静止卫星标称投影解析方法及其在 FY2-C 中的应用

钱　辉[1],师春香[2],施进明[2]

1. 中国地质科学院 地质研究所大陆动力学实验室,北京　100037;

2. 中国气象局 国家卫星气象中心,北京　100081

摘　要: 通过对静止卫星在三轴椭球参数条件下地心坐标的标称投影公式推导过程,建立了经纬度到单位平面位置的可逆映射方程,其正反算公式精度可达 10^{-20};并对大地坐标的经纬度进行了类似的推导,但标识线垂直地表而不过地心的坐标定义导致正算公式中存在角度正切的四次方项,因此反算需要采用数值解法。两组解析表达式为查照表的建立提供了直接的数学依据,相对于迭代数值计算方法而言,解析方法更便于分析投影过程的误差和畸变。围绕 FY2-C 卫星地面系统工程中查照表的重建,兼顾卫星图像陆地位置与主要大陆轮廓数据的投影吻合,需要对单位平面的投影进行放大和平移,并提供多组可选择的放大因子,使得经纬度到图像点映射与查照表对应值整体误差较小。建议根据实际应用的坐标系统、卫星位置参数、地球参数选择不同的匹配参数。这种方法可以应用于图像点地理位置精度要求很高但计算不是特别频繁的数据处理算法中,如相对定标和定位,但在其他算法中除了精度以外查照表还是有作用的。

关键词: 标称投影,三轴椭球,经纬度查照表,静止卫星,正反算公式,FY2-C

中图分类号: TP732/TP79　　**文献标识码:** A

1　引　言

静止卫星对于长期对地固定范围目标进行观测起着至关重要的作用,为低分辨率要求的农业、气象、环境等科学研究提供了不间断的监测手段,为国民经济发展和宏观局势的把握提供了保障。目前按照不同的静止卫星瞬时视场的取得方式,可分为自旋式单点扫描、推帚式线性扫描、阵列式扫描等不同方式,最后通过光电系统将目标辐射的光热能量转换为电信号,形成扫描图像(郭强 & 陈桂林,2001),图像可能是同一时间目标在焦距上的投影,也可能是不同时间投影的拼合(张伍 & 陆春玲,2007)。地球同步轨道卫星在距地面 35786 km 的位置观测地球,以地球自转角速度的公转速度绕地球旋转,可以形成对地固定区域的观测。静止卫星会由于地球引力场的变化而发生飘移,需要进行轨道控制和恢复。估计一固定点作为卫星的平衡位置,对地球给定区域的投影作为标准轮廓,把有偏移的图像校正到这个位置,是图像数据进一步应用的基础。目前大部分处理流程中使用预先计算好的经纬度到图像位置或图像位置到经纬度的查找表进行二者的对应,对于图像亚像元或非标准经纬网格点的处理需要插值(王宏博等,2007),但投影过程明显是非线性的,采用线性插值会带来各种误差,对图像的精处理是不利的。

空间尺度地球坐标一般使用地心坐标系,即以投影点到地心的连线及其在赤道面上的投影作为角度定义的基础。也有采用大地坐标系,由于椭球地面的垂线并不一定通过地心,大地坐标系则采用该垂线及其在赤道面上的投影作为角度定义的基础。两种方式的经度应该是相等的,但大地坐标系的纬度绝对值略大于地心坐标系的纬度绝对值,二者的转换关系也有专门研究(李延兴等,2007)。以 WGS84 定义的标准椭球地心坐标系为基础进行讨论,如椭球长轴位于 $\theta_0 = -15°$ 的赤道上长半轴 $a = 6378137$ m,赤道的扁率 $f_1 = 1 - b/a = 1/90000$,位于 75° 的赤道上短半轴 $b = 6378066$ m,连接 $-15°$ 长轴与两极的椭圆的扁率 $f_2 = 1 - c/a = 1/298.257223563$,即连接两极的短半轴 $c = 6356752$ m,

收稿日期:2008-02-20;**修订日期:**2008-05-14

基金项目:FY2-C 地面应用系统数据处理 DPC 软件工程项目与 FY-3 卫星资料同化技术支撑平台及原型软件研发项目(12-1)。

第一作者简介:钱　辉(1974—　),男,2000 年获中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业博士。副研究员,从事地球探测信息技术综合研究,发表论文 20 余篇,其中第一作者 8 篇。E-mail:etranger@163.com。

纬度 φ 为地面上的一点到地心连线与其在赤道上投影的逆时针夹角,经度 θ 为该投影线与 0° 经线逆时针夹角。

2 静止卫星 GSP 投影的定义与正反算

静止卫星投影是指地球在卫星视场中某个焦距上的投影,是空间投影的一个特例(任留成,2002),即过椭球面上一点 P 与卫星 S 点的连线在垂直于 OS 的某个焦平面的交点坐标,焦平面可以是实际太空照相机的感光片,也可以是星下点 O' 的切平面,也可以是过地心垂直于 OS 的椭圆面。地球构造常用的极射赤平投影是 GSP 投影的一个特例,其中地球为球形,焦平面为赤道面,视点为北极(钱辉等,1997)。以下约定 GSP 定义为单位平面中的投影(图1),设 S 位于赤道经度 θ_1 的上空 h 高度处,P 在赤道面的投影为 D,作 $PC \perp OS$ 于 C 点,单位平面中的投影 (x, y) 可定义为 $(CD/SC, PD/SC)$;以此投影值在不同方向进行放大,则可以得到任意焦平面上的投影值。

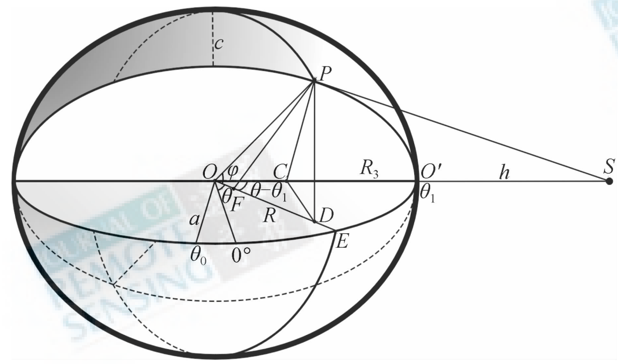

图 1　静止卫星三轴椭球 GSP 投影定义的相关要素

Fig. 1　The related elements of the GSP definition for the geostationary satellite given three − axis ellipsoid

2.1 地心坐标投影正算

根据短长轴比 μ 与扁率 f 的关系为 $\mu = 1 - f$,又可定义椭圆的离心率 $e^2 = 1 - \mu^2$,因此赤道上经度为 θ 的半弦长有

$$R_\theta = \frac{\mu_1 a}{\sqrt{1 - e_1^2 \cos^2(\theta - \theta_0)}} \tag{1}$$

星下点地心距 $O'O$ 的长度为

$$R_3 = \frac{\mu_1 a}{\sqrt{1 - e_1^2 \cos^2(\theta_1 - \theta_0)}} \tag{2}$$

椭圆 POE 的短轴为 $c = \mu_2 a$,长轴为 R_θ,则该椭圆的短长径比

$$\mu_3 = \frac{\mu_2}{\mu_1} \sqrt{1 - e_1^2 \cos^2(\theta - \theta_0)} \tag{3}$$

已知纬度为 φ,则投影点与地心连线长度

$$OP = \frac{\mu_3 R_\theta}{\sqrt{1 - e_3^2 \cos^2 \varphi}} \tag{4}$$

令 $c = \mu_0 b$,即 $\mu_0 = \mu_2 / \mu_1$,则

$$OP = \frac{c}{\sqrt{1 - \{1 - \mu_0^2[1 - e_1^2 \cos^2(\theta - \theta_0)]\} \cos^2 \varphi}} \tag{5}$$

则 P 在单位平面上投影为

$$\left(\frac{OP\cos\varphi\sin(\theta - \theta_1)}{R_3 + h - OP\cos\varphi\cos(\theta - \theta_1)}, \frac{OP\sin\varphi}{R_3 + h - OP\cos\varphi\cos(\theta - \theta_1)}\right) \tag{6}$$

令 $\varepsilon = (R_3 + h)/c$,则坐标可化为

$$\left(\frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\varepsilon\sqrt{\mathrm{tg}^2\varphi + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]} - \cos(\theta - \theta_1)}, \frac{\mathrm{tg}\varphi}{\varepsilon\sqrt{\mathrm{tg}^2\varphi + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]} - \cos(\theta - \theta_1)}\right) \tag{7}$$

注意到 PS 连线可能与椭球有两个交点,其中有一个被椭球面遮挡,尽管这两点有相同的 GSP 投影位置,但后者的投影是没有意义的,可以通过 OC 的长度来判断投影的有效范围。当 PS 与椭圆 POO' 相切时,OC 的长度最小,等于 $R_3^2/(R_3 + h)$,也就是说,当

$$OP\cos\varphi\cos(\theta - \theta_1) \geqslant R_3^2/(R_3 + h) \tag{8}$$

投影是有意义的,但是靠近切点附近的椭球点的投影非常接近,以至于难以区分,可以使用更严格的限制条件。

2.2 大地坐标投影正算

如果采用大地坐标系,需要做椭圆 POD 在 P 点的切线的法线,交 OD 于 F,则纬度 $\varphi = \angle PFD$,相应地

$$PF = \frac{(1 - e_3^2)R_\theta}{\sqrt{1 - e_3^2\sin^2\varphi}} \tag{9}$$

$$OD = \frac{R_\theta \cos\varphi}{\sqrt{1 - e_3^2 \sin^2\varphi}} \quad (10)$$

则有 P 在单位平面上投影 (x, y) 为

$$\left(\frac{OD\sin(\theta - \theta_1)}{R_3 + h - OD\cos(\theta - \theta_1)}, \frac{PF\sin\varphi}{R_3 + h - OD\cos(\theta - \theta_1)}\right) \quad (11)$$

即

$$x = \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\mu_0 \varepsilon \sqrt{1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)} \sqrt{1 + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]\mathrm{tg}^2\varphi} - \cos(\theta - \theta_1)} \quad (12)$$

$$y = \frac{\mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]\mathrm{tg}\varphi}{\mu_0 \varepsilon \sqrt{1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)} \sqrt{1 + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]\mathrm{tg}^2\varphi} - \cos(\theta - \theta_1)} \quad (13)$$

虽然地心坐标与大地坐标的投影公式相差较大,但由于地球椭球体的 $e_1 \approx 0$,同时 $\mu_0 \approx 1$,分别代入对应的公式,可以得到相同的投影公式,即当地球为球形体的投影

$$\left(\frac{\cos\varphi\sin(\theta - \theta_1)}{\frac{h}{a} + 1 - \cos\varphi\cos(\theta - \theta_1)}, \frac{\sin\varphi}{\frac{h}{a} + 1 - \cos\varphi\cos(\theta - \theta_1)}\right) \quad (14)$$

当 $(1 + h/a)\cos\varphi\,\cos(\theta - \theta_1) \geqslant 1$,投影点在有效范围内。

2.3　地心坐标 GSP 投影的反算

以上过程在实现给定星下点经度和卫星高度的条件下,求取静止卫星视场投影的正向过程。反过来,如果已知标称投影图像上的点,需要反算它对应的经纬度则是一个解二元非线性三角方程的过程,尽管可以采用弦割和牛顿等各种数值解法,但其精度损失是非常明显的,而且也不如解析解有明确的物理意义,便于分析误差传递。由式(12),式(13)可以看出大地坐标系的正演公式有 $\cos(\theta - \theta_0)$ 的四次方项,而式(7)中地心坐标系只有它的二次方项,因此可以对地心坐标系的正演公式直接进行反演计算,而大地坐标系则需要使用数值解法进行解的搜寻。在进行反算之前,要进行标称图像点的反平移和缩小变换,使图像点归一化到投影公式所定义的单位平面上。设单位平面上的坐标为 (x, y),由式(7)可知

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{y\sin(\theta - \theta_1)}{x} \quad (15)$$

$$x = \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\varepsilon \sqrt{\mathrm{tg}^2\varphi + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]} - \cos(\theta - \theta_1)} \quad (16)$$

将式(15)带入式(16)中得

$$[\sin(\theta - \theta_1) + x\cos(\theta - \theta_1)]^2 = \varepsilon^2\{y^2 \times \sin^2(\theta - \theta_1) + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]\} \quad (17)$$

令 $\gamma = 2(\theta - \theta_1)$,$\beta = 2(\theta_1 - \theta_0)$,函数 $\mathrm{sng}(x)$ 取出 x 的正负号,将上式按半角公式合并,则存在

$$\gamma_0 = \mathrm{tg}^{-1}\frac{x^2 - 1 + \varepsilon^2(y^2 + \mu_0^2 e_1^2 x^2\cos\beta)}{|2x - \varepsilon^2\mu_0^2 e_1^2\sin\beta|} \quad (18)$$

使得

$$\gamma + \gamma_0 = \sin^{-1}\frac{\varepsilon^2[\mu_0^2(2 - e_1^2)x^2 + y^2] - 1 - x^2}{\sqrt{[2x - \varepsilon^2\mu_0^2 e_1^2\sin\beta]^2 + [x^2 - 1 + \varepsilon^2(y^2 + \mu_0^2 e_1^2 x^2\cos\beta)]^2}} \quad (19)$$

即有

$$\theta = \mathrm{sng}(x)\left|\frac{\gamma}{2}\right| + \theta_1 \quad (20)$$

当 x 不等于 0 时可用下式计算 φ 值

$$\varphi = \mathrm{sng}(y)\,\mathrm{tg}^{-1}\left|\frac{y\sin(\theta - \theta_1)}{x}\right| \quad (21)$$

当 x 接近于 0,$\theta - \theta_1$ 也接近于 0,φ 的表达式没有意义,可以使用

$$\sin(\theta - \theta_1) = \frac{x\mathrm{tg}\varphi}{y} \quad (22)$$

$$y = \frac{\mathrm{tg}\varphi}{\varepsilon \sqrt{\mathrm{tg}^2\varphi + \mu_0^2[1 - e_1^2\cos^2(\theta - \theta_0)]} - \cos(\theta - \theta_1)} \quad (23)$$

联立方程(22)、(23),则 $1 - \cos^2(\theta - \theta_1) = x^2\mathrm{tg}^2\varphi/y^2$,又令 $\cos(\theta - \theta_1) = 1$,可以得到方程

$$\{1-x^2-\varepsilon^2[y^2+\mu_0^2e_1^2x^2\cos2(\theta_1-\theta_0)]\}\,\mathrm{tg}^2\varphi+2y\,\mathrm{tg}\varphi-\varepsilon^2y^2\mu_0^2(1-e_1^2\cos^2(\theta_1-\theta_0))+y^2=0 \quad (24)$$

注意到上式实际上已经可以解出 tgφ,但实际应用时会产生很大的舍入误差,以至于结果是不正确的,令 $\lambda=2\varphi$, $\sigma=\theta_1-\theta_0$,函数 sng(y) 取出 y 的正负号,将上式按半角公式合并,则存在

$$\lambda_0=\mathrm{tg}^{-1}\frac{x^2-1+y^2+\varepsilon^2[y^2+\mu_0^2e_1^2x^2\cos2\sigma-y^2\mu_0^2(1-e_1^2\cos^2\sigma)]}{|2y|} \quad (25)$$

使得

$$\lambda+\lambda_0=\sin^{-1}\frac{x^2-1-y^2+\varepsilon^2[y^2+\mu_0^2e_1^2x^2\cos2\sigma+\mu_0^2y^2(1-e_1^2\cos^2\sigma)]}{\sqrt{4y^2+\{x^2-1+y^2+\varepsilon^2[y^2+\mu_0^2e_1^2x^2\cos2\sigma-y^2\mu_0^2(1-e_1^2\cos^2\sigma)]\}^2}} \quad (26)$$

即有

$$\varphi=\mathrm{sng}(y)\left|\frac{\lambda}{2}\right| \quad (27)$$

采用半角公式的方式解关于 tgφ 的二次方程,会在解的精度、唯一性和物理意义方面有着明显的优势,因此不论求解 θ 或 φ,本文均采用了这种方式。

3 GSP 投影在 FY2-C 卫星资料处理中的应用

FY2-C 是新一代的气象卫星,于 2004 年 10 月发射成功,入轨在地球同步轨道的 35785864m 高空,作为 FY2-B 的换代星,它们有着相同的星下点位置(104.5°E,0°),可以观测中国及邻区的陆地、海洋及云和大气变化的过程,是环境变化及天气预报方法的重要补充资料,甚至是确定性的手段。可以利用的通道有热红外、分裂窗、水汽、近红外和可见光等 5 个通道(王程,2005),采用自旋扫描的方式获取地球亮度温度和反射率的量化数据,通过展宽到 2291×2291 行列再配准到 2288×2288 行列的标称投影图完成一个通道数据的定位过程,其中卫星天顶角、太阳天顶角和轨道及姿态数据是定位过程依赖的主要数据,投影到标称图使用了经纬度查照表的方式,即根据标称图的纵横坐标通过索引找到展宽图上对应的经纬度,利用定位信息找到对应的亚像元,进行数据插值完成标称投影的过程。定位的质量和精度很难在计算过程中进行监控,这种质量控制可以在标称投影完成后,利用经纬度和地标匹配的方式进行检验。

3.1 GSP 投影计算与 FY2-C 云图和图像点查照表的匹配

利用 GSP 投影取得了标称投影格式的主要大陆海岸线和经纬度网格图像,中央经线为 104.5°,中央纬线为 0°,经纬网格间距为 25°,计算间距 5°网格点的离差也使用同样的中心位置,与实际的 FY2-C 可见光通道数据进行匹配,可以发现二者的轮廓线基本一致(图 2)。为了使单位平面的图像呈现在计算机显示屏坐标系中,需要进行放大和平移变换,如果使用纵横相同的比例放大因子(7091,−7091)和平移因子(1144,1144),从经纬度查照表中提取 850 个覆盖整个圆盘的 5°间隔网格点,计算理论值与查表值的平均距离差为 3.5 点;使用纵横比例不同的放大因子(7124,−7075),则离差能减小到 2.15 点;如果经纬度采用大地坐标方式,利用相应的理论公式计算,则可以使用放大因子(7113,−7092),能使离差减小到 1.5 点,表明经纬度查照表在建立时使用了大地坐标的定义方式。离差值在标称图圆盘边缘附近比较大,在图的中心逐渐趋向于 0。图 2 使用地心坐标的投影方式和放大因子(7113,−7092),从理论计算位置到实际经纬度查找表对应位置的矢量表示离差。图中海岸线取自 GSHHS 的 2004 年 1.5 版的 25km 粗分辨率数据,可见光数据取自 2005-10-24 世界时 06 的可见光通道,略作了图像对比度的增强,以突出云和海洋以及陆地放射率的区别,从图 2 可以看出,为了保证中心点向对角线方向网格点的拟合度,牺牲了水平或垂直方向边缘的分辨率,以至于可以拟合得很好的东西南北极点位置有比较大的水平和垂直位移。当然这些比例因子的确定有很大的人为因素,可能会有更好的最小二乘拟合手段使理论计算值与经纬度查照表得到最好的匹配,但不代表经纬度查找表就是经纬度到图像位置映射的最佳方法,做这种匹配只是为了与实际卫星工程采用的手段进行对比。从海岸线与可见光图像的陆地匹配程度看,这种三轴椭球投影方式基本能满足图像的粗定位与

定位质量检验的要求,但可能需要根据卫星轨道和姿态参数对地球模型与卫星位置参数进行必要的调整,以及对单位平面的放大因子进行更合理的选择。

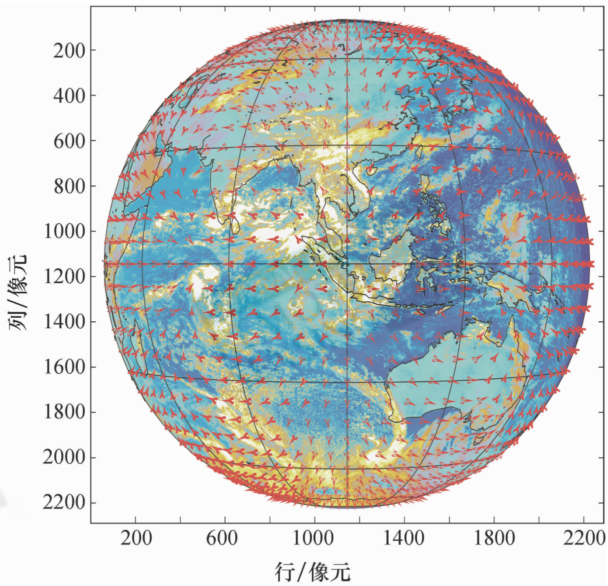

图 2 标准海岸线数据的 GSP 投影与可见光图像陆地位置匹配图以及与 FY2-C 查照表的离差矢量表示图

Fig. 2 GSP of standard coast line and its matching with the land outline in visible band image along with the deviation vector between FY2-C lookup table and its corresponding GSP calculation

3.2 反演计算结果与经纬度查照表的对照

对 FY2-C 卫星的 GSP 三轴椭球投影,按照纬度间隔 2°从南极到北极,经度间隔 2°从 14.5°到 194.5°进行正演计算,对于在投影可见范围外的点不做排除,计算得到的单位平面投影值不做任何变换,直接进行反算经纬度,绘制等值线图(图 3),在图中存在一个近似圆角正方形的区域把等值线分为网格状和涡流状。涡流状等值线代表了投影区域外的点与卫星的连线在投影区域,其反算结果为椭球面另一个交点的经纬度;网格状等值线代表了投影区域,其反算是完全可逆的运算,可以得到投影点的经纬度值,精度可以达到 10^{-20}。针对式(24)的正切二次方程解法,其中心点计算是精确的,但对于边缘地区误差可能达到 2°,表明解正切二次方程方法的局限性。

按照(-1144,-1144)的坐标平移和(7094,-7094)缩小因子对 850 个经纬度标称图点进行处理后按照反算公式得到相应的经纬度,再与查照表的经纬度求距离差,发现中心点附近的距离差为 0,在圆盘边缘能达到 0.3°,平均离差为 0.1°左右(如图 3 中的+字所示),可以看到使用相同纵横缩放比率时,主轴的 4 个端点和中心点附近的误差较小;靠近圆盘边缘的对角线附近,在向中心尖灭的扇形区域内有较大误差。为了配合经纬度查照表的数据,使主要误差分布到圆盘边缘,使中心区域可以应用该反算公式,需要采用不相等的纵横缩放比。然而这样的参数可能使边缘区域的可解部分变成无解,这是反算过程需要考虑的因素。由于经纬度查照表使用了大地坐标,采用地心坐标进行反算也会带来一定的误差。如图 3 按照 WGS84 的地球模型使用大地坐标经纬度网格计算在单位平面进行 GSP 投影,然后按照地心坐标系的经纬度反算公式,得到 FY2-C 相应的(60°S,60°N),(45°E,165°E)的 2°间隔经纬网格,得出平均反算误差约 0.02°,相当于 2km 距离,对于 5km 点距的粗标称图像是可以应用的。如果需要更精确的反算结果,则需要使用式(15),式(16)应用数值计算方法取得。

图 2 与图 3 中的部分数据如表 1,可以发现查照表与 GSP 计算结果在中心部位比较接近,到图像边缘则相差较大,其他影响因素还包括卫星本身的位置参数,放大因子以及经纬度坐标系统也影响到二者的差异。

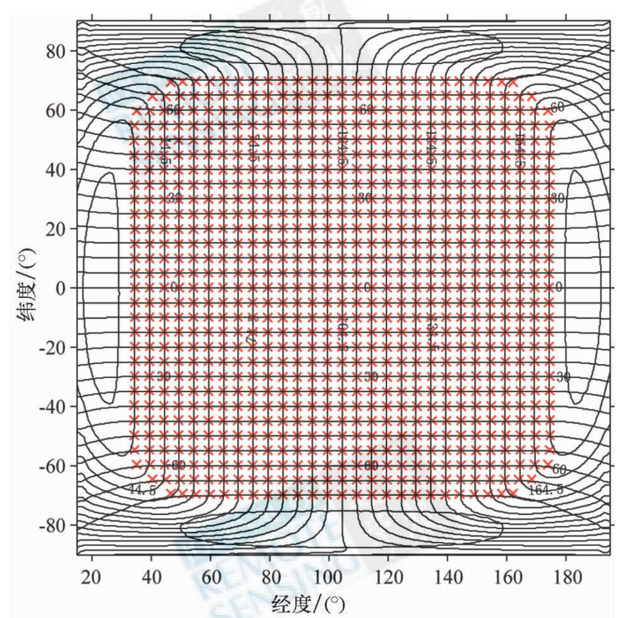

图 3 FY2-C 图像点查照表网格点的 GSP 地心坐标反算及误差分析

Fig. 3 Calculation of geocentric coordinates by GSP inversion of FY2-C lookup table point and error analysis

表 1　FY2-C 图像点查照表与标称投影对应关系表

Table 1　The image point lookup table of FY2-C and its corresponding with GSP calculation

FY2-C 经纬度对应图像点查照表				放大因子(7113, -7092) 大地坐标标称投影正算		放大因子(7094, -7094) 地心坐标标称投影反算	
经度/(°)	纬度/(°)	X	Y	X	Y	经度/(°)	纬度/(°)
34.50	55.00	543.84	243.84	544.94	242.30	34.43	54.66
39.50	40.00	357.26	424.38	357.37	422.71	39.32	39.70
44.50	15.00	174.67	847.18	172.76	846.38	44.44	14.86
49.50	-15.00	215.89	1444.53	214.54	1445.11	49.39	-14.87
54.50	-45.00	516.33	1953.82	517.02	1954.60	54.29	-44.75
54.50	70.00	850.43	105.82	851.50	105.01	55.18	69.55
59.50	40.00	507.21	397.13	508.20	396.76	59.25	39.79
64.50	10.00	374.81	934.88	375.06	935.09	64.34	9.95
69.50	-20.00	486.45	1557.42	487.35	1556.68	69.31	-19.92
74.50	-50.00	764.79	2037.77	765.58	2037.30	74.31	-49.84
74.50	65.00	901.69	118.96	902.61	118.62	74.40	64.76
79.50	35.00	722.59	453.03	723.87	454.60	79.31	34.91
84.50	5.00	715.62	1035.23	716.91	1035.80	84.38	4.99
89.50	-25.00	851.82	1665.81	852.89	1663.46	89.38	-24.97
94.50	-55.00	1026.51	2101.78	1026.53	2100.82	94.45	-54.89
94.50	60.00	1042.37	143.68	1042.79	144.15	94.42	59.86
99.50	30.00	1050.12	527.81	1050.51	530.62	99.46	29.98
104.50	0.00	1144.00	1144.00	1144.00	1144.00	104.50	0.00
109.50	-30.00	1237.88	1760.19	1237.49	1757.38	109.54	-29.98
114.50	-60.00	1246.03	2144.31	1245.21	2143.85	114.62	-59.86
114.50	55.00	1261.95	186.24	1261.47	187.18	114.59	54.89
119.50	25.00	1436.18	622.19	1435.12	624.55	119.62	24.97
124.50	-5.00	1572.38	1252.77	1571.10	1252.20	124.62	-4.99
129.50	-35.00	1566.02	1834.94	1564.14	1833.40	129.73	-34.91
134.50	-65.00	1386.60	2169.01	1385.39	2169.38	134.63	-64.76
134.50	50.00	1523.65	250.27	1522.42	250.71	134.73	49.84
139.50	20.00	1801.55	730.58	1800.66	731.32	139.69	19.91
144.50	-10.00	1913.19	1353.12	1912.95	1352.91	144.66	-9.95
149.50	-40.00	1781.19	1890.82	1779.81	1891.23	149.79	-39.79
154.50	-70.00	1437.57	2182.18	1436.50	2182.99	153.82	-69.55
154.50	45.00	1772.00	334.23	1770.99	333.40	154.75	44.75
159.50	15.00	2072.11	843.47	2073.47	842.89	159.61	14.87
164.50	-15.00	2113.33	1440.82	2115.25	1441.61	164.56	-14.86
169.50	-40.00	1930.93	1863.56	1930.64	1865.29	169.71	-39.70
174.50	-55.00	1744.28	2044.11	1743.06	2045.69	174.62	-54.66
174.50	60.00	1665.57	195.54	1664.31	194.18	173.93	59.57

4　结论与讨论

经纬度查照表适合在公式计算频繁 CPU 较大而内存比较富余的条件下使用,但是像查照操作不太频繁的图像处理过程或计算亚像元位置时可以采用解析表达式。由于地球参数和卫星参数的配置不同,以及标称图像的大小轮廓线的不同,使得单位平面的投影和反算需要进行实际的缩放和变形,这个过程会引入比较大的误差。当然如果卫星生产和应用之间能统一这些参数,并协商好相关的解析表达式是最佳的解决方案。

理论的可行性与实际的可应用性并不能完全等同起来,特别是在复杂的数学和软件工程上,系统难以避免不精确描述给理论的可行性方案带来完全错误的数值和结论,这需要在应用过程中精雕细琢,在误差最小和计算速度之间进行适当的折中,而不是完全依赖于理论或抛开理论只注重实际应用效果。当然卫星应用工程也是非常复杂的过程(钱建梅等,2005),这其中的误差分析和应用分析本身也需要大量的协作和投入才能完成。

建议在讨论卫星尺度问题时使用地心坐标定义的经纬度,在考虑地面高程和重力分布时应该使用大地坐标定义的经纬度,如果需要转换可以使用地心坐标到大地坐标的换算公式。在这个基础上采用统一的三角方程,得到最简坐标和经纬度表达式,当然也可以使用空间解析几何的向量方法完成这些推导,过程复杂一些(任留成等,1999),但结果

应该是一致的。

REFERENCES

Guo Q and Chen G L. 2001. Study on the high-speed acquisition and preprocessing of the images of the synchronous meteorologic satellites. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, **18**(suppl):10—15

Li Y X, Zhang J H, Zhang J Q, Zhang Z F and Du X S. 2007. A direct Tranformation from geocentric cartetesian to geodetic coordinates. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **27**(2):37—46

Qian H, Dong H G and Chen C M. 1997. Arithmatic method in polar stereographic projection. *Geological Journal of China Universities*, **3**(3):328—337

Qian J M, Shi J M and Li X R. 2005. Conceptual design for geostationary meteorological satellite ground applications system. *Computer Enginerring and Applications*, 18:224—228

Ren L C. 2002. Theory of space projection and its application on technology of remote sensing. Beijing: *Science Press*

Ren L C, Ye J K, Zhao Q and WANG H Y. 1999. The space perspective projection of the satellite image. *Henan Science*, **17**(2):119—123

Wang C. 2005, Introduction to the FY-2 geostationary meteorological satellite engineering. *Aerospace China*, **8**:10—12

Wang H B, Li G C and Sui M. 2007. A method of using the linear interpolation to realize the image location and projection calculation of the FY-2 satellite data. *Network Message of Agriculture*, **4**:35—43

Zhang W and Lu C L. 2007. Design and analysis of determining the image position error of Pushbroom remote sensing satellite. *Spacecraft Engineering*, **16**(2):6—11

附中文参考文献

郭强，陈桂林. 2001. 静止气象卫星图像高速采集和预处理研究. 量子电子学报, **18**(增刊):10—15

李延兴,张静华,张俊青,张中伏,杜雪松. 2007. 一种由地心直角坐标到大地坐标的直接转换. 大地测量与地球动力学, **27**(2):37—46

钱辉,董火根,陈楚铭. 1997. 极射赤平投影中的数学方法. 高校地质学报, **3**(3):328—337

钱建梅,施进明,李小榕. 2005. 静止气象卫星地面应用系统概念设计. 计算机工程与应用, **18**:224—228

任留成. 2002. 空间投影理论及其在遥感技术中的应用. 北京:科学出版社

任留成,叶建榜,赵祺,王宏勇. 1999. 适合卫星图像的空间透视投影. 河南科学, **17**(2):119—123

王程. 2005. 风云2号静止气象卫星工程简介. 中国航天, **8**:10—12

王宏博,李国春,隋明. 2007. 应用线形插值对风云二数据进行图像定位与投影计算. 农业网络信息, **4**:35—43

张伍,陆春玲. 2007. 推扫成像遥感卫星图像定位精度分析与设计. 航天器工程, **16**(2):6—11

Analytical method for geostationary satellite normalized projection and its FY2-C application

QIAN Hui[1], SHI Chun-xiang[2], SHI Jin-ming[2]

1. *Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of land and Resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing* 100037, *China*;
2. *National Satellite Meteorology Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081, *China*

Abstract: Presently the lookup table is adopted when corresponding relation between the position of remote sensing images and the geographic coordinates, which are involved in ground system engineering of geostationary satellites. For the corresponding geographic coordinates of sub-pixel or corresponding point of nonstandard grid nodes, which are not in lookup table, bilinear interpolation have to be introduced so that the precision loses remarkably for the image location. By deducing the formulas of geostationary satellite normalized projection at the condition of three-axis ellipsoidal parameter, the reversible equation from longitude/latitude to position on unit plane is established, which provides the mathematical reliance for lookup table for satellite image engineering. And corresponding match parameter for FY2-C application is provided after comparing with the practicing data of lookup table. The same procedure is applied to the situation of geographic coordinate system, but the inverse problem needs numerical solutions. The inverse method of geocenter coordinate system may be used as approximation when ellipsoidal parameter is close to sphere, while not applicable for fine image processing. The possibility of the application in FY2-C engineering of this reversible formulas is also discussed, with the analysis of the error distribution compared with practical data and the selection of applicable parameters for best fitting actual data.

Key words: normalized projection, three-axis ellipsoid, longitude/latitude lookup table, reversible formulas, geostationary satellite, FY2-C