(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 118494792 B
(45)授权公告日 2025.02.14

(21)申请号 202410411929.7
(22)申请日 2024.04.08
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 118494792 A
(43)申请公布日 2024.08.16
(73)专利权人 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院
地址 100041 北京市石景山区双园路11号
(72)发明人 李培林 刘乘源 马天琦 刘冰 张浩田 郭冠如 杨新华
(74)专利代理机构 工业和信息化部电子专利中心 11010
专利代理师 焉明涛
(51)Int.Cl.
*B64G 3/00*(2006.01)
*G06T 7/246*(2017.01)
*G06T 7/80*(2017.01)
*G06T 7/73*(2017.01)
*G06V 10/62*(2022.01)
(56)对比文件
CN 107529385 B,2013.02.27
CN 116027447 A,2023.04.28
审查员 郑硕

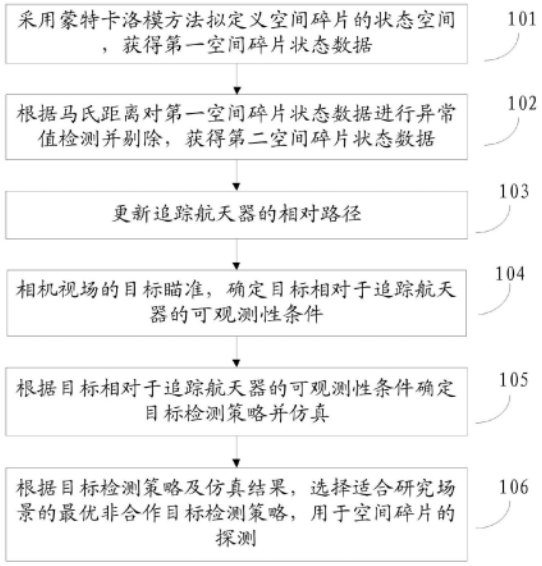
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54)发明名称

基于概率密度分布的空间碎片的探测方法、装置及设备

(57)摘要

本发明提出了一种基于概率密度分布的空间碎片的探测方法、装置、设备及计算机介质,该探测方法包括如下步骤:采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态;根据马氏距离进行异常值检测并剔除;更新追踪航天器的相对路径;相机视场的目标瞄准,确定目标相对于追踪航天器的可观测性条件;确定目标检测策略并仿真;选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。本发明基于状态概率密度分布,对非合作目标的探测策略,考虑追踪航天器与目标的相对位置关系、姿态关系,提出三种目标探测策略:同轨、高轨及低轨追踪探测策略,展现出良好工程应用潜力,为追踪航天器主动接近段的导航控制打下基础。




CN 118494792 B

1.基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,包括如下步骤:

采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,获得第一空间碎片状态数据;

根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除,获得第二空间碎片状态数据;

更新追踪航天器的相对路径;

相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件;

根据所述可观测性条件确定目标检测策略并仿真;

根据所述目标检测策略及仿真结果,选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。

2.根据权利要求1所述的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,

所述采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,具体包括:

通过蒙特卡洛方法模拟建立反映空间碎片在实际环境中的分布和动态特性的空间模型,通过如下公式实现:

$x_i = N(\mu, \Sigma)$

式中,$x_i$表示样本点的状态量,N表示正态分布,μ表示中心点,Σ表示协方差矩阵。

3.根据权利要求1所述的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,

所述根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测,具体包括:

采用马氏距离Δ通过如下公式进行判别:

$\Delta^2 = (x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)$

式中,考虑各维度的相关性,Δ表示状态量x相对于中心点μ的距离;基于此,Δ定义了一个距中心点概率相等的椭球,其数值为:

$P(\Delta < q_\alpha) \geq \alpha$,

式中,α为给定的位于椭球体中的个体总数的一部分占总数的比率。

4.根据权利要求1-3任一项所述的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,

更新追踪航天器的相对路径,具体包括如下步骤:

建立追踪航天器的姿态动力学模型;

根据蒙特卡洛方法生成目标的相对位置;

状态外推与坐标转换:利用高精度外推模型,将所述相对位置从相对坐标系转换到惯性坐标系下;

相机坐标系转换:将所述目标相对于追踪航天器的方向矢量转换到相机的参考系下。

5.根据权利要求4所述的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,

所述建立追踪航天器的姿态动力学模型,具体包括:

采用四元数方程描述所述追踪航天器的姿态动力学模型,定义其初始姿态四元数和角速度分别为$q_{JC}$和$w_{JC}$,相应的动力学模型为:

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{JC} = \frac{1}{2}\Omega(\boldsymbol{q}_{JC})\boldsymbol{w}_{JC}$$

所述根据蒙特卡洛方法生成目标的相对位置,具体包括:

给定估计的目标位置$\boldsymbol{r}_T^0$、速度$\boldsymbol{v}_T^0$,则蒙特卡洛方法产生的随机初始状态为:

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{r}_T^0 + \boldsymbol{A}_{HJ}^T \Delta \boldsymbol{r}_i$$

$$\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{v}_T^0 + \boldsymbol{A}_{HJ}^T \Delta \boldsymbol{v}_i$$

式中,记$\boldsymbol{x}_i = \left(\Delta \boldsymbol{r}_i^T, \Delta \boldsymbol{v}_i^T\right)^T$为相对坐标系下校正的状态偏量。

6.根据权利要求1-3任一项所述的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,

相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件,具体包括如下步骤:

给定从所述追踪航天器看向所述目标的相对位置$\Delta r_i^C(t)$,检测所述相对位置是否位于所述追踪航天器相机的视场内;

在相机光圈完全打开状态下,视场角记为β,可进行目标探测的最小和最大距离分别记为$d_{min}$和$d_{max}$,累积所需的目标识别时间为$\Delta t_r$,对每一时间更新,通过下面的判断方法进行目标可观测性检测:

当$x_i \geq 0$,目标位于追踪航天器$x^C$轴前方;

当$d_{min} \leq r_i \leq d_{max}$,目标位于相对于追踪航天器的距离范围;

当$\left|\tan^{-1}\frac{y_i}{x_i}\right| \leq \frac{\beta}{2}$,目标位于相对于追踪航天器$y^C$轴方向的视场;

当$\left|\tan^{-1}\frac{z_i}{x_i}\right| \leq \frac{\beta}{2}$,目标位于相对于追踪航天器$z^C$轴方向的视场;

其中,xi,yi和zi是$\Delta r_i^C(t)$的三轴分量,ri是$\Delta r_i^C(t)$的2范数。

7.根据权利要求1所述的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,其特征在于,

所述目标检测策略包括:同轨追踪探测策略、高轨追踪探测策略和低轨追踪探测策略;

所述同轨追踪探测策略定义为追踪航天器与目标航天器位于同一轨道上的不同真近点角上,并令追踪航天器位于目标航天器的后方,即在以目标质心建立的相对坐标系中速度方向的相对位置矢量$\Delta r_v \leq 0$;

所述高轨追踪探测策略定义为追踪航天器位于比目标航天器的轨道高的轨道上运行,即在以目标为中心建立的相对坐标系中径向矢量方向的相对位置矢量$\Delta r_R \geq 0$;

所述低轨追踪探测策略是追踪航天器在一个较低的轨道上对在航天器前方的目标航天器进行跟踪。

8.一种基于概率密度分布的空间碎片的探测装置,其特征在于,包括:

数据获取模块,用于采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,获得第一空间碎片状态数据;

数据处理模块,用于根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除,获得第二空间碎片状态数据;

路径更新模块,用于更新追踪航天器的相对路径;

目标瞄准模块,用于相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件;

目标检测策略及仿真模块,用于根据所述可观测性条件确定目标检测策略并仿真;

最优非合作目标检测策略确定模块,用于根据所述目标检测策略及仿真结果,选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。

9.一种电子设备,其特征在于,所述电子设备包括:存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述计算机程序被所述处理器执行时实现如权利要求1至7中任一项所述基于概率密度分布的空间碎片的探测方法的步骤。

10.一种计算机存储介质,其特征在于,所述计算机存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至7中任一项所述基于概率密度分布的空间碎片的探测方法的步骤。

# 基于概率密度分布的空间碎片的探测方法、装置及设备

## 技术领域

[0001] 本发明涉及空间碎片检测技术领域,尤其涉及一种基于概率密度分布的空间碎片的探测方法、装置及设备。

## 背景技术

[0002] 随着人类空间活动的增加,失效的航天器数量不断增多,它们成为空间碎片的主要来源之一,失效航天器长期滞留过程中,地面难以对其行为进行干预,相互之间的碰撞将导致空间碎片的急剧增加,对航天器的寿命和安全带来了严重威胁。因此,为管理和减少空间碎片,需进行空间碎片清理,通常通过追踪航天器(移除卫星)捕获碎片、将其移出有用轨道并清除或清理处置。在这一过程中,配备专用设备的追踪航天器需要靠近碎片目标。

[0003] 发明人所知的探测方法中,如两行轨道根数(TLE/SGP4)方法,虽然能够初步预测非合作(即不响应指令或失去控制)目标的轨道信息,但对于无动力的空间碎片而言,由于无动力碎片更容易受到环境效应的影响,因此存在一定的精度误差。再加上追踪航天器上的观测设备(相机)为有限视场,在执行主动相对接近前,必须确保航天器能够朝着正确的目标碎片机动,因此需要对非合作目标在复杂空间环境下通过相机对目标进行探测,需要更为优化的探测方法及策略。

## 发明内容

[0004] 本发明提供一种基于概率密度分布的空间碎片的探测方法、装置、设备及存储介质,解决了对非合作目标在复杂空间环境下通过相机对目标进行更精确的探测的问题。

[0005] 为达到上述目的,本申请采用如下技术方案:

[0006] 第一方面,提供一种基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,包括如下步骤:

[0007] 采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,获得第一空间碎片状态数据;

[0008] 根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除,获得第二空间碎片状态数据;

[0009] 更新追踪航天器的相对路径;

[0010] 相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件;

[0011] 根据所述可观测性条件确定目标检测策略并仿真;

[0012] 根据所述目标检测策略及仿真结果,选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。

[0013] 在第一方面的第一种可能的实现方式中,所述采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,具体包括:

[0014] 通过蒙特卡洛方法模拟建立反映空间碎片在实际环境中的分布和动态特性的空间模型,通过如下公式实现:

[0015] $x_i = N(\mu, \Sigma)$

[0016] 式中,$x_i$表示样本点的状态量,N表示正态分布,$\mu$表示中心点,$\Sigma$表示协方差矩阵。

[0017] 基于第一方面的上述任意一种可能的实现方式,在第一方面的第二种可能的实现方式中,所述根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测,具体包括:

[0018] 采用马氏距离Δ通过如下公式进行判别:

[0019] $\Delta^2=(x-\mu)^T\Sigma^{-1}(x-\mu)$

[0020] 式中,考虑各维度的相关性,Δ表示状态量x相对于中心点μ的距离;基于此,Δ定义了一个距中心点概率相等的椭球,其数值为:

[0021] $P(\Delta<q_\alpha)\geq\alpha$,

[0022] 式中,α为给定的位于椭球体中的个体总数的一部分占总数的比率。

[0023] 基于第一方面的上述任意一种可能的实现方式,在第一方面的第三种可能的实现方式中,更新追踪航天器的相对路径,具体包括如下步骤:

[0024] 建立追踪航天器的姿态动力学模型;

[0025] 根据蒙特卡洛方法生成目标的相对位置;

[0026] 状态外推与坐标转换:利用高精度外推模型,将所述相对位置从相对坐标系转换到惯性坐标系下;

[0027] 相机坐标系转换:将所述目标相对于追踪航天器的方向矢量转换到相机的参考系下。

[0028] 基于第一方面的上述第三种可能的实现方式,在第一方面的第四种可能的实现方式中,所述建立追踪航天器的姿态动力学模型,具体包括:

[0029] 采用四元数方程描述所述追踪航天器的姿态动力学模型,定义其初始姿态四元数和角速度分别为$q_{JC}$和$w_{JC}$,相应的动力学模型为:

[0030] $$\dot{\boldsymbol{q}}_{JC}=\frac{1}{2}\Omega\left(\boldsymbol{q}_{JC}\right)\boldsymbol{w}_{JC}$$

[0031] 所述根据蒙特卡洛方法生成目标的相对位置,具体包括:

[0032] 给定估计的目标位置$\boldsymbol{r}_T^0$、速度$\boldsymbol{v}_T^0$,则蒙特卡洛方法产生的随机初始状态为:

[0033] $$\boldsymbol{r}_i=\boldsymbol{r}_T^0+\boldsymbol{A}_{HJ}^T\Delta\boldsymbol{r}_i$$

[0034] $$\boldsymbol{v}_i=\boldsymbol{v}_T^0+\boldsymbol{A}_{HJ}^T\Delta\boldsymbol{v}_i$$

[0035] 式中,记$\boldsymbol{x}_i=\left(\Delta\boldsymbol{r}_i^T,\Delta\boldsymbol{v}_i^T\right)^T$为相对坐标系下校正的状态偏量。

[0036] 基于第一方面的第四种可能的实现方式,在第一方面的第五种可能的实现方式中,相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件,具体包括如下步骤:

[0037] 给定从所述追踪航天器看向所述目标的相对位置$\Delta r_i^C(t)$,检测所述相对位置是否位于所述追踪航天器相机的视场内;

[0038] 在相机光圈完全打开状态下,视场角记为β,可进行目标探测的最小和最大距离分别记为$d_{min}$和$d_{max}$,累积所需的目标识别时间为$\Delta t_r$,对每一时间更新,通过下面的判断方法进行目标可观测性检测:

[0039] 当$x_i\geq0$,目标位于追踪航天器$x^C$轴前方;

[0040] 当$d_{min}\leq r_i\leq d_{max}$,目标位于相对于追踪航天器的距离范围;

[0041] 当$\left|\tan^{-1}\frac{y_i}{x_i}\right| \leq \frac{\beta}{2}$,目标位于相对于追踪航天器$y^C$轴方向的视场;

[0042] 当$\left|\tan^{-1}\frac{z_i}{x_i}\right| \leq \frac{\beta}{2}$,目标位于相对于追踪航天器$z^C$轴方向的视场;

[0043] 其中,xi,yi和zi是$\Delta r_i^C(t)$的三轴分量,ri是$\Delta r_i^C(t)$的2范数。

[0044] 基于第一方面的上述任意一种可能的实现方式,在第一方面的第六种可能的实现方式中,所述目标检测策略包括:同轨追踪探测策略、高轨追踪探测策略和低轨追踪探测策略;

[0045] 所述同轨追踪探测策略定义为追踪航天器与目标航天器位于同一轨道上的不同真近点角上,并令追踪航天器位于目标航天器的后方,即在以目标质心建立的相对坐标系中速度方向的相对位置矢量$\Delta r_v \leq 0$;

[0046] 所述高轨追踪探测策略定义为追踪航天器位于比目标航天器的轨道高的轨道上运行,即在以目标为中心建立的相对坐标系中径向矢量方向的相对位置矢量$\Delta r_R \geq 0$;

[0047] 所述低轨追踪探测策略是追踪航天器在一个较低的轨道上对在航天器前方的目标航天器进行跟踪。

[0048] 第二方面,提供一种基于概率密度分布的空间碎片的探测装置,包括:

[0049] 数据获取模块,用于采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,获得第一空间碎片状态数据;

[0050] 数据处理模块,用于根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除,获得第二空间碎片状态数据;

[0051] 路径更新模块,用于更新追踪航天器的相对路径;

[0052] 目标瞄准模块,用于相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件;

[0053] 目标检测策略及仿真模块,用于根据所述可观测性条件确定目标检测策略并仿真;

[0054] 最优非合作目标检测策略确定模块,用于根据所述目标检测策略及仿真结果,选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。

[0055] 第三方面,提供一种电子设备,所述电子设备包括:存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述计算机程序被所述处理器执行时实现如第一方面所述方法的步骤。

[0056] 第四方面,提供一种计算机存储介质,所述计算机存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如第一方面所述方法的步骤。

[0057] 本发明的空间碎片的探测方法,基于状态概率密度分布,对非合作目标的探测策略,考虑追踪航天器与目标的相对位置关系、姿态关系,提出三种目标探测策略:同轨追踪探测策略、高轨追踪探测策略以及低轨追踪探测策略。采用蒙特卡洛研究方法进行了实验分析,表明了低轨追踪探测策略在目标识别率等方面的优势,展现出良好工程应用潜力,为追踪航天器主动接近段的导航控制打下基础。

## 附图说明

[0058] 图1为本申请实施例提供的一种的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法的示意性流程图；

[0059] 图2为本申请实施例提供的另一种的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法的示意性流程图；

[0060] 图3为本申请实施例的又一种的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法的示意性流程图；

[0061] 图4为本申请实施例提供的追踪航天器模型及本体坐标系定义示意图；

[0062] 图5为本申请实施例提供的基于概率密度分布的空间碎片的探测装置的示意性结构框图；

[0063] 图6为本申请实施例提供的电子设备的示意性结构框图。

## 具体实施方式

[0064] 为更进一步阐述本发明为达成预定目的所采取的技术手段及功效,对本申请实施例中的技术方案进行清楚地描述,显然,所描述的实施例是本申请一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,本领域普通技术人员获得的所有其他实施例,都属于本申请保护的范围。

[0065] 本申请的说明书和权利要求书中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的术语在适当情况下可以互换,以便本申请的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施,且“第一”、“第二”等所区分的对象通常为一类,并不限定对象的个数,例如第一对象可以是一个,也可以是多个。此外,说明书以及权利要求中“和/或”表示所连接对象的至少其中之一,字符“/”,一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。

[0066] 本申请中说明书中对方法流程的描述及本发明说明书附图中流程图的步骤并非必须按步骤标号严格执行,方法步骤是可以改变执行顺序的。而且,可以省略某些步骤,将多个步骤合并为一个步骤执行,和/或将一个步骤分解为多个步骤执行。

[0067] 以下结合附图及较佳实施例,对申请明实施例提供的一种基于概率密度分布的空间碎片的探测方法、装置、设备及存储介质进行详细说明如后。

[0068] 随着人类空间活动能力的逐渐增强,目前在轨运行的航天器已达数千颗,预计10年内每年超过服役期的航天器将达到百颗以上。空间碎片任务中,采用两行轨道根数(TLE/SGP4)方法对空间非合作目标进行初轨的确定和预报,由于模型的不确定性、测量的误差等因素,导致空间中追踪航天器对非合作目标的定位不可能是一个准确的点,而是围绕空间某一点的概率分布。

[0069] 因此,本申请提供一种基于概率密度分布的空间碎片的探测方法,提出不同初始相对场景下的机动策略,以为主动相对接近段的初始状态提供参考和优化,以满足不同初始场景下追踪航天器的机动策略。

[0070] 请参见图1-2,图1、图2为本申请实施例的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法的示意性流程图,如图1-2所示,本申请实施例的方法包括如下步骤:

[0071] 步骤101,采用蒙特卡洛模方法拟定义空间碎片的状态空间,获得第一空间碎片状

态数据。

[0072] 利用蒙特卡洛模拟方法来生成大量随机样本,以涵盖空间碎片可能的各种状态(包括位置、速度、姿态等)。通过蒙特卡洛方法模拟建立一个全面的状态空间模型,以反映空间碎片在实际环境中的分布和动态特性:

[0073] $x_i = N(\mu, \Sigma)$

[0074] 式中,$x_i$表示样本点的状态量,N表示正态分布,μ表示中心点,Σ表示协方差矩阵。

[0075] 步骤102,根据马氏距离对第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除,获得第二空间碎片状态数据。

[0076] 利用蒙特卡洛模拟方法生成初步的第一空间碎片状态数据后,对模拟产生的状态数据进行分析,识别那些偏离常规状态分布的异常值,并剔除异常值,获得第二空间碎片状态数据,该第二空间碎片状态数据为处理后的状态数据。

[0077] 具体来说,针对多变量、相关的正态分布,采用马氏距离(Mahalanobis distance,MD)Δ通过如下公式进行判别:

[0078] $\Delta^2 = (x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)$

[0079] 式中,考虑各维度的相关性,Δ表示状态量x相对于中心点μ的距离。因此,Δ定义了一个距中心点概率相等的椭球,其数值为:

[0080] $P(\Delta < q_\alpha) \geq \alpha$

[0081] 式中,α为给定的位于椭球体中的个体总数的一部分占总数的比率。

[0082] 步骤103,更新追踪航天器的相对路径。

[0083] 利用蒙特卡洛方法和高精度外推模型来更新航天器相对路径,并结合相机定位和方向矢量转换等技术来实现目标的可见性判断,将目标卫星相对于追踪航天器的方向矢量转换,得到在相机参考系下的方向。

[0084] 参见图3,更新追踪航天器的相对路径,具体包括如下步骤:

[0085] 步骤103a,建立追踪航天器的姿态动力学模型。

[0086] 航天器的姿态使用四元数表示,初始姿态四元数和角速度被设定为特定值。动力学模型基于这些初始条件,用四元数方程描述航天器的姿态变化。

[0087] 例如,追踪航天器的姿态动力学模型有四元数方程给出,定义其初始姿态四元数和角速度分别为$q_{JC}$和$w_{JC}$,相应的动力学模型为:

[0088] $$\dot{\boldsymbol{q}}_{JC} = \frac{1}{2}\Omega(\boldsymbol{q}_{JC})\boldsymbol{w}_{JC}$$

[0089] 步骤103b,根据蒙特卡洛方法生成目标相对位置。

[0090] 根据第二空间碎片状态数据,目标的相对位置由蒙特卡洛方法随机生成,即给定估计的目标位置$\boldsymbol{r}_T^0$、速度$\boldsymbol{v}_T^0$,则蒙特卡洛方法产生的随机初始状态为:

[0091] $$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{r}_T^0 + \boldsymbol{A}_{HJ}^T \Delta\boldsymbol{r}_i$$

[0092] $$\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{v}_T^0 + \boldsymbol{A}_{HJ}^T \Delta\boldsymbol{v}_i$$

[0093] 式中,记$\boldsymbol{x}_i = \left(\Delta\boldsymbol{r}_i^T, \Delta\boldsymbol{v}_i^T\right)^T$为相对坐标系下校正的状态偏量。

[0094] 步骤103c,状态外推与坐标转换,利用高精度外推模型,将相对位置从相对坐标系转换到惯性坐标系下。

[0095] 考虑状态的外推是在惯性系下进行的,为此对以H为中心的相对坐标系,转换为以Jr0为中心的惯性系下。通过高精度外推模型进行传播,校正状态在J参考系中计算为$\Delta r_i^T$和$\Delta \boldsymbol{v}_i^T$进行参考系的转换,其中,$\boldsymbol{A}_{HJ}=\boldsymbol{A}_{HJ}\left(\boldsymbol{r}_i^0,\boldsymbol{v}_i^0\right)$为相对坐标系到惯性系下的转换矩阵。

[0096] 步骤103d,相机坐标系转换,将目标相对于追踪航天器的方向矢量转换到相机的参考系下。

[0097] 考虑追踪航天器上的相机始终固定安装在卫星本体上,无相对运动,相机相对于航天器本体系与轨道坐标系的转化矩阵为$R(q_{JC}(t))$,将目标相对于追踪航天器的方向矢量转换到相机的参考系下,有:

[0098] $\Delta r_i^C(t)=R(q_{JC}(t))\{Jr_i(t)-Jr_C(t)\}$

[0099] 由此,可以给定从追踪航天器看向目标的相对位置$\Delta r_i^C(t)$,通过检测该相对位置是否位于追踪航天器相机的视场(Filde ofview,FOV)内,即可判断目标相对追踪航天器的可见性。

[0100] 步骤104,相机视场的目标瞄准,确定目标相对于追踪航天器的可观测性条件。

[0101] 假定相机固定在追踪航天器本体坐标系的$x^C$轴方向上,为了对目标的可观测性进行分析,其光圈需要完全打开,视场角记为β,可进行目标探测的最小和最大距离分别记为$d_{min}$和$d_{max}$,累积所需的目标识别时间为$\Delta t_r$。对每一时间更新,通过下面的判断方法进行目标可观测性检测,其中$x_i$,yi和zi是$\Delta r_i^C(t)$的三轴分量,ri是$\Delta r_i^C(t)$的2范数。具体判断如下:

[0102] 当$x_i\geqslant 0$,目标位于追踪航天器$x^C$轴前方;

[0103] 当$d_{min}\leqslant r_i\leqslant d_{max}$,目标位于相对于追踪航天器的距离范围;

[0104] 当$\left|\tan^{-1}\frac{y_i}{x_i}\right|\leq\frac{\beta}{2}$,目标位于相对于追踪航天器$y^C$轴方向的视场;

[0105] 当$\left|\tan^{-1}\frac{z_i}{x_i}\right|\leq\frac{\beta}{2}$,目标位于相对于追踪航天器$z^C$轴方向的视场。

[0106] 步骤105,根据目标相对于追踪航天器的可观测性条件确定目标检测策略并仿真。

[0107] 考虑追踪航天器与非合作目标不同的空间位置以及追踪航天器姿态的装填,提出三种不同模式下的检测策略,并采用蒙特卡洛仿真方法进行研究。检测策略具体包括:

[0108] 步骤105a,同轨追踪检测模式。同轨追踪模式定义为追踪航天器与目标航天器位于同一轨道上的不同真近点角上,并令追踪航天器位于目标航天器的后方,即在以目标质心建立的相对坐标系中速度方向的相对位置矢量$\Delta r_v\leqslant 0$。分别取追踪航天器与目标航天器不同的相对距离进行蒙特卡洛仿真。结合上述步骤101-104,仿真目标航天器的随机蒙特卡洛状态、根据边界值剔除异常值,分析随着追踪航天器距目标的距离接近,视场不断增加情况下,目标的可见性、平均观测时间。得到如下结论:同轨追踪策略下,对航天器的姿态控制需求较小,且对非合作目标的跟踪观测时间较长。追踪航天器相机具有较大的视场,或目标位置的不确定性较小,则可以采用此目标检测策略实现对目标的检测。

[0109] 步骤105b,高轨追踪模式。高轨追踪模式定义为追踪航天器位于比目标航天器的轨道高的轨道上运行,即在以目标为中心建立的相对坐标系中径向矢量方向的相对位置矢量$\Delta r_R\geqslant 0$。分别取追踪航天器与目标航天器不同的场景进行蒙特卡洛仿真,包括:追踪航天器的一直指向相对坐标系$x^H$轴负向、追踪航天器绕$y^H$分别旋转-45°和-90°三种场景。结合

上述步骤101-104,仿真目标航天器的随机蒙特卡洛状态、根据边界值剔除异常值,分析随着追踪航天器距目标的距离接近,视场不断增加情况下,目标的可见性、平均观测时间。得到如下结论:相较于同轨追踪策略,高轨追踪策略的优势在于,追踪航天器相对于目标间的运动,从而增加了相机摆动的视场,提高了对目标的观测概率。

[0110] 步骤105c,低轨追踪模式。低轨追踪策略是追踪航天器试图在一个较低的轨道上对在航天器前方的目标航天器进行跟踪。由于处于低轨的航天器一般具有较高的迹向速度,因此这种策略的一个优势的地方在于,当其一旦找到目标,便可以用较少的的燃料ΔV进行机动、接近目标。取追踪航天器低于目标航天器轨道的的场景进行蒙特卡洛仿真。结合上述步骤101-104,仿真目标航天器的随机蒙特卡洛状态、根据边界值剔除异常值,分析随着追踪航天器距目标的距离接近,视场不断增加情况下,目标的可见性、平均观测时间。得到如下结论:低轨追踪策略对目标的探测概率最高,但进行的平均观测时间较低,当配以更大视野的相机时,可进一步增加对目标的探测能力。

[0111] 示例性的,以下对本申请实施例三种探测策略的仿真过程做进一步说明。

[0112] 在仿真验证中,取追踪卫星CleanSpace One为例进行仿真。参见图4,图4为追踪航天器模型及本体坐标系定义示意图,结合图4说明卫星属性参数,其体积为34×34×34cm,质量为35kg的立方体卫星,卫星垂直于速度矢量的面积约为0.342m2,相机始终固定在追踪卫星本体上,实现沿本体$x^C$轴。相机视场角α为32°×32°,可进行目标探测的最小和最大距离分别记为dmin和dmax分别为0km和5km,$\Delta t_r=5s$。非合作目标空间碎片与追踪航天器在同一轨道上,并定义其状态的协方差矩阵为:$\Sigma=diag(0.4^2,0.7^2,0.0^2,0.7^2,0.5^2,0.1^2)$,其中位置标准差单位为km,速度标准差单位为m/s。

[0113] 对目标的异常值进行剔除,对于给定的分Σ,为使生成的随机目标在99.99%分布范围内,确定临界马氏距离ΔC=q99.9%=4.74。假设随机生成的样本状态量的任意一个方向方向的分量超过最大范围即为异常值,即Δ≥ΔC,则在该方向上的绝对值可分别计算得:

[0114] $\Delta r_R=2.2km\ \Delta r_V=4.7km\ \Delta r_H=1.4km$

[0115] $\Delta v_R=5.8m/s\ \Delta v_V=2.6m/s\ \Delta v_H=3.8m/s$

[0116] 同轨追踪探测策略及仿真验证:分别取追踪航天器与目标航天器相对距离为2.5km、3km和3.5km进行蒙特卡洛仿真,并取追踪航天器始终指向目标方向。对目标状态进行蒙特卡洛仿真,取样本数为1000;对仿真的目标航天器的随机蒙特卡洛状态进行异常值剔除,分析随着追踪航天器距目标的距离接近,仿真结果表明:静态的视场FOV无法同时对所有随机样本的状态进行观测,仅约总数的78%~85%的样本可被观测。而随着追踪航天器距目标的距离,视场不断增加,追踪航天器可定位观测的目标样本数也将随之增加。统计不同相对初始位置下,进入追踪航天器视场内的随机样本,其平均跟踪观测时间为606s($\Delta r_V=2.5km$)、677s($\Delta r_V=3.0km$)和663s($\Delta r_V=3.5km$)。由此得到如下结论:同轨追踪策略下,对卫星的姿态控制需求较小,且对非合作目标的跟踪观测时间较长。追踪卫星相机具有较大的视场,或目标位置的不确定性较小,则可以采用此目标检测策略实现对目标的检测。

[0117] 高轨追踪探测策略及仿真验证:分别取追踪航天器与目标航天器不同的场景进行蒙特卡洛仿真,包括:追踪航天器的一直指向相对坐标系$x^H$轴负向、追踪卫星绕$y^H$分别旋转-45°和-90°三种场景。对目标状态进行蒙特卡洛仿真,取样本数为1000;对仿真的目标航天

器的随机蒙特卡洛状态进行异常值剔除,分析随着追踪航天器在不同场景下的目标的可见性、平均观测时间,仿真结果表明:追踪卫星绕$y^H$分别旋转角从0°变化到-45°、-90°时,对目标的样本点的观测率从92.79%增加至93.19%、93.59%,但每个样本的平均观测时间从326s减小至169s、113s。由此,得到如下结论:相较于同轨追踪策略,高轨追踪策略的优势在于,追踪卫星相对于目标间的运动,从而增加了相机摆动的视场,提高了对目标的观测概率。

[0118] 低轨追踪探测策略及仿真验证。取追踪航天器低于目标航天器轨道的场景,$\Delta r_R^H = 1.5\text{km}, \Delta r_R^H = 5\text{km}$进行蒙特卡洛仿真。仿真过程中,相机在天底和$y^H$轴方向进行摆动,取$\Delta t_s$=6000s时间内摆动20次。对目标状态进行蒙特卡洛仿真,取样本数为1000;对仿真的目标航天器的随机蒙特卡洛状态进行异常值剔除,分析随着追踪航天器在不同场景下的目标的可见性、平均观测时间,仿真结果表明:目标随机样本点的初始位置及相机视场内的可见性,观测率高达97.6%,平均观测时间为410s。得到如下结论:低轨追踪策略对目标的探测概率最高,但进行的平均观测时间较低,当配以更大视野的相机时,可进一步增加对目标的探测能力。

[0119] 步骤106,根据目标检测策略及仿真结果,选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。

[0120] 本发明的基于状态概率密度分布的空间碎片的探测方法,对非合作目标的探测策略,考虑追踪航天器与目标的相对位置关系、姿态关系,提出三种目标探测策略:同轨追踪探测策略、高轨追踪探测策略以及低轨追踪探测策略。采用蒙特卡洛研究方法进行了实验分析,表明了低轨追踪探测策略在目标识别率等方面的优势,展现出良好工程应用潜力,为追踪卫星主动接近段的导航控制打下基础。

[0121] 参见图5,与本申请实施例的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法对应,本申请实施例提供一种基于概率密度分布的空间碎片的探测装置,该探测装置包括:

[0122] 数据获取模块1001,用于采用蒙特卡洛方法模拟定义空间碎片的空间状态,获得第一空间碎片状态数据;

[0123] 数据处理模块1002,用于根据马氏距离对所述第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除,获得第二空间碎片状态数据;

[0124] 路径更新模块1003,用于更新追踪航天器的相对路径;

[0125] 目标瞄准模块1004,用于相机视场的目标瞄准,确定目标相对于所述追踪航天器的可观测性条件;

[0126] 目标检测策略及仿真模块1005,用于根据所述可观测性条件确定目标检测策略并仿真;

[0127] 最优非合作目标检测策略确定模块1006,用于根据所述目标检测策略及仿真结果,选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略,用于空间碎片的探测。

[0128] 参见图6,与本申请实施例的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法对应,本申请实施例提供一种电子设备,该电子设备包括:存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述计算机程序被所述处理器执行时实现上述实施例的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法实施例的各个过程,且能达到相同的技术效果,为避免重复,这里不再赘述。

[0129] 存储器1009可用于存储软件程序以及各种数据。存储器1009可主要包括存储程序或指令的第一存储区和存储数据的第二存储区,其中,第一存储区可存储操作系统、至少一个功能所需的应用程序或指令(比如声音播放功能、图像播放功能等)等。此外,存储器1009可以包括易失性存储器或非易失性存储器,或者,存储器1009可以包括易失性和非易失性存储器两者。其中,非易失性存储器可以是只读存储器(Read-Only Memory,ROM)、可编程只读存储器(Programmable ROM,PROM)、可擦除可编程只读存储器(Erasable PROM,EPROM)、电可擦除可编程只读存储器(Electrically EPROM,EEPROM)或闪存。易失性存储器可以是随机存取存储器(Random Access Memory,RAM),静态随机存取存储器(Static RAM,SRAM)、动态随机存取存储器(Dynamic RAM,DRAM)、同步动态随机存取存储器(Synchronous DRAM,SDRAM)、双倍数据速率同步动态随机存取存储器(Double Data Rate SDRAM,DDRSDRAM)、增强型同步动态随机存取存储器(Enhanced SDRAM,ESDRAM)、同步连接动态随机存取存储器(Synch link DRAM,SLDRAM)和直接内存总线随机存取存储器(Direct Rambus RAM,DRRAM)。本申请实施例中的存储器1009包括但不限于这些和任意其它适合类型的存储器。

[0130] 处理器1010可包括一个或多个处理单元;可选的,处理器1010集成应用处理器和调制解调处理器,其中,应用处理器主要处理涉及操作系统、用户界面和应用程序等的操作,调制解调处理器主要处理无线通信信号,如基带处理器。可以理解的是,上述调制解调处理器也可以不集成到处理器1010中。

[0131] 与本申请实施例的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法对应,本申请实施例还提供一种可读存储介质,所述可读存储介质上存储有程序或指令,该程序或指令被处理器执行时实现上述实施例的基于概率密度分布的空间碎片的探测方法实施例的各个过程,且能达到相同的技术效果,为避免重复,这里不再赘述。

[0132] 其中,所述处理器为上述本申请第六实施例实施例中所述的电子设备中的处理器。所述可读存储介质,包括计算机可读存储介质,如计算机只读存储器ROM、随机存取存储器RAM、磁碟或者光盘等。

[0133] 需要说明的是,在本文中,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。此外,需要指出的是,本申请实施方式中的方法和装置的范围不限按示出或讨论的顺序来执行功能,还可包括根据所涉及的功能按基本同时的方式或按相反的顺序来执行功能,例如,可以按不同于所描述的次序来执行所描述的方法,并且还可以添加、省去、或组合各种步骤。另外,参照某些示例所描述的特征可在其他示例中被组合。

[0134] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到上述实施例方法可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件,但很多情况下前者是更佳的实施方式。基于这样的理解,本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以计算机软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质(如ROM/RAM、磁碟、光盘)中,包括若干指令用以使得一台终端(可以是手机,计算机,服务器,或者网络设备等)执行本申请各个实施例所述的方法。

[0135] 上面结合附图对本申请的实施例进行了描述,但是本申请并不局限于上述的具体实施方式,上述的具体实施方式仅仅是示意性的,而不是限制性的,本领域的普通技术人员在本申请的启示下,在不脱离本申请宗旨和权利要求所保护的范围情况下,还可做出很多形式,均属于本申请的保护之内。

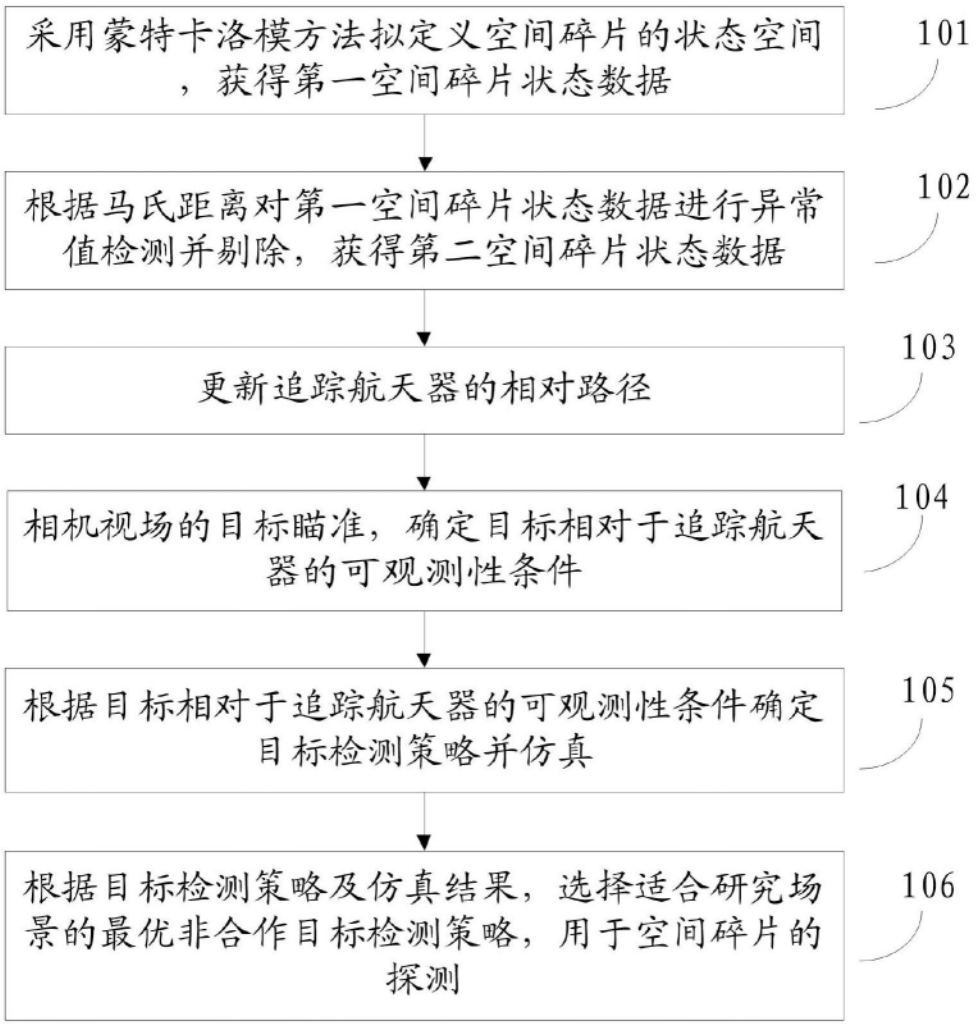

采用蒙特卡洛模方法拟定义空间碎片的状态空间，获得第一空间碎片状态数据
101
根据马氏距离对第一空间碎片状态数据进行异常值检测并剔除，获得第二空间碎片状态数据
102
更新追踪航天器的相对路径
103
相机视场的目标瞄准，确定目标相对于追踪航天器的可观测性条件
104
根据目标相对于追踪航天器的可观测性条件确定目标检测策略并仿真
105
根据目标检测策略及仿真结果，选择适合研究场景的最优非合作目标检测策略，用于空间碎片的探测
106

图1

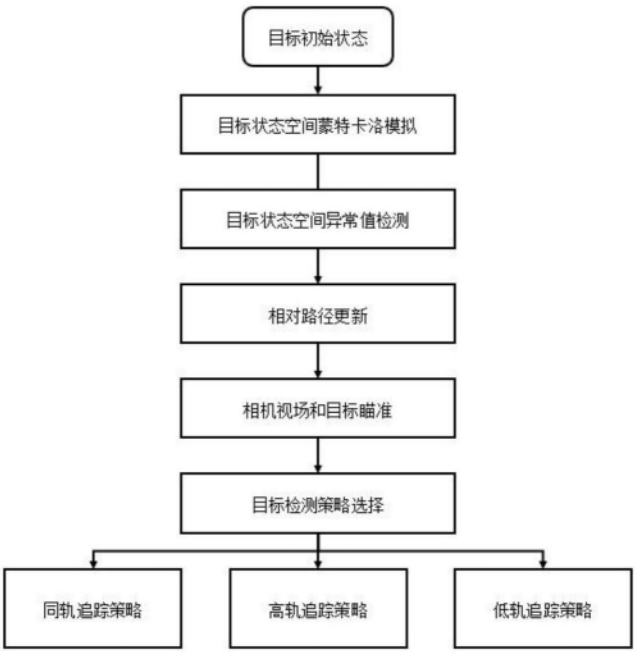

目标初始状态
目标状态空间蒙特卡洛模拟
目标状态空间异常值检测
相对路径更新
相机视场和目标瞄准
目标检测策略选择
同轨追踪策略
高轨追踪策略
低轨追踪策略

图2

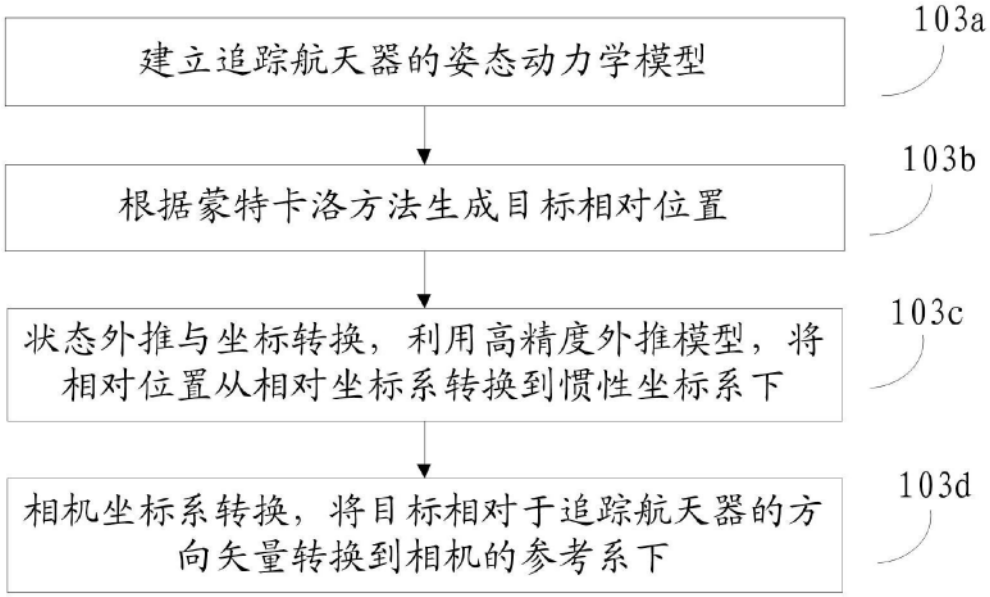

103a
建立追踪航天器的姿态动力学模型
103b
根据蒙特卡洛方法生成目标相对位置
103c
状态外推与坐标转换，利用高精度外推模型，将相对位置从相对坐标系转换到惯性坐标系下
103d
相机坐标系转换，将目标相对于追踪航天器的方向矢量转换到相机的参考系下

图3

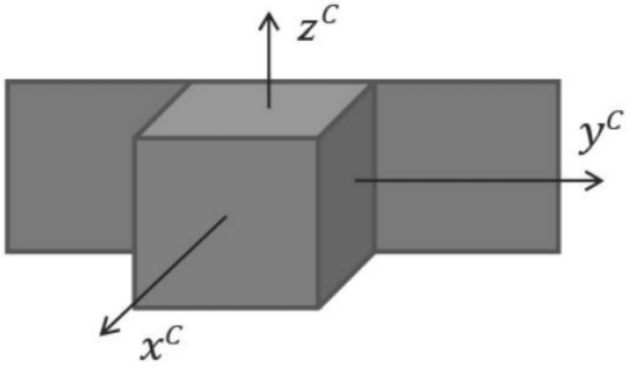

$z^C$
$y^C$
$x^C$

图4

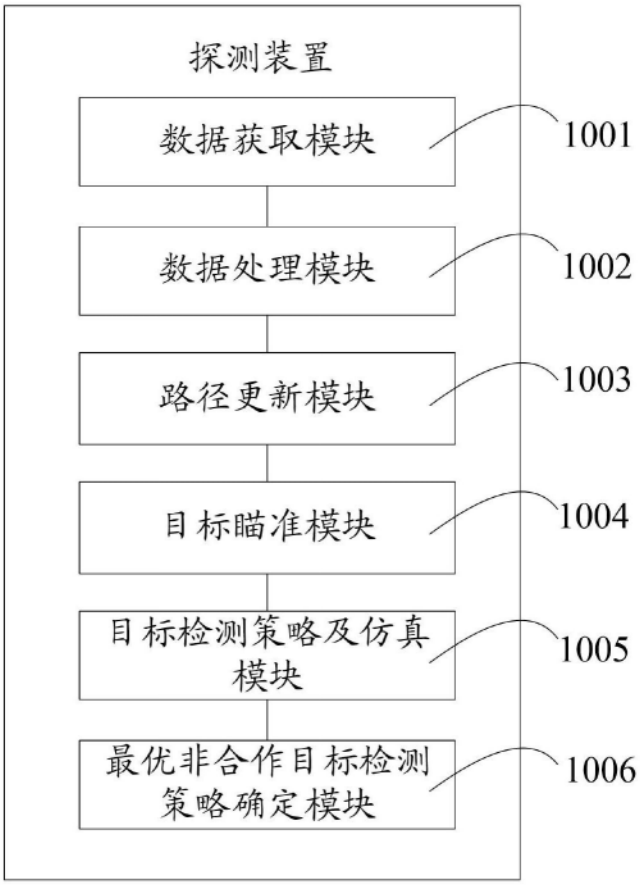

探测装置
数据获取模块
1001
数据处理模块
1002
路径更新模块
1003
目标瞄准模块
1004
目标检测策略及仿真模块
1005
最优非合作目标检测策略确定模块
1006

图5

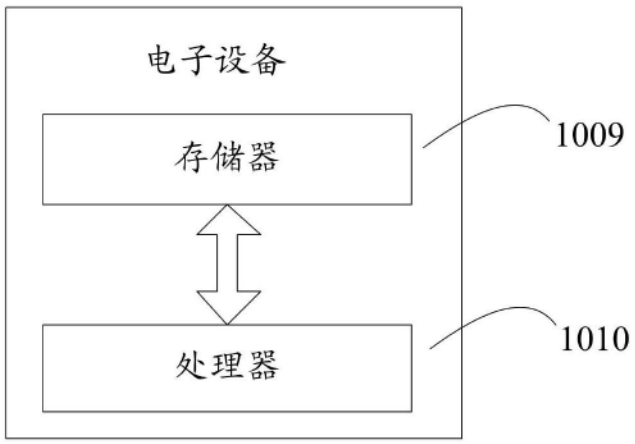



图6