



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113175931 A

(43) 申请公布日 2021.07.27

(21) 申请号 202110361651.3

(22) 申请日 2021.04.02

(71) 申请人 上海机电工程研究所

地址 201100 上海市闵行区元江路3888号
(八部)

(72) 发明人 秦峰 宋振华 刘伟鹏 崔闪
李云龙 吴镇 李勇 袁杰波
韩琳 王晖辉

(74) 专利代理机构 上海汉声知识产权代理有限公司 31236

代理人 胡晶

(51) Int. Cl.

G01C 21/20 (2006.01)

G01C 21/16 (2006.01)

G01C 25/00 (2006.01)

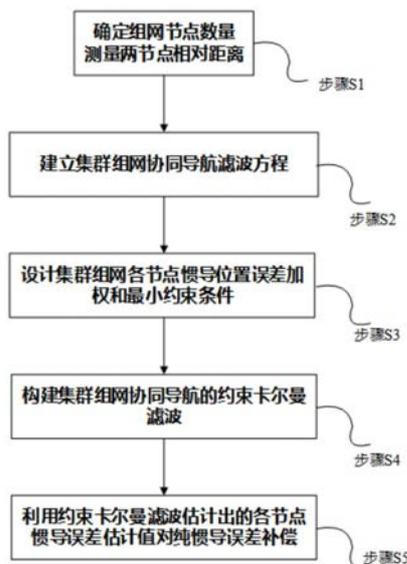
权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法及系统

(57) 摘要

本发明提供了一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法及系统,涉及协同导航技术领域,该方法包括:步骤S1:确定集群组网节点数量,并测量各节点间的相对距离;步骤S2:基于测量的各节点间的相对距离,建立集群组网协同导航滤波方程;步骤S3:设计集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件;步骤S4:构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波;步骤S5:利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值对纯惯导误差补偿。本发明能够实时递推估计出惯导误差对惯导系统进行修正,抑制各个节点纯惯导误差发散。



1. 一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法,其特征在于,包括:

步骤S1:确定集群组网节点数量,并测量各节点间的相对距离;

步骤S2:基于测量的各节点间的相对距离,建立集群组网协同导航滤波方程;

步骤S3:设计集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件;

步骤S4:构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波;

步骤S5:利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值对纯惯导误差补偿。

2. 根据权利要求1所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法,其特征在于,所述步骤S2中的集群组网协同导航滤波方程,包括状态方程,所述状态方程具体为:

$$\dot{X}(t) = F(t) X(t) + G(t) W(t)$$

式中, $X(t) = [\delta L_1^I, \delta \lambda_1^I, \delta h_1^I, \dots, \delta L_n^I, \delta \lambda_n^I, \delta h_n^I]$, $\delta L_i^I, \delta \lambda_i^I, \delta h_i^I (i = 1:n)$ 分别为集群中各个节点的地理坐标系下的三轴位置误差, n 为集群节点数量, $F(t)$ 为状态转移矩阵, $G(t)$ 为系统噪声系数矩阵, $W(t)$ 为系统噪声矩阵;

$$\text{其中, } F(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_n^i}{(R_M + h_i)^2} \\ \frac{V_e^i \sec L_i \tan L_i}{R_N + h_i} & 0 & -\frac{V_e^i \sec L_i}{(R_N + h_i)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,n;$$

式中, V_e^i 表示 i 节点东向速度; L_i 表示 i 节点纬度; h_i 表示 i 节点高度; R_N 表示地球卯酉圈曲率半径; R_M 表示地球子午圈曲率半径; V_n^i 表示 i 节点北向速度。

3. 根据权利要求1所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法,其特征在于,所述步骤S2中的集群组网协同导航滤波方程,还包括测量方程,所述测量方程具体为:

$$L(t) = HX(t) + \Delta$$

式中, $L(t)$ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测量矩阵, $n-1$ 为观测量数量,即测距值数量, H 为 $(n-1) \times 3n$ 维观测系数矩阵, Δ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测噪声矩阵;

$$\text{其中, } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & & & \\ -\frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(j-2)} & \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-j)} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & & & \\ -\frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} & \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \mathbf{D}_a \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} \rho_{ij}^I - \rho_{ij}^m \\ \vdots \\ \rho_{in}^I - \rho_{in}^m \end{bmatrix}$$

式中, ρ_{ij}^m 为集群中节点 i 与节点 j 间的测量距离,

$\rho_{ij}^l = \sqrt{(x_i^l - x_j^l)^2 + (y_i^l - y_j^l)^2 + (z_i^l - z_j^l)^2}$ ($i, j = 1, \dots, n$ 且 $i \neq j$) 为节点 i 与节点 j 间惯导计算距离, L 随弹群节点 n 的数量变化实时变化。

4. 根据权利要求3所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法, 其特征在于, 所述步骤S3中集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件, 其中, 约束条件包括:

$$G^T P_x D_a X = 0$$

式中, G^T 是由 $H^T P H$ 的零特征值对应的特征向量组成的 $6 \times 3n$ 维矩阵, P 为 L 的对角权阵, $H^T P H$ 为 L 的对角权阵的正定矩阵, P_x 为根据各节点惯导系统精度水平确定的待估参数向量 X 的 $3n \times 3n$ 维权阵, n 为集群节点数量,

$$P_x = \begin{bmatrix} (8000)^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (8000)^2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (8000)^2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & (8000)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & (8000)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & (8000)^2 \end{bmatrix}$$

式中, x_i^l, y_i^l, z_i^l ($i = 1:n$) 为集群节点 i 在地心地固系下惯导位置, P_x 随集群节点 n 的数量变化实时变化。

5. 根据权利要求4所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法, 其特征在于, 所述步骤S3中集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件, 地理坐标系下经纬高误差转换至地心地固坐标系下XYZ三轴误差的转换矩阵为:

$$d_{a_i} = \begin{bmatrix} -(Rn + h_i^l) \sin L_i^l \cos \lambda_i^l & -(Rn + h_i^l) \cos L_i^l \sin \lambda_i^l & \cos L_i^l \cos \lambda_i^l \\ -(Rn + h_i^l) \sin L_i^l \sin \lambda_i^l & (Rn + h_i^l) \cos L_i^l \cos \lambda_i^l & \cos L_i^l \sin \lambda_i^l \\ [Rn(1 - e^2) + h_i^l] \cos L_i^l & 0 & \sin L_i^l \end{bmatrix}$$

$$D_a = \begin{bmatrix} d_{a_1} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & d_{a_i} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & d_{a_n} \end{bmatrix}$$

式中, Rn 表示地球卯酉圈曲率半径; h_i^l 表示 i 节点惯导解算高度; L_i^l 表示 i 节点惯导解算纬度; λ_i^l 表示 i 节点惯导解算经度; e^2 表示地球曲率。

6. 根据权利要求1所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法, 其特征在于, 所述步骤S4采用投影法将约束条件投影至传统卡尔曼滤波, 构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波为如下:

$$\text{约束条件矩阵: } B_k = G^T P_x D_a;$$

状态一步预测: $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$;

约束修正后状态一步预测: $\tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{B}_k^T (\mathbf{B}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{B}_k^T)^{-1} \mathbf{B}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$;

状态估计: $\hat{\mathbf{X}}_k = \tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1})$;

滤波增益: $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$;

一步预测均方误差: $\mathbf{P}_{k/k-1} = \phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \phi_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k$;

估计均方误差: $\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}$;

式中, \mathbf{B}_k 为约束条件矩阵, $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$ 为一步预测状态量矩阵, $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 为前次状态量矩阵, $\phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵, $\tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1}$ 为约束修正后预测状态量矩阵, \mathbf{P}_{k-1} 为状态误差协方差矩阵, \mathbf{K}_k 为滤波增益矩阵, \mathbf{Z}_k 为观测量矩阵, \mathbf{H}_k 为观测系数矩阵, $\mathbf{P}_{k/k-1}$ 为一步预测状态误差协方差矩阵, \mathbf{R}_k 为观测噪声矩阵, \mathbf{Q}_k 为状态噪声矩阵, \mathbf{I} 为单位矩阵。

7. 根据权利要求6所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法, 其特征在于, 所述步骤S5利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 对纯惯导误差补偿方法如下:

$$L_i = L_i^l + \delta L_i^l$$

$$\lambda_i = \lambda_i^l + \delta \lambda_i^l$$

$$h_i = h_i^l + \delta h_i^l$$

式中, h_i^l 表示i节点惯导解算高度; L_i^l 表示i节点惯导解算纬度; λ_i^l 表示i节点惯导解算经度, δL_i^l 为i节点估计出的纬度误差, $\delta \lambda_i^l$ 为i节点估计出的经度误差, δh_i^l 为i节点估计出的高度误差。

8. 一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航系统, 其特征在于, 包括:

模块M1: 确定集群组网节点数量, 并测量各节点间的相对距离;

模块M2: 基于测量的各节点间的相对距离, 建立集群组网协同导航滤波方程;

模块M3: 设计集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件;

模块M4: 构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波;

模块M5: 利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值对纯惯导误差补偿。

9. 根据权利要求8所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航系统, 其特征在于, 所述模块M2中的集群组网协同导航滤波方程, 包括状态方程, 所述状态方程具体为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t) \mathbf{W}(t)$$

式中, $\mathbf{X}(t) = [\delta L_1^l, \delta \lambda_1^l, \delta h_1^l, \dots, \delta L_n^l, \delta \lambda_n^l, \delta h_n^l]$, $\delta L_i^l, \delta \lambda_i^l, \delta h_i^l (i = 1:n)$ 分别为集群中各个节点的地理坐标系下的三轴位置误差, n 为集群节点数量, $\mathbf{F}(t)$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{G}(t)$ 为系统噪声系数矩阵, $\mathbf{W}(t)$ 为系统噪声矩阵;

$$\text{其中, } F(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_n^i}{(R_M+h_i)^2} \\ \frac{V_e^i \sec L_i \tan L_i}{R_N+h_i} & 0 & -\frac{V_e^i \sec L_i}{(R_N+h_i)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,n;$$

式中, V_e^i 表示 i 节点东向速度; L_i 表示 i 节点纬度; h_i 表示 i 节点高度; R_N 表示地球卯酉圈曲率半径; R_M 表示地球子午圈曲率半径; V_n^i 表示 i 节点北向速度。

10. 根据权利要求6所述的基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航系统, 其特征在于, 所述模块M2中的集群组网协同导航滤波方程, 还包括测量方程, 所述测量方程具体为:

$$L(t) = HX(t) + \Delta$$

式中, $L(t)$ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测量矩阵, $n-1$ 为观测量数量, 即测距值数量, H 为 $(n-1) \times 3n$ 维观测系数矩阵, Δ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测噪声矩阵;

$$\text{其中, } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(j-2)} & \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-j)} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} & \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} \end{bmatrix} \mathbf{D}_a$$

$$L = \begin{bmatrix} \rho_{ij}^I - \rho_{ij}^m \\ \vdots \\ \rho_{in}^I - \rho_{in}^m \end{bmatrix}$$

式中, ρ_{ij}^m 为集群中节点 i 与节点 j 间的测量距离,

$\rho_{ij}^I = \sqrt{(x_i^I - x_j^I)^2 + (y_i^I - y_j^I)^2 + (z_i^I - z_j^I)^2}$ ($i, j = 1, \dots, n$ 且 $i \neq j$) 为节点 i 与节点 j 间惯导计算距离, L 随弹群节点 n 的数量变化实时变化。

基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及协同导航技术领域,具体地,涉及一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法及系统。

背景技术

[0002] 目前,惯性导航技术已经在航天、航空、无人驾驶、水下导航、室内定位等生活中各个场景广泛应用,成为一种常用的导航方式。

[0003] 公开号为CN110207691A的中国发明专利,公开了一种基于数据链测距的多无人车协同导航方法,利用数据链对无人车之间相对距离进行测量,进而通过多导航传感器信息融合方法对编队中每辆无人车节点的位置进行估计。无人车编队中每辆无人车节点搭载惯性导航系统、车辆里程计、数据链收发装置,首先通过卡尔曼滤波器对每辆无人车节点中的惯性导航系统、车辆里程计进行融合,得到每辆无人车节点的速度、位置、姿态信息;进而利用数据链测得的无人车之间的距离信息,通过等式约束对每辆无人车的位置估计结果进行优化。通过本方法能够提高无人车编队在卫星拒止条件下的导航定位精度。

[0004] 综上所述,在现有技术当中,协同导航时必须使用其它导航传感器辅助构建约束条件,如车辆里程计等,带来了额外的经济成本,且在许多场景使用受限。本发明在仅依靠每个载体自身所带惯性导航系统,利用数据链测距,通过设计几何约束条件,构建约束卡尔曼滤波,解决惯导系统存在长时误差快速发散,无法用于长时间导航的问题。

发明内容

[0005] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法及系统。

[0006] 根据本发明提供的一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法及系统,所述方案如下:

[0007] 第一方面,提供了一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法,所述方法包括:

[0008] 步骤S1:确定集群组网节点数量,并测量各节点间的相对距离;

[0009] 步骤S2:基于测量的各节点间的相对距离,建立集群组网协同导航滤波方程;

[0010] 步骤S3:设计集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件;

[0011] 步骤S4:构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波;

[0012] 步骤S5:利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值对纯惯导误差补偿。

[0013] 优选的,所述步骤S2中的集群组网协同导航滤波方程,包括状态方程,所述状态方程具体为:

[0014]
$$X(t) = F(t) X(t) + G(t) W(t)$$

[0015] 式中, $X(t) = [\delta L_1^t, \delta \lambda_1^t, \delta h_1^t, \dots, \delta L_n^t, \delta \lambda_n^t, \delta h_n^t]$, $\delta L_i^t, \delta \lambda_i^t, \delta h_i^t (i = 1:n)$ 分别为集群中

各个节点的地理坐标系下的三轴位置误差, n 为集群节点数量, $F(t)$ 为状态转移矩阵, $G(t)$ 为系统噪声系数矩阵, $W(t)$ 为系统噪声矩阵;

$$[0016] \quad \text{其中, } F(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_n \end{bmatrix},$$

$$[0017] \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_n^i}{(R_M+h_i)^2} \\ \frac{V_e^i \sec L_i \tan L_i}{R_N+h_i} & 0 & -\frac{V_e^i \sec L_i}{(R_N+h_i)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,n;$$

[0018] 式中, V_e^i 表示 i 节点东向速度; L_i 表示 i 节点纬度; h_i 表示 i 节点高度; R_N 表示地球卯西圈曲率半径; R_M 表示地球子午圈曲率半径; V_n^i 表示 i 节点北向速度。

[0019] 优选的, 所述步骤 S2 中的集群组网协同导航滤波方程, 还包括测量方程, 所述测量方程具体为:

$$[0020] \quad L(t) = HX(t) + \Delta$$

[0021] 式中, $L(t)$ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测量矩阵, $n-1$ 为观测量数量, 即测距值数量, H 为 $(n-1) \times 3n$ 维观测系数矩阵, Δ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测噪声矩阵;

[0022] 其中,

$$[0022] \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ -\frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(j-2)} & \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-j)} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ -\frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} & \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \end{bmatrix} \mathbf{D}_a$$

$$[0023] \quad L = \begin{bmatrix} \rho_{ij}^I - \rho_{ij}^m \\ \vdots \\ \rho_{in}^I - \rho_{in}^m \end{bmatrix}$$

[0024] 式中, ρ_{ij}^m 为集群中节点 i 与节点 j 间的测量距离,

$\rho_{ij}^I = \sqrt{(x_i^I - x_j^I)^2 + (y_i^I - y_j^I)^2 + (z_i^I - z_j^I)^2}$ ($i, j = 1, \dots, n$ 且 $i \neq j$) 为节点 i 与节点 j 间惯导计算距离, L 随弹群节点 n 的数量变化实时变化。

[0025] 优选的, 所述步骤 S3 中集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件, 其中, 约束条件包括:

$$[0026] \quad G^T P_x D_a X = 0$$

[0027] 式中, G^T 是由 $H^T P H$ 的零特征值对应的特征向量组成的 $6 \times 3n$ 维矩阵, P 为 L 的对角权

阵, H^T PH为L的对角权阵的正定矩阵; P_x 为根据各节点惯导系统精度水平确定的待估参数向量X的 $3n \times 3n$ 维权阵, n 为集群节点数量,

$$[0028] \quad P_x = \begin{bmatrix} (8000)^2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (8000)^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (8000)^2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & (8000)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & (8000)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & (8000)^2 \end{bmatrix}$$

[0029] 式中, $x_i^l, y_i^l, z_i^l (i=1:n)$ 为集群节点i在地心地固系下惯导位置, P_x 随集群节点n的数量变化实时变化。

[0030] 优选的, 所述步骤S3中集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件, 地理坐标系下纬经高误差转换至地心地固坐标系下XYZ三轴误差的转换矩阵为:

$$[0031] \quad d_{a_i} = \begin{bmatrix} -(Rn + h_i^l) \sin L_i^l \cos \lambda_i^l & -(Rn + h_i^l) \cos L_i^l \sin \lambda_i^l & \cos L_i^l \cos \lambda_i^l \\ -(Rn + h_i^l) \sin L_i^l \sin \lambda_i^l & (Rn + h_i^l) \cos L_i^l \cos \lambda_i^l & \cos L_i^l \sin \lambda_i^l \\ [Rn(1 - e^2) + h_i^l] \cos L_i^l & 0 & \sin L_i^l \end{bmatrix}$$

$$[0032] \quad D_a = \begin{bmatrix} d_{a_1} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & d_{a_i} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & d_{a_n} \end{bmatrix}$$

[0033] 式中, Rn 表示表示地球卯酉圈曲率半径; h_i^l 表示i节点惯导解算高度; L_i^l 表示i节点惯导解算纬度; λ_i^l 表示i节点惯导解算经度; e^2 表示地球曲率。

[0034] 优选的, 所述步骤S4采用投影法将约束条件投影至传统卡尔曼滤波, 构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波为如下:

[0035] 约束条件矩阵: $B_k = G^T P_x D_a$;

[0036] 状态一步预测: $\hat{X}_{k/k-1} = \phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}$;

[0037] 约束修正后状态一步预测: $\tilde{X}_{k/k-1} = \hat{X}_{k/k-1} - P_{k-1} B_k^T (B_k P_{k-1} B_k^T)^{-1} B_k \hat{X}_{k/k-1}$;

[0038] 状态估计: $\hat{X}_k = \tilde{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1})$;

[0039] 滤波增益: $K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$;

[0040] 一步预测均方误差: $P_{k/k-1} = \phi_{k,k-1} P_{k-1} \phi_{k,k-1}^T + Q_k$;

[0041] 估计均方误差： $P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}$ ；

[0042] 式中， B_k 为约束条件矩阵， $\hat{X}_{k/k-1}$ 为一步预测状态量矩阵， \hat{X}_{k-1} 为前次状态量矩阵， $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵， $\tilde{X}_{k/k-1}$ 为约束修正后预测状态量矩阵， P_{k-1} 为状态误差协方差矩阵， K_k 为滤波增益矩阵， Z_k 为观测量矩阵， H_k 为观测系数矩阵， $P_{k/k-1}$ 为一步预测状态误差协方差矩阵， R_k 为观测噪声矩阵， Q_k 为状态噪声矩阵， I 为单位矩阵。

[0043] 优选的，所述步骤S5利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值 \hat{X}_k 对纯惯导误差补偿方法如下：

[0044] $L_i = L_i^l + \delta L_i^l$

[0045] $\lambda_i = \lambda_i^l + \delta \lambda_i^l$

[0046] $h_i = h_i^l + \delta h_i^l$

[0047] 式中， h_i^l 表示i节点惯导解算高度； L_i^l 表示i节点惯导解算纬度； λ_i^l 表示i节点惯导解算经度， δL_i^l 为i节点估计出的纬度误差， $\delta \lambda_i^l$ 为i节点估计出的经度误差， δh_i^l 为i节点估计出的高度误差。

[0048] 第二方面，提供了一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航系统，所述系统包括：

[0049] 模块M1：确定集群组网节点数量，并测量各节点间的相对距离；

[0050] 模块M2：基于测量的各节点间的相对距离，建立集群组网协同导航滤波方程；

[0051] 模块M3：设计集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件；

[0052] 模块M4：构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波；

[0053] 模块M5：利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值对纯惯导误差补偿。

[0054] 优选的，所述模块M2中的集群组网协同导航滤波方程，包括状态方程，所述状态方程具体为：

[0055] $X(t) = F(t) X(t) + G(t) W(t)$

[0056] 式中， $X(t) = [\delta L_1^l, \delta \lambda_1^l, \delta h_1^l, \dots, \delta L_n^l, \delta \lambda_n^l, \delta h_n^l]$ ， $\delta L_i^l, \delta \lambda_i^l, \delta h_i^l (i = 1:n)$ 分别为集群中各个节点的地理坐标系下的三轴位置误差， n 为集群节点数量， $F(t)$ 为状态转移矩阵， $G(t)$ 为系统噪声系数矩阵， $W(t)$ 为系统噪声矩阵；

[0057] 其中， $F(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_n \end{bmatrix}$ ，

$$[0058] \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_n^i}{(R_M+h_i)^2} \\ \frac{V_e^i \sec L_i \tan L_i}{R_N+h_i} & 0 & -\frac{V_e^i \sec L_i}{(R_N+h_i)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,n;$$

[0059] 式中, V_e^i 表示 i 节点东向速度; L_i 表示 i 节点纬度; h_i 表示 i 节点高度; R_N 表示地球卯酉圈曲率半径; R_M 表示地球子午圈曲率半径; V_n^i 表示 i 节点北向速度。

[0060] 优选的, 所述模块 M2 中的集群组网协同导航滤波方程, 还包括测量方程, 所述测量方程具体为:

$$[0061] \quad L(t) = HX(t) + \Delta$$

[0062] 式中, $L(t)$ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测量矩阵, $n-1$ 为观测量数量, 即测距值数量, H 为 $(n-1) \times 3n$ 维观测系数矩阵, Δ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测噪声矩阵;

[0063] 其中,

$$[0064] \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(j-2)} & \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-j)} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-2)} & \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & \mathbf{0}_{1 \times 3(n-j)} \end{bmatrix} \mathbf{D}_a$$

$$L = \begin{bmatrix} \rho_{ij}^I - \rho_{ij}^m \\ \vdots \\ \rho_{in}^I - \rho_{in}^m \end{bmatrix}$$

[0065] 式中, ρ_{ij}^m 为集群中节点 i 与节点 j 间的测量距离,

$\rho_{ij}^I = \sqrt{(x_i^I - x_j^I)^2 + (y_i^I - y_j^I)^2 + (z_i^I - z_j^I)^2}$ ($i, j=1, \dots, n$ 且 $i \neq j$) 为节点 i 与节点 j 间惯导计算距离, L 随弹群节点 n 的数量变化实时变化。

[0066] 与现有技术相比, 本发明具有如下的有益效果:

[0067] 本发明不依赖其它导航设备, 仅利用集群中节点间组网测距, 并设计了组网几何约束条件, 基于约束条件构建状态方程和量测方程, 设计了新的卡尔曼滤波器, 实时递推估计出惯导误差对惯导系统进行修正, 抑制各个节点纯惯导误差发散。

附图说明

[0068] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述, 本发明的其它特征、目的和优点将会变得更加明显:

[0069] 图1为根据本发明实施例的一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法流程图;

[0070] 图2为约束卡尔曼滤波更新过程图。

具体实施方式

[0071] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变化和改进。这些都属于本发明的保护范围。

[0072] 本发明实施例提供了一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法,针对惯导误差长时累积问题,利用集群中节点间组网测距,并设计了组网约束条件,构建了约束卡尔曼滤波,估计出惯导误差,抑制纯惯导误差发散。方案如下:参照图1和图2所示,首先,确定集群组网节点数量,测量两节点间相对距离。

[0073] 在本发明实施例中,根据几何构型确定参与组网的节点,通过数据链、毫米波雷达等手段实现组网各个节点间距离测量,作为协同导航各个节点间的量测距离,用于测距组网。

[0074] 其次,建立集群组网协同导航滤波方程,包括状态方程和测量方程,其中,协同导航滤波状态方程:

$$[0075] \quad \dot{X}(t) = F(t) X(t) + G(t) W(t)$$

[0076] 式中, $X(t) = [\delta L_1^t, \delta \lambda_1^t, \delta h_1^t, \dots, \delta L_n^t, \delta \lambda_n^t, \delta h_n^t]$, $\delta L_i^t, \delta \lambda_i^t, \delta h_i^t (i = 1:n)$ 分别为集群中各个节点的地理坐标系下的三轴位置误差, n 为集群节点数量, $F(t)$ 为状态转移矩阵, $G(t)$ 为系统噪声系数矩阵, $W(t)$ 为系统噪声矩阵;

$$[0077] \quad \text{其中, } F(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_n \end{bmatrix},$$

$$[0078] \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{v_n^i}{(R_M + h_i)^2} \\ \frac{v_e^i \sec L_i \tan L_i}{R_N + h_i} & 0 & -\frac{v_e^i \sec L_i}{(R_N + h_i)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,n;$$

[0079] 式中, v_e^i 表示 i 节点东向速度; L_i 表示 i 节点纬度; h_i 表示 i 节点高度; R_N 表示地球卯酉圈曲率半径; R_M 表示地球子午圈曲率半径; v_n^i 表示 i 节点北向速度。

[0080] 协同导航滤波量测方程具体为:

$$[0081] \quad L(t) = HX(t) + \Delta$$

[0082] 式中, $L(t)$ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测量矩阵, $n-1$ 为观测量数量, 即测距值数量, H 为 $(n-1) \times 3n$ 维观测系数矩阵, Δ 是 $(n-1) \times 1$ 维观测噪声矩阵;

[0083] 其中,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & -\frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{x_i^I - x_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{y_i^I - y_1^I}{\rho_{i1}^I} & \frac{z_i^I - z_1^I}{\rho_{i1}^I} & 0_{1 \times 3(n-2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & -\frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & 0_{1 \times 3(j-2)} & \frac{x_i^I - x_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{y_i^I - y_j^I}{\rho_{ij}^I} & \frac{z_i^I - z_j^I}{\rho_{ij}^I} & 0_{1 \times 3(n-j)} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & -\frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & 0_{1 \times 3(n-2)} & \frac{x_i^I - x_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{y_i^I - y_n^I}{\rho_{in}^I} & \frac{z_i^I - z_n^I}{\rho_{in}^I} & 0_{1 \times 3(n-2)} \end{bmatrix} \mathbf{D}_a$$

$$[0084] \quad L = \begin{bmatrix} \rho_{ij}^I - \rho_{ij}^m \\ \vdots \\ \rho_{in}^I - \rho_{in}^m \end{bmatrix}$$

[0085] 式中, ρ_{ij}^m 为集群中节点i与节点j间的测量距离,

$\rho_{ij}^I = \sqrt{(x_i^I - x_j^I)^2 + (y_i^I - y_j^I)^2 + (z_i^I - z_j^I)^2}$ ($i, j=1, \dots, n$ 且 $i \neq j$) 为节点i与节点j间惯导计算距离, L随弹群节点n的数量变化实时变化。

[0086] 随后,再设计集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件。

[0087] 具体地,在本发明实施例中,集群组网各节点惯导位置误差加权和最小约束条件为:

$$[0088] \quad \mathbf{G}^T \mathbf{P}_x \mathbf{D}_a \mathbf{X} = 0$$

[0089] 式中, \mathbf{G}^T 是由 $\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H}$ 的零特征值对应的特征向量组成的 $6 \times 3n$ 维矩阵, \mathbf{P} 为 \mathbf{L} 的对角权阵, $\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H}$ 为 \mathbf{L} 的对角权阵的正定矩阵; \mathbf{P}_x 为根据各节点惯导系统精度水平确定的待估参数向量 \mathbf{X} 的 $3n \times 3n$ 维权阵, n 为集群节点数量,

$$[0090] \quad \mathbf{P}_x = \begin{bmatrix} (8000)^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (8000)^2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (8000)^2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & (8000)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & (8000)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & (8000)^2 \end{bmatrix}$$

[0091] 式中, x_i^I, y_i^I, z_i^I ($i=1:n$) 为集群节点i在地心地固系下惯导位置, \mathbf{P}_x 随集群节点n的数量变化实时变化。

[0092] 地理坐标系下纬经高误差转换至地心地固坐标系下XYZ三轴误差的转换矩阵为:

$$[0093] \quad d_{a_i} = \begin{bmatrix} -(Rn + h_i^I) \sin L_i^I \cos \lambda_i^I & -(Rn + h_i^I) \cos L_i^I \sin \lambda_i^I & \cos L_i^I \cos \lambda_i^I \\ -(Rn + h_i^I) \sin L_i^I \sin \lambda_i^I & (Rn + h_i^I) \cos L_i^I \cos \lambda_i^I & \cos L_i^I \sin \lambda_i^I \\ [Rn(1 - e^2) + h_i^I] \cos L_i^I & 0 & \sin L_i^I \end{bmatrix}$$

$$[0094] \quad \mathbf{D}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{a_1} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{d}_{a_i} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{d}_{a_n} \end{bmatrix}$$

[0095] 式中, R_n 表示地球卯酉圈曲率半径; h_i^l 表示i节点惯导解算高度; L_i^l 表示i节点惯导解算纬度; λ_i^l 表示i节点惯导解算经度; e^2 表示地球曲率。

[0096] 构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波。

[0097] 本发明实施例中,采用“投影法”将约束条件投影至传统卡尔曼滤波,构建集群组网协同导航的约束卡尔曼滤波为如下:

[0098] 约束条件矩阵: $\mathbf{B}_k = \mathbf{G}^T \mathbf{P}_x \mathbf{D}_a$;

[0099] 状态一步预测: $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$;

[0100] 约束修正后状态一步预测: $\tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{B}_k^T (\mathbf{B}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{B}_k^T)^{-1} \mathbf{B}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$;

[0101] 状态估计: $\hat{\mathbf{X}}_k = \tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1})$;

[0102] 滤波增益: $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$;

[0103] 一步预测均方误差: $\mathbf{P}_{k/k-1} = \phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \phi_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k$;

[0104] 估计均方误差: $\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}$;

[0105] 式中, \mathbf{B}_k 为约束条件矩阵, $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$ 为一步预测状态量矩阵, $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 为前次状态量矩阵, $\phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵, $\tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1}$ 为约束修正后预测状态量矩阵, \mathbf{P}_{k-1} 为状态误差协方差矩阵, \mathbf{K}_k 为滤波增益矩阵, \mathbf{Z}_k 为观测量矩阵, \mathbf{H}_k 为观测系数矩阵, $\mathbf{P}_{k/k-1}$ 为一步预测状态误差协方差矩阵, \mathbf{R}_k 为观测噪声矩阵, \mathbf{Q}_k 为状态噪声矩阵, \mathbf{I} 为单位矩阵。

[0106] 最后,利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值对纯惯导误差补偿。

[0107] 在本发明实施例中,利用约束卡尔曼滤波估计出的各节点惯导误差估计值 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 对纯惯导误差补偿方法如下:

[0108] $L_i = L_i^l + \delta L_i^l$

[0109] $\lambda_i = \lambda_i^l + \delta \lambda_i^l$

[0110] $h_i = h_i^l + \delta h_i^l$

[0111] 式中, h_i^l 表示i节点惯导解算高度; L_i^l 表示i节点惯导解算纬度; λ_i^l 表示i节点惯导解算经度, δL_i^l 为i节点估计出的纬度误差, $\delta \lambda_i^l$ 为i节点估计出的经度误差, δh_i^l 为i节点估计出的高度误差。

[0112] 本发明实施例提供了一种基于约束卡尔曼滤波的集群组网协同导航方法,不依赖其它导航设备,仅利用集群中节点间组网测距,并设计了组网约束条件,基于约束条件构建状态方程和量测方程,设计了新的卡尔曼滤波器,实时递推估计出惯导误差对惯导系统进行修正,抑制各个节点纯惯导误差发散,实现纯惯导高精度定位。

[0113] 本领域技术人员知道,除了以纯计算机可读程序代码方式实现本发明提供的系统及其各个装置、模块、单元以外,完全可以通过将方法步骤进行逻辑编程来使得本发明提供的系统及其各个装置、模块、单元以逻辑门、开关、专用集成电路、可编程逻辑控制器以及嵌入式微控制器等的形式来实现相同功能。所以,本发明提供的系统及其各项装置、模块、单元可以被认为是一种硬件部件,而对其内包括的用于实现各种功能的装置、模块、单元也可以视为硬件部件内的结构;也可以将用于实现各种功能的装置、模块、单元视为既可以是实现方法的软件模块又可以是硬件部件内的结构。

[0114] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变化或修改,这并不影响本发明的实质内容。在不冲突的情况下,本申请的实施例和实施例中的特征可以任意相互组合。

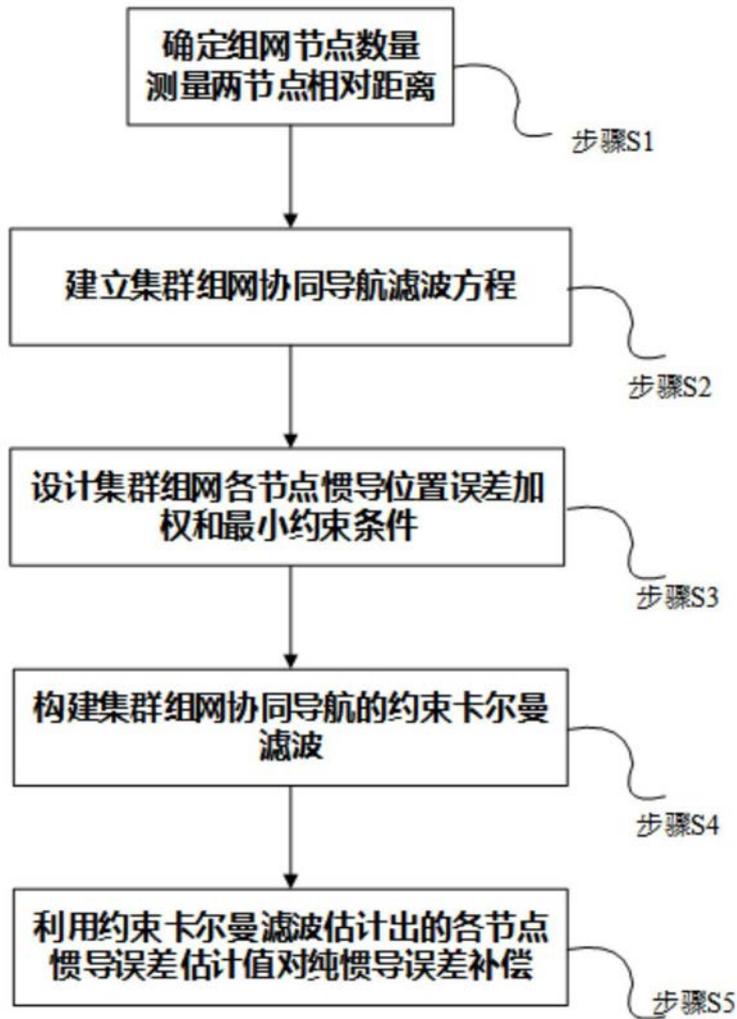


图1

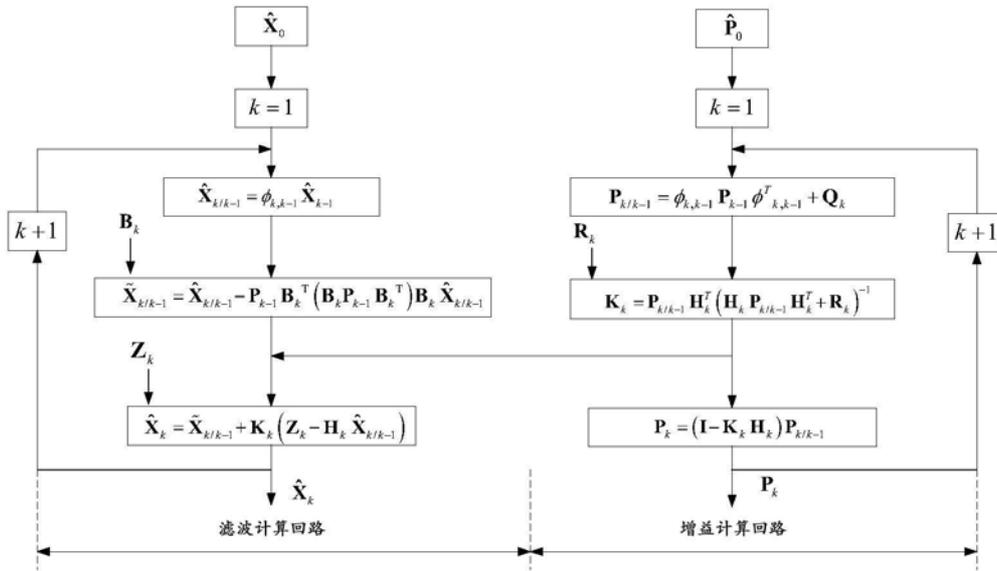


图2