



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113608182 A

(43) 申请公布日 2021.11.05

(21) 申请号 202110488715.6

(22) 申请日 2021.05.06

(30) 优先权数据

20172809.4 2020.05.04 EP

21166327.3 2021.03.31 EP

(71) 申请人 APTIV技术有限公司

地址 巴巴多斯圣迈克尔

(72) 发明人 M·罗泽维奇 K·科格特

J·波尔贝斯基 R·M·伯泽

D·博尔科夫斯基

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限

公司 11127

代理人 王小东 黄纶伟

(51) Int.Cl.

G01S 7/40 (2006.01)

权利要求书2页 说明书18页 附图14页

(54) 发明名称

确定雷达传感器的对准参数的方法和系统

(57) 摘要

800

本公开涉及确定雷达传感器的对准参数的方法和系统。确定雷达传感器的对准参数的计算机实现方法包括由计算机硬件组件执行的以下步骤：使用雷达传感器确定测量数据，该测量数据包括距离变化率测量值、方位角测量值和仰角测量值；确定雷达传感器的速度；以及基于所述测量数据和所述速度确定失准参数，该失准参数包括方位角失准、仰角失准和滚转角失准。



1. 一种确定雷达传感器的对准参数的计算机实现方法,所述计算机实现方法包括由计算机硬件组件执行的以下步骤:

使用所述雷达传感器确定测量数据,所述测量数据包括距离变化率测量值、方位角测量值和仰角测量值;

确定所述雷达传感器的速度;以及

基于所述测量数据和所述速度来确定失准参数,所述失准参数包括方位角失准、仰角失准和滚转角失准。

2. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,

其中,所述失准参数还包括速度调整误差。

3. 根据权利要求1或2所述的计算机实现方法,所述计算机实现方法还包括由所述计算机硬件组件执行的以下步骤:

确定系统参数,所述系统参数包括期望方位角安装角度、期望仰角安装角度和期望滚转角安装角度中的至少一者;

其中,所述失准参数还基于所述系统参数来确定。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的计算机实现方法,其中,所述测量数据与所述雷达传感器外部的多个对象有关。

5. 根据权利要求4所述的计算机实现方法,

其中,所述多个对象是静止的。

6. 根据权利要求1至5中任一项所述的计算机实现方法,

其中,所述失准参数是基于迭代方法确定的。

7. 根据权利要求1至6中任一项所述的计算机实现方法,

其中,所述失准参数是基于优化法确定的。

8. 根据权利要求1至7中任一项所述的计算机实现方法,

其中,所述失准参数是基于非线性最小二乘回归法确定的;和/或

其中,所述失准参数是基于非线性总最小二乘回归法确定的;和/或

其中,所述失准参数是基于滤波确定的。

9. 根据权利要求1至8中任一项所述的计算机实现方法,

其中,所述测量数据是使用多个雷达传感器确定的。

10. 根据权利要求9所述的计算机实现方法,

其中,所述雷达传感器的所述速度和所述失准参数是通过解决优化问题来同时确定的。

11. 一种确定经校正的测量数据的计算机实现方法,

所述计算机实现方法包括由计算机硬件组件执行的以下步骤:

使用雷达传感器确定测量数据;

基于根据权利要求1至10中任一项所述的计算机实现方法所确定的失准参数,对所述测量数据进行校正以获得所述经校正的测量数据。

12. 一种计算机系统,所述计算机系统包括被配置成执行根据权利要求1至11中任一项所述的计算机实现方法的步骤的多个计算机硬件组件。

13. 一种雷达系统,所述雷达系统包括雷达传感器,所述雷达传感器的失准参数是根据

权利要求1至11中任一项所述的计算机实现方法确定的。

14. 一种车辆,所述车辆包括根据权利要求13所述的雷达系统。

15. 一种非暂时性计算机可读介质,所述非暂时性计算机可读介质包含用于执行根据权利要求1至11中任一项所述的计算机实现方法的指令。

确定雷达传感器的对准参数的方法和系统

技术领域

[0001] 本公开涉及确定雷达传感器的对准参数的方法和系统。

背景技术

[0002] 例如在汽车应用中的雷达传感器需要与宿主车辆的底盘对准,以便准确地知道所检测的对象的位置。组装宿主车辆时执行的对准程序无法补偿因重物引起的俯仰角或仰角误差以及因宿主车辆的车轮或底盘失准引起的偏航角、方位角或滚转角误差,这可能会影响行驶中宿主车辆的“捕获”或“跟踪(dog-tracking)”。

[0003] 因此,需要提供对准参数的可靠确定。

发明内容

[0004] 本公开提供了一种计算机实现方法、雷达系统、计算机系统、车辆和非暂时性计算机可读介质。在从属权利要求、说明书和附图中给出了实施方式。

[0005] 在一个方面,本公开涉及一种确定雷达传感器的对准参数的计算机实现方法,该方法包括由计算机硬件组件执行(换句话说:实施)的以下步骤:使用所述雷达传感器确定测量数据,所述测量数据包括距离变化率(range-rate)测量值、方位角测量值和仰角测量值;确定雷达传感器的速度(换句话说:速率)(例如,使用速度传感器或与失准参数一起);以及基于所述测量数据和所述速度来确定失准参数,所述失准参数包括方位角失准、仰角失准和滚转角失准。

[0006] 应理解的是,确定雷达传感器的速度可以显式地(例如,使用速度传感器)或者隐式地(例如,通过将速度包括在优化问题中,如本文针对2D情况和3D所描述的那样)执行。

[0007] 根据各种实施方式,可以通过将由速度传感器(可以独立于雷达传感器)确定的速度与基于雷达测量数据确定的速度信息进行比较来确定失准参数。

[0008] 测量数据可以与雷达传感器有关,例如与安装在车辆(例如至少部分自动驾驶的车辆,例如汽车)上(例如车辆的底盘上)的雷达传感器有关。速度传感器可以在雷达传感器的外部;例如,速度传感器可以是车辆的速度传感器,例如基于里程计测量、陀螺仪测量和/或加速度测量。

[0009] 根据另一方面,失准参数还包括速度调整误差(speed-scaling error)。

[0010] 已经发现,提供具有速度调整误差估计的三轴自动对准可以提高雷达传感器的检测质量。

[0011] 根据另一方面,所述计算机实现方法还包括由所述计算机硬件组件执行的以下步骤:确定系统参数,所述系统参数包括期望方位角安装角度、期望仰角安装角度和期望滚转角安装角度中的至少一者;其中,所述失准参数还基于所述系统参数来确定。

[0012] 系统参数可以由设置有雷达传感器的系统(例如车辆)的制造商来设定。系统参数可以描述或定义如何在车辆中设置(例如安装)雷达传感器。

[0013] 根据另一方面,测量数据可以与雷达传感器外部的多个对象有关。例如,可以提供

与至少三个对象有关的测量结果。例如,可以提供与至少四个对象有关的测量结果。例如,可以提供与至少五个对象有关的测量结果。对象的数量可以被选择成使得用于确定失准参数的系统至少不欠定 (under-determined), 例如,使系统超定 (over-determined) (即,比待确定的未知失准参数更多的测量结果可能可用;这可允许对测量不准确性或测量误差进行隐式校正,例如通过使用回归方法来确定失准参数)。

[0014] 对象可以被设置在设置有雷达传感器的车辆的外部。

[0015] 根据另一方面,多个对象是静止的。因此,可以认为由速度传感器确定的速度与静止对象(相对于雷达传感器)的(相对)速度相同。这可用于通过确定失准参数以使基于雷达测量确定的速度与由速度传感器确定的速度相一致(例如,使得基于雷达测量确定的速度与速度传感器确定的速度之间的差最小)来确定失准参数。

[0016] 根据另一方面,失准参数是基于迭代方法确定的。

[0017] 用于确定失准参数的闭式解 (closed-form solution) 可能不可用,或者可能在数值上不稳定。可以从初始估计(或猜测)(例如将所有失准参数设定为默认值(例如0))开始使用迭代方法。估计值可以迭代地更新。在一次迭代后,失准参数可能已经具有合理的准确度。取决于如时间和计算能力之类的资源,可以执行多于一次的迭代。迭代可以继续直到达到预定的停止标准为止,例如可用于确定失准参数的最大时间,或失准参数的预定准确度(其例如可以基于有多少(例如绝对或相对)失准参数的估计从一个迭代到下一代改变来确定)。

[0018] 根据另一方面,失准参数是基于优化法确定的。

[0019] 该优化法可以优化失准参数,以使得由速度传感器测量的速度与基于测量数据确定的速度之间的差最小。该优化法可以从超定系统确定失准参数(其中,比闭式确定失准参数所需的更多的测量结果(例如与多个对象有关)可用)。优化法可以使用雅可比矩阵,包括相对于失准参数的建模输出的偏导数。

[0020] 根据另一方面,失准参数是基于非线性最小二乘回归法确定的。根据另一方面,失准参数是基于非线性总最小二乘回归法确定的。

[0021] 根据另一方面,失准参数是基于滤波确定的。例如,可以对已经基于优化或回归方法确定的失准参数进行滤波,例如卡尔曼滤波,以进一步改进失准参数。

[0022] 根据另一方面,测量数据是使用多个雷达传感器(其可以包括雷达传感器和至少一个其它雷达传感器)确定的。

[0023] 根据另一方面,雷达传感器的速度和失准参数是通过解决优化问题来同时确定的。

[0024] 利用根据各种实施方式的方法,可以改进对准的总体执行,这可以对进一步的雷达处理的执行产生积极影响。

[0025] 在另一方面,本公开涉及一种确定经校正的测量数据的计算机实现方法,所述方法包括由计算机硬件组件执行的以下步骤:使用雷达传感器确定测量数据;基于根据本文所述的计算机实现方法确定的失准参数来校正所述测量数据以获得经校正的测量数据。

[0026] 利用经校正的测量数据,可以实现改进的检测结果。

[0027] 基于失准参数,可以调整雷达传感器的控制(例如雷达传感器要用于确定测量的区域)(例如调整到期望区域或期望视场)。

[0028] 在另一方面,本公开涉及一种计算机系统,所述计算机系统包括多个计算机硬件组件,所述多个计算机硬件组件被配置成执行本文所描述的计算机实现方法的几个或全部步骤。该计算机系统可以是车辆的部分。

[0029] 该计算机系统可以包括多个计算机硬件组件(例如,处理器(例如处理单元或处理网络)、至少一个存储器(例如存储单元或存储网络)以及至少一个非暂时性数据存储部)。应理解的是,可以提供其它的计算机硬件组件并将其用于执行计算机系统计算机实现方法的步骤。所述非暂时性数据存储器和/或存储单元可以包括计算机程序,该计算机程序用于指示计算机例如使用处理单元和至少一个存储单元来执行本文所描述的计算机实现方法的几个或全部步骤或方面。

[0030] 在另一方面,本公开涉及一种雷达系统,所述雷达系统包括雷达传感器,所述雷达传感器的失准参数根据本文所述的计算机实现方法来确定。

[0031] 在另一方面,本公开涉及一种车辆,所述车辆包括本文所述的雷达系统。

[0032] 在另一方面,本公开涉及一种非暂时性计算机可读介质,该非暂时性计算机可读介质包含用于执行本文所描述的计算机实现方法的几个或全部步骤或方面的指令。计算机可读介质可以被配置成:诸如光盘(CD)或数字通用盘(DVD)的光学介质;诸如硬盘驱动器(HDD)的磁性介质;固态驱动器(SSD);诸如闪存存储器的只读存储器(ROM);等。此外,计算机可读介质可以被配置成经由诸如互联网连接的数据连接能够访问的数据存储部。计算机可读介质可以例如是在线数据存储库或云存储。

[0033] 本公开还涉及一种计算机程序,该计算机程序用于指示计算机执行本文所描述的计算机实现方法的几个或全部步骤或方面。

附图说明

[0034] 这里结合示意性示出的以下附图来描述本公开的示例实施方式和功能:

[0035] 图1A是当在方位角和仰角上失准时雷达视场的例示;

[0036] 图1B是在方位角、仰角和滚转角上的三维失准的例示;

[0037] 图2是例示了根据各种实施方式确定对准参数的方法的概述的流程图;

[0038] 图3是在引入滚转角失准之后的雷达视场的例示;

[0039] 图4是根据各种实施方式的雷达视场和补偿视场的例示;

[0040] 图5是例示了根据各种实施方式的方位角对准误差分布的图;

[0041] 图6是例示了根据各种实施方式的仰角对准误差分布的图;

[0042] 图7是例示了根据各种实施方式的滚转角对准误差分布的图(瞬时滚转角对准误差分布(500000样本));

[0043] 图8是例示了根据各种实施方式确定雷达传感器的对准参数的方法的流程图;

[0044] 图9是根据各种实施方式的对准参数估计系统;以及

[0045] 图10是具有多个计算机硬件组件的计算机系统,该计算机系统被配置成执行根据各种实施方式确定雷达传感器的对准参数的计算机实现方法的步骤;

[0046] 图11是车辆坐标系位置的例示;

[0047] 图12是相对于车辆坐标系(VCS)的传感器坐标系的例示;以及

[0048] 图13是传感器坐标系中的检测定义的例示。

- [0049] 附图标记列表
- [0050] 100 当在方位角和仰角上失准时雷达视场的例示
- [0051] 102 水平线
- [0052] 104 垂直分割线
- [0053] 106 理想朝向角度
- [0054] 108 真实朝向角度
- [0055] 110 雷达视场
- [0056] 112 失准
- [0057] 150 在方位角、仰角和滚转角上的三维失准的例示
- [0058] 152 x轴
- [0059] 154 y轴
- [0060] 156 z轴
- [0061] 158 地平面
- [0062] 160 实际视轴方向
- [0063] 162 期望视场
- [0064] 164 实际视场
- [0065] 200 例示了根据各种实施方式的确定对准参数的方法的概述的流程图
- [0066] 202 数据获取
- [0067] 204 回归
- [0068] 206 滤波
- [0069] 300 在引入滚转角失准之后的雷达视场的例示
- [0070] 302 从地面的角度来看的例示
- [0071] 304 从传感器的角度来看的例示
- [0072] 400 根据各种实施方式的雷达视场和补偿视场的例示
- [0073] 402 补偿视场
- [0074] 500 例示了根据各种实施方式的方位角对准误差分布的图
- [0075] 502 水平轴
- [0076] 504 垂直轴
- [0077] 506 例示了2轴对准的结果的曲线
- [0078] 508 例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-LS方法的结果的曲线
- [0079] 510 例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-TLS方法的结果的曲线
- [0080] 600 例示了根据各种实施方式的仰角对准误差分布的图
- [0081] 602 水平轴
- [0082] 604 垂直轴
- [0083] 606 例示了2轴对准的结果的曲线
- [0084] 608 例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-LS方法的结果的曲线
- [0085] 610 例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-TLS方法的结果的曲线
- [0086] 700 例示了根据各种实施方式的滚转角对准误差分布的图
- [0087] 702 水平轴

- [0088] 704 竖直轴
- [0089] 706 例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-LS方法的结果的曲线
- [0090] 708 例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-TLS方法的结果的曲线
- [0091] 800 例示了根据各种实施方式的确定雷达传感器的对准参数的方法的流程图
- [0092] 802 使用雷达传感器确定测量数据的步骤
- [0093] 804 确定雷达传感器的速度的步骤
- [0094] 806 基于测量数据和速度来确定失准参数的步骤
- [0095] 900 根据各种实施方式的对准参数估计系统
- [0096] 902 测量数据确定电路
- [0097] 904 速度确定电路
- [0098] 906 失准参数确定电路
- [0099] 908 连接
- [0100] 1000 根据各种实施方式的计算机系统
- [0101] 1002 处理器
- [0102] 1004 存储器
- [0103] 1006 非暂时性数据存储部
- [0104] 1008 雷达传感器
- [0105] 1010 速度传感器
- [0106] 1012 连接
- [0107] 1100 车辆坐标系位置的例示
- [0108] 1102 宿主车辆
- [0109] 1104 地平面
- [0110] 1106 后悬
- [0111] 1108 前保险杠
- [0112] 1110 簧上质量中心线
- [0113] 1200 相对于车辆坐标系 (VCS) 的传感器坐标系的例示
- [0114] 1202 平移
- [0115] 1204 旋转
- [0116] 1300 传感器坐标系中的检测定义的例示
- [0117] 1302 传感器原点
- [0118] 1304 X轴
- [0119] 1306 Y轴
- [0120] 1308 Z轴
- [0121] 1310 检测方位角
- [0122] 1312 检测仰角
- [0123] 1314 检测距离
- [0124] 1316 检测目标
- [0125] 1318 连接原点和检测目标的线在 (X;Y) 平面上的投影

具体实施方式

[0126] 雷达对准是确定雷达朝向方向的角度失准的过程。这些安装误差的校正对于基于雷达的跟踪方法以及对由雷达传感器提供的检测或跟踪对象进行操作的大多数特征功能的正常运行可能至关重要。旨在解决失准问题的两类主要方法/方式是：

[0127] 1) 静态对准方法，由于它们需要专用设备来执行校准过程，因此也可以被称为工厂对准；最常用的静态方法使用角反射器、多普勒发生器或钢板；

[0128] 2) 动态对准方法，由于它们可能不需要任何外部(附加)设备(装置)，因此也可以被称为自动对准。雷达传感器基于在汽车行驶(即驾驶)时对环境的观察来校正其朝向角度。

[0129] 图1A和图1B示出了失准和雷达视场关系的例示100和150。

[0130] 图1A示出了雷达视场110在方位角(沿着水平线102)和仰角(沿车辆前方处的竖直分割线104,其对应于0度)上失准时例示100。理想(或期望或假设)朝向角度106不同于真实(或实际)朝向角度108,使得存在失准112。

[0131] 图1B示出了在方位角(α)、仰角(β)和滚转角(γ)上的三维失准的例示150。在车辆坐标系(VCS)中例示了坐标轴,即 X_{VCS} 152、 Y_{VCS} 154和 Z_{VCS} 156。例示了地平面158。雷达传感器可以在地平面158上方安装在车辆坐标系的原点处。完美对准的期望视轴方向将与 X_{VCS} 152一致。然而,实际视轴方向160由于失准而与 X_{VCS} 152不同,并且实际视轴方向160与 X_{VCS} 152之间的差异可以由在方位角(α)、仰角(β)和滚转角(γ)上的三维失准来描述。由于失准,期望FOV 162(视场)可能与实际FOV 164不同。然而,可以根据基于实际FOV 164的失准参数通过校正来获得期望FOV 162。

[0132] 为了计算在方位角和仰角上失准的情况下的失准(不考虑滚转角上的可能失准),可以使用静止检测的距离变化率方程。它可以从负车辆速度矢量到距离矢量的投影得出,从而形成以下方程:

$$[0133] \quad \dot{r} = -V_X \cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS} - V_Y \sin \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS} - V_Z \sin \beta_{VCS} \quad (1)$$

[0134] 其中:

[0135] • \dot{r} 是距离变化率(静止检测的多普勒速度);

[0136] • V_X 是车辆的纵向速度(其可以是相对于车辆朝前的矢量,平行于地面; V_X 可以是该矢量的长度);

[0137] • V_Y 是车辆的横向速度(其可以是朝向车辆的左侧的矢量,平行于地面; V_Y 可以是该矢量的长度);

[0138] • V_Z 是车辆的竖直速度(其可以是朝向地面的矢量,垂直于地面; V_Z 可以是该矢量的长度);

[0139] • α_{VCS} 是与车辆坐标系对准的检测的方位角测量结果(其中,0[度]角可以被定义成朝向与安装有雷达传感器的车辆前方相同的方向);以及

[0140] • β_{VCS} 是与车辆坐标系对准的检测的仰角测量结果。

[0141] VCS对准的测量角度可以分解成传感器安装角度、传感器检测测量角度以及传感器安装失准角度:

$$[0142] \quad \alpha_{VCS} = \alpha_{SCS} + \alpha_B + \alpha_M \quad (2)$$

$$[0143] \quad \beta_{VCS} = \beta_{SCS} + \beta_B + \beta_M \quad (3)$$

其中：

[0144] • α_{SCS} 是传感器坐标系 (SCS) 中检测的方位角测量结果；

[0145] • α_B 是期望方位角安装角度；

[0146] • α_M 是期望方位角失准；

[0147] • β_{SCS} 是传感器坐标系中检测的仰角测量结果；

[0148] • β_B 是期望仰角安装角度；以及

[0149] • β_M 是仰角失准。

[0150] 利用速度校正因子 V_c (也可以被称为 (车辆) 速度调整误差或速度补偿因子) 进一步扩展方程, 将得出:

$$[0151] \quad V_X = \frac{V_{Xm}}{1 + V_c} \quad (4)$$

$$[0152] \quad V_Y = \frac{V_{Ym}}{1 + V_c} \quad (5)$$

$$[0153] \quad V_Z = \frac{V_{Zm}}{1 + V_c} \quad (6)$$

[0154] 其中：

[0155] • V_{Xm} 是测量的车辆纵向速度；

[0156] • V_{Ym} 是测量的车辆横向速度；

[0157] • V_{Zm} 是测量的车辆竖直速度；以及

[0158] • V_c 是速度调整误差。

[0159] 可以基于测量值 (X)、已知常数 (C) 和方程结果 (Y) 创建方程, 以用于查找未知参数 (B), 如下所示:

$$[0160] \quad f(C\{\alpha_B, \beta_B\}, X\{\alpha_{SCS}, \beta_{SCS}, V_{Xm}, V_{Ym}, V_{Zm}\}, B\{\alpha_M, \beta_M, V_c\}) = Y\{r\} \quad (7)$$

[0161] 各种方法 (诸如迭代非线性最小二乘回归法或变量误差法) 可以用于确定未知参数。然后通过诸如卡尔曼滤波器之类的时间滤波方法进一步改进通过这些方法找到的参数。

[0162] 图2示出了流程图200, 该流程图例示了根据各种实施方式确定对准参数的方法的概述 (或者不考虑滚转角上的失准, 或者考虑滚转角上的失准, 如以下将更详细描述)。在202处, 可以执行数据获取, 其可以包括静止检测、车辆速度和雷达信息。在204处, 可以执行回归, 例如包括方位角失准的估计、仰角失准的估计、滚转角失准的估计 (以下将更详细描述) 以及速度调整误差的估计。在206处, 可以提供滤波 (例如, 使用卡尔曼滤波器)。

[0163] 传感器的显著滚转失准角度 (期望传感器滚转角通常为零) 会极大地影响方位角和仰角测量结果, 因为它会减小雷达视场, 如下所示。

[0164] 滚转角失准可能会影响方位角-仰角失准计算本身。

[0165] 图3示出了在引入滚转角失准之后的雷达视场的例示300, 其与图1A中所示相似 (其中, 在图1A中未例示滚转角失准)。图3的左侧部分中的例示302示出了从地面的角度来看的例示, 而图3的右侧部分中的例示304示出了从传感器的角度来看的例示。

[0166] 如从图3可以看出的, 如果不考虑滚转角失准, 则由于理想朝向角度正好低于雷达传感器看到的报告的朝向角度, 方位角失准可以被视为0 (零) 或接近0, 并且仰角失准可以

被估计成大于仰角失准校正值。这可能导致找到错误的失准参数,例如零方位角失准和过高的仰角失准值。

[0167] 滚转角失准的影响对于小角度(例如,小于1[度])几乎是不可观察的,并且可能随滚转角成指数增长,从而在视场角处引入了最大的误差。如图3和图4所示,在雷达滚转角为30[度]时(即雷达传感器在滚转角为30度时的失准),误差使雷达的视场减小一半(传感器可能会观察到车辆前方附近的地面,以及FOV相反侧上方的天空;然而,从主动安全方法的角度来看,地面和天空区域均无关紧要)。同时,有关位于地面上方约0.5m处的对象的重要信息的重要部分被遗漏了。此外,未检测到的滚转角失准可能使方位角和仰角失准角变得不可靠。例如,在5度传感器滚转角失准的影响下处于60度方位角和5度仰角的对象将被报告处于方位角60.20度和-0.2484度的仰角。

[0168] 雷达滚转角失准可以通过扩展距离变化率方程来确定,这使得对滚转角的估计成为可能。该方程可以进一步改进偏航角和俯仰角失准的估计。在估计3个角失准(偏航角、俯仰角、滚转角)之后,可以校正测量的检测结果以表示车辆坐标系中的检测结果,或者在极端失准的情况下,估计值可能会触发警报,这将停止执行其它雷达功能。

[0169] 距离变化率方程(1)可以与方程(2)和(3)一起使用,其可以利用滚转角影响而扩展,这得出以下方程:

$$[0170] \quad \alpha_{VCS} = \alpha_{SCS}' + \alpha_B + \alpha_M \quad (8)$$

$$[0171] \quad \beta_{VCS} = \beta_{SCS}' + \beta_B + \beta_M \quad (9)$$

$$[0172] \quad \alpha'_{SCS} = \alpha_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) - \beta_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) \quad (10)$$

$$\beta'_{SCS} = \alpha_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) \quad (11)$$

其中:

[0173] • α'_{SCS} 是通过传感器坐标系中的滚转角失准校正的方位角测量结果;

[0174] • β'_{SCS} 是通过传感器坐标系中的滚转角失准校正的仰角测量结果;

[0175] • γ_M 是滚转角失准;以及

[0176] • γ_B 是滚转角理想安装位置(其通常可以为0度或180度)。

[0177] 因此, α'_{SCS} 和 β'_{SCS} 可以被可视化成距雷达视场中心(0,0)距离相同但相对于水平线旋转(对准)(假设期望滚转角安装角度为0[度])的检测,从而形成如图4所示的“补偿视场”。

[0178] 图4示出了根据各种实施方式的雷达视场110和补偿视场402的例示400。图4的各个部分与图1A的部分相似或相同,因此可以使用相同的附图标记,并且可以省略重复的描述。

[0179] 在将方程(8)和(9)(α'_{SCS} 和 β'_{SCS})带入方程(2)(3)用于 α_{SCS} 和 β_{SCS} 之后,可以分别得到以下方程:

$$[0180] \quad \alpha_{VCS} = \alpha_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) - \beta_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \alpha_B + \alpha_M \quad (12)$$

$$[0181] \quad \beta_{VCS} = \alpha_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_B + \beta_M \quad (13)$$

[0182] 此更改将公式(7)中的通用模型修改为:

$$[0183] \quad f(C\{\alpha_B, \beta_B, \gamma_B\}, X\{\alpha_{SCS}, \beta_{SCS}, V_{Xm}, V_{Ym}, V_{Zm}\}, B\{\alpha_M, \beta_M, \gamma_M, V_c\}) = Y\{\dot{r}\} \quad (14)$$

[0184] 该模型的一般形式可以从距离变化率方程(1)得出

$$\begin{aligned}
\dot{r} = & -\frac{V_{xm}}{1+V_c} \cos(\alpha_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) - \beta_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \\
& \cos(\alpha_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_B + \beta_M) - \\
[0185] \quad & \frac{V_{ym}}{1+V_c} \sin(\alpha_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) - \beta_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \\
& \cos(\alpha_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_B + \beta_M) - \\
& \frac{V_{zm}}{1+V_c} \sin(\alpha_{SCS} \sin(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_{SCS} \cos(\gamma_M + \gamma_B) + \beta_B + \beta_M)
\end{aligned} \quad (15)$$

[0186] 假设车辆仅在前向方向 (V_{ym} 和 V_{zm} 等于 0) 上移动并且仰角和滚转角期望安装角度为 0 [度], 则方程 (13) 可以被简化成以下形式:

$$\begin{aligned}
\dot{r} = & -\frac{V_{xm}}{1+V_c} \cos(\alpha_{SCS} \cos \gamma_M - \beta_{SCS} \sin \gamma_M + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \cos(\alpha_{SCS} \sin \gamma_M + \\
[0187] \quad & \beta_{SCS} \cos \gamma_M + \beta_M)
\end{aligned} \quad (16)$$

[0188] 方程 (16) 可用于组成 (创建) 方程的超定系统, 该超定系统可通过各种方法求解以找到关注的参数, 即失准角度和速度补偿因子。在一示例中, 方程 (14) 可以用作非线性最小二乘回归的模型。例如, 模型可能是迭代的, 这意味着该方法将对包含来自一个时间实例的数据的同一数据集进行迭代, 以在模型围绕其工作点进行线性化定义的多个步骤中收敛到非线性方程的解:

$$[0189] \quad (J^T \cdot J) \Delta B = J^T \cdot \Delta Y \quad (17)$$

[0190] 矩阵方程 (17) 可以转换成:

$$[0191] \quad \Delta B = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot \Delta Y \quad (18)$$

[0192] 其中:

[0193] • ΔB 是单次迭代 (解空间中的单个步骤) 中参数值的更新;

[0194] • J 是模型函数对参数的偏导数 (其可以被称为雅可比矩阵); 以及

[0195] • ΔY 是系统的测量输出与模型输出之间的差:

$$[0196] \quad \Delta Y = \begin{bmatrix} \dot{r}_1 - f_1 \\ \vdots \\ \dot{r}_n - f_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

[0197] 雅可比矩阵可以采用以下形式:

$$[0198] \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial V_c} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_M} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta_M} & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma_M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial V_c} & \frac{\partial f_n}{\partial \alpha_M} & \frac{\partial f_n}{\partial \beta_M} & \frac{\partial f_n}{\partial \gamma_M} \end{bmatrix} \quad (20)$$

[0199] 其中:

$$\begin{aligned}
[0200] \quad \frac{\partial f_i}{\partial V_c} = & \frac{V_{xm}}{(1+V_c)^2} \cos(\alpha_{SCS}^i \cos \gamma_M - \beta_{SCS}^i \sin \gamma_M + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \\
& \cos(\alpha_{SCS}^i \sin \gamma_M + \beta_{SCS}^i \cos \gamma_M + \beta_M)
\end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
[0201] \quad \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_M} = & \frac{V_{xm}}{1+V_c} \sin(\alpha_{SCS}^i \cos \gamma_M - \beta_{SCS}^i \sin \gamma_M + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \\
& \cos(\alpha_{SCS}^i \sin \gamma_M + \beta_{SCS}^i \cos \gamma_M + \beta_M)
\end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
[0202] \quad \frac{\partial f_i}{\partial \beta_M} = & \frac{V_{xm}}{1+V_c} \cos(\alpha_{SCS}^i \cos \gamma_M - \beta_{SCS}^i \sin \gamma_M + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \\
& \sin(\alpha_{SCS}^i \sin \gamma_M + \beta_{SCS}^i \cos \gamma_M + \beta_M)
\end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_i}{\partial \gamma_M} &= \frac{V_{Xm}}{1+V_c} \cos(\alpha_{SCS}^i \cos \gamma_M - \beta_{SCS}^i \sin \gamma_M + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \\
&\sin(\alpha_{SCS}^i \sin \gamma_M + \beta_{SCS}^i \cos \gamma_M + \beta_M) \cdot (\alpha_{SCS}^i \cos \gamma_M - \beta_{SCS}^i \sin \gamma_M) - \\
\frac{V_{Xm}}{1+V_c} &\sin(\alpha_{SCS}^i \cos \gamma_M - \beta_{SCS}^i \sin \gamma_M + \alpha_B + \alpha_M) \cdot \cos(\alpha_{SCS}^i \sin \gamma_M + \\
&\beta_{SCS}^i \cos \gamma_M + \beta_M) \cdot (\alpha_{SCS}^i \sin \gamma_M + \beta_{SCS}^i \cos \gamma_M)
\end{aligned} \tag{24}$$

[0204] 假设参数的初始值后,可以求解方程(18)至(24)所描述的非线性回归模型:

$$B_0 = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{for } m = 0 \\ \begin{bmatrix} V_{c\ m-1} \\ \alpha_{M\ m-1} \\ \beta_{M\ m-1} \\ \gamma_{M\ m-1} \end{bmatrix} & \text{for } m > 1 \end{cases} \tag{25}$$

[0206] 其中,m是成功的对准周期(雷达周期)的数量。换句话说,方位角、仰角和滚转角以及速度校正因子中的失准0可以被假设为第一次迭代的起点,而先前迭代的结果可以用作下一次迭代的起点。

[0207] 因此,方程(26)可以利用第i次迭代的值来更新模型参数值:

$$B_i = B_{i-1} + \Delta B_i \tag{26}$$

[0209] B_i 在无数次迭代时(或当迭代次数接近无穷大时)可能会收敛到实际速度调整误差和失准角度:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} B_i = \begin{bmatrix} V_c \\ \alpha_M \\ \beta_M \\ \gamma_M \end{bmatrix} \tag{27}$$

[0211] 根据各种实施方式的方法还提供了用于滚转轴的对准参数,其准确地描述了物理模型。

[0212] 图5、图6和图7例示了根据各种实施方式的方法的关于针对所有安装角度(即方位角、仰角和滚转角)的随机(非零)失准的模拟数据的执行。使用了以下模拟参数:

[0213] • 测试用例(样本)数量:500000(各个方法的输入相同);

[0214] • 失准(方位角、仰角和滚转角):从间隔[-5:5]度上的均匀分布得出的伪随机值;

[0215] • 从间隔[-180:180]度上的均匀分布得出的方位角视轴伪随机值;

[0216] • 车辆沿直线(X_{VCS} 方向)移动;

[0217] • 最低车辆速度:11m/s;

[0218] • 检测次数:64;

[0219] • 方位角高斯零平均噪声:标准偏差0.3度;

[0220] • 仰角高斯零平均噪声:标准偏差1度;

[0221] • 距离变化率高斯零平均噪声:标准偏差0.03m/s;

[0222] • 3轴上的车辆速度高斯零平均噪声:标准偏差0.2m/s。

[0223] 图5、图6和图7分别示出了各个比较的方法的单次迭代(第一次迭代)的结果。方法名称中的NL-LS可以代表用于找到解的非线性最小二乘回归,而NL-TLS则可以代表非线性

总最小二乘回归。为了比较目的,示出了没有滚转角估计的2轴对准。

[0224] 图5示出了例示了根据各种实施方式的方位角对准误差分布的图500。在水平轴502上例示了偏差角度。在竖直轴504上例示了样本的数量。曲线506例示了2轴对准的结果。曲线508例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-LS方法的结果。曲线510例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-TLS方法的结果。

[0225] 图6示出了例示了根据各种实施方式的仰角对准误差分布的例示600。在水平轴602上例示了偏差角度。在竖直轴604上例示了样本的数量。曲线606例示了2轴对准的结果。曲线608例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-LS方法的结果。曲线610例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-TLS方法的结果。

[0226] 图7示出了例示了根据各种实施方式的滚转角对准误差分布的图700。在水平轴702上例示了偏差角度。在竖直轴704上例示了样本的数量。曲线706例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-LS方法的结果。曲线708例示了根据各种实施方式的3轴对准NL-TLS方法的结果。

[0227] 如图5和图6所示,与2轴对准相比,在3轴对准的方位角和仰角失准估计的情况下,即使是基于一个时间实例的(非迭代)结果也要好得多。

[0228] 图7示出了滚转角对准的误差分布,在这种情况下2轴对准不可用,因为它不返回滚转角估计。

[0229] 图8示出了例示了根据各种实施方式确定雷达传感器的对准参数的方法的流程图800。在802,可以使用雷达传感器确定测量数据,其中,测量数据可以包括距离变化率测量值、方位角测量值和仰角测量值。在804,可以确定雷达传感器的速度。在806,可以基于测量数据和速度来确定失准参数,其中,该失准参数可以包括方位角失准、仰角失准和滚转角失准。

[0230] 根据各种实施方式,失准参数还可以包括速度调整误差。

[0231] 根据各种实施方式,可以确定系统参数,其中,该系统参数可以包括期望方位角安装角度、期望仰角安装角度和期望滚转角安装角度中的至少一者。失准参数还可以基于系统参数来确定。

[0232] 根据各种实施方式,测量数据可以与雷达传感器外部的多个对象有关。

[0233] 根据各种实施方式,多个对象可以是静止的。

[0234] 根据各种实施方式,失准参数可以是基于迭代方法确定的。

[0235] 根据各种实施方式,失准参数可以是基于优化法确定的。

[0236] 根据各种实施方式,失准参数可以是基于非线性最小二乘回归法确定的。

[0237] 根据各种实施方式,失准参数可以是基于非线性总最小二乘回归法确定的。

[0238] 根据各种实施方式,失准参数可以是基于滤波确定的。

[0239] 根据各种实施方式,测量数据可以是使用多个雷达传感器确定的。

[0240] 根据各种实施方式,雷达传感器的速度和失准参数可以通过解决优化问题来同时确定的。

[0241] 上述步骤802、804、806和其它步骤中的各个步骤都可以由计算机硬件组件执行。

[0242] 图9示出了根据各种实施方式的对准参数估计系统900。该对准参数估计系统900可以包括测量数据确定电路902、速度确定电路904和失准参数确定电路906。

[0243] 测量数据确定电路902可以被配置成使用雷达传感器来确定测量数据,该测量数据包括距离变化率测量值、方位角测量值和仰角测量值。雷达传感器可以是测量数据确定电路902的一部分,或者可以设置在测量数据确定电路902的外部。

[0244] 速度确定电路904可以被配置成确定雷达传感器的速度。速度传感器可以是速度确定电路904的一部分,或者可以设置在速度确定电路904的外部。

[0245] 失准参数确定电路906可以被配置成基于测量数据和速度来确定雷达传感器的失准参数,该失准参数包括方位角失准、仰角失准和滚转角失准。

[0246] 测量数据确定电路902、速度确定电路904和失准参数确定电路906可以彼此联接,例如,经由诸如电缆或计算机总线的电连接908或经由任何其它合适的电连接来交换电信号。

[0247] “电路”可以被理解为任何种类的逻辑实现实体,其可以是专用电路或执行存储在存储器、固件或其任何组合中的程序的处理器。

[0248] 图10示出了具有多个计算机硬件组件的计算机系统1000,该计算机系统被配置成执行根据各种实施方式的确定雷达传感器的对准参数的计算机实现方法的步骤。计算机系统1000可以包括处理器1002、存储器1004和非暂时性数据存储部1006。雷达传感器1008和/或速度传感器1010可以被设置为计算机系统1000的一部分(如图10所示),或者可以被设置在计算机系统1000的外部。

[0249] 处理器1002可以执行存储器1004中所提供的指令。非暂时性数据存储部1006可以存储计算机程序,包括可以被传递到存储器1004然后由处理器1002执行的指令。雷达传感器1008可以用于确定如上所述的测量数据。速度传感器1010可用于确定如上所述的速度。

[0250] 处理器1002、存储器1004和非暂时性数据存储部1006可以彼此联接,例如,经由诸如电缆或计算机总线的电连接1012或经由任何其它合适的电连接来交换电信号。雷达传感器1008和/或速度传感器1010可以例如经由外部接口联接到计算机系统1000,或者可以被设置为计算机系统的一部分(换句话说:例如在计算机系统内部,例如经由电连接1012联接)。

[0251] 术语“联接”或“连接”旨在分别包括直接“联接”(例如,经由物理链路)或直接“连接”以及间接“联接”或间接“连接”(例如,经由逻辑链路)。

[0252] 应理解的是,针对以上方法中的一个方法所描述的内容可以类似地适用于对准参数估计系统900和/或计算机系统1000。

[0253] 在下文中,将描述其它实施方式。这些实施方式可以基于多个多普勒雷达检测来提供对宿主车辆速度和雷达失准的同时估计。

[0254] 如本文所使用的,可以使用各种坐标系。

[0255] ISO-地球固定坐标系可以基于在惯性参照系中保持固定的轴系。该坐标系的原点可以固定在地平面上。位置和取向可以以任意方式选择(例如,基于期望应用)。系统在ISO标准中的命名可能是(xE;yE;zE)。

[0256] 另一坐标系可以是车辆坐标系。

[0257] 图11示出了车辆坐标系位置的例示1100。车辆坐标系可包括三个右手侧轴:(XV;YV;ZV)。坐标系中的值可以表示为(xV;yV;zV)。车辆坐标系可以处于稳定状态下的车辆的后轴的中心。坐标系可以保持固定到车辆簧上质量,这意味着在运动期间或在倾斜时,它可

能与后轴不对准。VCS在静止的车身上相对于车辆尺寸的位置可以如图11所示,其中,在图11的顶部的侧视图中,静止的宿主车辆1102在地平面1104上示出,其具有后悬1106以及后轴与前保险杠之间的距离1108。在图11的底部所示的顶视图上,示出了簧上质量中心线1110。轴(XV;YV;ZV)也在图11中示出。

[0258] 另一坐标系可以是传感器坐标系。

[0259] 如LiDAR和雷达等的传感器报告极坐标系中的检测结果。各次检测都可以用以下三项来描述:距离;方位角;仰角。

[0260] 图12示出了关于车辆坐标系(VCS)的传感器坐标系的例示1200。可以通过平移1202和旋转1204相对于VCS定义传感器坐标系的原点。

[0261] 图13示出了传感器坐标系中的检测定义的例示1300。示出了传感器原点1302、X轴1304、Y轴1306和Z轴1308。检测方位角1310可以被定义为X轴1304与连接原点1302和检测目标1316的线在(X;Y)平面上的投影1318之间的角度。检测仰角1312可以被定义为(X;Z)平面与连接原点和检测目标1316的线1318之间的角度。检测距离1314可以被定义为传感器原点1302与检测目标1316之间的笛卡尔距离。

[0262] 各次雷达扫描可产生一组(雷达)检测结果,其中各个检测结果都可能具有以下属性:

[0263] • 距离(其可以从传感器原点到检测目标的距离,如图13所示);

[0264] • 距离变化率(其可以是检测目标的径向速度;换句话说:距离的时间导数);

[0265] • 方位角(例如,如图13所示);以及

[0266] • 仰角(例如,如图13所示)。

[0267] 目标平面运动可以通过以下方式描述:

$$[0268] \quad \mathbf{v}^t = [\omega^t \quad x^t \quad y^t]^T$$

[0269] 相对于目标进行单次原始检测的距离变化率方程可以表示为:

$$[0270] \quad \dot{r}^i + v_x^s \cos \theta^i + v_y^s \sin \theta^i = v_x^t \cos \theta^i + v_y^t \sin \theta^i$$

[0271] 其中:

[0272] • \dot{r}^i -第i个检测距离变化率,

[0273] • θ^i -第i个检测方位角。

[0274] 为了简化表示,可以引入补偿距离变化率的概念并将其定义为:

$$[0275] \quad \dot{r}_{cmp}^i = \dot{r}^i + v_x^s \cos \theta^i + v_y^s \sin \theta^i$$

[0276] 然后,距离变化率方程可以被简化为:

$$[0277] \quad \dot{r}_{cmp}^i = v_x^t \cos \theta^i + v_y^t \sin \theta^i$$

[0278] 以矢量形式可以描述如下:

$$[0279] \quad \dot{r}_{cmp}^i = [\cos \theta^i \quad \sin \theta^i] \begin{bmatrix} v_x^t \\ v_y^t \end{bmatrix}$$

[0280] 系数 v_x^t 和 v_y^t 可以称为速度分布。

[0281] 如果可以相对于一个目标对象进行至少2次检测,则可以成功估计速度分布。该估计可以通过应用最小二乘法或US 2019/0369228中提出的方法来进行。两种方法都可以提

供速度分布及其协方差矩阵的估计:

$$[0282] \quad \begin{matrix} \widehat{v}_x^t, & \widehat{v}_y^t, \\ \sigma_{VP} = \end{matrix} \begin{bmatrix} \sigma_{v_x^t}^2 & \sigma_{v_x^t v_y^t} \\ \sigma_{v_x^t v_y^t} & \sigma_{v_y^t}^2 \end{bmatrix}$$

[0283] 高斯-牛顿优化法可以用于以二次形式最小化一个函数:

$$[0284] \quad Q(\mu) = f(\mu)^T f(\mu)$$

[0285] 高斯-牛顿优化法可以包括以下步骤:

[0286] 1. 可以首先给出点 μ^0 、函数 $f(\mu)$ 及其雅可比矩阵 $J(\mu) = \frac{\partial f(\mu)}{\partial \mu}$ 。设置 $i=0$ 。

[0287] 2. 设置 $\gamma^i = 1$ 。

[0288] 3. 计算:

$$[0289] \quad \mu^{i+1} = \mu^i + \gamma^i (J(\mu^i)^T J(\mu^i))^{-1} J(\mu^i)^T f(\mu^i)$$

[0290] 4. 如果 $Q(\mu^{i+1}) > Q(\mu^i)$, 则设置 $\gamma^i = \frac{1}{2} \gamma^i$ 并从3开始重复。

[0291] 5. 如果达到停止标准, 则终止。

[0292] 6. 否则设置 $i = i+1$ 并从2开始重复。

[0293] 根据各种实施方式, 可以提供用于同时估计车辆速度和雷达失准角度的装置和方法。对于单个雷达, 这样的方法可能是不可能的, 因为只有具有多个雷达, 才可以基于其它传感器的测量值来校正来自一个传感器的测量值。

[0294] 在下文中, 将描述用于2D(二维)情况的方法。

[0295] 在2D情况下, 距离变化率方程可以具有以下形式:

$$[0296] \quad -\dot{r} = v_{s,x}^{SCS} \cos \theta + v_{s,y}^{SCS} \sin \theta = [\cos \theta \quad \sin \theta] \begin{bmatrix} v_{s,x}^{SCS} \\ v_{s,y}^{SCS} \end{bmatrix}$$

[0297] 其中:

[0298] • \dot{r} 可以是检测的距离变化率,

[0299] • θ 可以是检测的方位角,

[0300] • $[v_{s,x}^{SCS} \quad v_{s,y}^{SCS}]^T$ 可以是在传感器坐标系(SCS)中报告的传感器速度。

[0301] 如果 α 是传感器偏航角, 则检测距离变化率可以是车辆坐标系(VCS)中传感器速度的函数, 并且可具有以下形式:

$$[0302] \quad -\dot{r} = [\cos \theta \quad \sin \theta] \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s,x}^{VCS} \\ v_{s,y}^{VCS} \end{bmatrix} = [\cos(\theta + \alpha) \quad \sin(\theta + \alpha)] \begin{bmatrix} v_{s,x}^{VCS} \\ v_{s,y}^{VCS} \end{bmatrix}$$

[0303] 其中

[0304] • $[v_{h,x}^{VCS} \quad v_{h,y}^{VCS}]^T$ 可以是在车辆坐标系(VCS)中报告的传感器速度, 并且

[0305] • 传感器偏航角 α 可以是校准角度 α_0 和失准角度 α_m 的和:

$$[0306] \quad \alpha = \alpha_0 + \alpha_m$$

[0307] 传感器速度还可以表示为VCS中宿主速度的函数:

$$[0308] \quad \begin{cases} v_{s,x}^{VCS} = v_{h,x}^{VCS} - \omega \Delta y \\ v_{s,y}^{VCS} = v_{h,y}^{VCS} + \omega \Delta x \end{cases}$$

[0309] 其中

[0310] • $[v_{h,x}^{vcs} \ v_{h,y}^{vcs}]^T$ 可以是在车辆坐标系 (VCS) 中报告的宿主速度。

[0311] • ω 可以是宿主偏航率，

[0312] • $\Delta x, \Delta y$ 可以是雷达在 VCS 中的位置。

[0313] 基于这些方程，距离变化率方程可以写为：

$$[0314] \quad -\dot{r} = [\cos(\alpha_0 + \alpha_m + \theta) \quad \sin(\alpha_0 + \alpha_m + \theta)] \begin{bmatrix} v_{h,x}^{vcs} - \omega\Delta y \\ v_{h,y}^{vcs} + \omega\Delta x \end{bmatrix}$$

[0315] 考虑到来自所有雷达的所有静态检测，可以提供以下方程组：

$$[0316] \quad \begin{bmatrix} -\dot{r}_1^1 \\ -\dot{r}_2^1 \\ \vdots \\ -\dot{r}_{N_1}^1 \\ -\dot{r}_1^2 \\ \vdots \\ -\dot{r}_{N_M}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_0^1 + \alpha_m^1 + \theta_1^1) [v_{h,x}^{vcs} - \omega\Delta y] + \sin(\alpha_0^1 + \alpha_m^1 + \theta_1^1) [v_{h,y}^{vcs} + \omega\Delta x] \\ \cos(\alpha_0^1 + \alpha_m^1 + \theta_2^1) [v_{h,x}^{vcs} - \omega\Delta y] + \sin(\alpha_0^1 + \alpha_m^1 + \theta_2^1) [v_{h,y}^{vcs} + \omega\Delta x] \\ \vdots \\ \cos(\alpha_0^1 + \alpha_m^1 + \theta_{N_1}^1) [v_{h,x}^{vcs} - \omega\Delta y] + \sin(\alpha_0^1 + \alpha_m^1 + \theta_{N_1}^1) [v_{h,y}^{vcs} + \omega\Delta x] \\ \cos(\alpha_0^2 + \alpha_m^2 + \theta_1^2) [v_{h,x}^{vcs} - \omega\Delta y] + \sin(\alpha_0^2 + \alpha_m^2 + \theta_1^2) [v_{h,y}^{vcs} + \omega\Delta x] \\ \vdots \\ \cos(\alpha_0^M + \alpha_m^M + \theta_{N_M}^M) [v_{h,x}^{vcs} - \omega\Delta y] + \sin(\alpha_0^M + \alpha_m^M + \theta_{N_M}^M) [v_{h,y}^{vcs} + \omega\Delta x] \end{bmatrix}$$

[0317] 简而言之，这可以写成：

$$[0318] \quad -\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{h}(\bar{\rho})$$

[0319] 其中

$$[0320] \quad \bar{\rho} = \begin{bmatrix} v_{h,x}^{vcs} \\ v_{h,y}^{vcs} \\ \omega \\ \alpha_m^1 \\ \vdots \\ \alpha_m^M \end{bmatrix}$$

[0321] 基于此，可以通过优化以下函数找到宿主速度矢量 $\bar{\rho}$ 和雷达对准：

$$[0322] \quad f(\bar{\rho}) = \mathbf{h}(\bar{\rho}) + \dot{\mathbf{r}}$$

[0323] 该优化可以通过如上所述的高斯-牛顿方法完成，其中，雅可比矩阵具有以下形式：

$$[0324] \quad J(\bar{\rho}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1^1(\bar{\rho})}{\partial v_{h,x}^{vcs}} & \dots & \frac{\partial h_1^1(\bar{\rho})}{\partial \alpha_m^M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_{N_M}^M(\bar{\rho})}{\partial v_{h,x}^{vcs}} & \dots & \frac{\partial h_{N_M}^M(\bar{\rho})}{\partial \alpha_m^M} \end{bmatrix}$$

[0325] 其中：

$$[0326] \quad \bullet \frac{\partial h_k^l(\bar{\rho})}{\partial v_{h,x}^{vcs}} = \cos(\alpha_0^k + \alpha_m^k + \theta_k^l),$$

$$[0327] \quad \bullet \frac{\partial h_k^l(\bar{\rho})}{\partial v_{h,y}^{vcs}} = \sin(\alpha_0^k + \alpha_m^k + \theta_k^l),$$

$$[0328] \quad \bullet \frac{\partial h_k^l(\bar{\rho})}{\partial \omega} = \sin(\alpha_0^k + \alpha_m^k + \theta_k^l) \Delta x - \cos(\alpha_0^k + \alpha_m^k + \theta_k^l) \Delta y,$$

$$[0329] \quad \bullet \frac{\partial h_k^l(\bar{\rho})}{\partial \alpha_m^k} = -\sin(\alpha_0^k + \alpha_m^k + \theta_k^l) [v_{h,x}^{vcs} - \omega \Delta y] + \cos(\alpha_0^k + \alpha_m^k + \theta_k^l) [v_{h,y}^{vcs} + \omega \Delta x], \text{ otherwise } \frac{\partial h_k^l(\bar{\rho})}{\partial \alpha_m^k} = 0.$$

[0330] 基于此雅可比矩阵,可以用以下形式近似Hessian矩阵:

$$[0331] \quad J(\bar{\rho})^T J(\bar{\rho}) = \begin{bmatrix} H_{11} & \cdots & H_{1(M+3)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ * & \cdots & H_{(M+3)(M+3)} \end{bmatrix}$$

[0332] 其中:

$$[0333] \quad H_{ij} = \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{l=1}^{N_k} \left[\frac{\partial h_k^l}{\partial \rho_i} \frac{\partial h_k^l}{\partial \rho_j} \right] \right\}$$

[0334] 此外,对于优化法,可能需要矩阵

$$[0335] \quad J(\bar{\rho})^T f(\hat{r} + h(\bar{\rho}))$$

[0336] 并且其可以被计算为:

$$[0337] \quad J(\bar{\rho})^T f(\hat{r} + h(\bar{\rho})) = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{l=1}^{N_k} \left[\frac{\partial h_k^l}{\partial \rho_1} (i_k^l + h_k^l) \right] \right\} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{l=1}^{N_k} \left[\frac{\partial h_k^l}{\partial \rho_{(3+\sum_{j=1}^M N_j)}} (i_k^l + h_k^l) \right] \right\} \end{bmatrix}$$

[0338] 在下文中,将描述3D情况。

[0339] 在3D情况下,距离变化率方程可以具有以下形式:

$$[0340] \quad \begin{aligned} -\dot{r} &= \cos \theta \sin \varphi v_{s,x}^{scs} + \sin \theta \cos \varphi v_{s,y}^{scs} - \sin \varphi v_{s,z}^{scs} \\ &= [\cos \theta \sin \varphi \quad \sin \theta \cos \varphi \quad -\sin \varphi] \begin{bmatrix} v_{s,x}^{scs} \\ v_{s,y}^{scs} \\ v_{s,z}^{scs} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

[0341] 其中:

[0342] • $[v_{s,x}^{scs} \quad v_{s,y}^{scs} \quad v_{s,z}^{scs}]^T$ 可以是在传感器坐标系(SCS)中的传感器速度。

[0343] • θ 可以是检测的方位角,

[0344] • φ 可以是检测的仰角。

[0345] 在这种情况下,可以假定雷达取向为3D,因此它可以具有偏航角、俯仰角和滚转角:

$$[0346] \quad \bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_r \\ \alpha_p \\ \alpha_y \end{bmatrix}$$

[0347] 同样,在这种情况下,实际取向可以是校准后的取向和失准的总和:

$$[0348] \quad \bar{\alpha} = \bar{\alpha}_0 + \bar{\alpha}_m = \begin{bmatrix} \alpha_{0,r} \\ \alpha_{0,p} \\ \alpha_{0,y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{m,r} \\ \alpha_{m,p} \\ \alpha_{m,y} \end{bmatrix}$$

[0349] 考虑到此取向,距离变化率可以由VCS中的传感器速度通过以下方程表示:

$$[0350] \quad -\dot{r} = [\cos \theta \sin \varphi \quad \sin \theta \cos \varphi \quad -\sin \varphi] R(\bar{\alpha})^T \begin{bmatrix} v_{s,x}^{vcs} \\ v_{s,y}^{vcs} \\ v_{s,z}^{vcs} \end{bmatrix}$$

[0351] 其中

[0352] • $[v_{s,x}^{vcs} \quad v_{s,y}^{vcs} \quad v_{s,z}^{vcs}]^T$ 可以是在车辆坐标系(VCS)中的传感器速度。

[0353] • $R(\bar{\alpha})$ 可以通过围绕轴按以下顺序旋转而获得的旋转3D矩阵:OZ、OY、OX。为了简化计算,以下假设可以是合理的:

$$[0354] \quad \alpha_{m,r} \approx 0,$$

$$[0355] \quad \alpha_{0,r} = 0,$$

$$[0356] \quad v_{s,z}^{vcs} \approx 0.$$

[0357] 应理解的是,第一假设中的点可以代表r和/或p和/或y。

[0358] 那么旋转矩阵可以具有以下形式:

$$[0359] \quad R(\bar{\alpha}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

[0360] 其中:

$$[0361] \quad \bullet r_{11} = \cos \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \sin \alpha_{0,p},$$

$$[0362] \quad \bullet r_{21} = -(\sin \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \cos \alpha_{0,p}) (\cos \alpha_{p,0} \cos \alpha_{m,p} \sin \alpha_{0,p}),$$

$$[0363] \quad \bullet r_{31} = \sin \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \cos \alpha_{0,p},$$

$$[0364] \quad \bullet r_{12} = (\sin \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \cos \alpha_{0,p}) \cos \alpha_{m,r} (\cos \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \sin \alpha_{0,y}) (\sin \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \cos \alpha_{0,p}),$$

$$[0365] \quad \bullet r_{22} = (\cos \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \sin \alpha_{0,y}) \cos \alpha_{m,r} (\sin \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \cos \alpha_{0,y}) (\sin \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \cos \alpha_{0,p}),$$

$$[0366] \quad \bullet r_{32} = -\cos \alpha_{m,r} (\cos \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \sin \alpha_{0,p}),$$

$$[0367] \quad \bullet r_{13} = (\sin \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \cos \alpha_{0,p}) \cos \alpha_{m,r} (\cos \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \sin \alpha_{0,y}) (\sin \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \cos \alpha_{0,p}),$$

$$[0368] \quad \bullet r_{23} = -\cos \alpha_{m,r} (\cos \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \sin \alpha_{0,y}) + (\sin \alpha_{0,y} \cos \alpha_{m,y} \cos \alpha_{0,p}) (\sin \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \cos \alpha_{0,p}),$$

$$[0369] \quad \bullet r_{33} = \cos \alpha_{0,p} \cos \alpha_{m,p} \sin \alpha_{0,p}.$$

[0370] 对所有这些方程求和,距离变化率方程可以写为:

$$[0371] \quad -\dot{r} = v_{s,x}^{vcs} (\cos \theta \cos \varphi r_{11} + \sin \theta \cos \varphi r_{21} - \sin \varphi r_{31}) + v_{h,y}^{vcs} (\cos \theta \cos \varphi r_{12} + \sin \theta \cos \varphi r_{22} - \sin \varphi r_{32})$$

[0372] 考虑到来自所有雷达的所有检测结果,可以提出一个优化问题来查找宿主速度和

雷达失准角度(这可能与上述2D情况相似):

$$[0373] \quad -\dot{\bar{r}} = \mathbf{h}(\bar{\gamma})$$

[0374] 其中:

$$[0375] \quad \bar{\gamma} = \begin{bmatrix} v_{hx}^{vcs} \\ v_{hy}^{vcs} \\ \omega \\ \alpha_{m,y}^1 \\ \alpha_{m,p}^1 \\ \alpha_{m,r}^1 \\ \alpha_{m,y}^2 \\ \vdots \\ \alpha_{m,p}^M \\ \alpha_{m,r}^M \end{bmatrix}$$

[0376] 如上所述,这可以通过使用高斯-牛顿方法的非线性最小二乘法来求解,为此,可以以下形式提供雅可比矩阵:

$$[0377] \quad J(\bar{\gamma}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1^1(\bar{\gamma})}{\partial v_{hx}^{vcs}} & \dots & \frac{\partial h_1^1(\bar{\gamma})}{\partial \alpha_m^M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_{NM}^M(\bar{\gamma})}{\partial v_{hx}^{vcs}} & \dots & \frac{\partial h_{NM}^M(\bar{\gamma})}{\partial \alpha_m^M} \end{bmatrix}$$

[0378] 其中:

$$[0379] \quad \bullet \frac{\partial h(\nu)}{\partial v_{sx}^{vcs}} = \cos \theta_i \cos \varphi_i (c_{\alpha_{y,0}} - \alpha_{y,m} s_{\alpha_{y,0}}) + \sin \theta_i \cos \varphi_i (-(s_{\alpha_{y,0}} + \alpha_{y,m} c_{\alpha_{y,0}})(c_{\alpha_{p,0}} - \alpha_{p,m} s_{\alpha_{p,0}})) - \sin \varphi_i (s_{\alpha_{p,0}} + \alpha_{p,m} c_{\alpha_{p,0}}),$$

$$[0380] \quad \bullet \frac{\partial h(\nu)}{\partial v_{sy}^{vcs}} = \cos \theta_i \cos \varphi_i ((s_{\alpha_{y,0}} + \alpha_{y,m} c_{\alpha_{y,0}}) + \alpha_{r,m} (c_{\alpha_{y,0}} - \alpha_{y,m} s_{\alpha_{y,0}})(s_{\alpha_{p,0}} + \alpha_{p,m} c_{\alpha_{p,0}})) + \sin \theta_i \cos \varphi_i ((c_{\alpha_{y,0}} - \alpha_{y,m} s_{\alpha_{y,0}}) - \alpha_{r,m} (s_{\alpha_{y,0}} + \alpha_{y,m} c_{\alpha_{y,0}})(s_{\alpha_{p,0}} + \alpha_{p,m} c_{\alpha_{p,0}})) + \sin \varphi_i (\alpha_{r,m} (c_{\alpha_{p,0}} - \alpha_{p,m} s_{\alpha_{p,0}})),$$

$$[0381] \quad \bullet \frac{\partial h(\nu)}{\partial \omega} = \Delta x \frac{\partial h(\nu)}{\partial v_{sx}^{vcs}} - \Delta y \frac{\partial h(\nu)}{\partial v_{sy}^{vcs}},$$

$$[0382] \quad \bullet \frac{\partial h(\nu)}{\partial \alpha_{y,m}^i} = -(v_{sx}^{vcs} - \Delta y \omega) [c_1 s_{\alpha_{y,0}^i} + c_2 c_{\alpha_{y,0}^i} (c_{\alpha_{y,0}^i} - \alpha_{p,m}^i s_{\alpha_{p,0}^i})] + (v_{sy}^{vcs} + \Delta x \omega) [c_1 (c_{\alpha_{y,0}^i} - s_{\alpha_{y,0}^i} (s_{\alpha_{p,0}^i} + \alpha_{p,m}^i c_{\alpha_{p,0}^i})) - c_2 (s_{\alpha_{y,0}^i} + \alpha_{r,m}^i c_{\alpha_{y,0}^i} (s_{\alpha_{y,0}^i} + \alpha_{p,m}^i c_{\alpha_{p,0}^i}))],$$

$$[0383] \quad \bullet \frac{\partial h(\nu)}{\partial \alpha_{p,m}^i} = (v_{sx}^{vcs} - \Delta y \omega) [c_2 \alpha_{p,0}^i (s_{\alpha_{y,0}^i} - \alpha_{y,m}^i c_{\alpha_{y,0}^i}) + c_3 c_{\alpha_{p,0}^i}] + (v_{sy}^{vcs} + \Delta x \omega) [c_1 c_{\alpha_{p,0}^i} \alpha_{r,m}^i (c_{\alpha_{y,0}^i} - \alpha_{y,m}^i s_{\alpha_{y,0}^i}) + c_2 \alpha_{r,m}^i c_{\alpha_{p,0}^i} (s_{\alpha_{y,0}^i} - \alpha_{y,m}^i c_{\alpha_{y,0}^i}) + c_3 \alpha_{r,m}^i c_{\alpha_{p,0}^i}],$$

$$[0384] \quad \bullet \frac{\partial h(\nu)}{\partial \alpha_{r,m}^i} = (v_{sx}^{vcs} + \Delta x \omega) [c_1 (c_{\alpha_{y,0}^i} - \alpha_{y,m}^i s_{\alpha_{y,0}^i}) (s_{\alpha_{p,0}^i} + \alpha_{p,0}^i c_{\alpha_{p,0}^i}) - c_2 (s_{\alpha_{y,0}^i} + \alpha_{y,m}^i c_{\alpha_{y,0}^i}) (s_{\alpha_{p,0}^i} + \alpha_{p,m}^i c_{\alpha_{p,0}^i})] - c_3 (c_{\alpha_{p,0}^i} - \alpha_{p,m}^i s_{\alpha_{p,0}^i}).$$

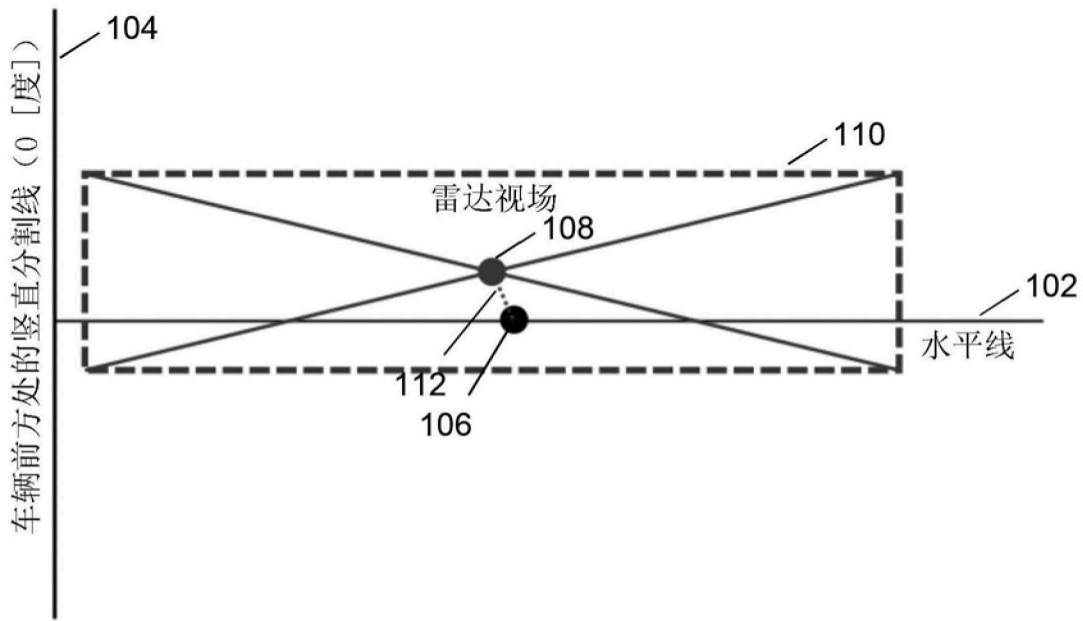


图1A

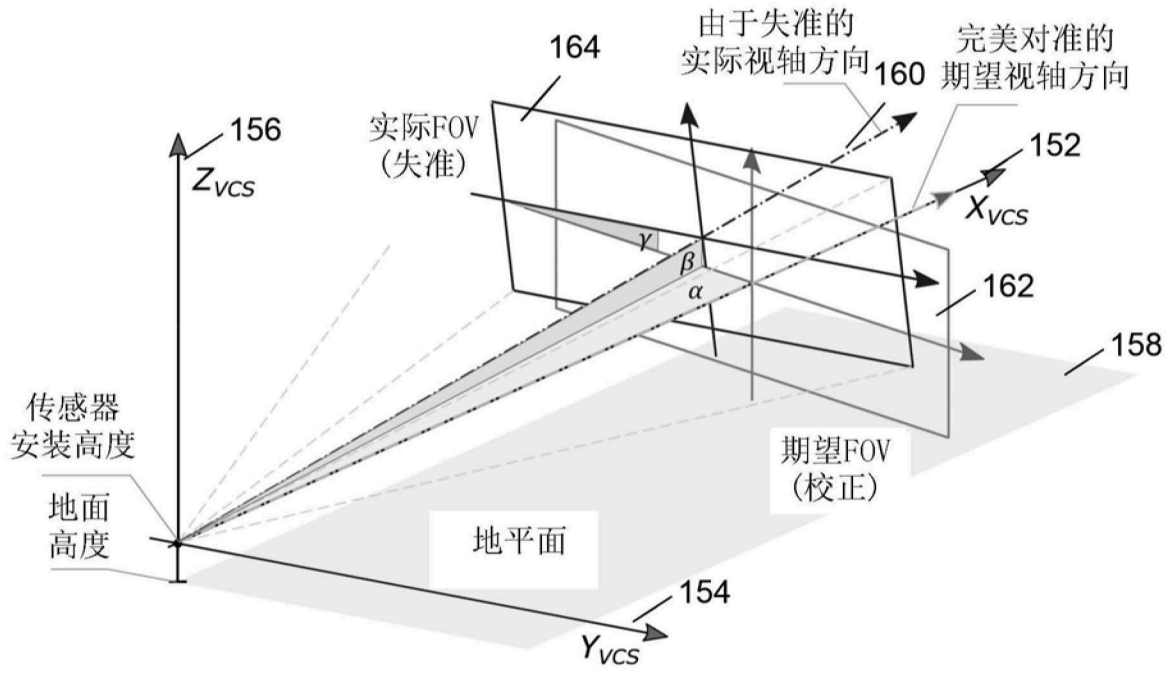


图1B

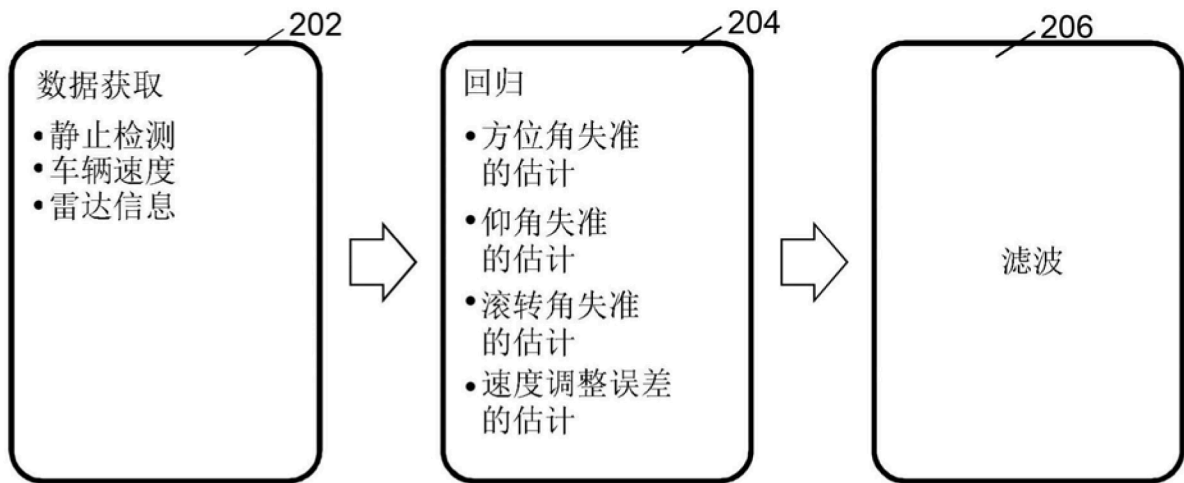


图2

300

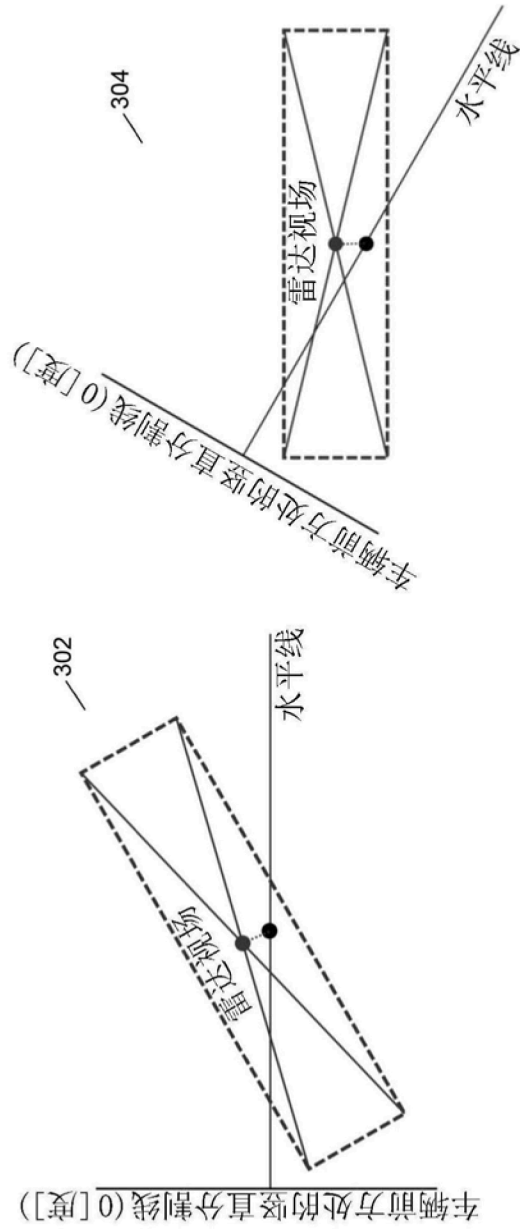


图3

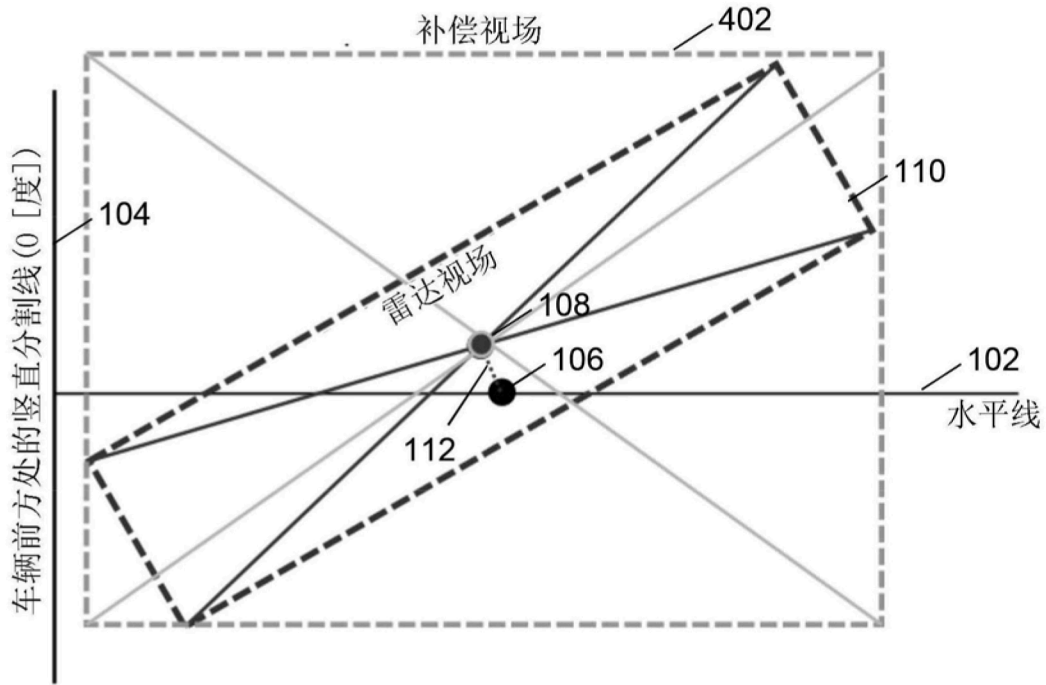


图4

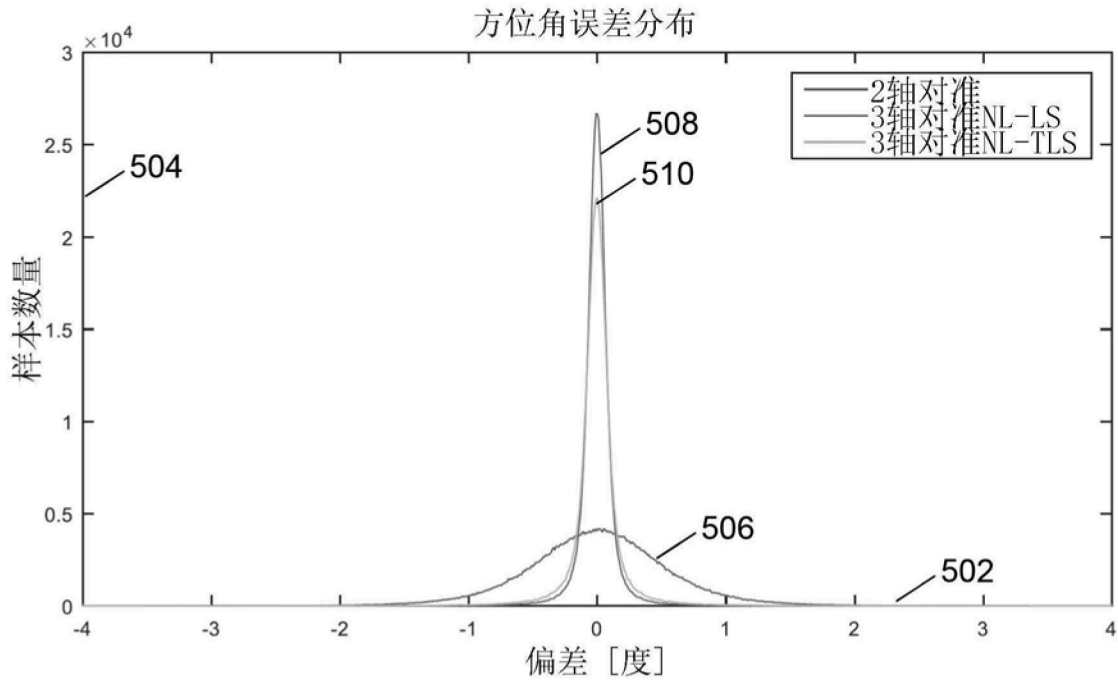


图5

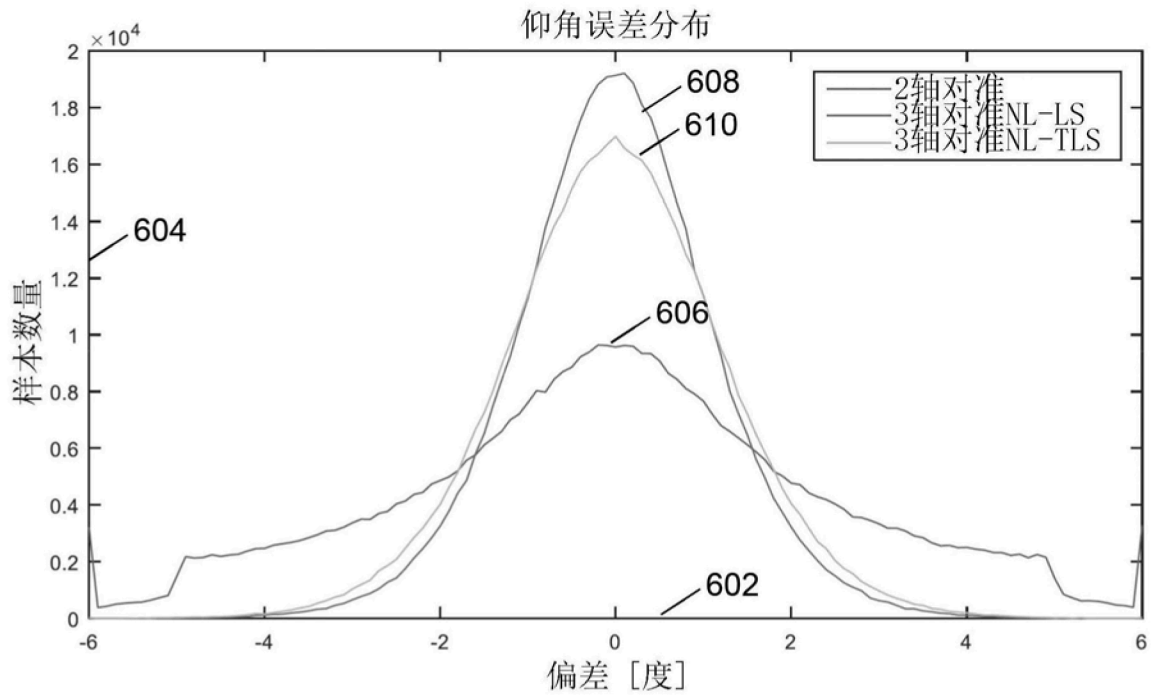


图6

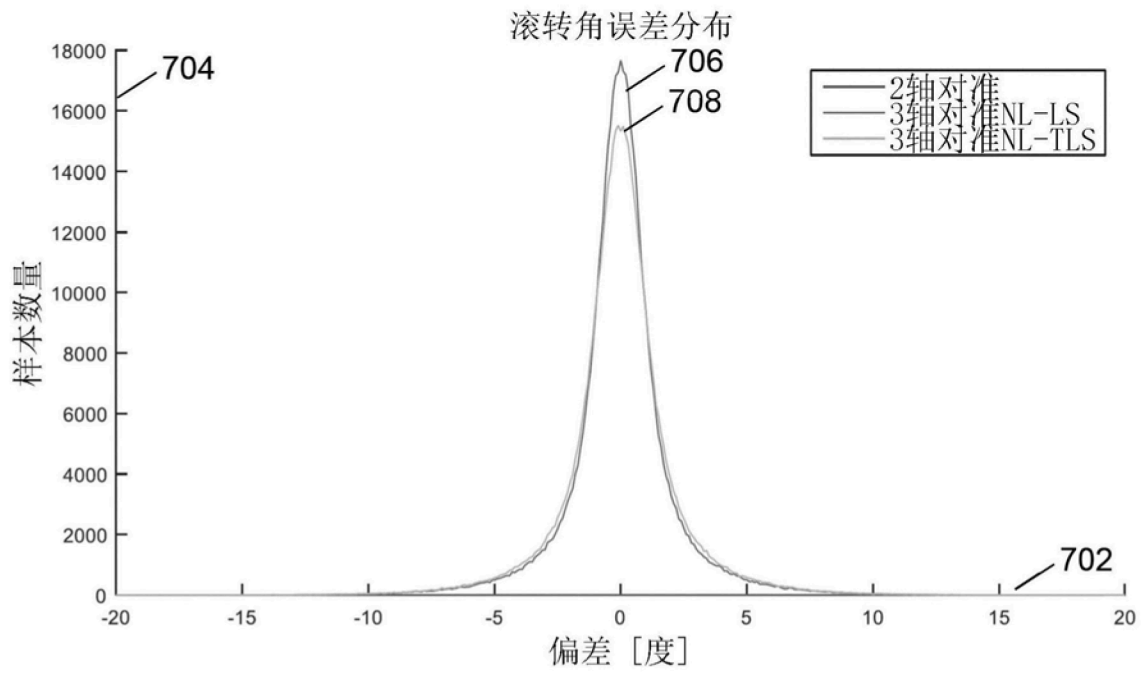


图7

800

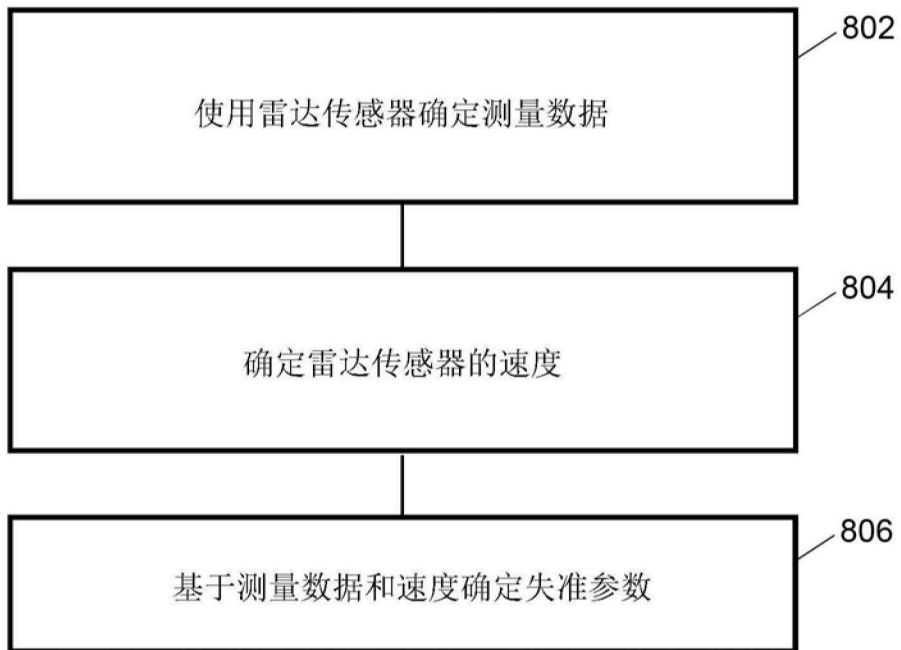


图8

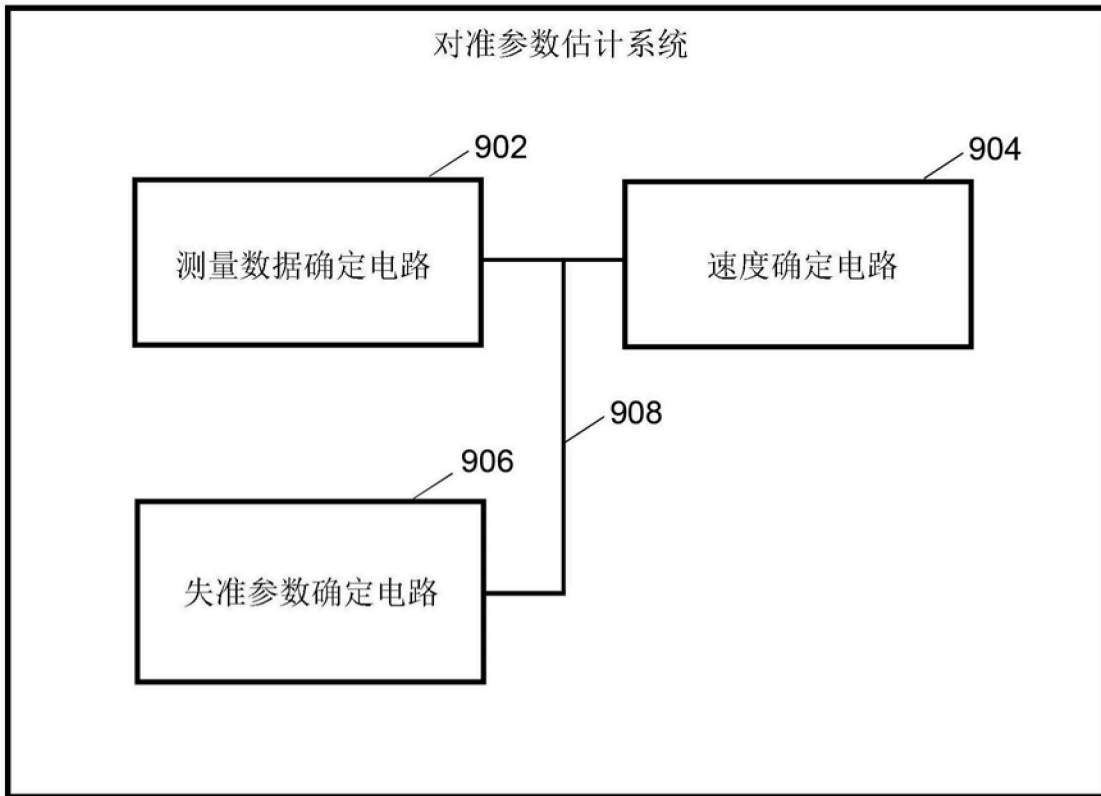


图9

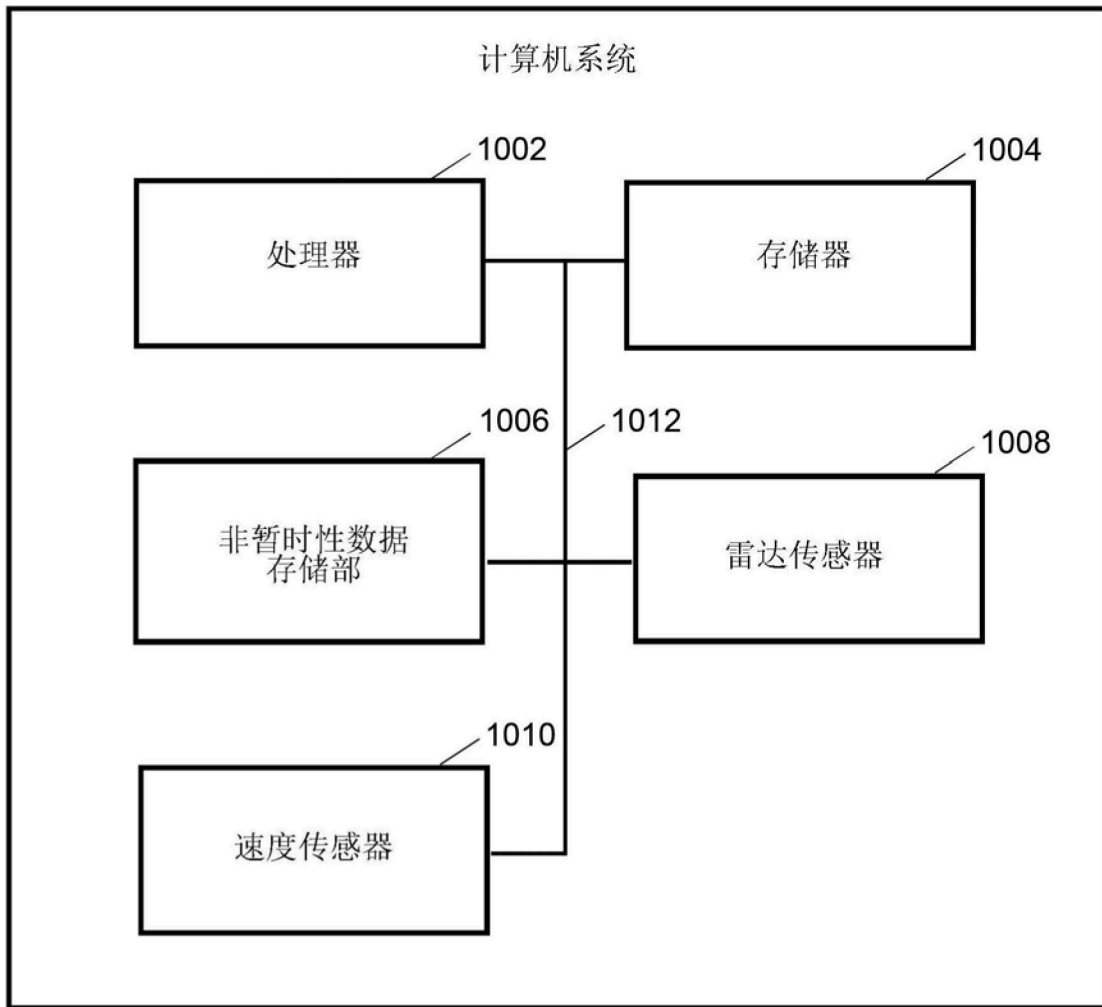


图10

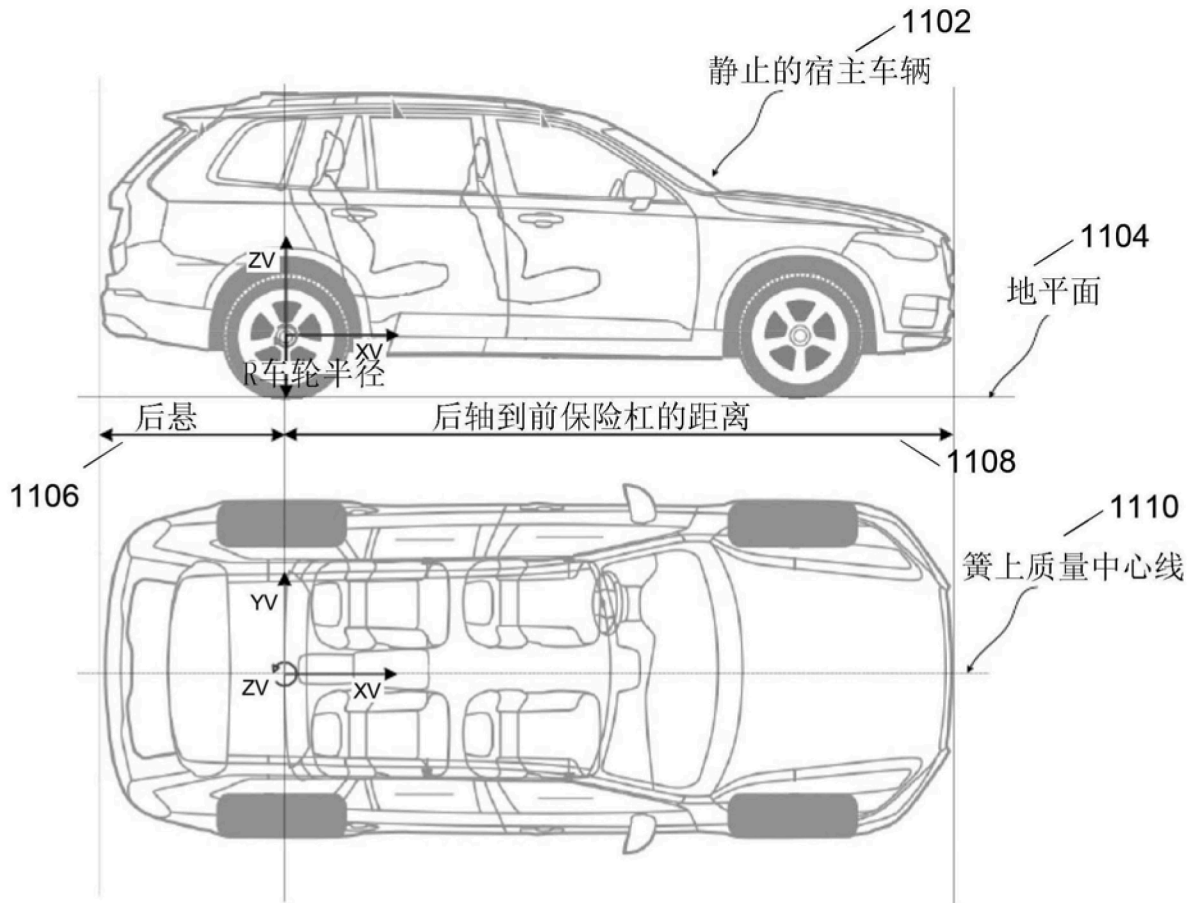


图11

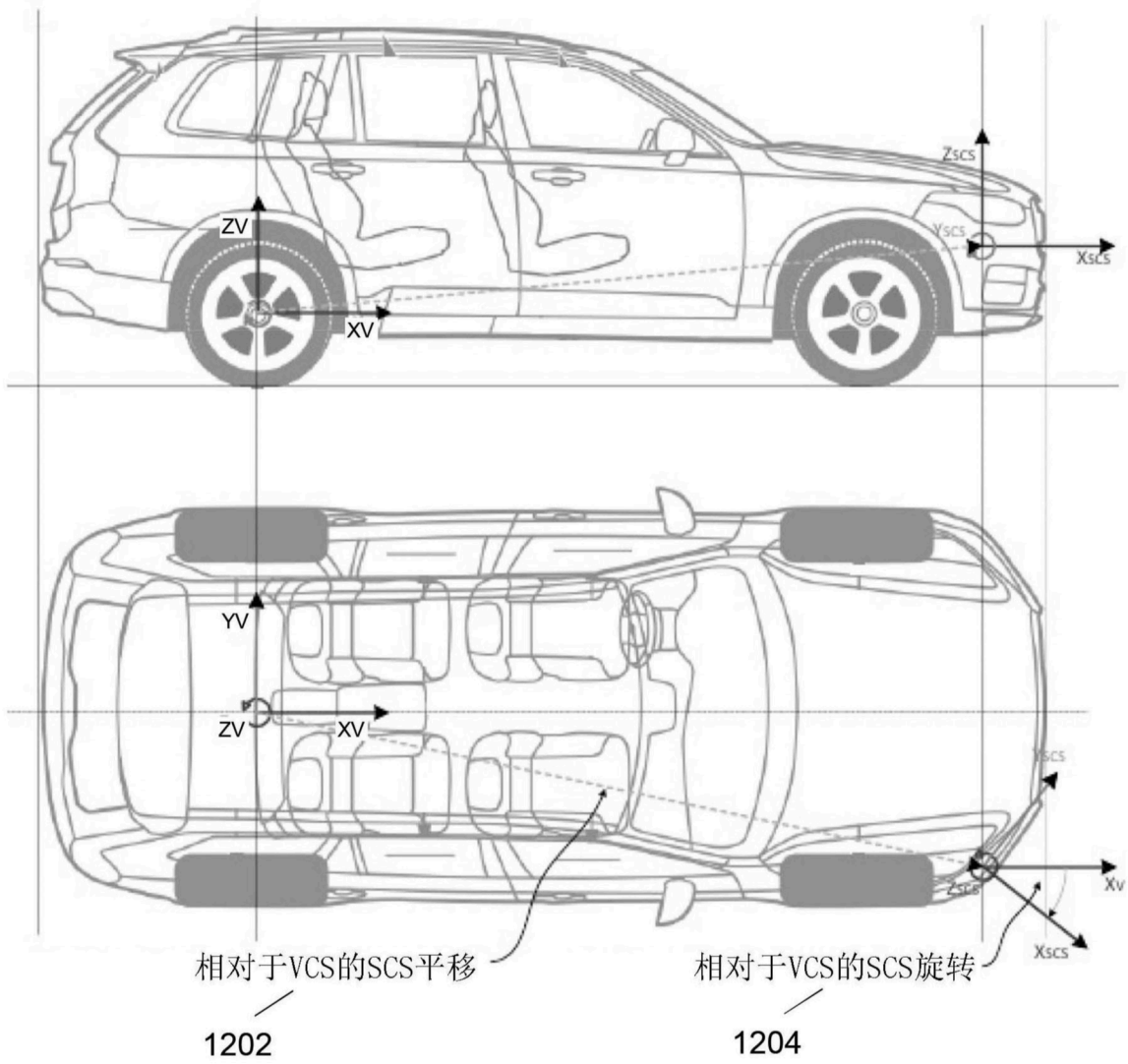


图12

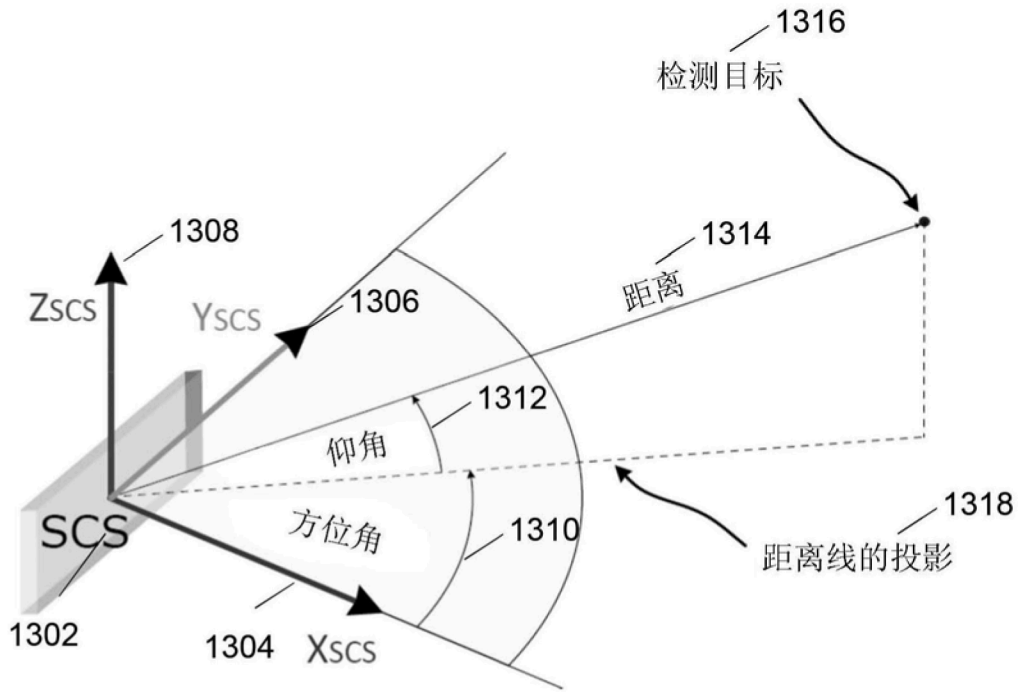


图13