

基于 WGS-84 椭球的改进海洋耀斑计算模型与仿真分析

戴春杰¹, 周爱明², 杨溢¹, 张冬冬^{1*}

¹中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘要 卫星载荷在海洋上探测温室气体时,为获得高精度的气体浓度数据,采用海洋耀斑观测模式,因此实时耀斑位置的准确计算是获得高精度有效数据的必要前提。提出了基于最优线搜索的改进海洋耀斑计算模型,根据 WGS-84 椭球模型,在二分法搜索满足镜面反射耀斑点要求的基础上,采用最优化中线搜索的思想对算法进行改进,使其更好地符合耀斑点共面条件。经仿真分析,与卫星工具包(STK)仿真结果对比,所提改进模型计算的耀斑位置距离误差显著降低至 90 m。

关键词 海洋耀斑; 温室气体; WGS-84 椭球; 二分法; 线搜索

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223050

Improved Sun Glint Computational Model Based on WGS-84 Ellipsoid and Simulation Analysis

Dai Chunjie¹, Zhou Aiming², Yang Yi¹, Zhang Dongdong^{1*}

¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Abstract The sun glint observation mode is adopted when a satellite payload detects greenhouse gases over the ocean to obtain high-precision gas concentration data. Therefore, accurately calculating the real-time sun glint position is a prerequisite for obtaining high-precision data. An improved sun glint calculation model based on an optimal line search is proposed. According to the WGS-84 ellipsoid model, on the basis of dichotomy searching to meet the requirements of specular reflective speckles, the algorithm is improved by using the idea of optimal line search to better meet the coplanar condition of the sun glint. Compared with the simulation results of the Satellite Tool Kit (STK), the sun glint position distance error calculated by the improved model is significantly reduced to 90 m.

Key words sun glint; greenhouse gas; WGS-84 ellipsoid; dichotomy; line search

1 引言

卫星在进行海洋上空温室气体探测时,常通过传感器主动探测海洋面对太阳短波辐射的镜面反射信号,来弥补海洋表面反射率低的不足,从而大幅提升信噪比,获得高精度的气体浓度数据。这种在特定位置和角度下观测到的由太阳光照射海面引起的闪耀区块即为海洋耀斑^[1],准确计算耀斑位置对海洋面温室气体探测至关重要。2009年日本发射升空的GOSAT

卫星、2014年美国发射的OCO-2卫星、中国的碳卫星(TANSAT)和高分5号(GF5)都具有海洋耀斑观测模式^[2]。

理论耀斑点的精确计算较为复杂,需求解一组描述太阳、卫星和地球几何关系的非线性方程组,存在计算量大且可能不收敛的问题。因此在星上观测时常将该问题简化,如对于太阳同步轨道,可将星下点太阳天顶角近似为耀斑点太阳天顶角,但在化简计算的同时也增加了误差^[3];或对地球表面建立网格,再对每个网

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2022-11-24; 录用日期: 2022-12-01; 网络首发日期: 2023-01-04

通信作者: *zhangdongdong@mail.sitp.ac.cn

格是否满足镜面反射关系进行计算,根据计算结果进一步细分网格从而提高精度^[4];或将搜索范围限定在太阳、卫星与地球形成的主平面内,采用二分法对太阳矢量和卫星矢量的夹角进行切分,通过不断判断是否满足镜面反射关系,最终在该主平面内将该夹角逼近到耀斑点的角度,该方法简洁直观、运算量适中且能够达到很高的精度^[5-6]。

本文对比了不同地球模型下的耀斑观测几何关系,据此分析海洋耀斑的判定依据以及实际可观测范围。基于 WGS-84 椭球模型,在二分法搜索满足镜面反射耀斑点要求的基础上,采用最优化中线搜索的思想对算法进行改进,使其更好地符合耀斑点共面条件。与卫星工具包(STK)的仿真结果进行对比,结果表明,所提改进后的算法精度显著提高,满足观测设计要求并且分析了误差来源。

2 海洋耀斑观测关系和几何区域

2.1 耀斑观测几何关系模型

假设海洋表面为镜面,耀斑的形成满足 2 个条件:一是耀斑处入射光与该处法线的夹角等于反射光与法线的夹角,即耀斑处的太阳天顶角与卫星天顶角相等;二是耀斑处入射光矢量、反射光矢量和法线矢量三者位于同一主平面内,也即耀斑处太阳方位角与卫星方位角之差为 180°。这两个条件可作为海洋耀斑的判定依据。

为应用这两条判据计算耀斑位置,首先需选择合适的地球模型,分别基于理想球体模型和 WGS-84 椭球模型绘制了耀斑观测几何关系示意图,如图 1 和图 2 所示。图中 OXYZ 为地球的 J2000 惯性系, r_{sat} 为卫星矢量,由地心指向卫星, r_{sun} 为太阳矢量,由地心指向太阳中心,通过这两个矢量可定义主平面 P。在理想球体模型中,该平面切球面形成一个大圆,圆弧上任一点的法线必在主平面 P 内,自动满足耀斑形成的第二个

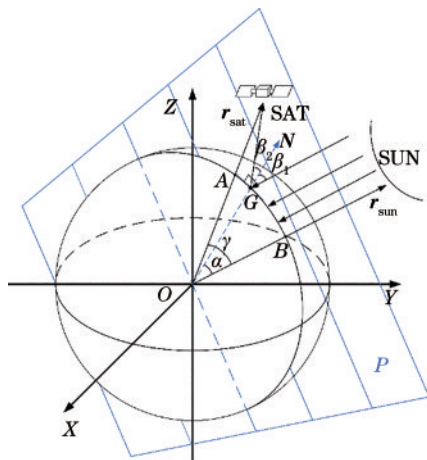


图 1 基于理想球体模型的耀斑观测几何关系
Fig. 1 Sun glint observation geometry based on an ideal sphere model

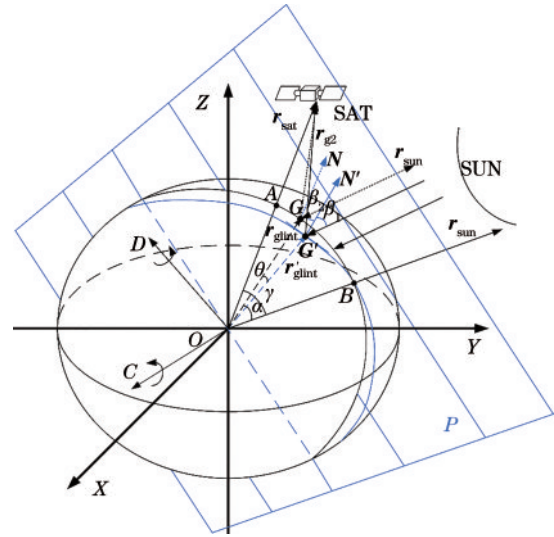


图 2 基于 WGS-84 椭球模型的耀斑观测几何关系
Fig. 2 Sun glint observation geometry based on the WGS-84 ellipsoid model

条件,因此耀斑位置求解就简化成在 \widehat{AB} 上搜索满足卫星天顶角和太阳天顶角相等的点 G。

在 WGS-84 模型中,主平面 P 切椭球体形成椭圆,椭圆上任一点法线不总是处于主平面内的,如图 2 所示的点 G 处的法向量 N 就不在主平面 P 内,该法向量与主平面存在一定夹角,这个夹角与该点纬度和主平面 P 与赤道面的倾角有关,因此仅仅在 \widehat{AB} 上搜索到的卫星天顶角和太阳天顶角相等的点 G 并不能严格满足耀斑形成的第二个条件。为了进一步提高位置精度,根据椭球模型,可在以点 G 为中心的小范围搜索满足共面条件的耀斑点 G',该点处的法向量为 N',计算法向量 N' 与新的入射光的反射光主平面 P' 的夹角,当此夹角在误差限内则认为满足共面条件,并且该点的卫星天顶角和太阳天顶角之差也足够小,这样耀斑点形成的两个条件均得到满足,点 G' 是 WGS-84 模型中最精确的耀斑点。

2.2 海洋耀斑几何区域

在进行耀斑观测时,为获得高精度有效的观测数据,除耀斑位置精度外,耀斑的几何特性也会对观测结果产生影响,这些特性包括区域大小、光学特性和运动规律与分布等^[7-8],其中最重要的是耀斑的形状与大小。在处理太阳矢量时,将其视为点光源,但由于地日距离足够远因此近似为平行光,但实际上从地球向太阳看去,存在约 0.53° 的角范围,所以耀斑区域并非唯一的镜面反射点,而是包含了该点附近的满足一定斜率范围的区域,根据太阳边缘与耀斑点的几何关系,计算出耀斑理论直径为 5~30 km^[9]。另外根据 Cox-Munk 模型^[10],海面上海风的风速和方向都会影响表面粗糙度,可以用一组与海风有关的斜率概率分布函数进行描述,这使得海面在光学上像是由无穷个不同斜率的小平面组成的,太阳光在海面耀斑区域形成准

镜面反射。在这两种因素共同作用下,可观测的耀斑尺寸又会进一步增大,假定观测中耀斑边界标准为,观测的辐亮度中太阳光经海面直接反射部分不小于海面大气散射部分的 10%,对于 866 km 的太阳同步轨道,观测波长为 0.4 μm,风速为 2 m/s,此时耀斑直径不小于 100 km^[11],这一数据在其他类似载荷的反演结果中也得到了验证^[12]。

3 基于 WGS-84 椭球的改进耀斑位置算法

3.1 基于 WGS-84 椭球与二分法的耀斑位置算法

基于 WGS-84 椭球模型进行海洋耀斑位置算法设计,根据图 2 中的耀斑几何关系模型,首先需要在 \widehat{AB} 上搜索到满足入射角等于反射角关系的点 G ,具体是采用二分法对这段弧进行分割,不断检验某点的入射

角反射角之差($\beta_1 - \beta_2$)是否足够接近 0,直到找到满足误差限要求的点 G ,此时该点满足镜面反射的入射角反射角相等条件。算法流程如图 3 所示,具体计算步骤说明如下。

1)根据已知的太阳矢量和卫星矢量,用余弦定理计算出夹角 γ ,该角度也是二分法搜索范围对应的圆心角,再对这两个矢量做叉乘,求出主平面法向量 C ,所有矢量运算处于 J2000 地心惯性系中。

2)求某点圆心角 α 对应的耀斑矢量 r_{glint} 以及该点两侧天顶角之差。如图 2 所示, α 为耀斑矢量与太阳矢量的夹角,在二分法的初次迭代中取 $\alpha = \gamma/2$,以法向量 C 为旋转轴,将单位化的太阳矢量绕旋转轴旋转角 α ,再乘以地心距,求出本次迭代的耀斑矢量 r_{glint} ,计算过程为

$$r_{glint} = R_e \cdot A(C, \alpha) \cdot \hat{r}_{sun}, \quad (1)$$

其中

$$A(C, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha + e_x^2(1 - \cos \alpha) & e_x e_y(1 - \cos \alpha) - e_z \sin \alpha & e_x e_z(1 - \cos \alpha) + e_y \sin \alpha \\ e_x e_y(1 - \cos \alpha) + e_z \sin \alpha & \cos \alpha + e_y^2(1 - \cos \alpha) & e_y e_z(1 - \cos \alpha) - e_x \sin \alpha \\ e_x e_z(1 - \cos \alpha) - e_y \sin \alpha & e_y e_z(1 - \cos \alpha) + e_x \sin \alpha & \cos \alpha + e_z^2(1 - \cos \alpha) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $A(C, \alpha)$ 为以 C 为欧拉轴旋转 α 角的旋转矩阵; e_x, e_y, e_z 为法向量 C 的方向余弦; R_e 为地心到耀斑点的距离,即理想球体模型中的地心距平均值。在椭球模型中, R_e 的计算表达式为

$$\cos \varphi = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (4)$$

$$\tan B = \frac{\tan \varphi}{1 - e^2}, \quad (5)$$

$$R_e = \frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{a^2}{\sqrt{a^2 + (b \cdot \tan B)^2}}, \quad (6)$$

式中: x, y, z 为单位化的耀斑矢量在三轴上的分量。地球长半轴 $a=6378.137$ km,短半轴 $b=6356.752$ km,偏心率为 $e = \sqrt{a^2 + b^2}/a$ 。为求耀斑点处两侧天顶角之差,需要先计算此次迭代该点的法向量 N ,在理想球体模型中,法向量与耀斑矢量共线。在椭球模型中, N 的表达式为

$$N = \left[\frac{x}{a^2} \quad \frac{y}{a^2} \quad \frac{z}{b^2} \right], \quad (7)$$

从耀斑点指向太阳的矢量为 r_{g1} ,由于地日距离远大于地球半径,因此所提算法将太阳光视为平行光且用太阳矢量近似 $r_{g1} = r_{sun}$ 。耀斑点指向卫星的矢量为 $r_{g2} = r_{sat} - r_{glint}$, r_{g1} 与 N 的夹角 β_1 即为卫星天顶角, r_{g2} 与 N 的夹角 β_2 即为太阳天顶角,可用余弦定理求出,最后作差得 $f(\alpha) = \beta_1 - \beta_2$ 。

3)根据预先设定的误差阈值 T_{error} ,若角度差小于误差限,则结束循环;若不满足条件,则需判断 $f(\alpha)$ 与

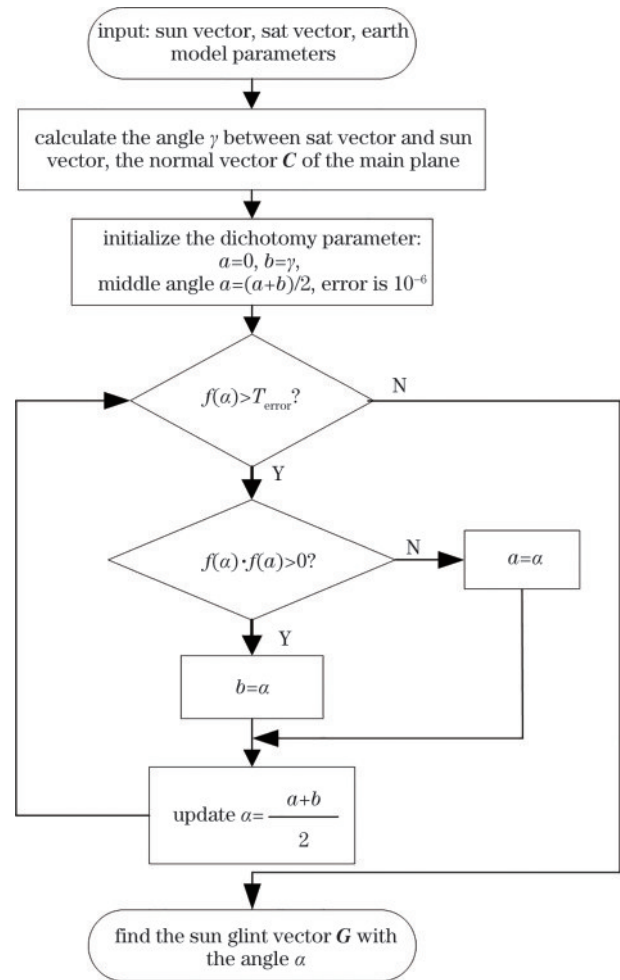


图 3 基于 WGS-84 模型的耀斑位置算法的流程
Fig. 3 Flow chart of the sun glint position algorithm based on the WGS-84 model

$f(a)$ 是否异号,若异号则说明耀斑矢量在该角度范围内,若同号则耀斑矢量在另一侧范围内,更新搜索范围后进入下一次迭代,直至满足收敛精度要求,二分法结束,得到该 α 角下的耀斑点 G 。

3.2 考虑共面条件的改进算法

由于椭球体的几何特性,法向量 \mathbf{N} 与入射光 \mathbf{r}_{g1} 和反射光 \mathbf{r}_{g2} 通常不共面,因此为了提高精度,需要在3.1节算法的基础上考虑共面条件的影响,在点 G 附近范围搜索并计算法向量与该点主平面夹角 φ ,该角度可用一个与耀斑点位置有关的函数 $\varphi = g(x, y, z)$ 表示。此问题便抽象为:搜索该函数在一定区域内的极小值,采用最优化中的线搜索算法的思想,从点 G 出发,沿函数数值下降最快方向以一定步长搜索到夹角最小的点 G' ,点 G' 即为算法要求的满足共面条件的耀斑点。实际上在椭球模型中,已知夹角函数的最速下降方向垂直于 \widehat{AB} ,因此算法流程得以简化,如图4所示。

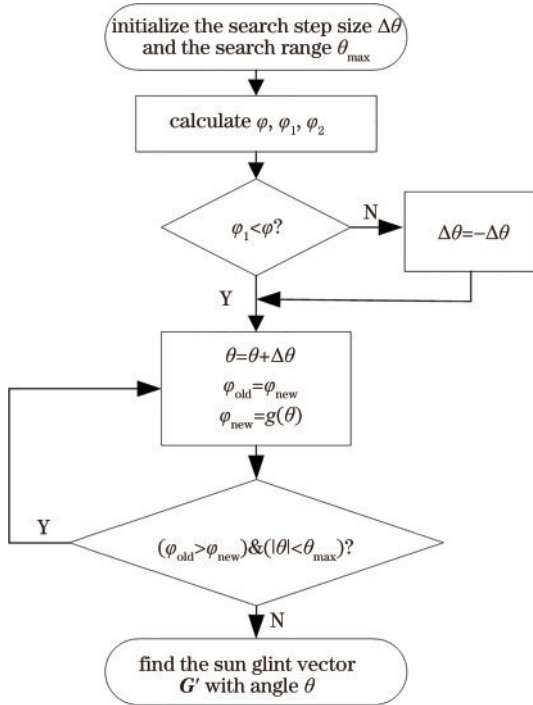


图4 考虑共面条件的改进耀斑位置算法的流程

Fig. 4 Flow chart of improved sun glint location algorithm considering coplanar conditions

将耀斑矢量 \mathbf{r}_{glint} 沿垂直 \widehat{AB} 的方向旋转一个步长,即圆心角 $\Delta\theta$,分别计算旋转 $\Delta\theta$ 与 $-\Delta\theta$ 所得耀斑矢量与当地主平面夹角 φ_1 和 φ_2 。由于在该方向上夹角的变化在小范围内呈现单调特性,因此对比 φ_1 和 φ_2 的大小之后就可以找到使得夹角减小的搜索方向,沿该方向不断以 $\Delta\theta$ 的步长搜索计算新的 φ 角,直到 φ 在某次迭代中不再减小或达到限定的搜索边界则停止。夹角 $\varphi = g(\theta)$ 的计算过程为

$$\mathbf{D} = \hat{\mathbf{r}}_{glint} \times \mathbf{C}, \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{r}}'_{glint} = \mathbf{R}_e \cdot \mathbf{A}(\mathbf{D}, \theta) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{glint}, \quad (9)$$

$$\mathbf{C}' = \mathbf{r}_{sun} \times (\mathbf{r}_{sat} - \hat{\mathbf{r}}'_{glint}), \quad (10)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{\mathbf{N}' \cdot \mathbf{C}'}{|\mathbf{N}'| \cdot |\mathbf{C}'|}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{D} 为 \mathbf{r}_{glint} 与 \mathbf{C} 形成的平面的法向量,也是旋转欧拉轴; \mathbf{C}' 为新的耀斑矢量 $\hat{\mathbf{r}}'_{glint}$ 对应的主平面法向量; \mathbf{N}' 为新的耀斑点处的法向量。

3.3 二维指向镜的指向角计算

考虑卫星载荷采用二维指向镜实现耀斑观测,为计算二维指向角度,首先将J2000惯性系下的耀斑矢量 \mathbf{r}'_{glint} 转换到指向镜坐标系中,表达式为

$$\mathbf{r}_{glint2} = \mathbf{R}_{oi} \cdot \mathbf{r}'_{glint} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_{glint3} = \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\varphi) \mathbf{R}_z(\psi) \cdot \mathbf{r}_{glint2}, \quad (13)$$

式中: $\mathbf{R}_{oi} = \mathbf{R}_x(-\pi/2) \mathbf{R}_z(\pi/2) \mathbf{R}_z(\omega + f) \mathbf{R}_x(i) \mathbf{R}_z(\Omega)$ 为惯性系到轨道坐标系的变换矩阵; R_s 为轨道半径。轨道坐标系原点位于卫星质心,Z轴位于轨道面内指向地心,X轴指向卫星飞行方向,Y轴与Z轴和X轴满足右手定则指向纸面内。卫星本体坐标系是轨道坐标系转动得到的,零姿态时两坐标系重合。 \mathbf{R}_x 、 \mathbf{R}_y 、 \mathbf{R}_z 分别为三轴旋转矩阵,采用3(Z)-1(X)-2(Y)转序,依次为偏航角 ψ ,滚动角 φ 和俯仰角 θ ,转动矩阵表达式为

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

为简化说明,将卫星本体坐标系与镜体坐标系重合,图5(a)中指向机构绕X轴转动即为方位角 φ ,绕Y轴转动即为俯仰角 θ 。设 \mathbf{r}_{glint3} 为镜体坐标系中的耀斑矢量,根据几何光学的反射定律, $\mathbf{N} = \hat{\mathbf{r}}_{glint3} + \hat{\mathbf{r}}'_{glint3}$,其中 $\hat{\mathbf{r}}_{glint3} = (x, y, z)^T$ 为镜体坐标系中单位化的耀斑矢量, $\hat{\mathbf{r}}'_{glint3} = (-1, 0, 0)^T$ 为出射光单位矢量, $\mathbf{N} = (N_x, N_y, N_z)^T = (x-1, y, z)^T$ 为镜体的法向量,由图5(a)中法向量 \mathbf{N} 与俯仰角 θ 的关系,可以得到

$$\theta = -\arcsin \frac{-N_x}{|\mathbf{N}|} = \arcsin \frac{x-1}{\sqrt{(x-1)^2 + y^2 + z^2}}. \quad (15)$$

若设镜体沿俯仰角定义的反方向旋转 45° 为零位,则此时的俯仰驱动角为镜体从零位顺时针绕Y轴转动的角度 $\theta_d = \theta + 45^\circ$ 。图5(b)为从X轴负半轴看过去的视角,其中 \mathbf{N}' 为指向镜法向量在YOZ平面的投影,由此可得

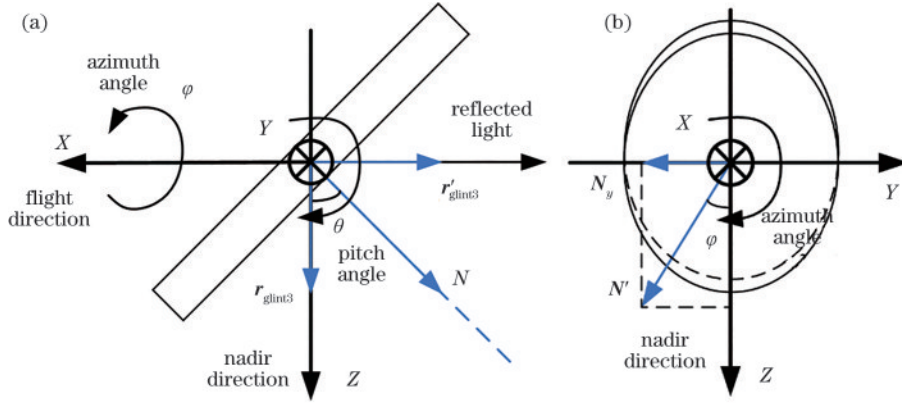


图 5 指向镜坐标系示意图。(a)沿 Y 轴方向;(b)沿 X 轴方向

Fig. 5 Pointing mirror coordinate system. (a) Along the Y axis; (b) along the X axis

$$\varphi = \arcsin \frac{-N_x}{|N'}| = \arcsin \frac{-y}{\sqrt{y^2 + z^2}} \quad (16)$$

4 仿真结果

为检验耀斑位置算法的位置计算精度,使用 STK 仿真软件对卫星运动过程进行仿真,通过软件设置输出耀斑点位置坐标,同时 STK 仿真的轨道根数、太阳矢量、儒略日等参数以 1 s 的周期输出。所提算法以这些数据为输入计算耀斑点坐标,并且以 STK 仿真出的耀斑点坐标为参考,计算采用不同模型的耀斑算法的距离误差。设太阳同步轨道卫星轨道倾角为 98°,轨道高度为 705 km,降交点地方时为上午 10:30。考虑到卫星运行的周期性,选取 2020 年春分、夏至和冬至 3 日中各一轨的数据进行仿真,算法周期为 1 s。首先考察卫星星下点与耀斑点在全球范围的运动规律,重点关注中低纬度区域,卫星自北向南穿过纬线,每轨向西进动,STK 仿真和算法计算的耀斑轨迹基本重合,始终

位于星下点轨迹右侧,耀斑点分布大致南北对称。

图 6 为基于理想球体模型的耀斑位置算法与 STK 仿真的耀斑点距离误差,图 7 为采用了 WGS-84 模型但未考虑法线与主平面共面条件的算法与 STK 仿真的距离误差,图 8 为采用了 WGS-84 模型且根据共面条件改进后的算法与 STK 仿真的距离误差。选取的数据是当日 00:00:00 时起计第一轨完整数据,对应于卫星自北向南从北纬 60°穿过赤道运行至南纬 60°的数据。可以看出:理想球体模型的误差在高纬度时更大,为 12~18 km;采用了 WGS-84 模型但未考虑法线与主平面共面条件的算法的误差最大值出现位置因不同日期而异,但趋势是赤道误差最小,分别向两极逐渐增加到最大再减小,误差最大值为 2.5~3.5 km;采用了 WGS-84 模型且根据共面条件改进后的算法的误差同样最小值出现在穿过赤道附近,向两极不断变大,但最大误差得到了明显改善,不超过 90 m。

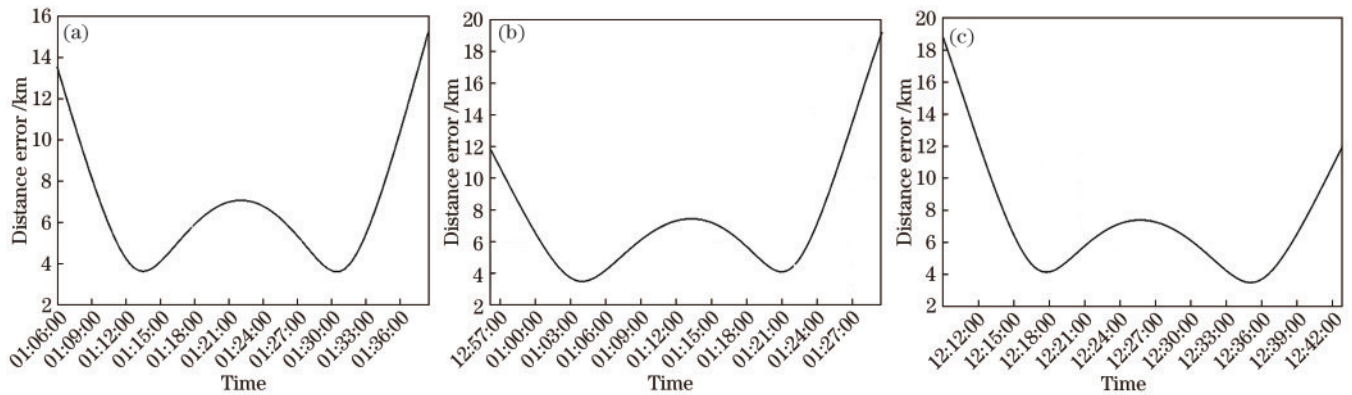


图 6 理想球体模型的耀斑点位置距离误差。(a)春分日;(b)夏至日;(c)冬至日

Fig. 6 Sun glint position distance error of the ideal sphere model. (a) Spring equinox; (b) summer solstice; (c) winter solstice

图 9 为基于 WGS-84 椭球模型的算法在改进前后的耀斑二维指向角度误差对比,分别将改进算法得出的俯仰角 θ 和方位角 φ 与 STK 仿真得出的相应角度做

差,横轴为时间,选取与图 8(a) 相同时间段的输入参数进行仿真计算。由图 9 可知,二维指向角度的最大误差从 0.13° 减小到了 0.008°。

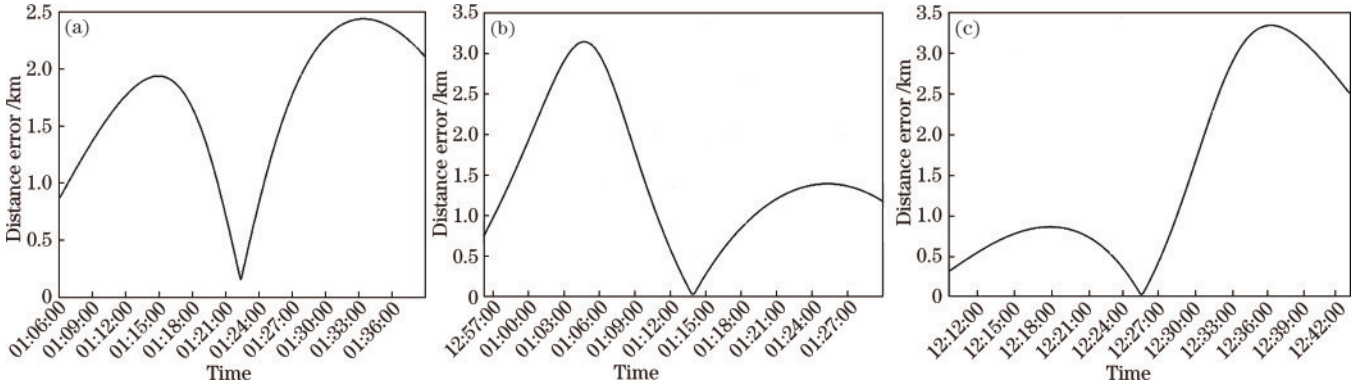


图 7 改进前 WGS-84 椭球模型的耀斑点位置距离误差。(a) 春分日；(b) 夏至日；(c) 冬至日

Fig. 7 Sun glint position distance error of the WGS-84 ellipsoid model before improvement. (a) Spring equinox; (b) summer solstice; (c) winter solstice

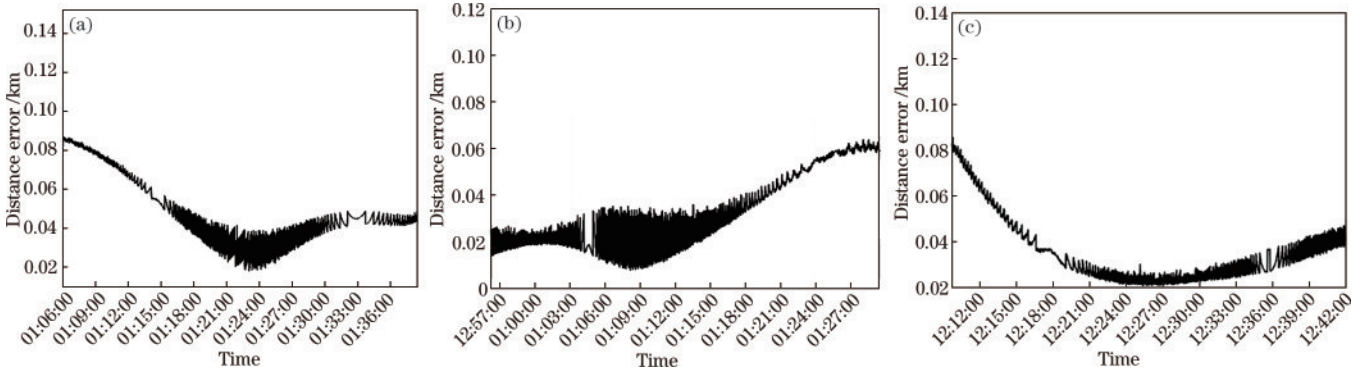


图 8 改进后 WGS-84 椭球模型的耀斑点位置距离误差。(a) 春分日；(b) 夏至日；(c) 冬至日

Fig. 8 Sun glint position distance error of the WGS-84 ellipsoid model after improvement. (a) Spring equinox; (b) summer solstice; (c) winter solstice

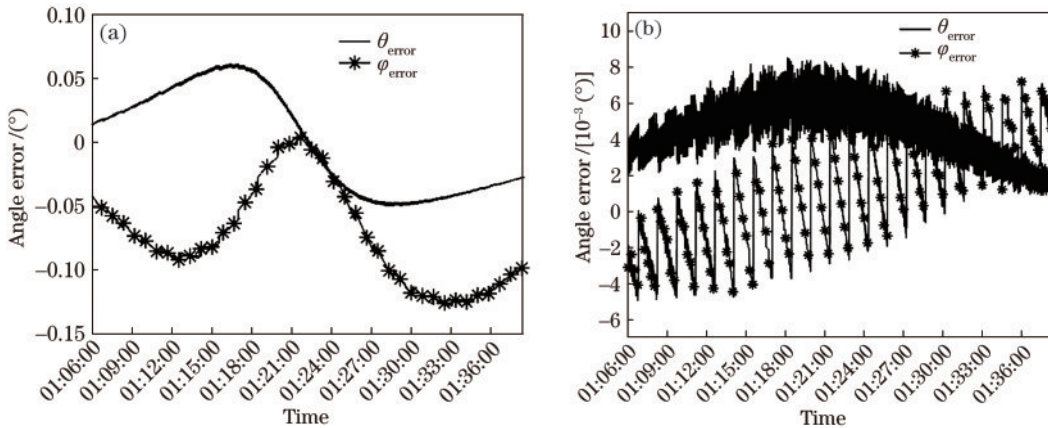


图 9 算法改进前后的二维指向角度误差。(a) 改进前；(b) 改进后

Fig. 9 Two-dimensional pointing angle error before and after algorithm improvement. (a) Before improvement; (b) after improvement

5 分析与讨论

5.1 设计需求符合性分析

选取了 2020 年春分、夏至和冬至 3 日 00:00:00 起第一个完整轨道数据,应用了基于理想球体模型的算法、基于 WGS-84 椭球模型的二分法、在基于 WGS-84 椭球模型的二分法基础上考虑共面条件的改进搜索算法,计算了耀斑点与 STK 仿真的距离误差和二维指向

角度误差。之所以选取这三个日期进行比较,是因为这时太阳光分别直射赤道和南北回归线处,与卫星的几何关系处于特殊条件。对比图 6~8 可知,同样采用二分法搜索满足入射角反射角相等条件的点时, WGS-84 椭球模型可将耀斑点位置误差从 18 km 缩小到 3.5 km,为进一步减小误差,又对满足共面条件的可能耀斑点位置进行搜索,从图 8 可知最大误差小于 90 m。从对耀斑区域大小的分析可知,该误差远小于

实际可观测的耀斑尺度,也小于理论计算中全年耀斑最小长度 5 km,并且越靠近耀斑区域中心,辐亮度越高,信噪比也越高,有助于获得有效观测数据,可满足绝大部分观测任务需求。

5.2 误差项分析

由于 STK 仿真时采用的是 WGS-84 椭球模型,采用理想球体模型计算出的耀斑点位置误差主要是由模型差异造成的,观察图 6 可知,误差在南北两极的方向上逐渐增大。而在采用了 WGS-84 椭球模型后,搜索方法未变,都在主平面与球面相切的弧上找到最满足入射角反射角相等条件的点,唯一改变的是地球模型,如图 7 所示,误差在赤道最小,在南北纬 45°左右的位置最大,考虑到镜面反射的形成条件,这时的系统误差是搜索算法未对共面条件进行检验造成的。因此对算法进行了改进,在满足入射角反射角相等的前提下,进一步搜索满足共面条件的点,仿真结果如图 8 和图 9 所示,距离误差和二维指向角度误差都得到了显著减小,但在加入改进算法后引入了小幅高频振荡,在图 8 和图 9(b)中均有体现。这是由于在搜索极值点的过程中为了简化计算选取了固定步长,因此在搜索到极值点附近时总存在最大一个步长角度的偏差,步长越小,振荡幅值也越小。要解决此问题,可选择变步长搜索,但运算量也随之增大,考虑到算法运算量与精度的平衡,步长选择为 0.00003°。

6 结 论

参考镜面反射规律与耀斑实际观测特性,提出了耀斑点位置的两条判据,即入射角反射角相等条件和法线、入射光、反射光共面条件,对比了不同地球模型下的海洋耀斑观测几何关系。根据共面条件的要求,采用线搜索的原理对已有的基于 WGS-84 模型的耀斑位置算法进行了改进,并结合 STK 的仿真结果进行了对比,分析了不同模型算法的误差来源。结果说明改进的耀斑位置算法将计算精度从 3.5 km 提升到了小于 90 m,二维指向角精度也得到了提升,有助于获得高信噪比观测数据,从而更好满足高精度温室气体监测需求,有利于主动激光雷达载荷优化视场规避海洋耀斑,也可帮助优化海洋水色观测和海洋溢油遥感监测。改进的搜索算法同时引入了振荡,如何更加高效快速地选择搜索步长可作为算法后续的优化方向。

参 考 文 献

- [1] Harmel T, Chami M. Estimation of the sunglint radiance field from optical satellite imagery over an open ocean: multidirectional approach and polarisation aspects[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 76-90.
- [2] 张兴赢, 孟晓阳, 周敏强, 等. 卫星高光谱大气 CO₂ 探测精度验证研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(6): 602-612.
- [3] 姜通, 曹琼, 温渊. 海洋区域大气 CO₂ 卫星遥感观测模型及仿真研究[J]. *上海航天*, 2015, 32(3): 47-50.
- [4] Nelsen J M, Hohlfelder R J, Jackson D C, et al. On identifying the specular reflection of sunlight in earth-monitoring satellite data[R]. Livermore: Sandia National Laboratories (SNL), 2009.
- [5] 温渊, 杨勇, 代海山, 等. 高精度海洋耀斑二维指向算法研究[J]. *红外*, 2018, 39(11): 28-33.
- [6] 熊伟. 星载超光谱大气主要温室气体监测仪载荷[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(3): 14-24.
- [7] 张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 等. 基于海洋耀斑的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1528002.
- [8] 李澜, 巩彩兰, 黄华文, 等. 基于离散余弦变换的无人机耀斑图像恢复算法[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1928001.
- [9] 代海山, 汪少林, 姜通, 等. 遥感卫星载荷海洋耀斑观测几何模型研究[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(3): 85-93.
- [10] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [11] Lebedev N E, Zapevalov A S. Modeling of a Sun glint on a sea surface for remote sensing purposes[M]//Karev V I, Klimov D, Pokazeev K. *Physical and mathematical modelling of earth and environmental processes (2018)*. Springer proceedings in earth and environmental sciences. Cham: Springer, 2019: 142-149.
- [12] Zhang H, Wang M. Evaluation of Sun glint models using MODIS measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(3): 492-506.
- [13] Zhang X Y, Meng X Y, Zhou M Q, et al. A review of the validation of atmospheric CO₂ from satellite hyperspectral remote sensing[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(6): 602-612.
- [14] Jiang T, Cao Q, Wen Y. Study on satellite observation mode and simulation for atmospheric CO₂ remote sensing over ocean[J]. *Aerospace Shanghai*, 2015, 32(3): 47-50.
- [15] Xiong W. Hyperspectral greenhouse gases monitor instrument (GMI) for spaceborne payload[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 14-24.
- [16] Dai H S, Wang S L, Jiang T, et al. The research of the Sun glint observation geometry model for remote sensing satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 85-93.