



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108537770 A

(43)申请公布日 2018.09.14

(21)申请号 201810024731.8

G06F 17/16(2006.01)

(22)申请日 2018.01.11

(71)申请人 中国人民解放军战略支援部队航天
工程大学

地址 101416 北京市怀柔区八一路一号

申请人 华中科技大学

(72)发明人 夏鲁瑞 左峥嵘 张占月 李纪莲
肖龙龙 杨雪榕 胡敏 潘升东
杨雅君

(74)专利代理机构 长沙市护航专利代理事务所
(特殊普通合伙) 43220

代理人 莫晓齐

(51)Int.Cl.

G06T 7/00(2017.01)

G06F 17/11(2006.01)

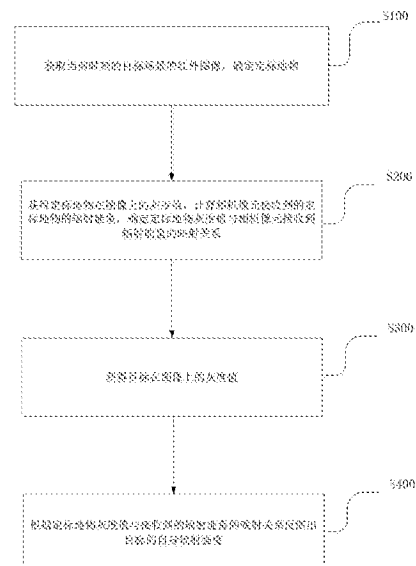
权利要求书3页 说明书13页 附图10页

(54)发明名称

一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法
及系统

(57)摘要

本发明公开了一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法和系统,所述方法:步骤S100:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物;步骤S200:获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;步骤S300:获得目标在图像上的灰度值;步骤S400:根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。本发明能够在缺乏标准定标辐射源条件下,以典型地物为辐射定标参照物对远距离小目标辐射特性进行反演。



1. 一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

步骤S100:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物;

步骤S200:获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

步骤S300:获得目标在图像上的灰度值;

步骤S400:根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。

2. 根据权利要求1所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,其特征在于,所述步骤S200具体为:获取成像时刻的定标地物区域在图像上的平均灰度值,结合定标地物的气象条件,计算定标地物成像时刻的表面温度及其对应的自身辐射强度,根据相机像元视场角及其成像距离计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内的表面辐射能量,计算出定标地物至相机之间光学路径上的大气衰减及其程辐射,在面辐射模型下计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

3. 根据权利要求2所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,其特征在于,所述步骤S400具体为:根据定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系,可计算出相机像元接收到目标的辐射能量,并考虑大气效应的修正,在点源辐射模型下反演出目标的自身辐射强度。

4. 根据权利要求3所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,其特征在于,所述步骤S100具体为:

步骤S101:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物得到定标地物区域中心点在图像上的相面坐标 (x_b, y_b) ;

步骤S102:根据定标地物区域中心点的相面坐标 (x_b, y_b) ,通过坐标系变换获得相机视线 $\overrightarrow{T_e^{sci}}$,所述视线 $\overrightarrow{T_e^{sci}}$ 与地球表面的交点再转换为经纬高 $B(Lat_b, Lon_b, H_b)$ 。

5. 根据权利要求4所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,其特征在于,所述步骤S102中所述涉及坐标系转换具体为:从地心惯性坐标系依次经过轨道坐标系、卫星坐标系转换为传感器成像坐标系。

6. 根据权利要求5所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,其特征在于,所述步骤S200具体为:

步骤S201:获得定标地物区域在当前时刻的图像上的平均灰度值 g_b ;

步骤S202:根据定标地物的气象条件,通过热平衡方程计算得到定标地物表面温度 T_s ;

步骤S203:根据定标地物表面温度 T_s ,通过普朗克定律计算定标地物自身辐射强度 I_s ;

;

步骤S204:通过Modtran计算获取定标地物区域红外图像成像时刻的气象条件下到达该区域的 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段的太阳热辐射强度 I_{sun} ,并根据太阳漫反射模型,计算定标地物

的漫反射辐射强度分量 I_{diff} ;

步骤S205: 计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段辐射能量 E_{ob} ;

步骤S206: 根据相机和定标地物区域中心点的经纬高 $B(Lat_s, Lon_s, H_s)$ 的几何关系, 以及大气参数计算定标地物和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} ;

步骤S207: 在面辐射模型下, 根据定标地物和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} , 计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量 E ;

步骤S208: 确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

7. 根据权利要求6所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法, 其特征在于, 所述步骤S208之后还包括步骤S209: 再次获取目标场景的红外图像, 重新确定定标地物, 返回步骤S201, 直至满足预设条件, 得到不同定标地物平均灰度值以及其相对应相机像元接收到辐射能量, 通过线性拟合获得定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

8. 根据权利要求7所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法, 其特征在于, 所述步骤S300具体为:

步骤S301: 通过检测算法或者人工标记的方法得到在当前时刻的图像上的目标区域对应的灰度值 G_{ss} ;

步骤S302: 已知目标区域中心点的经纬高 $A(Lat_s, Lon_s, H_s)$, 根据相机和目标区域中心点的经纬高 $A(Lat_s, Lon_s, H_s)$ 的几何关系以及大气参数计算目标与相机之间对应波段的大气透过率 τ_s 和该段路径的程辐射 E_{paths} 。

9. 根据权利要求8所述的无定标卫星成像目标辐射特性反演方法, 其特征在于, 所述步骤S400具体为:

步骤S401: 根据成像时刻的图像上的目标对应的灰度值 G_{ss} , 通过定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系计算相机像元接收到目标的辐射能量, 即入瞳辐射能量 E_o ;

步骤S402: 在点源辐射模型下, 根据入瞳辐射能量 E_o 、大气透过率 τ_s 和该段路径的程辐射 E_{paths} 反演出目标的自身辐射强度 I_{ob} 。

10. 一种无定标卫星成像目标辐射特性反演系统, 其特征在于, 所述系统包括定标地物确定模块、映射模块、目标确定模块和反演模块, 其中:

定标地物确定模块, 用于获取当前时刻目标场景的红外图像, 确定定标地物;

映射模块, 用于获得定标地物在图像上的灰度值, 计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量, 确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

目标标记模块, 用于获得目标在图像上的灰度值;

反演模块, 用于根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自

身辐射强度。

一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及图像处理技术领域,尤其涉及一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法及系统。

背景技术

[0002] 红外成像器获取的图像数据是目标/背景能量经光电转换及量化所形成的离散数据,为从图像数据中反演目标的辐射强度,则需要进行辐射定标处理,以确定图像数据值与辐射能量之间的对应关系。辐射定标通常采用标准辐射源来进行,但在实际成像条件下,卫星成像器有时缺乏标准辐射源进行辐射定标。

[0003] 因此,如何能够在缺乏标准定标辐射源的条件下,对远距离小目标辐射特性进行反演成为本领域技术人员亟需解决的问题。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法和系统,能够在缺乏标准定标辐射源的条件下,对远距离小目标辐射特性进行反演。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提供一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,所述方法包括以下步骤:

步骤S100:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物;

步骤S200:获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

步骤S300:获得目标在图像上的灰度值;

步骤S400:根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。

[0006] 优选地,所述步骤S200具体为:获取成像时刻的定标地物区域在图像上的平均灰度值,结合定标地物的气象条件,计算定标地物成像时刻的表面温度及其对应的自身辐射强度,根据相机像元视场角及其成像距离计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内的表面辐射能量,计算出定标地物至相机之间光学路径上的大气衰减及其程辐射,在面辐射模型下计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

[0007] 优选地,所述步骤S400具体为:根据定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系,可计算出相机像元接收到目标的辐射能量,并考虑大气效应的修正,在点源辐射模型下反演出目标的自身辐射强度。

[0008] 优选地,所述步骤S100具体为:

步骤S101:将预先设定的定标地物坐标系经过坐标系转换,得到定标地物区域中心点在图像上的相面坐标 (x_s, y_s) ;

步骤S102:根据定标地物区域中心点的相面坐标 (x_b, y_b) ,通过坐标系变换获得相机视线 \vec{T}_c^{sc} ,所述视线 \vec{T}_c^{sc} 与地球表面的交点再转换为经纬高 $B(Lat_b, Lon_b, H_b)$ 。

[0009] 优选地,所述步骤S102中所述涉及坐标系转换具体为:从地心惯性坐标系依次经过轨道坐标系、卫星坐标系转换为传感器成像坐标系。

[0010] 优选地,所述步骤S200具体为:

步骤S201:获得定标地物区域在当前时刻的图像上的平均灰度值 G_b ;

步骤S202:根据定标地物的气象条件,通过热平衡方程计算得到定标地物表面温度 T_g ;

步骤S203:根据定标地物表面温度 T_g ,通过普朗克定律计算定标地物自身辐射强度 I_g ;

步骤S204:通过Modtran计算获取定标地物区域红外图像成像时刻的气象条件下到达该区域的 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段的太阳热辐射强度 I_{sun} ,并根据太阳漫反射模型,计算定标地物的漫反射辐射强度分量 I_{diff} ;

步骤S205:计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段辐射能量 E_{ob} ;

步骤S206:根据相机和定标地物区域中心点的经纬高 $B(Lat_b, Lon_b, H_b)$ 的几何关系,以及大气参数计算定标地物和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} ;

步骤S207:在面辐射模型下,根据定标地物和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} ,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量 E ;

步骤S208:确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

[0011] 优选地,所述步骤S208之后还包括步骤S209:再次获取目标场景的红外图像,重新确定定标地物,返回步骤S201,直至满足预设条件,得到不同定标地物平均灰度值以及其相对应相机像元接收到辐射能量,通过线性拟合获得定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

[0012] 优选地,所述步骤S300具体为:

步骤S301:通过检测算法或者人工标记的方法得到在当前时刻的图像上的目标区域对应的灰度值 G_a ;

步骤S302:已知目标区域中心点的经纬高 $A(Lat_a, Lon_a, H_a)$,根据相机和目标区域中心点的经纬高 $A(Lat_a, Lon_a, H_a)$ 的几何关系以及大气参数计算目标与相机之间对应波段的大气透过率 τ_a 和该段路径的程辐射 E_{patha} 。

[0013] 优选地,所述步骤S400具体为:

步骤S401:根据成像时刻的图像上的目标对应的灰度值 G_{ob} ,通过定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系计算相机像元接收到目标的辐射能量,即入瞳辐射能量 E_o ;

步骤S402:在点源辐射模型下,根据入瞳辐射能量 E_o 、大气透过率 T_a 和该段路径的程辐射 E_{path} 反演出目标的自身辐射强度 I_{ob} 。

[0014] 本发明还提供一种无定标卫星成像目标辐射特性反演系统,所述系统包括定标地物确定模块、映射模块、目标确定模块和反演模块,其中:

定标地物确定模块,用于获取当前时刻目标场景的红外图像,确定定标地物;

映射模块,用于获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

目标标记模块,用于获得目标在图像上的灰度值;

反演模块,用于根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。

[0015] 本发明提供的一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法和系统,能够在缺乏标准定标辐射源的情况下,以典型地物为辐射定标参照物对远距离小目标辐射特性进行反演。

附图说明

[0016] 图1为本发明提供的第一种实施例所述无定标卫星成像目标辐射特性反演方法的流程图;

图2为本发明提供的第二种实施例所述无定标卫星成像目标辐射特性反演方法的流程图;

图3为本发明提供的第三种实施例所述无定标卫星成像目标辐射特性反演方法的流程图;

图4为成像投影相关坐标系的相对关系示意图;

图5为目标视线方向矢量示意图;

图6为一维有限差分求解示意图;

图7为 Lambert漫反射模型图;

图8为地球面源到像元的辐照度示意图;

图9 为Modtran大气路径类型示意图;

图10为 Vega仿真下生成的红外灰度图;

图11为材质辐亮度和仿真结果的对应曲线图;

图12为本发明提供的一种无定标卫星成像目标辐射特性反演系统结构框图。

具体实施方式

[0017] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明的技术方案,下面结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0018] 参见图1,图1为本发明提供的第一种实施例所述无定标卫星成像目标辐射特性反演方法的流程图。

[0019] 一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,所述方法包括以下步骤:

步骤S100:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物;

步骤S200:获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

步骤S300:获得目标在图像上的灰度值;

步骤S400:根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。

[0020] 获取当前时刻的目标场景的红外图像,选取场景中较为均匀、辐射特性易于理论计算的地物作为定标地物。定标地物可选择水体、沙漠等。这类地物在图像中显著而易于识别,并且其介质较为单一,为其辐射计算带来一定的便利。获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。获得目标在图像上的灰度值,根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。本发明能够在缺乏标准定标辐射源的条件,以典型地物为辐射定标参照物对远距离小目标辐射特性进行反演。

[0021] 参见图2,图2为本发明提供的第二种实施例所述无定标卫星成像目标辐射特性反演方法的流程图。

[0022] 一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,所述方法包括以下步骤:

步骤S100:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物;

步骤S200:获取成像时刻的定标地物区域在图像上的平均灰度值,结合定标地物的气象条件,计算定标地物成像时刻的表面温度及其对应的自身辐射强度,根据相机像元视场角及其成像距离计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内的表面辐射能量,计算出定标地物至相机之间光学路径上的大气衰减及其程辐射,在面辐射模型下计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

步骤S300:获得目标在图像上的灰度值;

步骤S400:根据定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系,可计算出相机像元接收到目标的辐射能量,并考虑大气效应的修正,在点源辐射模型下反演出目标的自身辐射强度。

[0023] 获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物。获取成像时刻的定标地物区域在图像上的平均灰度值,结合定标地物的气象条件,计算定标地物成像时刻的表面温度及其对应的自身辐射强度,根据相机像元视场角及其成像距离计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内的表面辐射能量,计算出定标地物至相机之间光学路径上的大气衰减及其程辐射,在面辐射模型下计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。

[0024] 获得目标在图像上的灰度值,根据定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系,可计算出相机像元接收到目标的辐射能量,并考虑大气效应的修正,由于是对远距离小目标进行反演,故在点源辐射模型下反演出目标的自身辐射强度。

[0025] 参见图3至图11,图3为本发明提供的第一种实施例所述无定标卫星成像目标辐射特性反演方法的流程图,图4为成像投影相关坐标系的相对关系示意图,图5为目标视线方向矢量示意图,图6为一维有限差分求解示意图,图7为 Lambert漫反射模型图,图8为地球面源到像元的辐照度示意图,图9为 Modtran大气路径类型示意图,图10 为Vega仿真下生成的红外灰度图,图11为材质辐亮度和仿真结果的对应曲线图。

[0026] 一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法,所述方法包括以下步骤:

步骤S101:获取当前时刻的目标场景的红外图像,确定定标地物,得到定标地物区域中心点在图像上的相面坐标 (x_s, y_s) ;

步骤S102:根据定标地物区域中心点的相面坐标 (x_s, y_s) ,通过坐标系变换获得相机视线 $\overrightarrow{T_{\text{vis}}}$,所述视线 $\overrightarrow{T_{\text{vis}}}$ 与地球表面的交点再转换为经纬高 $B(Lat_s, Lon_s, H_s)$ 。

[0027] 详见图4,所述涉及坐标系转换具体为:从地心惯性坐标系依次经过轨道坐标系、卫星坐标系转换为传感器成像坐标系。

[0028] 当前时刻即为成像时刻 t_I^K 时的坐标系转换矩阵 $M_{\text{earth2sensor}}$ 计算步骤,包括:

(1)地心坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 到轨道坐标系 $O_o X_o Y_o Z_o$ 的转换矩阵 $M_{\text{earth2orbit}}$ 计算:

轨道坐标系 $O_o X_o Y_o Z_o$ 的定义为:以卫星所处位置为原点 O_o , X_o 轴在轨道面内指向卫星飞行方向, Z_o 轴方向是卫星与星下点连线的方向,指向地心, Y_o 轴垂直轨道面,与 X_o 和 Z_o 轴组成右手系。转换矩阵 $M_{\text{earth2orbit}}$ 计算公式如下:

$$M_{\text{earth2orbit}} = \begin{bmatrix} \mu_{x_e}^{X_o} & \mu_{y_e}^{X_o} & \mu_{z_e}^{X_o} & 0 \\ \nu_{x_e}^{Y_o} & \nu_{y_e}^{Y_o} & \nu_{z_e}^{Y_o} & 0 \\ \eta_{x_e}^{Z_o} & \eta_{y_e}^{Z_o} & \eta_{z_e}^{Z_o} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_s \\ 0 & 1 & 0 & -y_s \\ 0 & 0 & 1 & -z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $(\mu_{x_e}^{X_o}, \mu_{y_e}^{X_o}, \mu_{z_e}^{X_o})$, $(\nu_{x_e}^{Y_o}, \nu_{y_e}^{Y_o}, \nu_{z_e}^{Y_o})$, $(\eta_{x_e}^{Z_o}, \eta_{y_e}^{Z_o}, \eta_{z_e}^{Z_o})$ 分别为轨道坐标系 X_o 、 Y_o 、 Z_o 轴在地心坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的方向矢量,计算式如下:

$$(\eta_{x_e}^{Z_o}, \eta_{y_e}^{Z_o}, \eta_{z_e}^{Z_o}) = \left(-\frac{x_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}}, -\frac{y_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}}, -\frac{z_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}} \right)$$

其中, (x_s, y_s, z_s) 为卫星平台的位置,与相机位置相同。轨道面法向,即坐标轴 Y_o 的方向矢量 $(\nu_{x_e}^{Y_o}, \nu_{y_e}^{Y_o}, \nu_{z_e}^{Y_o})$ 由轨道参数给定,则 X_o 轴矢量 $(\mu_{x_e}^{X_o}, \mu_{y_e}^{X_o}, \mu_{z_e}^{X_o})$ 可由 Y_o 轴矢量和 Z_o 轴矢量的叉乘得到:

$$(\mu_{x_s}^{X_s}, \mu_{y_s}^{X_s}, \mu_{z_s}^{X_s}) = (v_{x_s}^{Y_s}, v_{y_s}^{Y_s}, v_{z_s}^{Y_s}) \otimes (\eta_{x_s}^{Z_s}, \eta_{y_s}^{Z_s}, \eta_{z_s}^{Z_s}).$$

[0029] (2) 轨道坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 到卫星坐标系 $O_{sat} X_{sat} Y_{sat} Z_{sat}$ 的转换矩阵 $M_{orbit2sat}$ 计算:

理想情况下, 卫星坐标系与轨道坐标系重合, 但由于卫星姿态在俯仰、偏航和旋转上的扰动, 卫星坐标系与轨道坐标系实际并不重合, 两者存在一个旋转关系, 旋转变换由卫星相对于轨道坐标系的俯仰、偏航和旋转角确定:

$$M_{orbit2sat} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ 0 & -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \zeta & \sin \zeta & 0 & 0 \\ -\sin \zeta & \cos \zeta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, ϑ 、 ψ 、 ζ 分别为卫星相对于轨道坐标系的俯仰、旋转和偏航的角度。考虑卫星姿态误差服从高斯分布, 即俯仰、旋转和偏航角分别服从正态分布 $N(0, \delta_\vartheta)$ 、 $N(0, \delta_\psi)$ 和 $N(0, \delta_\zeta)$, δ_ϑ 、 δ_ψ 和 δ_ζ 分别为对应量的标准差, 其值由探测系统给定。 ϑ 、 ψ 、 ζ 按其分布随机生成。

[0030] (3) 卫星坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 到传感器成像坐标系 $O_{ss} X_{ss} Y_{ss} Z_{ss}$ 的转换矩阵 $M_{sat2sensor}$ 计算:

传感器成像坐标系 $O_{ss} X_{ss} Y_{ss} Z_{ss}$ 的原点与卫星坐标系原点重合, Z_{ss} 轴为传感器视轴指向, X_{ss} 轴平行坐标平面 $X_s O_s Y_s$, 传感器视轴指向 Z_{ss} 在卫星坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的俯仰角为 e_{pt} 、方位角为 α_{pt} , 传感器成像坐标系与卫星坐标系的关系如图5所示, Z_{ss} 轴在卫星坐标系下的方向矢量 $(\eta_{x_s}^{Z_{ss}}, \eta_{y_s}^{Z_{ss}}, \eta_{z_s}^{Z_{ss}})$ 为:

$$(\eta_{x_s}^{Z_{ss}}, \eta_{y_s}^{Z_{ss}}, \eta_{z_s}^{Z_{ss}}) = \left(\frac{\cos \alpha_{pt}}{\sqrt{1 + (\cos e_{pt})^2}}, \frac{\sin \alpha_{pt}}{\sqrt{1 + (\cos e_{pt})^2}}, \frac{\cos e_{pt}}{\sqrt{1 + (\cos e_{pt})^2}} \right)$$

X_{ss} 轴方向矢量 $(\mu_{x_s}^{X_{ss}}, \mu_{y_s}^{X_{ss}}, \mu_{z_s}^{X_{ss}})$ 和 Y_{ss} 轴方向矢量 $(v_{x_s}^{Y_{ss}}, v_{y_s}^{Y_{ss}}, v_{z_s}^{Y_{ss}})$ 分别为:

$$(\mu_{x_s}^{X_{ss}}, \mu_{y_s}^{X_{ss}}, \mu_{z_s}^{X_{ss}}) = (0, 0, 1) \otimes (\eta_{x_s}^{Z_{ss}}, \eta_{y_s}^{Z_{ss}}, \eta_{z_s}^{Z_{ss}}),$$

$$(v_{x_s}^{Y_{ss}}, v_{y_s}^{Y_{ss}}, v_{z_s}^{Y_{ss}}) = (\mu_{x_s}^{X_{ss}}, \mu_{y_s}^{X_{ss}}, \mu_{z_s}^{X_{ss}}) \otimes (\eta_{x_s}^{Z_{ss}}, \eta_{y_s}^{Z_{ss}}, \eta_{z_s}^{Z_{ss}}),$$

$$M_{sat2sensor} = \begin{bmatrix} \mu_{x_s}^{X_{sz}} & \mu_{y_s}^{X_{sz}} & \mu_{z_s}^{X_{sz}} & 0 \\ \nu_{x_s}^{Y_{sz}} & \nu_{y_s}^{Y_{sz}} & \nu_{z_s}^{Y_{sz}} & 0 \\ \eta_{x_s}^{Z_{sz}} & \eta_{y_s}^{Z_{sz}} & \eta_{z_s}^{Z_{sz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

[0031] 如图5所示,定标地物区域中心点在图像上的坐标位置为 (x_b, y_b) ,根据图像行数 row 及列数 col ,以及像元视场角 φ_{pixel} ,可求出该位置对应于定标地物区域中心点相对于光轴的偏角 (α_x, α_y) :

$$\alpha_x = (x_b - col/2) \cdot \varphi_{pixel}$$

$$\alpha_y = (y_b - row/2) \cdot \varphi_{pixel}$$

定标地物中心点视线在相机坐标系下的方向矢量 \vec{T}_c 为:

$$\vec{T}_c = (\sin \alpha_x \cos \alpha_y, \sin \alpha_y, \cos \alpha_x \cos \alpha_y)$$

则地心惯性坐标系下定标地物中心点视线方向矢量 \vec{T}_e^{eci} 为:

$$\vec{T}_c^{eci}(t_x, t_y, t_z) = (M_{sat2sensor} * M_{orbit2sat} * M_{earth2orbit})^{-1} * \vec{T}_c。$$

[0032] 进一步可得到视线 \vec{T}_e^{eci} 与地球表面的交点,将该地心惯性坐标系下的交点坐标转换到地理坐标系下得到经纬高 $B(Lat_b, Lon_b, H_b)$ 。计算交点过程如下:

根据定标地物区域中心点视线方向及卫星位置可得到过目标的射线方程:

$$\frac{X - X_s}{t_x} = \frac{Y - Y_s}{t_y} = \frac{Z - Z_s}{t_z}$$

则交点(即定标地物区域中心点)的空间位置 $P(x, y, z)$ 可由以下联立方程解得:

$$\begin{cases} \frac{X - X_s}{t_x} = \frac{Y - Y_s}{t_y} = \frac{Z - Z_s}{t_z} \\ x^2 + y^2 + z^2 = R_0^2 \end{cases}$$

其中, R_0 为地球半径。

[0033] 步骤S201:获得定标地物区域在成像时刻的图像上的平均灰度值 \mathcal{G}_b ;

步骤S202:根据定标地物的气象条件,通过热平衡方程计算得到定标地物表面温度 T_g

;

当定标地物选择沙漠时,对于沙漠而言,其地表温度由太阳、月球等的辐射所决定,对于自身不具有热源的沙漠地表来说,沙漠地表稳态热平衡方程如下:

$$E_s + E_c + M_g + H + EL + E_{cd} = 0$$

E_s 、 E_c 分别为地表吸收的太阳辐射和大气辐射, M_g 为地表的自身辐射, H 为显热交换, EL 为潜热交换, E_{cd} 为热传导, E_s 、 E_c 、 M_g 和 E_{cd} 由下式确定:

$$E_s = (1 - \gamma)E_e, E_c = \varepsilon\sigma T_a^4(a - b\sqrt{e_a})$$

$$M_g = \varepsilon\sigma T_g^4, E_{cd} = -\kappa \cdot \frac{\partial T}{\partial v}.$$

[0034] 上面各式中, E_e 为到达地表处的太阳辐射, γ 为地表反射率, ε 为地表发射率, σ 为斯蒂芬-波尔斯曼常数, κ 为定标地物的导热系数, T_a 、 T_g 和 T 分别为参考高度处的大气温度、地表表面温度和地下近地表处温度, e_a 为大气水汽压, a 、 b 为经验常数, \vec{v} 为地表面法向方向。

[0035] H 和 EL 相应的表达式为:

$$H = \rho_a C_p C_D \mu_a (T_a - T_f)$$

$$EL = \rho_a \Gamma C_D \mu_a (q_a - q_f)$$

上述各式中, ρ_a 、 C_p 分别为空气密度和定压比热, Γ 为汽化潜热, q_a 为参考高度处的大气比湿, q_f 为地表表面处的比湿, C_D 为拖曳系数, μ_a 为风速。

[0036] 温度的计算就是热传导方程的求解,微分方程的求解可采用微元法,由于地表介质的温度分布具有分层特点,温度的变化一般发生在深度方向上,而在横向上可认为无变化,因此,在温度计算过程中,按一维导热处理,其内部温度分布的导热微分方程为:

$$\frac{\partial T(t, h)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(t, h)}{\partial h^2}$$

式中, $T(t, h)$ 为时刻 t ,深度 h 的温度, α 为热扩散系数,其值为 $\frac{\kappa}{c \cdot \rho}$, c 、 ρ 分别为定标地物的比热和密度。

[0037] 对于上述的热传导方程,可采用一维有限差分法来求解其不稳定传热,如图7所示,令计算时间 $t = m \cdot \Delta t$, $m = 0, 1, 2, \dots$,并从地表向内将一定深度的沙漠划分为 n 个薄层,设总厚度为 H_g ,则薄层厚度为 $\Delta h = \frac{H_g}{n}$, t 时刻、第 k 个薄层的中心温度表示为 $T(m, k)$,则求解热传导方程的差分计算格式如下:

$$T(m+1, k) = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta h^2} T(m, k+1) - \left(2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta h^2} - 1 \right) T(m, k) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta h^2} T(m, k-1) \quad (1)$$

为求解上述导热微分方程,需要给定初始条件和边界条件,一般来讲,可将地物表面的初始温度设定为大气温度。即

$$T(0, 0) = T_a$$

所需的边界条件随求解对象的不同而有所不同,对于沙漠地表,其边界条件可由目标沙漠表面的热平衡方程给出。

[0038] 如图6所示,第0层在 Δt 时间步长内,其温度从 $T(m, 0)$ 变化到 $T(m+1, 0)$ 所吸收的热量为:

$$\begin{aligned}\Delta Q_{out} &= \rho \cdot C \cdot \Delta h \cdot S \cdot [T(m+1, 0) - T(m, 0)] \\ &= (E_s + E_c + M_g + H + EL + E_{cd}) \cdot S\end{aligned}$$

其中,S为临时变量。

[0039] 因此有:

$$\rho \cdot C \cdot \Delta h \cdot [T(m+1, 0) - T(m, 0)] = E_s + E_c + M_g + H + EL + E_{cd} \quad (2)$$

其中,t时刻 E_{cd} 的具体计算式如下:

$$E_{cd} = -\kappa \cdot \frac{\partial T}{\partial v} = -\kappa \cdot (T(0, k) - T(1, k)) / \Delta h。$$

[0040] 由于地表深度处的温度基本保持不变,故可设定地表某一深度处的边界条件为 $T(m, n) = \text{constant}$ 。该温度查当地地质资料可得,一般设置290K左右即可。计算过程中,首先设定各层的初始温度,然后根据式(2)计算得到下一时刻的地表层温度,再由(1)式计算得到下一时刻各层的温度,重复上述过程,直到各层温度趋于稳定,各层温度不再发生显著变化。计算过程中,t时刻的定标地物表面温度 T_g 与 $T(0, k)$ 相等。

[0041] 步骤S203:根据计算得到的定标地物表面温度 T_g ,通过普朗克定律计算定标地物自身辐射强度 I_g ;

自身辐射强度 I_g 为: $I_g = \varepsilon M_{\lambda_1 - \lambda_2}。$

[0042] 其中: $M_{\lambda_1 - \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_g) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T_g} - 1} d\lambda。$

[0043] λ 为波长(m),第一辐射常数 $C_1 = 3.7415 \times 10^{-16} (W / m^2)$,第二辐射常数 $C_2 = 1.8344 \times 10^{-2} (m \cdot K)$ 。

[0044] 步骤S204:通过Modtran计算获取定标地物区域红外图像成像时刻的气象条件下到达该区域的 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段的太阳热辐射强度 I_{sun} ,并根据太阳漫反射模型,计算定标地物的漫反射辐射强度分量 I_{diff} ;

地表对太阳的漫反射光强度近似地服从Lambert定律,即漫反射光的光强仅与入射光的方向和反射点处表面法向夹角的余弦成正比。由此构造出Lambert漫反射模型:

$$I_{diff} = I_{sun} \cdot K_d \cdot \cos \theta$$

$K_d (0 < K_d < 1)$ 为标定地物表面漫反射分量, θ 是入射光线的方向 \vec{L} 与物体表面该顶点法线 \vec{N} 的夹角, 或称为入射角 ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$)。Lambert漫反射模型示意图如图7所示。

[0045] 为计算方便可以用 $\cos \theta = \vec{N} \cdot \vec{L}$ 替代原式中的余弦计算, 其中 \vec{N} 为顶点的单位法向量, \vec{L} 是入射光的单位法向量, 指向为顶点指向光源。即上式变为:

$$I_{diff} = I_{sun} \cdot K_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L})$$

步骤S205: 计算单个像元所覆盖定标地物的地表范围内 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段辐射能量 E_{ob} ;

参见图8, 假设像元为受照面元, 光学系统口径面积为 dS , 像元所指向的地球表面定标物区域A, 面积为 dA , 成像面的法线与像元入射辐射方向的夹角为 φ , 定标物区域A到像元的距离为 l 。则光学系统口径相对于面源A的立体角 ω 为:

$$\omega = dS \cdot \cos \varphi / l^2$$

面辐射源A的辐射主要由其对太阳的漫反射 I_{diff} 和其自身辐射 I_{bg} 组成。

[0046] 假设定标地物为朗伯体, 若面辐射源所在平面法线 \vec{n} 与辐射方向的夹角为 β , 则像元接收到的定标地物辐射能量 E_e 为:

$$E_e = (I_{diff} + I_{bg} \cdot \cos \beta) \cdot \omega \cdot dA$$

步骤S206: 根据相机和定标地物区域中心点的经纬高 $B(Lat_b, Lon_b, H_b)$ 的几何关系, 以及大气参数计算定标地物和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} 。

[0047] 根据相机和定标地物区域中心点的经纬高 $B(Lat_b, Lon_b, H_b)$ 的几何关系, 同时输入风速、温度、日序、大气路径类型、波段等参数。其中大气路径类型由已知条件目标位置、相机位置决定, 为short Slant Path, 也即短程斜路径, 其路径示意图如图9所示, 计算得到定标区域和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} 。

[0048] 步骤S207: 在面辐射模型下, 根据定标地物和相机之间对应波段的大气透过率 τ_b 和该段路径的程辐射 E_{pathb} , 计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量 E ;

红外相机像元接收到场景辐射主成分是太阳漫反射和热辐射, 则定标区域中心点像元接收到的辐射量为:

$$E = E_g \cdot \tau_b + E_{pathb}$$

步骤S208:确定定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

假定相机的量化为线性量化,则像素灰度和辐射能量之间的变换关系可由下式表达:

$$g_b = r_0 \cdot E + r_1$$

上式中, g_b 为定标地物平均灰度值, E 为像元接收到的辐射能量, r_0 、 r_1 为系数。

[0049] 步骤S301:通过检测算法或者人工标记的方法得到在当前时刻的图像上的目标区域对应的灰度值 G_{ob} ;

步骤S302:已知目标区域中心点的经纬高 $A(Lat_s, Lon_s, H_s)$,根据相机与目标区域中心点经纬高 $A(Lat_s, Lon_s, H_s)$ 的几何关系,以及大气参数,通过Modtran计算目标与相机之间对应波段的大气透过率 τ_a 和该段路径的程辐射 E_{paths} ;

步骤S401:根据成像时刻的图像上的目标对应的灰度值 G_{ob} ,通过定标地物平均灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系计算相机像元接收到目标的辐射能量,即入瞳辐射能量 E_0 ;

计算目标像素值 G_{ob} 对应的入瞳辐射能量 E_0 。

$$E_0 = \frac{G_{ob} - r_1}{r_0}$$

[0050] 步骤S402:在点源辐射模型下,根据入瞳辐射能量 E_0 、大气透过率 τ_a 和该段路径的程辐射 E_{paths} 反演出目标的自身辐射强度 I_{ob} 。

[0051] 假定小目标在成像波段范围内的辐射强度为 $I_{ob}(W \cdot sr^{-1})$,对于小目标,可假定其为点源辐射,则传感器入瞳处接收到的目标能量为:

$$E_0 = \frac{R^2 \cdot I_{ob} \cdot \tau_a}{4d^2} + E_{paths}$$

上式中, R 为光学孔径(半径), d 为目标与传感器的距离。因此,目标的辐射强度可由下式反演得到:

$$I_{ob} = \frac{4 \cdot (G_{ob} - r_1 - r_0 \cdot E_{paths}) \cdot d^2}{r_0 \cdot R^2 \cdot \tau_a}。$$

[0052] 进一步的为了提高定标地物图像灰度与相机像元接收到辐射能量的映射关系的精确性。所述步骤S208之后还包括步骤S209:再次获取目标场景的红外图像,重新确定定标地物,返回步骤S201,直至满足预设条件,得到不同定标地物图像灰度以及其相对应相机像元接收到辐射能量,通过线性拟合获得定标地物图像灰度与相机像元接收到辐射能量的映射关系。即利用多帧图像中不同定标地物的灰度值和理论计算辐射能量,通过线性拟合获得模型参数 r_0 和 r_1 。

[0053] 本发明中的定标物沙漠的辐射计算模型的准确性直接影响目标辐射强度反演的精度,为了验证发明中沙漠地物辐射计算模型的有效性,采用Vega红外仿真软件计算相同相、气象条件下沙漠地物的辐射量,并与发明中的模型计算结果进行比较以衡量本发明中计算模型的有效性。

[0054] 验证沙漠在某一特定的时间和场景下的红外辐射反演值,操作的总体思想是首先建立沙漠模型,并设置相关的实验条件,再使用Vega软件中的SensorVision 模块求得其在红外成像中的灰度值并根据灰度值对应关系表拟合计算出相对应的辐射强度。具体步骤如下:

首先使用Creator软件建立一个沙漠的模型,由于此实验中不需要描述沙漠的起伏变化,所以只需产生一幅平面的.rgb图像作为初始的沙漠模型图像。

[0055] 利用TMM软件导入Creator产生的.rgb图像,对相应的灰度值赋材料的标记,即标定某一区域的某一灰度范围对应为沙漠材质,在TMM中选择desert sand作为此次沙漠的材质,最终生成.tmm格式的文件。

[0056] 利用Matlab软件设置红外仿真下的环境参数,包括当地时间、目标点经度和纬度、目标高度、环境温度和风速、探测波长、观测高度,并选择此次仿真需要模拟的材质desert sand,选择完成后点击生成环境参数模型,文件格式为.mat。

[0057] 进入Vega软件,导入.rgb图像、.tmm和.mat参数配置文件,设定观察者的角度。进入SensorVision模块设置相关的红外观测变量,观测辐射和反射的红外波段,完成设置后,点击仿真按钮,生成最终的图像如图10所示。

[0058] Vega仿真图像中,沙漠的灰度值约为230,根据图11的Vega仿真数据灰度值和辐射强度的对应线性映射关系计算出沙漠的辐射强度约为55W/Sr。

[0059] 实际载荷数据图像中定标的沙漠区域灰度平均值为225,利用沙漠辐射计算模型计算得到的平均辐射强度为53.5 W/Sr。

[0060] 表1 Vega仿真结果与辐射反演模型计算结果

| 类型 | Vega仿真 | 模型计算 |
|------------|--------|------|
| 灰度值 | 230 | 225 |
| 辐射强度(W/Sr) | 55 | 53.5 |

参见图12,图12为本发明提供一种无定标卫星成像目标辐射特性反演系统结构框图。

[0061] 本发明还提供了一种无定标卫星成像目标辐射特性反演系统,所述系统包括定标地物确定模块1、映射模块2、目标标记模块3和反演模块4,其中:

定标地物确定模块1,用于获取当前时刻目标场景的红外图像,确定定标地物;

映射模块2,用于获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系;

目标标记模块3,用于获得目标在图像上的灰度值;

反演模块4,用于根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。

[0062] 定标地物确定模块1获取当前时刻的目标场景的红外图像,选取场景中较为均匀、辐射特性易于理论计算的地物作为定标地物。定标地物可选择水体、沙漠等。这类地物在图像中显著而易于识别,并且其介质较为单一,为其辐射计算带来一定的便利。映射模块2获得定标地物在图像上的灰度值,计算相机像元接收到的定标地物的辐射能量,确定定标地物灰度值与相机像元接收到辐射能量的映射关系。目标标记模块3获得目标在图像上的灰度值。反演模块4根据定标地物灰度值与接收到的辐射能量的映射关系反演出目标的自身辐射强度。本发明能够在缺乏标准定标辐射源的条件下,以典型地物为辐射定标参照物对远距离小目标辐射特性进行反演。

[0063] 以上对本发明所提供的一种无定标卫星成像目标辐射特性反演方法和系统进行了详细介绍。本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的核心思想。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以对本发明进行若干改进和修饰,这些改进和修饰也落入本发明权利要求的保护范围内。

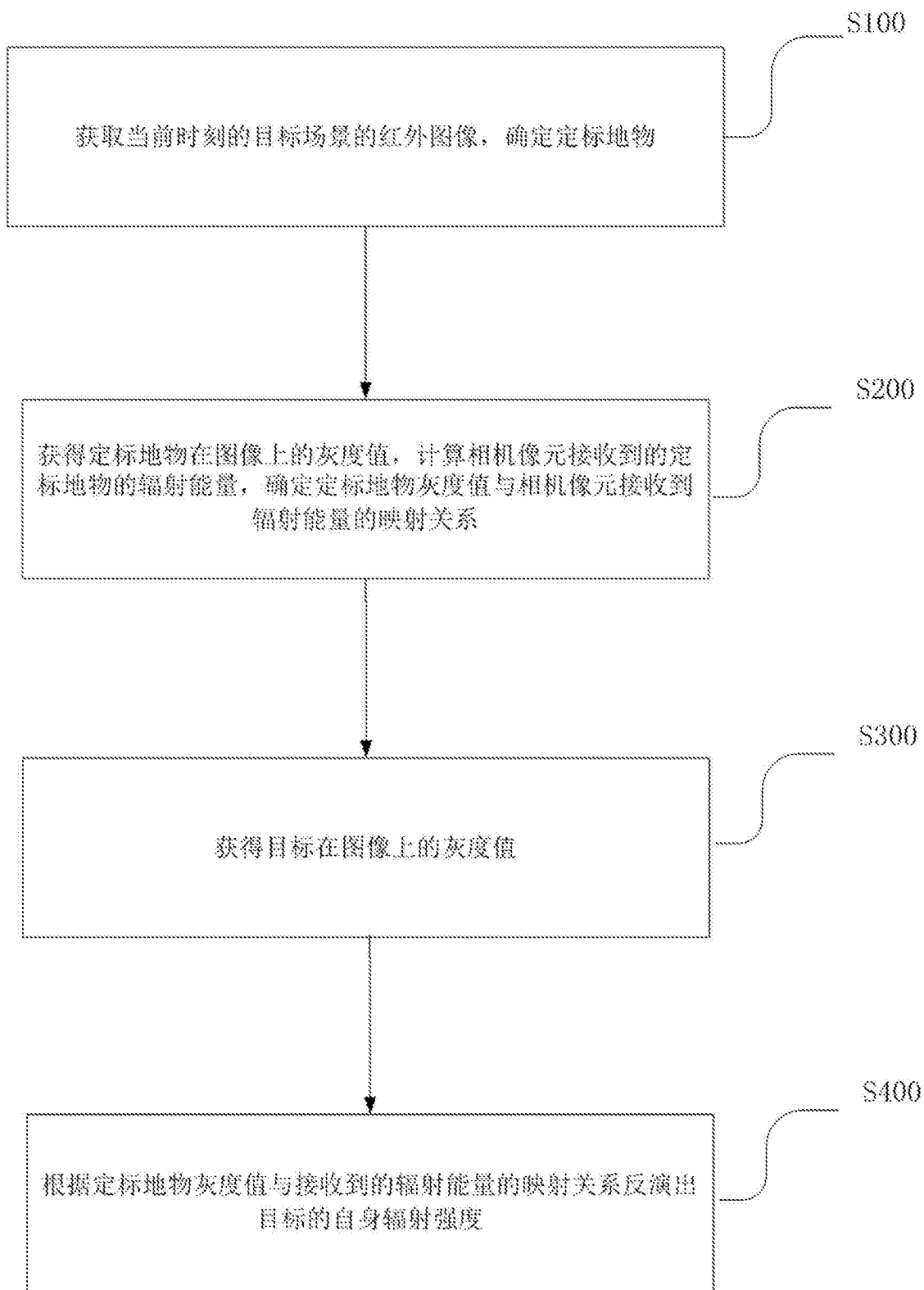


图1

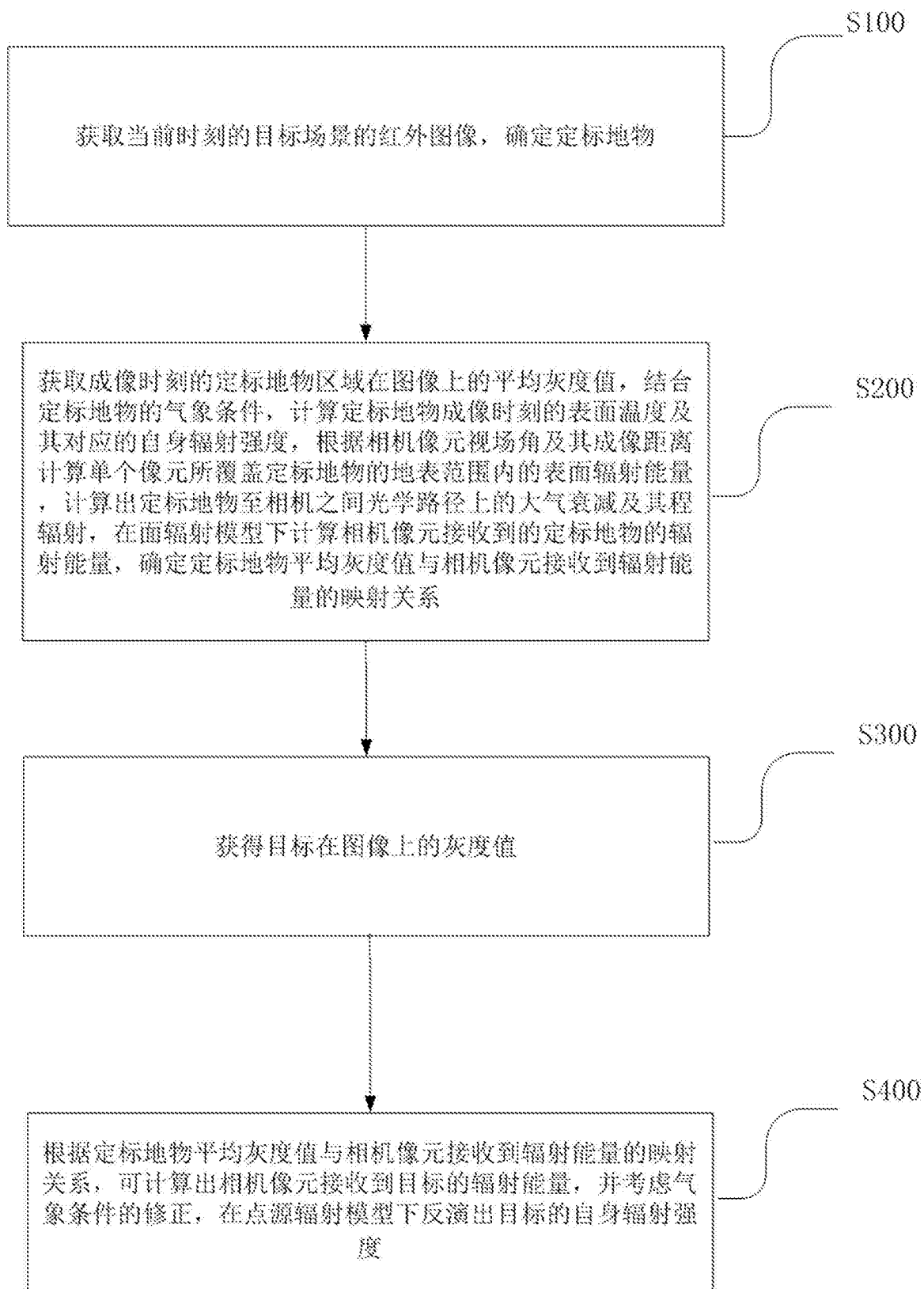


图2

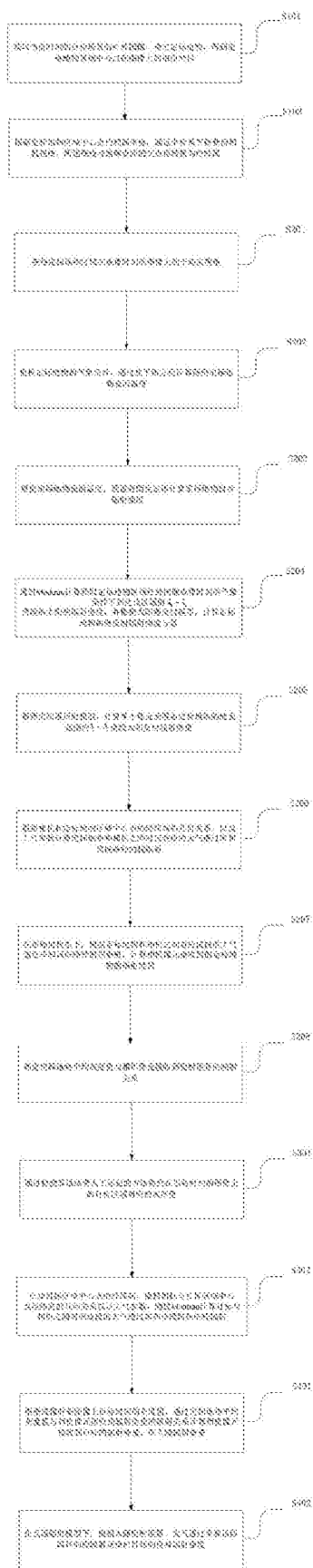


图3

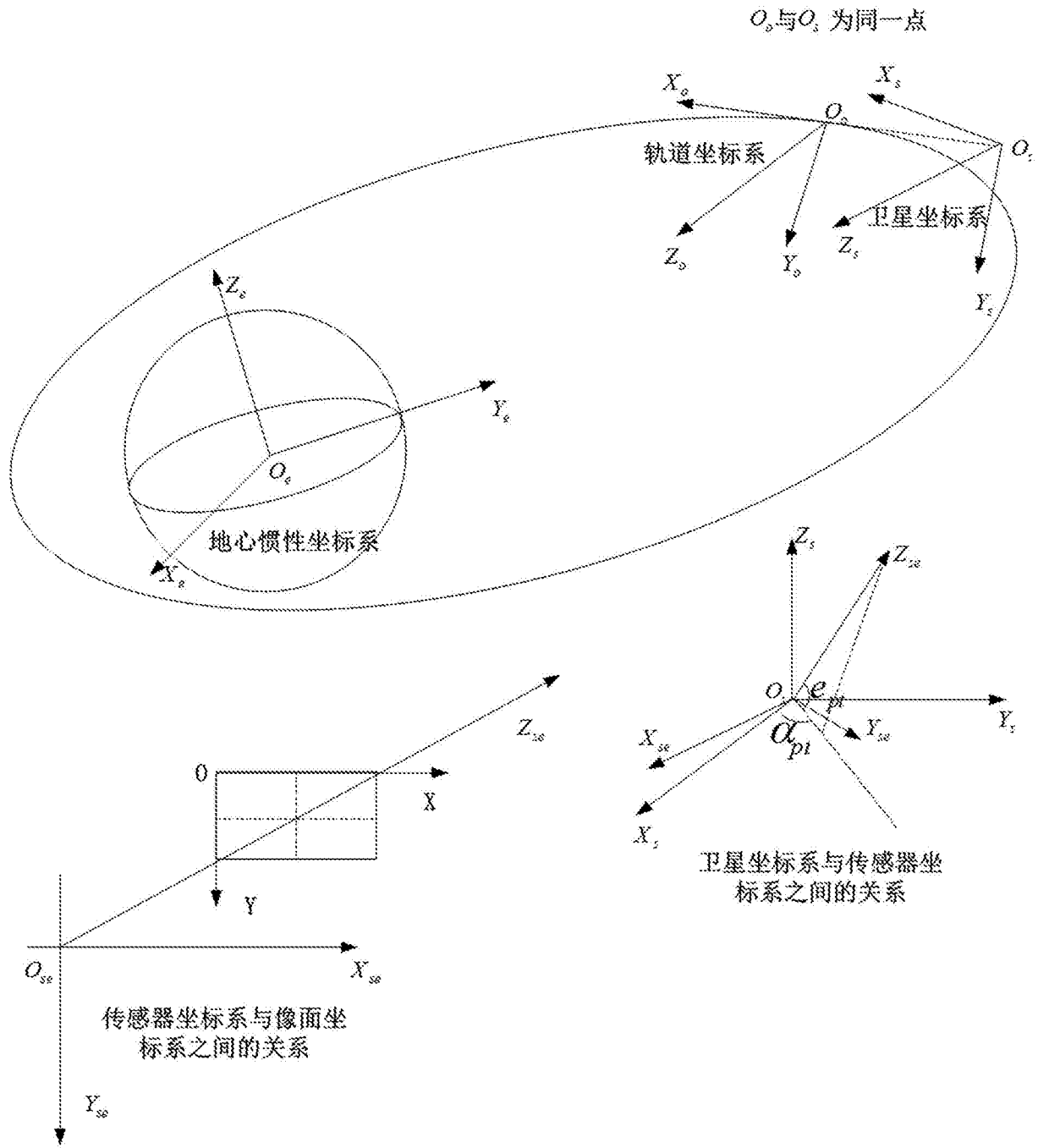


图4

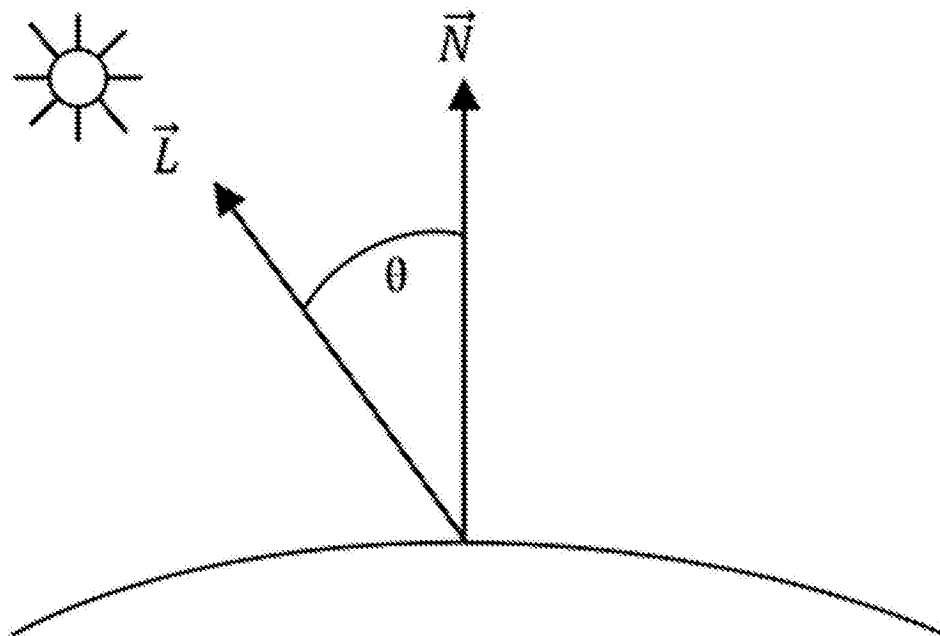


图7

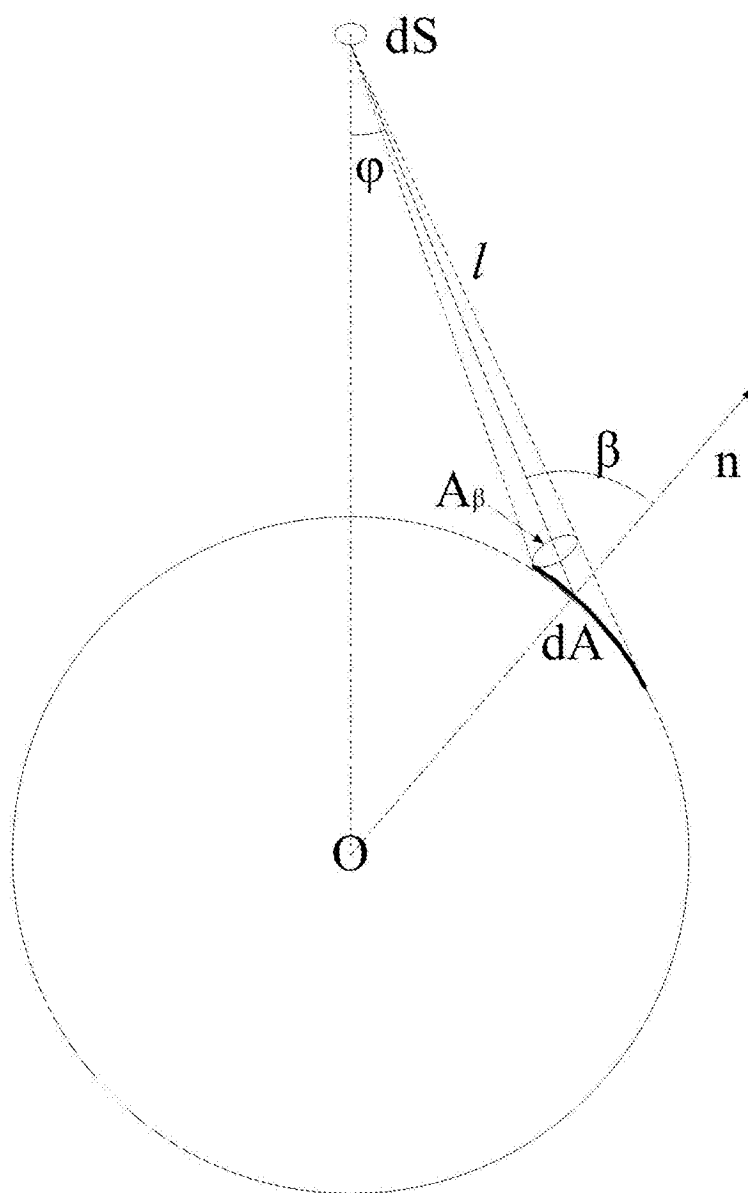


图8

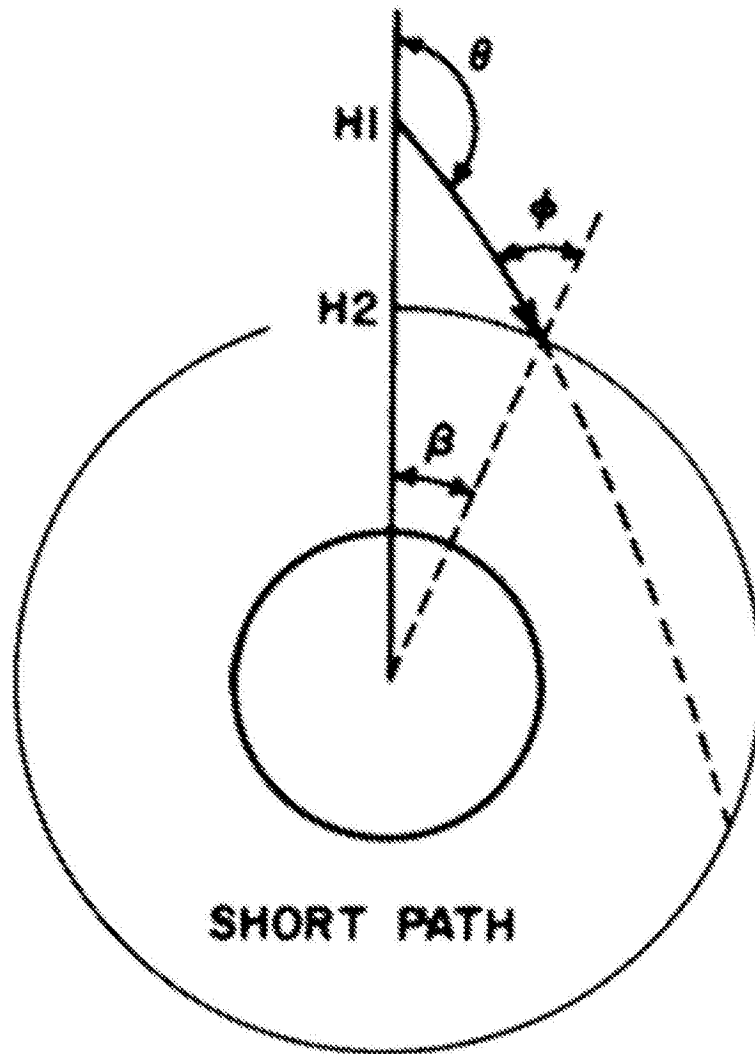


图9



图10

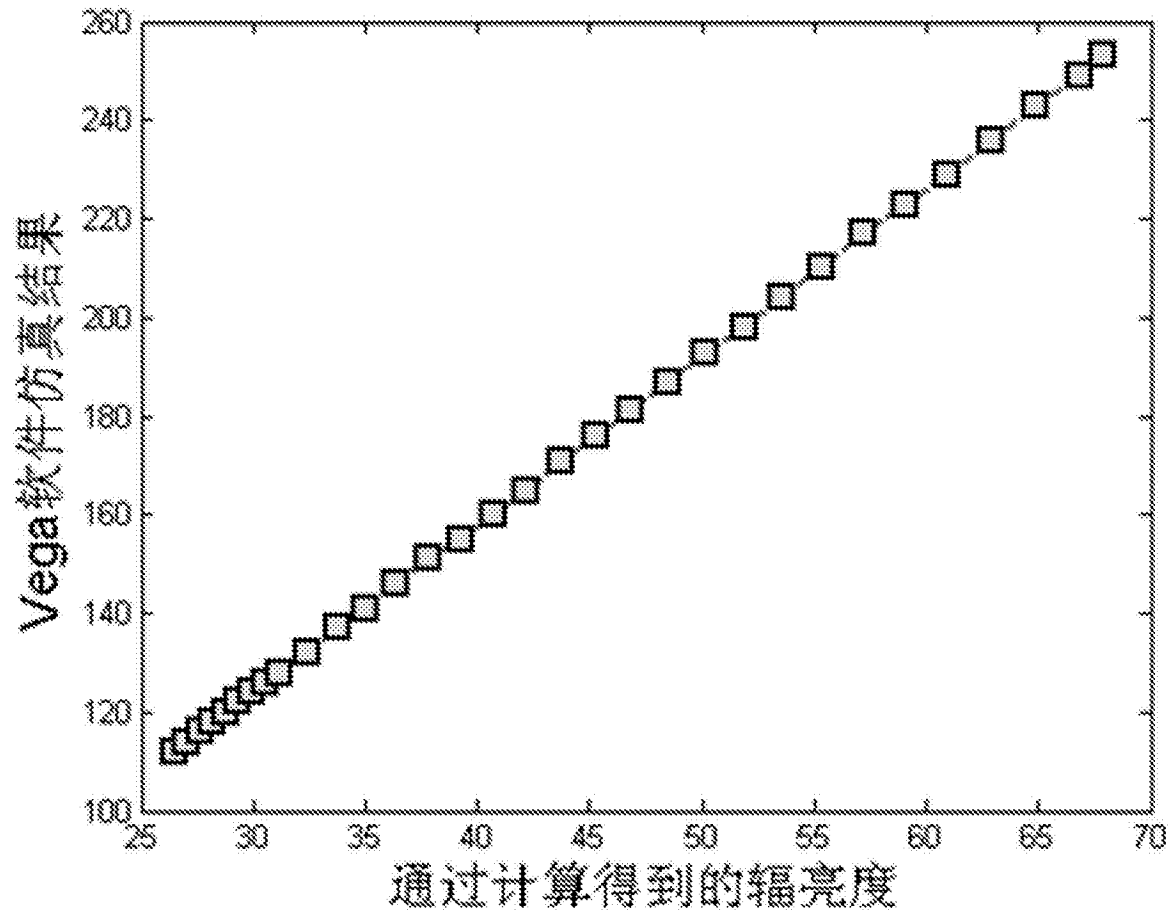


图11

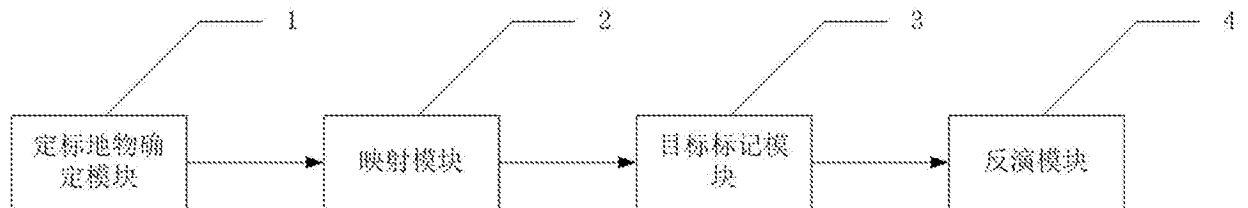


图12