



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115683091 A

(43) 申请公布日 2023. 02. 03

(21) 申请号 202310010273.3

(22) 申请日 2023.01.05

(71) 申请人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72) 发明人 郭雷 王振 张霄 陈泰航

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251
专利代理师 金怡 顾炜

(51) Int. Cl.

G01C 21/02 (2006.01)

G01C 21/20 (2006.01)

G06F 16/29 (2019.01)

G06T 17/05 (2011.01)

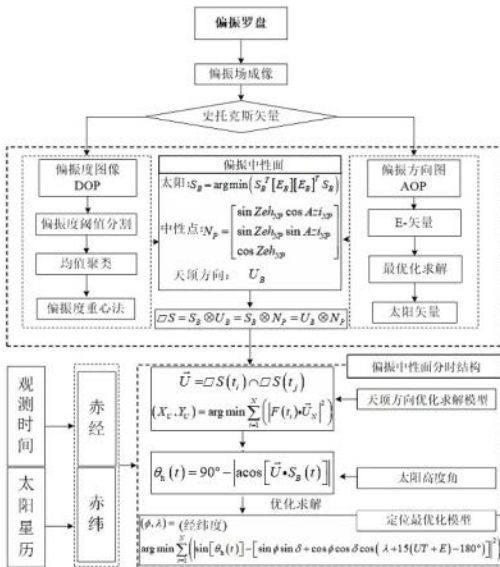
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法,针对当前偏振罗盘导航系统的自主定位的实现需依赖外部提供水平基准的问题,首先,基于太阳偏振分布模式反演解算得到太阳矢量与偏振中性点,进而联立天顶方向建立偏振中性面模型;其次,基于不同观测时间获得的偏振中性面,实现偏振中性面分时反演重构,建立偏振天顶方向优化求解模型;最后,基于偏振天顶方向,计算分时重构后各个偏振中性面的太阳高度角,建立偏振罗盘定位优化求解模型,得到位置经纬度信息。



1. 一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法,其特征在于,包括以下步骤:

第一步,基于太阳偏振分布模式反演解算得到太阳矢量与偏振中性点,进而联立天顶方向建立偏振中性面模型;

第二步,基于不同观测时间获得的偏振中性面,实现偏振中性面分时反演重构,建立偏振天顶方向优化求解模型;

第三步,基于偏振天顶方向,计算分时反演重构后的各个偏振中性面的太阳高度角,建立偏振罗盘定位优化求解模型,得到最终观测位置经纬度信息。

2. 根据权利要求1所述的基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法,其特征在于:所述第一步的实现步骤如下:

(a1) 利用偏振罗盘完成对大气层中偏振光场信息的测量,所述偏振光场信息包括偏振度DOP与偏振方向AOP;

(a2) 基于不同观测方向的偏振方向AOP,建立偏振E矢量在观测坐标系B系下的解算模型:

$$E_B = \begin{bmatrix} \cos AOP \\ \sin AOP \\ -\tan \gamma_p \cos \alpha_p \cos AOP - \tan \gamma_p \sin \alpha_p \sin AOP \end{bmatrix}$$

式中, γ_p 和 α_p 分别为观测位置P在观测坐标系B系中的方位角与天顶角;

(a3) 由于偏振E矢量与太阳矢量互相垂直,因此由多个方向的偏振E矢量建立在观测坐标系B系下的太阳矢量 S_B 优化求解模型:

$$S_B = \arg \min \left(S_B^T [E_B] [E_B]^T S_B \right), s.t. S_B^T S_B = 1$$

式中, S_B 为太阳矢量, $[E_B]$ 为偏振方向图像上不同偏振计算单元对应的偏振E矢量的集合, $\arg \min()$ 为目标取最小值时的求解变量值;s.t.为约束条件;

(a4) 基于偏振光场信息中的偏振度DOP的图像,利用偏振度阈值分割与均值聚类估计法,计算偏振度DOP的图像中偏振度最小的区域中心,进而获得偏振中性点矢量 N_P ;

(a5) 假设天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量为 U_B ,联立太阳矢量 S_B 建立观测时刻对应的偏振中性面模型:

$$\square S = S_B \otimes U_B = S_B \otimes N_P = U_B \otimes N_P, \text{式中} \otimes \text{为矢量叉乘。}$$

3. 根据权利要求2所述的基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法,其特征在于:所述第二步的实现步骤如下:

(b1) 在不同的观测时刻t, 偏振罗盘获得对应的偏振中性面模型 $\square S(t)$,其对应的法向量表示为 $F(t) = S_B(t) \otimes N_P(t)$;

(b2) 对连续时刻内的偏振中性面进行反演重构并统一映射在地理坐标系下,连续时刻内的偏振中性面相交于观测位置的天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量 U_B ,即

$U_B = \square S(t_i) \cap \square S(t_j)$, 式中 t_i 与 t_j 分别为不同的观测时间, $\cap$ 为平面交集;

(b3) 假设天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量 U_B 在偏振罗盘成像面的映射位置坐标为 X_U, Y_U , 偏振罗盘焦距为 f , 其映射位置表示为 $U_B(X_U, Y_U, f)$; 基于天顶方向到各个偏振中性面最小映射距离原则, 建立天顶映射位置的优化求解模型, 即

$$(X_U, Y_U) = \arg \min \sum_{t=1}^N \left(|F(t_i) \cdot U_B|^2 \right), \text{ 其中 } N \text{ 为观测偏振中性面的个数, } t_i \text{ 为第 } i \text{ 个观测时刻。}$$

4. 根据权利要求3所述的基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法, 其特征在于: 所述第三步的实现步骤如下:

(c1) 基于第二步中求得的天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量 U_B 在偏振罗盘成像面的映射位置为 $U_B(X_U, Y_U, f)$, 计算不同观测时刻 t 的偏振中性面的太阳矢量 $S_B(t)$ 的太阳高度角, 即 $\theta_h(t) = 90^\circ - \left| \arccos[\vec{U} \cdot S_B(t)] \right|$,

式中, $\theta_h(t)$ 为 t 时刻太阳矢量的高度角, $\arccos[\]$ 为反余弦函数;

(c2) 基于球面导航三角形, 建立观测位置经纬度与太阳高度角之间的位置关系模型为: $\sin[\theta_h(t)] = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos(\lambda + 15(UT+E) - 180^\circ)$,

其中, φ 为观测位置纬度, λ 为观测位置经度, δ 和 E 分布为观测时刻 t 对应的太阳赤纬与赤经, UT 为观测时间 t 对应的世界时;

(c3) 当观测时刻 t 个数大于2时, 根据不同观测时刻 t 的位置关系模型对观测位置经度 λ 、观测位置纬度 φ 解算;

当观测时刻 t 的分时个数为 N 时, 建立偏振罗盘定位优化求解模型为:

$$(\phi, \lambda) = \arg \min \sum_{t=1}^N \left(\left| \sin[\theta_h(t)] - [\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos(\lambda + 15(UT+E) - 180^\circ)] \right|^2 \right);$$

(c4) 根据地球的椭球度对求解得到的观测位置纬度 φ 进行椭球校正, 得到最终观测

位置纬度 $\bar{\phi}$, 即 $\tan \bar{\phi} = \frac{r_p^2}{r_e^2} \cdot \tan \phi$;

式中, r_p 与 r_e 分别为地球的极地半径与赤道半径。

一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于仿生偏振光自主导航领域,具体涉及一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法。

背景技术

[0002] 作为一种应用于地球大气层内的自主导航仪器,偏振自主定位技术一直是世界各国不断研究,探索和寻求突破的一项关键性技术。这项技术可以解决卫星导航拒止或干扰情况下高精度载体位置信息的获取问题。

[0003] 当前,由于缺乏位置信息与太阳偏振信息之间的三维量测关系,为了实现偏振罗盘的高精度自主定向与定位,现有的偏振罗盘自主导航方法多依赖于其他设备如地平仪、磁强计、重力摆、惯导系统或倾角仪提供水平基准量测信息。专利号为CN109459015A的《一种基于最大偏振度观测的偏振导航全球自主定位方法》借助于外部水平基准获得观测地理坐标系下的观测太阳高度角,而后建立位置信息求解模型,获得位置信息。专利号为CN111595329A的《一种基于观测月光大气偏振模式的自主定位方法》借助于外部陀螺得到载体姿态信息,而后利用偏振信息建立定位求解模型,实现偏振定位。

[0004] 然而,现有这些依赖于外部水平基准信息的理论方法存在以下问题:首先,外部水平测量仪器(如倾角仪、惯导等)必然会引入水平测量系统误差;同时,偏振罗盘与载体的安装误差,水平仪器的安装误差也参与到定位计算过程中;最后,偏振定位的解算精度受限于水平测量仪器的对太阳高度角的求解精度。

[0005] 综上所述,现有偏振罗盘自主定位方法的实现需依赖外部仪器提供水平基准信息,亟需突破外部水平基准仪器对于偏振罗盘自主导航的限制。

发明内容

[0006] 为克服现有偏振罗盘自主定位技术的实现需依赖外部仪器提供水平基准信息这一难题,本发明提供一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法,可以在不依赖外部水平基准仪器的条件下,实现高精度偏振自主定向与定位。

[0007] 为达到上述目的,本发明采用的技术方案为:

一种基于太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法,包括以下步骤:

第一步,基于太阳偏振分布模式反演解算得到太阳矢量与偏振中性点,进而联立天顶方向建立偏振中性面模型;

第二步,基于不同观测时间获得的偏振中性面,实现偏振中性面分时反演重构,建立偏振天顶方向优化求解模型;

第三步,基于天顶方向,计算分时反演重构后的各个偏振中性面的太阳高度角,建立偏振罗盘定位优化求解模型,得到最终观测位置经纬度信息。

[0008] 进一步地,所述第一步的实现步骤如下:

(a1) 利用偏振罗盘完成对大气层中偏振光场信息的测量,所述偏振光场信息包

括偏振度DOP与偏振方向AOP;

(a2) 基于不同观测方向的偏振方向AOP,建立偏振E矢量在观测坐标系B系下的解算模型:

$$E_B = \begin{bmatrix} \cos AOP \\ \sin AOP \\ -\tan \gamma_p \cos \alpha_p \cos AOP - \tan \gamma_p \sin \alpha_p \sin AOP \end{bmatrix}$$

式中, γ_p 和 α_p 分别为观测位置P在观测坐标系B系中的方位角与天顶角;

(a3) 由于偏振E矢量与太阳矢量互相垂直,因此由多个方向的偏振E矢量建立在观测坐标系B系下的太阳矢量 S_B 优化求解模型:

$$S_B = \arg \min \left(S_B^T [E_B] [E_B]^T S_B \right), s.t. S_B^T S_B = 1$$

式中, S_B 为太阳矢量, $[E_B]$ 为偏振方向图像上不同偏振计算单元对应的偏振E矢量的集合, $\arg \min()$ 为目标取最小值时的求解变量值; s.t. 为约束条件;

(a4) 基于偏振光场信息中的偏振度DOP的图像,利用偏振度阈值分割与均值聚类估计法,计算偏振度DOP的图像中偏振度最小的区域中心,进而获得偏振中性点矢量 N_p ;

(a5) 假设天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量为 U_B ,联立太阳矢量 S_B 建立观测时刻对应的偏振中性面模型:

$$\square S = S_B \otimes U_B = S_B \otimes N_p = U_B \otimes N_p, \text{ 式中 } \otimes \text{ 为矢量叉乘。}$$

[0009] 进一步地,所述第二步的实现步骤如下:

(b1) 在不同的观测时刻 t , 偏振罗盘获得对应的偏振中性面模型 $\square S(t)$,其对应的法向量表示为 $F(t) = S_B(t) \otimes N_p(t)$;

(b2) 对连续时刻内的偏振中性面进行反演重构并统一映射在地理坐标系下,连续时刻内的偏振中性面相交于观测位置的天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量 U_B ,即 $U_B = \square S(t_i) \cap \square S(t_j)$,式中 t_i 与 t_j 分别为不同的观测时间, $\cap$ 为平面交集;

(b3) 假设天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量 U_B 在偏振罗盘成像面的映射位置坐标为 X_U, Y_U ,偏振罗盘焦距为 f ,其映射位置表示为 $U_B(X_U, Y_U, f)$;基于天顶方向到各个偏振中性面最小映射距离原则,建立天顶映射位置的优化求解模型,即

$$(X_U, Y_U) = \arg \min \sum_{t=1}^N \left(|F(t_i) \cdot U_B|^2 \right), \text{ 其中 } N \text{ 为观测偏振中性面的个数, } t_i \text{ 为第 } i \text{ 个}$$

观测时刻。

[0010] 进一步地,所述第三步的实现步骤如下:

(c1) 基于第二步中求得的天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量 U_B 在偏振罗盘成像面的映射位置为 $U_B(X_U, Y_U, f)$,计算不同观测时刻 t 的偏振中性面的太阳矢量 $S_B(t)$ 的

太阳高度角,即 $\theta_h(t) = 90^\circ - \left| \arccos \left[\vec{U} \cdot \vec{S}_B(t) \right] \right|$;

式中, $\theta_h(t)$ 为 t 时刻太阳矢量的高度角, $\arccos[\]$ 为反余弦函数;

(c2) 基于球面导航三角形, 建立观测位置经纬度与太阳高度角之间的位置关系模型为: $\sin[\theta_h(t)] = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos(\lambda + 15(UT+E) - 180^\circ)$;

其中, φ 为观测位置纬度, λ 为观测位置经度, δ 和 E 分布为观测时刻 t 对应的太阳赤纬与赤经, UT 为观测时间 t 对应的世界时;

(c3) 当观测时刻 t 个数大于 2 时, 根据不同观测时刻 t 的位置关系模型对观测位置经度 λ 、观测位置纬度 φ 解算;

当观测时刻 t 的分时个数为 N 时, 建立偏振罗盘定位优化求解模型为:

$$(\phi, \lambda) = \arg \min \sum_{t=1}^N \left(\left| \sin[\theta_h(t)] - [\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos(\lambda + 15(UT+E) - 180^\circ)] \right|^2 \right)$$

(c4) 根据地球的椭球度对求解得到的观测位置纬度 φ 进行椭球校正, 得到最终

观测位置纬度 $\bar{\phi}$, 即 $\tan \bar{\phi} = \frac{r_p^2}{r_e^2} \cdot \tan \phi$;

式中, r_p 与 r_e 分别为地球的极地半径与赤道半径。

[0011] 本发明与现有技术相比的优点在于:

(1) 现有技术的缺点主要在于其依赖外部仪器提供水平基准信息, 从而限制了偏振自主定向与定位方法的精度。首先, 外部水平测量仪器(如倾角仪、惯导等)必然会引入水平测量系统误差; 同时, 偏振罗盘与载体的安装误差, 水平仪器的安装误差也参与到定位计算过程中; 最后, 偏振定位的解算精度受限于水平测量仪器的对太阳高度角的求解精度;

(2) 与现有技术的缺点相比, 本发明不依赖外部仪器提供水平基准信息;

(3) 与现有技术的缺点相比, 发明适用于静态环境下具有高自主定位精度需求的军用或民用载体;

(4) 本发明之所有存在上述优点, 是由于本发明提出通过分时重构建立长时间的偏振中性面观测系统, 从而无需借助外部水平基准仪器, 实现偏振罗盘的自主定位。

附图说明

[0012] 图1为本发明一种太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法的设计流程图;

图2为本发明一种太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法的中性面重构示意图。

具体实施方式

[0013] 下面结合附图及实施例对本发明进行详细说明。

[0014] 如图1所示, 本发明公开了一种太阳偏振中性面分时反演重构的自主定位方法。该方法提出通过分时重构建立长时间的偏振中性面观测系统, 从而无需借助外部水平基准仪器, 实现偏振罗盘的自主定位。

[0015] 太阳光在地球大气层中与大气分子或气溶胶等粒子相互作用发生散射而产生偏振。假设偏振罗盘对大气偏振场成像检偏方向分别为 0° , 45° , 90° 和 135° 时的成像灰度值分别为 $I(0^\circ)$, $I(45^\circ)$, $I(90^\circ)$ 和 $I(135^\circ)$, 那么对应的偏振光场信息中偏振度DOP与偏振方向AOP为:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right)$$

$$\text{式中, } S_0 = \frac{1}{2}(I(0^\circ) + I(45^\circ) + I(90^\circ) + I(135^\circ)),$$

$$S_1 = I(0^\circ) - I(90^\circ), S_2 = I(45^\circ) - I(135^\circ).$$

[0016] 在偏振感光坐标系(I系)下, 对应的偏振E矢量可以有偏振方向AOP得到:

$$E_I = [\cos AOP \quad \sin AOP \quad 0]$$

假设偏振成像位置P对应的在观测坐标系B系的方向矢量为:

$$P_B = [\sin \gamma_p \cos \alpha_p \quad \sin \gamma_p \sin \alpha_p \quad \cos \gamma_p]$$

式中, γ_p 和 α_p 分别为观测位置P在B系中的方位角与天顶角。

[0017] 然后, 在B系中偏振E矢量由其与观测方向之间的垂直关系即 $E_B \perp P_B$ 求解得到:

$$E_B = \begin{bmatrix} \cos AOP \\ \sin AOP \\ -\tan \gamma_p \cos \alpha_p \cos AOP - \tan \gamma_p \sin \alpha_p \sin AOP \end{bmatrix}$$

在偏振罗盘中考虑不同的观测方向的E矢量与太阳矢量垂直即 $E_B \perp S_B$, 那么可使用最小二乘优化对太阳矢量在B系中的方向求解:

$$S_B = \arg \min (S_B^T [E_B][E_B]^T S_B), s.t. S_B^T S_B = 1$$

式中, S_B 为太阳矢量, $[E_B]$ 为不同观测方向的偏振E矢量集合 $[E_B] = [E_{B,1}, E_{B,2}, E_{B,3}, \dots]$, $\arg \min()$ 为目标取最小值时的求解变量值。

[0018] 同时基于偏振度DOP信息, 利用偏振度阈值分割与均值聚类估计法, 计算偏振度图像中偏振度最小的区域中心, 进而获得偏振中性点矢量 N_p :

$$N_p = \begin{bmatrix} \sin Zeh_{NP} \cos Azi_{NP} \\ \sin Zeh_{NP} \sin Azi_{NP} \\ \cos Zeh_{NP} \end{bmatrix}$$

式中, Zeh_{NP} 与 Azi_{NP} 分别为中性点区域中心的天顶角与方位角。

[0019] 如图2所示, 0_n 为观测坐标系原点, S 为太阳矢量在观测系下的方向。假设天顶方向在观测坐标系B系下的方向矢量为 U_B , 联立太阳矢量 S_B 建立该观测时刻对应的偏振中性面

模型:

$$\square S = S_B \otimes U_B = S_B \otimes N_P = U_B \otimes N_P$$

式中, $\otimes$ 为矢量叉乘。

[0020] 假设偏振罗盘静止放置, 随着地球的自转, 偏振中性面也随之慢慢发生偏移。在不同的观测时刻 t , 偏振罗盘可以获得对应的偏振中性面 $\square S(t)$, 其对应的法向量表示为:

$$F(t) = S_B(t) \otimes N_P(t)$$

将连续时刻内的偏振中性面进行反演重构, 统一映射在地理坐标系下(东-北-天坐标系)。它们相交于观测位置的天顶方向 U_B , 即:

$$U_B = \square S(t_i) \cap \square S(t_j)$$

式中 t_i 与 t_j 分别为不同的观测时间, $\cap$ 为平面交集。

[0021] 假设天顶方向 U_B 在偏振罗盘成像面的映射位置坐标为 X_U, Y_U , 偏振罗盘焦距为 f , 天顶方向表示为 $U_B(X_U, Y_U, f)$ 。基于天顶方向坐标到各个偏振中性面最小映射距离原则, 建立天顶映射位置的优化求解模型, 即:

$$(X_U, Y_U) = \arg \min \sum_{i=1}^N \left(\left| F(t_i) \cdot \vec{U}_N \right|^2 \right)$$

其中 N 为观测偏振中性面的个数。

[0022] 基于天顶方向 U_B 在偏振罗盘成像面的映射位置为 (X_U, Y_U, f) , 通过计算太阳矢量与天顶方向之间的夹角获得计算不同时刻 t 对应的偏振中性面的太阳矢量 $S_B(t)$ 的高度角:

$$\theta_h(t) = 90^\circ - \left| \arccos \left[\vec{U} \cdot S_B(t) \right] \right|$$

式中, $\theta_h(t)$ 为 t 时刻太阳矢量的高度角, $\arccos[\]$ 为反余弦函数。

[0023] 基于球面天文导航三角形, 建立观测位置经纬度与太阳高度角之间的位置关系模型为:

$$\sin[\theta_h(t)] = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos(\lambda + 15(UT+E) - 180^\circ)$$

其中, φ 为观测位置纬度, λ 为观测位置经度, δ 和 E 分别为观测时刻的太阳赤纬与赤经(由太阳星历得到), UT 为观测时间对应的世界时;

当观测时刻 t 个数大于 2 时, 不同观测时刻 t 的位置关系模型可对观测位置纬度 φ 与观测位置经度 λ 解算。当观测时刻 t 分时个数为 N 时, 建立偏振罗盘定位优化求解模型为:

$$(\phi, \lambda) = \arg \min \sum_{i=1}^N \left(\left| \sin[\theta_h(t)] - [\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos(\lambda + 15(UT+E) - 180^\circ)] \right|^2 \right)$$

最后, 根据地球的椭球度对求解得到的观测位置经纬度信息 (λ, φ) 的纬度进行椭球校正, 得到最终观测位置经纬度信息 $\bar{\phi}$, 即:

$$\tan \bar{\phi} = \frac{r_p^2}{r_e^2} \cdot \tan \phi$$

式中, r_p 与 r_e 分别为地球的极地半径与赤道半径。

[0024] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。本领域的技术人员容易理解, 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

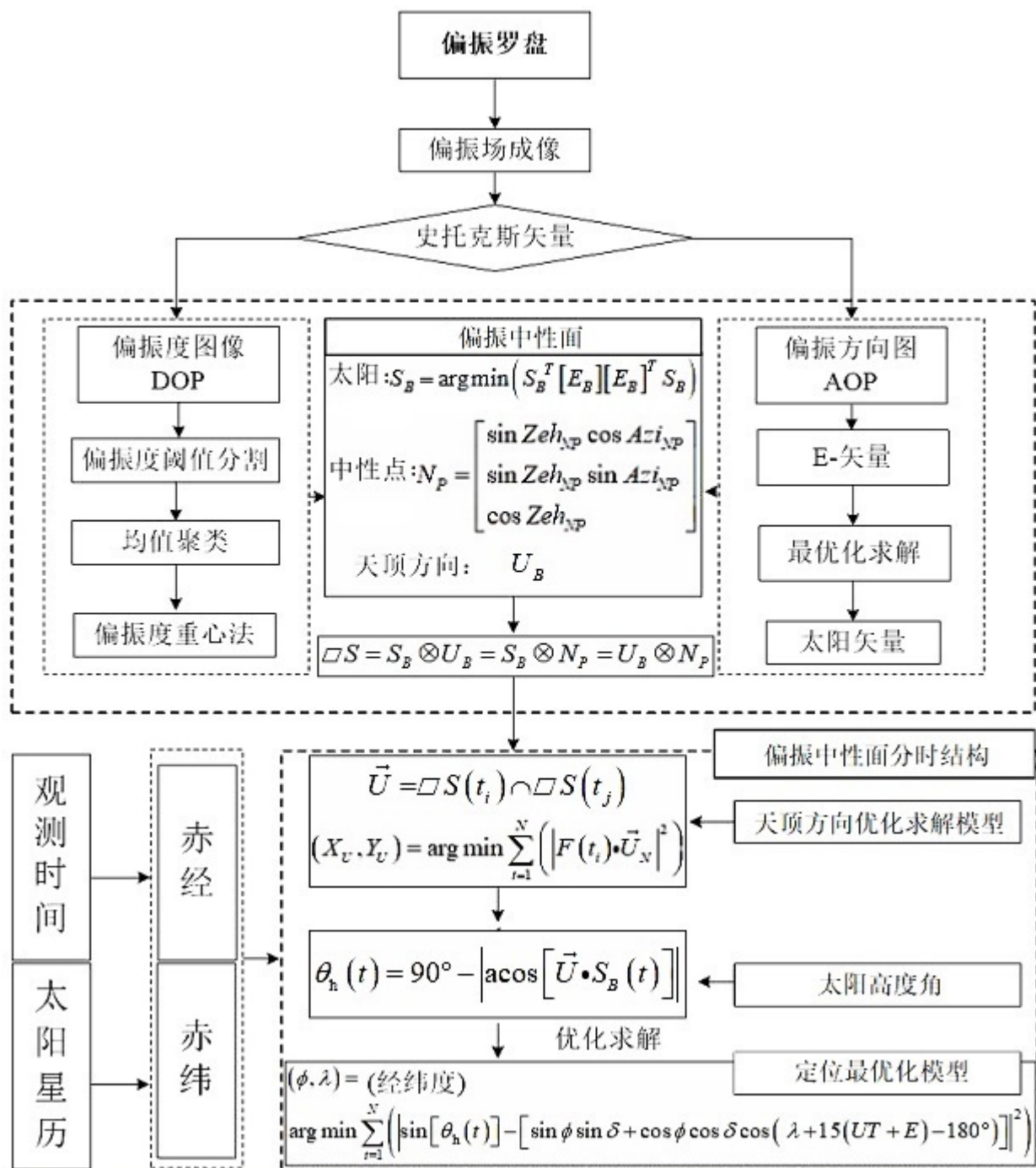


图1

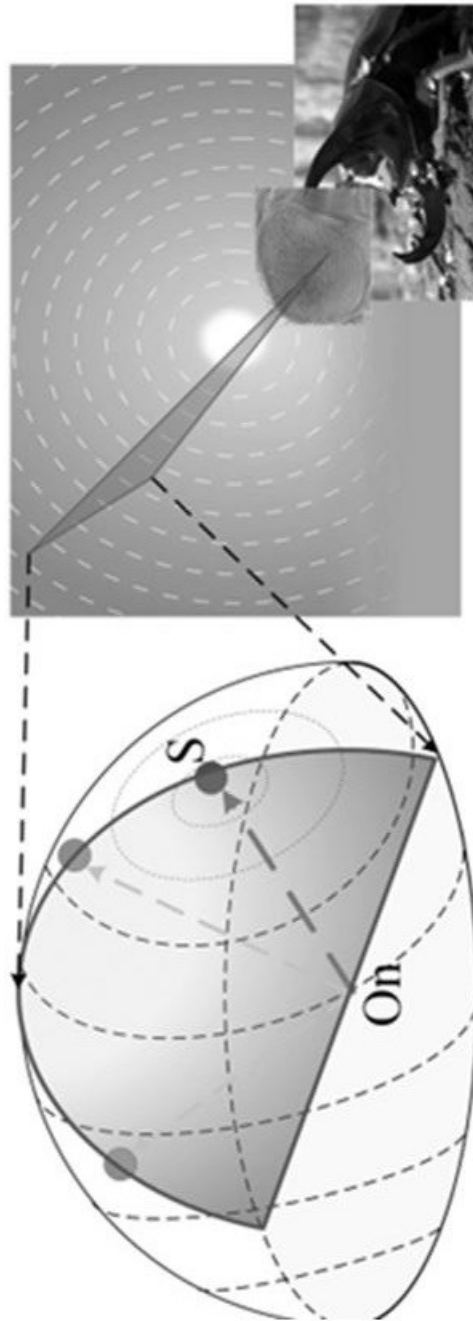


图2