



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114814762 B

(45) 授权公告日 2025. 02. 07

(21) 申请号 202210106053.6

(22) 申请日 2022.01.28

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114814762 A

(43) 申请公布日 2022.07.29

(30) 优先权数据
21154386.3 2021.01.29 EP

(73) 专利权人 APTIV技术股份公司
地址 瑞士沙夫豪森

(72) 发明人 S·莱斯曼 U·伊乌格尔
W·多尔

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127
专利代理师 师玮 王小东

(51) Int.Cl.

G01S 7/41 (2006.01)

G01S 13/931 (2020.01)

(56) 对比文件

US 2020174096 A1, 2020.06.04

审查员 崔萌

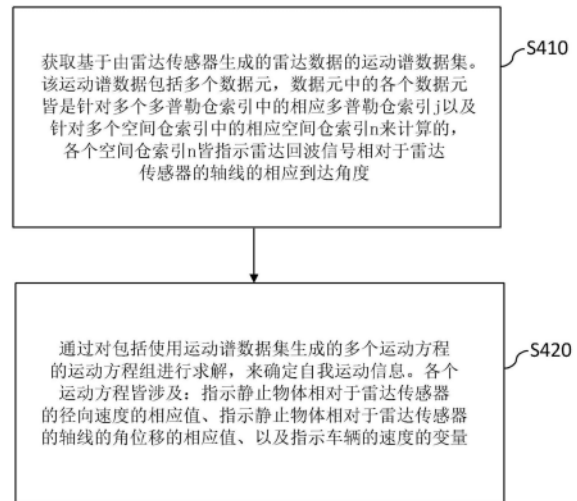
权利要求书7页 说明书26页 附图14页

(54) 发明名称

用于车辆自我运动估计的雷达数据处理

(57) 摘要

用于车辆自我运动估计的雷达数据处理。提供了一种确定包括具有多个天线振子的雷达传感器的车辆的自我运动信息的方法,所述方法包括以下步骤:获取(S410)包括多个数据元的运动谱数据,各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引计算的,各个空间仓索引指示在雷达传感器处的雷达回波信号的相应到达角;以及通过对包括使用运动谱数据生成的运动方程的运动方程组进行求解来确定(S420)自我运动信息,并且该运动方程涉及指示径向速度的相应值、指示角位移的相应值、以及指示车辆的速度的变量。



1. 一种确定车辆(30)的自我运动信息的方法,所述车辆(30)包括具有多个天线振子的雷达传感器(20),所述方法包括以下步骤:

接收(S10)雷达数据(R),所述雷达数据包括在所述雷达传感器(20)的所述天线振子中的各个天线振子处接收到的多个雷达回波信号中的各个雷达回波信号的相应多个数据样本;

对所述数据样本进行处理(S20),以针对所述天线振子中的各个天线振子生成包括以下项中的一个的相应的经多普勒处理的数据(D):

多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个距离仓索引中的相应距离仓索引(i)以及针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(j)来计算的;以及

多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(j)来计算的;

获取基于由所述雷达传感器(20)生成的雷达数据的运动谱数据集,所述运动谱数据集包括多个数据元,所述数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(j)以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引(n)计算的,各个空间仓索引(n)指示雷达回波信号相对于所述雷达传感器(20)的轴线的相应到达角,

其中,通过针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引(j)执行以下处理来获取(S30)所述运动谱数据集(S):

选择(S30-1)所述经多普勒处理的数据的已针对该多普勒仓索引(j)计算出的数据值;

使用针对该多普勒仓索引(j)选择的所述数据值来计算(S30-2)协方差矩阵;以及

应用(S30-3)谱估计算法,所述谱估计算法使用所述协方差矩阵,以针对该多普勒仓索引(j)来确定所述多个空间仓索引中的各个空间仓索引的相应空间谱值;以及

通过对包括使用所述运动谱数据集生成的多个运动方程的运动方程组求解来确定所述自我运动信息,各个运动方程涉及指示静止对象(40)相对于所述雷达传感器(20)的径向速度的相应值、指示所述静止对象(40)相对于所述雷达传感器(20)的轴线的角位移的相应值、以及指示所述车辆(30)的速度的变量。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,各个运动方程具有以下形式:

$$d = (-1_y \cos(\theta + \theta_M) + 1_x \sin(\theta + \theta_M)) \omega + \cos(\theta + \theta_M) v_x + \sin(\theta + \theta_M) v_y$$

其中,d指示所述静止对象(40)的径向速度,

θ 指示所述静止对象(40)相对于所述雷达传感器(20)的轴线的角位移,

θ^M 指示所述雷达传感器(20)的安装角度,所述安装角度是所述雷达传感器(20)的轴线与所述车辆(30)的车辆坐标系的轴线之间的角度,

1_x 指示所述雷达传感器(20)沿着所述车辆坐标系的X轴的安装位置,并且 1_y 指示所述雷达传感器(20)沿着所述车辆坐标系的Y轴的安装位置,

v_x 指示所述车辆(30)的速度的X分量,并且 v_y 指示所述车辆(30)的所述速度的Y分量,

ω 指示所述车辆(30)的偏航率,并且

所述自我运动信息包括 v_x 、 v_y 及 ω 的值。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,在所述车辆(30)上的K个不同位置处安装有K个雷达传感器(20),各个雷达传感器具有多个天线振子,其中,K是大于或等于2的整数,并且其中,针对所述K个雷达传感器中的各个雷达传感器获取相应运动谱数据集(S),各个相应运

动谱数据集(S)是基于由所述雷达传感器(20)生成的雷达数据的,并且其中,确定所述自我运动信息的步骤包括:通过求解以下运动方程组来估计 v_x 、 v_y 及 ω 的值:

$$D=H \cdot E$$

$$\text{其中, } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_2 \mathbf{L}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_K \mathbf{T}_K \mathbf{L}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \omega \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix},$$

$\mathbf{d}_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k=1, 2, \dots, K$, 其中,F是等于或大于1的整数,并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第k雷达传感器(20)获取的第k运动谱数据集(S)中的F个相应多普勒仓索引相对应的F个径向速度值,

其中, \mathbf{M}_k 是包含第k运动谱数据集(S)中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, $k=1, 2, \dots, K$,其中,U是大于或等于一的正整数,并且F和U的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的,其中, \mathbf{M}_k 的各个行索引对应于第k运动谱数据集(S)中的相应多普勒仓索引,并且 \mathbf{M}_k 的各个列索引对应于第k运动谱数据集(S)中的相应空间仓索引,其中, \mathbf{M}_k 的各个行包括第k运动谱数据集(S)中的对应多普勒仓索引的数据元,

$$\text{其中, } \mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, k=1, 2, \dots, K,$$

其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 指示分别与第k运动谱数据集(S)中的U个空间仓索引相对应的U个角度值, $u=1, 2, \dots, U$,并且其中, θ_k^M 指示第k雷达传感器(20)的安装角度,所述安装角度是第k雷达传感器(20)的轴线与所述车辆(30)的车辆坐标系的轴线之间的角度,

$$\text{其中, } \mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} -l_k^y & 1 & 0 \\ l_k^x & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{是第k雷达传感器(20)的模型矩阵, } k=1, 2, \dots, K, \text{ 其中, } l_k^x$$

指示第k雷达传感器(20)沿着所述车辆坐标系的X轴的安装位置,并且 l_k^y 指示第k雷达传感器(20)沿着所述车辆坐标系的Y轴的安装位置。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,各个运动方程由下式给出:

$$d = \cos(\theta + \theta^M) v_x^s + \sin(\theta + \theta^M) v_y^s$$

其中,d指示所述静止对象(40)的径向速度,

θ 指示所述静止对象(40)相对于所述雷达传感器(20)的轴线的角位移,

θ^M 指示所述雷达传感器(20)的轴线与所述车辆(30)的车辆坐标系的轴线之间的角度,

v_x^s 指示所述雷达传感器(20)的速度的X分量,并且 v_y^s 指示所述雷达传感器(20)的速度的Y分量,

所述自我运动信息包括当所述车辆(30)的偏航率为零时设定值 $v_x = v_x^s$ 和 $v_y = v_y^s$,其中, v_x 指示所述车辆(30)的速度的X分量,并且 v_y 指示所述车辆(30)的速度的Y分量,

其中,在所述车辆(30)上的K个不同位置处安装有K个雷达传感器(20),各个雷达传感器具有多个天线振子,其中,K是大于或等于1的整数,并且其中,针对所述K个雷达传感器中的各个雷达传感器获取相应运动谱数据集(S),各个相应运动谱数据集是基于由所述雷达

传感器 (20) 生成的雷达数据的, 并且其中, 确定所述自我运动信息的步骤包括: 估计 v_x^s 和 v_y^s 的值, 并且设定 $v_x = v_x^s$ 并且 $v_y = v_y^s$, 其中, 估计 v_x^s 和 v_y^s 的值的步骤包括: 求解以下运动方程组:

$$D=H \cdot E$$

$$\text{其中, } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_K \mathbf{T}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} v_x^s \\ v_y^s \end{bmatrix},$$

$\mathbf{d}_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k=1, 2, \dots, K$, 其中, F 是等于或大于 1 的整数, 并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第 k 雷达传感器 (20) 获取的第 k 运动谱数据集 (S) 中的, 个相应多普勒仓索引相对应的, 个径向速度值,

其中, \mathbf{M}_k 是包含第 k 运动谱数据集 (S) 中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, $k=1, 2, \dots, K$, 其中, U 是大于或等于 1 的整数, 并且 F 和 U 的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的, 其中, \mathbf{M}_k 的各个行索引对应于第 k 运动谱数据集 (S) 中的相应多普勒仓索引, 并且 \mathbf{M}_k 的各个列索引对应于第 k 运动谱数据集 (S) 中的相应空间仓索引, 其中, \mathbf{M}_k 的各个行包括第 k 运动谱数据集 (S) 中的对应多普勒仓索引的数据元,

$$\text{其中, } \mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 指示分别与第 k 运动谱数据集中的 U 个空间仓索引相对应的 U 个角度值, $u=1, 2, \dots, U$, 其中, θ_k^M 指示第 k 雷达传感器的安装角度, 所述安装角度是第 k 雷达传感器 (20) 的轴线与所述车辆 (30) 的车辆坐标系的轴线之间的角度。

5. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 各个运动方程由下式给出:

$$d = (-l_y \cos(\theta + \theta^M) + l_x \sin(\theta + \theta^M)) \omega + \cos(\theta + \theta^M) v_x$$

其中, d 指示所述静止对象 (40) 的径向速度,

θ 指示所述静止对象 (40) 相对于所述雷达传感器 (20) 的轴线的角位移,

θ^M 指示所述雷达传感器 (20) 的轴线与所述车辆 (30) 的车辆坐标系的轴线之间的角度,

l_x 指示所述雷达传感器 (20) 沿着所述车辆坐标系的 X 轴的安装位置, 并且 l_y 指示所述雷达传感器 (20) 沿着所述车辆坐标系的 Y 轴的安装位置,

ω 指示所述车辆 (30) 的偏航率,

v_x 是所述车辆 (30) 的速度的 X 分量,

其中, 所述自我运动信息包括 ω 和 v_x 的值,

其中, 在所述车辆 (30) 上的 K 个不同位置处安装有 K 个雷达传感器 (20), 各个雷达传感器具有多个天线振子, 其中, K 是大于或等于 1 的整数, 其中, 针对所述 K 个雷达传感器中的各个雷达传感器获取相应运动谱数据集 (S), 各个相应运动谱数据集是基于由所述雷达传感器 (20) 生成的雷达数据的, 并且其中, 确定所述自我运动信息的步骤包括: 通过求解以下运动方程组来估计 ω 和 v_x 的值:

$$D=H \cdot E$$

$$\text{其中, } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_K \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_2 \mathbf{L}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_K \mathbf{T}_K \mathbf{L}_K \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \omega \\ v_x \end{bmatrix},$$

$\mathbf{d}_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k=1, 2, \dots, K$, 其中, F 是等于或大于 1 的整数, 并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第 k 雷达传感器 (20) 获取的第 k 运动谱数据集 (S) 中的 F 个相应多普勒仓索引相对应的 F 个径向速度值,

其中, \mathbf{M}_k 是包含第 k 运动谱数据集 (S) 中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, $k=1, 2, \dots, K$, 其中, U 是大于或等于 1 的整数, 并且 F 和 U 的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的, 其中, \mathbf{M}_k 的各个行索引对应于第 k 运动谱数据集 (S) 中的相应多普勒仓索引, 并且 \mathbf{M}_k 的各个列索引对应于第 k 运动谱数据集 (S) 中的相应空间仓索引, 其中, \mathbf{M}_k 的各个行包括第 k 运动谱数据集 (S) 中的对应多普勒仓索引的数据元,

$$\text{其中, } \mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, k=1, 2, \dots, K,$$

其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 指示分别与第 k 运动谱数据集 (S) 中的 U 个相应空间仓索引相对应的 U 个角度值, $u=1, 2, \dots, U$, 其中, θ_k^M 指示第 k 雷达传感器 (20) 的安装角度, 所述安装角度是第 k 雷达传感器 (20) 的轴线与所述车辆 (30) 的车辆坐标系的轴线之间的角度,

其中, $\mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} -l_k^y & 1 \\ l_k^x & 0 \end{bmatrix}$ 是第 k 雷达传感器 (20) 的模型矩阵, $k=1, 2, \dots, K$, 其中, l_k^y 指示第 k 雷达传感器 (20) 沿着所述车辆坐标系的 X 轴的安装位置, 并且 l_k^x 指示第 k 雷达传感器 (20) 沿着所述车辆坐标系的 Y 轴的安装位置。

6. 根据权利要求 3 至 5 中任一项所述的方法, 其中, 使用线性最小二乘估计法来求解所述运动方程组以确定所述自我运动信息。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其中, 所述自我运动信息是通过以下步骤来确定的:

从 K 个运动谱数据集 (S) 中的多普勒仓索引中随机选择多个多普勒仓索引子集;

针对所述多个多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引子集来执行以下处理:

通过将其中 $k=1, 2, \dots, K$ 的 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 设定成与第 k 运动谱数据集 (S) 中的处于所述多普勒仓索引子集中的相应多普勒仓索引相对应的径向速度值, 并且通过将 \mathbf{M}_k 的各个行设定成第 k 运动谱数据集 (S) 中的处于所述多普勒仓索引子集中的相应多普勒仓索引的数据元, 使用所述线性最小二乘估计法对所述运动方程组 $\mathbf{D} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{E}$ 进行求解, 来估计 (S320-1) 所述自我运动信息,

确定 (S320-2) 所述多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的估计误差; 以及

基于所确定的估计误差, 将所述多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引 (i) 归类 (S320-3) 为正常多普勒仓索引 (i) 和异常多普勒仓索引 (i) 中的一者;

基于以下项中的一个, 从所述多个多普勒仓索引子集中选择多普勒仓索引子集:

各个多普勒仓索引子集的正常多普勒仓索引的数量, 以及

各个多普勒仓索引子集的被确定的所有正常多普勒仓索引的所述估计误差的总和, 以

及

通过将其中 $k=1,2,\dots,K$ 的 $d_{k,1},d_{k,2},\dots,d_{k,F}$ 设定成与第 k 运动谱数据集(S)中的被归类为所选择的多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的相应多普勒仓索引相对应的径向速度值,并且还通过将其中 $k=1,2,\dots,K$ 的 M_k 的各个行设定成第 k 运动谱数据集(S)中的被归类为所选择的多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的相应多普勒仓索引的数据元,使用所述线性最小二乘估计法对所述运动方程组 $D=H \cdot E$ 进行求解,来确定所述自我运动信息。

8. 根据权利要求1所述的方法,其中,

所述经多普勒处理的数据(D)的所述数据值中的各个数据值是针对多个距离仓索引中的相应距离仓索引(i)以及针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(i)计算的,并且其中,针对各个多普勒仓索引(i)选择的所述数据值限定了包括针对R个天线振子和针对所述多普勒仓索引(i)的I个距离仓索引计算的数据值的 $R \times I$ 维矩阵,并且其中,所述协方差矩阵是使用所述 $R \times I$ 维矩阵和所述 $R \times I$ 维矩阵的共轭转置的乘积根据所述 $R \times I$ 维矩阵确定的 $R \times R$ 维矩阵,或者

所述经多普勒处理的数据(D)的所述数据值中的各个数据值是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(i)计算的,并且其中,针对各个多普勒仓索引(i)选择的所述数据值限定了包括针对R个天线振子和针对所述多普勒仓索引(i)的I个快时间索引计算的数据值的 $R \times I$ 维矩阵,并且其中,所述协方差矩阵是使用所述 $R \times I$ 维矩阵和所述 $R \times I$ 维矩阵的共轭转置的乘积根据所述 $R \times I$ 维矩阵确定的 $R \times R$ 维矩阵。

9. 根据权利要求1或8所述的方法,其中,生成(S30)所述运动谱数据集(S)的步骤还包括:将针对各个多普勒仓索引(i)确定的所述空间谱值归一化(S210),以生成相应多个归一化空间谱值,所述归一化空间谱值中的各个归一化空间谱值是针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(i)以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引(n)生成的。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中,生成所述运动谱数据集(S)的步骤还包括:

针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引(i),通过使用针对所述空间仓索引生成的所述归一化空间谱值作为所述空间仓索引的概率值,来计算(S220)这样的数据,即,所述数据指示所述雷达回波信号相对于所述雷达传感器(20)的轴线的到达角在由所述相应空间仓索引指示的到达角当中的概率分布的方差;以及

确定(S230)所述多个多普勒仓索引中的这样的多普勒仓索引子集,即,对于所述多普勒仓索引子集,所计算的方差低于预定阈值,

其中,所述运动谱数据集(S)中的各个数据元的值是基于与所述数据元相对应的、已针对所述多普勒仓索引子集中的多普勒仓索引(i)以及针对空间仓索引(n)生成的相应归一化空间谱值的。

11. 根据权利要求10所述的方法,其中,所述运动谱数据集(S)中的数据元的值是通过按以下步骤对针对所述多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引(i)生成的所述多个归一化空间谱值进行处理,来针对该多普勒仓索引(i)生成的:

识别(S240-1)这样的空间仓索引(n),即,对于该空间仓索引,所述归一化空间谱值在针对所述多个空间仓索引生成的所述归一化空间谱值当中是最高的;

将所识别的空间仓索引(n)的数据元的值设定(S240-2)成非零值;以及
将所有其它空间仓索引的数据元的值设定(S240-3)成零。

12. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述运动谱数据集(S)中的数据元的值是通过按以下步骤针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引(j)生成的所述多个归一化空间谱值进行处理,来针对该多普勒仓索引(j)生成的:

识别这样的空间仓索引(n),即,对于该空间仓索引,所述归一化空间谱值在针对所述多个空间仓索引生成的所述归一化空间谱值当中是最高的;

将所识别的空间仓索引(n)的数据元的值设定成非零值;以及
将所有其它空间仓索引的数据元的值设定成零。

13. 根据权利要求9所述的方法,其中,确定所述自我运动信息的步骤包括:使用最小二乘平差法来求解所述运动方程组,

其中,所述最小二乘平差法执行迭代处理的至少一次迭代,其中,在所述迭代处理中的每次迭代中,计算所述自我运动信息的估计值的增量,以获得更新的估计值,所述更新的估计值是基于所述估计值和所述增量的并且被用于计算所述迭代处理的下一次迭代中的增量,

其中,所述增量是使用以下项来计算的:

所述运动谱数据集(S)的第一值集,所述第一值集中的各个值指示在由针对所述运动谱数据集(S)中的多普勒仓索引(j)的所述相应空间仓索引指示的到达角当中所述到达角的分布的方差,其中,所述第一值集中的各个值是使用与针对所述多普勒仓索引(j)的所述多个空间仓索引相对应的所述归一化空间谱值作为所述多个空间仓索引的相应概率值来计算的,以及

所述运动谱数据集(S)的第二值集,所述第二值集中的各个值指示在由针对所述运动谱数据集(S)中的空间仓索引(n)的所述相应多普勒仓索引指示的径向速度当中所述径向速度的分布的方差,其中,所述第二值集中的各个值是使用与针对所述空间仓索引(n)的所述多个多普勒仓索引相对应的所述归一化空间谱值作为所述多个多普勒仓索引的相应概率值来计算的。

14. 一种雷达数据处理设备,所述雷达数据处理设备被设置成确定包括具有多个天线振子的雷达传感器(20)的车辆(30)的自我运动信息,所述雷达数据处理设备(10)包括:

数据获取模块(2),所述数据获取模块被设置成接收雷达数据(R),所述雷达数据包括在所述雷达传感器(20)的所述天线振子中的各个天线振子处接收到的多个雷达回波信号中的各个雷达回波信号的相应多个数据样本;

多普勒处理模块(4),所述多普勒处理模块被设置成对所述数据样本进行处理,以针对所述天线振子中的各个天线振子生成包括以下项中的一个的相应的经多普勒处理的数据(D):

多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个距离仓索引中的相应距离仓索引(i)以及针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(j)来计算的;以及

多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(j)来计算的;

运动谱获取模块(6),所述运动谱获取模块被设置成获取基于由所述雷达传感器(20)

生成的雷达数据的运动谱数据集(S),所述运动谱数据集包括多个数据元,所述数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引(j)以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引(n)计算的,各个空间仓索引(n)指示雷达回波信号相对于所述雷达传感器(20)的轴线的相应到达角,

其中,所述运动谱获取模块(6)被设置成通过针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引(j)执行以下处理来获取所述运动谱数据集(S):

选择(S30-1)所述经多普勒处理的数据的已针对该多普勒仓索引(j)计算出的数据值;

使用针对该多普勒仓索引(j)选择的所述数据值来计算(S30-2)协方差矩阵;以及

应用(S30-3)谱估计算法,所述谱估计算法使用所述协方差矩阵,以针对该多普勒仓索引(j)来确定所述多个空间仓索引中的各个空间仓索引的相应空间谱值;以及

自我运动信息确定模块(8),所述自我运动信息确定模块被设置成通过对包括使用所述运动谱数据集(S)生成的多个运动方程的运动方程组进行求解,来确定所述自我运动信息,各个运动方程涉及指示静止对象(40)相对于所述雷达传感器(20)的径向速度的相应值、指示所述静止对象(40)相对于所述雷达传感器(20)的轴线的角位移的相应值、以及指示所述车辆(30)的速度的变量。

用于车辆自我运动估计的雷达数据处理

技术领域

[0001] 本文中的示例方面总体上涉及雷达数据处理领域,并且更具体地,涉及使用从已由雷达传感器生成的雷达数据导出的运动谱(motion spectrum)数据来确定具有该雷达传感器的车辆的自我运动(ego-motion)信息的方法。

背景技术

[0002] 在汽车工业中采用的许多感知算法需要关于车辆自我运动的信息,以便感知车辆的环境。因此,对稳定自我运动估计算法的要求是高级驾驶辅助系统(ADAS)和自动驾驶应用的重要部分。车辆的自我运动可以由惯性测量单元(IMU)进行测量或者使用由其它类型的传感器(诸如摄像机或雷达)获取的测量结果来进行估计。然而,当估计自我运动时,那些类型的测量结果经常遭受固有误差以及因使用异常(outlier)测量结果而出现的误差。

[0003] 在Kellner D.等人发表于2014IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)的文章“Instantaneous ego-motion estimation using multiple Doppler radars”中,将雷达探测用于估计行驶车辆的自我运动。该文章中的雷达探测是通过首先生成距离多普勒响应图并且另外对沿着天线维度(antenna dimension)的波束向量应用测角(angle-finding)算法来确定的,以便获得检测目标的角度信息。然后,在回归分析中使用针对检测到的目标获得的径向速度和角度信息来估计车辆自我运动信息。

发明内容

[0004] 使用雷达探测来估计自我运动信息的现有解决方案的一个问题是高度复杂的处理,该处理必须首先在距离多普勒域中执行检测,以识别距离域图中的具有高幅度检测值的单元(cell),并且然后对与所识别的单元相对应的波束向量附加地执行波束成形FFT,以获得三维距离多普勒角度域中的角度信息。而且,当只有少数探测可用时,无法准确地执行自我运动参数的估计。

[0005] 鉴于上述情况,根据本文的第一示例方面,设计了一种确定包括具有多个天线振子的雷达传感器的车辆(30)的自我运动信息的方法,所述方法包括以下步骤:获取基于由雷达传感器生成的雷达数据的运动谱数据集,该运动谱数据集包括多个数据元,所述数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引计算的,各个空间仓索引指示雷达回波信号相对于雷达传感器的轴线的相应到达角。所述方法还包括以下步骤:通过对包括使用所述运动谱数据集生成的多个运动方程的运动方程组进行求解,来确定所述自我运动信息,各个运动方程涉及:指示静止对象相对于雷达传感器的径向速度的相应值、指示静止对象相对于雷达传感器的轴线的角位移的相应值、以及指示车辆的速度的变量。运动方程组中指示径向速度的值可以是基于多普勒仓索引并且独立于雷达数据预先计算的,并且运动方程组中指示角位置的值可以是基于空间仓索引并且独立于雷达数据预先计算的。

[0006] 各个运动方程可以具有以下形式:

$$[0007] \quad d = (-l_y \cos(\theta + \theta_M) + l_x \sin(\theta + \theta_M)) \omega + \cos(\theta + \theta_M) v_x + \sin(\theta + \theta_M) v_y$$

[0008] 其中, d 指示静止对象的径向速度, θ 指示静止对象相对于雷达传感器的轴线的角位移, θ^M 指示雷达传感器的安装角度, 该安装角度是雷达传感器的轴线与车辆的车辆坐标系的轴线之间的角度, l_x 指示雷达传感器沿着车辆坐标系的X轴的安装位置, 并且 l_y 指示雷达传感器沿着车辆坐标系的Y轴的安装位置, v_x 指示车辆的速度的X分量, 并且 v_y 指示车辆的速度的Y分量, ω 指示车辆的偏航率, 并且自我运动信息包括 v_x 、 v_y 及 ω 的值。

[0009] 在以下实施方式中, 在车辆的K个不同位置处安装有K个雷达传感器, 各个雷达传感器具有多个天线振子, 其中, K是大于或等于2的整数, 并且其中, 相应运动谱数据集是针对K个雷达传感器中的各个雷达传感器, 基于由该雷达传感器生成的雷达数据来获取的, 确定自我运动信息的步骤可以包括: 通过求解以下运动方程组来估计 v_x 、 v_y 以及 ω 的值:

$$[0010] \quad D = H \cdot E$$

$$[0011] \quad \text{其中, } D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} M_1 T_1 L_1 \\ M_2 T_2 L_2 \\ \vdots \\ M_K T_K L_K \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \omega \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix}.$$

[0012] 在上面的运动方程组中, $d_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T$, $k=1, 2, \dots, K$, 其中, F是等于或大于1的整数, 并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第k雷达传感器获取的第k运动谱数据集中的F个相应多普勒仓索引相对应的F个径向速度值。

[0013] 而且, M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 是包含第k运动谱数据集中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, 其中, U是大于或等于一的整数, 并且F和U的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的, 其中, M_k 的各个行索引对应于第k运动谱数据集中的相应多普勒仓索引, 并且 M_k 的各个列索引对应于第k运动谱数据集中的相应空间仓索引, 其中, M_k 的各个行包括第k运动谱数据集中的对应多普勒仓索引的数据元,

$$[0014] \quad T_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

[0015] 其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ ($u=1, 2, \dots, U$) 指示分别与第k运动谱数据集中的U个空间仓索引相对应的U个角度值, 并且其中, θ_k^M 指示第k雷达传感器的安装角度, 该安装角度是第k雷达传感器的轴线与车辆的车辆坐标系的轴线之间的角度, 以及

$$[0016] \quad L_k = \begin{bmatrix} -l_k^y & 1 & 0 \\ l_k^x & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (k = 1, 2, \dots, K)$$

是第k雷达传感器的模型矩阵, 其中, l_k^x 指示

第k雷达传感器沿着车辆坐标系的X轴的安装位置, 并且 l_k^y 指示第k雷达传感器沿着车辆坐标系的Y轴的安装位置。

[0017] 在另选实施方式中, 各个运动方程可以由下式给出:

$$[0018] \quad d = \cos(\theta + \theta^M) v_x^s + \sin(\theta + \theta^M) v_y^s$$

[0019] 其中, d 指示静止对象的径向速度, θ 指示静止对象相对于雷达传感器的轴线的角位移, θ^M 指示雷达传感器的轴线与车辆的车辆坐标系的轴线之间的角度, v_x^s 指示雷达传感

器的速度的X分量, v_y^s 指示雷达传感器的速度的Y分量, 并且该自我运动信息包括当车辆的偏航率为零时设定值 $v_x = v_x^s$ 和 $v_y = v_y^s$, 其中, v_x 指示车辆的速度的X分量, 并且 v_y 指示车辆的速度的Y分量。

[0020] 在这个另选实施方式中, 当在车辆的K个不同位置处安装有K个雷达传感器时, 各个雷达传感器具有多个天线振子, 其中, K是大于或等于1的整数, 并且其中, 相应运动谱数据集是针对K个雷达传感器中的各个雷达传感器, 基于由该雷达传感器生成的雷达数据来获取的, 自我运动信息可以通过估计 v_x^s 和 v_y^s 的值以及设定 $v_x = v_x^s$ 和 $v_y = v_y^s$ 来确定, 其中, 估计 v_x^s 和 v_y^s 的值的步骤包括: 求解以下运动方程组:

$$[0021] \quad D = H \cdot E$$

$$[0022] \quad \text{其中, } D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} M_1 T_1 \\ M_2 T_2 \\ \vdots \\ M_K T_K \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} v_x^s \\ v_y^s \end{bmatrix}, \text{ 其中, } d_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k=1,$$

2, ..., K, 其中, F是等于或大于1的整数, 并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第k雷达传感器获取的第k运动谱数据集中的F个相应多普勒仓索引相对应的F个径向速度值,

[0023] M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 是包含第k运动谱数据集中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, 其中, U是大于或等于一的整数, 并且F和U的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的, 其中, M_k 的各个行索引对应于第k运动谱数据集中的相应多普勒仓索引, 并且 M_k 的各个列索引对应于第k运动谱数据集中的相应空间仓索引, 其中, M_k 的各个行包括第k运动谱数据集中的对应多普勒仓索引的数据元,

$$[0024] \quad T_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

[0025] 并且, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$, $u=1, 2, \dots, U$ 指示分别与第k运动谱数据集中的U个空间仓索引相对应的U个角度值, 其中, θ_k^M 指示第k雷达传感器的安装角度, 该安装角度是第k雷达传感器的轴线与车辆的车辆坐标系的轴线之间的角度。

[0026] 在另一另选实施方式中, 各个运动方程可以由下式给出:

$$[0027] \quad d = (-l_y \cos(\theta + \theta^M) + l_x \sin(\theta + \theta^M)) \omega + \cos(\theta + \theta^M) v_x$$

[0028] 其中, d指示静止对象的径向速度, θ 指示静止对象相对于雷达传感器的轴线的角位移, θ^M 指示雷达传感器的轴线与车辆的车辆坐标系的轴线之间的角度, l_x 指示雷达传感器沿着车辆坐标系的X轴的安装位置, 并且 l_y 指示雷达传感器沿着车辆坐标系的Y轴的安装位置, ω 指示车辆的偏航率, v_x 是车辆的速度的X分量, 该自我运动信息包括值 ω 和 v_x 。

[0029] 在该另一另选实施方式中, 当在车辆的K个不同位置处安装有K个雷达传感器时, 各个雷达传感器具有多个天线振子, 其中, K是大于或等于1的整数, 其中, 相应运动谱数据集是针对K个雷达传感器中的各个雷达传感器, 基于由该雷达传感器生成的雷达数据来获取的, 该自我运动信息可以通过对以下运动方程组进行求解以估计值 ω 和 v_x 来确定:

$$[0030] \quad D = H \cdot E$$

$$[0031] \quad \text{其中, } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_2 \mathbf{L}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_K \mathbf{T}_K \mathbf{L}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \omega \\ v_x \end{bmatrix}$$

[0032] $\mathbf{d}_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k=1, 2, \dots, K$, 其中, F 是等于或大于 1 的整数, 并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第 k 雷达传感器生成的第 k 运动谱数据集中的 F 个相应多普勒仓索引相对应的 F 个径向速度值,

[0033] $\mathbf{M}_k (k=1, 2, \dots, K)$ 是包含第 k 运动谱数据集中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, 其中, U 是大于或等于一的整数, 并且 F 和 U 的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的, 其中, \mathbf{M}_k 的各个行索引对应于第 k 运动谱数据集中的相应多普勒仓索引, 并且 \mathbf{M}_k 的各个列索引对应于第 k 运动谱数据集中的相应空间仓索引, 其中, \mathbf{M}_k 的各个行索引包括第 k 运动谱数据集中的对应多普勒仓索引的数据元,

$$[0034] \quad \mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, k=1, 2, \dots, K,$$

[0035] $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U} (u=1, 2, \dots, U)$ 指示分别与第 k 运动谱数据集中的 U 个相应空间仓索引相对应的 U 个角度值, 其中, θ_k^M 指示第 k 雷达传感器的安装角度, 该安装角度是第 k 雷达传感器的轴线与车辆的车辆坐标系的轴线之间的角度, 并且

$$[0036] \quad \mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} -l_k^y & 1 \\ l_k^x & 0 \end{bmatrix} (k=1, 2, \dots, K) \text{ 是第 } k \text{ 雷达传感器的模型矩阵, 其中, } l_k^x \text{ 指示第 } k$$

雷达传感器沿着车辆坐标系的 X 轴的安装位置, 并且 l_k^y 指示第 k 雷达传感器沿着车辆坐标系的 Y 轴的安装位置。

[0037] 在之前的实施方式中, 可以基于第 k 运动谱数据集中的 F 个相应多普勒仓索引并且独立于雷达数据来预先计算值 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$, 并且可以基于第 k 运动谱数据集中的 U 个相应空间仓索引并且独立于雷达数据来预先计算值 $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 。

[0038] 可以使用线性最小二乘估计法来对运动方程组进行求解, 以确定自我运动信息。该自我运动信息可以通过以下步骤来确定: 从 K 个运动谱数据集中的多普勒仓索引中随机选择多个多普勒仓索引子集; 针对所述多个多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引子集来执行以下处理: 通过将 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F} (k=1, 2, \dots, K)$ 设定成与第 k 运动谱数据集中的处于该多普勒仓索引子集中的相应多普勒仓索引相对应的径向速度值, 并且通过将 \mathbf{M}_k 的各个行设定成第 k 运动谱数据集中的处于该多普勒仓索引子集中的相应多普勒仓索引的数据元, 使用线性最小二乘估计法对运动方程组 $\mathbf{D} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{E}$ 进行求解, 来估计自我运动信息, 确定针对该多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的估计误差; 以及基于所确定的估计误差, 将该多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引归类为正常 (inlier) 多普勒仓索引和异常 (outlier) 多普勒仓索引中的一者。自我运动信息可以通过进一步执行以下处理来确定: 基于以下项中的一个从所述多个多普勒仓索引子集中选择多普勒仓索引子集: 各个多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的数量; 以及针对各个多普勒仓索引子集确定的所有正常多普勒仓索引的估计误差的总和; 以及通过将 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F} (k=1, 2, \dots, K)$ 设定成

与第k运动谱数据集中的被归类为所选择的多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的相应多普勒仓索引相对应的径向速度值,并且还通过将 M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 的各个行设定成第k运动谱数据集中的被归类为所选择的多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的相应多普勒仓索引的数据元,使用线性最小二乘估计法对运动方程组 $D=H \cdot E$ 进行求解,来确定自我运动信息。

[0039] 在示例实施方式中,所述方法还可以包括以下步骤:接收雷达数据,所述雷达数据包括在雷达传感器的天线振子中的各个天线振子处接收到的多个雷达回波信号中的各个雷达回波信号的相应多个数据样本;对数据样本进行处理,以针对所述天线振子中的各个天线振子来生成包括以下项中的一个的相应经多普勒处理的数据:(i) 多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个距离仓索引中的相应距离仓索引以及针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引计算的;以及(ii) 多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引计算的。而且,通过针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引执行以下处理来获取运动谱数据集:选择经多普勒处理的数据的已针对该多普勒仓索引计算的数据值;使用针对该多普勒仓索引选择的数据值来计算协方差矩阵;以及应用谱估计算法,该谱估计算法使用协方差矩阵,以针对该多普勒仓索引来确定所述多个空间仓索引中的各个空间仓索引的相应空间谱值。

[0040] 在示例实施方式中,经多普勒处理的数据的数据值中的各个数据值可以是针对多个距离仓索引中的相应距离仓索引以及针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引计算的,并且针对各个多普勒仓索引选择的数据值可以限定包括针对R个天线振子和针对多普勒仓索引的I个距离仓索引计算的数据值的 $R \times I$ 维矩阵。该协方差矩阵可以是使用 $R \times I$ 维矩阵和 $R \times I$ 维矩阵的共轭转置的乘积根据 $R \times I$ 维矩阵确定的 $R \times R$ 维矩阵。

[0041] 另选地,在示例实施方式中,经多普勒处理的数据的数据值中的各个数据值可以是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引计算的,并且针对各个多普勒仓索引选择的数据值可以限定包括针对R个天线振子和针对多普勒仓索引(j)的I个快时间索引计算的数据值的 $R \times I$ 维矩阵。该协方差矩阵可以是使用 $R \times I$ 维矩阵和 $R \times I$ 维矩阵的共轭转置的乘积而基于 $R \times I$ 维矩阵确定的 $R \times R$ 维矩阵。

[0042] 在上面阐述的示例实施方式或其变体中的任一变体中,该谱估计算法可以是多信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法或者经由旋转不变性技术的信号参数估计(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)算法。

[0043] 而且,生成运动谱数据集的步骤还可以包括:将针对各个多普勒仓索引确定的空间谱值归一化,以生成相应多个归一化空间谱值,所述归一化空间谱值中的各个归一化空间谱值是针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引生成的。

[0044] 生成运动谱数据集的步骤还可以包括:针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引,通过使用针对空间仓索引生成的归一化空间谱值作为该空间仓索引的概率值,来计算这样的数据,即,该数据指示雷达回波信号相对于雷达传感器的轴线的到达角在由相应空间仓索引指示的到达角当中的概率分布的方差;以及确定所述多个多普勒仓索引中

的这样的多普勒仓索引子集,即,针对该多普勒仓索引子集,所计算的方差低于预定阈值,其中,该运动谱数据中的各个数据元的值是基于与该数据元相对应的、已针对多普勒仓索引子集中的多普勒仓索引以及针对空间仓索引生成的相应归一化空间谱值的。在这种情况下,该运动谱数据集中的数据元的值是通过按以下步骤对针对多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引生成的所述多个归一化空间谱值进行处理,来针对该多普勒仓索引生成的:识别这样的空间仓索引,即,该空间仓索引的归一化空间谱值在针对所述多个空间仓索引生成的归一化空间谱值当中是最高的;将所识别的空间仓索引的数据元的值设定成非零值;以及将所有其它空间仓索引的数据元的值设定成零。

[0045] 另选地,该运动谱数据集中的数据元的值可以通过按以下步骤对针对多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引生成的所述多个归一化空间谱值进行处理,来针对该多普勒仓索引生成:识别这样的空间仓索引,即,该空间仓索引的归一化空间谱值在针对所述多个空间仓索引生成的归一化空间谱值当中是最高的;将所识别的空间仓索引的数据元的值设定成非零值;以及将所有其它空间仓索引的数据元的值设定成零。

[0046] 确定自我运动信息的步骤还可以包括:使用最小二乘平差(least square adjustment)法求解运动方程组,并且最小二乘平差法可以执行迭代处理的至少一次迭代,其中,在所述迭代处理中的每次迭代中,计算自我运动信息的估计的增量以获得更新的估计,该经更新的估计是基于所述估计和增量的并且被用于计算所述迭代处理的下一次迭代中的增量,其中,该增量是使用以下项来进行计算的:(i)运动谱数据集的第一值集,该第一值集中的各个值指示在由针对该运动谱数据集中的多普勒仓索引的相应空间仓索引指示的到达角当中到达角的分布的方差,其中,该第一值集中的各个值是使用与针对该多普勒仓索引的所述多个空间仓索引相对应的归一化空间谱值作为所述多个空间仓索引的相应概率值来计算的,以及(ii)运动谱数据集的第二值集,该第二值集中的各个值指示在由针对该运动谱数据集中的空间仓索引的相应多普勒仓索引指示的径向速度当中径向速度的分布的方差,其中,该第二值集中的各个值是使用与针对该空间仓索引的所述多个多普勒仓索引相对应的归一化空间谱值作为所述多个多普勒仓索引的相应概率值来计算的。在迭代处理中使用的自我运动信息的初始估计可以使用线性最小二乘估计法来获得。

[0047] 而且,根据本文的第二示例方面,设计了一种包括计算机程序指令的计算机程序,该计算机程序指令在由计算机处理器执行时,使该计算机处理器执行上面阐述的根据第一示例方面或其实施方式以及其变体中的任一者的方法。例如,可以将该计算机程序存储在于非暂时性计算机可读存储介质上,或者可以由信号进行承载。

[0048] 根据本文的第三示例方面,设计了一种雷达数据处理设备,该雷达数据处理设备被设置成确定包括具有多个天线振子的雷达传感器的车辆的自我运动信息。该雷达数据处理设备包括运动谱获取模块,该运动谱获取模块被设置成获取基于由雷达传感器生成的雷达数据的运动谱数据集,该运动谱数据集包括多个数据元,所述数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引计算的,各个空间仓索引指示雷达回波信号相对于雷达传感器的轴线的相应到达角。该雷达数据处理设备还包括自我运动确定模块,该自我运动确定模块被设置成通过对包括使用所述运动谱数据集生成的多个运动方程的运动方程组进行求解,来确定所述自我运动信息,各个运动方程涉及:指示静止对象相对于雷达传感器的径向速度的相应值、指示静止

对象相对于雷达传感器的轴线的角位移的相应值、以及指示车辆的速度的变量。

附图说明

[0049] 现在,参照下述附图,仅通过非限制性示例的方式对示例实施方式进行描述。除非另有指示,否则不同的图中出现的相同标号可以表示相同或功能相似的要素。

[0050] 图1A是根据第一示例实施方式的雷达数据处理设备的示意图。

[0051] 图1B是包括雷达传感器的车辆的示意性例示图,该雷达传感器用于生成要由第一示例实施方式的雷达数据处理设备处理的雷达数据。

[0052] 图2例示了本文的第一示例实施方式的雷达数据处理设备的可编程信号处理硬件中的示例实现。

[0053] 图3是例示第一示例实施方式的雷达数据处理设备可以对雷达数据进行处理以生成用于估计车辆自我运动信息的运动谱数据的方法的流程图。

[0054] 图4A例示了在第一示例实施方式中已经根据雷达数据生成的经多普勒处理数据的雷达数据立方体表示的示例。

[0055] 图4B例示了针对多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引生成的包括空间谱值的二维阵列的示例。

[0056] 图5是例示由第一示例实施方式的雷达数据处理设备执行以获得运动谱数据集的进一步处理的流程图。

[0057] 图6例示了由第一示例实施方式的雷达数据处理设备生成的在多普勒对照角度域中的归一化空间谱值的示例标绘图。

[0058] 图7是例示由该示例实施方式的运动谱获取模块6执行以使用线性最小二乘估计方法来对自我运动参数进行估计的处理的流程图。

[0059] 图8例示了与由被安装在主车辆上的六个不同雷达传感器获取的雷达数据相对应的运动谱数据集的六个不同标绘图。

[0060] 图9例示了被拟合至图8中的六个标绘图中的各个标绘图的自我运动曲线,其中,使用线性最小二乘估计结合迭代RANSAC处理来拟合各个曲线。

[0061] 图10例示了使用线性最小二乘估计估计的自我运动信息与使用其它方法获得的自我运动信息的比较。

[0062] 图11例示了使用高斯-赫尔默特(Gauss-Helmert)模型估计的自我运动信息与使用其它方法获得的自我运动信息的比较。

[0063] 图12例示了根据具有多个子阵列的二维阵列生成的运动谱数据集。

[0064] 图13A例示了根据第二示例实施方式的雷达数据处理设备。

[0065] 图13B是例示由第二示例实施方式的雷达数据处理设备确定主车辆的自我运动信息的方法的流程图。

具体实施方式

[0066] 图1A是根据第一示例实施方式的雷达数据处理设备10的示意图。在本示例实施方式中,可以将雷达数据处理设备10设置成对被安装在车辆30上的雷达传感器20(如图1B所例示的)获得的雷达数据进行处理以生成用于估计该车辆的自我运动信息的运动谱数据

集S。如图1A所示,雷达数据处理设备10包括:运动谱获取模块6和自我运动信息确定模块8。在本示例实施方式中,雷达数据处理设备10还可以包括数据获取模块2和多普勒处理模块4。

[0067] 如图1B所例示的,具有原点 O_r 、X轴 X_r 以及Y轴 Y_r 的雷达坐标系与雷达传感器20相关联。在本示例实施方式中,X轴 X_r 可以与雷达传感器20的瞄准线(boresight)对准,尽管该瞄准线通常可以相对于雷达坐标系的轴线具有任何取向。而且,如图1B所示,处于雷达传感器20的视场内的静止对象40可以相对于雷达传感器20的轴线形成角度 θ ,其中, θ 指示静止对象40相对于雷达传感器20的轴线的角位移。在本示例中, θ 表示相对于雷达传感器20的X轴 X_r 形成的方位角度。

[0068] 如图1B所示,将雷达传感器20安装至车辆30的在车辆坐标系中相对于原点 O_h 限定的位置 (l_x, l_y) 处。 l_x 指示雷达传感器20沿着车辆坐标系的第一轴线(例如,在本示例中为X轴 X_h)的安装位置,并且 l_y 指示雷达传感器20沿着车辆坐标系的第二轴线(例如,在本示例中为Y轴 Y_h)的安装位置。雷达传感器20相对于车辆坐标系的轴线的取向是由该雷达传感器的安装角度 θ^M 给出的,该安装角度指示雷达传感器20的安装角度,该安装角度是雷达传感器20的轴线与车辆30的车辆坐标系的轴线之间的角度。在本示例中,安装角度 θ^M 是由雷达传感器20的瞄准线(沿着X轴 X_r)相对于车辆坐标系的X轴 X_h 形成的角度。

[0069] 应理解,车辆30的坐标系和雷达传感器20的坐标系以及雷达传感器20的位置和安装角度不限于图1B所例示的示例。相反,这些坐标系可以具有以任何合适的方式限定的轴线,并且可以将雷达传感器20以任何合适的安装角度安装在主车辆30上的任何合适的位置处。

[0070] 假设车辆30正在以偏航率 ω 以及具有X轴分量 v_x (在本示例中相对于 X_h 定义的)和Y轴分量 v_y (即,在本示例中相对于 Y_h 定义的)的速度行驶,由雷达传感器20测得的静止对象40的径向速度 d 与静止对象的方位角度 θ (如图1B所例示的相对于雷达传感器20的轴线形成的)之间的关系可以由下式给出:

$$[0071] \quad d = (-l_y \cos(\theta + \theta_M) + l_x \sin(\theta + \theta_M)) \omega + \cos(\theta + \theta_M) v_x + \sin(\theta + \theta_M) v_y \quad (1)$$

[0072] 在图1B中,由雷达传感器20针对静止对象40测得的径向速度指示车辆30的速度。具体地,随着雷达传感器20与车辆30一起移动,雷达传感器20观测到静止对象40以与雷达传感器20的速度在幅度上相等的速度但沿相反方向移动。

[0073] 在假设车辆30的偏航率是零的情况下,车辆30的速度可以取为等于雷达传感器20的速度。在这点上,由雷达传感器20测得的静止对象40的径向速度 d 与静止对象40的方位角度 θ 之间的关系也可以由以下公式描述:

$$[0074] \quad d = \cos(\theta + \theta^M) v_x^s + \sin(\theta + \theta^M) v_y^s \quad (2)$$

[0075] 其中, v_x^s 指示雷达传感器20的速度的X分量,并且 v_y^s 指示雷达传感器20的速度的Y分量。因此,当偏航率为零或接近零时,可以通过使用式(2)对雷达传感器速度 v_x^s 和 v_y^s 进行求解,并且例如通过设定 $v_x = v_x^s$ 和 $v_y = v_y^s$ 来确定车辆速度等于雷达传感器速度,从而估计车辆30的自我运动信息。

[0076] 而且,在一些情况下,可以假设车辆30速度的Y轴分量 v_y 为零,在该情况下,将上式(1)解析成:

$$[0077] \quad d = (-l_y \cos(\theta + \theta^M) + l_x \sin(\theta + \theta^M)) \omega + \cos(\theta + \theta^M) v_x \quad (3)$$

[0078] 在本示例实施方式中,雷达传感器20可以包括一个或更多个发射天线振子(未示出),这些发射天线振子被配置成向车辆30附近的静止对象40发送一系列雷达信号。在本示例实施方式中,各个雷达信号例如可以是调频信号,诸如在预定带宽上改变其频率的啁啾(chirp)信号。然而,雷达信号可以另选地以固定频率发送。在本示例实施方式中,雷达传感器20还可以包括接收天线振子阵列(未示出),该接收天线振子阵列被配置成接收与从静止对象40反射的该系列雷达信号相对应的雷达回波信号。在本示例实施方式中,接收天线振子形成线性的、等间隔的一维阵列。然而,接收天线振子阵列在这方面不受限制,并且可以另选地形成具有任何合适阵列图案的二维阵列。

[0079] 雷达传感器20还可以解调制接收到的雷达回波信号,以例如通过将雷达回波信号与所发送的雷达信号进行混合,来生成基带(或中频)信号。使用模数转换器进一步数字化所获得的基带信号,以针对在雷达传感器20的多个接收天线振子中的各个接收天线振子处接收到的多个雷达回波信号中的各个雷达回波信号,来生成多个时域数据样本。还可以将包括所生成的时域数据样本的雷达数据R提供给雷达数据处理设备10,以生成用于估计车辆30的自我运动信息的运动谱数据集S,下面对其细节进行描述。

[0080] 图2是可编程信号处理硬件200的示意性例示图,该可编程信号处理硬件可以被配置成执行示例实施方式的雷达数据处理设备10的操作。

[0081] 可编程信号处理设备200包括通信接口(I/F)210,该通信接口用于与雷达传感器20进行通信以从该雷达传感器接收雷达数据。信号处理设备200还包括:处理器(例如,中央处理单元CPU)220、工作存储器230(例如,随机存取存储器)以及存储计算机程序245的指令存储部240,该计算机程序包括计算机可读指令,该计算机可读指令在由处理器220执行时,使该处理器220执行本文所描述的雷达数据处理设备10的各种功能。工作存储器230存储在执行计算机程序245期间由处理器220使用的信息。指令存储部240可以包括被预加载有计算机可读指令的ROM(例如,采用电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)或闪存的形式)。另选地,指令存储部240可以包括RAM或类似类型的存储器,并且可以将计算机程序245的计算机可读指令从计算机程序产品(诸如采用CD-ROM、DVD-ROM等形式的非暂时性计算机可读存储介质250,或者承载计算机可读指令的计算机可读信号260)输入至该指令存储部。在任何情况下,计算机程序245在由处理器220执行时,使处理器220执行下文描述的确定车辆30的自我运动信息的方法,并且还可选地执行如本文所述的生成用于估计车辆的自我运动信息的运动谱数据集S的方法然而,应注意,雷达数据处理设备10可以另选地以不可编程的硬件(诸如专用集成电路(ASIC))来实现。

[0082] 图3是例示图1A的雷达数据处理设备10的运动谱获取模块6可以获取用于估计车辆30的自我运动信息的运动谱数据集S的方法的流程图。该运动谱数据集是基于由雷达传感器20生成的雷达数据的并且包括多个数据元,所述数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引计算的。各个空间仓索引指示雷达回波信号相对于雷达传感器20的轴线的相应到达角。在图3的示例中,运动谱获取模块6通过基于由雷达传感器20提供的雷达数据R生成运动谱数据S,从而获取运动谱数据集S,如下更详细描述。然而,运动谱获取模块6不需要以这种方式来获取运动谱数据集,并且例如可以另选地接收已根据下述处理或以其它方式在别的地方生成的

运动谱数据集。

[0083] 在图2的步骤S10中,数据获取模块2接收雷达数据R,雷达数据R包括在雷达传感器20的天线振子中的各个天线振子处接收到的多个雷达回波信号中的各个雷达回波信号的相应多个数据样本。在本示例实施方式中,雷达数据R可以是由雷达传感器20生成的时域数据样本,如先前所描述的。可以将这些时域数据样本表示为定义雷达数据立方体的三维阵列。该阵列的第一维可以对应于“快时间”维,沿着该快时间维,可以设置在多个相应快时间采样间隔处针对单个雷达信号(例如,啁啾信号)获取的多个数据样本。该阵列的第二维可以对应于“慢时间(slow-time)”维,沿着该慢时间维,可以设置在同一快时间间隔索引处从多个不同的雷达信号(例如,不同的啁啾信号)获取的数据样本。该阵列的第三维可以对应于由多个接收天线振子从单个雷达信号(例如,啁啾信号)并且针对单个快时间间隔索引获取的数据样本。所接收到的雷达数据R被传递至多普勒处理模块4。

[0084] 在图3的步骤S20中,多普勒处理模块4对雷达数据R的数据样本进行处理,以针对接收天线振子中的各个接收天线振子生成相应的经多普勒处理的数据D。在本示例实施方式中,经多普勒处理的数据包括多个数据值,多个数据值中的各个数据值是针对多个距离仓索引中的相应距离仓索引并且针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引计算的。如在本示例中,多普勒处理模块4可以通过在快时间维上对时域样本执行距离FFT处理,并且进一步针对该距离FFT处理的输出频域样本在慢时间维上执行多普勒FFT处理,来对数据样本进行处理以生成包括多个数据值的经多普勒处理的数据D。然而,应理解,在另选实现中,多普勒处理模块4可以不对时域数据样本执行距离FFT处理,而可以仅执行多普勒FFT以生成多个数据值。即,在该另选实现中,经多普勒处理的数据D代替地包括以下多个数据值,即,所述多个数据值中的各个数据值是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引计算的。

[0085] 在图3的步骤S30中,运动谱获取模块6生成包括多个数据元的运动谱数据S,数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引来计算的。各个空间仓索引指示雷达回波信号相对于雷达传感器20的轴线(即,图1B中的 Y_r)的相应到达角。在本示例实施方式中,各个空间仓索引可以指示相对于雷达传感器20的轴线形成的方位角度。等效地,各个空间仓索引还指示雷达回波信号相对于多个接收天线振子的空间频率。具体地,对于方位角度范围 $-\pi/2$ 至 $\pi/2$,在方位角度与空间频率之间存在一对一映射。

[0086] 更具体地,在图3的步骤S30中,针对多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引,运动谱获取模块6执行步骤S30-1、S30-2以及S30-3的处理。在图3的步骤S30-1中,运动谱获取模块6选择已针对多普勒仓索引计算的经多普勒处理的数据D的数据值。在图3的步骤S30-2中,运动谱获取模块6使用为多普勒仓选择的数据值来计算协方差矩阵。在图3的步骤S30-3中,运动谱获取模块6应用谱估计算法,该谱估计算法使用协方差矩阵以针对多普勒仓索引来确定所述多个空间仓索引中的各个空间仓索引的相应空间谱值。因此,该运动谱数据S中的各个数据元是基于已针对与该数据元相对应的多普勒仓索引和空间仓索引生成的相应归一化空间谱值的。

[0087] 图4A例示了表示经多普勒处理的数据D的数据值的雷达数据立方体400,该经多普勒处理的数据D是在图3的步骤S20中针对多个天线振子中的各个天线振子生成的。在图4A

中,雷达数据立方体400是 $I \times J \times R$ 维阵列,其数据元是由 I 个距离仓索引(沿着该阵列的距离维)、 J 个多普勒仓索引(沿着该阵列的多普勒维)以及 R 个天线振子索引(沿着该阵列的天线振子维)中的相应索引来标识的。各个多普勒仓索引指示潜在对象相对于雷达传感器20的径向速度。而且,各个距离仓索引指示潜在对象距雷达传感器20的距离。

[0088] 在本示例实施方式中,在图3的步骤S30-1中针对各个多普勒仓索引 j (其中, $j=1, 2, \dots, J$)选择的数据值定义了 $R \times I$ 维矩阵 X_j ,对于多普勒仓索引 j 来说,该矩阵包括针对 R 个天线振子索引 $r=1, 2, \dots, R$ 和 I 个距离仓索引 $i=1, 2, \dots, I$ 计算的(经多普勒处理的数据 D 中的)数据值。因此,矩阵 X_j 包括 I 个波束向量,各个波束向量包括与 R 个相应的空间仓索引相对应的 R 个数据值。因此,在图3的步骤S30-1中计算的协方差矩阵可以是基于矩阵 X_j 与该矩阵 X_j 的共轭转置的乘积而根据矩阵 X_j 确定的 $R \times R$ 维协方差矩阵 S_{xx} 。作为非限制性示例,可以将该协方差矩阵计算为 $S_{xx} = E[X_j X_j^H] - E[X_j] E[X_j^H]$ 。

[0089] 然而,在不执行距离FFT处理来生成数据值的情况下(即,其中,经多普勒处理的数据的数据值中的各个数据值是针对多个快时间索引中的相应快时间索引以及多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引来计算的),在图3的步骤S30-1中针对各个多普勒仓索引选择的数据值限定包括针对 K 个天线振子和针对该多普勒仓索引的 I 个快时间索引计算的数据值的 $R \times I$ 维矩阵,并且其中,该信号协方差矩阵是使用 $R \times I$ 维矩阵和该 $R \times I$ 维矩阵的共轭转置的乘积而根据 $R \times I$ 维矩阵确定的 $R \times R$ 维矩阵。

[0090] 在本示例实施方式中,在图3的步骤S30-3中,运动谱获取模块6通过使用多信号分类(MUSIC)算法作为谱估计算法来确定各个多普勒仓的空间谱值。在本示例实施方式中,运动谱获取模块6可以使用MUSIC算法,以针对多普勒仓索引 $j=1, 2, \dots, J$ 中的各个多普勒仓索引,通过使用以下MUSIC空间谱函数来计算多个空间仓索引 $n=1, 2, \dots, N$ 中的各个空间仓索引的空间谱值 p_{jn} :

$$[0091] \quad P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (4)$$

[0092] 其中, $\mathbf{a}(\theta)$ 是多个天线的与到达角 θ 相对应的转向向量(steering vector),并且 \mathbf{E}_N 表示根据针对多普勒仓索引 j 的协方差矩阵 X_j 的本征分解导出的噪声子空间。如从方程(1)可观察到的,对于各个多普勒仓可以存在至多两个目标,因此,当使用MUSIC算法确定空间谱值时,可以假设一个或两个目标。

[0093] 在一些实施方式中,例如,可以对雷达传感器20的天线振子进行校准,以最小化天线振子之间的幅度和相位误差。在这样的实施方式中,可以先将校准矩阵应用于协方差矩阵以生成经校准的协方差矩阵,然后再使用经校准的协方差矩阵来执行谱估计。

[0094] 应注意,各个空间仓不仅映射至角度域中的角度值,而且可以等效地映射至空间频率域中的空间频率值,这是因为在设置接收天线振子阵列所沿着的平面中的信号的空间频率 ψ 取决于该信号的到达角 θ 。因此,在一些示例实施方式中,可以在空间频域中确定空间谱值,其中,各个空间仓对应于与雷达传感器20相对的信号的空间频率值。

[0095] 而且,在图3的步骤S30-3中被用于生成空间谱值的谱估计算法不限于MUSIC算法,并且可以另选为经由旋转不变性技术的信号参数估计(ESPIRIT)算法,或者是可以用于基于从检测到的信号获得的协方差矩阵来估计一个或更多个雷达回波信号的空间谱或到达角的任何合适的谱估计算法。而且,基于观测的协方差矩阵的谱估计算法假设信号源是不

相关的。然而,当信号中的一些信号相关时,可以执行空间平滑。更具体地,在一些示例实施方式中,可以将运动谱获取模块6设置成通过执行空间平滑操作来确定与由所述多个天线振子形成的多个子阵列相对应的协方差矩阵,并且基于针对所述多个子阵列确定的协方差矩阵来生成协方差矩阵,从而确定针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引的协方差矩阵。

[0096] 图4B是包括在图3的步骤S30中针对所述多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引生成的空间谱值的二维阵列420的示例例示图。更具体地,图4B中的二维阵列420包括:沿着阵列420的第一方向的J个多普勒仓索引 $j=1,2,\dots,J$,以及沿着阵列420的第二方向的N个空间仓索引 $n=1,2,\dots,N$ 。针对各个多普勒仓索引生成的空间谱值对应于阵列420的列430。图4B中的阵列420包括多个空间谱值 p_{jn} , $j=1,2,\dots,J$, $n=1,2,\dots,N$,其中,针对阵列420中的多普勒仓索引j和空间仓索引n计算各个空间谱值 p_{jn} 。而且,运动谱数据集S中的各个数据元是基于与该数据元相对应的已针对多普勒仓索引j和空间仓索引n生成的相应归一化空间谱值 p_{jn} 的。如图4B所例示的,列430处的针对多普勒仓索引j的空间谱值是通过使用雷达数据立方体400中的在多普勒仓索引j的范围内的数据值作为谱估计算法中的雷达传感器测量结果的单个“快照(snapshot)”来获得的。

[0097] 图5是例示可以由运动谱获取模块6进一步执行以从已针对各个多普勒仓索引计算的空间谱值获得运动谱数据集S的处理的流程图。在图3的步骤S30-1中计算各个多普勒仓索引的空间谱值之后,在图5的步骤S210中,运动谱获取模块6可以进一步执行针对多普勒仓索引确定的空间谱值的归一化,以生成相应的多个归一化空间谱值,所述归一化空间谱值中的各个归一化空间谱值是针对所述多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引来生成的。例如,运动谱获取模块6可以执行关于针对各个多普勒仓索引生成的所述多个空间谱值的L1归一化,以使针对多普勒仓索引生成的所有归一化空间谱值的总和等于值1。可以将根据所述多个空间谱值计算的归一化空间谱值表示为 q_{jn} , $j=1,\dots,J$, $n=1,\dots,N$ 。

[0098] 图6例示了在图5的步骤S210中生成的归一化空间谱值的示例标绘图。在图6中,多普勒仓索引在被转换成径向速度值时覆盖-10m/s到10m/s的范围,并且针对相对于雷达传感器20的轴线形成的(方位)角度范围-75°到75°,来计算空间谱值(在本示例实施方式中使用MUSIC算法)。使用较高强度的像素值来显示较高幅值的归一化空间谱值。

[0099] 如图6所示,由于在雷达传感器20的视场内存在一个或更多个静止目标40,因此,针对各个多普勒仓索引,由峰归一化空间谱值(或高值(high-valued)归一化空间谱值)映射出的径向速度随角度的变化近似地遵循正弦轨迹,这与方程(1)、(2)以及(3)中的运动方程所指定的关系一致。因此,可以通过执行回归分析,例如,通过将由方程(1)、(2)以及(3)给出的函数拟合至由各个多普勒仓索引的峰(或高值)归一化空间谱值指定的径向速度随角度的变化,来使用归一化空间谱值对方程(1)、(2)以及(3)中的自我运动参数 v_x 、 v_y 以及 ω 进行估计。

[0100] 在图6中,移动目标的存在将造成位于正弦轨迹之外的孤立峰值,举例来说,如图6中的位置620处的高强度值。因移动目标而造成的强归一化空间谱值的存在可能导致在估计自我运动参数方面的准确度降低。特别地,假设由谱估计算法估算的角度范围覆盖这样的范围,即,对于该范围,方程(1)针对各个径向速度仅具有一个唯一的角度解,那么对于图

6中的各个多普勒仓,仅应当存在单个强归一化空间谱值。

[0101] 因此,如图5的步骤S220所示,在本示例实施方式中,运动谱获取模块6还针对多个多普勒仓索引中的各个多普勒仓索引,通过使用针对空间仓索引生成的归一化空间谱值作为该空间仓索引的概率值,来计算这样的数据,即,该数据指示雷达回波信号相对于雷达传感器20的轴线的到达角在由相应空间仓索引指示的到达角当中的概率分布的方差。例如,针对给定的多普勒仓索引j,可以把多个空间仓索引 $n=1,2,\dots,N$ 作为随机角度变量 Θ_j 的所有可能值的集合。而且,可以把针对多普勒仓索引j的所述空间仓索引 $n=1,2,\dots,N$ 中的各个空间仓索引计算的归一化空间谱值 q_{jn} 作为空间仓索引的出现概率。因此,可以使用以下公式来计算角度变量 Θ_j 在分别由针对多普勒仓j的空间仓索引 $n=1,2,\dots,N$ 表示的角度 θ_n ($n=1,2,\dots,N$) 当中的概率分布的方差:

$$[0102] \quad \text{Var}(\Theta_j) = \sum_{n=1}^N q_{jn} (\theta_n - E[\Theta_j])^2 \quad (5) \text{ 其中, } E[\Theta_j] = \sum_{n=1}^N q_{jn} \theta_n \text{ 是}$$

针对随机角度变量 Θ_j 的期望值。然而,在一些实施方式中,代替使用针对角度变量 Θ_j 的期望值来计算方程(5)中的方差,可以代替地使用角度变量 Θ_j 的众数(mode)(与针对多普勒仓索引j的峰归一化空间谱值相对应)。

[0103] 在图5的步骤S230中,运动谱获取模块6确定多个多普勒仓索引中的这样的多普勒仓索引子集,即,针对该多普勒仓索引子集,在步骤S220中计算的方差低于预定阈值。此外,运动谱数据S中的各个数据元的值是基于与该数据元相对应的已针对多普勒仓索引子集中的多普勒仓索引以及空间仓索引生成的相应归一化空间谱值的。换句话说,在图5的步骤S210中归一化空间谱值,并且在步骤S220中计算针对各个多普勒仓索引的方差之后,仅使用具有低于预定阈值的方差的多普勒仓索引来生成运动谱数据S。

[0104] 如图5的步骤S240所示,运动谱获取模块6可以通过执行也在图5中例示的步骤S240-1、S240-2以及S240-3,对针对多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引生成的多个归一化空间谱值进行处理,针对该多普勒仓索引,来生成运动谱数据集S中的数据元的值。更具体地,在步骤S240-1中,运动谱获取模块6在针对所述多个空间仓索引生成的归一化谱值当中识别具有归一化空间谱值的最高绝对值的空间仓索引。在图5的步骤S240-2中,运动谱获取模块6将针对所识别的空间仓索引的数据元的值设定成非零值。另外,在图5的步骤S240-3中,运动谱获取模块6将针对所有其它空间仓索引的数据元的值设定成零。

[0105] 尽管图5例示了按顺序执行的步骤S210、S220、S230以及S240,但是应理解,这些是可以在图3的步骤S30之后进一步执行来获得运动谱数据集S的可选步骤。即,运动谱数据集S可以是如前所述的步骤S30、S210、S230以及S240中的任一步骤的输出。另外,在一些示例实施方式中,可以直接对在步骤S210中生成的归一化空间谱值执行步骤S240,以便生成运动谱数据集S,而不执行步骤S220和S230。

[0106] 在已获取运动谱数据集S之后,将自我运动信息确定模块8设置成通过对包括使用运动谱数据集生成的多个运动方程的运动方程组进行求解,来确定车辆30的自我运动信息。各个运动方程涉及:指示静止对象相对于雷达传感器20的径向速度的相应值、指示静止对象相对于雷达传感器20的轴线的角位移的相应值、以及指示车辆30的速度的变量。运动方程组中指示径向速度的值可以是基于多普勒仓索引并且独立于雷达数据R而预先计算的。而且,运动方程组中指示角位置的值可以是基于空间仓索引并且独立于雷达数据R而预

先计算的。

[0107] 在本示例实施方式中,可以将方程(1)用作运动方程,以确定车辆30的包括 v_x 、 v_y 以及 ω 的车辆自我运动信息。

[0108] 为了使用方程(1)唯一地确定自我运动信息 v_x 、 v_y 以及 ω ,需要从由被安装在车辆30周围的不同位置处的至少两个雷达传感器获取的雷达数据生成的运动谱数据S。各个雷达传感器可以采取先前描述的雷达传感器20的形式,并且运动谱获取模块6可以使用先前描述的用于生成运动谱数据集的方法中的任一方法,根据在各个雷达传感器处接收到的雷达数据来生成相应的运动谱数据集。

[0109] 更具体地,针对这样的情况,即,其中,在车辆30上的K个不同位置处安装了K个雷达传感器,其中各个雷达传感器具有多个天线振子,其中,K是大于或等于2的整数,并且其中针对K个雷达传感器中的各个雷达传感器生成相应的运动谱数据集(使用如在先前描述的实施方式/示例中的任一实施方式/示例中描述的生成运动谱数据集的方法),可以如在本示例实施方式中那样,将自我运动信息确定模块8设置成通过对以下运动方程组进行求解以估计方程(1)中的 v_x 、 v_y 以及 ω 的值,来确定自我运动信息:

$$[0110] \quad D = H \cdot E \quad (6)$$

$$[0111] \quad \text{其中, } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_2 \mathbf{L}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_K \mathbf{T}_K \mathbf{L}_K \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \omega \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix}。$$

[0112] $\mathbf{d}_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k = 1, 2, \dots, K$, 其中,F是等于或大于1的整数。值 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第k雷达传感器20生成的第k运动谱数据集S中的F个相应多普勒仓索引相对应的F个径向速度值。

[0113] 矩阵 $\mathbf{M}_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 是包含第k运动谱数据集S中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵,其中,U是大于或等于一的整数,并且F和U的值是分别针对 $k = 1, 2, \dots, K$ 中的每一个来选择的。 \mathbf{M}_k 的各个行索引对应于第k运动谱数据集S中的相应多普勒仓索引,并且 \mathbf{M}_k 的各个列索引对应于第k运动谱数据集S中的相应空间仓索引。 \mathbf{M}_k 的各个行包括第k运动谱数据集S中的对应多普勒仓索引的数据元。

[0114] 将矩阵 \mathbf{T}_k 定义为:

$$[0115] \quad \mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, k = 1, 2, \dots, K,$$

[0116] 其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U} (u = 1, 2, \dots, U)$ 指示分别与第k运动谱数据集中的u个空间仓索引相对应的u个角度值。 θ_k^M 指示第k雷达传感器的安装角度,该安装角度是第k雷达传感器的轴线与车辆20的车辆坐标系的轴线之间的角度。

[0117] 将矩阵 \mathbf{L}_k 定义为:

$$[0118] \quad \mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} -l_k^y & 1 & 0 \\ l_k^x & 0 & 1 \end{bmatrix}, k = 1, 2, \dots, K$$

[0119] 并且是第k雷达传感器的模型矩阵,其中, l_k^x 指示第k雷达传感器沿着车辆坐标系

的X轴的安装位置,并且 l_k^y 指示第k雷达传感器沿着车辆坐标系的Y轴的安装位置。(6)的解要求H具有至少三个线性独立的行。

[0120] 还应注意,通过将方程组的一个或更多个变量变换成其它变量的函数,可以将方程组(6)以许多等效形式重写。作为一个示例,如果运动谱数据集S包括在不同空间频率索引上获得的空间谱值,则可以另选地将方程组(6)中的角度值 $\theta_{k,1}, \dots, \theta_{k,U}$ 转换成对应的空间频率值,以便估计方程组(4)中的自我运动参数。可以被用于将方程组(6)中的角度值 $\theta_{k,1}, \dots, \theta_{k,U}$ 变换成对应的空间频率值 $\psi_{k,1}, \dots, \psi_{k,U}$ 的关系可以由 $\psi = b \sin(\theta)$ 给出,由此可以将方程(4)的矩阵 T_k 等效地重写为:

$$[0121] \quad T_k = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \frac{\psi_{k,1}^2}{b^2}} & \frac{\psi_{k,1}}{b} \\ \vdots & \vdots \\ \sqrt{1 - \frac{\psi_{k,U}^2}{b^2}} & \frac{\psi_{k,U}}{b} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_k^M) & \sin(\theta_k^M) \\ -\sin(\theta_k^M) & \cos(\theta_k^M) \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

[0122] 项b是常数,并且如在本示例中那样可以由 $b = \frac{c_k}{\lambda}$ 给出,其中, c_k 是第k雷达传感器的天线阵列振子之间的距离,并且 λ 是在第k雷达传感器处接收到的信号的波长。

[0123] 求解(6)中的方程组允许估计(1)中的全部自我运动参数集 v_x 、 v_y 以及 ω 。然而,在另选实施方式中,可通过假设某些条件来简化方程(1)。例如,在另选实施方式中,可以将车辆30的偏航率 ω 假设为零,并且可以将先前定义的方程(2)用于估计包括 v_x 和 v_y 的自我运动信息。具体地,在方程(2)中,可以使用(2)来计算项 v_x^s 和 v_y^s ,它们分别是雷达传感器的速度(而不是车辆30的速度)的X和Y分量。而且,在偏航率为零的条件下,可以通过设定 $v_x = v_x^s$ 和 $v_y = v_y^s$ 来确定车辆速度 v_x 、 v_y 。还应注意,当偏航率为零时,车辆速度 v_x 和 v_y 可以仅使用一个运动谱数据集S来确定,而不需要来自被安装在车辆30上的两个不同位置处的两个雷达传感器的至少两个运动谱数据集。

[0124] 更具体地,针对这样的情况,即,其中,在车辆30的K个不同位置处安装了K个雷达传感器,其中各个雷达传感器具有多个天线振子,其中,K是大于或等于1的整数,并且其中,针对K个雷达传感器中的各个雷达传感器生成相应的运动谱数据集(使用如在先前描述的实施方式/示例中的任一实施方式/示例中描述的生成运动谱数据集的方法),可以将自我运动信息确定模块8设置成通过估计方程(2)中的 v_x^s 和 v_y^s 的值并且将自我运动参数设定为 $v_x = v_x^s$ 和 $v_y = v_y^s$,来确定自我运动信息。特别地,估计 v_x^s 和 v_y^s 的值的步骤包括:求解以下运动方程组:

$$[0125] \quad D = H \cdot E \quad (7)$$

$$[0126] \quad \text{其中, } D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} M_1 T_1 \\ M_2 T_2 \\ \vdots \\ M_K T_K \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} v_x^s \\ v_y^s \end{bmatrix}$$

[0127] $d_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T, k = 1, 2, \dots, K$, 其中,F是等于或大于1的整数,并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第k雷达传感器20获取的第k运动谱数据集S中的F个相应多普勒仓

索引相对应的F个径向速度值。

[0128] 矩阵 M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 是包含第k运动谱数据集S中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, 其中, U 是大于或等于一的整数, 并且 F 和 U 的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的。 M_k 的各个行索引对应于第k运动谱数据集S中的相应多普勒仓索引, 并且 M_k 的各个列索引对应于第k运动谱数据集S中的相应空间仓索引。 M_k 的各个行包括第k运动谱数据集S中的对应多普勒仓索引的数据元。

[0129] T_k 被定义为:

$$[0130] \quad T_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

[0131] 其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ ($u=1, 2, \dots, U$) 指示分别与第k运动谱数据集S中的 U 个空间仓索引相对应的 U 个角度值。 θ_k^M 指示第k雷达传感器的安装角度, 该安装角度是第k雷达传感器的轴线与车辆30的车辆坐标系的轴线之间的角度。

[0132] 在一些实施方式中, 可以假设车辆速度的Y轴线分量 v_y 为零, 在该情况下, 可以将先前定义的方程(3)用于获得包括值 ω 和 v_x 的自我运动信息。

[0133] 更具体地, 针对这样的情况, 即, 其中, 在车辆30的 K 个不同位置处安装了 K 个雷达传感器, 其中各个雷达传感器具有多个天线振子, 其中, K 是大于或等于1的整数, 并且其中针对 K 个雷达传感器中的各个雷达传感器生成相应的运动谱数据集S(使用如在先前描述的实施方式/示例中的任一实施方式/示例中描述的生成运动谱数据集S的方法), 可以将自我运动信息确定模块8设置成通过对以下运动方程组进行求解以估计值 ω 和 v_x , 来确定自我运动信息:

$$[0134] \quad D = H \cdot E \quad (8)$$

$$[0135] \quad \text{其中, } D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} M_1 T_1 L_1 \\ M_2 T_2 L_2 \\ \vdots \\ M_K T_K L_K \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \omega \\ v_x \end{bmatrix}$$

[0136] $d_k = [d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}]^T$, $k=1, 2, \dots, K$, 其中, F 是等于或大于1的整数, 并且 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 指示与针对第k雷达传感器20生成的第k运动谱数据集S中的 F 个相应多普勒仓索引相对应的 F 个径向速度值。

[0137] 矩阵 M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 是包含第k运动谱数据集S中的数据元的 $F \times U$ 维矩阵, 其中, U 是大于或等于一的整数, 并且 F 和 U 的值是分别针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个选择的。 M_k 的各个行索引对应于第k运动谱数据集中的相应多普勒仓索引, 并且 M_k 的各个列索引对应于第k运动谱数据集中的相应空间仓索引。 M_k 的各个行包括第k运动谱数据集中的对应多普勒仓索引的数据元。

[0138] 将矩阵 T_k 定义为:

$$[0139] \quad \mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,1} + \theta_k^M) \\ \cos(\theta_{k,2} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,2} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_{k,U} + \theta_k^M) & \sin(\theta_{k,U} + \theta_k^M) \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

[0140] 其中, $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ ($u=1, 2, \dots, U$) 指示分别与第k运动谱数据集中的U个相应空间仓索引相对应的U个角度值, 其中, θ_k^M 指示第k雷达传感器的安装角度, 该安装角度是第k雷达传感器的轴线与车辆30的车辆坐标系的轴线之间的角度。

[0141] $\mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} -l_k^y & 1 \\ l_k^x & 0 \end{bmatrix}$ ($k = 1, 2, \dots, K$) 是第k雷达传感器的模型矩阵, 其中, l_k^x 指示第k

雷达传感器沿着车辆坐标系的X轴的安装位置, 并且 l_k^y 指示第k雷达传感器沿着车辆坐标系的Y轴的安装位置。

[0142] 另外, 应理解, 对自我运动参数的估计可以等效地采取方程组 (6)、(7) 以及 (8) 两侧的转置来执行。

[0143] 在本示例实施方式中, 为了生成K个雷达传感器中的各个雷达传感器的相应运动谱数据集, 针对该雷达传感器, 对在图3的步骤S30处生成的空间谱值执行图5的步骤S210、S220、S230以及S240中的各个步骤。因此, 在步骤S240处为K个雷达传感器中的各个雷达传感器生成的相应运动谱数据集在针对各个多普勒仓索引的单个空间仓索引处包括非零值 (例如, 1), 其中, 针对各个多普勒仓索引的剩余空间仓索引的数据元被设定成零值 (如参照图5的步骤S240-3所描述的)。如在本示例中, 非零值可以是值1, 但是可以另选为任何非零值。

[0144] 在本示例实施方式中, 可以基于第k运动谱数据集中的F个相应多普勒仓索引并且独立于在第k雷达传感器处接收到的雷达数据来预先计算值 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 。而且, 可以基于第k运动谱数据集中的U个相应空间仓索引并且独立于在第k雷达传感器处接收到的雷达数据来预先计算值 $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 。

[0145] 具体地, 在本示例实施方式中, 通过使用基于第k雷达传感器20的多普勒分辨率的预定转换因子, 可以从对应的多普勒仓索引导出值 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 。类似地, 在本示例实施方式中, 通过使用基于第k雷达传感器20的角度分辨率的预定转换因子, 可以从对应的空间仓索引导出角度值 $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 。在本示例实施方式中, 在由雷达数据处理设备10获取和处理K个雷达传感器中的各个雷达传感器的雷达数据之前, 预先计算并在存储器中存储径向速度值 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 、角度值 $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 、以及方程组 (6)、(7) 或 (8) 中的三角项的值。换句话说, $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ 的值、 $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}, \dots, \theta_{k,U}$ 的值、以及方程组 (6)、(7) 或 (8) 中的三角项的值只需要被计算一次, 这是因为由于仓离散化的缘故, 它们的值是预先已知的。

[0146] 为了估计自我运动参数, 可以使用线性最小二乘估计法在方程 (6)、(7) 或 (8) 中对运动方程组进行求解, 以确定自我运动信息。

[0147] 例如, 在本实施方式中, 为了估计方程组 (6) 中的自我运动参数 v_x, v_y 以及 ω 的值, 可以将自我运动信息确定模块8设置成使用线性最小二乘估计算法。例如, 可以使用用于普通最小二乘估计的公式 $\mathbf{c} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{D}$ 来计算自我运动参数 $\mathbf{c} = [\omega, \hat{v}_x, \hat{v}_y]^T$ 的初始估

计。

[0148] 然而,线性最小二乘估计不限于上述公式,并且可以使用线性最小二乘估计的其它公式。

[0149] 在一些示例实施方式中,为了提高线性最小二乘估计的鲁棒性,自我运动信息确定模块8可以通过执行迭代算法(该迭代算法将K个运动谱数据集S中的多普勒仓索引分类为正常和异常),并且仅基于正常的多普勒仓索引的数据元执行估计来执行线性最小二乘估计。迭代算法例如可以基于将随机样本一致性(Random Sample Consensus (RANSAC))法或M估计器样本一致性(M-estimator Sample Consensus (MSAC))法应用于K个运动谱数据集S中的多普勒仓索引的数据元,以便选择产生自我运动参数的最佳估计的多普勒仓索引子集。然而,也可以使用诸如M估计器(例如,Huber K估计器)的其它鲁棒估计法。

[0150] 图7例示了可以由自我运动信息确定模块8执行以使用线性最小二乘估计法来估计自我运动参数 v_x 、 v_y 以及 ω 的迭代法。

[0151] 在图7的步骤S310中,自我运动信息确定模块8从K个运动谱数据集S中的多普勒仓索引中随机选择多个多普勒仓索引子集。

[0152] 在图7的步骤S320中,针对多个多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引子集,自我运动信息确定模块8执行步骤S320-1、S320-2以及S320-3的处理。

[0153] 具体地,在步骤S320-1中,自我运动信息确定模块8通过如下操作来估计自我运动信息:基于处于多普勒仓索引子集中的多普勒仓索引设定D和H,使用线性最小二乘估计法对(6)中列出的运动方程组 $D=H \cdot E$ 进行求解。更具体地,自我运动信息确定模块8通过如下操作使用线性最小二乘估计法对如(6)中列出的运动方程组 $D=H \cdot E$ 进行求解,来估计自我运动信息:将 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ ($k=1, 2, \dots, K$) 设定成与第k运动谱数据集中的处于该多普勒仓索引子集中的相应多普勒仓索引相对应的径向速度值,并且还将方程组(6)中的 M_k (被包括在矩阵H中)的各个行设定成第k运动谱数据集中的处于该多普勒仓索引子集中的相应多普勒仓索引的数据元。

[0154] 在图7的步骤S320-2中,自我运动信息确定模块8确定多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的估计误差。在图7的步骤S320-3中,自我运动信息确定模块8基于多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的确定的估计误差,将该多普勒仓索引归类为正常多普勒仓索引或异常多普勒仓索引。

[0155] 在使用方程组(6)来确定自我运动信息的本示例中,对于步骤S320-2,自我运动信息确定模块8可以基于和多普勒仓索引相对应的径向速度值与基于 v_x 、 v_y 以及 ω 的估计值确定的回归模型的相应拟合值之间的差异,来确定多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的估计误差。即,可以将 v_x 、 v_y 以及 ω 的估计值替换回运动方程组(6),以确定多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的拟合径向速度值。因此,可以通过和多普勒仓索引相对应的径向速度值与和多普勒仓索引相对应的拟合径向速度值之间的差异的平方根,来给出多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引的估计误差(即,误差残差)。然而,可以使用不同的度量来计算各个多普勒仓索引的估计误差。

[0156] 在本示例中,对于步骤S320-3,可以基于阈值将多普勒仓索引子集中的各个多普勒仓索引归类为正常多普勒仓索引或异常多普勒仓索引。可以将估计误差低于阈值的多普勒仓索引确定为正常多普勒仓索引。而且,可以将具有高于阈值的估计误差的多普勒仓索引

引确定为异常多普勒仓索引。

[0157] 在图7的步骤S330中,自我运动信息确定模块8基于以下项从多个多普勒仓索引子集中选择多普勒仓索引子集:(i)各个多普勒仓索引子集的正常多普勒仓索引的总数,或者(ii)针对各个多普勒仓索引子集确定的所有正常多普勒仓索引的估计误差的总和。例如,在使用RANSAC算法的情况下,自我运动信息确定模块8可以在图7的步骤S330中基于步骤S320-3的确定来选择具有最正常的多普勒仓索引的多普勒仓索引子集。

[0158] 在一些示例实施方式中,当使用MSAC算法时,自我运动信息确定模块8可以另选地在图7的步骤S330中选择这样的多普勒仓索引子集,即,该多普勒仓索引子集在针对该子集中的所有正常多普勒仓索引计算的估计误差的总和方面具有最低值。换句话说,作为本实施方式的步骤S330的部分,自我运动信息确定模块8可以针对各个多普勒仓索引子集来计算该多普勒仓索引子集中的所有正常多普勒仓索引的估计误差的总和。在步骤S330中,可以将生成估计误差的总和中的最低值的多普勒仓索引子集选择为所述子集。在使用MSAC算法的一些实施方式中,可以将自我运动信息确定模块8配置成通过进一步考虑各个子集中的异常多普勒仓索引,来从所述多个多普勒仓索引子集中选择所述多普勒仓索引子集。具体地,可以向各个异常多普勒仓索引指派恒定的误差值。然后,可以针对各个多普勒仓索引子集来确定累积误差,该累积误差是所有正常多普勒仓索引的估计误差和所有异常多普勒仓索引的总恒定误差值(该总恒定误差值是通过将恒定误差值乘以异常多普勒仓索引的数量来计算的)的总和。在步骤S330中,可以将具有最低累积误差的多普勒仓索引子集选择为所述子集。

[0159] 在图7的步骤S340中,自我运动信息确定模块8通过以下操作使用线性最小二乘估计法对如(6)中列出的运动方程组 $D=H \cdot E$ 进行求解,来确定自我运动信息:基于处于所选择的多普勒仓索引子集中的多普勒仓索引设定D和H。具体地,自我运动信息确定模块8通过以下操作使用线性最小二乘估计法对如(6)中列出的运动方程组 $D=H \cdot E$ 进行求解,来确定自我运动信息:将 $d_{k,1}, d_{k,2}, \dots, d_{k,F}$ ($k=1, 2, \dots, K$) 设定成与第k运动谱数据集中的被归类为所选择的多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的相应多普勒仓索引相对应的径向速度值,并且还将 M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 的各个行设定成第k运动谱数据集中的被归类为所选择的多普勒仓索引子集中的正常多普勒仓索引的相应多普勒仓索引的数据元。

[0160] 应理解,尽管在本示例中图7的步骤S320-1和S340被描述为被执行以求解(6)中列出的方程组,但是在仅需要所述自我运动参数中的一些自我运动参数的情况下,这两个步骤也可以被执行以求解(7)或(8)中列出的方程组。

[0161] 上述线性优化过程假设针对各个雷达传感器生成的运动谱数据集S提供了无误差的精确测量结果。然而,这对于有噪声的现实雷达测量结果可能不成立。在一些示例实施方式中,使用运动方程组(6)(或者使用方程组(7)或(8))的自我运动参数的估计可以通过进一步考虑观测方面的不确定性来改进,这些不确定性是在自我运动信息的估计方面的角度和径向速度的变化。

[0162] 因此,在一些示例实施方式中,可以将自我运动信息确定模块8设置成通过进一步使用最小二乘平差法来确定自我运动信息(这在求解方程组(6)的本示例中是 v_x 、 v_y 以及 ω)。最小二乘平差法执行迭代处理的至少一次迭代,其中,在所述迭代处理中的每次迭代中计算自我运动信息的估计的增量,以获得更新的估计,更新的估计是基于所述估计和增

量的并且被用于计算所述迭代处理的下一次迭代中的增量。而且,所述增量是基于K个运动谱数据集的各个运动谱数据集的第一值集以及K个运动谱数据集的各个运动谱数据集的第二值集来计算的。该第一值集中的各个值指示在由针对该运动谱数据S中的多普勒仓索引的相应空间仓索引指示的到达角当中到达角的分布的方差,其中,该第一值集中的各个值是使用与针对该多普勒仓索引的所述多个空间仓索引相对应的归一化空间谱值作为针对所述多个空间仓索引的相应概率值来计算的。而且,该第二值集中的各个值指示在由针对该运动谱数据S中的空间仓索引的相应多普勒仓索引指示的径向速度当中径向速度的分布的方差,其中,该第二值集中的各个值是使用与针对该空间仓索引的所述多个多普勒仓索引相对应的归一化空间谱值作为针对所述多个多普勒仓索引的相应概率值来计算的。如在本实施方式中,在迭代处理中使用的自我运动信息的初始估计可以使用线性最小二乘估计法来获得。

[0163] 如本示例中,最小二乘平差法可以与高斯赫尔默特模型一起使用,该高斯赫尔默特模型在“Convex Optimization for Inequality Constrained Adjustment Problems”, PhD thesis of L.R.Roese-Koerner, Institut für Geodäsie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn(2015)中进行了更详细描述。

[0164] 更具体地,在高斯-赫尔默特模型中,表示由观测向量 l 表示的F个观测结果,并且将观测结果的方差-协方差矩阵表示为 Q_{ll} ,由观测结果 l 与模型参数向量 x 之间的F个非线性关系给出的约束可以被写为:

$$[0165] \quad g(l, x) = 0 \quad (9)$$

[0166] 该非线性函数可以通过围绕初始值来线性化函数(9),然后迭代求解该函数从而进行求解。具体地,函数(9)可以使用围绕选定点 (l_0, x_0) 的泰勒级数展开来进行线性化,以便以近似线性形式表达非线性函数。更具体地,写为

$$[0167] \quad \tilde{x} = x_0 + \Delta x \quad (10)$$

$$[0168] \quad \tilde{l} = l + e = l_0 + \Delta l + e \quad (11)$$

[0169] 其中, e 表示与观测结果相关联的残差向量,使用围绕泰勒点 (l_0, x_0) 的泰勒级数展开的(9)的线性化生成

$$\begin{aligned}
 & g(\tilde{x}, \tilde{l}) = g(x_0 + \Delta x, l_0 + \Delta l + e) \\
 [0170] \quad & = \underbrace{g(x, l) |_{x=x_0, l=l_0}}_{w_0} + \underbrace{\frac{\partial g(x, l)}{\partial l} |_{x=x_0, l=l_0}}_{B^T} (\Delta l + e) + \underbrace{\frac{\partial g(x, l)}{\partial x} |_{x=x_0, l=l_0}}_A \Delta x \\
 & = \underbrace{w_0 + B^T \Delta l}_{w} + B^T e + A \Delta x = 0 \\
 & = w + B^T e + A \Delta x = 0 \quad (12)
 \end{aligned}$$

[0171] 对于非线性高斯-赫尔默特模型中的最小二乘平差,目的是在由(12)给出的方程约束下使加权最小二乘对象函数 $e^T Q_{ll}^{-1} e$ 最小化。该最小化问题可以使用拉格朗日乘子的方法来求解,以获得下面的正规方程组(13),其被求解以计算参数向量 x 的增量 Δx ,以及F个拉格朗日乘子的向量 k :

$$[0172] \quad \begin{bmatrix} B Q_{ll} B^T & A \\ A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \Delta x \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

[0173] 在求解 Δx 之后,可以使用方程 (10) 来获得该迭代的估计值 \bar{x} 。而且,该迭代的残差向量 e 可以被计算为

$$[0174] \quad e = Q_{ll} B^T z \quad (14)$$

[0175] 在使用方程 (14) 计算残差向量 e 之后,可以使用方程 (11) 进一步计算估计值 \bar{l} 。然后,可以将该估计值 \bar{x} 和 \bar{l} 用作所述估计的下一迭代起始点 (l_0, x_0) 。更具体地,在下一迭代中,使用 A 、 B 及 w 的新值来求解方程组 (13) (新值是使用新的起始点 (l_0, x_0) 获得的), 并且可以计算 \bar{x} 和 \bar{l} 的新估计值。

[0176] 在本示例中,为简单起见,将方程组 (6) 中的 U 的值取为 F , 使得方程组 (6) 中的矩阵 M_k ($k=1, 2, \dots, K$) 是 $F \times F$ 维矩阵。然而,应理解, U 的值不限于此,并且可以被选择为任何合适的值。方程组 (6) 中的各个方程可以按照由 (9) 给出的形式书写,以使方程组 (6) 中的各个方程被重新表达为以下形式的函数:

$$[0177] \quad g(\theta, d, \omega, v_x, v_y) = (-l_y \cos(\theta + \theta_M) + l_x \sin(\theta + \theta_M)) \omega + \cos(\theta + \theta_M) v_x + \sin(\theta + \theta_M) v_y - d = 0 \quad (15)$$

[0178] 在方程组 (6) 中,可以针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的各个值导出 (15) 中所表达的形式的 F 个函数,其中, F 可以针对 k 中的所有值被选择为相同的或者可以另选地针对 k 中的各个值进行独立选择。对于 $k=1, 2, \dots, K$ 中的各个值,可以使用围绕相应初始点 $(\theta_0^{k,f}, d_0^{k,f}, \omega_0, v_{x_0}, v_{y_0})$ ($f=1, 2, \dots, F$) 的泰勒级数展开来线性化 F 个函数中的各个函数。而且,如先前说明的,然后可以执行使用拉格朗日乘子的方法使加权的最小二乘函数最小化,以导出方程 (13) 中所示形式的正规方程组,其可以如下给出:

$$[0179] \quad \begin{bmatrix} B Q_{ll} B^T & A \\ A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \Delta \omega \\ \Delta v_x \\ \Delta v_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[0180] \quad \text{其中, } A = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^K \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} w^1 \\ w^2 \\ \vdots \\ w^K \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B^1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & B^K \end{bmatrix}, \quad Q_{ll} = \begin{bmatrix} Q_{ll}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ll}^K \end{bmatrix},$$

[0181] $k=1, 2, \dots, K$,

[0182] 其中, w^k ($k=1, 2, \dots, K$) 是向量,其元素是通过将初始点 $(\theta_0^{k,f}, d_0^{k,f}, \omega_0, v_{x_0}, v_{y_0})$ ($f=1, 2, \dots, F$) 针对 $k=1, 2, \dots, K$ 中的每一个代入相应 F 个函数中的各个函数来确定的。 $\theta_0^{k,f}$ 和 $d_0^{k,f}$ 是方程组 (6) 的各个方程中的 d 和 θ 的值。可以将初始值 ω_0, v_{x_0} 及 v_{y_0} 选择为由先前描述的线性最小二乘估计法提供的估计。然而,初始点不限于此,并且可以使用任何恰当的方法来选择 ω_0, v_{x_0} 及 v_{y_0} 的值。

[0183] 对于 $k=1, 2, \dots, K$ 中的各个值,矩阵 A^k 是通过将初始点 $\theta_0^{k,f}$ ($f=1, 2, \dots, F$) 代入关于自我运动参数 ω, v_x, v_y 的 F 个函数 (对于 k 的值) 的偏导数而形成的雅可比 (Jacobian) 矩阵。

$$[0184] \quad \mathbf{A}^k = \begin{bmatrix} -l_k^y \cos(\theta_0^{k,1} + \theta_k^M) + l_k^x \sin(\theta_0^{k,1} + \theta_k^M) & \cos(\theta_0^{k,1} + \theta_k^M) & \sin(\theta_0^{k,1} + \theta_k^M) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -l_k^y \cos(\theta_0^{k,F} + \theta_k^M) + l_k^x \sin(\theta_0^{k,F} + \theta_k^M) & \cos(\theta_0^{k,F} + \theta_k^M) & \sin(\theta_0^{k,F} + \theta_k^M) \end{bmatrix}$$

[0185] 对于 $k=1,2,\dots,K$ 中的各个值,矩阵 \mathbf{B}^k 是通过将初始点 $(\theta_0^{k,f}, d_0^{k,f}, \omega_0, v_{x_0}, v_{y_0})$ ($f=1,2,\dots,F$)代入关于 d 和 θ 的 F 个函数(对于 k 的值)的偏导数而形成的雅可比矩阵。矩阵 \mathbf{B}^k 可以以如下形式表达:

$$[0186] \quad \mathbf{B}^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial g^k}{\partial \theta^1} & 0 & 0 & \frac{\partial g^k}{\partial d^1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial g^k}{\partial \theta^F} & 0 & 0 & \frac{\partial g^k}{\partial d^F} \end{bmatrix}$$

[0187] 其中,对于 $f=1,2,\dots,F$,

$$[0188] \quad \frac{\partial g^k}{\partial \theta^f} = \left(l_k^y \sin(\theta_0^{k,f} + \theta_k^M) + l_k^x \cos(\theta_0^{k,f} + \theta_k^M) \right) \omega_0 - \sin(\theta_0^{k,f} + \theta_k^M) v_{x_0} \\ + \cos(\theta_0^{k,f} + \theta_k^M) v_{y_0}$$

$$[0189] \quad \frac{\partial g^k}{\partial d^f} = -1$$

[0190] 对于 $k=1,2,\dots,K$ 中的各个值, \mathbf{Q}_{il}^k 表示观测结果 $\theta_0^{k,f}, d_0^{k,f}$ ($f=1,2,\dots,F$)中的不确定性,并且可以由下式给出,

$$[0191] \quad \mathbf{Q}_{il}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\theta\theta}^k & \mathbf{Q}_{\theta d}^k \\ \mathbf{Q}_{d\theta}^k & \mathbf{Q}_{dd}^k \end{bmatrix}$$

[0192] 其中, \mathbf{Q}_{dd}^k 、 $\mathbf{Q}_{d\theta}^k$ 、 $\mathbf{Q}_{\theta d}^k$ 、 $\mathbf{Q}_{\theta\theta}^k$ 是观测结果 $\theta_0^{k,f}, d_0^{k,f}$ ($f=1,2,\dots,F$)的方差-协方差矩阵,其可以基于从第 k 雷达传感器测得的雷达数据导出的第 k 运动谱数据集计算出。更具体地, \mathbf{Q}_{dd}^k 是径向速度测量结果 $d_0^{k,f}$ 的协方差矩阵 ($f=1,2,\dots,F$),其包括各个径向速度测量结果的方差(或不确定性)以及不同径向速度测量结果之间的相关性。各个径向速度测量结果 $d_0^{k,f}$ 对应于第 k 运动谱数据集中的相应多普勒索引,并且各个径向速度测量结果的方差可以基于在图5的步骤S210处生成的归一化空间谱值来计算。具体地,可以使用先前描述的方程(5)来确定与径向速度测量结果相对应的、(第 k 运动谱数据集的)各个多普勒索引的方差值。针对各个径向速度测量结果确定的方差值可以形成 \mathbf{Q}_{dd}^k 的对角元素。

[0193] $\mathbf{Q}_{\theta\theta}^k$ 是针对角度测量结果 $\theta_0^{k,f}$ ($f=1,2,\dots,F$)的协方差矩阵,其可以是基于从第 k 雷达传感器测得的雷达数据导出的第 k 运动谱数据集计算出的。更具体地, $\mathbf{Q}_{\theta\theta}^k$ 包括各个角度测量结果的方差以及角度测量结果之间的相关性。方程(5)可以类似地适于确定第 k 运动谱数据集中的与角度测量结果相对应的各个空间索引的方差。具体地, $\mathbf{Q}_{\theta\theta}^k$ 的对角元素可以通过确定在由针对第 k 运动谱数据集中的各个空间索引的相应多普勒索引指示的径向速度当中径向速度的分布的方差来计算的。该方差是通过使用与针对该空间索引的

多个多普勒仓索引相对应的归一化空间谱值作为针对多个多普勒仓索引的相应概率值来计算的。 $Q_{d\theta}^k$ 和 $Q_{\theta d}^k$ 表征第k运动谱数据集的径向速度测量结果与角度测量结果之间的协方差。

[0194] 在求解方程(16)中的 z 、 $\Delta \omega$ 、 Δv_x 、 Δv_y 的值时,可以通过将参数增量 $\Delta \omega$ 、 Δv_x 、 Δv_y 分别与起始点 ω_0 、 v_{x0} 、 v_{y0} 相加来获得当前迭代的估计值 $\tilde{\omega}$ 、 \tilde{v}_x 及 \tilde{v}_y 。而且,可以使用方程(14)来计算残差向量 e 。还可以使用所获得的残差向量 e 和方程(11)来计算观测结果 $\tilde{\theta}$ 和 \tilde{d} 的估计值(以供在所述估计的下一迭代中使用)。

[0195] 尽管最小二乘平差法的前述示例是基于方程组(6)的,但是应明白,在只需要计算自我运动参数中的一些自我运动参数的情况下,可以将相同的方法应用于先前定义的方程组(7)或(8)。

[0196] 尽管本示例是使用最小二乘平差法(使用高斯-赫尔默特模型)来执行自我运动参数的估计的,但是在另选实施方式中,可以另选地使用总最小二乘(TLS)法。

[0197] 图8例示了与由被安装在主车辆上的六个不同雷达传感器获取的雷达数据相对应的运动谱数据S的六个不同标绘图,各个雷达传感器被安装在车辆上的不同位置处并且扫描车辆周围的不同视场。在各个标绘图中,由标绘图中的高强度值给出的径向速度随方位角度的变化与运动方程(1)一致。

[0198] 图9以白色实线例示了通过使用线性最小二乘估计结合迭代RANSAC处理(如关于图7所描述的)而拟合至图8中的六个运动谱数据S标绘图中的各个标绘图的自我运动曲线。而且,为了比较,图9中的各个曲标绘图还以虚线示出了由车辆上的运动传感器测得的自我运动曲线。如图9所示,针对运动谱数据S使用最小二乘估计获得的自我运动曲线基本上与由运动传感器测得的自我运动曲线相匹配。

[0199] 图10例示了使用线性最小二乘估计而估计出的自我运动信息与经由其它方法获得的自我运动信息的比较。更具体地,图10例示了基于线性最小二乘估计结合迭代MSAC处理而估计的速度和偏航率(在图10中标注为“LLD RM速度/偏航率”)与使用GPS获得的速度和偏航率(“GPS滤波器速度/偏航率”)、使用主车运动传感器获得的速度和偏航率(“主车速度/偏航率”)以及使用即时雷达运动获得的速度和偏航率(“IRM速度/偏航率”)的比较。

[0200] 图11例示了使用高斯-赫尔默特模型估计的自我运动信息与经由其它方法获得的自我运动信息的比较。更具体地,图11例示了使用前述非线性高斯-赫尔默特模型估计的速度和偏航率(在图10中标注为“LLD RM速度/偏航率”)与使用GPS获得的速度和偏航率(“GPS滤波器速度/偏航率”)、使用主车运动传感器获得的速度和偏航率(“主车速度/偏航率”)以及使用即时雷达运动获得的速度和偏航率(“IRM速度/偏航率”)的比较。

[0201] 图12例示了根据具有多个线性子阵列的二维阵列生成的运动谱数据。具体地,由于在运动谱数据的生成中未考虑仰角,因此也可以使用二维阵列的各个单独子阵列来计算运动谱数据。然而,如图12所示,在这种场景中,对于各个多普勒仓,由于存在与两条相应曲线相对应的两个强峰值,因此在角度测量结果中存在不明确。为了根据该运动谱数据确定车辆自我运动,应当仅选择这两条曲线中的一条曲线并且将其用于使用上述方法来估计自我运动参数。而且,可以通过分析已知的运动行为或者测量来自另一传感器的运动来解决该不明确以便选择正确的曲线。

[0202] 尽管图1A中的自我运动信息确定模块8利用了由运动谱获取模块6使用上面参照图3描述的处理生成的运动谱数据集S,但是运动谱获取模块可以改为从外部源接收运动频谱数据集。这样,设备10不需要包括图1A中例示的数据获取模块2和多普勒处理模块4,并且可以具有运动谱获取模块6的变体。图13A例示了根据第二示例实施方式的设备10',该设备包括经修改的运动谱获取模块6'以及第一示例实施方式的自我运动信息确定模块8,但是不包括第一示例实施方式的数据获取模块2和多普勒处理模块4。

[0203] 图13B概括了由第二示例实施方式的雷达数据处理设备10'确定车辆30的自我运动信息的方法。

[0204] 在图13B的步骤S410中,图13A的运动谱获取模块6'获取基于由雷达传感器20生成的雷达数据的运动谱数据集。该运动谱数据包括多个数据元,所述数据元中的各个数据元是针对多个多普勒仓索引中的相应多普勒仓索引 j 以及针对多个空间仓索引中的相应空间仓索引 n 计算的。各个空间仓索引 n 指示雷达回波信号相对于雷达传感器20的轴线的相应到达角。

[0205] 在图13B的步骤S420中,图13A的自我运动信息确定模块8通过对包括使用运动谱数据集生成的多个运动方程的运动方程组进行求解,来确定自我运动信息。各个运动方程涉及:指示静止对象相对于雷达传感器20的径向速度的相应值、指示静止对象相对于雷达传感器20的轴线的角位移的相应值、以及指示车辆30的速度的变量。

[0206] 这里所描述的示例方面避开了可能妨碍各种高级驾驶辅助系统(ADAS)和自动驾驶应用的执行的、与移动车辆的自我运动信息的估计相关的具体以计算机技术为基础的限制。特别地,由惯性测量单元(IMU)测测得的或者使用由另一类型的传感器(诸如摄像机或雷达)获取的测量结果估计的自我运动通常遭受固有误差。根据本文所描述的示例方面,获取用于估计车辆自我运动信息的运动谱数据集,并且通过对包括使用运动谱数据集生成的多个运动方程的运动方程组进行求解,来确定车辆的自我运动信息。指示运动方程组中的径向速度和角位置的值是基于运动频谱数据集中的仓索引并且独立于雷达数据来预先计算的。结果,由于运动方程组中的许多项是预先计算的,并且可能只需要计算一次,因此减少了确定自我运动信息的复杂性。而且,使用运动谱数据集允许确定自我运动信息,而不必首先对雷达数据进行处理以在多普勒角度域中进行检测,然后在与该检测相对应的单独波束向量上应用测角算法。由于估计的质量不取决于单独雷达探测的数量,因此使用运动谱数据集来估计自我运动信息可以是有利的。而且,根据本文所描述的示例方面的以计算机技术为基础的前述能力,本文所描述的示例方面改进了计算机和计算机处理/功能,并且还改进了至少自我运动确定以及各种高级驾驶辅助系统(ADAS)和自动驾驶应用的领域。

[0207] 在前述描述中,参照多个示例实施方式描述了示例方面。因此,本说明书应被认为是例示性的,而非限制性的。类似地,附图中例示的突出示例实施方式的功能和优点的图仅是出于示例目的而呈现的。示例实施方式的架构是足够灵活和可配置的,使得它可以不同于附图所示的方式来加以利用(和导航)。

[0208] 在一个示例实施方式中,本文所呈现的示例的软件实施方式可以被提供为计算机程序或软件(诸如具有指令或指令序列的一个或多个程序),该计算机程序或软件被包括或存储在诸如机器可访问或机器可读介质、指令存储部或计算机可读存储装置的制品中,其中每一个都可以是非暂时性的。可以将非暂时性机器可访问介质、机器可读介质、指令存

储部或计算机可读存储装置上的程序或指令用于对计算机系统或其它电子装置进行编程。机器或计算机可读介质、指令存储部以及存储装置可以包括但不限于软盘、光盘和磁光盘，或者适于存储或传输电子指令的其它类型的介质/机器可读介质/指令存储部/存储设备。本文所描述的技术不限于任何特定的软件配置。它们可以在任何计算或处理环境中找到适用性。本文所使用的术语“计算机可读”、“机器可访问介质”、“机器可读介质”、“指令存储部”以及“计算机可读存储装置”应当包括能够存储、编码或传输指令或指令序列以供机器、计算机或计算机处理器执行并且使机器/计算机/计算机处理器执行本文所描述的方法中的任一方法的任何介质。而且，本领域中通常以一种形式或另一种形式（例如，程序、过程、处理、应用、模块、单元、逻辑等）将软件称为采取动作或导致结果。这样的表达仅仅是陈述由处理系统执行软件造成处理器执行动作以生成结果的速记方式。

[0209] 一些实施方式还可以通过准备专用集成电路、现场可编程门阵列、或者通过互连常规组件电路的恰当网络来实现。

[0210] 一些实施方式包括计算机程序产品。计算机程序产品可以是存储有指令的存储介质、指令存储部或者存储装置，这些指令可以被用于控制或造成计算机或计算机处理器执行本文所描述的示例实施方式的过程中的任一过程。存储介质/指令存储部/存储设备可以包括，例如但不限于，光盘、ROM、RAM、EPROM、EEPROM、DRAM、VRAM、闪存、闪存卡、磁卡、光学卡、纳米系统、分子级存储器集成电路、RAID、远程数据存储装置/存档/仓储、和/或适于存储指令和/或数据的任何其它类型的装置。

[0211] 被存储在计算机可读介质、指令存储部或者存储装置上的一些实现包括用于既控制系统的硬件又用于使得系统或微处理器能够利用本文所描述的示例实施方式的结果与人类用户或其它机制进行交互的软件。这种软件可以包括但不限于设备驱动程序、操作系统以及用户应用。最终，此类计算机可读介质或存储装置还包括用于执行本文中的示例方面的软件，如上文所描述的。

[0212] 被包括在系统的编程和/或软件中的的是用于实现本文所描述的过程的软件模块。在本文中的一些示例实施方式中，模块包括软件，但是在本文的其它示例实施方式中，模块包括硬件、或者硬件和软件的组合。

[0213] 虽然上面已经描述了各种示例实施方式，但是应理解，它们是作为示例而非限制来呈现的。对于相关领域的技术人员显而易见的是，可以在其中进行形式和细节上的各种改变。因此，本公开不应受上述示例实施方式中的任一示例实施方式的限制，而应仅根据所附权利要求及其等同物来进行限定。

[0214] 此外，说明书摘要的目的是使专利局和公众，尤其是不熟悉专利或法律术语或措辞的本领域的科学家、工程师和从业者能够从粗略的检查中快速地确定本申请的技术公开的性质和本质。说明书摘要不旨在以任何方式限制本文所呈现的示例实施方式的范围。还要理解，在权利要求中叙述的过程不需要以所呈现的次序来执行。

[0215] 尽管本说明书包含许多具体实施方式细节，但是这些细节不应解释为限制性的，而是作为对特定于本文所描述的特定实施方式的特征的描述。本说明书中在单独实施方式的背景下描述的某些特征还可以在单个实施方式中组合实现。相反地，在单个实施方式的背景下描述的各种特征还可以单独地或者以任何适当的子组合在多个实施方式中加以实现。此外，尽管上面将特征描述为以某些组合起作用，甚至同样一开始就要求加以保护，但

是来自要求保护的组合的一个或更多个特征在某些情况下可以从该组合除去,并且该要求保护的组合可以被指向子组合或子组合的变型例。

[0216] 在某些境况下,多任务执行和并行处理可能是有利的。此外,上面描述的实施方式中的各种组件的分离不应被理解为在所有实施方式中都需要这种分离,而应理解,所描述的程序组件和系统通常可以共同集成在单个软件产品中或者封装到多个软件产品中。

[0217] 现在已经描述了一些例示性实施方式和实施方式,显然已经通过示例的方式呈现的前述实施方式是例示性的而非限制性的。特别地,尽管本文所呈现的示例中的许多示例涉及设备或软件要素的特定组合,但是这些要素可以以其它方式进行组合以实现相同的目的。仅结合一个实施方式讨论的动作、要素以及特征不旨在被排除在其它的一个或多个实施方式中的类似角色之外。

[0218] 本文所描述的设备 and 计算机程序可以在不脱离其特性的情况下以其它特定形式加以具体实施。前述实施方式是例示性的而不是对所描述的系统和方法的限制。由此,本文所描述设备和计算程序的范围是通过所附权利要求而非前述描述来指示的,并且落入权利要求的等同物的含义和范围内的所有改变都被涵盖于此。

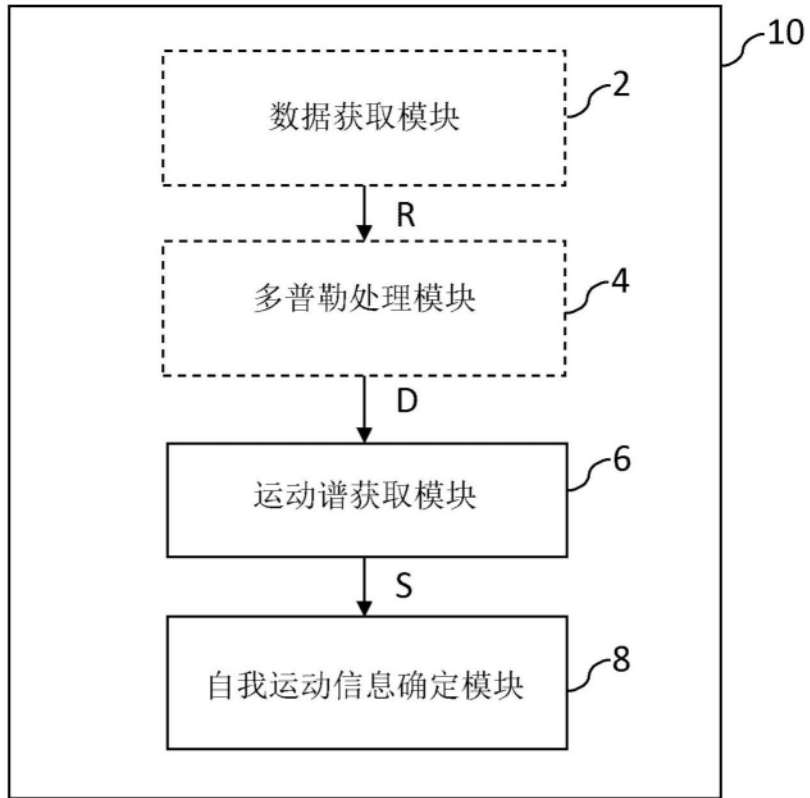


图1A

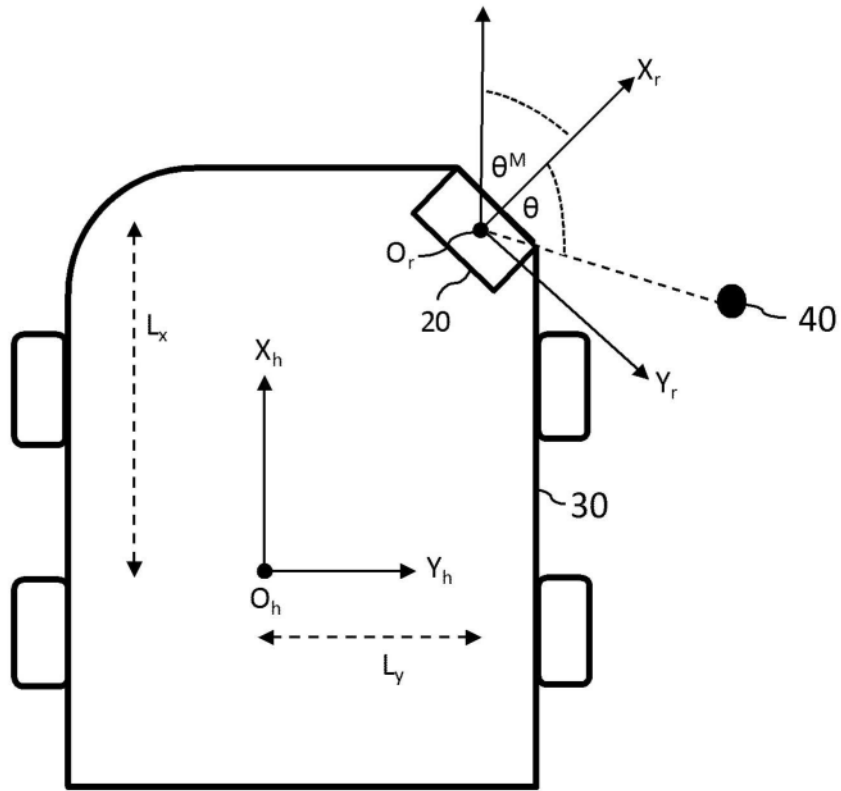


图1B

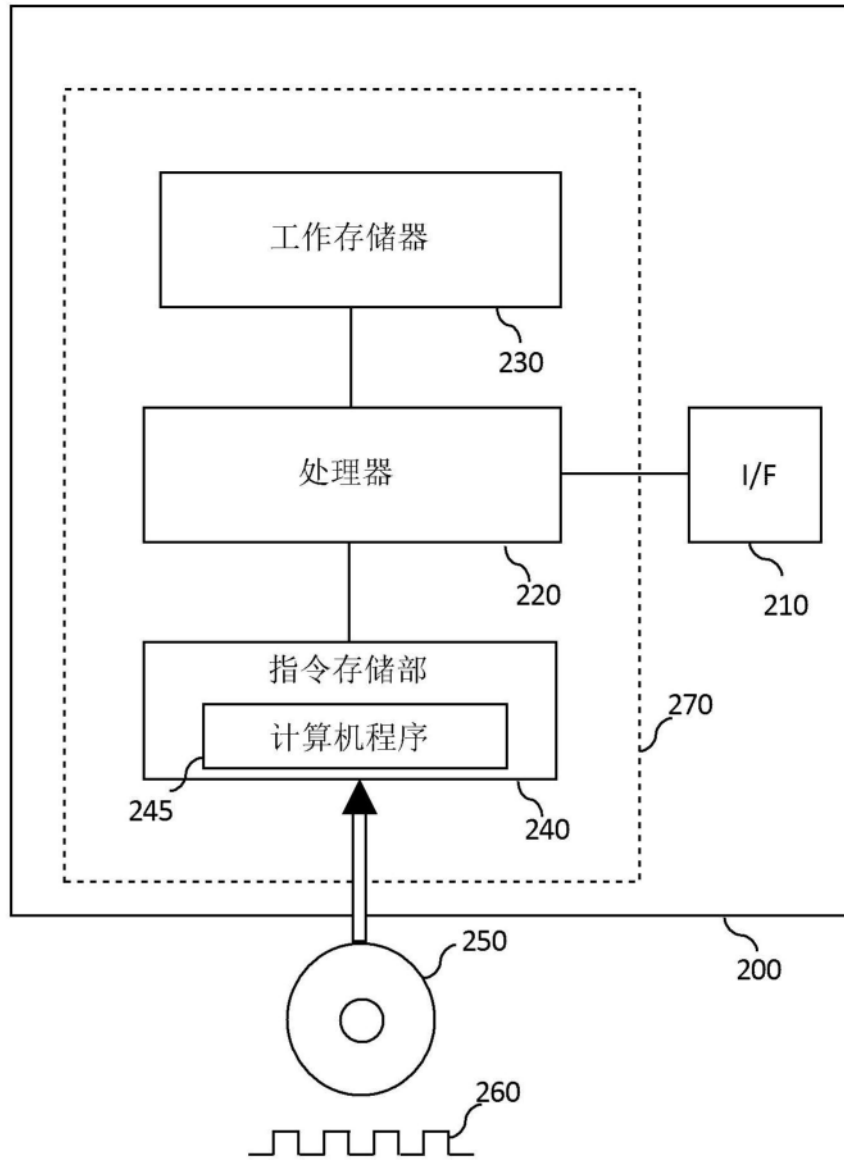


图2

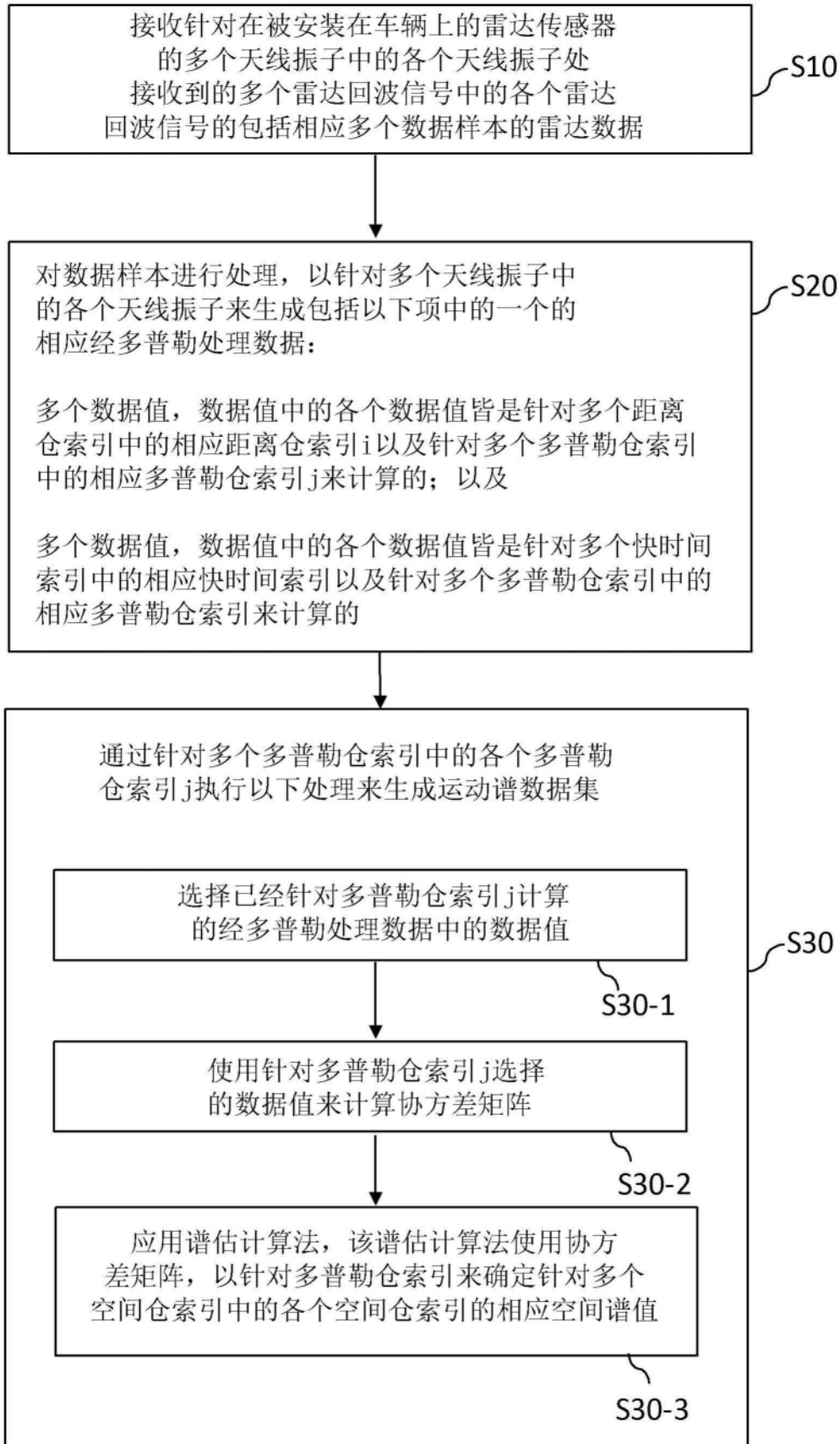


图3

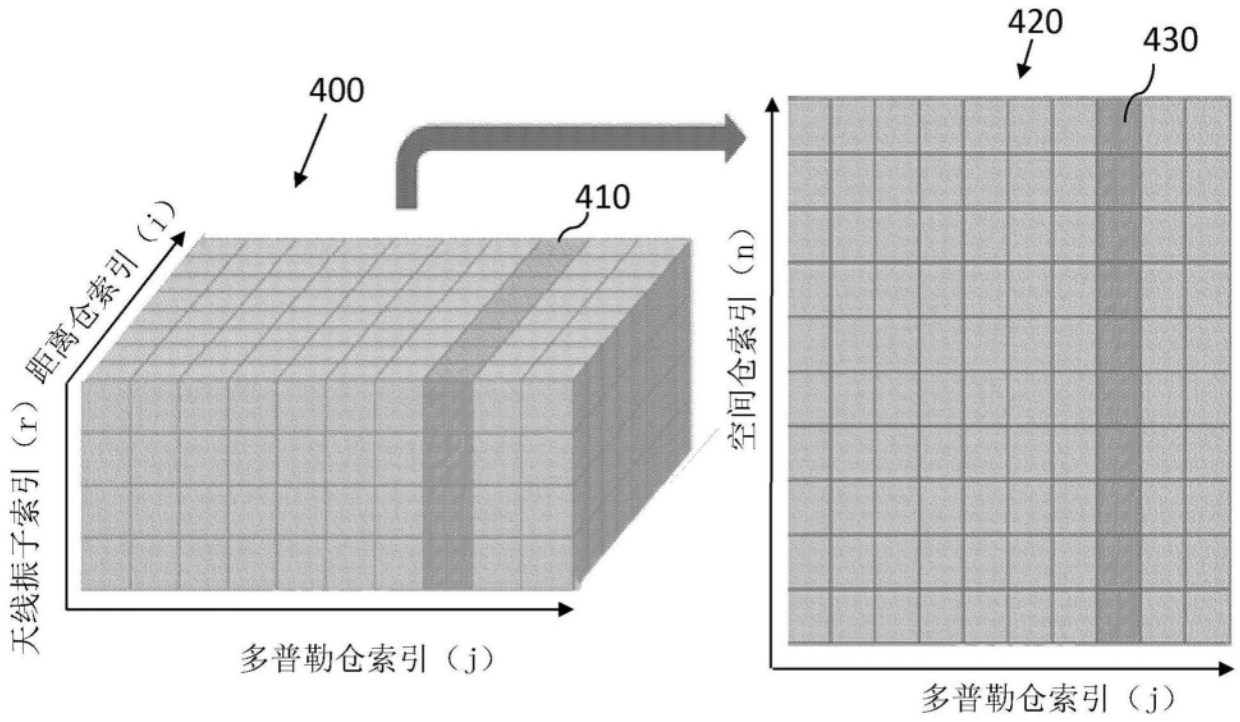


图4A

图4B

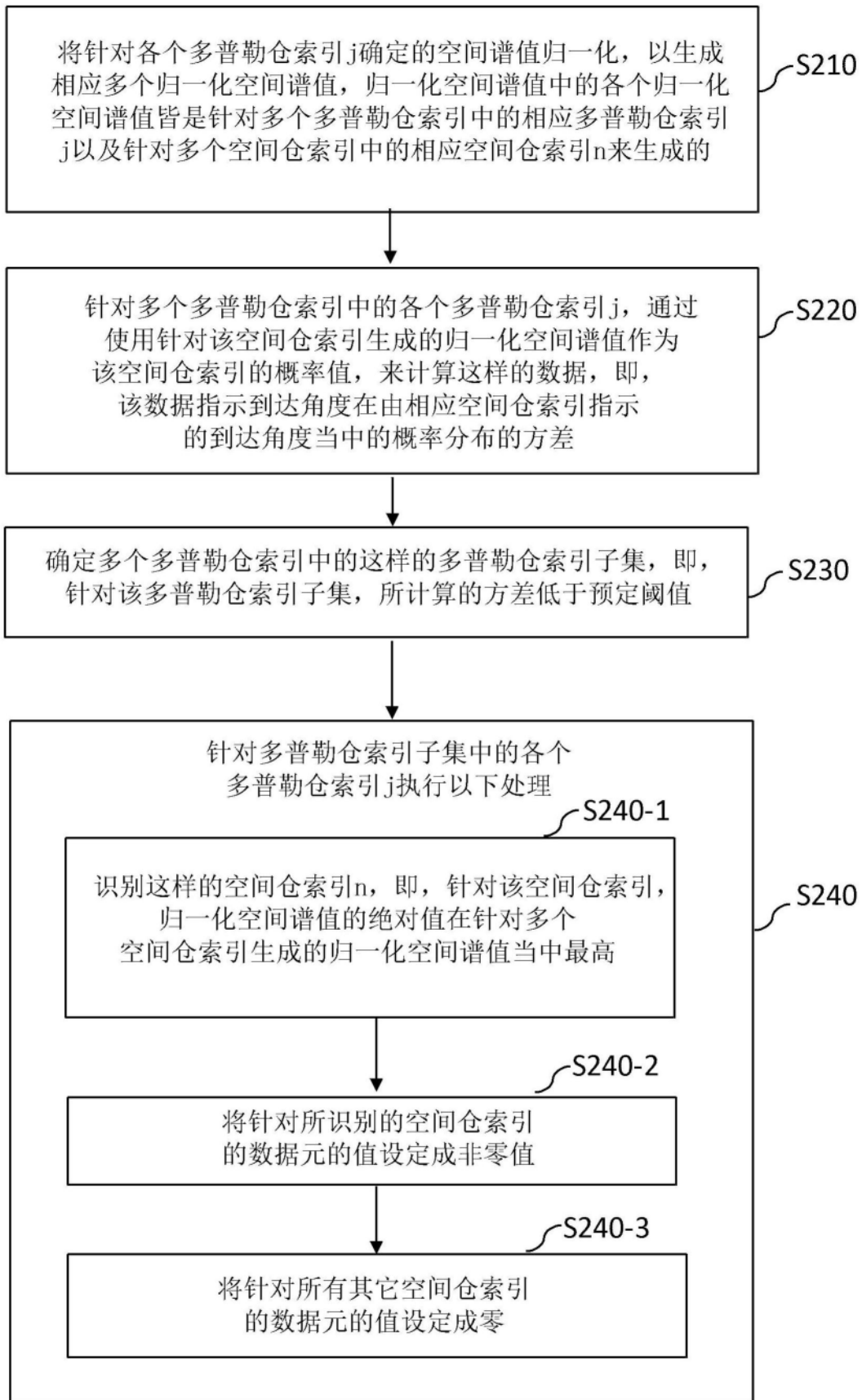


图5

右前方

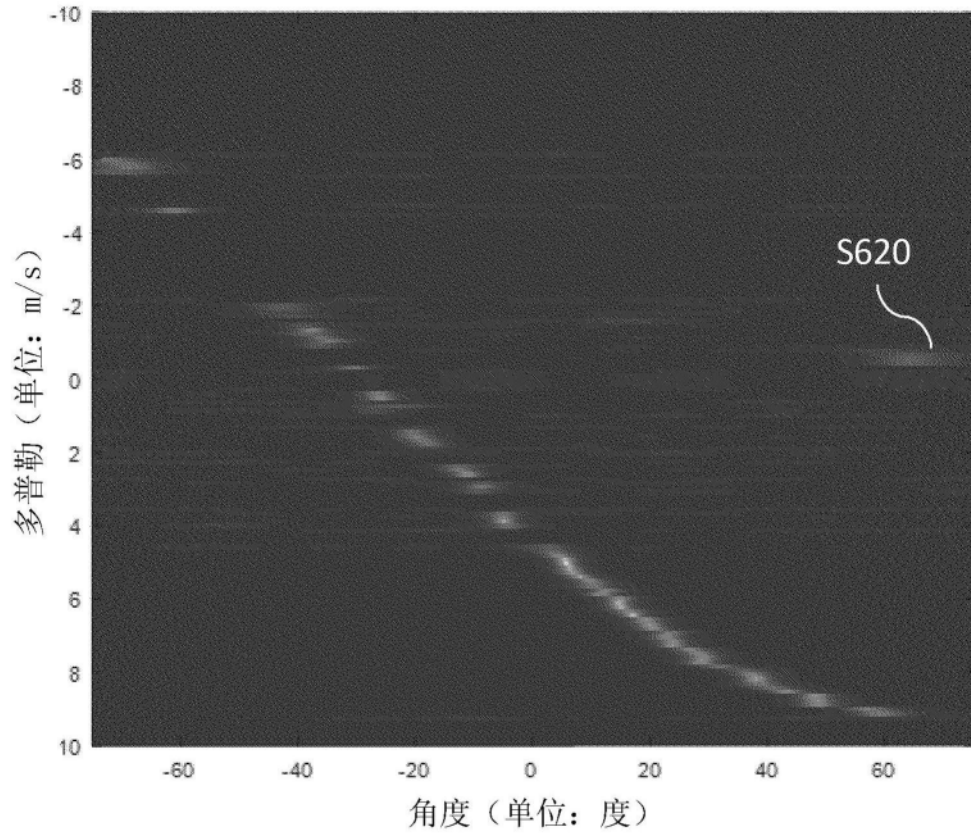


图6

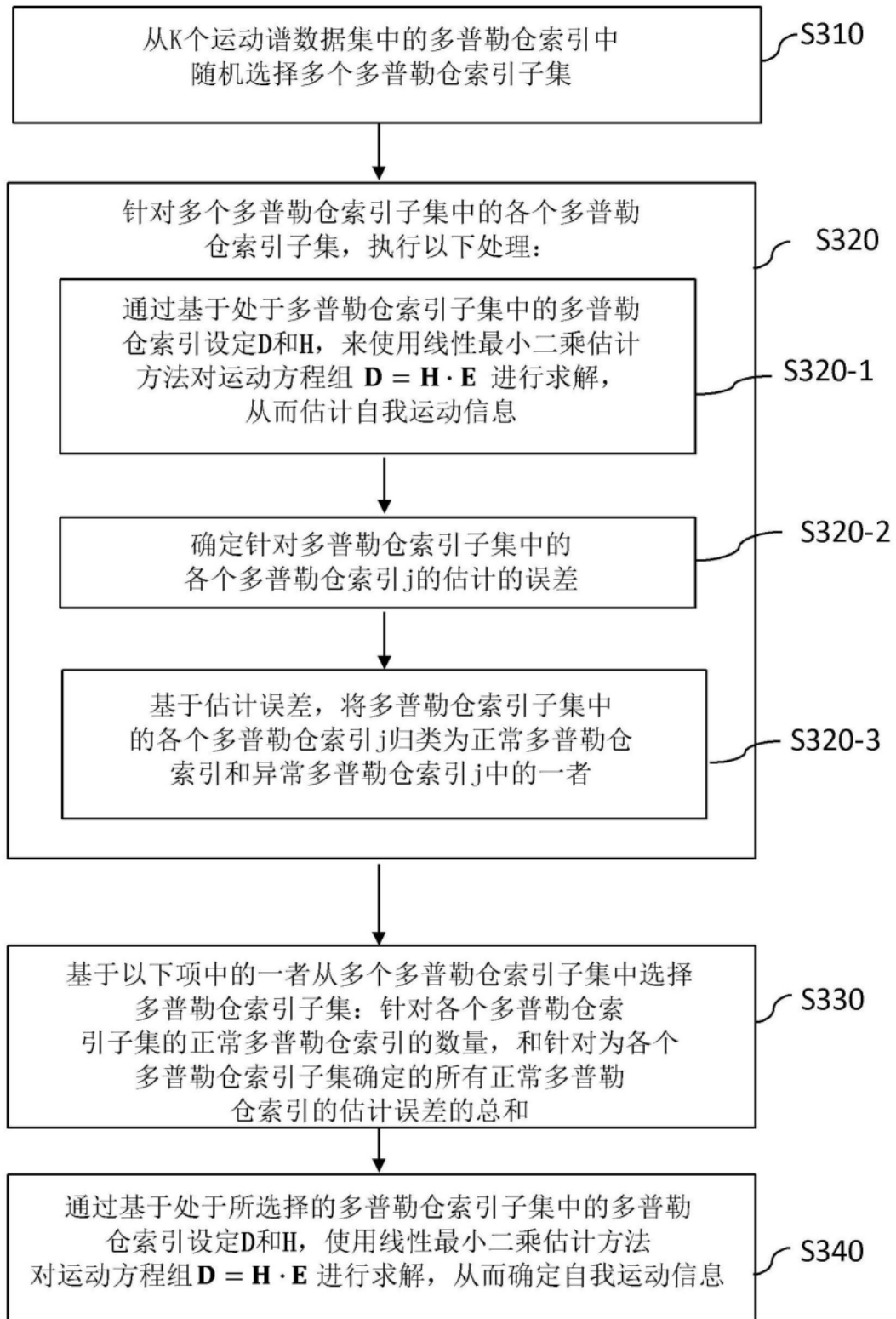


图7

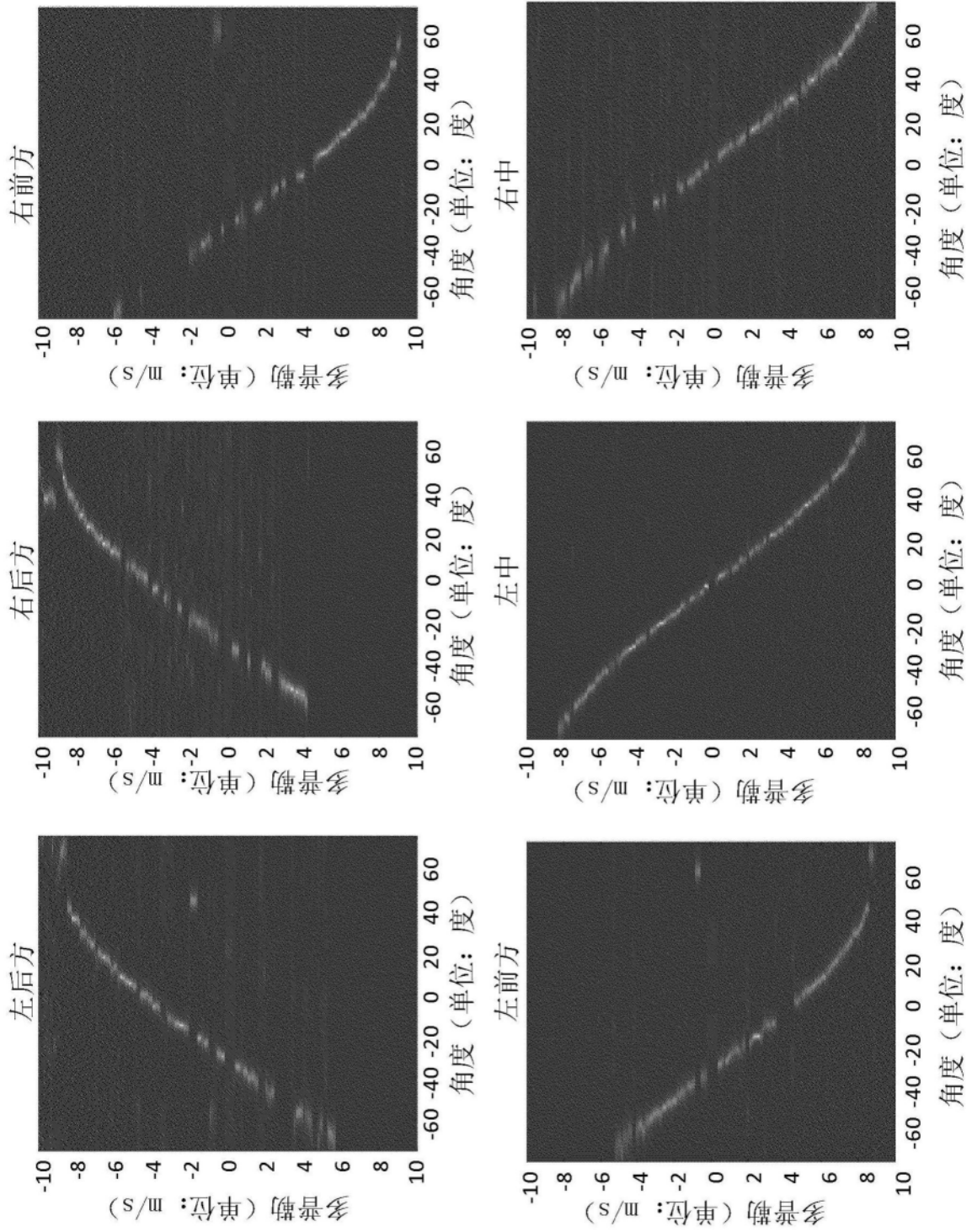


图8

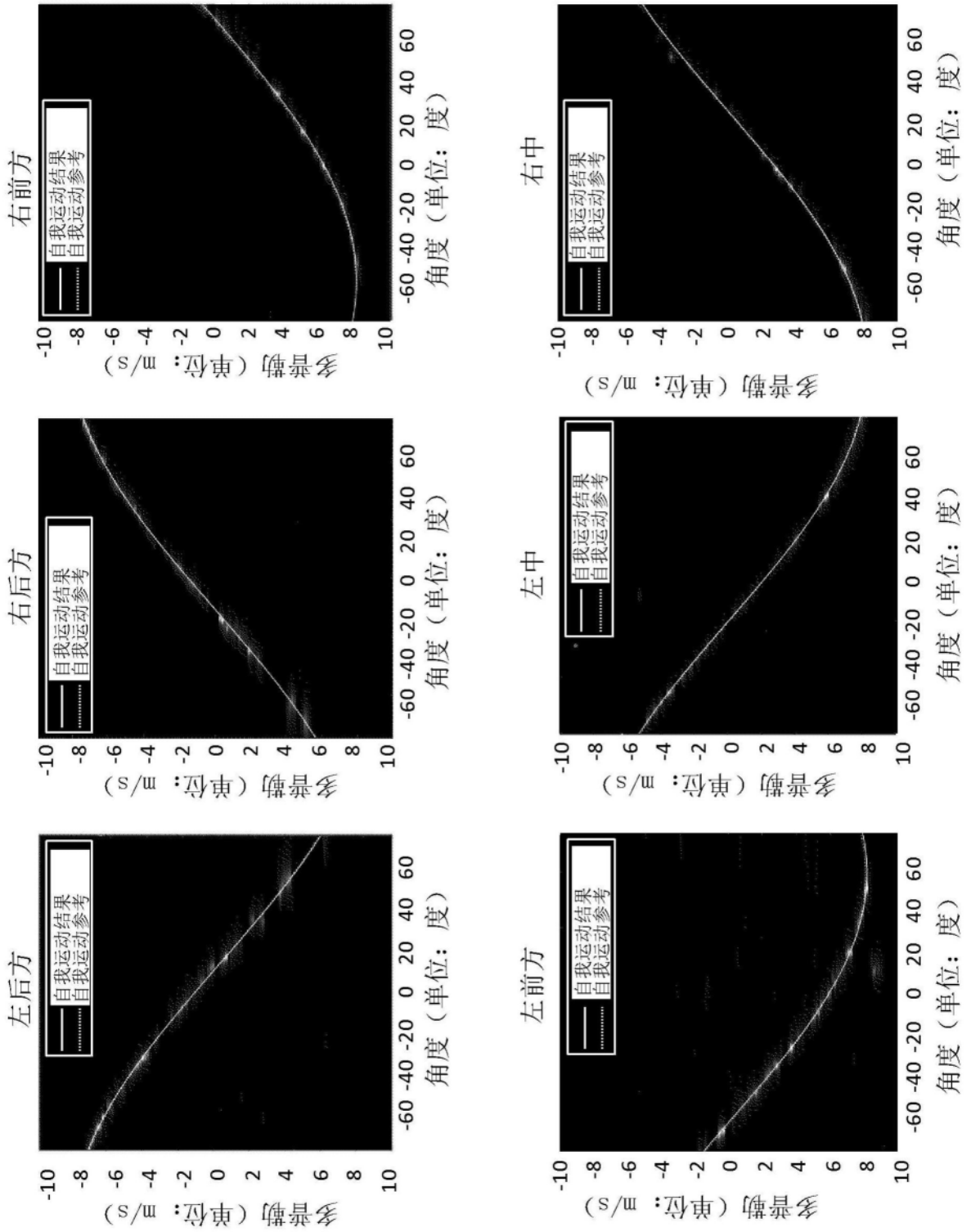


图9

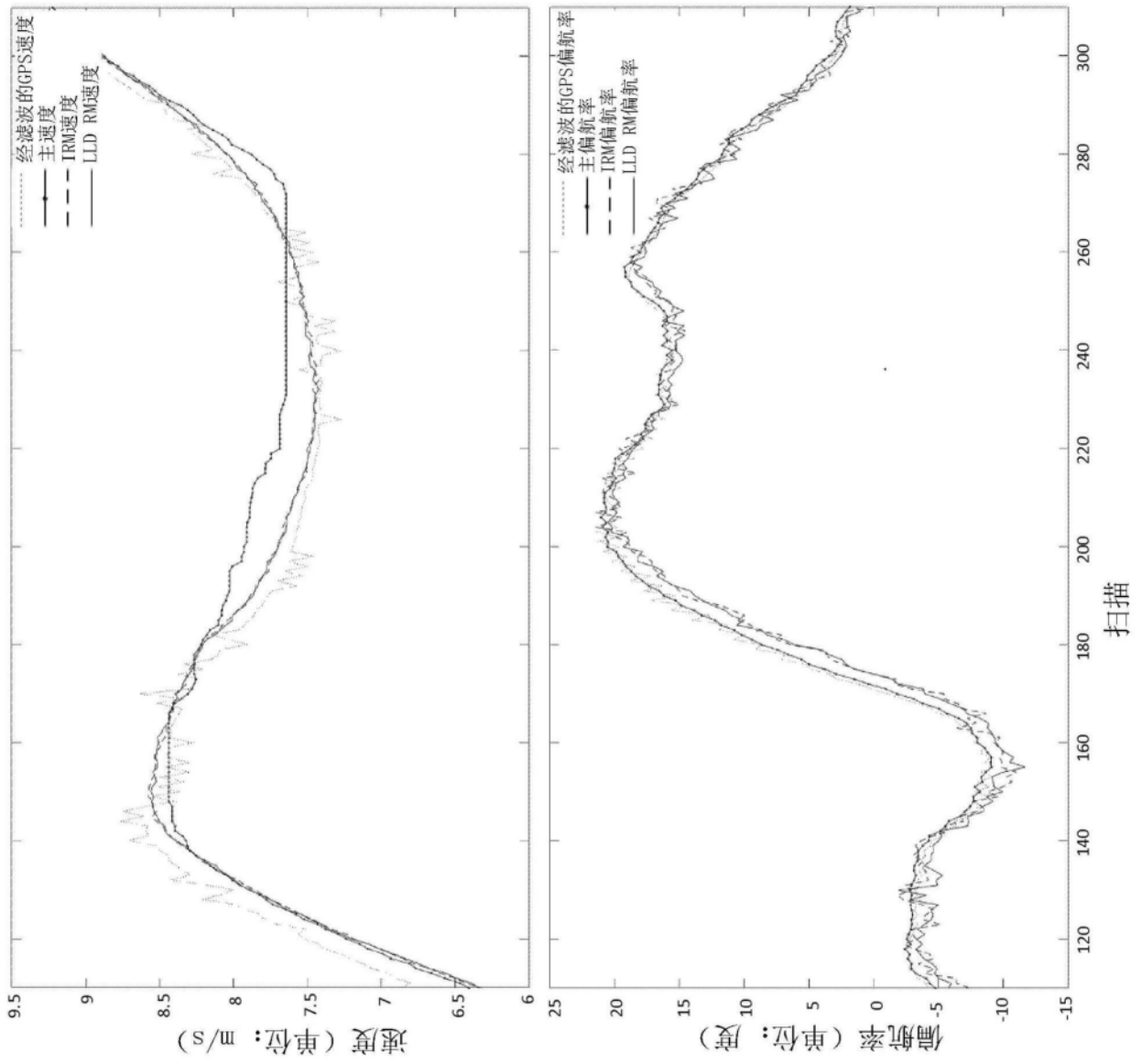


图10

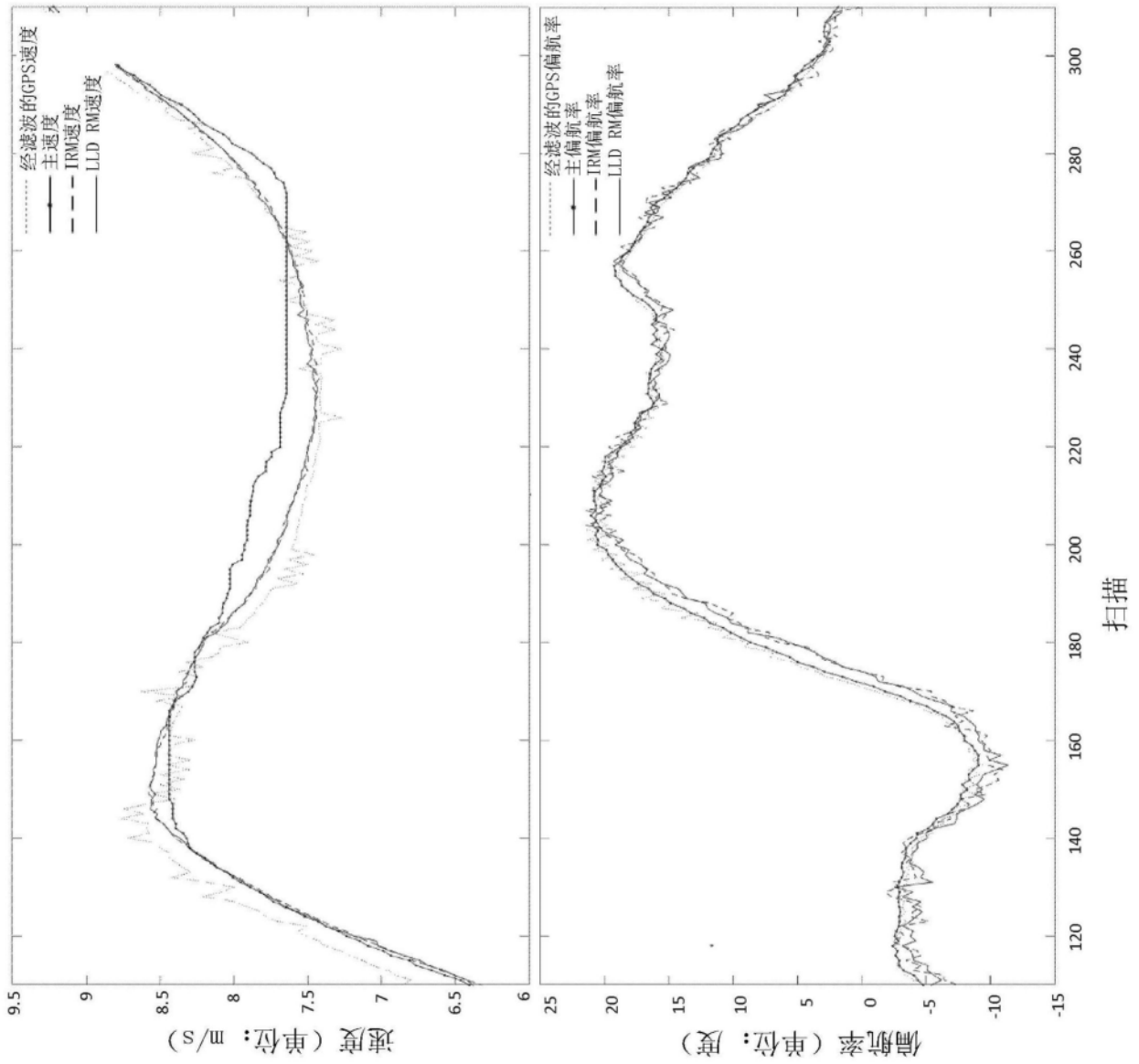


图11

右前方

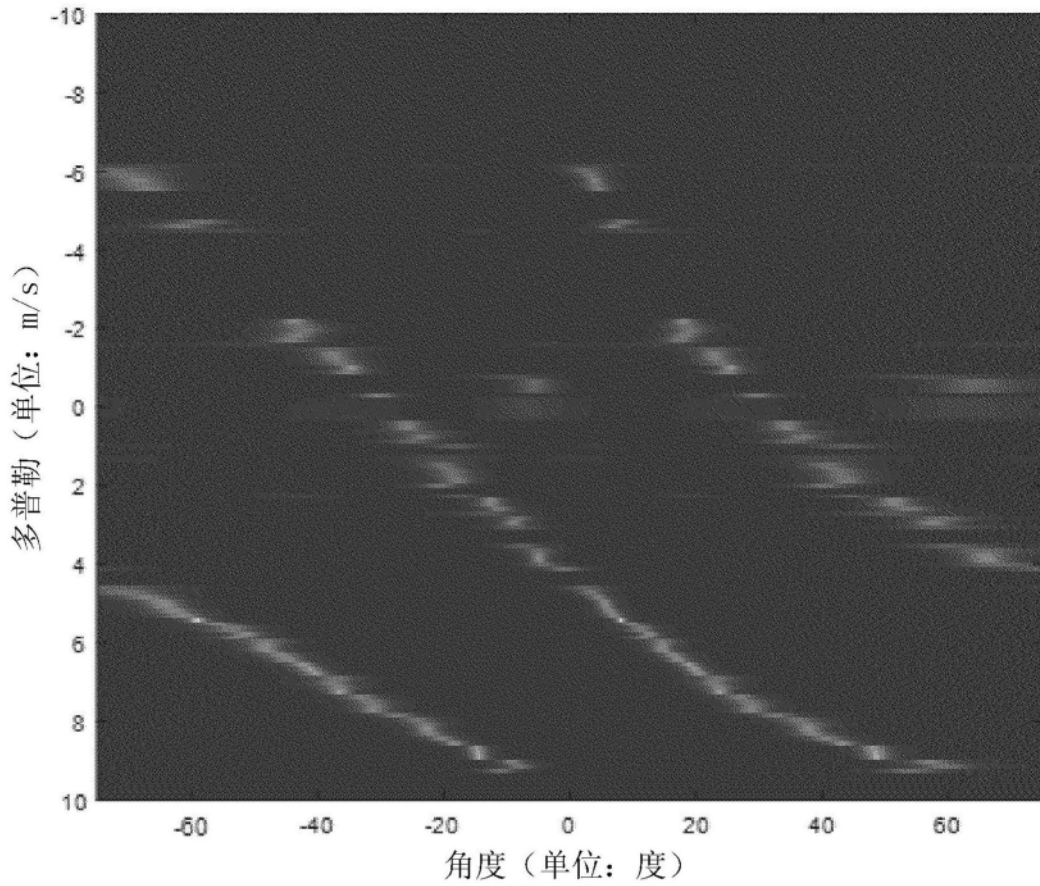


图12

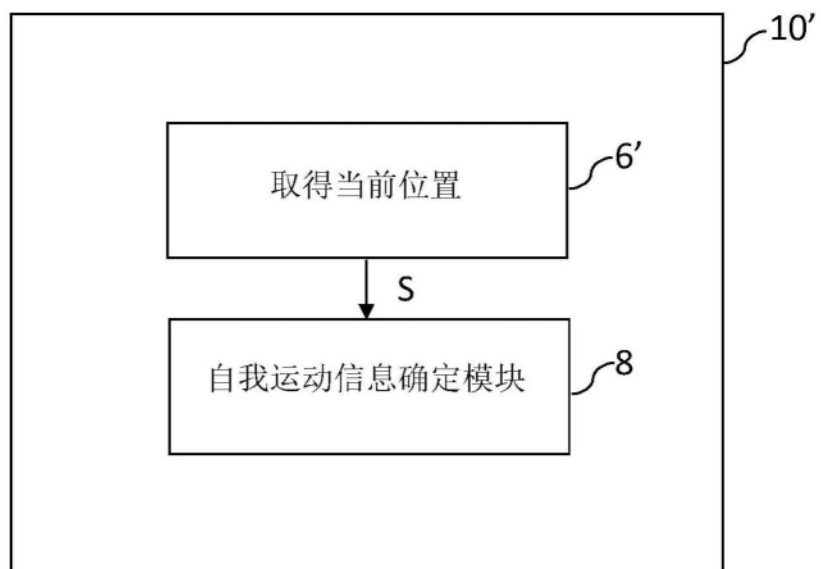


图13A

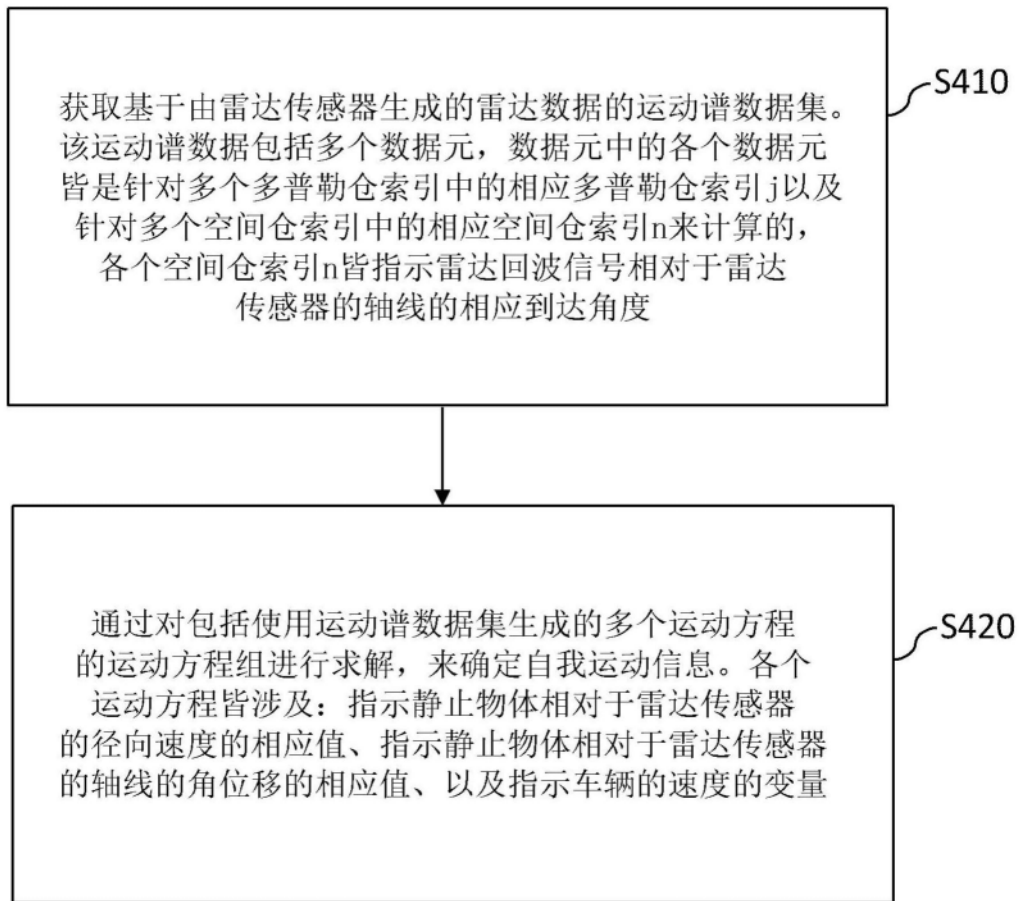


图13B