引文格式:徐睿,纪松,宋佳璇,等.视线指向角改正的卫星影像区域网平差[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):133-143.DOI:10.13203/j.whugis20220434

Citation:XU Rui,JI Song,SONG Jiaxuan,et al.Block Adjustment of Satellite Images Using Line-of-Sight Direction Angle Correction[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(1):133-143.DOI:10.13203/j.whugis20220434

视线指向角改正的卫星影像区域网平差

徐 睿[1,2] 纪 松[1] 宋佳璇[1] 李东子[1] 范大昭[1] 李 凯[3]

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 61287部队,四川 成都,610036

3 军事科学院系统科学研究院,北京,100044

摘 要:对于存在较大姿态测量误差、宽视场角和弱交会情况的卫星影像,传统有理函数模型区域网平差方法的误差补偿能力有限。虽然从物方角度去建立误差模型能够避免传统方法的局限性,但现有方法的模型构造都较为复杂。首先通过有理函数模型恢复像点的视线向量,求解视线指向角并构建指向角误差模型,然后通过区域网平差求解模型参数,最后根据模型参数更新有理多项式系数。仿真和真实的高分一号宽幅卫星影像实验表明,对比传统方法,所提方法在不同的角元素误差和控制点数量条件下可以取得更优且更稳定的定位结果;对交会角仅有0.05°的高分二号卫星影像进行实验,结果表明,所提方法无需数字高程模型辅助和弱交会检测就能得到收敛的结果,像方定位精度可达到1.89像素。

关键词:视线向量恢复;视线指向角;区域网平差;非测绘卫星;弱交会

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-29

DOI:10.13203/j.whugis20220434 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0133-11

Block Adjustment of Satellite Images Using Line-of-Sight Direction Angle Correction

XU Rui[1,2] *JI Song*[1] *SONG Jiaxuan*[1] *LI Dongzi*[1] *FAN Dazhao*[1] *LI Kai*[3]

1 School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 61287 Troops, Chengdu 610036, China

3 Institute of System Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100044, China

Abstract: **Objectives**: For the satellite images with large attitude measurement error, wide field angle and weak intersection, the traditional block adjustment of rational function mode (RFM) has limited error compensation ability. Although establishing error model from the object-space can avoid the limitations, the model construction of existing methods is more complicated. **Methods**: First, the line-of-sight vector of image point is recovered by RFM. Then, the error model for the line-of-sight direction angle is constructed, with a number of parameters consistent with the traditional method. Finally, the model parameters are solved by block adjustment. **Results**: Experiments on simulated and real Gaofen-1 wide field view satellite images show that the proposed method can always maintain an image-side positioning accuracy of about 1 pixel under different angular element errors. When using 13 control points, the plane positioning accuracy can reach 12.63 m, and the elevation positioning accuracy can reach 17.20 m. Experiments on Gaofen-2 satellite images with intersection angle of only 0.05° show that this method can obtain an adjustment convergence result with an image-side positioning accuracy of 1.89 pixel. **Conclusions**: Compared with the traditional methods, the method using line-of-sight direction angle correction can achieve better and more stable positioning results for the satellite images with large attitude measurement errors and wide field angles, and can obtain convergence results without weak intersection detection and digital elevation model assistance in the

基金项目:国家自然科学基金(41971427);高分遥感测绘应用示范系统(二期)(42-Y30B04-9001-19/21)。

第一作者:徐睿,硕士,助理工程师,主要从事高分辨率光学卫星影像几何定位研究。will831@qq.com

通信作者:纪松,博士,副教授。jisong_chxy@163.com

block adjustment under weak intersection conditions.

Key words: line-of-sight vector recovery; line-of-sight direction angle; block adjustment; non-mapping satellite; weak intersection

卫星影像区域网平差通常是基于严格传感器模型(rigorous sensor model, RSM)或有理函数模型(rational function model, RFM)进行几何处理。RSM具有很高的几何定位精度,但其形式复杂,用户获取和使用都较为困难。RFM使用较为方便,可直接用于高精度定位,其多项式系数就是RPC(rational polynomial coefficients)[1-2]。用原始RPC定位时往往存在几到几十像素的系统误差,传统方法是通过在像方构建附加的误差改正模型实现对影像几何定位误差的补偿[3-5]。文献[6]提出了一种基于物方坐标相关的像方误差模型,相比传统方法能更具鲁棒性。文献[7]提出了一种附加傅里叶补偿项的像方误差模型,对影像畸变误差补偿效果较好。但由于像方误差模型是从定位误差造成的像方偏移结果上对误差的近似拟合,所以存在一定的限制条件,文献[4-5]指出像方误差模型只适用于视场角较窄(5°以内),且姿态误差较小的卫星影像数据。

文献[5,8-10]验证了对于存在宽视场角、大姿态测量误差和弱交会情况的非测绘卫星影像数据,传统方法的误差改正能力有限,并提出从物方的角度去建立误差模型可以得到更好的改正精度。文献[11-13]通过对共线方程线性化并建立外方位元素的多项式模型来恢复RSM,但该类方法需要准确的初值,并且由于内外方位元素具有相关性,会造成求解过程不稳定。文献[9,14]提出了一种“恢复-补偿-生成”的误差补偿策略,先由RFM恢复等效的RSM,再基于RSM进行区域网平差求解误差补偿参数,并重新求解RPC。文献[15]提出了一种基于李代数生成的RFM反求RSM的方法,并验证了RSM的恢复精度。文献[16]提出了一种由RFM恢复RSM的方法,实验表明该方法可以有效改正非线性系统误差,在无控或少控的条件下可以得到比传统方法更好的定位精度。以上方法证明了由RFM恢复等效RSM的方法是可行的,并且在处理非测绘卫星影像数据时比传统方法更具优势,但由于区域网平差需要基于RSM进行,从而待求解的未知参数较多,且参数之间具有相关性,因而求解过程较为复杂。文献[5,8,10]利用RPC和卫星轨道高程面恢复视线的外方位元素,再通过区域网平差求解外方位元素误差改正参数,该方法处理非测绘卫星影像数据时能取得更优的结果,但由于难以确定准确的轨道高度,导致该方法在无控条件下精度较差,并且误差模型也较复杂。文献[17-18]提出了一种用于多视立体三维重建的卫星影像区域网平差方法,通过旋转改正矩阵对视线的方位误差进行补偿,该方法能使影像匹配得到的数字表面模型具有更好的内部一致性,但只能用于面阵卫星影像数据,且没有验证对绝对定位误差的补偿效果。

综上,相比传统的像方误差模型,现有建立在物方的误差模型虽然在处理非测绘类卫星影像上具有一定的优势,但需要求解的模型参数较多,致使区域网平差的过程都较为复杂,并且在使用上存在一定的限制条件。本文提出一种视线指向角改正的卫星影像区域网平差方法,通过恢复并改正视线指向角误差,实现对卫星影像定位误差的补偿。该方法的误差模型构造并不复杂,模型参数数量能与传统方法保持一致,使用上具有良好的适用性,并对存在大姿态测量误差、宽视场角和弱交会问题的非测绘类卫星影像能取得较好的误差补偿效果。

1 基本原理

1.1 视线向量恢复

由于RFM描述的是像方与物方之间的数学关系,从而具有恢复视线向量的能力。像点的视线向量可由投影中心位置和像点所对应的物方点坐标来确定。其中,投影中心位置可通过RFM恢复等效RSM得到。RFM通常表示为:

$$\begin{cases} r=\dfrac{P_1(U,V,W)}{P_2(U,V,W)} \\ c=\dfrac{P_3(U,V,W)}{P_4(U,V,W)} \end{cases} \tag{1}$$

式中,(r,c)为像方点正则化坐标;(U,V,W)为物方点正则化坐标;$P_i(U,V,W)(i=1,2,3,4)$为(U,V,W)的有理多项式。用(ϕ,λ,h)表示物方的大地坐标,(s,l)表示像方的行列坐标,则有:

$$\begin{cases} U=(\phi-\phi_0)/\phi_s \\ V=(\lambda-\lambda_0)/\lambda_s \\ W=(h-h_0)/h_s \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} r=(l-l_0)/l_s \\ c=(s-s_0)/s_s \end{cases} \tag{3}$$

式中,ϕ_0、λ_0、h_0、l_0、s_0为标准化平移参数;ϕ_s、λ_s、h_s、l_s、s_s为标准化比例参数。通过标准化可提高模型中系数求解的稳定性,并减少计算过程中的舍入误差。

由RFM恢复等效RSM的基本过程是:先在同一影像行内选取一定数量的像元,恢复每个像元的视线向量,通过多条视线向量交会得到行投影中心;再根据投影中心位置和行首末两端视线向量构造等效本体坐标系,恢复得到本体坐标系的姿态,从而也就恢复了该影像行的外方位线元素和角元素,具体由RFM恢复等效RSM的方法可参考文献[9,14],本文不再赘述。由于线阵推扫式影像需要恢复影像内每一行的外方位元素,而行外方位元素是随时间连续变化的,因此可通过以影像行坐标为变量的多项式模型来描述[12]。通过恢复等效RSM的方法得到拟合行外方位元素的RPC,从而可恢复影像内任一行的外方位线元素(X_S, Y_S, Z_S)和角元素(α,β,γ),即投影中心位置和平台姿态。

为恢复像点的视线向量,还需要确定像点所对应的物方点坐标,而用户获得的RPC文件通常只能实现从物方至像方的坐标正变换,由像方至物方的坐标反变换并不能直接得到,一般需要给定某一高程值并通过迭代计算得到物方平面坐标,可表示为:

$$(\phi,\lambda)=P'(s,l,h) \tag{4}$$

式中,$P'(s,l,h)$为RFM坐标反变换的过程[19]。因为恢复视线向量并不需要确定像点所对应的实际地面坐标,所以高程值可采用RPC文件中的高程标准化平移参数h_0。由于恢复的RSM是基于地心坐标系,所以需要将物方点的大地坐标转换到地心坐标系下,即:

$$(X_T,Y_T,Z_T)=G(\phi_T,\lambda_T,h_0) \tag{5}$$

$$(\phi_T,\lambda_T)=P'(s,l,h_0) \tag{6}$$

式中,$G(\phi_T,\lambda_T,h_0)$为大地坐标转换到地心坐标系的过程[20];(X_T, Y_T, Z_T)为地心坐标系下的像点物方坐标;(ϕ_T,λ_T)为RFM坐标反变换得到的物方大地平面坐标。由像点所在行的投影中心位置(X_S, Y_S, Z_S)和根据RPC计算的像点物方坐标,即可恢复像点的理论视线向量:

$$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{N}$为地心坐标系下的理论视线向量。将连接点的初始物方坐标(一般通过多片前方交会得到)和控制点的实际物方坐标表示为(X_T', Y_T', Z_T'),则像点的实际视线向量可表示为:

$$\boldsymbol{N}'=\begin{bmatrix} X_C' \\ Y_C' \\ Z_C' \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} X_T' \\ Y_T' \\ Z_T' \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{N}'$为地心坐标系下的实际视线向量。

为便于分析和补偿视线的指向误差,根据恢复的外方位角元素,将视线向量由地心坐标系转换到本体坐标系下:

$$\boldsymbol{n}=[\,X_B\ Y_B\ Z_B\,]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{R}\times\boldsymbol{N} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{n}'=[\,X_B'\ Y_B'\ Z_B'\,]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{R}\times\boldsymbol{N}' \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{n}$和$\boldsymbol{n}'$分别为本体坐标系下的理论视线和实际视线的向量;$\boldsymbol{R}$为外方位角元素构成的旋转矩阵[21]。

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma-\cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma+\sin\alpha\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma+\cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma-\sin\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中,α、β、γ为外方位角元素,对应由本体坐标系到地心坐标系在X、Y、Z轴方向上的旋转量。

因此,可恢复得到所有连接点和控制点在本体坐标系下的理论和实际视线向量,如图1所示,O_S-XYZ为本体坐标系,O-SL为像平面坐标系。

1.2　视线指向角误差补偿

基于RFM恢复视线向量后,可根据理论视线向量与实际视线向量的差异,对理论视线向量的外方位元素误差进行补偿。理论视线向量外方位元素的误差主要由原始RPC的系统误差造成,而在恢复视线向量的过程中,因为等效RSM与原始RPC之间的定位差异和通过RPC对行外方位元素的拟合,都会给视线向量的外方位元素引入一定的误差。相比原始RPC的系统误差,恢复视线向量过程中所引入的误差通常很小,且可以与系统误差一起在对视线向量外方位元素误差的补偿中得到消除。

以沿轨方向上的视线向量为例,如图2所示,O_S-XZ表示无误差影响下沿轨方向上的真实本体坐标系,L表示像平面,P'表示像点l对应的实际物方点,$\boldsymbol{n}_0$表示真实视线向量;由于沿轨方向上的线元素误差dX和角元素误差dθ的影响,实

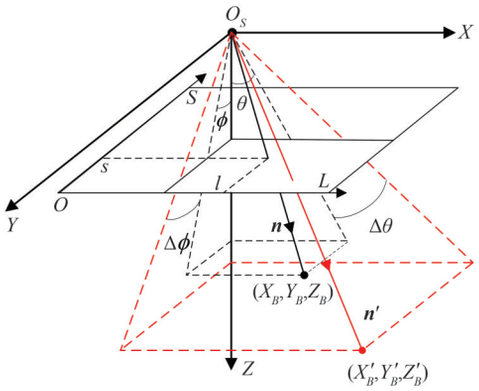


图1 恢复视线向量

Fig. 1 Recovering Line-of-Sight Vector

际的本体坐标系为O_S'-XZ,通过对理论视线向量$\boldsymbol{n}$在沿轨方向上的指向角θ进行补偿,得到实际视线向量$\boldsymbol{n}'$。虽然$\boldsymbol{n}'$与$\boldsymbol{n}_0$在位置和方向上并不相同,但都能得到相同的物方定位结果。考虑到当前卫星的测轨精度远优于定姿精度,并且通过只改正影像外方位角元素误差可将外方位线元素误差也一并改正[21]。因此,在补偿视线向量的定位误差时,无需改正视线向量的线元素,通过只改正角元素就能得到正确的物方定位结果。

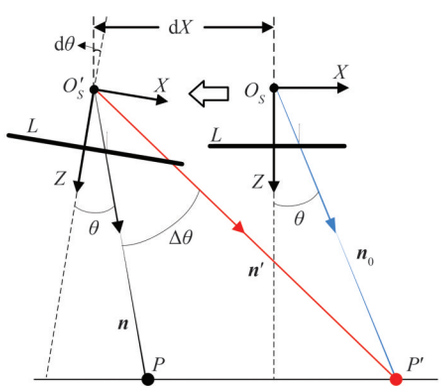


图2 沿轨方向上的视线向量误差补偿

Fig. 2 Compensation of Line-of-Sight Vector Error on Along-Track Direction

为通过补偿视线向量的角元素误差来提高卫星影像定位精度,将视线向量在本体坐标系X和Y轴方向(即沿轨和垂轨方向)的指向角作为误差补偿角,如图1所示,指向角可表示为:

$$\begin{cases}\theta=\arctan(X_B/Z_B)\\ \phi=\arctan(Y_B/Z_B)\end{cases}\tag{12}$$

式中,θ和ϕ为理论视线向量在本体坐标系下的指向角。对于每张影像上的每个连接点或控制点,可以列出观测方程:

$$\begin{cases}F_x=X'_B-Z'_B\tan\hat{\theta}\\ F_y=Y'_B-Z'_B\tan\hat{\phi}\end{cases}\tag{13}$$

$$\begin{cases}\hat{\theta}=\theta+\Delta\theta\\ \hat{\phi}=\phi+\Delta\phi\end{cases}\tag{14}$$

式中,F_x、F_y为误差补偿后的视线在本体坐标系X和Y轴方向上的不符值;$\hat{\theta}$、$\hat{\phi}$为误差补偿后的视线指向角;$\Delta\theta$、$\Delta\phi$为视线指向角误差。

由于线阵卫星影像内各行的外方位角元素是随着影像行坐标连续变化的,对于$\Delta\theta$、$\Delta\phi$可采用像方坐标相关的多项式模型来表达:

$$\begin{cases}\Delta\theta=e_0+e_1l+e_2s+e_3l^2+e_4s^2+\cdots\\ \Delta\phi=f_0+f_1l+f_2s+f_3l^2+f_4s^2+\cdots\end{cases}\tag{15}$$

式中,e_i和$f_i(i=0,1,2,\cdots)$为多项式误差模型的系数。

将式(15)取至一次项,与式(12)一同代入式(14)可得:

$$\begin{cases}\hat{\theta}=\arctan(X_B/Z_B)+e_0+e_1l+e_2s\\ \hat{\phi}=\arctan(Y_B/Z_B)+f_0+f_1l+f_2s\end{cases}\tag{16}$$

以e_0、e_1、e_2、f_0、f_1、f_2和连接点的实际视线向量坐标(X'_B,Y'_B,Z'_B)作为未知数,将式(16)代入式(13)后线性化,可得到区域网平差误差方程式:

$$\begin{cases}0=F_x^0+\dfrac{\partial F_x}{\partial e_0}\mathrm{d}e_0+\dfrac{\partial F_x}{\partial e_1}\mathrm{d}e_1+\dfrac{\partial F_x}{\partial e_2}\mathrm{d}e_2+\\ \qquad\dfrac{\partial F_x}{\partial X'_B}\mathrm{d}X'_B+\dfrac{\partial F_x}{\partial Y'_B}\mathrm{d}Y'_B+\dfrac{\partial F_x}{\partial Z'_B}\mathrm{d}Z'_B\\ 0=F_y^0+\dfrac{\partial F_y}{\partial f_0}\mathrm{d}f_0+\dfrac{\partial F_y}{\partial f_1}\mathrm{d}f_1+\dfrac{\partial F_y}{\partial f_2}\mathrm{d}f_2+\\ \qquad\dfrac{\partial F_y}{\partial X'_B}\mathrm{d}X'_B+\dfrac{\partial F_y}{\partial Y'_B}\mathrm{d}Y'_B+\dfrac{\partial F_y}{\partial Z'_B}\mathrm{d}Z'_B\end{cases}\tag{17}$$

式中,F_x^0和F_y^0为式(13)代入未知数初值后所得,根据最小二乘平差方法可求解得到误差模型的RPC和连接点的实际视线向量坐标。

1.3 RPC参数更新

由于本文的误差模型是对视线指向角进行改正,若直接用于卫星影像定位会较为不便,从而需要根据误差模型参数更新RPC。参照地形无关的方法[22-23],为使改正后的虚拟控制格网在大地坐标系下的高程区间保持不变,可先通过原始RPC构造虚拟控制格网,并根据虚拟控制点的大地高程值构建椭球面,即:

$$\frac{X^2}{(a+H)^2}+\frac{Y^2}{(a+H)^2}+\frac{Z^2}{(b+H)^2}=1\tag{18}$$

式中,a、b分别为参考椭球面的长半轴和短半轴;H为虚拟控制点的大地高程值。

按照§1.1的方法,得到虚拟控制点在本体坐标系下的物方坐标(X_G,Y_G,Z_G),再按照§1.2的方

法恢复和补偿虚拟控制点的视线指向角,得到改正后的视线向量$\boldsymbol{n}'=[\ X_G'\ \ Y_G'\ \ Z_G'\ ]^{\mathrm{T}}$,其中:

$$\begin{cases} X_G'=Z_G\cdot\tan\hat{\theta} \\ Y_G'=Z_G\cdot\tan\hat{\phi} \\ Z_G'=Z_G \end{cases} \tag{19}$$

计算改正后的视线向量$\boldsymbol{n}'$与构建的新椭球面的交点坐标,由于通常会有两个交点坐标,需选取距离投影中心最近的交点坐标为虚拟控制点的新物方坐标。最后将所有虚拟控制点的新物方坐标转换到大地坐标系下,求解新的RPC。

1.4　视线指向角改正的区域网平差流程

由原始RPC恢复像点的视线指向角,并通过区域网平差计算和补偿视线指向角误差的流程如图3所示,主要包括以下4个步骤:

1)根据由RFM恢复等效RSM的方法,获得每张影像的拟合行外方位元素的RPC。

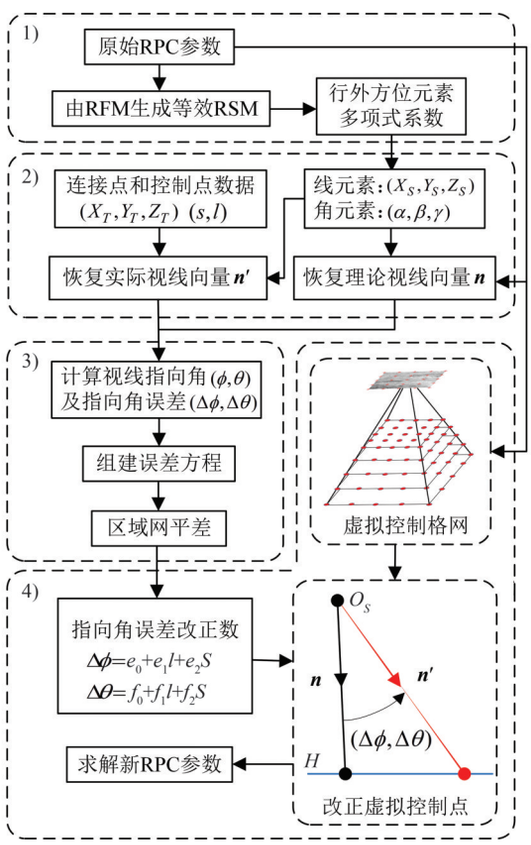


图3　视线指向角改正的区域网平差流程图

Fig. 3　Flowchart of Block Adjustment Using Line-of-Sight Direction Angle Correction

2)对于每张影像上的每个连接点或控制点,先通过RPC拟合得到像点所在影像行的投影中心坐标,并根据RPC计算像点所对应的物方坐标,恢复得到像点的理论视线向量;再根据连接点的初始物方坐标或控制点的实际物方坐标,恢复得到像点的实际视线向量。

3)先根据式(12)和式(15)计算理论视线向量在本体坐标系下的指向角和指向角误差,再根据式(13)和式(17)列出误差方程式,将所有影像上的所有连接点和控制点作为观测数据列出误差方程式后,通过区域网平差求解得到每张影像的误差模型参数和所有连接点的实际视线向量坐标。

4)先通过原始RPC构造虚拟控制格网,再根据误差模型参数改正所有虚拟控制点的物方坐标,最后求解得到新的RPC。

2　卫星影像区域网平差实验与分析

2.1　实验数据及方法

为验证本文方法的有效性,分别采用仿真数据和真实卫星影像数据进行实验。仿真数据采用高分一号(Gaofen-1, GF-1)宽幅相机(wide field view, WFV)影像的原始RPC,通过RFM生成等效RSM后,加入线元素和角元素误差,再生成新的RPC。真实卫星影像数据包括高分七号(Gaofen-7, GF-7)前后视、天绘一号(Tianhui-1, TH-1)三线阵立体测绘卫星影像数据和GF-1 WFV、高分二号(Gaofen-2, GF-2)非立体测绘卫星影像数据。对于非立体测绘卫星影像,本文将覆盖同一地域不同时相的影像组合为立体像对;实验采用的GF-1卫星影像分别为WFV 1和WFV 2相机拍摄,立体覆盖的幅宽约150 km;实验采用的GF-2卫星影像均为全色和多光谱扫描仪(panchromatic and multispectral scanner, PMS)1号相机拍摄,不同时相的影像间交会角仅为0.05°。实验中,采用的各类卫星影像数据具体信息见表1,所有控制点数据均是在已有的地理信息产品上采集获得,平面误差5 m,高程误差2 m,由于本文实验主要是为了与传统方法的精度进行对比,所以在采用相同的影像和控制数据条件下,控制点误差对本文方法与传统方法的影响相同,理论上对实验结论并不影响。影像覆盖范围及控制数据分布情况如图4所示。

实验采用的传统方法为像方平移模型(传统方法一)和像方仿射变换模型(传统方法二),本文方法采用将式(15)分别取至零次项和一次项时的误差模型,分别定义为本文方法一和本文方法二。传统方法一和本文方法一为2参数的误差模型,传统方法二和本文方法二为6参数的误差模型,各方法的具体形式见表2。

表1 实验数据信息

Table 1 Information of Test Data

传感器类型	影像分辨率/m	影像幅宽/km	轨道数/根	影像数	交会角均值/(°)	影像获取时间
GF-1 WFV	16.0	200	2	2	33.5	2017年12月和2018年2月
GF-2	1.0	45	2	4	0.05	2019年11月和2020年6月
GF-7	0.8	20	1	10	33.8	2022年1月
TH-1	5.0	60	1	12	33.5	2013年4月

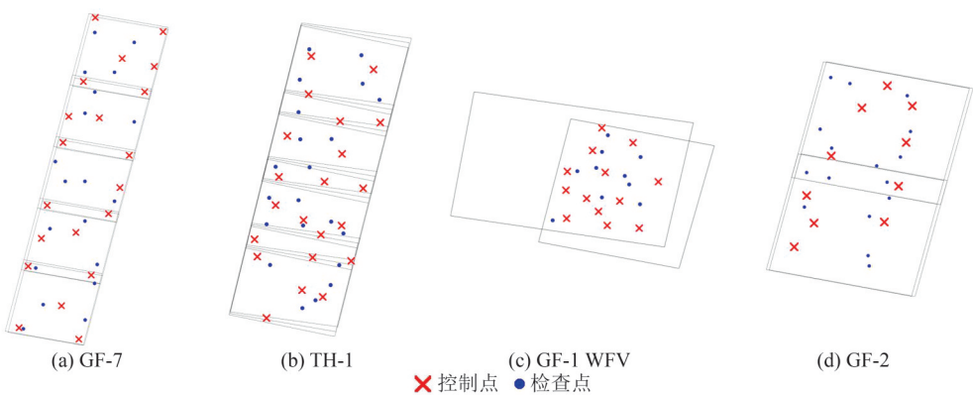


图4 影像覆盖范围及控制数据分布图

Fig. 4 Image Coverage and Control Data Distribution

表2 误差补偿方法

Table 2 Error Compensation Methods

	改正项类型	误差模型	参数数量
传统方法一	像方行列坐标改正	$\begin{cases}\Delta s=e_0\\ \Delta l=f_0\end{cases}$	2
传统方法二		$\begin{cases}\Delta s=e_0+e_1l+e_2s\\ \Delta l=f_0+f_1l+f_2s\end{cases}$	6
本文方法一	视线指向角改正	$\begin{cases}\Delta\theta=e_0\\ \Delta\phi=f_0\end{cases}$	2
本文方法二		$\begin{cases}\Delta\theta=e_0+e_1l+e_2s\\ \Delta\phi=f_0+f_1l+f_2s\end{cases}$	6

2.2 仿真数据实验

为验证传统方法和本文方法对存在较大姿态和位置误差的卫星影像的误差补偿效果,由GF-1 WFV卫星影像的原始RPC生成等效RSM,以欧拉角的形式加入不同大小的角元素误差和不同大小的线元素误差,生成新的带有误差的RPC。在13个控制点的条件下,将生成的RPC分别采用传统方法和本文方法进行实验,结果如表3和表4所示。

表3 仿真数据实验精度统计表(2参数模型)

Table 3 Accuracy Statistics of Simulated Data Model with 2 Parameters

编号	线元素误差/m			角元素误差			检查点定位中误差					
							传统方法一			本文方法一		
	X	Y	Z	滚动	俯仰	航偏	像方/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方/像素	物方平面/m	物方高程/m
1	0	0	0	0	0	0	0.91	12.97	17.80	0.88	12.63	17.20
2	100	100	100	0	0	0	0.95	14.14	17.52	0.93	14.40	19.82
3	1 000	1 000	1 000	0	0	0	2.42	46.28	105.59	3.06	58.57	157.12
4	0	0	0	20″	20″	20″	0.93	13.11	20.68	0.91	13.01	18.43
5	0	0	0	40″	40″	40″	0.94	13.15	23.18	0.92	12.98	18.34
6	0	0	0	60″	60″	60″	0.99	13.45	26.14	0.93	12.96	18.26
7	0	0	0	20′	20′	20′	6.47	103.53	264.43	4.88	31.38	20.67
8	0	0	0	40′	40′	40′	13.19	192.75	530.16	9.71	61.01	32.96
9	0	0	0	60′	60′	60′	20.49	270.91	812.42	14.59	92.61	47.96

由编号2、3和11、12的实验可以看出,对于较大的线元素误差,6参数模型的误差补偿能力相对较强;同时也表明虽然本文方法只改正了视线向量的角元素,但依然具有线元素误差的补偿能力。由编号4、5、6和13、14、15的实验可以看出,对于(″)级的角元素误差,4种方法的像方定

表 4　仿真数据实验精度统计表(6参数模型)

Table 4　Accuracy Statistics of Simulated Data Model with 6 Parameters

编号	线元素误差/m			角元素误差			检查点定位中误差					
							传统方法二			本文方法二		
	X	*Y*	*Z*	滚动	俯仰	航偏	像方/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方/像素	物方平面/m	物方高程/m
10	0	0	0	0	0	0	0.94	13.40	18.22	0.95	13.50	18.43
11	100	100	100	0	0	0	0.99	13.73	24.10	1.01	13.93	24.74
12	1 000	1 000	1 000	0	0	0	1.18	20.07	21.14	1.00	13.98	25.09
13	0	0	0	20″	20″	20″	1.00	13.80	24.25	1.02	14.02	24.71
14	0	0	0	40″	40″	40″	0.99	13.78	24.04	1.02	14.03	24.71
15	0	0	0	60″	60″	60″	0.96	13.83	23.83	1.02	14.04	24.71
16	0	0	0	20′	20′	20′	2.91	54.36	17.88	1.06	14.80	24.83
17	0	0	0	40′	40′	40′	5.81	104.03	31.25	1.12	15.74	25.03
18	0	0	0	60′	60′	60′	8.87	152.34	59.84	1.19	16.80	25.31

位精度均能保持在1像素左右,在相同角元素误差的影响下,本文方法一的定位精度最优。由编号7、8、9和16、17、18的实验可以看出,对于(″)级的角元素误差,只有本文方法二的像方定位精度能保持在1像素左右,其余方法的定位误差均较大。为综合对比4种方法的角元素误差补偿能力,同时对3个方向的角元素加入(″)级和(′)级误差,传统方法与本文方法的物方定位精度统计如图5所示。

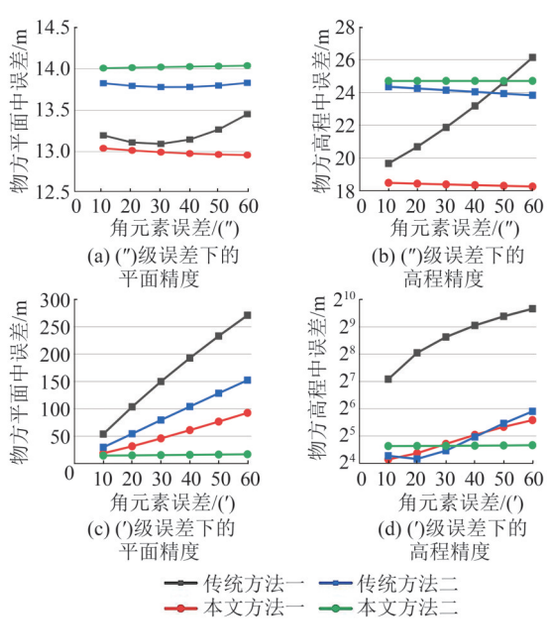


图5　角元素误差补偿精度统计图

Fig. 5　Accuracy of Angle Elements Error Compensation

由图5(a)、5(b)可以看出,当角元素误差为(″)级时,2参数模型在大部分情况下可以取得比6参数模型更高的定位精度,但传统方法一的精度并不稳定,其物方定位误差随着角元素误差的增大呈现出明显的上升趋势,而本文方法一能始终保持最优的定位精度。由图5(c)、5(d)可以看出,当角元素误差为(′)级时,除了本文方法二,其余3种方法的物方定位误差都随着角元素误差的增大而增大,而本文方法二能保持较高的精度和稳定性。

总体来看,对于未加入误差的原始GF-1 WFV影像数据,本文方法与传统方法取得的定位精度相当;当存在(″)级的角元素误差时,本文方法一的定位精度最优;当存在(′)级的角元素误差时,本文方法二最为稳定,能保持较高的定位精度。

2.3　真实卫星影像数据实验

为验证本文方法对真实卫星影像定位误差的补偿效果,分别对测绘卫星和非测绘卫星影像数据进行实验。在相同的控制数据条件下,采用传统方法和本文方法进行区域网平差,测绘卫星影像的实验结果如表5和表6所示。

由表5和表6可以看出,对于GF-7影像,本文方法与传统方法的像方差异仅在0.1像素以内,物方最大差异仅有0.1 m左右;对于TH-1影像,在无控条件下,本文方法一相比传统方法一在像方和物方的定位精度有略微提升,但本文方法二相比传统方法二的定位精度有所下降,物方平面差异达到0.5 m左右。综合来看,对于GF-7和TH-1立体测绘卫星影像,在无控或有控的条件下,本文方法能与传统方法的像方和物方定位精度基本保持一致。

为验证本文方法对非测绘卫星影像定位误差的补偿效果,实验采用具有大幅宽的GF-1 WFV和弱交会条件下的GF-2卫星影像,实验结果如表7和表8所示。由于GF-2影像交会角过小,部分实验的区域网平差无法收敛,立体定位误差达到上千甚至上万米,本文对物方定位误差

表5 测绘卫星影像实验精度统计表(2参数模型)

Table 5 Accuracy Statistics of Mapping Satellite Images Model with 2 Parameters

影像	控制点数	检查点定位中误差						精度变化/%		
		传统方法一			本文方法一					
		像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面	物方平面	物方高程
GF-7	0	8.95	6.23	3.74	8.95	6.23	3.73	0.00	0.00	0.27
	10	4.15	2.80	3.49	4.16	2.81	3.49	−0.24	−0.36	0.00
	15	4.02	2.69	3.52	4.02	2.69	3.52	0.00	0.00	0.00
	20	3.97	2.67	3.47	3.98	2.67	3.46	−0.25	0.00	0.29
TH-1	0	5.19	25.95	11.36	5.16	25.79	11.19	0.58	0.60	1.50
	10	3.97	18.14	9.62	3.97	18.15	9.63	0.00	−0.06	−0.10
	15	3.93	18.06	10.48	3.93	18.07	10.49	0.00	−0.06	−0.10
	22	3.89	18.02	9.44	3.89	18.05	9.44	0.00	−0.17	0.00

表6 测绘卫星影像实验精度统计表(6参数模型)

Table 6 Accuracy Statistics of Mapping Satellite Image Model with 6 Parameters

影像	控制点数	检查点定位中误差						精度变化/%		
		传统方法二			本文方法二					
		像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面	物方平面	物方高程
GF-7	0	8.94	6.22	3.74	8.92	6.22	3.86	0.22	0.00	−3.21
	10	4.29	2.83	3.24	4.29	2.83	3.24	0.00	0.00	0.00
	15	3.69	2.43	2.74	3.68	2.42	2.74	0.27	0.41	0.00
	20	3.44	2.21	2.76	3.44	2.21	2.76	0.00	0.00	0.00
TH-1	0	4.88	25.51	7.36	4.99	26.08	7.53	−2.25	−2.23	−2.31
	10	2.56	11.93	4.92	2.56	11.92	4.89	0.00	0.08	0.61
	15	2.22	10.58	4.85	2.21	10.54	4.83	0.45	0.38	0.41
	22	2.35	11.52	5.73	2.34	11.47	5.73	0.43	0.43	0.00

表7 非测绘卫星影像实验精度统计表(2参数模型)

Table 7 Accuracy Statistics of Non-mapping Satellite Images Model with 2 Parameters

影像	控制点数	检查点定位中误差						精度变化/%		
		传统方法一			本文方法一					
		像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面	物方平面	物方高程
GF-1 WFV	0	6.40	98.22	37.16	6.41	98.18	38.01	−0.16	0.04	−2.29
	5	1.06	15.73	19.00	1.01	15.00	18.65	4.72	4.64	1.84
	8	0.97	14.02	17.58	0.92	13.40	17.02	5.15	4.42	3.19
	13	0.91	12.97	17.80	0.88	12.63	17.20	3.30	2.62	3.37
GF-2	0	43.06			51.98			−20.72		
	4	35.17			2.88	18.11	510.30	91.81		
	8	31.80			2.96	14.40	464.80	90.69		
	10	30.19			2.96	17.16	576.67	90.20		

表 8　非测绘卫星影像实验精度统计表(6参数模型)

Table 8　Accuracy Statistics of Non-mapping Satellite Images Model with 6 Parameters

影像	控制点数	检查点定位中误差						精度变化/%		
		传统方法二			本文方法二					
		像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面/像素	物方平面/m	物方高程/m	像方平面	物方平面	物方高程
GF-1 WFV	0	6.40	98.07	37.92	6.41	98.14	38.40	−0.16	−0.07	−1.27
	5	1.03	14.59	19.07	1.04	14.80	19.13	−0.97	−1.44	−0.31
	8	0.97	14.04	18.13	0.98	14.22	18.23	−1.03	−1.28	−0.55
	13	0.94	13.40	18.22	0.95	13.50	18.43	−1.06	−0.75	−1.15
GF-2	0	41.61			47.49			−14.13		
	4	23.79			2.13	31.98	894.22	91.05		
	8	23.12			1.89	23.82	641.59	91.83		
	10	22.00			1.99	27.13	719.29	90.95		

超过 1 km的实验结果认为是立体交会失败,不对实验数据进行记录和比较。

对于GF-1 WFV影像,由表7和表8可以看出,无控条件下,本文方法与传统方法定位精度基本一致;有控条件下,本文方法一的定位精度相比传统方法一有所提升,但本文方法二的定位精度相比传统方法二略有下降。在不同控制条件下,大部分情况下,两参数模型可以取得比6参数模型更高的物方定位精度,说明两参数模型更适用于GF-1 WFV影像的定位误差补偿,并且本文方法一的物方定位精度相比传统方法一更高。总体来看,在4种方法中,本文方法一对GF-1 WFV影像误差的补偿效果最优,与加入(″)级误差时的仿真数据实验结果相一致。

对于GF-2影像,由表7和表8可以看出,在无控条件下,由于光线弱交会的影响,通过前方交会得到的连接点初始物方坐标存在较大误差,导致传统方法和本文方法都无法得到平差收敛的结果。在有控条件下,传统方法的像方定位精度虽有提升,但平差依然无法收敛,而本文方法可以得到平差收敛的结果,像方定位精度最高可达到1.89像素,但由于实验数据的光线交会角过小以及检查点会存在一定的像方匹配误差,从而难以得到较高的物方定位精度,实验中的平面定位精度最高只能达到14.4 m,而物方高程定位精度达到数百米。分析原因,传统方法都是以像方残差最小为目标进行最小二乘平差,而平差过程中像方坐标的改正会导致物方坐标发生剧烈震荡,使平差难以收敛;本文方法以式(13)作为观测方程,是以物方残差最小为目标进行最小二乘平差,并没有直接对像方坐标进行改正,从而可避免由弱交会造成的平差不收敛问题。

总体来看,本文方法在有控条件下能有效避免由弱交会造成的平差不收敛问题,其中,本文方法一的物方定位精度明显优于本文方法二,而本文方法二的像方定位精度相对较优,说明在弱交会条件下,由于像方坐标的变化会对物方坐标产生较大影响,从而像方与物方的定位精度并不一定等价。还需要说明的是,在弱交会条件下,虽然通过本文方法可以使单张影像获得较高的像方定位精度,但对于光线交会角过小的数据,难以通过前方交会获得检查点的物方坐标(特别是高程坐标)的精确值。

3　结　语

对于非测绘类卫星影像可能具有的大姿态测量误差、宽视场角和光线弱交会问题,本文提出了一种视线指向角改正的卫星影像区域网平差方法,通过恢复视线向量并构建视线指向角误差模型实现对影像定位误差的补偿。该方法能避免像方误差模型在处理非测绘类卫星影像时的局限性,并且无需求解过多的模型参数。

GF-1 WFV的仿真数据实验结果表明,当存在(″)级的姿态误差时,本文方法一取得的误差补偿效果最优;当存在(′)级的姿态误差时,本文方法二的精度最为稳定,能取得较好的误差补偿效果。真实卫星影像数据的实验结果表明,对于GF-7和TH-1测绘类卫星影像,本文方法能取得与传统方法相当的定位精度;对于具有大幅宽的

GF-1 WFV卫星影像,本文方法一的整体定位精度最优;对于交会角仅有0.05°的GF-2卫星影像,本文方法可有效避免因交会角过小造成的物方坐标变化剧烈的问题,从而在区域网平差中无需数字高程模型辅助和弱交会检测就能得到收敛的结果。由于数据条件限制,本文只对同一种类的卫星影像进行了区域网平差实验,在后续研究中,将进一步尝试对大规模的多源卫星影像数据进行实验。

参 考 文 献

[1] TOUTIN T. Review Article: Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(10): 1893-1924.

[2] FRASER C. S, DIAL G, GRODECKI J. Sensor Orientation via RPCs[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 60 (3): 182-194.

[3] 满益云,江志军. 光学遥感卫星平面定位精度误差分析[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 135-144.
MAN Yiyun, JIANG Zhijun. Error Analysis for Planar Geolocation Accuracy of Optical Remote Sensing Satellites[J] *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(1): 135-144.

[4] GRODECKI J, DIAL G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 59-68.

[5] XIONG Z, ZHANG Y. A Generic Method for RPC Refinement Using Ground Control Information[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, 75(9): 1083-1092.

[6] DONG Y, LER R, FAN D, et al. A Novel RPC Bias Model for Improving the Positioning Accuracy of Satellite Images[J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2020, 5(2): 35-41.

[7] 孙佳明. 光学卫星遥感影像的严格几何模型与RFM模型组合平差研究[D]. 广州:广东工业大学, 2020.
SUN Jiaming. Research on Combination Adjustment of Strict Geometric Model and RFM Model of Optical Satellite Remote Sensing Images [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.

[8] XIONG Z, ZHANG Y. Bundle Adjustment with Rational Polynomial Camera Models Based on Generic Method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49: 190-202.

[9] 黄文超. 基础遥感产品系统误差补偿方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016.
HUANG Wenchao. Research on Compensation for System Errors of Basic Satellite Products[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.

[10] 伍洋,张永生,于英,等. 一种鲁棒的RFM模型定位精度优化方法[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(3): 281-286.
WU Yang, ZHANG Yongsheng, YU Ying, et al. A Robust RFM Model Positioning Accuracy Optimization Method [J] *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(3): 281-286.

[11] DI K, MA R, LI R. Rational Functions and Potential for Rigorous Sensor Model Recovery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(1): 33-41.

[12] 童小华,刘世杰. 高分辨率卫星影像物理模型与有理函数模型转换[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(11): 793-800.
TONG Xiaohua, LIU Shijie. Rational Polynomial Coefficients Generation and Physical Sensor Model Recovery for High Resolution Satellite Stereo Imagery [J]. *Science Paper Online*, 2008, 3 (11): 793-800.

[13] LIU S, TONG X. Transformation Between Rational Function Model and Rigorous Sensor Model for High Resolution Satellite Imagery[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37 (B1): 873-878.

[14] HUANG W, ZHANG G, LI D. Robust Approach for Recovery of Rigorous Sensor Model Using Rational Function Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54 (7): 4355-4361.

[15] 周瑜. 基于李代数的高分辨率卫星遥感影像定位理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2020.
ZHOU Yu. Theory and Method Study of Geopositioning for High-Resolution Satellite Imageries Based on Lie Algebra[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020.

[16] CAO H, TAO P, LIU Y, et al. Nonlinear Systematic Distortions Compensation in Satellite Images Based on an Equivalent Geometric Sensor Model Recovered from RPCs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14:12088-12102.

[17] MARI R, FRANCHIS C D, MEINHARDT-LLO-

PIS E, et al. To Bundle Adjust or Not: A Comparison of Relative Geolocation Correction Strategies for Satellite Multi-View Stereo[C]//IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop, Seoul, Korea, 2019.

[18] MARI R, FRANCHIS C D, MEINHARDT-LLOPIS E, et al. A Generic Bundle Adjustment Methodology for Indirect RPC Model Refinement of Satellite Imagery[J]. *Image Processing on Line*, 2021, 11: 344-373.

[19] 戴激光,贾永红,宋伟东,等. 一种异源高分辨率卫星遥感影像近似核线生成算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(6): 661-664.
DAI Jiguang, JIA Yonghong, SONG Weidong, et al. A New Algorithm on Approximate Epipolar Generation Between Multi-source High Satellite Imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 661-664.

[20] 吕志平,乔书波. 大地测量学基础[M]. 北京:测绘出版社, 2010.
LÜ Zhiping, QIAO Shubo. Fundamentals of Geodesy [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 2010.

[21] 袁修孝,余翔. 高分辨率卫星遥感影像姿态角系统误差检校[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 385-392.
YUAN Xiuxiao, YU Xiang. Calibration of Angular Systematic Errors for High Resolution Satellite Imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012,41(3):385-392.

[22] TAO C, HU Y. Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1357.

[23] 曹金山,袁修孝. 利用虚拟格网系统误差补偿进行RPC参数精化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(2): 185-189.
CAO Jinshan, YUAN Xiuxiao. Refined RPC Parameters by Virtual Grid System Error Compensation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 185-189.