.4 No. 4, p.293—299.

- [2] 陈贻运, 梁泽环, 中国遥感地面站 SPOT 数据处理的扩充, 第二代资源卫星的应用, 中法卫星遥感学术讨论会论文选辑, 测绘出版社 1989, p.9—18。
- [3] P. Arnold et al., Application of A Recursive Distortion Estimator to the Geodetic Correction of THEMATIC MAPPER Imagery, Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, p.332—386.
- [4] Daniel E. Friedmann et al., Multiple Scene Precision Rectification of Spaceborne Imagery With Very Few Ground Control Points, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 49 No. 12 p.1657—1667.
- [5] Jone B. Moore, Optimal Filtering, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, N. J. 1979.
- [6] D. Graupe (著)梁泽环(译), 时间序列分析、辨识与适应性滤波器, 科学出版社, 1987。

The Application of KALMAN FILTER in the Geodetic Correction of Satellite Remote Sensing Imagery

Liang Zehuan

(Remote Sensing Satellite Ground Station Chinese Academy of Sciences)

Abstract

One of the image pre-processing tasks in the Remote Sensing Satellite Ground Station is the Systematic Correction Processing which may remove almost all the distortions inside the scene. However, the location accuracy is still rough and may probably reach hundred meters or kilometers. A recursive algorithm based on the Kalman Filter rather than the Batch Processing Algorithm using a few number of Ground Control Points will be used to enhance the location accuracy. Moreover, the ephemeris data and the attitude data will also be updated. In a single scene processing, 8 or 9 Control Points will be sufficient to reach the good result. In the continual multi-scene processing of a path, this algorithm may be propagated to predict the locations or the ephemeris and attitude data of the next scenes, in which the Control Point may be not available.

In the section 2 of this paper, the recursive algorithm and the coefficients of the Transition Matrix and the Measurement Matrix in the Kalman Filter equations will be derived. The results of the simulation experiments including 3 Figures and 2 tables will be presented in the section 3. The section 4 has some discussions about the convergence and the advantages of this algorithm. Finally, 6 references will be given for the convenience in the future discussions.

Key words KALMAN FILTER Ground Control Points Systematic Correction Recursive Algorithm Batch Processing Algorithm Time Series Analysis AR Model