

卫星遥感图像反辉区定位方法研究

李 玮^{1,2},毛士艺¹,李艳兵²

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100083;2. 空军装备研究院气象所,北京 100085)

摘 要: 本文从理论上推导静止卫星遥感图像中太阳反辉区的精确定位方法,据此计算了2006年部分整点时次FY-2C图像反辉区中心点的理论位置,结合海陆分布推测反辉区发生的时间和区域特征.选取个例与实际图像中反辉区进行了对比,通过分析误差进行调整,与人工判定结果取得了很好的一致性.探讨了反辉区形成机理,可视化地表达出理论计算的反辉区形状和大小特性.

关键词: 卫星遥感; 静止卫星; 太阳反辉区; 反辉区定位

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1210-06

An Algorithm for Locating of Sun glints in Satellite Remote Sensing Images

LI Wei^{1,2}, MAO Shi-yi¹, LI Yan-bing²

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Meteorological Institute, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100085, China)

Abstract: A precise algorithm of determining theoretical locations of sun glints in remote sensing images from geostationary satellites was described. An application of the algorithm in FY-2C Images for different hours in each day of year 2006 was presented, and with help of sea-land distribution information, temporal and spatial characteristics of sun glint happenings could be inferred. Theoretical calculation results of selected samples were compared with manual results. Errors were analyzed and two adjustments were made, which led to satisfying consistent results. The emerging mechanism of sun glint areas was discussed then, and the theoretical calculation results of their shapes and sizes were shown in a visualized way.

Key words: satellite remote sensing; geostationary satellites; sun glints; locating of sun glints

1 引言

太阳反辉区是太阳光经平静的海面镜面反射到卫星而形成的卫星可见光通道图像上的一块高亮区域,亦称太阳耀斑区.由于该区域处太阳镜面反射能量占据主体,使得遥感目标的辐射难以测量,会对遥感带来不小的影响,尤其对于专门的海洋遥感^[1,2],而静止卫星位置固定,每天受反辉区影响是个客观存在的问题.另外,非平静的海面也能形成太阳反辉区,当海面具有一定的波高时,该区域还会扩大,从而影响更大范围的探测,但是这种影响反过来被用于确定近海面风场.

研究太阳反辉区的定位具有重要的意义,相对于国内,太阳反辉区的精确定位国外有较多研究.具有代表性的有:Prakash研究了INSAT卫星反辉区定位方法^[3],但算法较复杂且迭代求解非线性方程的过程没有收敛性保证;Emecen应用于Meteosat卫星的方法则相对简单,取

得了很好的结果,对反辉区的大小也进行了初步的讨论^[4],但其对于太阳的位置进行了较大的近似处理.

这里针对我国第一颗业务运行的静止气象卫星FY-2C探讨反辉区定位问题.FY-2C受反辉区影响的不仅是可见光通道,波长3.5-4.0 μm 的IR4通道用于昼夜云、高温目标的探测,该通道图像也存在反辉区,表现为显眼的黑色块,其形成是由通道特性引起的,3.5-4.0 μm 波段属中红外区,处于大气窗区,地球的热辐射与太阳辐射的反射部分处于同一个数量级,需要同时考虑.通常情况下,高温目标的热辐射会大于太阳反射,所以该通道可探测高温目标,如应用于火情监测^[5,6];也有特殊情况,如平静海面反射的太阳辐射也会大于一般太阳反射和地面辐射,形成类似高温点但面积明显较大的黑色区域,这就是太阳反辉区. IR4通道的太阳反辉区与可见光通道有很好的对应,从图像出发进行反辉区人工判识时,两个通道联合进行可互相验证.

2 定位原理与算法

通过研究地球球体的表面反射原理,可从理论上计算出静止卫星图像中太阳反辉区的中心位置,下面给出反辉区定位的理论推导过程.

2.1 计算太阳下点和卫星下点的位置

地球围绕太阳的椭圆运动可通过二体运动的开普勒方程来求解,得到地球相对太阳的位置,经转化可得到太阳相对地球的位置,通过验算,本文选择 SPA 算法. SPA 算法是美国 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 开发的精确计算太阳位置的算法. 利用该算法,由需要计算的时间 t ,可计算地心真天球坐标系中太阳的赤经和赤纬 (s, δ) 及真格林尼治恒星时 g ,由于算法中考虑了月球的影响和地球的章动,结果具有较高的精度. 赤经应取角度单位,而非计时单位,以便于后面计算.

得到地心真天球坐标系中太阳的赤纬和赤经后,转换到地固坐标系中,设太阳下点为 T ,可得到太阳下点的经纬度 (T, λ) . 由于这两个坐标系之间是绕 Z 轴旋转真格林尼治恒星时的关系^[7],所以

$$\begin{cases} T = s - g \\ \lambda = \lambda_s - g \end{cases}$$

注意到获得的经度还要经过圆周订正以保证其值合理,即处于 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内,后文计算得到的反射点经度同样要有这种处理. 卫星下点的计算,对于静止卫星,可近似认为星下点经纬度固定(实际情况不同,后文定位实验部分有相关讨论),设为 (P, λ_p) , P 因卫星而异, $\lambda_p = 0$.

2.2 计算太阳下点和卫星下点所在的大圆弧

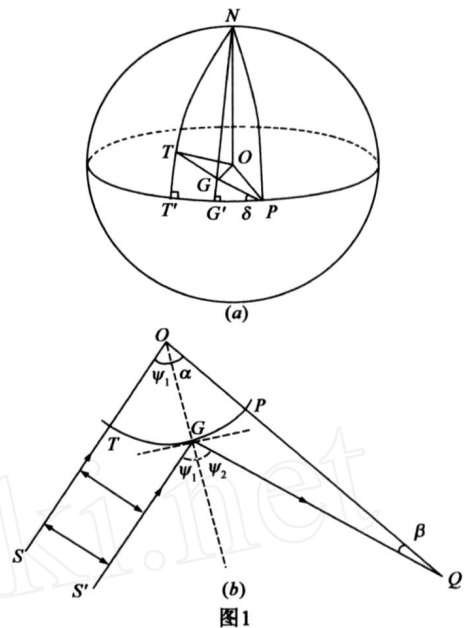
为方便计算,需要有地球为球体的假设,球体半径取平均地球半径 $R = 6371.009\text{km}$. 按照太阳下点和卫星下点的位置关系,可分 3 种情况处理:(1) 太阳下点在卫星下点的西侧 ($\lambda_p - 180^\circ < T < \lambda_p$); (2) 太阳下点与卫星下点经度相同 ($T = \lambda_p$); (3) 太阳下点在卫星下点的东侧. 先分析第 1 种情况,第 3 种情况通常与之差别不大,可类比得出,第 2 种情况需要另做说明.

如图 1(a), T 是太阳下点, P 是卫星下点, N 是北极点, NT 、 NG 、 NP 都是大圆弧. 太阳下点、卫星下点和地球中心所在的平面,这里称为参考平面,用 α 表示该

平面上的大圆弧 TP 对应的角,应有 $\alpha = 180^\circ - \angle TNP$. 在球面三角形 NTP 中,利用余弦定理及 $\lambda_p = 0$ 可得:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \cos(90^\circ - \delta) \cos(90^\circ - \delta_p) + \sin(90^\circ - \delta) \sin(90^\circ - \delta_p) \cos(\lambda_p - \lambda_T) \\ &= \arccos \left\{ \cos \delta \cos \delta_p + \sin \delta \sin \delta_p \cos(\lambda_p - \lambda_T) \right\} \end{aligned}$$

当 $\lambda_p = \lambda_T$ 时, T 在大圆弧 NP 上, $\alpha = 0$.



2.3 计算参考平面上反射点位置

反射点在参考平面上,且在太阳下点和卫星下点所在的大圆弧上,其位置可由卫星下点和反射点之间的角 β 唯一表示. 如图 1(b) 所示, Q 是卫星, G 是反射点,相对卫星来说,太阳距离地球可认为无限远,则太阳发出的光线近似平行,即 SO 与 $S'G$ 平行,则 $\angle SOG = 180^\circ - \beta$,而 $\angle GQO = \beta$,利用反射定律 $\angle SOG = \angle GQO$ 可得:

$$\beta + \alpha = 180^\circ - \beta \Rightarrow \beta = \frac{1}{2}(180^\circ - \alpha)$$

在三角形 GQO 中,存在三角关系:

$$\begin{cases} |GO| \cos \beta + |OQ| \cos \alpha = |GQ| \\ |GO| \sin \beta = |GQ| \sin \alpha \end{cases} \Rightarrow \text{tg } \beta = \frac{|GO| \sin \alpha}{|OQ| - |GO| \cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

这里 $\beta = \arctg \left(\frac{R}{R+H} \right)$, H 是卫星高度

$$\begin{aligned} &= \arctg \left(\frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha} \right) = \left(\frac{1}{2} \left(180^\circ - \alpha \right) \right) = \beta \end{aligned}$$

按照静止卫星与地球的几何关系, $\alpha = \angle TNP$ 取得最大值为 $\arccos \left[\frac{1}{2} \right] = 81.3087^\circ$,所以 β 的取值范围为 $[0, 81.3087^\circ]$. 上述方程满足收敛性定理,可用迭代法求解得到 β 的唯一解.

2.4 计算反射点经纬度

设反射点 G 的经纬度为 (G, λ_g) ,参考平面与赤道面的夹角为 α ,如图 1(a),球面三角形 TPT 和 GPG 中分别利用正弦定理可得:($\lambda_T = 0$ 时)

$$\begin{cases} \frac{\sin T}{\sin \alpha} = \frac{\sin \lambda_g}{\sin(90^\circ - \delta)} \\ \frac{\sin G}{\sin \alpha} = \frac{\sin \lambda_g}{\sin(90^\circ - \delta_p)} \end{cases} \Rightarrow G = \arcsin \left(\frac{\sin T \sin \delta_p}{\sin \delta} \right)$$

$T=0$ 时, $G=$.

在球面三角形 NGP 中, 利用余弦定理可得:

$$\cos G = \cos(90^\circ - p) \cos(90^\circ - G) + \sin(90^\circ - p) \sin(90^\circ - G) \cos T$$

$$\Rightarrow G = p - \arccos \left(\frac{\cos T}{\cos p} \right)$$

所以, 当太阳下点在卫星下点的西侧 ($p - 180^\circ < T < p$) 时

$$\left\{ \begin{aligned} G &= \arcsin \left(\frac{\sin T \cdot \sin p}{\sin G} \right) \\ G &= p - \arccos \left(\frac{\cos T}{\cos p} \right) \end{aligned} \right.$$

同理, 当太阳下点在卫星下点的东侧时

$$\left\{ \begin{aligned} G &= \arcsin \left(\frac{\sin T \cdot \sin p}{\sin G} \right) \\ G &= p + \arccos \left(\frac{\cos T}{\cos p} \right) \end{aligned} \right.$$

$T = p$ 时, $G = 0$.

3 定位实验与结果分析

利用上述理论推导的算法, 可以计算 FY-2C 卫星图像中太阳反辉区中心的理论位置. FY-2C 卫星定位于东经 105 度(后文中所有经度均为东经值), $p = 105^\circ$, 卫星高度取近地点和远地点的平均 $H = 35790\text{km}$.

图2中给出了东半球2006年全年每天0~11时(文

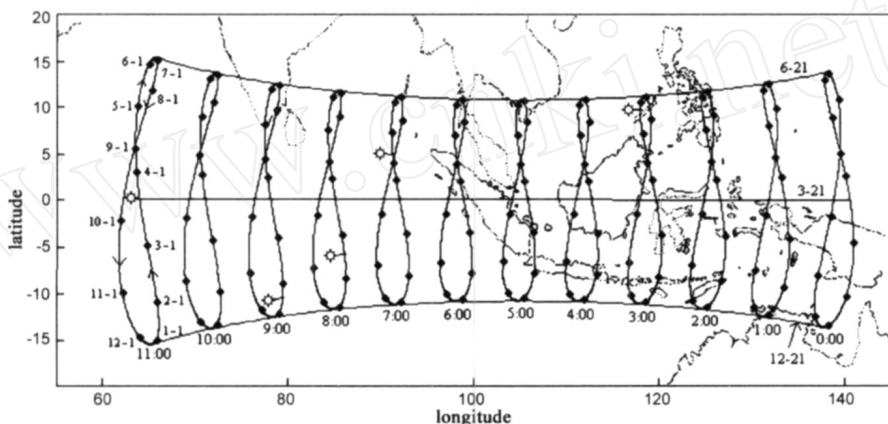


图2 2006年部分整点FY-2C太阳反辉区中心位置分布

中所有时间均为世界时) 整点的反辉区中心理论位置分布, 包括 12 个整点的年轨迹, 轨迹上都标示了各月 1 日的位置并在 11:00 的年轨迹上进行标注, 东西向的 3 条大弧线分别表示了 6 月 21、3 月 21 日和 12 月 21 日 0:00 至 11:00 的日轨迹. 可以看出, 对相同时次来说, 反辉区中心的日变化呈 8 字形分布, 上半年从南移向北, 下半年从北移向南, 这种变化是与太阳下点的日变化

对应的(如图3). 同一天内, 反辉区中心由东向西移动, 对应地球的自转. 参照图2中底图的海岸边界, 可推测: (1) 反辉区发生在 6:00 以后的几率应比较大, 因为对应区域多是海洋; (2) 冬季 6:00 以后对应图中左下角区域, 海洋广阔, 反辉区发生可能性更大. 这种推测只考虑了必要性, 不具充分性, 实际反辉区发生受云以及其他因素的影响是很大的.

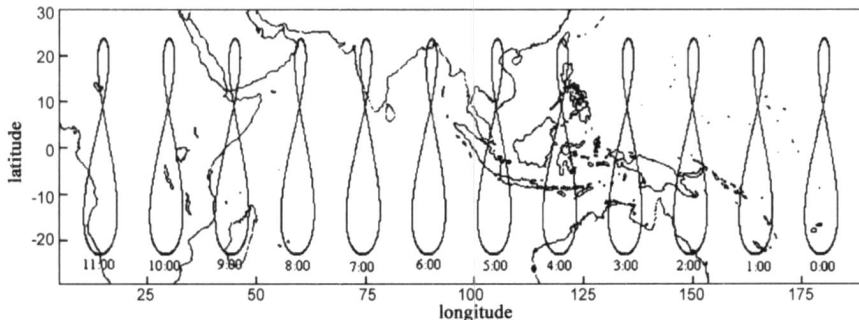


图3 2006年部分整点太阳下点的年轨迹

表 1 和图 4 给出了反辉区较明显的几个个例. 图 4 每组包含上下两幅图, 上图为可见光通道, 下图为 IR4 通道, 从左到右各组依次对应表 1 中各行. 表 1 中“图像估计经纬度”是人工观察可见光和 IR4 通道图像, 寻找反辉区中心点位置并利用定位计算得出的, 定位所需信息来自随 FY-2C 云图数据播发的卫星轨道预测数

据, 具有较高的精度, 定位过程中还能获得反辉区中心点对应的卫星扫描时刻(后文称为“计算时刻”). 理论计算的经纬度有两个值:“整点经纬度”和“调整经纬度”. 前者是按照“图像时次”计算的, 后者按照“计算时刻”得出. 做这样的区分是出于更精确处理的考虑, 举例说明, 由于卫星观测采用逐行扫描方式, 当扫描到赤

道附近时相距整点已经过了约 10 分钟,10 分钟之内地球自转可达 2.5°,按照整点的“图像时次”计算的反辉区

位置显然会不准确.表中个例的“调整的经纬度”在图 2 中有对应标识(挂在在年轨迹上的小太阳).

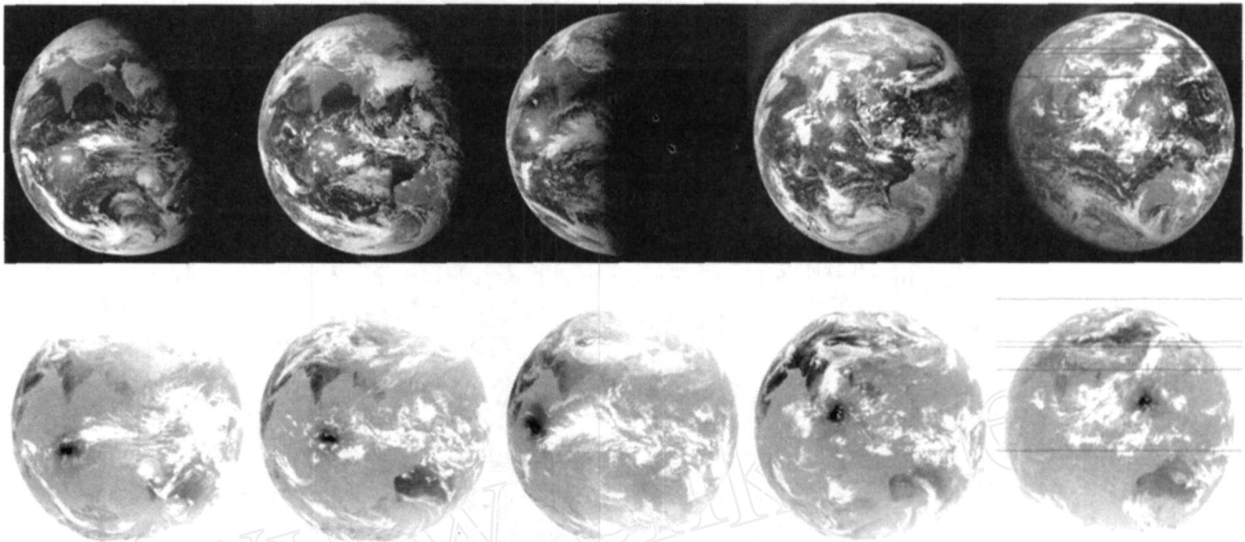


图4 FY-2C可见光通道和IR4通道图像

表 1 反辉区定位计算举例

图像时次 (M:d h:m)	图像估计经 纬度(°,′)	整点经纬度 (°,′)	调整经纬度 (°,′)	计算时刻 (h:m:s)
01-21 09:00	77.5, -11.0	79.55, -10.48	77.90, -10.75	09:14:48
02-18 08:00	84.5, -5.5	86.11, -5.75	84.60, -5.91	08:13:18
03-21 11:00	62.0, 0.0	64.09, 0.18	63.06, 0.30	11:08:35
04-17 07:00	89.5, 5.0	91.29, 4.98	89.95, 5.10	07:11:40
05-22 03:00	116.0, 10.0	117.94, 9.67	116.79, 9.66	03:10:20

表 2 反辉区定位的再次调整

图像时次 (M:d h:m)	计算时刻 (h:m:s)	卫星下点经 纬度(°,′)	卫星高度 (m)	再次调整经 纬度(°,′)
01-21 09:00	09:14:48	104.5342, 0.1254	35792028	77.65, -10.66
02-18 08:00	08:13:18	104.3920, -0.0513	35793207	84.26, -5.80
03-21 11:00	11:08:35	104.4402, -0.3170	35786827	62.78, 0.18
04-17 07:00	07:11:40	104.2352, -0.5353	35789049	89.54, 5.01
05-22 03:00	03:10:20	104.5175, -0.7187	35785243	116.53, 9.63

比较表 1 中 3 组经纬度数据可以看出,整点计算的
值误差较大,调整处理后经度的精度确实有所提高,但
仍有约 0.5° 的差异.推测误差来源之一是卫星下点经
度的近似处理,实际不是固定值 105° 也发现了另一个
问题,就是调整后纬度的误差仍较大,约 0.3°;推测误
差来源主要是卫星下点纬度的近似处理,前文算法中
取卫星下点纬度 $p=0$,实际上 FY-2C 轨道倾角是 1.7°
(在现有静止气象卫星中是较大的),星下点纬度会有
不小的变化,近似作 0 会引起反辉区中心纬度的较大
误差.另外,卫星的高度实际是变化的,而前文计算中
取了固定的一个平均值,也会引起计算的误差.

现有算法不具备卫星下点纬度修正功能(即仍取
 $p=0$),但可以利用实际卫星下点经度和卫星高度来
对反辉区中心位置进行再次调整.表 2 中给出了从
FY-2C 云图相应的卫星轨道预测数据中提取的“计算
时刻”对应的卫星下点经纬度和卫星高度,利用这个
经度和高度再次调整后的反辉区中心位置与表 1 对
比,发现定位精度有了一定提高,经度误差绝对值平
均约为 0.35°,纬度误差绝对值平均约为 0.28°.以上
的实验共同说明,排除一些客观因素的干扰,前文理
论算法的精度是令人满意的.

4 反辉区形状和大小的研究

前文的算法计算出了太阳反辉区中心点的位置,
利用的太阳下点 T 是来自太阳中心的,实际上,即使
距离甚远,从地球上看来,太阳仍具有一定的视角,太
阳边缘形成的太阳下点组成一个圆(在球体上看),可
称之为太阳下圆,如图 5 中所示的圆 $ABCD$,该圆所
截地球球面得到的圆冠的顶点就是 T .

图 5 是图 1(a) 的局部放大,太阳下点中心 T 对
应反辉区中心点 G ,太阳下圆 $ABCD$ 对应反辉区边
缘是近

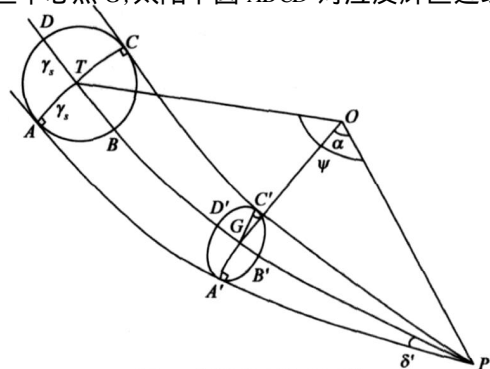


图5 反辉区区域示意图

似椭圆的形状(后面会有详细解释),可称为反辉区椭圆.从卫星下点出发的夹持太阳下圆的两条大圆弧与太阳下圆相切于点 A 和 C ,与反辉区椭圆相切于点 A 和 C . B 和 D 是太阳下圆与参考平面也是与 P, T 所在大圆的交点,它们对应反辉区椭圆的点 B 和 D .计算 G 到周围 4 点的大圆弧所对应的角,得到 4 点的相对位置,就可获知反辉区椭圆的大体形状和大小.

太阳半径对应的视角是常数

$$\frac{\text{太阳半径}}{\text{日地距离}} = \frac{6.9595 \times 10^8}{1.4956 \times 10^{11}} = 0.00465332$$

化为角度, $s = 0.266615^\circ$, 对应地球上弧长为 29.6463km.

当 P 不在太阳下圆内,也不在太阳下圆上,即 $\alpha > s$ 时,对应 α 取值范围是 $[0.266615^\circ, 81.3087^\circ]$, 在球面三角形 TAP 和 GAP 中,设 GA 弧对应角为 α_A , 利用正弦定理可得

$$\begin{cases} \frac{\sin s}{\sin \alpha} = \frac{\sin \alpha_A}{\sin(90^\circ)} \\ \frac{\sin \alpha_A}{\sin \alpha} = \frac{\sin s}{\sin(90^\circ)} \end{cases} \Rightarrow \alpha_A = \arcsin\left(\frac{\sin s \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha}\right)$$

如果把 α 作为自变量, $\alpha_A = 2s + \alpha$, 代入上式得到关于 α 的函数 $\alpha_A(\alpha)$, 它反映了反辉区椭圆在 GA 方向上的大小变化,由于 s 一般都非常小, $\alpha_A \approx \alpha + 2s$, 所以大多数情况下, GA 方向上的变化就可近似表示椭圆在垂直于大圆弧 PD 方向上的变化.

图形的图形如图 6(a) 所示,可以看出,函数是单调递增的,且增速由小到大,由小于 1 变化到大于 6,多数情况下大于 0.5,表明太阳下圆在这个方向上由被压缩近一半到被拉伸 6 倍多的变化情况.图 6(c) 直观反映了这种变化,由于太阳下圆所处位置不同,引起夹持它的两个大圆弧的夹角变化和反辉区位置的变化,两个大圆弧所

夹持的反辉区椭圆大小发生相应变化.

太阳下圆在球面上是关于大圆弧 PD 对称的,相应生成反辉区椭圆也是关于大圆弧 PD 对称的,因而 $c = a$.

大圆弧 PB 和 PD 对应的角为 $\alpha - s$ 和 $\alpha + s$, 大圆弧 PB 和 PD 对应的角为 $\alpha - s$ 和 $\alpha + s$. 仍把 α 作为自变量, 求出太阳下点中心位置 $\alpha = 2s + \alpha$, 将它减 s , 再反求 B 点对应的 α_B , $\alpha_B = \alpha - s$, 那么,大圆弧 GB 对应的角也是 $\alpha - s$, 它反映了椭圆在 GB 方向上的大小变化, $\frac{\alpha_B}{\alpha}$ 的图形见图 6(b), 从中可以看出, GB 弧角略有递增,但增大不明显,相比 s 的倍数都在 0.48 附近,表明太阳下圆在这个方向上被压缩了近一半,与 GA 弧角比较可发现,多数情况下,反辉区椭圆长轴在垂直于大圆弧 PD 方向上,短轴在大圆弧 PD 方向上.同理,可以计算 GD 对应的角,理论推导和数值试验都可表明, GD 弧角与 GB 弧角不相等但非常接近,这反映了反辉区形状不是严格的椭圆.

图 6(c) 给出了综合上述两个方向上的变化得出的反辉区椭圆举例,表示的是球面上的情形,实际卫星图像上得到的反辉区椭圆会因成像而扭曲,大小还会随海面波浪情况发生变化.

5 结论

本文较深入地研究了静止卫星图像中太阳反辉区的形成机理,给出了计算其位置、形状和大小的算法.与 Emecen 工作相比,对太阳位置的处理更为精确,反射点的经纬度计算更加直观,结合 FY-2C 云图的仿真实验,获得了较好的效果.定位算法中,高精度的太阳位置算法,利用太阳下点和卫星下点把 3 维空间中几何问题转化到参考平面上求解的策略.

利用 FY-2C 图像进行了实验,首先给出了 2006 年全年 0~11 时整点反辉区中心的理论位置,结合海陆分布对反辉区发生的时间和区域性进行了推测,认为:(1)反辉区发生在 6:00 以后的几率比较大;(2)冬季 6:00 以后 FY-2C 图中左下(西南)区域发生的几率比较大.继而对 2006 年反辉区发生较明显的 5 个个例进行了进一步的人机交互实验,以人工根据 VIS 和 IR4 通道联合判定的位置为准,检验了定位算法精度,经过分析,找到了部分误差来源,并对定位结果进行了两次调整:(1)考虑成像时间引起的误差,利用卫星实际扫描到反辉区的时间进行调整;(2)考虑卫星经度和高度取固定值引起的误差,利用图像中轨道预测数据块包含

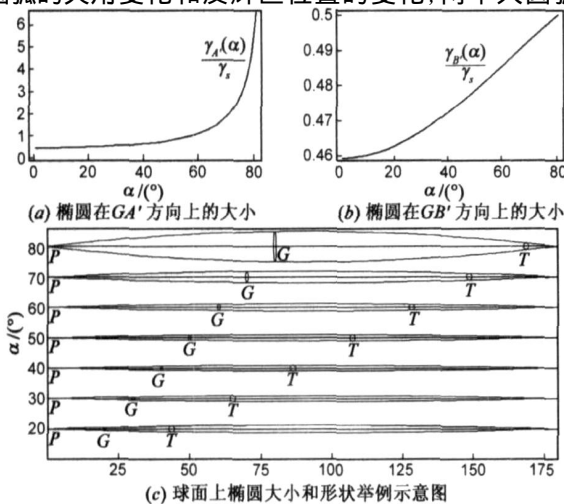


图6

的卫星下点经度和卫星高度进行调整,最终结果,经度误差绝对值平均约为 0.35° , 纬度误差绝对值平均约为 0.28° 。

尽管如此,算法仍有许多细节需要深入研究,包括:(1)文中假设地球是球体来进行计算,精度不及椭球体假设的情况,但椭球体上大圆弧计算及反射计算复杂得多,有待进一步探讨;(2)静止卫星下点纬度并非固定值 0,会引起反辉区定位的不准确,文中算法步骤 4“计算反射点经纬度”需要做修改,如果成功完成这种修改,则本文的算法可推广用于极轨卫星的反辉区定位。

在反辉区中心定位的基础上,探讨了反辉区区域形成的机理,得出了区域的形状为近似的椭圆的结论,给出了一些个例。今后还需要把计算得出的反辉区椭圆放到图像中去比对验证,通过分析差异确定影响因素,从而探索进一步改进。

参考文献:

- [1] 罗杨洁,赵云升,胡新礼,等. 偏振与多角度遥感中的太阳耀光剥离[J]. 光学技术,2006,32(2):205 - 208.
Luo Yang-jie, Zhao Yun-sheng, Hu Xin-li, et al. Polarization and sun glitter's peeling-off of multi-angle remote sensing[J]. Optical Technique,2006,32(2):205 - 208. (in Chinese)
- [2] 李淑菁,毛天明,潘德炉. 太阳反射光对海洋水色卫星遥感的影响研究[J]. 热带海洋,1997,16(4):76 - 82.
Li Shu-jing, Mao Tian-ming, Pan Delu. Affections of reflected sunlight on satellite ocean colour remote sensing [J]. Tropic

Oceanology,1997,16(4):76 - 82. (in Chinese)

- [3] Prakash W J, Varma A K, Bhandari S M. An algorithm for the precise location of the solar specular reflection point in the visible band images from geostationary meteorological satellites [J]. Computers & Geosciences,1994,20(10):1467 - 1482.
- [4] Emecen E G, Kara G, Erdogmus F, et al. The determination of sunglint locations on the ocean surface by observation from geostationary satellites [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences,2005,17(1):253 - 261.
- [5] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京:科学出版社,2003.
- [6] 陈渭民. 卫星气象学 [M]. 北京:气象出版社,2003.
- [7] 胡友健,罗昀,曾云. 全球定位系统 (GPS) 原理与应用 [M]. 北京:中国地质大学出版社,2003.

作者简介:



李 玮 男,1968 年出生于河北省,空军装备研究院高级工程师,解放军理工大学硕士生导师,现为北京航空航天大学博士研究生,获军队科技进步奖 10 余项,已发表学术论文 20 余篇,研究方向为遥感信息处理,高分辨率图像成像等。

E-mail:liweieml@yahoo.com.cn

毛士艺 男,1935 年生于浙江省,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师,中国电子学会会士,主要研究领域为高分辨率图像成像,信号建模与谱分析,信号检测与分类,多目标跟踪与数据融合等。