

静止气象卫星标称网格的计算方法 及其在风云四号中的应用

王静*, 刘成保, 杨磊**, 商建, 张志清

中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 标称网格计算将地球给定区域投影变换成标称图像,是静止轨道卫星图像定位与配准的关键技术。分析了以风云四号(FY-4A)、Himawari-8、MTG、Electro-L等卫星为代表的气象卫星协调组(CGMS)规范和以GOES-R为代表的两种标称网格定义,对两种标称网格的计算过程进行了详细推导,并总结了CGMS规范和GOES-R标称网格的异同。结果表明,CGMS规范沿用了自旋卫星扫描成像方式,GOES-R标称网格基于“先南北后东西”双扫描镜高级基线成像仪(ABI)真实入射光路设计。两种标称网格都是在卫星空间直角坐标系中定义的,尽管计算方法不同,但可相互转换。进一步以FY-4A卫星观测数据为例,给出了由CGMS规范标称图像计算GOES-R标称图像的详细过程,变换后的图像与由GOES-R方式计算的海岸线套合得很好。FY-4A先进静止轨道成像仪的扫描角和步进角与GOES-R的相比,两者差分别为 10^{-16} μrad 和 10^{-17} μrad 数量级,表明GOES-R标称网格是从ABI的光机结构出发定义的。为方便用户使用,并保证与全球规范的一致性,FY-4A L1产品目前采用国际上普遍接受的CGMS LRIT/HRIT全球规范中定义的标准投影。

关键词 成像系统; 静止气象卫星; 标称网格; 气象卫星协调组; 风云四号

中图分类号 TP701

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1211001

Calculation of Geostationary Satellites' Nominal Fixed Grid and Its Application in FY-4A Advanced Geosynchronous Radiation Imager

Wang Jing*, Liu Chengbao, Yang Lei**, Shang Jian, Zhang Zhiqing

National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Calculation of nominal fixed grid, aimed to project a given area of the earth to the nominal image, is a key technique for navigation and registration of geostationary satellites. In view of the existing nominal fixed grid definitions from coordination group for meteorological satellites (CGMS) specification and geostationary operational environmental satellite-R series (GOES-R) user's guide, whose representatives are FY-4A, Himawari-8, MTG, Electro-L satellites and GOES-R satellite, respectively, the formulas of CGMS and GOES-R nominal fixed grid calculation are deduced in detail, and the difference and relationship between CGMS and GOES-R nominal grids are summarized. Both nominal fixed grids are defined in satellite body Cartesian coordinate system. Furthermore, the detailed transforming process from nominal image of CGMS specification to the corresponding nominal image of GOES-R definition is presented using FY-4A observations. The results demonstrate that the nominal images defined by the two aforementioned methods can be converted to each other. Besides, by comparing the scanning and stepping angles of FY-4A advanced geosynchronous radiation imager to the responding angles of GOES-R fixed grid, the differences are 10^{-16} μrad and 10^{-17} μrad magnitude, respectively, which reveals that GOES-R fixed grid is defined from the point view of opto-mechanical design of advanced base imager. Considering that the foreign satellites, except GOES-R, all use CGMS fixed grid to calculate the nominal image, for end-user's convenience, FY-4A nominal fixed grid will adopt the internationally accepted standard projection defined in CGMS LRIT/HRIT global specification.

Key words imaging systems; geostationary satellites; normal fixed grid; coordination group for meteorological satellites; FY-4A

OCIS codes 110.2960; 100.2000; 120.0280; 120.2040

收稿日期: 2018-06-06; 修回日期: 2018-07-19; 录用日期: 2018-08-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504900, 2018YFB0504905)、国家自然科学基金(61172113, 91338109)

* E-mail: wjing@cma.gov.cn; ** E-mail: yangl@cma.gov.cn

1 引 言

静止轨道卫星在距地面 35786 km 的海拔高度处,以地球自转角速度绕地心旋转,其上搭载的遥感载荷可实现对地球固定区域的长期连续观测,为气象气候灾害预警、环境监测和农林牧渔产量评估等提供技术支撑。地球全圆盘对静止卫星张角约为 $17.4^\circ \times 17.4^\circ$,可以想象,地球同步轨道卫星对地球的理想成像方式为:搭载一个焦平面能够覆盖全圆盘的、无畸变的载荷,对整个全圆盘一次成像^[1]。标称网格是采用此理想成像模式,对地球给定区域的投影变换。标称网格由一系列等间隔的固定观测角度组成,能够确保所有产品中相同的数据点落在地球上同一位置,是遥感图像进一步应用的基础。

目前,静止气象卫星大多采用标称网格上的图像定位方法使遥感图像上各个像元点与地球上的经纬度相对应,这种方式使图像数据中不需再保存经纬度信息,大大降低了数据传输和存储的要求。对于标称网格的计算,气象卫星协调组(CGMS)在 LRIT/HRIT 全球规范^[2]中给出了标称网格行列号与经纬度互转的计算公式及其参数值。2015年,日本发射的 Himawari-8 卫星的标称网格便是基于 CGMS 规范得到的^[3]。2016年,美国发射的 GOES-R 卫星则采用与 CGMS 不同的标称投影^[4]进行计算。尽管 CGMS 规范与 GOES-R 都直接给出了解析表达式,但未见其详细的推导过程及对两种投影方式异同的分析,这对于标称网格的理解和标称网格计算的实际应用都极为不利。国内大部分处理流程^[5-6]使用预先计算好的经纬度到图像行列号或图像行列号到经纬度的查找表进行二者的相互转换,对于图像亚像元或非标准经纬网格点的处理会因插值而引入误差^[7-9],不利于图像的精确处理。因此,研究静止气象卫星标称网格的定义和计算方法,对增强我国静止气象卫星遥感图像处理能力具有重要的实用价值。

本文阐述了 CGMS 规范和 GOES-R 中关于标称网格的定义,详细推导了标称网格上行列号与经纬度相互转换的计算过程,并对 CGMS 规范和 GOES-R 对于标称网格定义进行了比较。目前为止,风云四号(FY-4A)采用国际上普遍接受的 CGMS LRIT/HRIT 全球规范中定义的标准投影,但在技术上保留了使用 GOES-R 定义的可能性。

2 FY-4A 成像仪的观测几何

如图 1 所示,FY-4A 成像仪^[10]采用双镜式独立

扫描设计,一个扫描镜完成东西扫描,另一个扫描镜在每次扫描后控制视场在南北方向上的移动。FY-4A 定义的卫星本体坐标系为 $S-X'Y'Z'$: Z' 轴指向地心, X' 轴沿卫星飞行方向(向东为正), Y' 轴与 X' 、 Z' 轴构成右手坐标系(向南为正)。南北向扫描镜转轴与 X' 轴平行,东西向扫描镜转轴与 Z' 轴平行。以主光轴为例,从探测器出发的出射光线依次经东西和南北扫描镜反射。由反射定律可知,入射光线、法线和反射光线处于同一平面,而且入射光的反向向量与反射光向量与镜面法线成镜像,入射光的反向向量与反射光向量之差得到的向量与镜面法线向量正交,则

$$\begin{cases} x_r^2 + y_r^2 + z_r^2 = 1 \\ x_p = -x_i, y_p = -y_i, z_p = -z_i \\ (x_p - x_r)x_m + (y_p - y_r)y_m + (z_p - z_r)z_m = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

而且,空间中三个向量共面,一个向量可以写成另外两个向量的线性组合,故

$$\begin{aligned} x_m &= k(x_p + x_r), y_m = k(y_p + y_r), \\ z_m &= k(z_p + z_r), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 (x_i, y_i, z_i) 、 (x_p, y_p, z_p) 、 (x_r, y_r, z_r) 和 (x_m, y_m, z_m) 分别为归一化的入射光向量、入射光反向向量、反射光向量和镜面法线向量。联立(1)式和(2)式即可求得反射向量。

主光轴 $\mathbf{r}_0 = [-1, 0, 0]^T$ 、东西和南北扫描镜位于零位时,东西和南北扫描镜法线的方向向量分别为 $[\cos(\pi/4), \sin(\pi/4), 0]^T$ 和 $[0, -\cos(\pi/4), \sin(\pi/4)]^T$,经东西和南北扫描镜反射后,出射视向量为 $[0, 0, 1]^T$ 。当东西扫描镜转动 β 、南北扫描镜转动 α 时,东西扫描镜和南北扫描镜法线分别为

$$(x'_m, y'_m, z'_m)_{EW}^T = \mathbf{R}_Z(x_m, y_m, z_m)^T = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix}_{EW}, \quad (3)$$

$$(x'_m, y'_m, z'_m)_{NS}^T = \mathbf{R}_X(x_m, y_m, z_m)^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix}_{NS}, \quad (4)$$

将 $\mathbf{r}_0 = [-1, 0, 0]^T$ 和东西扫描镜法线 $(x'_m, y'_m, z'_m)_{EW}^T$ 代入(1)式和(2)式,计算得到经东西扫描镜反射的视向量,其为南北镜的入射向量,将其与南北镜法线一同代入(1)式和(2)式,得到卫星本体坐标系 $S-X'Y'Z'$ 中成像仪出射视向量为

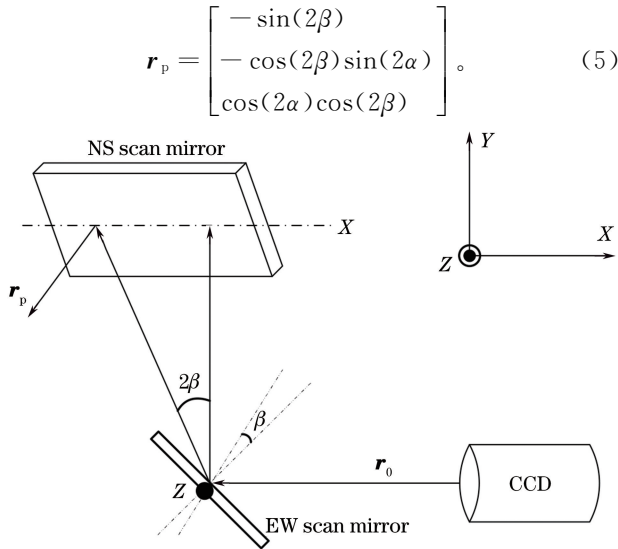


图 1 FY-4A 成像仪扫描镜光路示意图
Fig. 1 Schematic of scanning mirror optical path of FY-4A imager

3 标称网格计算

标称网格是由位于理想位置的地球同步轨道卫星观测视图计算标称网格坐标与地理经纬度间的一种投影变换。调研发现,国外大多数静止轨道气象卫星,如 Electro L^[11]、H8 AHI、MTG FCI^[12]等近几年发射的或预计发射的卫星,均采用 CGMS LRIT/HRIT 全球规范中定义的标准投影生成 L1 标称图像;而 GOES-R 则采用自己定义的标准投影来生成 L1 标称图像。针对上述两种标称投影,推导了 CGMS 规范和 GOES-R 标称网格上行列号与经纬度相互转换的计算过程,并对两者的异同进行了分析。

3.1 CGMS 标称网格定义与推导

由经纬度坐标、南北步进角和东西扫描角、卫星定点位置和所采用地球模型可以计算出该点在标称网格上的行列号。CGMS 采用世界大地坐标系 (WGS 84) 地球参考椭球模型,即

$$\frac{e_3^2}{r_{\text{pol}}^2} + \frac{e_1^2 + e_2^2}{r_{\text{eq}}^2} = 1, r_{\text{pol}} = 6356.7523 \text{ km},$$

$$r_{\text{eq}} = 6378.1370 \text{ km}. \quad (6)$$

如图 2 所示,以地心 O 为原点建立空间直角坐标系 $O-xyz$, x 轴沿地心与卫星连线指向卫星, z 轴指向北极, y 轴与 z 、 x 轴构成右手坐标系;以卫星 S 为原点建立空间直角坐标系 $S-r_1r_2r_3$, r_1 轴从卫星出发指向星下点, r_3 轴与地心直角坐标系 z 轴平行, r_2 轴与 r_1 、 r_3 轴构成右手坐标系。由 $S-r_1r_2r_3$ 与 $O-xyz$ 间的相对关系知,若点 P 在 $O-xyz$ 坐标系中

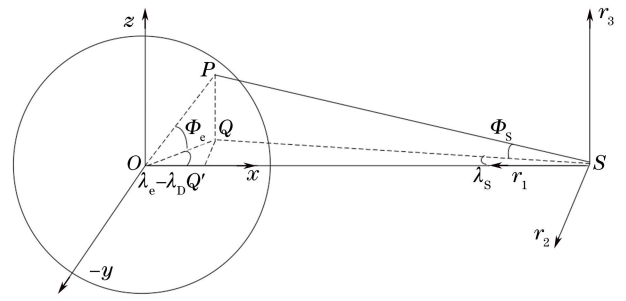


图 2 CGMS 标称图对应的卫星坐标系
Fig. 2 Satellite coordinates defined in CGMS

为 (x, y, z) , 则在 $S-r_1r_2r_3$ 坐标系中, $r_1 = H - x$, $r_2 = -y$, $r_3 = z$, 式中 H 为卫星与地心连线的距离, 单位为 km 。 r_e 从地心指向地球表面任意一点 $P(\lambda, \Phi)$ 。图中 Φ_e 和 λ_e 分别为 P 点对应的地心纬度和经度, Q 为 P 在平面 xOy 内的投影, 由大地坐标与地心坐标间的关系, 可得

$$OP = r_e, \angle POQ = \Phi_e, \angle QOQ' = \lambda - \lambda_D, \quad (7)$$

于是, P 在 $O-xyz$ 坐标系中可表示为

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_e \cos \phi_e \cos(\lambda - \lambda_D) \\ r_e \cos \phi_e \sin(\lambda - \lambda_D) \\ r_e \sin \phi_e \end{pmatrix}, \quad (8)$$

则点 P 在卫星坐标系 $S-r_1r_2r_3$ 中的坐标为

$$P = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H - r_e \cos \phi_e \cos(\lambda - \lambda_D) \\ -r_e \cos \phi_e \sin(\lambda - \lambda_D) \\ r_e \sin \phi_e \end{pmatrix}, \quad (9)$$

因此, 扫描角和步进角^[2]为

$$\lambda_s = \arctan\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad \phi_s = \arcsin\left(\frac{r_3}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}}\right), \quad (10)$$

式中扫描角和步进角“西北”为正。因此, 点 P 在标称网格上的行列号^[2]为

$$\begin{cases} C = C_{\text{OFF}} + \text{int}(-\lambda_s \cdot C_{\text{FAC}} \cdot 2^{-16}) \\ L = L_{\text{OFF}} + \text{int}(-\phi_s \cdot L_{\text{FAC}} \cdot 2^{-16}) \end{cases}, \quad (11)$$

式中 L_{OFF} 与 C_{OFF} 为星下点在标称网格上的行列号, L_{FAC} 与 C_{FAC} 为与角分辨率对应的行列缩放系数。

反过来, 由行列号计算地理经纬度, 即

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) + \lambda_D \\ \arctan\left(\frac{r_{\text{eq}}^2}{r_{\text{pol}}^2} \cdot \frac{S_3}{S_{xy}}\right) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式中 $S_1 = H - S_n \cos x \cos y$, $S_2 = S_n \sin x \cos y$, $S_3 = -S_n \sin y$, $S_{xy} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ 。

$$S_n = \frac{H \cos x \cos y - S_d}{\cos^2 y + \frac{r_{\text{eq}}^2}{r_{\text{pol}}^2} \sin^2 y}, \quad (13)$$

$$S_d = \sqrt{(H \cos x \cos y)^2 - \left(\cos^2 y + \frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \cdot \sin^2 y \right) \cdot (H^2 - r_{eq}^2)}, \quad (14)$$

式中 $x = -\lambda_s, y = -\phi_s$ 。

3.2 ABI/GOES-R 标称网格的定义与推导

由 GOES-R 用户手册得知,GOES-R 采用 GRS 80 参考椭球来计算标称网格,东西向和南北向扫描角“东北”为正,而 $S_x S_y S_z$ 坐标系中“西北”为正,因此点 P 在图 3 所示卫星空间直角坐标系中坐标为

$$P = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s \cos x \cos y \\ -r_s \sin x \\ r_s \cos x \sin y \end{pmatrix}, \quad (15)$$

式中 x 为标称网格上东西方向扫描角, y 为标称网格上南北方向扫描角。则 P 在地心坐标系下坐标为 $(H - S_x, -S_y, S_z)^T$

$$\begin{pmatrix} \phi \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan \left[\frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \cdot \frac{S_z}{\sqrt{(H - S_x)^2 + S_y^2}} \right] \\ \lambda_0 - \arctan \left(\frac{S_y}{H - S_x} \right) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

由于点 P 在参考椭球上,满足

$$\frac{(H - S_x)^2 + S_y^2}{r_{eq}^2} + \frac{S_z^2}{r_{pol}^2} = 1, \quad (17)$$

化简得到 $ar_s^2 + br_s + c = 0$, 式中 $a = \sin^2 x + \cos^2 x [\cos^2 y + (\sin^2 y) r_{eq}^2 / r_{pol}^2], b = -2H \cos x \cos y, c = H^2 - r_{eq}^2, r_s = (-b - \sqrt{b^2 - 4ac}) / (2a)$ 。

反过来,由经纬度转行列号可得:

$$x = \arcsin \left(\frac{-S_y}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}} \right), y = \arctan \left(\frac{S_z}{S_x} \right), \quad (18)$$

$$C = C_{OFF} + \frac{x}{\theta}, L = L_{OFF} - \frac{y}{\theta}, \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H - r_e \cos \phi_e \cos(\lambda - \lambda_D) \\ -r_e \cos \phi_e \sin(\lambda - \lambda_D) \\ r_e \sin \phi_e \end{pmatrix}, \quad (20)$$

式中 θ 为标称网格上单个像元在水平和垂直方向的张角, ϕ_e 和 r_e 分别为地心纬度和地心距。

3.3 CGMS 与 GOES-R 标称网格的区别与联系

CGMS 与 GOES-R 标称网格都是在卫星空间直角坐标系 $S-XYZ$ 中定义的,在 $S-XYZ$ 坐标系中,GOES-R 定义的扫描角 x 和步进角 y 、CGMS 中扫描角 λ_s 和步进角 ϕ_s 如图 4 所示。GOES-R 中,

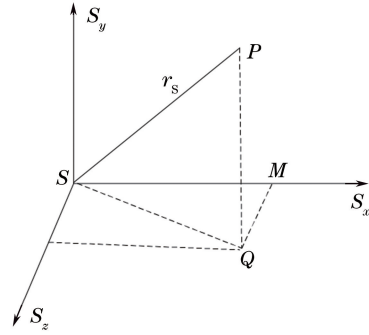


图 3 GOES-R 标称图对应的卫星坐标系

Fig. 3 Satellite coordinates defined in GOES-R

东西向扫描角是观测向量 SP 与 XSZ 平面的夹角,向东为正;南北向步进角是观测向量 SP 在 XSZ 平面内的投影与 X 轴夹角,向北为正。CGMS 中,东西向扫描角是观测向量 SP 与 XSZ 平面的夹角,向西为正;南北向步进角是观测向量 SP 在 XSZ 平面内的投影与 X 轴夹角,向北为正。从数学角度来看,在空间直角坐标系 $S-XYZ$ 中,观测向量既可以表示成 $(|SP|, \lambda_s, \phi_s)$,也可以表示成 $(|SP|, x, y)$,两者可以进行等价变换,表明 GOES-R 和 CGMS 格式的全圆盘标称图像可以相互转换。表 1 为空间直角坐标系 $S-XYZ$ 中 CGMS 和 GOES-R 东西向和南北向扫描角的计算公式,其中 α, β 分别是南北向和东西向的机械扫描角。

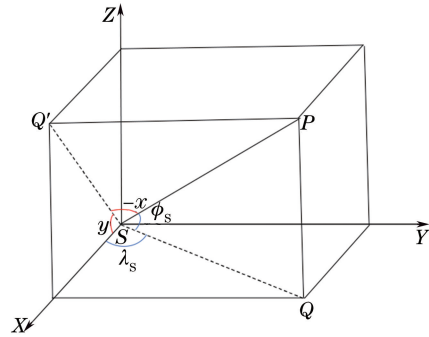


图 4 CGMS 与 GOES-R 的东西向和南北向扫描角

Fig. 4 East-west and north-south pointing angles in CGMS and GOES-R

此外,CGMS 与 GOES-R 在计算标称网格时,选择的参考椭球模型和卫星标称轨道高度不同:1)GOES-R 采用 GRS 80 参考椭球,标称轨道高度 $H = 42164.160 \text{ km}$;2)CGMS 采用 WGS 84 参考椭球,标称轨道高度 $H = 42164 \text{ km}$ 。

表 1 标称网格上扫描角和步进角

Table 1 Scanning and stepping angles of normal fixed grid

Definition	Calculation formula	Positive direction
CGMS	$\beta = \frac{\lambda_s}{2} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_y}{S_x}\right)$	Northwest
	$\alpha = \frac{\phi_s}{2} = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{S_z}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}}\right)$	
GOES-R	$\beta = \frac{x}{2} = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{-S_y}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}}\right)$	Northeast
	$\alpha = \frac{y}{2} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_z}{S_x}\right)$	

为了更加直观地说明 CGMS 规范和 GOES-R 标称网格的区别与联系,以 FY-4A 成像仪 2017 年 7 月 28 日 4:30 UTC 获取的第 5 通道的全圆盘 L1 数据为例,给出 CGMS 与 GOES-R 标称图像的转换方法。将 CGMS 全圆盘图像转换成 GOES-R 方式定义的标称图像,计算过程如下:1)根据 CGMS 全圆盘图像行列号由(12)~(14)式计算对应的经纬度;2)根据计算的经纬度由(18)~(20)式计算 GOES-R 标称网格上的行列号;3)根据计算的行列号与原行列号对应关系,生成 GOES-R 格式的全圆盘标称图像,即变换图

像;4)在变换图像上叠加 GOES-R 海岸线。

反过来,也可将 GOES-R 标称图像转换成 CGMS 图像。在原图像上先后叠加由(8)~(11)式计算的 CGMS 海岸线和(18)~(20)式计算的 GOES-R 海岸线,在变换图像上仅叠加(18)~(20)式计算的 GOES-R 海岸线。因为图像尺寸为 5496 pixel×5496 pixel,空间分辨率为 2 km,为了便于显示,从中选取 6 个地标给出 CGMS 和 GOES-R 标称图像的异同,结果如图 5~10 所示。选取的 6 个地标分别是里海、库页岛、索马里、爪哇岛西海岸、澳大利亚东海岸和西海岸,所选地标尽可能均匀地分布在整个全圆盘上。

目前,为方便用户使用并保持与全球规范的一致性,FY-4A 采用 CGMS 方式生成全圆盘标称图像,其结果与 GOES-R 海岸线套合情况不好,索马里附近在南北方向约偏 6 pixel,但变换后的图像与 GOES-R 海岸线套合得很好,偏差约为 1 pixel。原因在于,标称图像与相应方式海岸线的套合情况完全依赖于图像定位结果的准确性,与采用何种方式生成标称图像无关。测试结果进一步证实 GOES-R 和 CGMS 格式的标称图像不一致,但可以相互转换。

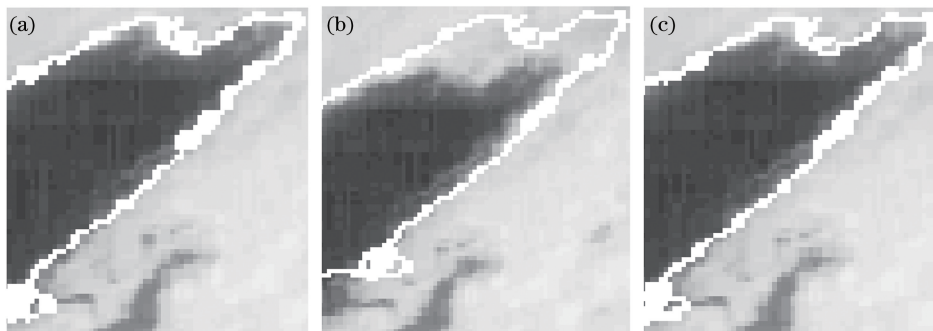


图 5 (a)里海原图像+CGMS 海岸线;(b)里海原图像+GOES-R 海岸线;(c)里海变换图像+GOES-R 海岸线

Fig. 5 (a) Caspian sea L1 image+CGMS coastline; (b) Caspian sea L1 image+GOES-R coastline;

(c) Caspian sea transformed image+GOES-R coastline

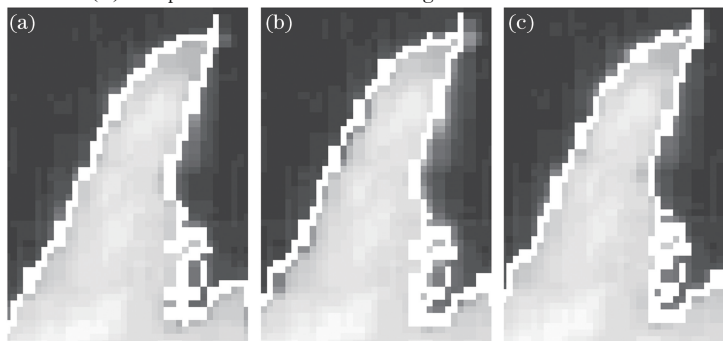


图 6 (a)澳大利亚西海岸原图像+CGMS 海岸线;(b)澳大利亚西海岸原图像+GOES-R 海岸线;(c)澳大利亚西海岸变换图像+GOES-R 海岸线

Fig. 6 (a) Western coastline of Australia L1 image+CGMS coastline; (b) western coastline of Australia L1 image+GOES-R coastline; (c) western coastline of Australia transformed image+GOES-R coastline

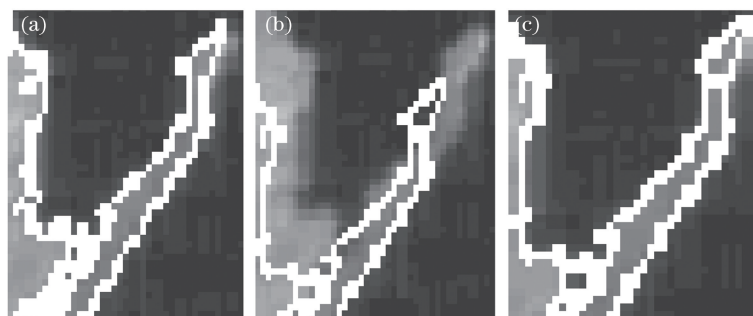


图 7 (a) 澳大利亚东海岸原图像+CGMS 海岸线;(b)澳大利亚东海岸原图像+GOES-R 海岸线;
(c) 澳大利亚东海岸变换图像+GOES-R 海岸线

Fig. 7 (a) Eastern coastline of Australia L1 image+CGMS coastline; (b) eastern coastline of Australia L1 image+GOES-R coastline; (c) eastern coastline of Australia transformed image+GOES-R coastline

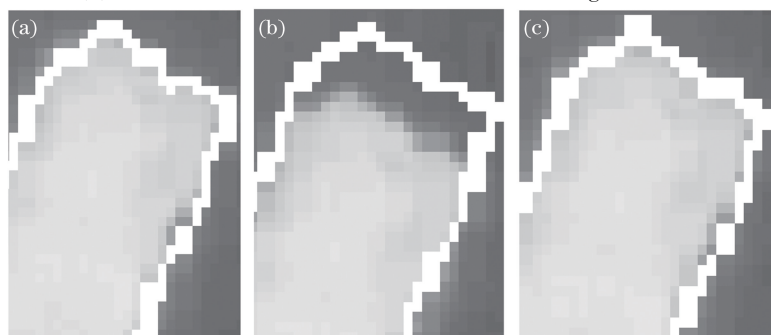


图 8 (a) 索马里原图像+CGMS 海岸线;(b)索马里原图像+GOES-R 海岸线;(c)索马里变换图像+GOES-R 海岸线

Fig. 8 (a) Somalia L1 image+CGMS coastline; (b) Somalia L1 image+GOES-R coastline; (c) Somalia transformed image+GOES-R coastline

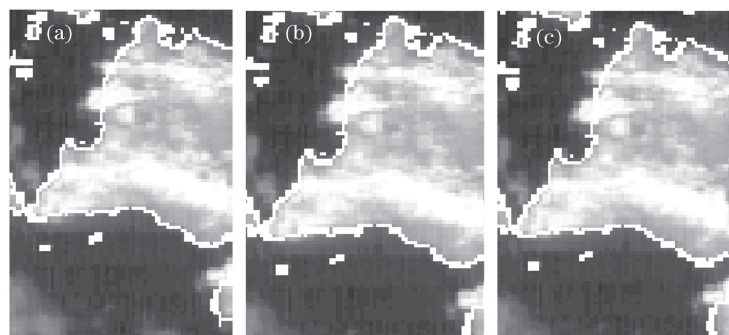


图 9 (a) 爪哇岛西海岸原图像+CGMS 海岸线;(b)爪哇岛西海岸原图像+GOES-R 海岸线;(c)爪哇岛西海岸变换图像+GOES-R 海岸线

Fig. 9 (a) Western coastline of Java island L1 image+CGMS coastline; (b) western coastline of Java island L1 image+GOES-R coastline; (c) western coastline of Java island transformed image+GOES-R coastline

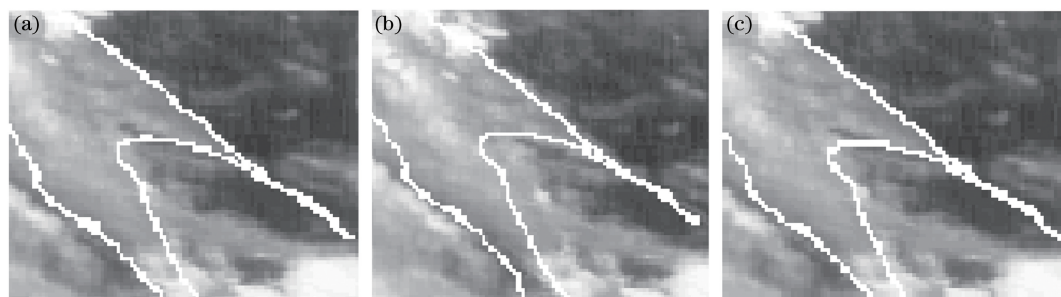


图 10 (a) 库页岛原图像+CGMS 海岸线;(b)库页岛原图像+GOES-R 海岸线;(c)库页岛变换图像+GOES-R 海岸线

Fig. 10 (a) Sakhalin island L1 image+CGMS coastline; (b) Sakhalin island L1 image+GOES-R coastline;
(c) Sakhalin island transformed image+GOES-R coastline

4 FY-4A 标称网格特点分析

如前所述, FY-4A 成像仪出射视向量与 GOES-R 在形式上略有不同, 原因在于两者采用的卫星空间直角坐标系不一致。从 S - XYZ 与前述 S - $S_x S_y S_z$ 两个空间直角坐标系的关系可知, 3 个坐标轴间满足

$$S_z = -Y, S_y = X, S_x = Z. \quad (21)$$

于是, S - $S_x S_y S_z$ 坐标系中 FY-4A 成像仪的出射视向量由(5)式可变形为

$$r_{out} = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\alpha) \cos(2\beta) \\ -\sin(2\beta) \\ \cos(2\beta) \sin(2\alpha) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

令 $x = 2\beta, y = 2\alpha$, (22) 式则变成与(14)式完全同样的形式, x 和 y 分别为东西扫描镜和南北扫描镜转过 β 、南北扫描镜转动 α 时出射光线转过的角度。由前述推导过程可知, GOES-R 定义的标称网格是从 ABI 的光机结构和扫描方式出发定义的; FY-4A 成像仪对地成像的实际光路与 GOES-R 定义的标称网格相符。因此, FY-4A 的任务规划、指令生成与星上补偿量计算都是在该标称网格的基础上进行的。

为了进一步证实 FY-4A 成像仪扫描控制机构测量的扫描角、步进角与 CGMS 和 GOES-R 定义的标称网格上的扫描角、步进角之间的关系, 在星下点 104.7° 全圆盘上选出了部分海岸线(图 11 中红线部分), 利用(10)、(18)和(5)式分别计算了所选海岸线在 CGMS、GOES-R 和 FY-4A 标称网格上对应的扫描角和步进角(机械角)。FY-4A 与 GOES-R、FY-4A 与 CGMS 的扫描角和步进角之差分别如图 12 和图 13 所示。因为 GOES-R 标称网格上的扫描角和步进角以“东北”为正, 在计算两者之差前, 依据

GOES-R 定义对计算的扫描角符号取反。结果表明, FY-4A 成像仪扫描控制机构测量的扫描角、步进角与 GOES-R 标称网格上扫描角、步进角相同, 与 CGMS 标称网格上扫描角、步进角不同, 最大差别为 $300 \mu\text{rad}$ 以上(换算成 500 m 通道像元数约为 42.84 pixel)。

国外大多数静止轨道气象卫星均采用 CGMS 定义的标准投影生成 L1 标称图像。为方便用户使用并保持与全球规范的一致性, FY-4A 成像仪将采用国际上普遍接受的 CGMS LRIT/HRIT 全球规范中定义的标准投影。

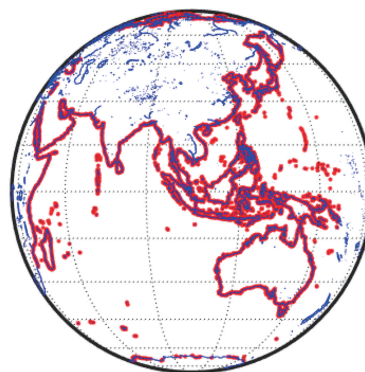


图 11 计算的海岸线在全圆盘上的分布

Fig. 11 Distribution of calculated coastlines on the full disk

5 结 论

国际上存在两种静止轨道卫星标称图像计算方法, 理解这两种方法的定义与异同对卫星数据应用具有非常重要的意义。静止卫星的标称图像是基于理想位置的卫星观测视图对地球给定区域的投影变换, 以保证所有产品中相同的数据点落在地球上同一位置。因此, 标称图像与卫星定点位置、星下角分辨率和参考椭球参数有关。目前存在 CGMS 规范和 GOES-R 两种标称网格定义方式, 使用时需要

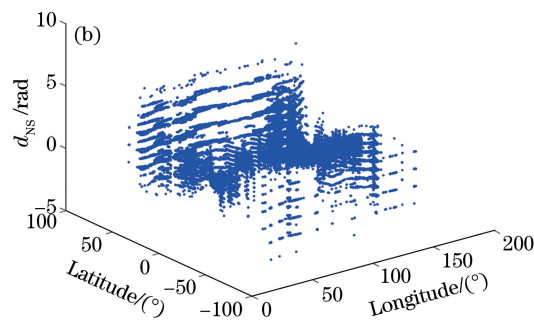
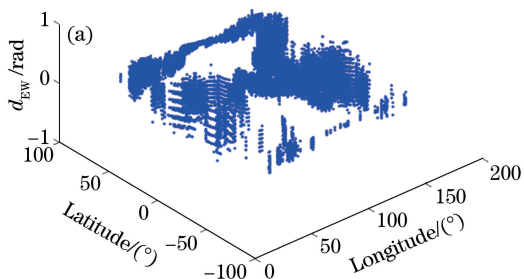


图 12 (a) FY-4A 和 GOES-R 方式计算的扫描角之差; (b) FY-4A 和 GOES-R 方式计算的步进角之差

Fig. 12 (a) Differences of east-west angles between FY-4A and GOES-R; (b) differences of north-south angles between FY-4A and GOES-R

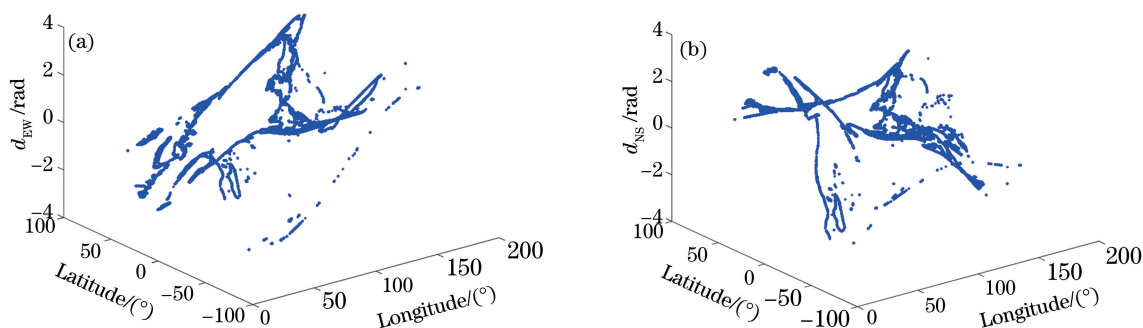


图 13 (a) FY-4A 和 CGMS 方式计算的扫描角之差; (b) FY-4A 和 CGMS 方式计算的步进角之差
Fig. 13 (a) Differences of east-west angles between FY-4A and CGMS; (b) differences of north-south angles between FY-4A and CGMS

注意。详细推导了 CGMS 规范与 GOES-R 标称网格的计算过程,针对上述两种标称网格定义,深入比较了两者的异同。结果表明,两种标称网格定义出发点不同,CGMS 规范延续了以往自旋稳定式静止卫星的扫描机制,GOES-R 则是从 ABI 的光机结构出发;两者计算的扫描角与步进角最大差别在 $300 \mu\text{rad}$ 以上,但两者可相互转换。本文给出了详细的转换方法,并以 FY-4A 成像仪全圆盘图像为例加以证实。最后,为方便用户使用并保证与全球规范的一致性,目前 FY-4A L1 产品采用国际上普遍接受的 CGMS LRIT/HRIT 全球规范中定义的标准投影,但技术上也保留了未来采用 GOES-R 方式的可能。

致谢 FY-4A 成像仪扫描角与步进角的计算得到上海卫星工程研究所吕旺、王田野等的无私帮助,在此表示衷心感谢!同时,衷心感谢解放军信息工程大学童晓冲和中国科学院上海技术物理研究所王葆勇对成像仪出射视向量计算公式正确性的确认。

参 考 文 献

- [1] Wang G Q, Chen G L. Two-dimensional scanning infrared imaging technology on geosynchronous orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 429-433.
王淦泉, 陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 429-433.
- [2] Wolf R, Just D. LRIT/HRIT global specification [J]. *Coordination Group for Meteorological Satellites*, 2013. 2.8: 1-54.
- [3] Murata H, Takahashi M, Kosaka Y. VIS and IR bands of Himawari-8/AHI compatible with those of MTSAT-2/Imager[J]. *MSC Technical Note*, 2015, 60: 1-18.
- [4] Schmit T J, Griffith P, Gunshor M M, *et al.* A closer look at the ABI on the GOES-R series [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(4): 681-698.
- [5] Guo Q, Chen G L. Study on the high-speed acquisition and preprocessing of the images of the synchronous meteorologic satellites [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(s1): 10-15.
郭强, 陈桂林. 静止气象卫星图像高速采集和预处理研究 [J]. *量子电子学报*, 2001, 18(s1): 10-15.
- [6] Qian H, Shi C X, Shi J M. Analytical method for geostationary satellite normalized projection and its FY2-C application [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(2): 300-306.
钱辉, 师春香, 施进明. 静止卫星标称投影解析方法及其在 FY2-C 中的应用 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(2): 300-306.
- [7] Wang H B, Li G C, Sui M. A method of using the linear interpolation to realize the image location and projection calculation of the FY-2 satellite data [J]. *Agriculture Network Information*, 2007 (4): 35-37, 43.
王宏博, 李国春, 隋明. 应用线性插值对风云二数据进行图像定位与投影计算 [J]. *农业网络信息*, 2007 (4): 35-37, 43.
- [8] Li Z Q, Kuang D B, Yin Q, *et al.* The research on processing of geographical location data of FY 2 based on interpolation [J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(2): 31-35.
李志乾, 匡定波, 尹球, 等. 基于插值的 FY-2 静止气象卫星地理定位数据处理方法研究 [J]. *遥感信息*, 2012, 27(2): 31-35.
- [9] Long M T, Yu T, Meng Q Y, *et al.* A fast interpolating scheme for longitude and latitude of HJ-1 satellite images [J]. *Microcomputer Information*, 2011, 27(11): 118-119, 125.
龙明涛, 余涛, 孟庆岩, 等. 一种基于 HJ-1 卫星影像的经纬度快速插值算法 [J]. *微计算机信息*, 2011,

- 27(11): 118-119, 125.
- [10] Shen Y L, Lü W, Yu Y J, *et al.* Research of imager scan mirror's thermal distortion model for image navigation and registration[J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(2): 26-29, 72.
沈毅力, 吕旺, 于永江, 等. 用于图像定位与配准的扫描辐射计扫描镜热变形模型研究[J]. 上海航天, 2014, 31(2): 26-29, 72.
- [11] Russian Federal Service on Hydrometeorology, State Research Institute on Space Hydrometeorology Planeta. ElectrolL ground segment MSU-GS instrument: LRIT/HRIT mission specific implementation[M]. Moscow: State Research Institute on Space Hydrometeorology Planeta, 2012.
- [12] Durand Y, Hallibert P, Wilson M, *et al.* The flexible combined imager on board MTG: from design to calibration[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9639: 963903.