



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115015260 B

(45) 授权公告日 2025. 04. 11

(21) 申请号 202111118885.1

(22) 申请日 2021.09.24

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 115015260 A

(43) 申请公布日 2022.09.06

(73) 专利权人 中国科学院国家天文台南京天文

光学技术研究所

地址 210042 江苏省南京市板仓街188号

(72) 发明人 窦江培 王子跃 赵刚

(74) 专利代理机构 南京知识律师事务所 32207

专利代理师 李湘群

(51) Int. Cl.

G01N 21/85 (2006.01)

G01N 21/84 (2006.01)

(56) 对比文件

杨峰等. “先进多孔径视宁度廓线仪数值模拟研究”. 《天文学报》. 2019, 第60卷卷(第6期期), 第51-1至51-11页.

审查员 钱亦泉

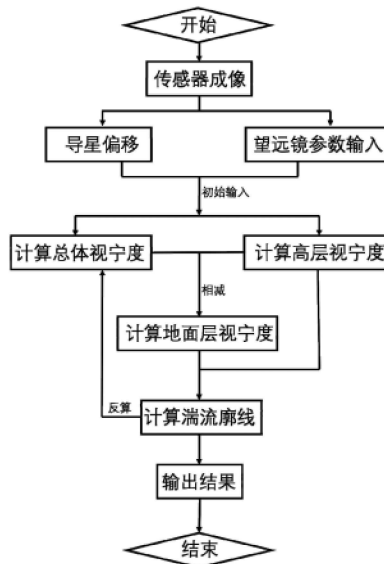
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

## (54) 发明名称

一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,其步骤包括:两台小型望远镜同时指向同一个导星区域,并保持光路共轭;采用直接成像传感器拍摄两台小型望远镜的观测图像;以两台望远镜的孔径直径、孔径间距及各个导星偏移量为初始输入,获取总体视宁度;以上述参数的方差为初始输入,获取各个大气高度分层的视宁度,并计算地面层视宁度,进而反算出各个高度大气湍流廓线。本发明使用的两台小型望远镜口径小、体积小、重量轻,方便携带;采用刚性三脚架限制两台望远镜,能有效规避相对振动误差和导向误差的影响;不需要使用波前传感器,能够有效消除夏克哈特曼波前传感器分辨率相对较低、动态范围有限、精确校准难度大等诸多缺陷。



1. 一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:采用两台小型望远镜,两台所述小型望远镜同时指向同一个导星区域,并保持光路共轭;采用直接成像传感器拍摄两台小型望远镜的观测图像,并记录两台望远镜的孔径直径、孔径间距及各个导星偏移量;以两台望远镜的孔径直径、孔径间距及各个导星偏移量为初始输入,获取总体视宁度Fried参数;以望远镜孔径直径、孔径间距、各个导星偏移量组合的方差为初始输入,通过矩阵奇异值分解及非线性最小二乘法获取各个大气高度分层的Fried参数,并计算地面层视宁度,进而反算出各个高度大气湍流廓线;

所述地面层视宁度为:

$$r_0(h_0)^{-5/3} = r_0^{-5/3} - \sum_{n=1}^{N-1} r_0(h_n)^{-5/3};$$

其中: $r_0$ 表示大气视宁度Fried参数; $r_0(h_0)$ 表示地面层视宁度数值; $r_0(h_n)$ 表示各个共轭高度下的大气视宁度;

所述总体视宁度为:

$$r_0 = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\cos\phi)^{-1} \int C_n^2(h_n) dh \right]^{-3/5};$$

其中: $\lambda$ 表示测量波长; $\phi$ 为天顶角角度; $C_n^2(h_n)$ 为大气折射率结构常数。

2. 根据权利要求1所述的一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,其特征在于,两台所述小型望远镜固定在同一刚性三脚架上。

3. 根据权利要求1所述的一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,其特征在于,步骤2中,还包括记录导星组合确定的大气视宁度分层节点的初始高度。

4. 根据权利要求1所述的一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,其特征在于,使用线性排列的导星阵列恢复大气湍流廓线。

5. 根据权利要求1所述的一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,其特征在于,选用不同角间距、不同数量的导星组合,通过改变导星组合,获得预期的垂直分辨率和最大测量高度。

## 一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于大气光学技术领域,具体涉及一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法。本发明是中国空间站工程项目“巡天望远镜系外行星成像星冕仪模块”、国家自然科学基金天文联合重点支持项目“用于大口径拼接镜面望远镜的系外行星高对比度成像关键技术研究”(U2031210)、国家重大科研仪器研制项目“围绕暗弱恒星的太阳系外行星高对比度成像探测器研制”(11827804)、国家自然科学基金面上项目“基于差分图像运动的便携式多孔径日间大气湍流廓线测量技术研究”(11873068)的成果。

### 背景技术

[0002] 观测大气湍流廓线的测量对于评估天文台址至关重要,因此,对大气湍流结构常数 $C_n^2(h_n)$ 作为高度的函数的研究对于未来自适应光学和多层共轭自适应光学性能估计和优化变得越来越重要。而大气视宁度 $r_0$ 是评价大气湍流特性的重要参数,可以通过测量各个湍流层的视宁度数值,反算出该高度下大气折射率结构常数 $C_n^2(h_n)$ 。

[0003] 随着大气湍流的垂直分布对于现有自适应光学和多层共轭自适应光学越来越重要,许多方法应运而生。目前测量大气视宁度最为流行的方法主要包括:(1)差分图像运动视宁度监测法,基于位于同一望远镜的两个子孔径观测同一恒星,用于测量总体视宁度。但是不具备得到分层的大气湍流廓线分辨率。(2)日间差分图像运动视宁度监测类似法,该技术被用在美国大熊湖天文台1.6米新太阳望远镜上,然而,该方法借助的新太阳望远镜是口径为1.6米的大口径太阳望远镜,这对于没有大型太阳望远镜设备的新台址来说是不现实的。(3)先进多子孔径日间视宁度监测法,该技术尽管可以使用两台望远镜,但其使用与日间差分图像运动视宁度监测类似法的算法,又为消除地面振动引入抖动消除优化算法,使得无法测量地面层大气视宁度。均不能满足同时获得分层大气(包括地面湍流层)及总体视宁度参数值的要求。

### 发明内容

[0004] 为了至少克服:(1)使用大型望远镜的不便携性;(2)无法获得总体视宁度;(3)无法获得包括地面层在内的各分层大气湍流层视宁度参数,其中一种缺陷,本发明提供一种装置更便携、同时获得总体视宁度和各分层大气视宁度参数的方法,本发明方法提出一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,通过对太阳不同角间距的造粒导星作为初始输入,得到除地面层外其余高层大气分层视宁度,并结合单个导星作为初始输入,得到总体视宁度,通过总体视宁度与分层视宁度的运算关系得到地面层视宁度参数。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0006] 一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,该方法包括如下步骤:

[0007] 步骤1、采用两台小型望远镜,两台所述小型望远镜同时指向同一个导星区域,并保持光路共轭;

[0008] 步骤2、采用直接成像传感器拍摄两台小型望远镜的观测图像,并记录两台望远镜

的孔径直径、孔径间距及各个导星偏移量；

[0009] 步骤3、以两台望远镜的孔径直径、孔径间距及各个导星偏移量为初始输入，获取总体视宁度Fried参数；

[0010] 步骤4、以望远镜孔径直径、孔径间距、各个导星偏移量组合的方差为初始输入，通过矩阵奇异值分解及非线性最小二乘法获取各个大气高度分层的Fried参数，并计算地面层视宁度，进而反算出各个高度大气湍流廓线。

[0011] 进一步的，两台所述小型望远镜固定在同一刚性三脚架上。

[0012] 进一步的，步骤2中，还包括记录导星组合确定的大气视宁度分层节点的初始高度。

[0013] 进一步的，使用线性排列的导星阵列恢复大气湍流廓线。

[0014] 进一步的，选用不同角间距、不同数量的导星组合，通过改变导星组合，获得预期的垂直分辨率和最大测量高度。

[0015] 进一步的，步骤4中，所述地面层视宁度为：

$$[0016] \quad r_0(h_0)^{-5/3} = r_0^{-5/3} - \sum_{n=1}^{N-1} r_0(h_n)^{-5/3}$$

[0017] 其中： $r_0$ 表示大气视宁度Fried参数； $r_0(h_0)$ 表示地面层视宁度数值； $r_0(h_n)$ 表示各个共轭高度下的大气视宁度。

[0018] 进一步的，步骤4中，所述总体视宁度为：

$$[0019] \quad r_0 = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\cos\phi)^{-1} \int C_n^2(h_n) dh \right]^{-3/5}$$

[0020] 其中： $\lambda$ 表示测量波长； $\phi$ 为天顶角角度； $C_n^2(h_n)$ 为大气折射率结构常数。

[0021] 与现有技术相比，本发明的有益效果是：

[0022] (1) 本发明采用两架小型望远镜，使用线性排列的导星阵列恢复大气湍流廓线，且可以选用任何不同角间距且任何数量的导星组合，通过改变导星组合，本发明的方法可以获得良好的垂直分辨率和令人满意的最大测量高度。

[0023] (2) 本发明的方法中两个望远镜是共同固定在同一个刚性三脚架上，这个装置限制着两台望远镜同时指向同一个导星区域，并保持光路共轭，能够有效规避传统方法中的相对振动误差和导向误差的影响。本发明的方法可以省略额外测量总体视宁度的步骤。

[0024] (3) 本发明的方法不需要使用夏克哈特曼波前传感器，这可以有效地消除其分辨率相对较低、动态范围有限、精确校准难度大等缺点。

[0025] (4) 两台小型望远镜口径小、体积小、重量轻，使得本发明的仪器携带更加方便。考虑到潜在天文台址不具备大型望远镜设备，甚至现有的大型望远镜很难申请大量的观测时间，本发明的方法便携、经济且有效。

[0026] (5) 本发明不需要添加新的硬件设备，不改变现有光路结构，可以充分利用现有望远镜设备，实用性强。

### 附图说明

[0027] 图1为双小型望远镜系统及光路示意图；

[0028] 图2为三角测量法光路共轭标高示意图；

[0029] 图3为本发明一种双小型望远镜测量分层大气视宁度方法流程图；

[0030] 图中标记:1、光源波前;2、小型望远镜;3、折返射式光学结构;4、刚性脚手架;5、成像传感器;6、图像处理及恢复系统。

### 具体实施方式

[0031] 下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

[0032] 如图3所示,本实施例一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法包括如下步骤:

[0033] 步骤1:所述方法基于如图1所示的光学系统,该光学系统包括光源波前1、小型望远镜2、折返射式光学结构3、刚性脚手架4、成像传感器5、图像处理及恢复系统6。两台小型望远镜2固定在同一刚性三脚架4上,刚性三脚架4限制着两台小型望远镜2同时指向同一个导星区域,并保持光路共轭。图2是三角测量法光路共轭标高示意图。

[0034] 步骤2:记录成像传感器5拍摄的两台小型望远镜2观测图像,记录两台望远镜孔径直径、孔径间距,记录各个导星偏移量,记录导星组合确定的大气视宁度分层节点的初始高度。

[0035] 步骤3:以望远镜孔径直径、孔径间距、各个导星偏移量为初始输入,获取总体视宁度Fried参数,用 $r_0$ 表示。

[0036] 当两台望远镜同时指向同一颗导星,此时该方法转换为传统的差分图像运动监测法,可以测量总体大气视宁度。当两台望远镜指向不同导星组合,此时该方法可以测量除地面层外高空的大气视宁度Fried参数,对应高度的数值用 $r_0(h_n)$ 表示。

[0037] 步骤4:以望远镜孔径直径、孔径间距、各个导星偏移量组合的方差为初始输入,通过矩阵奇异值分解及非线性最小二乘法获取各个大气高度分层的Fried参数,并计算地面层视宁度,进而反算出各个高度大气湍流廓线。

[0038] 对于N层大气湍流,地面层视宁度数值表示为 $r_0(h_0)$ ,高层大气视宁度数值依次表示为 $r_0(h_1) \sim r_0(h_{N-1})$ ,总体视宁度与各层视宁度的关系表述为:

$$[0039] \quad r_0^{-5/3} = \sum_{n=0}^{N-1} r_0(h_n)^{-5/3} \quad (1)$$

[0040] 当获得总体视宁度和高层视宁度数值后,即可通过相减求的地面层视宁度数值。表述为:

$$[0041] \quad r_0(h_0)^{-5/3} = r_0^{-5/3} - \sum_{n=1}^{N-1} r_0(h_n)^{-5/3} \quad (2)$$

[0042] 大气折射率结构常数 $C_n^2(h_n)$ 与大气视宁度的关系为:

$$[0043] \quad r_0(h_n) = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\cos\phi)^{-1} C_n^2(h_n) dh \right]^{-3/5} \quad (3)$$

[0044] 得到各个湍流层大气的Fried参数 $r_0(h_n)$ 即可求得各高度下的大气折射率结构常数,进而可以获得大气湍流廓线。

[0045] 其中, $\phi$ 为天顶角角度。由上述公式亦可反算得到总体视宁度

$$[0046] \quad r_0 = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\cos\phi)^{-1} \int C_n^2(h_n) dh \right]^{-3/5} \quad (4)$$

[0047] 本实施例中,具体采用两个口径直径为10厘米的小型望远镜,共同固定在同一个刚性三脚架上,两者间距40厘米。通过适用于自适应光学系统仿真的专业光学软件YAO生成四个太阳造粒导星和高度分别为0千米、3千米、8千米、12千米的四层薄层大气。仿真四层大气的强度比值分别为0.4、0.3、0.2、0.1。成像传感器采集图像帧数为200帧。

[0048] 根据步骤(2)-(4)的方法,可以计算得到四层大气湍流被精准的反算出,误差很小。证明本发明的方法可以有效且准确的分辨大气分层视宁度。输入与输出的结果对比与误差如表1。

[0049] 表1输入与该方法输入结果对比

大气湍流高度(千米)	输入湍流层强度(权重)	输出湍流层强度(权重)	相对误差
0-12	1.0	1.0	0
0	0.4	0.43	3%
3	0.3	0.26	4%
8	0.2	0.17	3%
12	0.1	0.14	4%

[0051] 本发明的方法可以获得良好的垂直分辨率和令人满意的最大测量高度。本发明的实例演示了恢复四层大气的过程,有效恢复精度优于4%。还可以增加任意导星数量,以获得更高的垂直分辨率,不仅仅局限于实例中的四层大气湍流。实例证明本发明提出的一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法有效且精确,可以替代过去大型望远镜才可以实现的视宁度分层测量,可以同时求得地面层、高层已经总体视宁度,可以不使用传统的夏克哈特曼传感器,避免了由传感器本身缺陷引起的计算误差。

[0052] 综上所述,本发明一种基于双小型望远镜测量分层大气视宁度的方法,使用有一定间距的两个小型望远镜的组合测量大气视宁度与大气湍流廓线,通过选取不同角间距的太阳米粒结构中的小区域作为导星,根据三角测量原理可以测得相应高度的湍流强度。在具体计算中,首先通过计算求得不同导星偏移量的方差,之后通过恢复算法,求得不同高度的Fried参数,最后获得湍流廓线。该方法区别于传统单个望远镜测量视宁度的方法,两台小型望远镜口径小、体积小、重量轻,使得本发明的仪器携带更加方便。此外,本发明的方法不需要使用夏克哈特曼波前传感器,这可以有效地消除其分辨率相对较低、动态范围有限、精确校准难度大等缺点,实用性强。

[0053] 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。

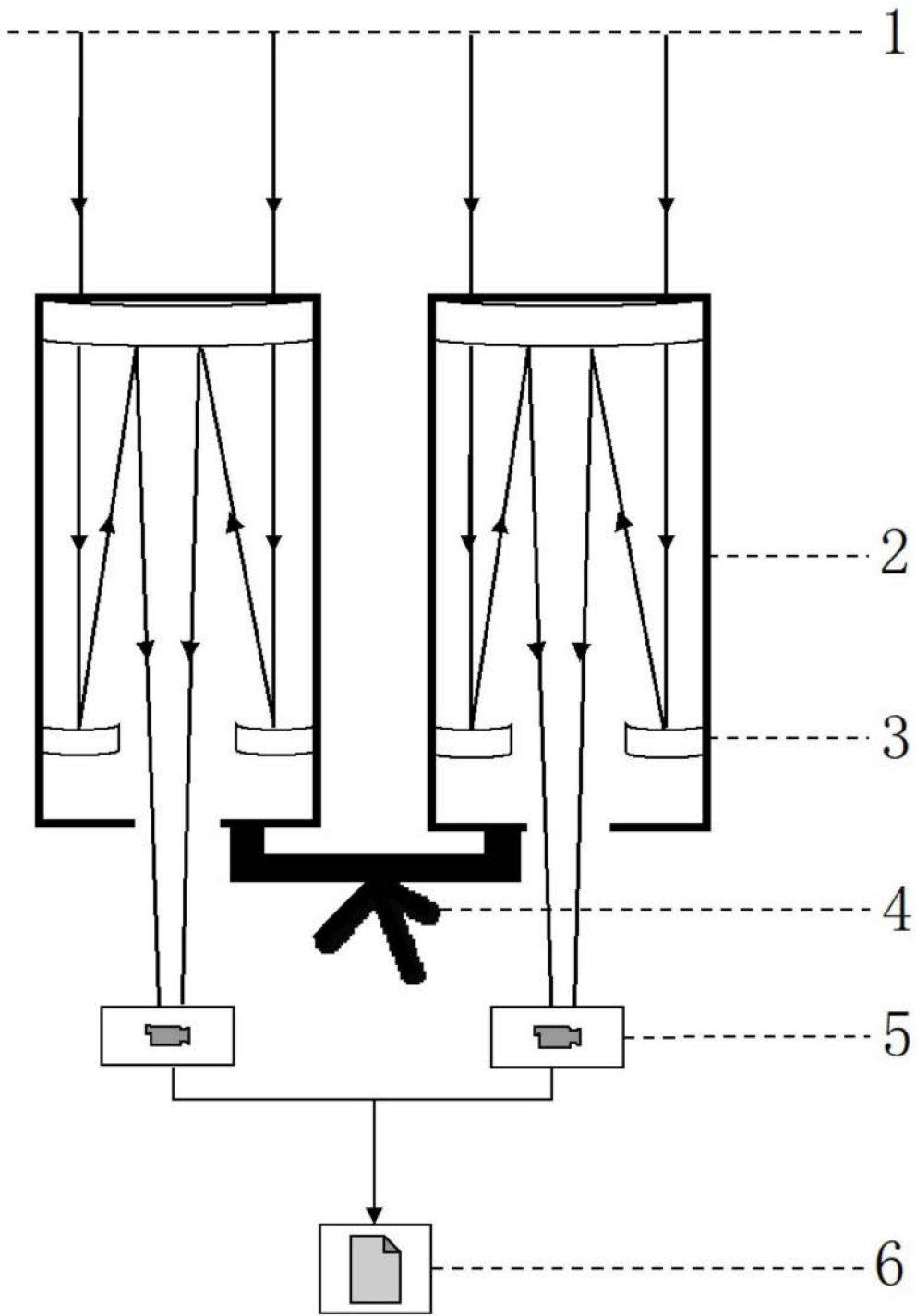


图1

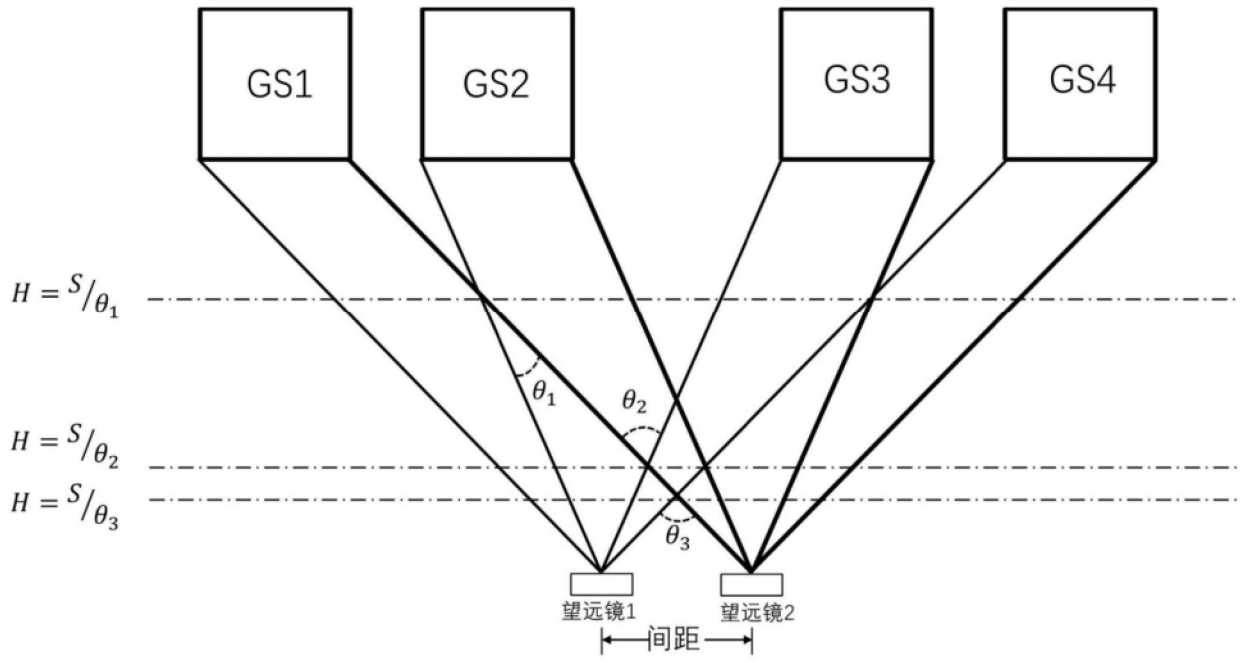


图2

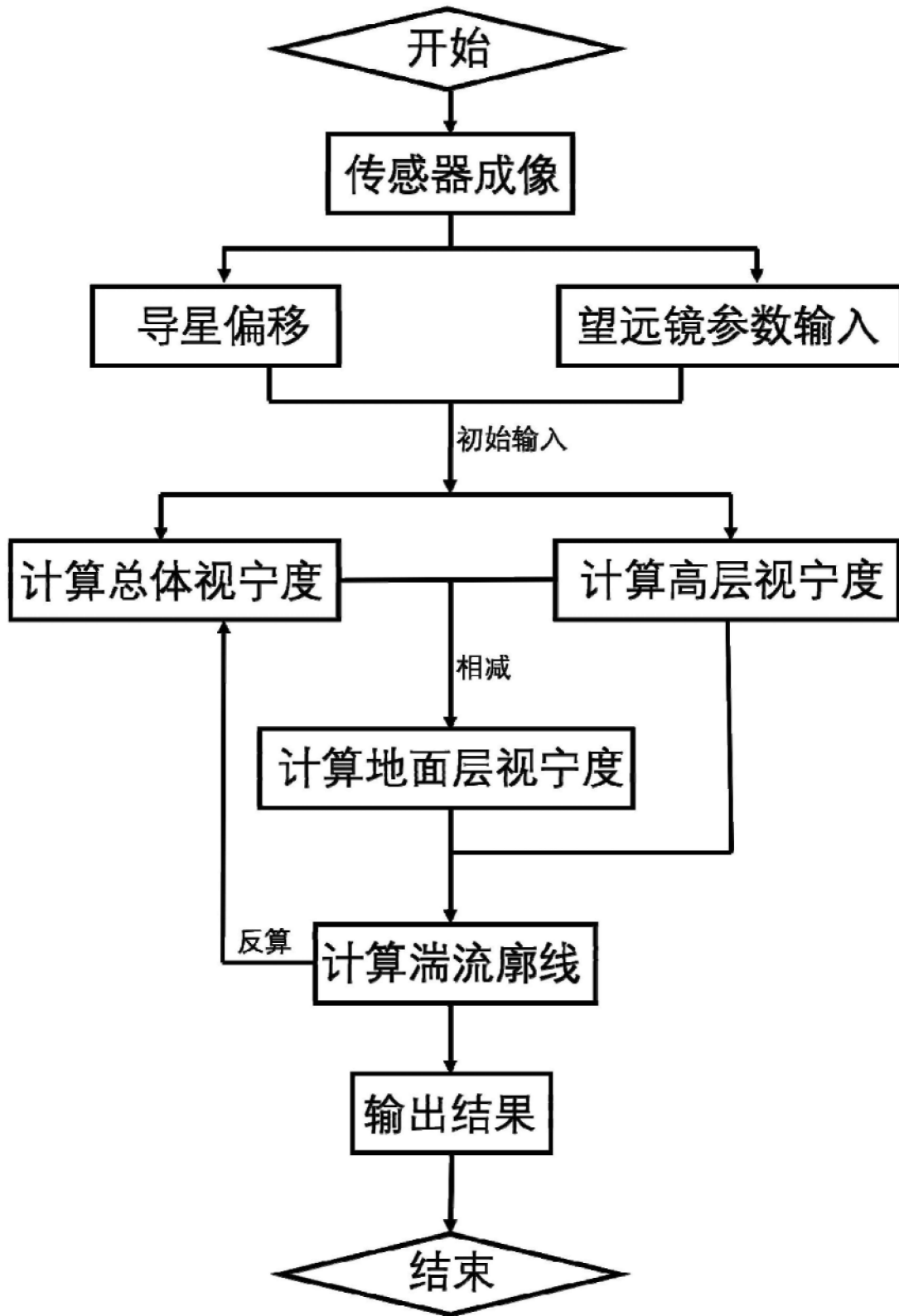


图3